

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΡΕΥΣΤΩΝ ΚΑΙ ΠΥΡΗΝΩΝ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΩΝ

**Μετρήσεις πυκνότητας αερίων υδρογονανθράκων με CO<sub>2</sub> σε υψηλές πιέσεις και  
θερμοκρασίες και μελέτη της ακρίβειας πρόρρησής τους με  
κυβικές καταστατικές εξισώσεις**

Διπλωματική Εργασία

Ιάσων Τσαγκάρης

Εξεταστική Επιτροπή

Ανδρέας Γιώτης, Επίκουρος Καθηγητής ( επιβλέπων )  
Νικόλαος Πασαδάκης, Καθηγητής  
Δημήτρης Μαρινάκης, Επίκουρος Καθηγητής

Χανιά  
Απρίλιος, 2024



## Ευχαριστίες

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Ανδρέα Γιώτη για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε, για την πολύτιμη καθοδήγησή του και τη συνεισφορά του στην υλοποίηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας μου.

Ένα πολύ μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στον επίκουρο καθηγητή κ. Δημήτρη Μαρινάκη, για την αμέριστη βοήθεια και στήριξη που μου προσέφερε απλόχερα, για την υπομονή και κατανόηση που επέδειξε καθώς και για τις γνώσεις που μου μεταλαμπάδεψε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης αυτής της εργασίας αλλά και κατά την διάρκεια των σπουδών μου.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τον καθηγητή κ. Νικόλαο Πασαδάκη για τη συμμετοχή του στην εξεταστική επιτροπή και για τον χρόνο που αφιέρωσε στη διόρθωση της εργασίας.

Την παρούσα διπλωματική εργασία την αφιερώνω στην οικογένεια μου ως ένδειξη ευγνωμοσύνης για όλα όσα μου προσέφεραν και συνεχίζουν να μου προσφέρουν, καθώς και για την αμέριστη συμπαράστασή τους.

Τσαγκάρης Ιάσων



## Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, μελετήθηκαν και αξιολογήθηκαν μέθοδοι πρόβλεψης της πυκνότητας των αερίων σε υψηλές πιέσεις και θερμοκρασίες. Συγκεκριμένα, πραγματοποιήθηκαν εργαστηριακές μετρήσεις πυκνοτήτων μιγμάτων αερίων υδρογονανθράκων με CO<sub>2</sub> σε υψηλές πιέσεις και θερμοκρασίες για τη μελέτη της ακρίβειας πρόρρησης με κυβικές καταστατικές εξισώσεις.

Αναπτύχθηκε εργαστηριακή διάταξη που περιελάμβανε πυκνόμετρο υψηλών πιέσεων και θερμοκρασιών. Το όργανο βαθμονομήθηκε κατάλληλα και χρησιμοποιήθηκε για την πειραματική μέτρηση των πυκνοτήτων μιγμάτων αερίων υδρογονανθράκων. Με τις μετρήσεις αυτές ελέγχθηκε η ακρίβεια των προβλέψεων της πυκνότητας των μιγμάτων αυτών με χρήση κυβικών καταστατικών εξισώσεων και στο τέλος διατυπώθηκαν συμπεράσματα σχετικά με τη δυνατότητα βελτίωσής της.

Τα μείγματα αερίων υδρογονανθράκων με CO<sub>2</sub> που χρησιμοποιήθηκαν στις εργαστηριακές μετρήσεις πυκνοτήτων είναι τα παρακάτω:

- 1) Μεθάνιο - Αιθάνιο - CO<sub>2</sub>
- 2) Μεθάνιο - Προπάνιο - CO<sub>2</sub>
- 3) Μεθάνιο - Βουτάνιο - CO<sub>2</sub>

Για κάθε μείγμα από τα παραπάνω διεξάχθηκαν μετρήσεις για τρεις διαφορετικές συγκεντρώσεις διοξειδίου του άνθρακα (0%, 30% και 60%) σε θερμοκρασίες 20°C, 60°C και 90°C και πιέσεις από 20 bar έως 520 bar.



## **Abstract**

In the present diploma thesis, laboratory measurements of densities of mixtures of hydrocarbon gas with CO<sub>2</sub> at high pressures and temperatures were performed to evaluate the accuracy of predictions with cubic equations.

A densitometer of high pressures and temperatures was appropriately calibrated and used for the experimental measurement of hydrocarbon gas mixture densities of various compositions over a range of pressure and temperature values. These measurements tested the accuracy of the density predictions of these mixtures using cubic equations.

The mixtures of gaseous hydrocarbons with CO<sub>2</sub> used in laboratory densities measurements are the following:

- 1) Methane - Ethane - CO<sub>2</sub>
- 2) Methane - Propane - CO<sub>2</sub>
- 3) Methane - Butane - CO<sub>2</sub>

For each mixture, measurements were carried out for three different proportions of carbon dioxide (0%, 30% and 60%) at temperatures of 20°C, 60°C and 90°C and pressures from 20 bar to 520 bar.



# Πίνακας περιεχομένων

<b>ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ .....</b>	<b>3</b>
<b>ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....</b>	<b>5</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>7</b>
<b>ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ.....</b>	<b>12</b>
<b>ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ.....</b>	<b>21</b>
<b>1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ΠΑΓΚΟΣΜΙΑ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ - ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΑΙ ΓΕΓΟΝΟΤΑ .....	1
1.1.1 Αποθέματα .....	1
1.1.2 Παραγωγή .....	3
1.1.3 Κατανάλωση .....	4
1.2 ΠΑΓΚΟΣΜΙΑ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ - ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΑΙ ΓΕΓΟΝΟΤΑ.....	6
1.2.1 Αποθέματα .....	6
1.2.2 Παραγωγή .....	8
1.2.3 Κατανάλωση .....	9
<b>2 ΟΡΥΚΤΑ ΚΑΥΣΙΜΑ .....</b>	<b>11</b>
2.1 ΠΕΤΡΕΛΑΙΟ .....	11
2.1.1 Προέλευση πετρελαίου .....	11
2.1.2 Δημιουργία ταμιευτήρων .....	11
2.1.3 Εντοπισμός ταμιευτήρων .....	12
2.1.4 Παραγωγή πετρελαίου .....	14
2.1.5 Σύσταση πετρελαίου .....	17
2.1.6 Συστηματική ταξινόμηση των πετρελαίων.....	18
2.2 ΦΥΣΙΚΟ ΑΕΡΙΟ.....	18
2.2.1 Προέλευση φυσικού αερίου.....	19
2.2.2 Ιδιότητες φυσικού αερίου.....	20
<b>3 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΚΑΙ ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΙΣ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ.....</b>	<b>21</b>
3.1 ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ .....	21
3.1.1 Καταστατικές εξισώσεις .....	21
3.1.2 Εξίσωση Alani-Kennedy .....	22
3.1.3 Μέθοδος Standing-Katz .....	23
3.1.4 Μέθοδος Αμερικανικού Ινστιτούτου Πετρελαίου .....	27
3.1.5 Άλλες Μέθοδοι.....	28
3.2 ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ .....	28
3.3 ΦΥΣΙΚΟΧΗΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΡΕΥΣΤΩΝ .....	30
<b>4 ΚΥΒΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΕΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ .....</b>	<b>31</b>
4.1 ΕΞΙΣΩΣΗ VAN DER WAALS .....	31
4.2 ΕΞΙΣΩΣΗ REDLICH-KWONG .....	34
4.3 ΕΞΙΣΩΣΗ SOAVE-REDLICH-KWONG (SRK) .....	36
4.4 ΕΞΙΣΩΣΗ PENG-ROBINSON (PR) .....	39
4.5 ΔΙΟΡΘΩΣΗ ΟΓΚΟΥ PÉNELOUX .....	40
4.6 ΆΛΛΕΣ ΚΥΒΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΕΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ .....	44

4.8 ΜΗ ΚΛΑΣΣΙΚΟΙ ΚΑΝΟΝΕΣ ΑΝΑΜΕΙΞΗΣ.....	45
4.9 ΆΛΛΕΣ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΕΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ.....	45
4.10 ΚΑΝΟΝΕΣ ΑΝΑΜΕΙΞΗΣ ΓΙΑ ΤΙΣ ΚΥΒΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΕΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ.....	46
4.11 ΡΥΘΜΙΣΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΩΝ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ.....	46
4.12 ΕΥΡΕΣΗ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗΣ ΜΕΣΩ ΤΩΝ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΩΝ.....	47
4.13 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ.....	48
<b>5 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΑΙ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ.....</b>	<b>50</b>
5.1 ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΟΣ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ.....	50
5.1.1 Εργαστηριακός κλίβανος.....	51
5.1.2 Αντλίες ISCO.....	52
5.1.3 Αυτόκλειστος εμβολοφόρος κύλινδρος υψηλής πίεσης.....	53
5.1.4 Μανόμετρο ακριβείας.....	55
5.1.5 Πυκνόμετρο.....	55
5.1.6 Σύνδεσμοι-σωληνώσεις.....	56
5.1.7 Βαλβίδες.....	57
5.1.8 Φιάλες φόρτωσης αερίων – μανοεκτονωτής.....	58
5.2 ΜΕΤΡΑ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΓΙΑ ΤΗ ΔΙΕΞΑΓΩΓΗ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ.....	58
5.3 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ, ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΚΑΙ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ.....	58
5.3.1 Πλήρωση αντλιών με νερό.....	59
5.3.2 Πλήρωση θαλάμου αυτοκλείστου με νερό.....	59
5.3.3 Πλήρωση αυτοκλείστου άνωθεν και κάτωθεν με νερό.....	59
5.3.4 Δοκιμή πίεσης (pressure test).....	59
5.3.5 Αποστράγγιση νερού.....	60
5.4 ΠΙΘΑΝΕΣ ΑΣΤΟΧΙΕΣ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ.....	60
5.5 ΦΟΡΤΩΣΗ ΑΕΡΙΩΝ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΩΝ ΚΑΙ ΔΙΟΞΕΙΔΙΟΥ ΤΟΥ ΑΝΘΡΑΚΑ.....	60
5.6 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ ΑΕΡΙΩΝ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΩΝ.....	61
<b>6 ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ.....</b>	<b>62</b>
6.1 ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΜΑΝΟΜΕΤΡΩΝ ΑΝΤΛΙΩΝ.....	62
6.2 ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ ΠΥΚΝΟΜΕΤΡΟΥ.....	65
6.2.1 Μετατροπή περιόδου ταλάντωσης σε πυκνότητα.....	65
6.2.2 Πειραματικές μετρήσεις συστατικών.....	66
6.2.3 Παράμετροι της εξίσωσης μετατροπής περιόδου ταλάντωσης σε πυκνότητα.....	66
6.3 ΈΛΕΓΧΟΣ ΑΞΙΟΠΙΣΤΙΑΣ ΠΥΚΝΟΜΕΤΡΟΥ.....	69
6.4 ΕΠΑΝΑΛΗΨΙΜΟΤΗΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ.....	74
6.4 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ.....	75
<b>7 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....</b>	<b>81</b>
7.1 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΜΕΙΓΜΑΤΩΝ.....	81
7.2 ΑΝΑΛΥΤΙΚΟΣ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΣΥΣΤΑΣΗΣ ΑΕΡΙΩΝ ΔΕΙΓΜΑΤΩΝ.....	82
7.3 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑΣ.....	84
7.4 ΜΕΘΑΝΙΟ-ΑΙΘΑΝΙΟ-CO <sub>2</sub> .....	85
7.4.1 Μεθάνιο 39,33% - Αιθάνιο 60,67% - CO <sub>2</sub> 0%.....	85
7.4.2 Μεθάνιο 28,30% - Αιθάνιο 45,80% - CO <sub>2</sub> 25,90%.....	88
7.4.3 Μεθάνιο 13,60% - Αιθάνιο 20,00% - CO <sub>2</sub> 66,40%.....	90
7.4.4 Φάκελοι φάσεων.....	92
7.5 ΜΕΘΑΝΙΟ-ΠΡΟΠΑΝΙΟ-CO <sub>2</sub> .....	94
7.5.1 Μεθάνιο 41,40% - Προπάνιο 58,60% - CO <sub>2</sub> 0%.....	95
7.5.2 Μεθάνιο 34,40% - Προπάνιο 47,10% - CO <sub>2</sub> 18,60%.....	96
7.5.3 Μεθάνιο 12,50% - Προπάνιο 18,30% - CO <sub>2</sub> 69,20%.....	98

7.5.4 Φάκελοι φάσεων .....	100
7.6 ΜΕΘΑΝΙΟ-ΒΟΥΤΑΝΙΟ-CO <sub>2</sub> .....	103
7.6.1 Μεθάνιο 58,17% - Βουτάνιο 41,83% - CO <sub>2</sub> 0% .....	103
7.6.2 Μεθάνιο 36,30% - Βουτάνιο 26,10% - CO <sub>2</sub> 37,60% .....	104
7.6.3 Μεθάνιο 25,60% - Βουτάνιο 9,30% - CO <sub>2</sub> 65% .....	106
7.6.4 Φάκελοι φάσεων .....	108
<b>8 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....</b>	<b>111</b>
<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>113</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.....</b>	<b>114</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β.....</b>	<b>120</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ.....</b>	<b>139</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ.....</b>	<b>157</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ε.....</b>	<b>163</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ζ.....</b>	<b>169</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Η.....</b>	<b>184</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Θ.....</b>	<b>211</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι.....</b>	<b>250</b>

## Κατάλογος Σχημάτων

<b>Σχήμα 1.1:</b> Αποδεδειγμένα αποθέματα πετρελαίου παγκοσμίως από το 1980 έως το 2020.....	2
<b>Σχήμα 1.2:</b> Παραγωγή πετρελαίου παγκοσμίως από το 1967 έως το 2022.....	3
<b>Σχήμα 1.3:</b> Κατανάλωση πετρελαίου παγκοσμίως από το 1967 έως το 2022.....	5
<b>Σχήμα 1.4:</b> Αποδεδειγμένα αποθέματα φυσικού αερίου παγκοσμίως από το 1980 έως το 2020.....	7
<b>Σχήμα 1.5:</b> Παραγωγή φυσικού αερίου παγκοσμίως από το 1970 έως το 2020.....	8
<b>Σχήμα 1.6:</b> Κατανάλωση φυσικού αερίου παγκοσμίως από το 1967 έως το 2022.....	9
<b>Σχήμα 2.1:</b> Δομή διαφορετικών τύπων παγίδων πετρελαίου και αερίου.....	12
<b>Σχήμα 2.2:</b> Μέθοδοι δευτερογενούς παραγωγής.....	15
<b>Σχήμα 2.3:</b> Μέθοδος τριτογενούς παραγωγής.....	15
<b>Σχήμα 2.4:</b> Διάγραμμα ταξινόμησης των πετρελαίων.....	18
<b>Σχήμα 2.5:</b> Σχηματική παράσταση ταμιευτήρα φυσικού αερίου.....	19
<b>Σχήμα 4.1:</b> Καμπύλη PV για καθαρό συστατικό.....	32
<b>Σχήμα 4.2:</b> Αλληλεπίδραση μεταξύ δύο στοιχείων όγκου σε ένα δοχείο γεμάτο με αέριο.....	33
<b>Σχήμα 4.3:</b> Καμπύλες PV για μεθάνιο σε $T_1 = 248\text{ K}$ ( $>T_c$ ), $T_2 = 190,6\text{ K}$ ( $=T_c$ ) και $T_3 = 162\text{ K}$ ( $<T_c$ ) που υπολογίζονται από την εξίσωση van der Waals. Η διακεκομμένη γραμμή δείχνει τη θέση της τάσης ατμών στο $T = T_3$ .....	34
<b>Σχήμα 4.4:</b> Σχέση μεταξύ $(a/a_c)^{0.5}$ και $(T/T_c)^{0.5}$ που παρατηρήθηκε από τον Soave (1972).....	37
<b>Σχήμα 4.5:</b> Πειραματικές και υπολογισμένες πυκνότητες κορεσμένων υγρών. (Προσαρμοσμένο από το American Petroleum Institute, Technical Data Book — Petroleum Refining, API, Νέα Υόρκη, 1982).....	42
<b>Σχήμα 4.6:</b> Μοριακός όγκος n-εξανίου στους $15^\circ\text{C}$ υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας την εξίσωση SRK και την εξίσωση SRK– Péneloux. Η παράμετρος μετατόπισης όγκου έχει ρυθμιστεί σε μοριακό όγκο $130\text{ cm}^3$ στο $1\text{ bar}$ .....	43
<b>Σχήμα 5.1:</b> Πειραματική διάταξη.....	51
<b>Σχήμα 5.2:</b> Εργαστηριακός κλίβανος (θερμοθάλαμος).....	51
<b>Σχήμα 5.3:</b> Θερμόμετρο ακριβείας, οθόνη ακριβείας (αριστερά) και αισθητήρας (δεξιά).....	52
<b>Σχήμα 5.4:</b> Οι δύο αντλίες εισπίεσης νερού, Teledyne Isco 500D (αριστερά) και Teledyne Isco 260D (δεξιά).....	52
<b>Σχήμα 5.5:</b> Τομή εμβολοφόρου κυλίνδρου.....	54
<b>Σχήμα 5.6:</b> Το αυτόκλειστο κελί εντός του θερμοθαλάμου.....	54
<b>Σχήμα 5.7:</b> Πυκνόμετρο Anton Paar.....	55
<b>Σχήμα 5.8:</b> Εσωτερική μονάδα πυκνόμετρου τοποθετημένη μέσα στο θερμοθάλαμο (αριστερά) και Εξωτερική μονάδα συλλογής μετρήσεων (δεξιά).....	55
<b>Σχήμα 5.9:</b> Πυκνόμετρο τοποθετημένο στις βάσεις απορρόφησης κραδασμών.....	56
<b>Σχήμα 5.10:</b> Σύνδεσμοι υψηλών πιέσεων Autoclave, Nova, Swagelok.....	57
<b>Σχήμα 5.11:</b> Βαλβίδες Autoclave Engineers (αριστερά) και Nova Swiss (δεξιά).....	57
<b>Σχήμα 5.12:</b> O-ring με τα αντίστοιχα καπάκια.....	60
<b>Σχήμα 5.13:</b> Φόρτωση αερίου στην πειραματική διάταξη.....	61
<b>Σχήμα 6.1:</b> Βαθμονόμηση μανομέτρου αντλίας 1.....	63
<b>Σχήμα 6.2:</b> Βαθμονόμηση μανομέτρου αντλίας 2.....	64
<b>Σχήμα 6.3 :</b> Παρεμβολή ονομαστικών τιμών πυκνότητας μεθανίου από βιβλιογραφία, για μέγιστη θερμοκρασία $100^\circ\text{C}$ (άνω) και για μέγιστη πίεση $600\text{ bar}$ (κάτω).....	71

<b>Σχήμα 6.4 :</b> Παρεμβολή ονομαστικών τιμών πυκνότητας αιθανίου από βιβλιογραφία, για μέγιστη θερμοκρασία 100°C (άνω) και για μέγιστη πίεση 600 bar (κάτω).....	72
<b>Σχήμα 6.5 :</b> Παρεμβολή ονομαστικών τιμών πυκνότητας προπανίου από βιβλιογραφία, για μέγιστη θερμοκρασία 100°C (άνω) και για μέγιστη πίεση 600 bar (κάτω).....	73
<b>Σχήμα 6.6 :</b> Επαναληψιμότητα μετρήσεων για το μεθάνιο στους 22 °C, 50 °C και 90 °C με Pmax= 77,763 bar.....	74
<b>Σχήμα 6.7 :</b> Επαναληψιμότητα μετρήσεων για το αιθάνιο στους 50 °C, 70 °C και 90 °C με Pmax= 493,563 bar.....	75
<b>Σχήμα 6.10 :</b> Γραφική απεικόνιση απόκλισης εξίσωσης και πειραματικής αβεβαιότητας πυκνότητας από τις βιβλιογραφικές τιμές στους 21,50 °C.....	76
<b>Σχήμα 6.11 :</b> Γραφική απεικόνιση απόκλισης εξίσωσης και πειραματικής αβεβαιότητας πυκνότητας από τις βιβλιογραφικές τιμές στους 50 °C.....	77
<b>Σχήμα 6.12 :</b> Γραφική απεικόνιση απόκλισης εξίσωσης και πειραματικής αβεβαιότητας πυκνότητας από τις βιβλιογραφικές τιμές στους 90 °C.....	77
<b>Σχήμα 6.13 :</b> Γραφική απεικόνιση απόκλισης εξίσωσης και πειραματικής αβεβαιότητας πυκνότητας από τις βιβλιογραφικές τιμές στους 50 °C.....	78
<b>Σχήμα 6.14 :</b> Γραφική απεικόνιση απόκλισης εξίσωσης και πειραματικής αβεβαιότητας πυκνότητας από τις βιβλιογραφικές τιμές στους 70 °C.....	79
<b>Σχήμα 6.15 :</b> Γραφική απεικόνιση απόκλισης εξίσωσης και πειραματικής αβεβαιότητας πυκνότητας από τις βιβλιογραφικές τιμές στους 90 °C.....	79
<b>Σχήμα 7.1:</b> Χρωματογράφημα δείγματος Α (στήλη HP-Plot Q).....	82
<b>Σχήμα 7.2:</b> Χρωματογράφημα δείγματος Β (στήλη HP-Plot Q).....	82
<b>Σχήμα 7.3:</b> Χρωματογράφημα δείγματος C (στήλη HP-Plot Q).....	83
<b>Σχήμα 7.4:</b> Χρωματογράφημα δείγματος D (στήλη HP-Plot Q).....	83
<b>Σχήμα 7.5:</b> Χρωματογράφημα δείγματος F (στήλη HP-Plot Q).....	83
<b>Σχήμα 7.6:</b> Χρωματογράφημα δείγματος G (στήλη HP-Plot Q).....	84
<b>Σχήμα 7.7:</b> Διάγραμμα πυκνοτήτων για το μείγμα Μεθάνιο 39,33% - Αιθάνιο 60,67% - CO <sub>2</sub> 0% στους 22°C.....	85
<b>Σχήμα 7.8:</b> Διάγραμμα απόλυτης απόκλισης πυκνοτήτων προσομοιωτή με τις πειραματικές πυκνότητες, για το μείγμα Μεθάνιο 39,33% - Αιθάνιο 60,67% - CO <sub>2</sub> 0% στους 22°C.....	86
<b>Σχήμα 7.9:</b> Διάγραμμα απόκλισης % πυκνοτήτων προσομοιωτή με τις πειραματικές πυκνότητες, για το μείγμα Μεθάνιο 39,33% - Αιθάνιο 60,67% - CO <sub>2</sub> 0% στους 22°C.....	86
<b>Σχήμα 7.10:</b> Διάγραμμα φακέλων φάσεων μειγμάτων μεθανίου-αιθανίου-CO <sub>2</sub> σε τρεις διαφορετικές συστάσεις πριν το regression στους 22°C.....	92
<b>Σχήμα 7.11:</b> Διάγραμμα φακέλων φάσεων μειγμάτων μεθανίου-αιθανίου-CO <sub>2</sub> σε δύο διαφορετικές συστάσεις μετά το regression στους 22°C.....	92
<b>Σχήμα 7.12:</b> Διάγραμμα φακέλων φάσεων μειγμάτων μεθανίου-αιθανίου-CO <sub>2</sub> σε τρεις διαφορετικές συστάσεις πριν το regression στους 50°C.....	93
<b>Σχήμα 7.13:</b> Διάγραμμα φακέλων φάσεων μειγμάτων μεθανίου-αιθανίου-CO <sub>2</sub> σε τρεις διαφορετικές συστάσεις μετά το regression στους 50°C.....	93
<b>Σχήμα 7.14:</b> Διάγραμμα φακέλων φάσεων μειγμάτων μεθανίου-αιθανίου-CO <sub>2</sub> σε τρεις διαφορετικές συστάσεις πριν το regression στους 90°C.....	94
<b>Σχήμα 7.15:</b> Διάγραμμα φακέλων φάσεων μειγμάτων μεθανίου-αιθανίου-CO <sub>2</sub> σε τρεις διαφορετικές συστάσεις μετά το regression στους 90°C.....	94
<b>Σχήμα 7.16:</b> Διάγραμμα φακέλων φάσεων μειγμάτων μεθανίου-προπανίου-CO <sub>2</sub> σε τρεις διαφορετικές συστάσεις πριν το regression στους 27°C.....	100
<b>Σχήμα 7.17:</b> Διάγραμμα φακέλων φάσεων μειγμάτων μεθανίου-προπανίου-CO <sub>2</sub> σε τρεις διαφορετικές συστάσεις μετά το regression στους 27°C.....	100

<b>Σχήμα 7.18:</b> Διάγραμμα φακέλων φάσεων μειγμάτων μεθανίου-προπανίου-CO <sub>2</sub> σε τρεις διαφορετικές συστάσεις πριν το regression στους 50°C.....	101
<b>Σχήμα 7.19:</b> Διάγραμμα φακέλων φάσεων μειγμάτων μεθανίου-προπανίου-CO <sub>2</sub> σε τρεις διαφορετικές συστάσεις μετά το regression στους 50°C.....	101
<b>Σχήμα 7.20:</b> Διάγραμμα φακέλων φάσεων μειγμάτων μεθανίου-προπανίου-CO <sub>2</sub> σε τρεις διαφορετικές συστάσεις πριν το regression στους 90°C.....	102
<b>Σχήμα 7.21:</b> Διάγραμμα φακέλων φάσεων μειγμάτων μεθανίου-προπανίου-CO <sub>2</sub> σε τρεις διαφορετικές συστάσεις μετά το regression στους 90°C.....	102
<b>Σχήμα 7.22:</b> Διάγραμμα φακέλων φάσεων μειγμάτων μεθανίου-βουτανίου-CO <sub>2</sub> σε τρεις διαφορετικές συστάσεις πριν το regression στους 29°C.....	108
<b>Σχήμα 7.23:</b> Διάγραμμα φακέλων φάσεων μειγμάτων μεθανίου-βουτανίου-CO <sub>2</sub> σε τρεις διαφορετικές συστάσεις μετά το regression στους 29°C.....	108
<b>Σχήμα 7.24:</b> Διάγραμμα φακέλων φάσεων μειγμάτων μεθανίου-βουτανίου-CO <sub>2</sub> σε τρεις διαφορετικές συστάσεις πριν το regression στους 50°C.....	109
<b>Σχήμα 7.25:</b> Διάγραμμα φακέλων φάσεων μειγμάτων μεθανίου-βουτανίου-CO <sub>2</sub> σε τρεις διαφορετικές συστάσεις μετά το regression στους 50°C.....	109
<b>Σχήμα 7.26:</b> Διάγραμμα φακέλων φάσεων μειγμάτων μεθανίου-βουτανίου-CO <sub>2</sub> σε τρεις διαφορετικές συστάσεις πριν το regression στους 90°C.....	110
<b>Σχήμα 7.27:</b> Διάγραμμα φακέλων φάσεων μειγμάτων μεθανίου-βουτανίου-CO <sub>2</sub> σε δύο διαφορετικές συστάσεις μετά το regression στους 90°C.....	110
<b>Σχήμα B.1:</b> Γραφική απεικόνιση αποκλίσεων εξίσωσης κατασκευαστή για το μεθάνιο στους 22°C.....	121
<b>Σχήμα B.2:</b> Γραφική απεικόνιση απόλυτων αποκλίσεων εξίσωσης κατασκευαστή για το μεθάνιο στους 22°C.....	121
<b>Σχήμα B.3:</b> Γραφική απεικόνιση σχετικών αποκλίσεων εξίσωσης κατασκευαστή για το μεθάνιο στους 22°C.....	122
<b>Σχήμα B.4:</b> Γραφική απεικόνιση αποκλίσεων εξίσωσης κατασκευαστή για το μεθάνιο στους 50°C.....	123
<b>Σχήμα B.5:</b> Γραφική απεικόνιση απόλυτων αποκλίσεων εξίσωσης κατασκευαστή για το μεθάνιο στους 50°C.....	123
<b>Σχήμα B.6:</b> Γραφική απεικόνιση σχετικών αποκλίσεων εξίσωσης κατασκευαστή για το μεθάνιο στους 50°C.....	124
<b>Σχήμα B.7:</b> Γραφική απεικόνιση αποκλίσεων εξίσωσης κατασκευαστή για το μεθάνιο στους 90°C.....	125
<b>Σχήμα B.8:</b> Γραφική απεικόνιση απόλυτων αποκλίσεων εξίσωσης κατασκευαστή για το μεθάνιο στους 90°C.....	125
<b>Σχήμα B.9:</b> Γραφική απεικόνιση σχετικών αποκλίσεων εξίσωσης κατασκευαστή για το μεθάνιο στους 90°C.....	126
<b>Σχήμα B.10:</b> Γραφική απεικόνιση αποκλίσεων εξίσωσης κατασκευαστή για το αιθάνιο στους 50°C.....	128
<b>Σχήμα B.11:</b> Γραφική απεικόνιση απόλυτων αποκλίσεων εξίσωσης κατασκευαστή για το αιθάνιο στους 50°C.....	128
<b>Σχήμα B.12:</b> Γραφική απεικόνιση σχετικών αποκλίσεων εξίσωσης κατασκευαστή για το αιθάνιο στους 50°C.....	129
<b>Σχήμα B.13:</b> Γραφική απεικόνιση αποκλίσεων εξίσωσης κατασκευαστή για το αιθάνιο στους 70°C.....	131
<b>Σχήμα B.14:</b> Γραφική απεικόνιση απόλυτων αποκλίσεων εξίσωσης κατασκευαστή για το αιθάνιο στους 70°C.....	131

[illegible]

<b>Σχήμα Γ.15:</b> Γραφική απεικόνιση σχετικών αποκλίσεων εξίσωσης κατασκευαστή (6.10) για το αιθάνιο στους 70°C.....	150
<b>Σχήμα Γ.16:</b> Γραφική απεικόνιση αποκλίσεων εξίσωσης κατασκευαστή (6.10) για το αιθάνιο στους 90°C.....	152
<b>Σχήμα Γ.17:</b> Γραφική απεικόνιση απόλυτων αποκλίσεων εξίσωσης κατασκευαστή (6.10) για το αιθάνιο στους 90°C.....	152
<b>Σχήμα Γ.18:</b> Γραφική απεικόνιση σχετικών αποκλίσεων εξίσωσης κατασκευαστή (6.10) για το αιθάνιο στους 90°C.....	153
<b>Σχήμα Γ.19:</b> Γραφική απεικόνιση απόλυτων αποκλίσεων εξίσωσης κατασκευαστή (6.10) για το μεθάνιο και το αιθάνιο σε διαφορετικές θερμοκρασίες και πιέσεις.....	154
<b>Σχήμα Γ.20:</b> Γραφική απεικόνιση απόλυτων αποκλίσεων εξίσωσης κατασκευαστή (6.10) για το μεθάνιο και το αιθάνιο στους 50 °C.....	154
<b>Σχήμα Γ.21:</b> Γραφική απεικόνιση απόλυτων αποκλίσεων εξίσωσης κατασκευαστή (6.10) για το μεθάνιο και το αιθάνιο στους 90 °C.....	155
<b>Σχήμα Γ.22:</b> Γραφική απεικόνιση σχετικών αποκλίσεων εξίσωσης κατασκευαστή (6.10) για το μεθάνιο και το αιθάνιο σε διαφορετικές θερμοκρασίες και πιέσεις.....	155
<b>Σχήμα Γ.23:</b> Γραφική απεικόνιση σχετικών αποκλίσεων εξίσωσης κατασκευαστή (6.10) για το μεθάνιο και το αιθάνιο στους 50 °C.....	156
<b>Σχήμα Γ.24:</b> Γραφική απεικόνιση σχετικών αποκλίσεων εξίσωσης κατασκευαστή (6.10) για το μεθάνιο και το αιθάνιο στους 90 °C.....	156
<b>Σχήμα Δ.1 :</b> Σχετική απόκλιση εξίσωσης (6.9) και εξίσωσης (6.10) στους 22°C.....	157
<b>Σχήμα Δ.2 :</b> Σχετική απόκλιση εξίσωσης (6.9) και εξίσωσης (6.10) στους 50°C.....	157
<b>Σχήμα Δ.3 :</b> Σχετική απόκλιση εξίσωσης (6.9) και εξίσωσης (6.10) στους 90°C.....	158
<b>Σχήμα Δ.4 :</b> Απόλυτη απόκλιση εξίσωσης (6.9) και εξίσωσης (6.10) στους 22°C.....	158
<b>Σχήμα Δ.5 :</b> Απόλυτη απόκλιση εξίσωσης (6.9) και εξίσωσης (6.10) στους 50°C.....	159
<b>Σχήμα Δ.6 :</b> Απόλυτη απόκλιση εξίσωσης (6.9) και εξίσωσης (6.10) στους 90°C.....	159
<b>Σχήμα Δ.7 :</b> Σχετική απόκλιση εξίσωσης (6.9) και εξίσωσης (6.10) στους 50°C.....	160
<b>Σχήμα Δ.8 :</b> Σχετική απόκλιση εξίσωσης (6.9) και εξίσωσης (6.10) στους 70°C.....	160
<b>Σχήμα Δ.9 :</b> Σχετική απόκλιση εξίσωσης (6.9) και εξίσωσης (6.10) στους 90°C.....	161
<b>Σχήμα Δ.10 :</b> Απόλυτη απόκλιση εξίσωσης (6.9) και εξίσωσης (6.10) στους 50°C.....	161
<b>Σχήμα Δ.11 :</b> Απόλυτη απόκλιση εξίσωσης (6.9) και εξίσωσης (6.10) στους 70°C.....	162
<b>Σχήμα Δ.12 :</b> Απόλυτη απόκλιση εξίσωσης (6.9) και εξίσωσης (6.10) στους 90°C.....	162
<b>Σχήμα Ε.1 :</b> Σχετική απόκλιση εξίσωσης (6.10) για δύο μετρήσεις στους 22 °C για το μεθάνιο.....	163
<b>Σχήμα Ε.2 :</b> Σχετική απόκλιση εξίσωσης (6.10) για δύο μετρήσεις στους 50 °C για το μεθάνιο.....	163
<b>Σχήμα Ε.3 :</b> Σχετική απόκλιση εξίσωσης (6.10) για δύο μετρήσεις στους 90 °C για το μεθάνιο.....	164
<b>Σχήμα Ε.4 :</b> Απόλυτη απόκλιση εξίσωσης (6.10) για δύο μετρήσεις στους 22 °C για το μεθάνιο.....	164
<b>Σχήμα Ε.5 :</b> Απόλυτη απόκλιση εξίσωσης (6.10) για δύο μετρήσεις στους 50 °C για το μεθάνιο.....	165
<b>Σχήμα Ε.6 :</b> Απόλυτη απόκλιση εξίσωσης (6.10) για δύο μετρήσεις στους 90 °C για το μεθάνιο.....	165
<b>Σχήμα Ε.7 :</b> Σχετική απόκλιση εξίσωσης (6.10) για δύο μετρήσεις στους 50 °C για το αιθάνιο.....	166
<b>Σχήμα Ε.8 :</b> Σχετική απόκλιση εξίσωσης (6.10) για δύο μετρήσεις στους 70 °C για το αιθάνιο.....	166

[illegible]

[illegible]

[illegible]

<b>Σχήμα Θ.71:</b> Διάγραμμα απόλυτης απόκλισης πυκνοτήτων προσομοιωτή με τις πειραματικές πυκνότητες, για το μείγμα Μεθάνιο 25,60% - Βουτάνιο 9,30% - CO <sub>2</sub> 65% στους 30°C.....	246
<b>Σχήμα Θ.72:</b> Διάγραμμα απόκλισης % πυκνοτήτων προσομοιωτή με τις πειραματικές πυκνότητες, για το μείγμα Μεθάνιο 25,60% - Βουτάνιο 9,30% - CO <sub>2</sub> 65% στους 30°C.....	246
<b>Σχήμα Θ.73:</b> Διάγραμμα πυκνοτήτων για το μείγμα Μεθάνιο 25,60% - Βουτάνιο 9,30% - CO <sub>2</sub> 65% στους 50°C.....	247
<b>Σχήμα Θ.74:</b> Διάγραμμα απόλυτης απόκλισης πυκνοτήτων προσομοιωτή με τις πειραματικές πυκνότητες, για το μείγμα Μεθάνιο 25,60% - Βουτάνιο 9,30% - CO <sub>2</sub> 65% στους 50°C.....	247
<b>Σχήμα Θ.75:</b> Διάγραμμα απόκλισης % πυκνοτήτων προσομοιωτή με τις πειραματικές πυκνότητες, για το μείγμα Μεθάνιο 25,60% - Βουτάνιο 9,30% - CO <sub>2</sub> 65% στους 50°C.....	248
<b>Σχήμα Θ.76:</b> Διάγραμμα πυκνοτήτων για το μείγμα Μεθάνιο 25,60% - Βουτάνιο 9,30% - CO <sub>2</sub> 65% στους 90°C.....	248
<b>Σχήμα Θ.77:</b> Διάγραμμα απόλυτης απόκλισης πυκνοτήτων προσομοιωτή με τις πειραματικές πυκνότητες, για το μείγμα Μεθάνιο 25,60% - Βουτάνιο 9,30% - CO <sub>2</sub> 65% στους 90°C.....	249
<b>Σχήμα Θ.78:</b> Διάγραμμα απόκλισης % πυκνοτήτων προσομοιωτή με τις πειραματικές πυκνότητες, για το μείγμα Μεθάνιο 25,60% - Βουτάνιο 9,30% - CO <sub>2</sub> 65% στους 90°C.....	249

## Κατάλογος Πινάκων

<b>Πίνακας 1.1:</b> Αποδεδειγμένα αποθέματα πετρελαίου παγκοσμίως ανά περιοχή το 2020.....	2
<b>Πίνακας 1.2:</b> Τα μεγαλύτερα αποδεδειγμένα αποθέματα πετρελαίου παγκοσμίως ανά χώρα το 2020.....	3
<b>Πίνακας 1.3:</b> Παραγωγή πετρελαίου παγκοσμίως ανά περιοχή το 2022.....	4
<b>Πίνακας 1.4:</b> Οι χώρες με την μεγαλύτερη παραγωγή πετρελαίου το 2022.....	4
<b>Πίνακας 1.5:</b> Κατανάλωση πετρελαίου παγκοσμίως ανά περιοχή το 2022.....	5
<b>Πίνακας 1.6:</b> Οι χώρες με την μεγαλύτερη κατανάλωση πετρελαίου το 2022.....	6
<b>Πίνακας 1.7:</b> Αποδεδειγμένα αποθέματα φυσικού αερίου παγκοσμίως ανά περιοχή το 2020.....	7
<b>Πίνακας 1.8:</b> Τα μεγαλύτερα αποδεδειγμένα αποθέματα φυσικού αερίου παγκοσμίως ανά χώρα το 2020.....	7
<b>Πίνακας 1.9:</b> Παραγωγή φυσικού αερίου παγκοσμίως ανά περιοχή το 2022.....	8
<b>Πίνακας 1.10:</b> Οι χώρες με την μεγαλύτερη παραγωγή φυσικού αερίου το 2022.....	9
<b>Πίνακας 1.11:</b> Κατανάλωση φυσικού αερίου παγκοσμίως ανά περιοχή το 2022.....	10
<b>Πίνακας 1.12:</b> Οι χώρες με την μεγαλύτερη κατανάλωση φυσικού αερίου το 2022.....	10
<b>Πίνακας 2.1:</b> Μέση στοιχειακή σύσταση του πετρελαίου.....	17
<b>Πίνακας 2.2:</b> Σύσταση φυσικού αερίου.....	19
<b>Πίνακας 3.1:</b> Τιμές σταθερών που χρησιμοποιούνται για διαφορετικούς καθαρούς υδρογονάνθρακες.....	23
<b>Πίνακας 3.2:</b> Πυκνότητες καθαρών συστατικών σε κανονικές συνθήκες.....	24
<b>Πίνακας 3.3:</b> Πυκνότητα ορισμένων καθαρών συστατικών υδρογονανθράκων και μη υδρογονανθράκων.....	27
<b>Πίνακας 3.4:</b> $B_i$ Τιμές των εξισώσεων $A_1$ , $A_2$ , $A_3$ και $A_4$ .....	28
<b>Πίνακας 3.5:</b> Συντελεστές της εξίσωσης $Z$ .....	29
<b>Πίνακας 4.1:</b> Mathias-Copeman Συντελεστές (Εξίσωση 4.27 και Εξίσωση 4.28) για χρήση με την εξίσωση SRK.....	38
<b>Πίνακας 4.2:</b> Μη μηδενικοί δυαδικοί συντελεστές αλληλεπίδρασης για συστατικά ρευστών ταμιευτήρων πετρελαίου για χρήση με την καταστατική εξίσωση SRK.....	38
<b>Πίνακας 4.3:</b> Κρίσιμοι συντελεστές συμπίεστότητας των $C_1$ - $C_{10}$ n-Παραφίνες.....	40
<b>Πίνακας 4.4:</b> Τιμές των παραμέτρων της καταστατικής εξίσωσης στη γενικευμένη καταστατική εξίσωση που εκφράζονται στην εξίσωση 4.53.....	44
<b>Πίνακας 5.1:</b> Προδιαγραφές αντλίας 1.....	53
<b>Πίνακας 5.2:</b> Προδιαγραφές αντλίας 2.....	53
<b>Πίνακας 5.3:</b> Χαρακτηριστικά αυτόκλειστου κελιού.....	54
<b>Πίνακας 5.4:</b> Προδιαγραφές πυκνομέτρου.....	56
<b>Πίνακας 5.5:</b> Προδιαγραφές συνδέσμων.....	57
<b>Πίνακας 5.6:</b> Προδιαγραφές βαλβίδων.....	57
<b>Πίνακας 6.1:</b> Συντελεστές εξίσωσης (6.9) όπως προέκυψαν χρησιμοποιώντας τα δεδομένα πίεσης, θερμοκρασίας και περιόδου των συστατικών μεθανίου και αιθανίου.....	67
<b>Πίνακας 6.2:</b> Μέγιστες, ελάχιστες, μέσες απόλυτες και σχετικές αποκλίσεις εξίσωσης κατασκευαστή.....	67
<b>Πίνακας 6.3:</b> Συντελεστές εξίσωσης (6.10) όπως προέκυψαν χρησιμοποιώντας τα δεδομένα πίεσης, θερμοκρασίας και περιόδου των συστατικών μεθανίου και αιθανίου.....	68

<b>Πίνακας 6.4:</b> Μέγιστες, ελάχιστες, μέσες απόλυτες και σχετικές αποκλίσεις εξίσωσης κατασκευαστή (6.10).....	68
<b>Πίνακας 6.5:</b> Αποκλίσεις εξίσωσης κατασκευαστή (6.9) και εξίσωσης κατασκευαστή (6.10).....	69
<b>Πίνακας 6.6:</b> Συντελεστές εξίσωσης (6.10).....	70
<b>Πίνακας 6.7:</b> Πολυωνυμικές εξισώσεις παρεμβολής τιμών πυκνότητας μεθανίου από βιβλιογραφία (kg/m <sup>3</sup> ).....	71
<b>Πίνακας 6.8:</b> Πολυωνυμικές εξισώσεις παρεμβολής τιμών πυκνότητας αιθανίου από βιβλιογραφία (kg/m <sup>3</sup> ).....	72
<b>Πίνακας 6.9:</b> Πολυωνυμικές εξισώσεις παρεμβολής τιμών πυκνότητας προπανίου από βιβλιογραφία (kg/m <sup>3</sup> ).....	73
 <b>Πίνακας 7.1:</b> Ποσοτική σύσταση (% v/v) των δειγμάτων Α και Β.....	82
<b>Πίνακας 7.2:</b> Ποσοτική σύσταση (% v/v) των δειγμάτων C και D.....	83
<b>Πίνακας 7.3:</b> Ποσοτική σύσταση (% v/v) των δειγμάτων F και G.....	84
 <b>Πίνακας 8.1:</b> Μέσες αποκλίσεις % των πυκνοτήτων του προσομοιωτή μετά το regression, με τις πειραματικές πυκνότητες, σε κάθε θερμοκρασία και συνολικά.....	112
 <b>Πίνακας Α.1:</b> Πειραματικές μετρήσεις μεθανίου στους 22 °C.....	114
<b>Πίνακας Α.2:</b> Πειραματικές μετρήσεις μεθανίου στους 50 °C.....	114
<b>Πίνακας Α.3:</b> Πειραματικές μετρήσεις μεθανίου στους 90 °C.....	115
<b>Πίνακας Α.4:</b> Πειραματικές μετρήσεις αιθανίου στους 50 °C.....	116
<b>Πίνακας Α.5:</b> Πειραματικές μετρήσεις αιθανίου στους 70 °C.....	117
<b>Πίνακας Α.6:</b> Πειραματικές μετρήσεις αιθανίου στους 90 °C.....	118
<b>Πίνακας Α.7:</b> Πειραματικές μετρήσεις προπανίου στους 50 °C.....	119
<b>Πίνακας Α.8:</b> Πειραματικές μετρήσεις προπανίου στους 70 °C.....	119
<b>Πίνακας Α.9:</b> Πειραματικές μετρήσεις προπανίου στους 90 °C.....	119
 <b>Πίνακας Β.1:</b> Αποκλίσεις εξίσωσης κατασκευαστή για το μεθάνιο στους 22°C.....	120
<b>Πίνακας Β.2:</b> Αποκλίσεις εξίσωσης κατασκευαστή για το μεθάνιο στους 50°C.....	122
<b>Πίνακας Β.3:</b> Αποκλίσεις εξίσωσης κατασκευαστή για το μεθάνιο στους 90°C.....	124
<b>Πίνακας Β.4:</b> Αποκλίσεις εξίσωσης κατασκευαστή για το αιθάνιο στους 50°C.....	127
<b>Πίνακας Β.5:</b> Αποκλίσεις εξίσωσης κατασκευαστή για το αιθάνιο στους 70°C.....	130
<b>Πίνακας Β.6:</b> Αποκλίσεις εξίσωσης κατασκευαστή για το αιθάνιο στους 90°C.....	133
 <b>Πίνακας Γ.1:</b> Αποκλίσεις εξίσωσης κατασκευαστή (6.10) για το μεθάνιο στους 22°C.....	139
<b>Πίνακας Γ.2:</b> Αποκλίσεις εξίσωσης κατασκευαστή (6.10) για το μεθάνιο στους 50°C.....	141
<b>Πίνακας Γ.3:</b> Αποκλίσεις εξίσωσης κατασκευαστή (6.10) για το μεθάνιο στους 90°C.....	143
<b>Πίνακας Γ.4:</b> Αποκλίσεις εξίσωσης κατασκευαστή (6.10) για το αιθάνιο στους 50°C.....	145
<b>Πίνακας Γ.5:</b> Αποκλίσεις εξίσωσης κατασκευαστή (6.10) για το αιθάνιο στους 70°C.....	148
<b>Πίνακας Γ.6:</b> Αποκλίσεις εξίσωσης κατασκευαστή (6.10) για το αιθάνιο στους 90°C.....	151
 <b>Πίνακας Ζ.1:</b> Θερμοκρασιακή αβεβαιότητα με T <sub>K</sub> =21,00 °C και T <sub>A</sub> =22,00 °C και εύρος πίεσης 5 έως 75 bar.....	169
<b>Πίνακας Ζ.2:</b> Αβεβαιότητα πίεσης και συνολική αβεβαιότητα με μέση θερμοκρασία 21,50 °C και εύρος πίεσης 5 έως 75 bar.....	170
<b>Πίνακας Ζ.3:</b> Αποκλίσεις πυκνότητας μεθανίου βιβλιογραφικών δεδομένων και πυκνότητας υπολογισμένης από εξίσωση σε θερμοκρασία 22 °C και εύρος πίεσης 4 έως 78 bar.....	171

<b>Πίνακας Z.4:</b> Αποκλίσεις πυκνότητας μεθανίου βιβλιογραφικών δεδομένων λαμβάνοντας υπόψη την συνολική αβεβαιότητα σε αντίστοιχες συνθήκες πειράματος.....	171
<b>Πίνακας Z.5:</b> Θερμοκρασιακή αβεβαιότητα με $T_K=49,48\text{ }^{\circ}\text{C}$ και $T_A=50,48\text{ }^{\circ}\text{C}$ και εύρος πίεσης 5 έως 75 bar.....	172
<b>Πίνακας Z.6:</b> Αβεβαιότητα πίεσης και συνολική αβεβαιότητα με μέση θερμοκρασία $49,98\text{ }^{\circ}\text{C}$ και εύρος πίεσης 5 έως 75 bar.....	173
<b>Πίνακας Z.7:</b> Αποκλίσεις πυκνότητας μεθανίου βιβλιογραφικών δεδομένων και πυκνότητας υπολογισμένης από εξίσωση σε θερμοκρασία $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ και εύρος πίεσης 5 έως 78 bar.....	174
<b>Πίνακας Z.8:</b> Αποκλίσεις πυκνότητας μεθανίου βιβλιογραφικών δεδομένων λαμβάνοντας υπόψη την συνολική αβεβαιότητα σε αντίστοιχες συνθήκες πειράματος.....	174
<b>Πίνακας Z.9:</b> Θερμοκρασιακή αβεβαιότητα με $T_K=89,54\text{ }^{\circ}\text{C}$ και $T_A=90,54\text{ }^{\circ}\text{C}$ και εύρος πίεσης 5 έως 75 bar.....	175
<b>Πίνακας Z.10:</b> Αβεβαιότητα πίεσης και συνολική αβεβαιότητα με μέση θερμοκρασία $90,04\text{ }^{\circ}\text{C}$ και εύρος πίεσης 5 έως 75 bar.....	176
<b>Πίνακας Z.11:</b> Αποκλίσεις πυκνότητας μεθανίου βιβλιογραφικών δεδομένων και πυκνότητας υπολογισμένης από εξίσωση σε θερμοκρασία $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ και εύρος πίεσης 6 έως 78 bar.....	177
<b>Πίνακας Z.12:</b> Αποκλίσεις πυκνότητας μεθανίου βιβλιογραφικών δεδομένων λαμβάνοντας υπόψη την συνολική αβεβαιότητα σε αντίστοιχες συνθήκες πειράματος.....	177
<b>Πίνακας Z.13:</b> Αποκλίσεις πυκνότητας αιθανίου βιβλιογραφικών δεδομένων και πυκνότητας υπολογισμένης από εξίσωση σε θερμοκρασία $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ και εύρος πίεσης 50 έως 494 bar.....	178
<b>Πίνακας Z.14:</b> Αποκλίσεις πυκνότητας αιθανίου βιβλιογραφικών δεδομένων λαμβάνοντας υπόψη την συνολική αβεβαιότητα σε αντίστοιχες συνθήκες πειράματος.....	179
<b>Πίνακας Z.15:</b> Αποκλίσεις πυκνότητας αιθανίου βιβλιογραφικών δεδομένων και πυκνότητας υπολογισμένης από εξίσωση σε θερμοκρασία $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ και εύρος πίεσης 55 έως 494 bar.....	180
<b>Πίνακας Z.16:</b> Αποκλίσεις πυκνότητας αιθανίου βιβλιογραφικών δεδομένων λαμβάνοντας υπόψη την συνολική αβεβαιότητα σε αντίστοιχες συνθήκες πειράματος.....	181
<b>Πίνακας Z.17:</b> Αποκλίσεις πυκνότητας αιθανίου βιβλιογραφικών δεδομένων και πυκνότητας υπολογισμένης από εξίσωση σε θερμοκρασία $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ και εύρος πίεσης 58 έως 493 bar.....	182
<b>Πίνακας Z.18:</b> Αποκλίσεις πυκνότητας αιθανίου βιβλιογραφικών δεδομένων λαμβάνοντας υπόψη την συνολική αβεβαιότητα σε αντίστοιχες συνθήκες πειράματος.....	183

<b>Πίνακας H.1:</b> Μετρηθείσα πυκνότητα, πυκνότητα προσομοιωτή και αποκλίσεις για το μείγμα Μεθάνιο 39,33% - Αιθάνιο 60,67% - $\text{CO}_2$ 0% στους $22^{\circ}\text{C}$ σε διαφορετικές πιέσεις.....	184
<b>Πίνακας H.2:</b> Τιμές παραμέτρων του προσομοιωτή πριν το regression (άνω) και μετά το regression (κάτω) για το μείγμα Μεθάνιο 39,33% - Αιθάνιο 60,67% - $\text{CO}_2$ 0% στους $22^{\circ}\text{C}$ .....	184
<b>Πίνακας H.3:</b> Μετρηθείσα πυκνότητα, πυκνότητα προσομοιωτή και αποκλίσεις για το μείγμα Μεθάνιο 39,33% - Αιθάνιο 60,67% - $\text{CO}_2$ 0% στους $50^{\circ}\text{C}$ σε διαφορετικές πιέσεις.....	185
<b>Πίνακας H.4:</b> Τιμές παραμέτρων του προσομοιωτή πριν το regression (άνω) και μετά το regression (κάτω) για το μείγμα Μεθάνιο 39,33% - Αιθάνιο 60,67% - $\text{CO}_2$ 0% στους $50^{\circ}\text{C}$ .....	185
<b>Πίνακας H.5:</b> Μετρηθείσα πυκνότητα, πυκνότητα προσομοιωτή και αποκλίσεις για το μείγμα Μεθάνιο 39,33% - Αιθάνιο 60,67% - $\text{CO}_2$ 0% στους $90^{\circ}\text{C}$ σε διαφορετικές πιέσεις.....	186
<b>Πίνακας H.6:</b> Τιμές παραμέτρων του προσομοιωτή πριν το regression (άνω) και μετά το regression (κάτω) για το μείγμα Μεθάνιο 39,33% - Αιθάνιο 60,67% - $\text{CO}_2$ 0% στους $90^{\circ}\text{C}$ .....	186
<b>Πίνακας H.7:</b> Μετρηθείσα πυκνότητα, πυκνότητα προσομοιωτή και αποκλίσεις για το μείγμα Μεθάνιο 28,30% - Αιθάνιο 45,80% - $\text{CO}_2$ 25,90% στους $22^{\circ}\text{C}$ σε διαφορετικές πιέσεις.....	187
<b>Πίνακας H.8:</b> Τιμές παραμέτρων του προσομοιωτή πριν το regression (άνω) και μετά το regression (κάτω) για το μείγμα Μεθάνιο 28,30% - Αιθάνιο 45,80% - $\text{CO}_2$ 25,90% στους $22^{\circ}\text{C}$ .....	187
<b>Πίνακας H.9:</b> Μετρηθείσα πυκνότητα, πυκνότητα προσομοιωτή και αποκλίσεις για το μείγμα Μεθάνιο 28,30% - Αιθάνιο 45,80% - $\text{CO}_2$ 25,90% στους $50^{\circ}\text{C}$ σε διαφορετικές πιέσεις.....	188

[illegible]

[illegible]

<b>Πίνακας I.1:</b> Χαρακτηρίστηκα και ιδιότητες Μεθανίου.....	250
<b>Πίνακας I.2:</b> Χαρακτηρίστηκα και ιδιότητες Αιθανίου.....	251
<b>Πίνακας I.3:</b> Χαρακτηρίστηκα και ιδιότητες Προπανίου.....	252
<b>Πίνακας I.4:</b> Χαρακτηρίστηκα και ιδιότητες Βουτανίου.....	253
<b>Πίνακας I.5:</b> Χαρακτηρίστηκα και ιδιότητες Διοξειδίου του Άνθρακα.....	254

# 1 Εισαγωγή

## 1.1 Παγκόσμια βιομηχανία πετρελαίου - στατιστικά στοιχεία και γεγονότα

Η ποσότητα και η προέλευση της χρησιμοποιούμενης ενέργειας αποτελεί ένα ουσιαστικό δείκτη οικονομικής ανάπτυξης των χωρών. Σήμερα η παγκόσμια παραγωγή ενέργειας στηρίζεται κατά κύριο λόγο στα ορυκτά καύσιμα. Το φυσικό αέριο, το πετρέλαιο, ο άνθρακας και τα βαριά αποστάγματα υδρογονανθράκων από ασφαλούχους άμμους και πετρελαιοφόρους σχιστόλιθους αποτελούν τις κυριότερες μορφές. Το πετρέλαιο είναι ένα από τα πιο περιζήτητα προϊόντα στον κόσμο σήμερα και η πλέον χρησιμοποιούμενη ενεργειακή πρώτη ύλη. Το ευρύ φάσμα των χρήσεων του κυμαίνεται από την παραγωγή ενέργειας έως την εφαρμογή του ως πρώτη ύλη για καύσιμα μεταφοράς και πετροχημικά προϊόντα όπως πλαστικά, διαλύτες και κόλλες. Ως εκ τούτου, η πετρελαϊκή βιομηχανία είναι ένας από τους ισχυρότερους κλάδους της παγκόσμιας οικονομίας. Η πρόβλεψη για το άμεσο μέλλον είναι ότι η ζήτηση του πετρελαίου θα συνεχίσει να αυξάνεται. Επίσης φαίνεται ότι για τις επόμενες δεκαετίες το πετρέλαιο θα διατηρήσει την θέση του ως η κυριότερη ενεργειακή πρώτη ύλη παγκόσμια. (Πασαδάκης Ν. ,2010)

Το πετρέλαιο σχηματίζεται κατά τη διάρκεια εκατομμυρίων ετών από οργανικά υλικά που αποσυντίθενται σε περιβάλλον χαμηλού οξυγόνου και υψηλής πίεσης. Λόγω του χρόνου που απαιτείται για τη δημιουργία πετρελαίου, θεωρείται ορυκτό καύσιμο και τα αποθέματά του είναι πεπερασμένα. Καθώς ένας αυξανόμενος αριθμός συμβατικών αποθεμάτων, όπως οι υπόγειοι ταμειυτήρες, εξαντλήθηκαν, τα μη συμβατικά μέσα εξόρυξης πετρελαίου έχουν γίνει πιο βιώσιμα. Μέσω της εξερεύνησης του σχιστολιθικού πετρελαίου και της πετρελαϊκής άμμου, οι Ηνωμένες Πολιτείες και ο Καναδάς έχουν γίνει μεγάλες πετρελαιοπαραγωγές χώρες. Πάνω από τέσσερα δισεκατομμύρια μετρικοί τόνοι πετρελαίου παράγονται παγκοσμίως κάθε χρόνο, με τη Μέση Ανατολή να φιλοξενεί το μεγαλύτερο μερίδιο των αποδεδειγμένων αποθεμάτων πετρελαίου, κοντά στο 48 τοις εκατό. (Statista Research Department, 2024)

Παρά τις αυξανόμενες ανησυχίες σχετικά με τη χρήση ορυκτών καυσίμων, η κατανάλωση πετρελαίου παρέμεινε στο υψηλότερο επίπεδο όλων των εποχών. Οι ΗΠΑ είναι η χώρα με την υψηλότερη κατανάλωση πετρελαίου παγκοσμίως, ακολουθούμενη από την Κίνα, η οποία έχει δει τη ζήτηση πετρελαίου να αυξάνεται σταθερά την τελευταία δεκαετία. Δεδομένου ότι δεν διαθέτει αξιοσημείωτα αποθέματα στην εγχώρια αγορά, η Κίνα είναι επίσης ο μεγαλύτερος εισαγωγέας πετρελαίου στον κόσμο.

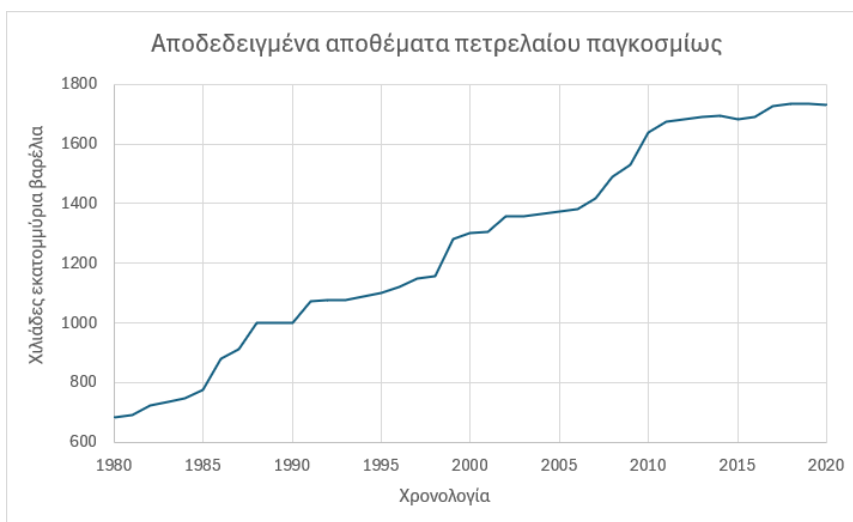
### 1.1.1 Αποθέματα

Για τον υπολογισμό των συνολικά αποδεδειγμένων αποθεμάτων πετρελαίου γενικά λαμβάνονται υπόψη οι ποσότητες που οι γεωλογικές και γεωφυσικές μελέτες δείχνουν με εύλογη βεβαιότητα ότι μπορούν να ανακτηθούν στο μέλλον από γνωστούς ταμειυτήρες υπό τις υπάρχουσες οικονομικές και τεχνολογικές συνθήκες. Τα αποθέματα περιλαμβάνουν συμπυκνώματα αερίου και υγρά φυσικού αερίου (NGL), καθώς και αργό πετρέλαιο.

Η συνολική εκτιμώμενη ποσότητα πετρελαίου σε έναν ταμειυτήρα πετρελαίου, συμπεριλαμβανομένου τόσο του παραγωγικού όσο και του μη παραγωγικού πετρελαίου, ονομάζεται Oil In Place (OIP). Ωστόσο, λόγω των χαρακτηριστικών των ταμειυτήρων και των περιορισμών στις τεχνολογίες εξόρυξης πετρελαίου, μόνο ένα κλάσμα αυτού του πετρελαίου μπορεί να έρθει στην επιφάνεια και μόνο αυτό το παραγωγικό κλάσμα θεωρείται απόθεμα. (petrowiki.spe.org)

Ο λόγος των αποθεμάτων προς τη συνολική ποσότητα πετρελαίου σε έναν συγκεκριμένο ταμειευτήρα ονομάζεται συντελεστής ανάκτησης. Ο προσδιορισμός του συντελεστή ανάκτησης για ένα δεδομένο πεδίο εξαρτάται από διάφορα γεωλογικά χαρακτηριστικά του ταμειευτήρα, συμπεριλαμβανομένης της μεθόδου ανάκτησης πετρελαίου που χρησιμοποιείται και των τεχνολογικών εξελίξεων.

Εάν τα αποθέματα που απομένουν στο τέλος οποιουδήποτε έτους διαιρεθούν με την παραγωγή κατά το εν λόγω έτος, το αποτέλεσμα είναι το χρονικό διάστημα που θα διαρκούσαν τα εναπομένοντα αποθέματα εάν η παραγωγή συνεχιζόταν με αυτόν τον ρυθμό και ονομάζεται δείκτης αποθεματικών προς παραγωγή (R/P).



**Σχήμα 1.1:** Αποδεδειγμένα αποθέματα πετρελαίου παγκοσμίως από το 1980 έως το 2020

**Πηγή:** The Energy Institute Statistical Review of World Energy (2023)

Τα παγκόσμια αποδεδειγμένα αποθέματα πετρελαίου ήταν 1,73 τρισεκατομμύρια βαρέλια στο τέλος του 2020, μειωμένα κατά 2 δισεκατομμύρια βαρέλια σε σύγκριση με το 2019. Ο παγκόσμιος λόγος R/P δείχνει ότι τα αποθέματα πετρελαίου το 2020 αντιστοιχούσαν για περίπου 53 χρόνια τρέχουσας παραγωγής.

	Thousand million barrels	Share 2020
North America	242,91	14,02%
S. & Cent. America	323,37	18,67%
Europe	13,63	0,79%
CIS	146,25	8,44%
Middle East	835,94	48,25%
Africa	125,11	7,22%
Asia Pacific	45,16	2,61%
<b>World</b>	<b>1732,37</b>	<b>100,00%</b>

**Πίνακας 1.1:** Αποδεδειγμένα αποθέματα πετρελαίου παγκοσμίως ανά περιοχή το 2020

**Πηγή:** The Energy Institute Statistical Review of World Energy (2023)

Ο ΟΠΕΚ κατέχει το 70,1% των παγκόσμιων αποθεμάτων. Οι κορυφαίες χώρες όσον αφορά τα αποθέματα είναι η Βενεζουέλα, η Σαουδική Αραβία και ο Καναδάς.

	Thousand million barrels	Share 2020
Venezuela	303,81	17,54%
Saudi Arabia	297,53	17,17%
Canada	168,09	9,70%
Iran	157,80	9,11%
Iraq	145,02	8,37%
Russian Federation	107,80	6,22%
Kuwait	101,50	5,86%
United Arab Emirates	97,80	5,65%
US	68,76	3,97%

**Πίνακας 1.2:** Τα μεγαλύτερα αποδεδειγμένα αποθέματα πετρελαίου παγκοσμίως ανά χώρα το 2020  
**Πηγή:** The Energy Institute Statistical Review of World Energy (2023)

## 1.1.2 Παραγωγή

Η παγκόσμια παραγωγή πετρελαίου έχει υποστεί σημαντικές διακυμάνσεις τα τελευταία 50 χρόνια, επηρεασμένη από γεωπολιτικούς παράγοντες, τεχνολογικές εξελίξεις και την δυναμική της αγοράς. Η στατιστική ανάλυση των παγκόσμιων τάσεων παραγωγής πετρελαίου υπογραμμίζει τον σημαντικό ρόλο που διαδραμάτισαν συγκεκριμένες περιοχές και χώρες στη διαμόρφωση της παγκόσμιας αγοράς πετρελαίου τις τελευταίες δύο δεκαετίες. Το 2022, η παγκόσμια παραγωγή πετρελαίου ανήλθε σε περίπου 4,4 δισεκατομμύρια μετρικούς τόνους.



**Σχήμα 1.2:** Παραγωγή πετρελαίου παγκοσμίως από το 1967 έως το 2022  
**Πηγή:** The Energy Institute Statistical Review of World Energy (2023)

Η Μέση Ανατολή κυριαρχεί ιστορικά στην παγκόσμια παραγωγή πετρελαίου, λόγω των άφθονων αποθεμάτων και του χαμηλού κόστους παραγωγής. Άλλες σημαντικές περιοχές παραγωγής πετρελαίου είναι η Βόρεια Αμερική και η Κοινοπολιτεία Ανεξαρτήτων Κρατών (CIS).

	Thousand barrels daily	Million tonnes	Share 2022
North America	25290	1131	26,95%
S. & Cent. America	6361	326	6,78%
Europe	3131	148	3,34%
CIS	14006	683	14,92%
Middle East	30743	1442	32,76%
Africa	7043	332	7,50%
Asia Pacific	7273	346	7,75%
<b>World</b>	<b>93848</b>	<b>4407</b>	<b>100,00%</b>

**Πίνακας 1.3:** Παραγωγή πετρελαίου παγκοσμίως ανά περιοχή το 2022  
**Πηγή:** The Energy Institute Statistical Review of World Energy (2023)

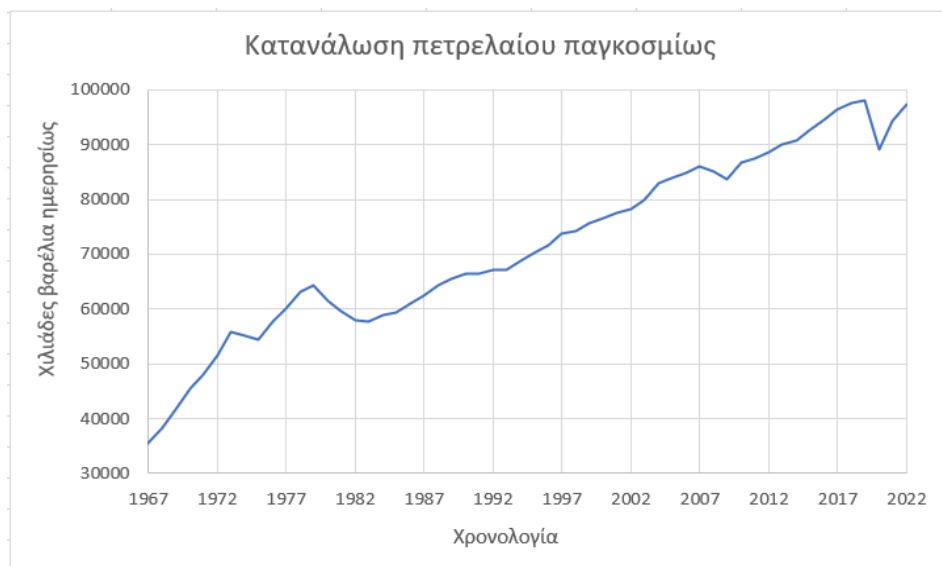
Οι Ηνωμένες Πολιτείες, επωφελούμενες από τις εξελίξεις στις τεχνολογίες εξόρυξης σχιστολιθικού πετρελαίου, είναι ο μεγαλύτερος παραγωγός πετρελαίου στον κόσμο σήμερα. Η Σαουδική Αραβία κατατάσσεται σταθερά μεταξύ των κορυφαίων πετρελαιοπαραγωγών χωρών τις τελευταίες δύο δεκαετίες, αξιοποιώντας τα τεράστια αποθέματα και τις στρατηγικές επενδύσεις της σε υποδομές παραγωγής. Η Ρωσία διατηρεί επίσης σημαντική παρουσία στην παγκόσμια παραγωγή πετρελαίου, αξιοποιώντας τα εκτεταμένα αποθέματα και την τεχνολογική τεχνογνωσία της.

	Thousand barrels daily	Million tonnes	Share 2022
US	17770	759	18,94%
Saudi Arabia	12136	573	12,93%
Russian Federation	11202	549	11,94%
Canada	5576	274	5,94%
Iraq	4520	221	4,82%
China	4111	205	4,38%
United Arab Emirates	4020	181	4,28%
Iran	3822	177	4,07%

**Πίνακας 1.4:** Οι χώρες με την μεγαλύτερη παραγωγή πετρελαίου το 2022  
**Πηγή:** The Energy Institute Statistical Review of World Energy (2023)

### 1.1.3 Κατανάλωση

Τα τελευταία είκοσι χρόνια, η παγκόσμια κατανάλωση πετρελαίου αυξήθηκε, λόγω της ταχείας εκβιομηχάνισης, ιδιαίτερα στις αναδυόμενες οικονομίες όπως η Κίνα και η Ινδία. Την περίοδο αυτή σημειώθηκαν διακυμάνσεις της ζήτησης λόγω οικονομικών κρίσεων, γεωπολιτικών εντάσεων και, κυρίως, της πανδημίας COVID-19 το 2020, γεγονός που οδήγησε σε σημαντική μείωση της κατανάλωσης. Οι περιβαλλοντικές ανησυχίες επηρεάζουν όλο και περισσότερο τα καταναλωτικά πρότυπα, προκαλώντας συζητήσεις σχετικά με την ενεργειακή μετάβαση και τη βιωσιμότητα στην παγκόσμια οικονομία που εξαρτάται από το πετρέλαιο. Η παγκόσμια κατανάλωση πετρελαίου ανήλθε σε περίπου 4,4 δισεκατομμύρια μετρικούς τόνους το 2022.



**Σχήμα 1.3:** Κατανάλωση πετρελαίου παγκοσμίως από το 1967 έως το 2022  
**Πηγή:** The Energy Institute Statistical Review of World Energy (2023)

Το 2022, περιοχές με ραγδαία εκβιομηχάνιση και ταχεία αστικοποίηση, ιδιαίτερα η Ασία-Ειρηνικός, συνέχισαν να οδηγούν την παγκόσμια κατανάλωση πετρελαίου. Η Κίνα, ως ο μεγαλύτερος εισαγωγέας πετρελαίου στον κόσμο, διατήρησε τη θέση της ως σημαντικός καταναλωτής, τροφοδοτούμενη από την ισχυρή οικονομική ανάπτυξη και την αυξανόμενη ζήτηση για μεταφορές και βιομηχανικές δραστηριότητες. Άλλες αναδυόμενες οικονομίες στην Ασία, όπως η Ινδία και οι χώρες της Νοτιοανατολικής Ασίας, παρουσίασαν επίσης αξιοσημείωτες αυξήσεις στην κατανάλωση πετρελαίου, αντιστακώνοντας τις αυξανόμενες ενεργειακές ανάγκες τους.

	Thousand barrels daily	Million tonnes	Share 2022
North America	23527	1016	24,18%
S. & Cent. America	6153	286	6,32%
Europe	14062	663	14,45%
CIS	4628	208	4,76%
Middle East	9450	414	9,71%
Africa	4163	192	4,28%
Asia Pacific	35326	1615	36,30%
<b>World</b>	<b>97309</b>	<b>4395</b>	<b>100,00%</b>

**Πίνακας 1.5:** Κατανάλωση πετρελαίου παγκοσμίως ανά περιοχή το 2022  
**Πηγή:** The Energy Institute Statistical Review of World Energy (2023)

Οι Ηνωμένες Πολιτείες παρέμειναν ο μεγαλύτερος καταναλωτής πετρελαίου το 2022, ακολουθούμενες στενά από την Κίνα. Παρά τις προσπάθειες μετάβασης προς καθαρότερες πηγές ενέργειας, οι Ηνωμένες Πολιτείες συνέχισαν να βασίζονται σε μεγάλο βαθμό στο πετρέλαιο για μεταφορές και βιομηχανικές εφαρμογές. Η κατανάλωση πετρελαίου της Ινδίας αυξήθηκε το 2022, λόγω της ταχείας αστικοποίησης, της αυξανόμενης ιδιοκτησίας οχημάτων και των έργων ανάπτυξης υποδομών.

	Thousand barrels daily	Million tonnes	Share 2022
US	19140	823	19,67%
China	14295	659	14,69%
India	5185	237	5,33%
Saudi Arabia	3876	166	3,98%
Russian Federation	3570	161	3,67%
Japan	3337	152	3,43%
South Korea	2858	124	2,94%
Brazil	2512	116	2,58%
Canada	2288	98	2,35%
Mexico	2098	95	2,16%
Germany	2075	97	2,13%

**Πίνακας 1.6:** Οι χώρες με την μεγαλύτερη κατανάλωση πετρελαίου το 2022  
**Πηγή:** The Energy Institute Statistical Review of World Energy (2023)

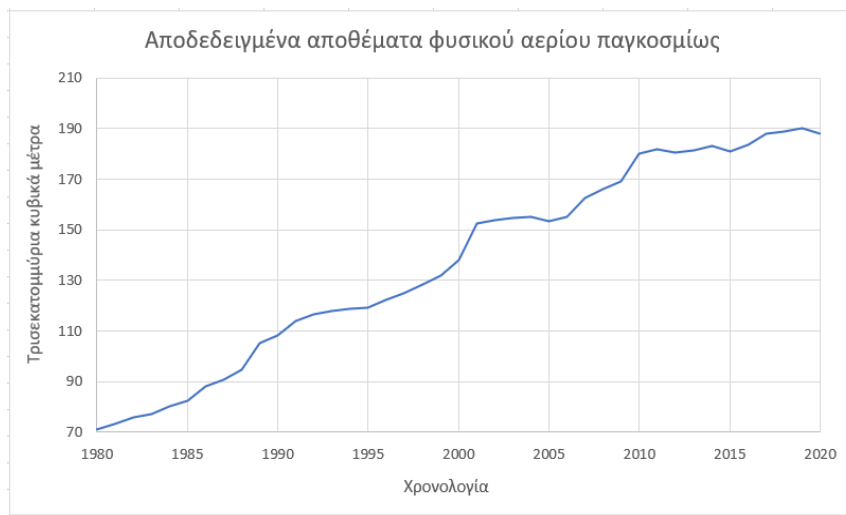
## 1.2 Παγκόσμια βιομηχανία φυσικού αερίου - στατιστικά στοιχεία και γεγονότα

Το φυσικό αέριο είναι ένας τύπος ορυκτού καυσίμου που αποτελείται κυρίως από αέριο μεθανίου και άλλους εύφλεκτους υδρογονάνθρακες. Σχηματίζεται σε διάστημα εκατομμυρίων ετών από φυτικά και ζωικά υπολείμματα, καθώς και άμμο και λάσπη, που έχουν συσσωρευτεί υπό θερμότητα και πίεση. Αυτή η διαδικασία σχηματίζει επίσης άλλους τύπους ορυκτών καυσίμων, όπως ο άνθρακας και το πετρέλαιο. Στην περίπτωση του φυσικού αερίου, το προϊόν αυτής της διαδικασίας έχει μετακινηθεί σε μεγάλες ρωγμές και χώρους εντός πετρωμάτων και σε μικροσκοπικούς πόρους εντός ιζηματογενών πετρωμάτων (ο τελευταίος από τους οποίους είναι γνωστός ως σχιστολιθικό αέριο). Κατά συνέπεια, αυτή η πηγή ενέργειας βρίσκεται σε ταμιευτήρες κάτω από την επιφάνεια της Γης, με τα μεγαλύτερα αποδεδειγμένα αποθέματα να βρίσκονται στη Μέση Ανατολή.

Το φυσικό αέριο έχει ένα ευρύ φάσμα χρήσεων. Είναι μια πηγή θέρμανσης και παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και μια σημαντική πρώτη ύλη για χημικά προϊόντα όπως λιπάσματα και πλαστικά. Λόγω της καλύτερης αναλογίας υδρογόνου προς άνθρακα από άλλα ορυκτά καύσιμα, οι υποστηρικτές του φυσικού αερίου έχουν προωθήσει τη χρήση του ως καύσιμο γέφυρας στην ενεργειακή μετάβαση. Ως αποτέλεσμα, χώρες όπως η Γερμανία και οι Ηνωμένες Πολιτείες, αναπτύσσουν παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με αέριο για να μειώσουν την εξάρτηση από τον άνθρακα. Αυτή η αύξηση της ζήτησης αντικατοπτρίζεται στη σταθερή αύξηση της παγκόσμιας παραγωγής φυσικού αερίου, η οποία αυξήθηκε κατά σχεδόν 60 τοις εκατό από τα τέλη της δεκαετίας του 1990 έως το 2020. (Statista Research Department, 2024)

### 1.2.1 Αποθέματα

Ο παγκόσμιος όγκος των αποδεδειγμένων αποθεμάτων φυσικού αερίου έχει αυξηθεί από 138 τρισεκατομμύρια κυβικά μέτρα το 2000 σε πάνω από 188 τρισεκατομμύρια κυβικά μέτρα το 2020. Τα αποδεδειγμένα αποθέματα αντιστοιχούν στην ποσότητα αερίου που μπορεί να παραχθεί οικονομικά με τις τρέχουσες τιμές και τεχνολογίες. Τα αποθέματα μπορούν να αλλάζουν ετησίως με νέες ανακαλύψεις, ενδελεχή αξιολόγηση των υπαρχόντων πεδίων και παραγωγή υπαρχόντων πόρων. Τα παγκόσμια αποδεδειγμένα αποθέματα φυσικού αερίου ήταν 188,1 τρισεκατομμύρια κυβικά μέτρα στο τέλος του 2020, μειωμένα κατά 2,2 τρισεκατομμύρια κυβικά μέτρα σε σύγκριση με το 2019. Ο παγκόσμιος λόγος R/P δείχνει ότι τα αποθέματα φυσικού αερίου το 2020 αντιστοιχούσαν για περίπου 49 χρόνια τρέχουσας παραγωγής.



**Σχήμα 1.4:** Αποδεδειγμένα αποθέματα φυσικού αερίου παγκοσμίως από το 1980 έως το 2020  
**Πηγή:** The Energy Institute Statistical Review of World Energy (2023)

Η Μέση Ανατολή είναι η περιοχή με το μεγαλύτερο μερίδιο των παγκόσμιων αποθεμάτων φυσικού αερίου. Οι κορυφαίες χώρες όσον αφορά τα αποθέματα είναι η Ρωσία, το Ιράν και το Κατάρ.

	Trillion cubic metres	Share 2020
North America	15,15	8,06%
S. & Cent. America	7,90	4,20%
Europe	3,17	1,68%
CIS	56,60	30,10%
Middle East	75,81	40,31%
Africa	12,89	6,85%
Asia Pacific	16,56	8,81%
<b>World</b>	<b>188,07</b>	<b>100,00%</b>

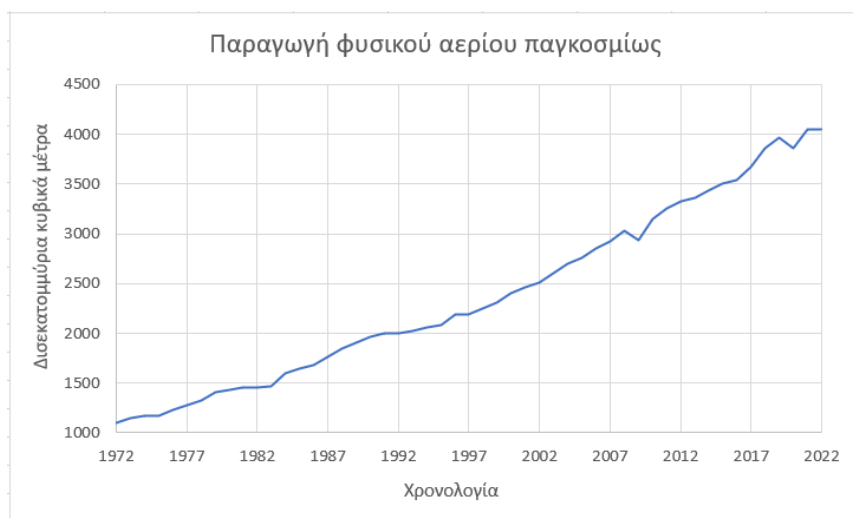
**Πίνακας 1.7:** Αποδεδειγμένα αποθέματα φυσικού αερίου παγκοσμίως ανά περιοχή το 2020  
**Πηγή:** The Energy Institute Statistical Review of World Energy (2023)

	Trillion cubic metres	Share 2020
Russian Federation	37,39	19,88%
Iran	32,10	17,07%
Qatar	24,67	13,11%
Turkmenistan	13,60	7,23%
US	12,62	6,71%
China	8,40	4,47%
Venezuela	6,26	3,33%
Saudi Arabia	6,02	3,20%
United Arab Emirates	5,94	3,16%

**Πίνακας 1.8:** Τα μεγαλύτερα αποδεδειγμένα αποθέματα φυσικού αερίου παγκοσμίως ανά χώρα το 2020  
**Πηγή:** The Energy Institute Statistical Review of World Energy (2023)

## 1.2.2 Παραγωγή

Η παγκόσμια παραγωγή φυσικού αερίου αυξάνεται αργά από το 1970. Εκτός από τα γεγονότα που περιβάλλουν την παγκόσμια οικονομική κρίση, όπως στα τέλη του 2010 και του 2020, η παραγωγή φυσικού αερίου αυξανόταν σταθερά κάθε χρόνο τις τελευταίες δύο δεκαετίες. Η παγκόσμια παραγωγή φυσικού αερίου ανήλθε σε περίπου 4,04 τρισεκατομμύρια κυβικά μέτρα το 2022.



**Σχήμα 1.5:** Παραγωγή φυσικού αερίου παγκοσμίως από το 1970 έως το 2020

**Πηγή:** The Energy Institute Statistical Review of World Energy (2023)

Το 2022, η παγκόσμια παραγωγή φυσικού αερίου συνέχισε να καθοδηγείται από βασικές περιοχές και χώρες, με αξιοσημείωτες μεταβολές στον όγκο παραγωγής να επηρεάζουν το ενεργειακό τοπίο. Η Βόρεια Αμερική είναι ο μεγαλύτερος παραγωγός φυσικού αερίου στον κόσμο, με τις Ηνωμένες Πολιτείες να διατηρούν την πρωτιά τους στην παραγωγή φυσικού αερίου, οδηγούμενες από τις εξελίξεις στο σχιστολιθικό φυσικό αέριο και τις τεχνολογικές καινοτομίες στις τεχνικές γεώτρησης.

	Billion cubic metres	Billion cubic feet per day	Exajoules	Share 2022
North America	1203,92	116,48	43,34	29,77%
S. & Cent. America	162,05	15,68	5,83	4,01%
Europe	220,38	21,32	7,93	5,45%
CIS	805,92	77,98	29,01	19,93%
Middle East	721,32	69,79	25,97	17,84%
Africa	248,96	24,09	8,96	6,16%
Asia Pacific	681,27	65,91	24,53	16,85%
<b>World</b>	<b>4043,82</b>	<b>391,25</b>	<b>145,58</b>	<b>100,00%</b>

**Πίνακας 1.9:** Παραγωγή φυσικού αερίου παγκοσμίως ανά περιοχή το 2022

**Πηγή:** The Energy Institute Statistical Review of World Energy (2023)

Η Ρωσία παρέμεινε ο δεύτερος μεγαλύτερος παραγωγός φυσικού αερίου στον κόσμο, αξιοποιώντας τα εκτεταμένα αποθέματα και τις προηγμένες τεχνολογίες εξόρυξης. Η Μέση Ανατολή διατήρησε τη θέση της ως σημαντικός παραγωγός, με το Κατάρ, το Ιράν και τη Σαουδική Αραβία να συμβάλλουν σημαντικά στην παγκόσμια παραγωγή. Οι αναδυόμενοι παραγωγοί, όπως η Κίνα και

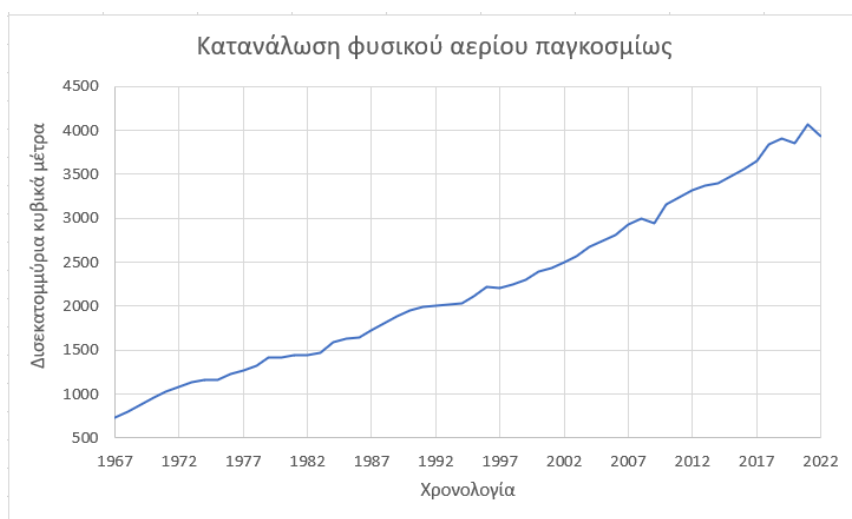
η Αυστραλία, σημείωσαν επίσης σημαντική αύξηση στην παραγωγή φυσικού αερίου, αντανακλώντας τις προσπάθειές τους να ανταποκριθούν στην αυξανόμενη εγχώρια ζήτηση και να επεκτείνουν τις εξαγωγικές τους δυνατότητες.

	Billion cubic metres	Billion cubic feet per day	Exajoules	Share 2022
US	978,55	94,68	35,23	24,20%
Russian Federation	618,37	59,83	22,26	15,29%
Iran	259,40	25,10	9,34	6,41%
China	221,84	21,46	7,99	5,49%
Canada	185,02	17,90	6,66	4,58%
Qatar	178,41	17,26	6,42	4,41%
Australia	152,82	14,79	5,50	3,78%
Norway	122,85	11,89	4,42	3,04%

**Πίνακας 1.10:** Οι χώρες με την μεγαλύτερη παραγωγή φυσικού αερίου το 2022  
**Πηγή:** The Energy Institute Statistical Review of World Energy (2023)

### 1.2.3 Κατανάλωση

Η παγκόσμια κατανάλωση φυσικού αερίου αυξάνεται τα τελευταία 20 χρόνια. Το 2020, η κατανάλωση φυσικού αερίου παγκοσμίως ανήλθε σε περίπου 3,8 τρισεκατομμύρια κυβικά μέτρα. Αυτό ήταν μια μείωση περίπου 81 δισεκατομμύρια κυβικά μέτρα σε σύγκριση με το 2019 και προέκυψε από την παγκόσμια κρίση που δημιουργήθηκε λόγω πανδημίας. Εκτός από τα χρόνια της χρηματοπιστωτικής κρίσης και της πανδημίας του κορονοϊού του 2020, η κατανάλωση φυσικού αερίου αυξανόταν διαδοχικά κάθε χρόνο από το 1967. Το φυσικό αέριο χρησιμοποιείται συνήθως σε οικιακές, εμπορικές και βιομηχανικές εφαρμογές, όπως η θέρμανση και η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Το 2022, η κατανάλωση φυσικού αερίου παγκοσμίως ανήλθε σε περίπου 3,9 τρισεκατομμύρια κυβικά μέτρα.



**Σχήμα 1.6:** Κατανάλωση φυσικού αερίου παγκοσμίως από το 1967 έως το 2022  
**Πηγή:** The Energy Institute Statistical Review of World Energy (2023)

Το 2022, η παγκόσμια κατανάλωση φυσικού αερίου παρουσίασε διακριτές περιφερειακές και εθνικές τάσεις, αντανakλώντας τις ποικίλες ενεργειακές ανάγκες και την οικονομική δυναμική. Η περιοχή της Βόρειας Αμερικής αναδείχθηκε ως ο μεγαλύτερος καταναλωτής φυσικού αερίου, με την περιοχή Ασίας-Ειρηνικού να βρίσκεται πολύ κοντά λόγω της ισχυρής ζήτησης από ταχέως αναπτυσσόμενες οικονομίες όπως η Κίνα, η Ινδία και η Ιαπωνία.

	<b>Billion cubic metres</b>	<b>Billion cubic feet per day</b>	<b>Exajoules</b>	<b>Share 2022</b>
North America	1099,43	106,37	39,58	27,89%
S. & Cent. America	161,73	15,65	5,82	4,10%
Europe	498,78	48,26	17,96	12,66%
CIS	551,23	53,33	19,84	13,99%
Middle East	560,56	54,24	20,18	14,22%
Africa	162,50	15,72	5,85	4,12%
Asia Pacific	907,08	87,76	32,65	23,01%
<b>World</b>	<b>3941,30</b>	<b>381,33</b>	<b>141,89</b>	<b>100,00%</b>

**Πίνακας 1.11:** Κατανάλωση φυσικού αερίου παγκοσμίως ανά περιοχή το 2022

**Πηγή:** The Energy Institute Statistical Review of World Energy (2023)

Οι Ηνωμένες Πολιτείες, παρέμειναν ο σημαντικότερος καταναλωτής, υποστηριζόμενος από την αυξημένη χρήση φυσικού αερίου στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και στους βιομηχανικούς τομείς. Η Ευρώπη διατήρησε τη θέση της ως σημαντικός καταναλωτής φυσικού αερίου, με χώρες όπως η Γερμανία, το Ηνωμένο Βασίλειο και η Ιταλία να οδηγούν τη ζήτηση για θέρμανση και παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

	<b>Billion cubic metres</b>	<b>Billion cubic feet per day</b>	<b>Exajoules</b>	<b>Share 2022</b>
US	881,21	85,26	31,72	22,36%
Russian Federation	408,05	39,48	14,69	10,35%
China	375,70	36,35	13,53	9,53%
Iran	228,91	22,15	8,24	5,81%
Canada	121,63	11,77	4,38	3,09%
Saudi Arabia	120,36	11,64	4,33	3,05%
Japan	100,50	9,72	3,62	2,55%
Mexico	96,59	9,34	3,48	2,45%

**Πίνακας 1.12:** Οι χώρες με την μεγαλύτερη κατανάλωση φυσικού αερίου το 2022

**Πηγή:** The Energy Institute Statistical Review of World Energy (2023)

## **2 Ορυκτά καύσιμα**

### **2.1 Πετρέλαιο**

Η ιστορία της σύγχρονης βιομηχανικής κοινωνίας είναι άρρηκτα συνυφασμένη με το πετρέλαιο. Η σχέση αυτή είναι ιδιαίτερα αντιφατική. Η χρήση του πετρελαίου είναι απαραίτητη προϋπόθεση για την λειτουργία και ανάπτυξη της οικονομίας, αλλά τα περιβαλλοντικά προβλήματα που δημιουργεί θέτουν όρια στην ίδια αυτή την ανάπτυξη. Το πετρέλαιο έχει καθιερωθεί ως ο κύριος ενεργειακός πόρος για δύο κυρίως λόγους. Διότι έχει υψηλό ενεργειακό περιεχόμενο συγκρινόμενο με τα άλλα συμβατικά καύσιμα (άνθρακας) και είναι υγρό, γεγονός που καθιστά εύκολη τη μεταφορά, διακίνηση και αποθήκευσή του. (Πασαδάκης Ν. ,2010)

#### **2.1.1 Προέλευση πετρελαίου**

Η δημιουργία του πετρελαίου αποτέλεσε επί μακρόν θέμα έρευνας. Σήμερα είναι αποδεκτό ότι η δημιουργία του σχετίζεται με την δημιουργία ιζηματογενών πετρωμάτων από αποθέσεις σε θαλάσσια ή παραθαλάσσια περιβάλλοντα και αποτελεί προϊόν αποδόμησης των ζωικών και φυτικών ιστών οι οποίοι παγιώθηκαν μέσα στα πετρώματα στην διάρκεια της δημιουργίας τους. Η διεργασία αυτή έλαβε χώρα στην διάρκεια εκατομμυρίων ετών. Θεωρείται ότι η κύρια ποσότητα του πετρελαίου έχει δημιουργηθεί από μονοκυτταρικούς θαλάσσιους οργανισμούς. Η συγκέντρωσή τους στο βυθό και η ανάμιξή τους με την άμμο δημιούργησε πλούσιες σε οργανική ύλη δομές, οι οποίες μετασχηματίστηκαν σε ιζηματογενή πετρώματα. Η ίδια διεργασία έλαβε χώρα και σε λίμνες. Αρχικά μία ποσότητα του οργανικού υλικού υπό την επίδραση αερόβιων μικροοργανισμών μετατράπηκε σε αέριο το οποίο και απελευθερώθηκε, ενώ απομακρύνθηκε το υδατοδιαλυτό μέρος του υλικού. Το υπόλειμμα δεν αποδομήθηκε λόγω έλλειψης οξυγόνου. Υπό την επίδραση αναερόβιων μικροοργανισμών τα μεγάλα οργανικά μόρια διασπάστηκαν δίδοντας συστατικά πλούσια σε άνθρακα και υδρογόνο. Η αυξημένη πίεση από το βάρος των υπερκειμένων στρωμάτων του πετρώματος και η υψηλή θερμοκρασία ολοκληρώνουν τη μετατροπή της οργανικής ύλης σε πετρέλαιο, ενώ ο αρχικός κορεσμός του πετρώματος σε νερό από 70-80% μειώνεται στο 10% ή και λιγότερο ανάλογα με το είδος του πετρώματος και το βάθος.

Τα αρχαιότερα κοιτάσματα πετρελαίου χρονολογούνται 600 εκατομμύρια χρόνια και τα νεότερα 1 εκατομμύριο, ενώ υπολογίζεται ότι η πλειονότητα των κοιτασμάτων βρίσκεται σε πετρώματα ηλικίας μεταξύ 10 και 270 εκατομμυρίων ετών. (Πασαδάκης Ν. ,2010)

#### **2.1.2 Δημιουργία ταμιευτήρων**

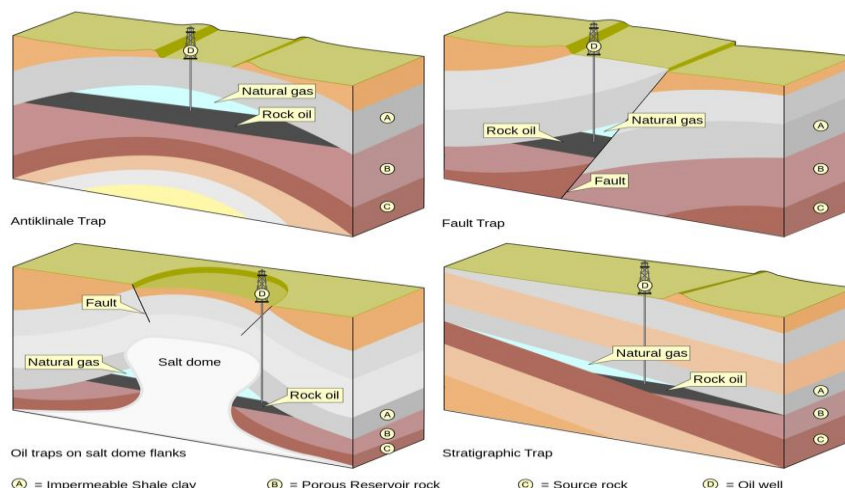
##### **Μετανάστευση υδρογονανθράκων**

Η δημιουργία των μορίων των υδρογονανθράκων μέσα στα ιζηματογενή πετρώματα προκαλεί αύξηση της πίεσης στο σχηματισμό που όταν υπερβεί την αντοχή του πετρώματος σχηματίζονται ρωγμές μέσω των οποίων ποσότητες υδρογονανθράκων αποβάλλονται στον περιβάλλοντα χώρο. Οι κύκλοι αυτοί, δηλαδή αύξηση της πίεσης του μητρικού πετρώματος-ρωγμάτωση-αποβολή υδρογονανθράκων, μπορεί να επαναληφθούν πολλές φορές κατά την διάρκεια της ωρίμανσης. Η πρωτογενής μετανάστευση είναι πολύ βραδεία και λαμβάνει χώρα διαμέσου πορώδους μέσου συνήθως ελάχιστα διαπερατού μέχρις ότου οι υδρογονάνθρακες συναντήσουν ευνοικότερες συνθήκες ροής οπότε η δευτερογενής μετανάστευση καθίσταται πολύ ταχύτερη.

Η ροή των υδρογονανθράκων μέσα στα διαπερατά στρώματα κατά την διάρκεια της δευτερογενούς μετανάστευσης ρυθμίζεται κυρίως από τις δυνάμεις της άνωσης καθότι οι υδρογονάνθρακες έχοντας μικρότερη πυκνότητα από το νερό του σχηματισμού (formation water) το εκτοπίζουν προς τα κάτω ενώ αυτοί κινούνται προς τα πάνω. (Βαρότσης Ν. , 2014)

## Παγίδευση

Η προς τα πάνω κίνηση των υδρογονανθράκων που μεταναστεύουν συνεχίζεται μέχρις ότου η ροή συναντήσει αδιαπέρατο πέτρωμα όπου, οι τριχοειδείς πιέσεις εισόδου στους πόρους του οποίου δεν δύνανται να υπερνικηθούν από τις δυνάμεις της άνωσης.



Σχήμα 2.1: Δομή διαφορετικών τύπων παγίδων πετρελαίου και αερίου

Οι παγίδες πετρελαίου και αερίου είναι παγίδες κάτω από το έδαφος όπου ένα διαπερατό πέτρωμα ταμιευτήρα (reservoir rock) καλύπτεται από κάποιο πέτρωμα-κάλυμμα (cap rock) χαμηλής διαπερατότητας. Αυτός ο συνδυασμός πετρωμάτων μπορεί να πάρει διάφορες μορφές, αλλά όλες εμποδίζουν την μετανάστευση πετρελαίου και φυσικού αερίου προς τα πάνω μέσω του πετρώματος ταμιευτήρα. Τα πετρώματα-κάλυμμα χαμηλής διαπερατότητας είναι γενικά σχιστολιθικοί ή χαμηλής διαπερατότητας ψαμμίτες και ανθρακικά πετρώματα.

Οι παγίδες των ρευστών υδρογονανθράκων είναι είτε δομικές (structural), όπως αντίκλινα, μεταπτώσεις, δόμοι άλατος κλπ, είτε στρωματογραφικές (stratigraphic). Για να είναι εκμεταλλεύσιμο ένα κοίτασμα θα πρέπει η διαμόρφωση του πετρώματος να δημιουργεί παγίδες εντός των οποίων να έχουν συσσωρευτεί σημαντικές ποσότητες πετρελαίου. (Βαρότσης Ν. , 2014)

### 2.1.3 Εντοπισμός ταμιευτήρων

#### Ανίχνευση

Η ανίχνευση των ταμιευτήρων υδρογονανθράκων γίνεται σε διάφορα στάδια: επιφανειακή έρευνα, γεωλογική έρευνα και γεωφυσική έρευνα.

Η επιφανειακή έρευνα μπορεί να προσφέρει μόνο ενδείξεις ενώ η γεωλογική έρευνα αποτελεί την πρώτη φάση της συστηματικής αναζήτησης του πετρελαίου. Ιδιαίτερης σημασίας είναι ο συσχετισμός των γεωλογικών σχηματισμών της υπό έρευνα περιοχής με τους αντίστοιχους

σηματισμούς γειτονικών πετρελαιοπαραγωγών που έχουν μελετηθεί εντατικά. Τέλος, η γεωφυσική έρευνα, με τις τρεις βασικές μεθόδους της (μαγνητική, βαρυτομετρική και σεισμική), δίνει εξαιρετικά ενδιαφέρουσες πληροφορίες για την γεωλογική δομή του υπεδάφους πριν ακόμα πραγματοποιηθούν οι εξαιρετικά δαπανηρές ερευνητικές γεωτρήσεις. (Βαρότσης Ν. , 2014)

## **Ερευνητικές γεωτρήσεις – τεστ**

Αφού τα αποτελέσματα των παραπάνω ερευνητικών προσπαθειών συνεκτιμηθούν και αξιολογηθούν και εφ' όσον προκύψουν αποχρώσεις ενδείξεις, εκλέγεται το σημείο στο οποίο θα πραγματοποιηθεί η πρώτη γεώτρηση. Το γεωτρύπανο με όλο τον βοηθητικό εξοπλισμό εγκαθίσταται στη σωστή θέση και ολοκληρώνονται οι προετοιμασίες.

Κατά την εκτέλεση της δοκιμαστικής γεώτρησης, συλλέγεται ένας μεγάλος αριθμός στοιχείων με τα οποία επαληθεύουν ή όχι τις ως τότε πληροφορίες και επεκτείνεται η γνώση όσον αφορά την γεωλογική δομή του υπεδάφους και την παρουσία ρευστών στους πόρους των πετρωμάτων.

Μόλις το γεωτρύπανο διατρήσει ένα πέτρωμα το οποίο από τις διαγραφίες προκύπτει ότι περιέχει σημαντική ποσότητα υδρογονανθράκων, προβάλλει το ερώτημα για τη δυνατότητα του σχηματισμού να παράγει τους ρευστούς υδρογονάνθρακες. Μια πρώτη μέτρηση της διαπερατότητας αλλά και της πραγματικής πίεσης του σχηματισμού, επιτυγχάνεται με την διεξαγωγή του Repeat Formation Test (RFT). Το RFT επιτρέπει την δοκιμή περισσότερων του ενός οριζόντων με μία και μόνη κάθοδο του οργάνου στο φρέαρ. Παρέχει επίσης την δυνατότητα λήψης δείγματος ρευστών υδρογονανθράκων για τον έλεγχο των ιδιοτήτων και της ποιότητάς των.

Το ύψος του κεφαλαίου που απαιτείται για την ανάπτυξη του κοιτάσματος επιβάλλει μία εκ των προτέρων γνώση των παραμέτρων του ταμιευτήρα, των διαστάσεών του και της παραγωγικής του δυνατότητας που μόνο τα τεστ ροής (well tests) μπορούν να προσφέρουν.

Το drill stem test (DST) δίνει την ευκαιρία διεξαγωγής των τεστ ροής ενώ ακόμα το φρέαρ δεν έχει ολοκληρωθεί. Η συσκευή του DST πραγματοποιεί μία προσωρινή συμπλήρωση χρησιμοποιώντας το στέλεχος του γεωτρύπανου και επανακτήσιμα packers. Αντιπροσωπευτικό δείγμα υδρογονανθράκων μπορεί να ληφθεί κατά την διάρκεια αυτού του τεστ καθώς επίσης και να αντληθούν πληροφορίες σχετικά με τον ταμιευτήρα συμπεριλαμβανομένων και της στατικής πίεσης του σχηματισμού καθώς και της πίεσης ροής. Για τον προσδιορισμό των εμπορικών ρυθμών παραγωγής του φρέατος, το DST, ανάλογα με την περίπτωση, μπορεί να διαρκέσει αρκετές ώρες ακόμα και μέρες. Με την εκτέλεση του τεστ ουσιαστικά προσομοιώνεται, για λίγες ώρες ή μέρες, η διαδικασία παραγωγής διαμέσω της συγκεκριμένης γεώτρησης. (Βαρότσης Ν. , 2014)

## **Αξιολόγηση ταμιευτήρα**

Προτού εγκριθεί η δαπάνη τεραστίων κεφαλαίων για την ανάπτυξη ενός κοιτάσματος, όλες οι πληροφορίες που συλλέγησαν κατά την ερευνητική φάση συνεκτιμώνται για την κατάρτιση ενός όσο το δυνατόν πιο αριστοποιημένου σχεδίου ανάπτυξης.

Θα υπολογιστεί ο όγκος των υδρογονανθράκων που περιέχονται μέσα στον ταμιευτήρα καθώς επίσης και το ποσοστό εξ αυτών που ελπίζεται τελικά να ανακτηθεί. Θα αποφασιστεί ο αριθμός των παραγωγικών γεωτρήσεων καθώς και τα σημεία στα οποία θα πραγματοποιηθούν με ένα συνδυασμό που θα επιτυγχάνει ελαχιστοποίηση του κόστους και μεγιστοποίηση της αποληψιμότητας. Θα καθοριστούν οι ρυθμοί παραγωγής από κάθε γεώτρηση και θα τεθούν οι προδιαγραφές των εγκαταστάσεων επεξεργασίας των παραγομένων ρευστών στην επιφάνεια.

Φυσικά και μαθηματικά μοντέλα θα εκπονηθούν και θα χρησιμοποιηθούν για την πρόβλεψη της παραγωγής και της κίνησης των ρευστών ανά πάσα χρονική στιγμή μέσα στο πορώδες μέσο. Θα παραγγελθούν οι εγκαταστάσεις καθώς και οι πλατφόρμες σε περίπτωση υποθαλάσσιου κοιτάσματος. (Βαρότσης Ν. , 2014)

## 2.1.4 Παραγωγή πετρελαίου

Η παραγωγή του κοιτάσματος παρακολουθείται μέρα με την μέρα και αναλύεται ανά γεώτρηση και ανά παράγουσα ζώνη. Η ακρίβεια των χρησιμοποιούμενων οργάνων μέτρησης της παροχής των παραγομένων φάσεων ελέγχεται ανά τακτά χρονικά διαστήματα. Σχεδιάζονται επίσης τεστ για την καταγραφή της εξέλιξης της τιμής της μέσης πίεσης στον ταμιευτήρα. Η μετατόπιση της θέσης των διεπιφανειών αερίου/πετρελαίου και πετρελαίου/νερού καταγράφεται με τον χρόνο.

Η ανάλυση των στοιχείων παραγωγής επιτρέπει την διάγνωση του κυρίαρχου μηχανισμού με τον οποίον παράγεται το ρευστό. Τούτο θα επιτρέψει την έγκαιρη λήψη μέτρων για την συνέχιση της παραγωγής υπό αριστοποιημένες συνθήκες και θα βελτιώσει τις προβλέψεις για την τελική αποληψιμότητα. Τα μοντέλα θα τροποποιηθούν ώστε να συμφωνήσουν με τα δεδομένα διορθώνοντας τις αρχικές εκτιμήσεις και προβλέψεις τους. Το γενικό μοντέλο προσομοίωσης (reservoir simulator) συνδυάζει στους κόλπους του όλα τα δεδομένα και αποτελεί την πλέον πολύπλοκη αλλά και ολοκληρωμένη προσέγγιση για το τι συμβαίνει μέσα στον ταμιευτήρα κατά την διάρκεια της εκμετάλλευσης.

Αν οι δεδομένες συνθήκες το επιβάλλουν, δευτερογενής παραγωγή θα τεθεί σε εφαρμογή με την έγχυση νερού από ειδικά τοποθετημένες γεωτρήσεις εισπίεσης εις τρόπον ώστε το νερό να αναπληρώσει στους πόρους του πετρώματος τους παραγόμενους υδρογονάνθρακες και να κρατήσει την πίεση στον ταμιευτήρα υψηλή για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα αυξάνοντας έτσι την αποληψιμότητα. Ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται στην εφαρμογή της μεθόδου διότι ορισμένα λάθη μπορούν να οδηγήσουν στο ακριβώς αντίθετο αποτέλεσμα.

Τέλος, αν οι συνθήκες το επιτρέπουν και την καθιστούν οικονομικά βιώσιμη, η μέθοδος τριτογενούς παραγωγής μπορεί να προγραμματιστεί και να τεθεί σε εφαρμογή με στόχο την ανάκτηση μερικών περαιτέρω % των αρχικώς περιεχομένων υδρογονανθράκων που μπορούν όμως κάλλιστα να αντιπροσωπεύουν αρκετά εκατομμύρια δολάρια επιπρόσθετο κέρδος. (Βαρότσης Ν. , 2014)

### Ανάλυση απόδοσης ταμιευτήρων

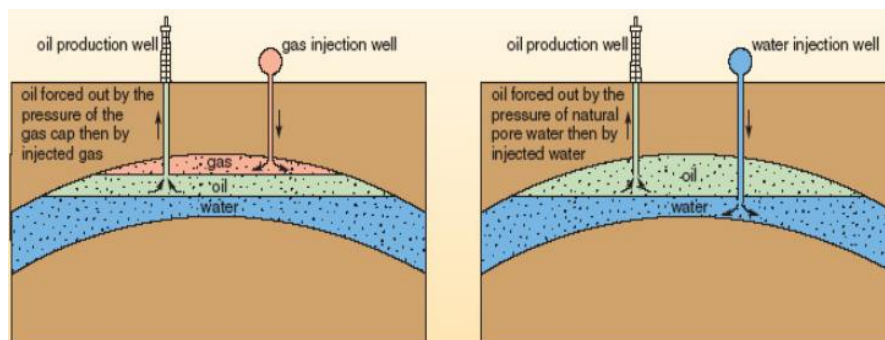
Η παραγωγή υδρογονανθράκων από ένα ταμιευτήρα στην επιφάνεια απαιτεί την κατανάλωση μίας ενέργειας η οποία είτε ανήκει στο σύστημα είτε προσφέρεται επί τούτου. Συνεπώς διακρίνουμε τα παρακάτω στάδια παραγωγής ανάλογα με την προέλευση της ενέργειας που δαπανάται για την παραγωγή:

- **Πρωτογενής παραγωγή** (primary production) όπου η ενέργεια προέρχεται αποκλειστικά από το σύστημα ταμιευτήρας-ρευστά ή και από πιθανό υποκείμενο ταμιευτήρα νερού με δυνατότητα επικοινωνίας με τον ταμιευτήρα υδρογονανθράκων. Πιο συγκεκριμένα η ενέργεια αυτή, μπορεί να προέρχεται από : την εκτόνωση του αερίου που αρχικά ήταν διαλυμένο στην υγρή φάση, την εκτόνωση της υπερκείμενης ζώνης αερίου η οποία ήταν παρούσα στον ταμιευτήρα κατά την ανακάλυψη του, τη διείσδυση νερού το οποίο προέρχεται από κάποιον γειτονικό υδροφόρο ορίζοντα ο οποίος επικοινωνεί με τον ταμιευτήρα, την επίδραση των δυνάμεων βαρύτητας.

Λαμβάνει χώρα κατά τα πρώτα στάδια της παραγωγής και επιδίωξη είναι να επεκταθεί για όσο το δυνατόν περισσότερο χρονικό διάστημα καθότι η εκμετάλλευση υπό αυτές τις συνθήκες είναι οικονομικότερη. Το χρονικό διάστημα αυτό, περιορίζεται από την πίεση του ταμιευτήρα όπου μεγάλη πτώση της συνεπάγεται και πτώση της αποληψιμότητας. Κατά την πρωτογενή παραγωγή ανακτάται συνήθως το 5-20% του OOIP-Original oil in place (η ποσότητα του πετρελαίου που υπήρχε στον ταμιευτήρα κατά την ανακάλυψή του).

- **Δευτερογενής παραγωγή** (secondary production) όπου οι παραγόμενες ποσότητες υδρογονανθράκων ανέρχονται στην επιφάνεια με την δαπάνη ενέργειας. Η έγχυση νερού

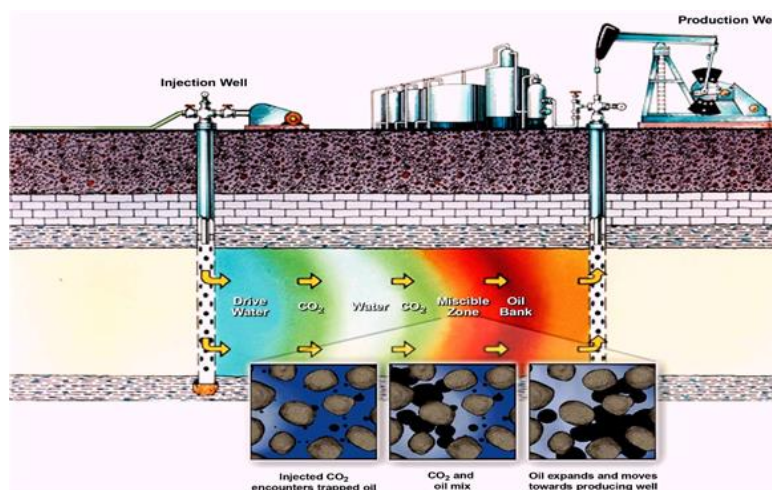
(waterflooding) και η έγχυση αερίου (dry gas) με στόχο την ώθηση των υδρογονανθράκων προς τα φρεάτια παραγωγής και χωρίς επιβολή φυσικοχημικών διεργασιών μεταξύ του εγχυομένου αερίου και του ρευστού του ταμιευτήρα.



Σχήμα 2.2: Μέθοδοι δευτερογενούς παραγωγής

Σημειώτέων ότι η δευτερογενής παραγωγή υδρογονανθράκων εφαρμόζεται κατά κόρον σήμερα σε παγκόσμια κλίμακα και συμβάλει σημαντικά στην τελική αποληψιμότητα. Αν η πίεση του ταμιευτήρα είναι πολύ χαμηλή, οι δύο παραγωγές (πρωτογενής και δευτερογενής) μπορούν να ξεκινήσουν ταυτόχρονα. Κατά τη δευτερογενή παραγωγή ανακτάται ένα 10 με 20% του ΟΟΙΡ. Οι τρόποι παραγωγής που περιλαμβάνουν θερμικές μεθόδους (thermal recovery) συγκαταλέγονται συνήθως στην δευτερογενή παραγωγή διότι ως επί το πλείστον περιορίζονται να βελτιώσουν τις ρεολογικές ιδιότητες των υδρογονανθράκων παρά να επιβάλλουν φυσικοχημικές διεργασίες.

- **Τριτογενής παραγωγή** ή επαυξημένη απόληψη πετρελαίου (tertiary production ή enhanced oil recovery) η οποία στοχεύει στον απεγκλωβισμό, με την βοήθεια φυσικοχημικών διεργασιών (μεταφορά μάζας στην περίπτωση της έγχυσης αερίου, μείωση της επιφανειακής τάσης στην περίπτωση του chemical flooding και CO<sub>2</sub>), μέρους του πετρελαίου το οποίο βρίσκεται παγιδευμένο στο πορώδες μέσο ένεκα των τριχοειδών πιέσεων που ανεπτύχθησαν, συνέπεια κυρίως της προηγούμενης δευτερογενούς παραγωγής.



Σχήμα 2.3: Μέθοδος τριτογενούς παραγωγής

Συνήθως μετά την ολοκλήρωση των συμβατικών μεθόδων παραγωγής (πρωτογενής και δευτερογενής ) μια ποσότητα της τάξεως του 60-70% του ΟΟΙΡ παραμένει εγκλωβισμένη λόγω τριχοειδών φαινομένων στον ταμιευτήρα είτε υπό την μορφή σταγόνων στους πόρους του πετρώματος, είτε με την μορφή ενός φιλμ προσροφημένου στην επιφάνεια των κόκκων του πετρώματος. Η μεγαλύτερη ποσότητα πετρελαίου παραμένει στις περιοχές του ταμιευτήρα στις οποίες δεν κατάφερε να φτάσει το εισπνεζόμενο ρευστό κατά τη δευτερογενή παραγωγή.

Κατά την τριτογενή παραγωγή, προσφέρεται ενέργεια και μάζα στο σύστημα, οι οποίες έχουν ως στόχο την αλλαγή των φυσικοχημικών ιδιοτήτων των ρευστών του ταμιευτήρα. Οι χρησιμοποιούμενες μέθοδοι μπορεί να είναι θερμικές, χημικές, μικροβιακές ή φυσικές. Από τις σημαντικότερες φυσικές μεθόδους της τριτογενούς παραγωγής, είναι η εκτόπιση του ρευστού του ταμιευτήρα με εισπίεση διοξειδίου του άνθρακα (ή και εμπλουτισμένου φυσικού αερίου) υπό συνθήκες ανάμειξης (CO<sub>2</sub>-EOR). Η μέθοδος αυτή εμφανίστηκε την δεκαετία του 1930 και αναπτύχθηκε σε μεγάλο βαθμό κατά τη δεκαετία του 1970. Εξακολουθεί να μελετάται μέχρι σήμερα και πλέον αποτελεί την βασικότερη τεχνική της επαυξημένης απόληψης πετρελαίου κυρίως για πετρέλαια τα οποία χαρακτηρίζονται σαν ελαφριά και σαν ενδιάμεσα. Η μέθοδος αυτή μπορεί να παρατείνει τη ζωή του ταμιευτήρα και μέχρι 15 με 20 χρόνια και να οδηγήσει στη ανάκτηση μιας επιπρόσθετης ποσότητας της τάξης του 15-25% του ΟΟΙΡ. Η διαδικασία ξεκινάει με την εισπίεση διοξειδίου του άνθρακα στη γεώτρηση, το οποίο αντιδρά φυσικά με το περιεχόμενο πετρέλαιο και με το πέτρωμα ταμιευτήρα και δημιουργεί συνθήκες ευνοϊκές για την ανάκτηση. Οι συνθήκες αυτές περιλαμβάνουν: τη μείωση των διεπιφανειακών τάσεων μεταξύ πετρελαίου και πετρώματος-ταμιευτήρα και την εξασθένηση των τριχοειδών πιέσεων οι οποίες είναι υπεύθυνες για την παρεμπόδιση της ροής των σταγόνων του πετρελαίου μέσω των πόρων του πετρώματος, τη διόγκωση του πετρελαίου (oil swelling) και την ακόλουθη μείωση του ιξώδους του.

Η δυνατότητα ανάμειξης του CO<sub>2</sub> με το πετρέλαιο, εξαρτάται από τις συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας που επικρατούν στον ταμιευτήρα, από τη σύσταση του πετρελαίου καθώς επίσης και από την πίεση με την οποία εισπνέζεται το CO<sub>2</sub> στον ταμιευτήρα. Εάν το CO<sub>2</sub>, μπορεί να εισέλθει στον ταμιευτήρα σε πίεση μεγαλύτερη από την ελάχιστη πίεση αναμειξιμότητας-Minimum Miscibility Pressure-MMP, τότε τα ρευστά θα είναι αναμείξιμα. Η ελάχιστη πίεση αναμειξιμότητας διαφέρει ανάλογα με τον τύπο του πετρελαίου και τη θερμοκρασία του συστήματος και συνήθως κυμαίνεται μεταξύ 100-150bar. Στην περίπτωση που το CO<sub>2</sub> είναι πλήρως αναμείξιμο με το πετρέλαιο, τότε σχηματίζεται σταδιακά ένα ενιαίο ρευστό. Όταν εισέρχεται το διοξείδιο του άνθρακα στον ταμιευτήρα, έρχεται αρχικά σε επαφή μια ποσότητα πετρελαίου και η σύστασή του εμπλουτίζεται με τα πτητικά συστατικά του πετρελαίου. Αυτό προκαλεί αντίστοιχη αλλαγή και στη σύσταση του πετρελαίου η οποία εμπλουτίζεται με CO<sub>2</sub>. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται σε στάδια, με ολοένα και περισσότερη ποσότητα CO<sub>2</sub> να διαλύεται στην πετρελαϊκή φάση. Η ζώνη εντός του ταμιευτήρα όπου πραγματοποιείται αυτό το φαινόμενο, ονομάζεται ζώνη αναμειξιμότητας (miscible zone). Τελικά, σχηματίζεται ένα μονοφασικό ρευστό, με χαμηλότερο ιξώδες και καλύτερη κινητικότητα από το αρχικό πετρέλαιο, το οποίο κατευθύνεται προς την γεώτρηση παραγωγής .

Στην περίπτωση που το διοξείδιο του άνθρακα δεν είναι πλήρως αναμείξιμο με το πετρέλαιο, τα τριχοειδή φαινόμενα δεν εξαλείφονται, μειώνεται όμως η επίδρασή τους και σε συνδυασμό με τη μείωση του ιξώδους είναι δυνατή η ανάκτηση μιας ποσότητας πετρελαίου (μικρότερη από αυτή που ανακτάται όταν το CO<sub>2</sub> είναι πλήρως αναμείξιμο με το πετρέλαιο).

Η αποτελεσματικότητα της εκτόπισης του πετρελαίου ελέγχεται από τον λόγο της κινητικότητας των ρευστών (mobility ratio). Αν το εκτοπιζόμενο ρευστό (π.χ. διοξείδιο του άνθρακα) έχει μεγαλύτερη κινητικότητα από το εκτοπιζόμενο ρευστό (πετρέλαιο), τότε η εκτόπιση θα είναι αναποτελεσματική. Το διοξείδιο του άνθρακα θα κινηθεί γρήγορα προς τις γεωτρήσεις παραγωγής και δεν θα έρθει σε σημαντική επαφή με την ποσότητα πετρελαίου που παραμένει στον ταμιευτήρα. Ο λόγος κινητικότητας είναι ευνοϊκός ως προς την παραγωγή του πετρελαίου όταν είναι χαμηλότερος της μονάδας.

Η συγκεκριμένη μέθοδος παραγωγής, όπως άλλωστε και οι περισσότερες μέθοδοι τριτογενούς παραγωγής, είναι δαπανηρή σε σχέση με τα προαναφερθέντα συμβατικά στάδια παραγωγής και απαιτεί εύκολη πρόσβαση σε μεγάλες ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα. Αυτό σημαίνει πρακτικά ότι πρέπει να υπάρχει σε κοντινή απόσταση, βιομηχανία που παράγει ως απόβλητο το διοξείδιο του άνθρακα ή κάποιο κοίτασμα διοξειδίου του άνθρακα έτσι ώστε η μεταφορά του και αγορά του να είναι όσο το δυνατόν οικονομικότερη. Το όφελος χρήσης του CO<sub>2</sub> μπορεί να είναι διπλό: τόσο ως προς την αποτελεσματική εκμετάλλευση των κοιτασμάτων πετρελαίου όσο και ως προς τη μείωση της συγκέντρωσης του διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα το οποίο είναι το κύριο αέριο του φαινομένου του θερμοκηπίου. Πολλές από τις βιομηχανίες που παράγουν ως απόβλητο διοξείδιο του άνθρακα, συνεργάζονται με πετρελαϊκές εταιρείες προκειμένου οι τελευταίες να το χρησιμοποιήσουν και έτσι να αποθηκευτεί μόνιμα κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. (Βαρότης Ν. , 2013)

## 2.1.5 Σύσταση πετρελαίου

Το πετρέλαιο είναι ένα εξαιρετικά σύνθετο μείγμα κυρίως υδρογονανθράκων και άλλων ενώσεων άνθρακα και υδρογόνου που περιέχουν επιπλέον άζωτο, οξυγόνο, θείο και άτομα μετάλλων. Τα σημεία βρασμού των συστατικών του πετρελαίου ξεπερνούν τους 40°C, ενώ ο αριθμός των ατόμων άνθρακα φθάνει τα 80-100 στα μόρια των συστατικών. (Πασαδάκης Ν. ,2010)

Η σύσταση του πετρελαίου παρουσιάζει έντονες διαφοροποιήσεις ανάλογα με την προέλευση και την ηλικία του. Ακόμη και στα όρια του ίδιου ταμιευτήρα ή και σε μία γεώτρηση δείγματα του παραγόμενου πετρελαίου μπορεί να διαφέρουν σημαντικά μεταξύ των. Η στοιχειακή ανάλυση σε ένα μεγάλο αριθμό δειγμάτων πετρελαίου, όπως παρατίθεται στον Πίνακα 2.1, δείχνει ότι η περιεκτικότητα των επιμέρους στοιχείων μεταβάλλεται σε σχετικά στενά όρια παρά τις μεγάλες διαφορές που παρουσιάζουν στις φυσικές ιδιότητες των.

Πρέπει να επισημανθεί ότι και τα υπόλοιπα στοιχεία πλην του άνθρακα και του υδρογόνου υπάρχουν κατά κύριο λόγο μέσα στα οργανικά μόρια.

Στοιχείο	Περιεκτικότητα (κ.β.)
Άνθρακας	83.0-87.0
Υδρογόνο	10.0-14.0
Άζωτο	0.1-2.0
Οξυγόνο	0.05-1.5
Θείο	0.05-6.0

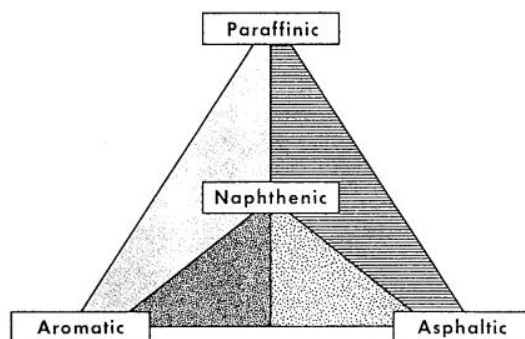
**Πίνακας 2.1:** Μέση στοιχειακή σύσταση του πετρελαίου

## Υδρογονάνθρακες

Οι υδρογονάνθρακες που απαντώνται στο πετρέλαιο είναι κυρίως αλκάνια, κυκλοαλκάνια και αρωματικές ενώσεις. Οι ολεφίνες (αλκένια) απαντώνται σπάνια ενώ ακόμη σπανιότερα τα αλκίνια (υδρογονάνθρακες της σειράς του ακετυλενίου) διότι η πίεση και η θερμοκρασία που επικρατούν στους ταμιευτήρες πετρελαίου επιτρέπουν τις αντιδράσεις προσθήκης στα μόρια των. (Πασαδάκης Ν. ,2010)

## 2.1.6 Συστηματική ταξινόμηση των πετρελαίων

Η συστηματική ταξινόμηση των πετρελαίων έχει σημαντική αξία στην διαχείριση τους, λόγω της τεράστιας ποικιλότητας που παρατηρείται στην σύσταση των. Δεδομένου ότι το τεχνολογικό σχήμα κάθε διυλιστηρίου είναι κατάλληλο μόνο για πετρέλαια των οποίων οι συστάσεις - και συνακόλουθα οι ιδιότητες - κυμαίνονται εντός συγκεκριμένων ορίων, γίνεται προφανής η ανάγκη ανάπτυξης συστημάτων ταξινόμησης - χαρακτηρισμού των παραγόμενων αργών πετρελαίων. Αρκετά σχήματα συστηματικής ταξινόμησης των πετρελαίων έχουν προταθεί αλλά μέχρι σήμερα κανένα δεν έχει γίνει συνολικά αποδεκτό. Το παλαιότερο και περισσότερο διαδεδομένο σύστημα διακρίνει τα πετρέλαια στην βάση της περιεκτικότητας τους σε παραφίνες, αρωματικά και ασφαλτικά συστατικά (Σχήμα 2.9). Κάθε πετρέλαιο αντιστοιχεί σε ένα σημείο στο εσωτερικό του τριγώνου και ανάλογα με την σχετική θέση του ονομάζεται αντίστοιχα. Συνήθως το σχήμα αυτό χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με τον διαχωρισμό του πετρελαίου σε ελαφρύ ή βαρύ και έτσι οι πιθανές υποκατηγορίες διπλασιάζονται. (Πασαδάκης Ν. ,2010)



Σχήμα 2.4: Διάγραμμα ταξινόμησης των πετρελαίων

Ο συνηθέστερα χρησιμοποιούμενος σήμερα δείκτης για την κατάταξη, περιλαμβανομένης και της εμπορικής, των πετρελαίων είναι ο λεγόμενος UOP characterization factor. Ο δείκτης ορίζεται ως

$$K = \frac{\sqrt[3]{T_B}}{d} \quad \text{όπου :}$$

**T<sub>B</sub>** : το μέσο σημείο ζέσεως του πετρελαίου σε βαθμούς Rankin (βαθμοί Fahrenheit + 460)

**d** : η σχετική πυκνότητα (60°/60°F)

Ο δείκτης αυτός έχει αποδειχθεί ότι λειτουργεί αθροιστικά σε μίγματα πετρελαίων. Υψηλές τιμές του δείκτη υποδεικνύουν παραφινικά πετρέλαια ενώ χαμηλές κυρίως ναφθενικά.

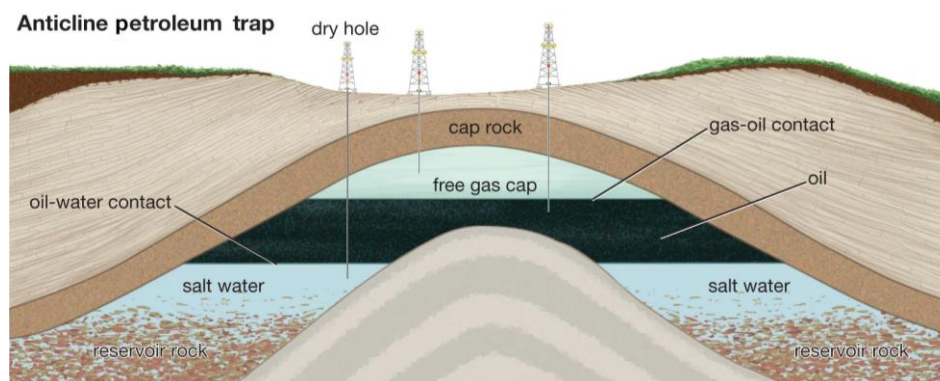
Υπάρχουν και άλλα σχήματα ταξινόμησης των πετρελαίων που στηρίζονται στην πυκνότητα, το ιξώδες, και την κατανομή του είδους των ατόμων του άνθρακα.

## 2.2 Φυσικό αέριο

Η πρώτη γεώτρηση για την παραγωγή του φυσικού αερίου (gas well) πραγματοποιήθηκε το 1821 στην περιοχή της Νέας Υόρκης, όμως η δυσκολία στην ανάπτυξη δικτύων διανομής καθυστέρησε την χρήση του για ένα περίπου αιώνα. Μέχρι το μεσοπόλεμο το φυσικό αέριο που παράγονταν από

ταμιευτήρες πετρελαίου και κατά την διύλιση θεωρείτο ανεπιθύμητο παραπροϊόν και καίγονταν στον πυρσό (flare) των εγκαταστάσεων ή απελευθερώνονταν στην ατμόσφαιρα. Πρακτικά η χρήση του φυσικού αερίου ως καυσίμου άρχισε μετά το Β. Παγκόσμιο Πόλεμο. (Πασαδάκης Ν. ,2010)

Το φυσικό αέριο είναι ένα μίγμα ελαφρών υδρογονανθράκων. Συναντάται υπό πίεση σε πορώδεις σχηματισμούς. Η ύπαρξη κοιτάσματος πετρελαίου στην ίδια περιοχή δεν είναι πάντα απαραίτητη. Στο Σχήμα 2.10 παρουσιάζεται μια σχηματική παράσταση ταμιευτήρα φυσικού αερίου. Το γεγονός ότι το φυσικό αέριο βρίσκεται υπό πίεση στους σχηματισμούς καθιστά εύκολη την παραγωγή του μέσω γεωτρήσεων.



**Σχήμα 2.5:** Σχηματική παράσταση ταμιευτήρα φυσικού αερίου

Τα κύρια συστατικά του φυσικού αερίου είναι τα ελαφρά αλκάνια - μεθάνιο, αιθάνιο, προπάνιο, κανονικό(η)βουτάνιο, ισο(ι)βουτάνιο, n-πεντάνιο, i-πεντάνιο και εξάνιο. Επίσης περιέχονται σε μικρότερες συγκεντρώσεις άζωτο, διοξείδιο του άνθρακα υδρόθειο και ευγενή αέρια. Συνήθως το μεθάνιο αποτελεί το 70-95% κ.ό. του φυσικού αερίου. Μία τυπική σύσταση του φυσικού αερίου παρουσιάζεται στον Πίνακα 2.2 : (Πασαδάκης Ν. ,2010)

Συστατικό	Μοριακός τύπος	Περιεκτικότητα (% κ.ο.)
Μεθάνιο	CH <sub>4</sub>	70-90
Αιθάνιο, Προπάνιο, Βουτάνιο	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> , C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> , C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0-20
Υδρογόνο	H <sub>2</sub>	Ιχνη
Διοξείδιο του άνθρακα	CO <sub>2</sub>	0-8
Οξυγόνο	O <sub>2</sub>	0-0.2
Άζωτο	N <sub>2</sub>	0-5
Υδρόθειο	H <sub>2</sub> S	0-5
Ευγενή αέρια	Ar, He, Ne, Xe	Ίχνη

**Πίνακας 2.2:** Σύσταση φυσικού αερίου

### 2.2.1 Προέλευση φυσικού αερίου

Το φυσικό αέριο θεωρείται ότι δημιουργήθηκε κατά κύριο λόγο από δύο διεργασίες, την θερμική (thermogenic) και την βιογενή (biogenic) αποδόμηση της οργανικής ύλης. Κατά την θερμική διασπάται η οργανική ύλη που είναι εγκλωβισμένη στους σχηματισμούς υπό την επίδραση κύρια

της θερμοκρασίας, ενώ κατά την βιογενή η αποδόμηση προκαλείται από την δράση μικροοργανισμών. Τέλος υποστηρίζεται από κάποιους ερευνητές ότι φυσικό αέριο, κυρίως μεθάνιο, μπορεί να σχηματίστηκε αβιογενικά (abiogenic) σε βαθύτερα στρώματα της γης και το οποίο δεν προέρχεται από αποδόμηση οργανικής ύλης. (Πασαδάκης Ν. ,2010)

### 2.2.2 Ιδιότητες φυσικού αερίου

Η γνώση της σύστασης του φυσικού αερίου είναι απαραίτητη για τον σχεδιασμό της εκμετάλλευσής του, δεδομένου ότι η ύπαρξη βαρύτερων του μεθανίου υδρογονανθράκων αλλάζει ριζικά τον τρόπο μεταφοράς και επεξεργασίας. Επίσης σημαντική εμπορικά και τεχνολογικά είναι η περιεκτικότητα σε υδρόθειο. Το αέριο αναφέρεται ως sour ή sweet ανάλογα με το περιεχόμενο CO<sub>2</sub> και υδρόθειο. Οι προδιαγραφές του φυσικού αερίου που καθορίζουν και την εμπορική αξία του περιλαμβάνουν την περιεκτικότητα σε νερό και υδρογονάνθρακες, την θερμογόνο δύναμη, την περιεκτικότητα σε όξινα συστατικά, και το ειδικό βάρος.

Η περιεκτικότητα σε υδρογονάνθρακες προσδιορίζεται συνήθως σαν συνάρτηση του ειδικού βάρους ή της θερμογόνου δύναμης. Στην περίπτωση που το αέριο περιέχει σχετικά υψηλές συγκεντρώσεις CO<sub>2</sub> και H<sub>2</sub>S η έμμεση μέτρηση είναι αδύνατη και απαιτείται χρωματογραφική ανάλυση.

Τα όξινα συστατικά του φυσικού αερίου είναι το υδρόθειο και το διοξείδιο του άνθρακα. Το υδρόθειο πέραν της δυσάρεστης οσμής που προσδίδει στο φυσικό αέριο είναι ιδιαίτερα τοξικό. Σε συγκεντρώσεις άνω των 600ppm προκαλεί ακαριαίο θάνατο. Επιπλέον είναι ιδιαίτερα διαβρωτικό για τα μεταλλικά μέρη των εγκαταστάσεων. Το διοξείδιο του άνθρακα ενισχύει την τάση του αερίου για δημιουργία υδριτών. Συνήθως απομακρύνεται και για να αυξηθεί η θερμογόνος δύναμη του αερίου.

Η περιεκτικότητα σε νερό είναι συνήθως έως 7lb ανά εκατομμύριο c.f. Ο ακριβής προσδιορισμός είναι σημαντικός ειδικά σε περιπτώσεις χρήσης του αερίου σε ψυχρά κλίματα. Η θερμογόνος δύναμη (gross calorific value) είναι η κύρια εμπορική ιδιότητα του φυσικού αερίου και είναι συνήθως της τάξης των 1020 BTU ανά κυβικό πόδι ή 39,1 MJ/m<sup>3</sup>. Προσεγγιστικά υπολογίζεται από τον τύπο (Dulong) όπου C, H, O και S οι περιεκτικότητες των στοιχείων κατά βάρος. (Πασαδάκης Ν. ,2010)

$$CV = 338.2 \times C + 1442.8 \times (H + \frac{1}{8} O) + 94.2 S \text{ (kJ/Kg)} \quad (2.1)$$

### 3 Ιδιότητες και συσχετίσεις πετρελαίου και φυσικού αερίου

Το αργό πετρέλαιο και το φυσικό αέριο είναι φυσικά μείγματα που αποτελούνται κυρίως από υδρογονάνθρακες και μικρές ποσότητες ενώσεων όπως θείο, οξυγόνο και άζωτο. Τα δείγματα αργού πετρελαίου και φυσικού αερίου χαρακτηρίζονται στη μηχανική πετρελαίου από τις διαφορετικές φυσικές τους ιδιότητες. Η σύνθεση του ρευστού ταμιευτήρα είναι παράγοντας, ο οποίος επηρεάζει τη συμπεριφορά πίεσης-όγκου-θερμοκρασίας (PVT). Οι ιδιότητες αργού πετρελαίου και φυσικού αερίου χρησιμοποιούνται προκειμένου να αξιολογηθούν τα αποθέματα πετρελαίου και φυσικού αερίου, η απόδοση ανάκτησης, η βελτιστοποίηση της παραγωγής κ.λπ. Πιο συγκεκριμένα, η συμπεριφορά φάσης του φυσικού αερίου πρέπει να αντιμετωπιστεί με ακρίβεια όχι μόνο για τους ταμιευτήρες φυσικού αερίου αλλά και λόγω του σημαντικού ρόλου του στους μηχανισμούς παραγωγής πετρελαίου των κορεσμένων ταμιευτήρων πετρελαίου. Ως εκ τούτου, απαιτείται ακριβής αξιολόγηση των ιδιοτήτων του ρευστού ταμιευτήρα για τη μοντελοποίηση και την προσομοίωση της παραγωγής πετρελαίου και φυσικού αερίου κατά τη διάρκεια ζωής ενός ταμιευτήρα υδρογονανθράκων. Η καλύτερη πηγή για την περιγραφή των ιδιοτήτων είναι εργαστηριακά πειράματα πραγματικών δειγμάτων ταμιευτήρων. Ωστόσο, υπάρχουν πολλοί συσχετισμοί που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την πρόβλεψη των ιδιοτήτων του πετρελαίου και του φυσικού αερίου. (Alireza Bahadori, 2017)

Στις ακόλουθες ενότητες, εξετάζονται οι περισσότερες φυσικές και θερμοδυναμικές ιδιότητες του αργού πετρελαίου (πυκνότητα πετρελαίου, ειδικό βάρος πετρελαίου, συμπίεστότητα, πίεση σημείου φυσαλίδας, αναλογία αερίου διαλύματος, συντελεστής όγκου σχηματισμού πετρελαίου και ιξώδες) και αερίου (πυκνότητα αερίου, συμπίεστότητα αερίου, συντελεστής όγκου σχηματισμού αερίου και ιξώδες) και παρουσιάζονται οι αντίστοιχες συσχετίσεις.

#### 3.1 Πυκνότητα πετρελαίου

Η πυκνότητα ορίζεται ως η μάζα μιας μονάδας όγκου σε μια καθορισμένη πίεση και θερμοκρασία. Υπάρχουν πολλές θεωρητικές και εμπειρικές εκφράσεις για την εκτίμηση της πυκνότητας του πετρελαίου. Αν και οι εμπειρικές συσχετίσεις είναι πολύ πιο εύχρηστες, αναπτύσσονται από πειραματικά δεδομένα. Επομένως, οι συσχετισμοί ισχύουν για περιορισμένα εύρη πίεσης, θερμοκρασίας και σύνθεσης. Ορισμένες θεωρητικές και εμπειρικές συσχετίσεις παρέχονται στις ακόλουθες ενότητες. (Alireza Bahadori, 2017)

##### 3.1.1 Καταστατικές εξισώσεις

Οι πυκνότητες αερίων και υγρών μπορούν να προσδιοριστούν από μοριακούς όγκους που προβλέπονται από κυβικές καταστατικές εξισώσεις (EOS). Γενικά, τα αποτελέσματα κυβικών καταστατικών εξισώσεων (EOS) όπως η Soave-Redlich-Kwong (SRK) δίνουν μια αξιόπιστη τιμή για την πυκνότητα αερίου. Ωστόσο, για την υγρή φάση οδηγεί σε υποτίμηση (Pedersen et al., 1984b). Η Péneloux et al. (1982) εισήγαγε μια διόρθωση για τον μοριακό όγκο που ελήφθη από την SRK EOS. Παρουσιάζεται μια τροποποιημένη μορφή της SRK EOS που προτάθηκε από την Péneloux :

$$P = \frac{RT}{(V - b)} - \frac{a}{[(V + c)(V + b + 2c)]} \quad (3.1)$$

όπου  $c$  είναι ένα μέτρο απόκλισης από την πραγματική πυκνότητα. Για ένα μείγμα, αυτή η παράμετρος λαμβάνεται από

$$c = \sum_i c_i z_i \quad (3.2)$$

όπου  $z_i$  και  $c_i$  είναι τα μοριακά κλάσματα και μια σταθερά για τη συνιστώσα  $i$ .

Για μη υδρογονανθρακικά συστατικά και υδρογονανθρακικά συστατικά με ανθρακικό αριθμό μικρότερο από 7, το  $c_i$  υπολογίζεται ως εξής:

$$c_i = 0.40768 \left( \frac{RT_{c_i}}{P_{c_i}} \right) (0.29441 - (Z_{RA})_i) \quad (3.3)$$

όπου το  $Z_{RA}$  είναι ο συντελεστής συμπιεστότητας Racket που ορίζεται ως (Spencer and Danner, 1972):

$$(Z_{RA})_i = 0.29056 - 0.08775 \omega_i \quad (3.4)$$

Η Pénélox et al. το 1982 πρότεινε μια συσχέτιση για την προσέγγιση της παραμέτρου  $c$  για το κλάσμα  $C_{7+}$ , αλλά λειτουργεί καλά μόνο για την αέρια φάση ή τη φάση συμπυκνώματος αερίου.

### 3.1.2 Εξίσωση Alani-Kennedy

Το 1960 οι Alani και Kennedy παρουσίασαν μια εξίσωση για την πρόβλεψη της πυκνότητας ρευστών. Τα πειραματικά αποτελέσματα αποκάλυψαν ότι αυτή η εξίσωση είναι μια αποτελεσματική και εξαιρετικά ακριβής μέθοδος για την εκτίμηση της πυκνότητας υγρής φάσης, αλλά δεν είναι αξιόπιστη για τον υπολογισμό της πυκνότητας ατμών. Η εξίσωση των Alani και Kennedy είναι η εξής:

$$V^3 - \left( \frac{RT}{P} + b \right) V^2 + a \frac{V}{P} - \frac{ab}{P} = 0 \quad (3.5)$$

Όπου

**P**: η πίεση, psia

**T**: η θερμοκρασία, °R

**V**: το ειδικός όγκος, ft<sup>3</sup>/lb mol,

**R**= 10,7335 lb ft<sup>3</sup> /in. °R lb mol

και τα **a** και **b** για καθαρά συστατικά λαμβάνονται από

$$a = K \exp\left(\frac{n}{T}\right) \quad (3.6)$$

$$b = mT + C \quad (3.7)$$

Τα **K** , **m** , **n** και **C** είναι σταθερές που παρατίθενται σε πίνακα στον Πίνακα 3.1 .

Component	K	N	m × 10 <sup>4</sup>	C
C <sub>1</sub> (70–300°F)	9160.6413	61.893223	3.3162472	0.50874303
C <sub>1</sub> (301–460°F)	147.47333	3247.4533	–14.072637	1.8326695
C <sub>2</sub> (100–249°F)	46,709.573	–404.48844	5.1520981	0.52239654
C <sub>2</sub> (250–460°F)	17,495.343	34.163551	2.8201736	0.62309877
C <sub>3</sub>	20,247.757	190.24420	2.1586448	0.90832519
i-C <sub>4</sub>	32,204.420	131.63171	3.3862284	1.1013834
n-C <sub>4</sub>	33,016.212	146.15445	2.9021257	1.1168144
n-C <sub>5</sub>	37,046.234	299.62630	2.1954785	1.4364289
n-C <sub>6</sub>	52,093.006	254.56097	3.6961858	1.5929406

**Πίνακας 3.1:** Τιμές σταθερών που χρησιμοποιούνται για διαφορετικούς καθαρούς υδρογονάνθρακες

Για το κλάσμα C<sub>7+</sub>, τα **a** και **b** προκύπτουν από τις ακόλουθες εξισώσεις:

$$\ln a_{C_{7+}} = 3.8405985 \times 10^{-3}MW - 9.5638281 \times 10^{-4}\frac{MW}{\rho} + 2.6180818 \quad (3.8)$$

$$\times \frac{10^2}{T} + 7.3104464 \times 10^{-6}MW^2 + 10.753517$$

$$b_{C_{7+}} = 3.4992740 \times 10^{-2}MW - 7.2725403\rho + 2.2323950 \times 10^{-4}T \quad (3.9)$$

$$- 1.6322572 \times 10^{-2}\frac{MW}{\rho} + 6.2256545$$

Όπου

**MW**: το μοριακό βάρος του κλάσματος C<sub>7+</sub>, lb<sub>m</sub>/lb mol

**ρ**: η πυκνότητα του C<sub>7+</sub> στα 14,7 psi και 520 °R, g/cm<sup>3</sup>

**T**: η θερμοκρασία, °R.

Για ένα μείγμα, χρησιμοποιείται ο ακόλουθος απλός κανόνας ανάμιξης για τον υπολογισμό των σταθερών **a** και **b**:

$$a = \sum_i a_i z_i \quad (3.10)$$

$$b = \sum_i b_i z_i \quad (3.11)$$

### 3.1.3 Μέθοδος Standing-Katz

Το 1942 οι Standing και Katz αρχικά πρότειναν μια συσχέτιση για την πυκνότητα σε γραφική μορφή. Αργότερα, μετατράπηκε στο ακόλουθο σύνολο εξισώσεων από τους Pedersen et al. το 1984,

το οποίο χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της πυκνότητας ρευστών. Τα αποτελέσματα αυτής της μεθόδου είναι πιο αποδεκτά για την υγρή φάση. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι όλες οι πυκνότητες είναι σε  $\text{g/cm}^3$ . Για τον προσδιορισμό της πυκνότητας, αρχικά η πυκνότητα του κλάσματος ( $\text{H}_2\text{S} + \text{C}_{3+}$ ) υπολογίζεται ως εξής :

$$\rho_{(\text{H}_2\text{S}+\text{C}_{3+})} = \frac{\sum_i \text{MW}_i x_i}{\sum_i \frac{\text{MW}_i x_i}{\rho_i}} \quad (3.12)$$

Όπου

$\rho$  ( $\text{H}_2\text{S} + \text{C}_{3+}$ ): η πυκνότητα του ( $\text{H}_2\text{S} + \text{C}_{3+}$ ) κλάσματος,  $\text{g/cm}^3$

$\text{MW}_i$ : το μοριακό βάρος του συστατικού  $i$

$\rho_i$ : η καθαρή πυκνότητα συστατικού στην κανονική συνθήκη,  $\text{g/cm}^3$ .

Ο δείκτης  $i$  περιλαμβάνει  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{C}_3$  και βαρύτερα συστατικά με αριθμό άνθρακα μεγαλύτερο από 3. Οι πυκνότητες για ορισμένα από τα καθαρά συστατικά σε κανονική συνθήκη (σε 1 atm και 15,6 °C) παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα .

Component	Density, $\text{g/cm}^3$
$\text{C}_3$	0.5072
$i\text{-C}_4$	0.5625
$n\text{-C}_4$	0.5836
$i\text{-C}_5$	0.6241
$n\text{-C}_5$	0.6305
$n\text{-C}_6$	0.6850
$\text{H}_2\text{S}$	0.7970

**Πίνακας 3.2:** Πυκνότητες καθαρών συστατικών σε κανονικές συνθήκες

Η επίδραση του συστατικού  $\text{C}_2$  εισήχθη στο μοντέλο. Άρα, η πυκνότητα του κλάσματος ( $\text{H}_2\text{S} + \text{C}_{2+}$ ) προσδιορίζεται από

$$(3.13) \quad \rho_{(\text{H}_2\text{S}+\text{C}_{2+})} = \rho_{(\text{H}_2\text{S}+\text{C}_{3+})} - A_0 - A_1 a_1 - A_2 a_2$$

όπου τα  $A_0$  ,  $A_1$  ,  $A_2$  ,  $a_1$  , και  $a_2$  δίνονται από

$$A_0 = 0.3158 w_2 \quad (3.14)$$

$$A_1 = -0.2583 w_2 \quad (3.15)$$

$$A_2 = 0.01457 w_2 \quad (3.16)$$

$$a_1 = 3.3 - 5.0 \rho_{(\text{H}_2\text{S}+\text{C}_{3+})} \quad (3.17)$$

$$a_2 = 1 + 15(\rho_{\text{H}_2\text{S}+\text{C}_{3+}} - 0.46) \left( 2.5 \rho_{(\text{H}_2\text{S}+\text{C}_{3+})} - 2.15 \right) \quad (3.18)$$

και  $w_2$  είναι το βάρος κλάσματος του συστατικού  $C_2$ .

Η επίδραση του κλάσματος  $CO_2$  έχει επίσης ληφθεί υπόψη. Επομένως, η πυκνότητα του ( $CO_2 + H_2S + C_{2+}$ ) λαμβάνεται με βάση τον πρόσθετο όγκο χρησιμοποιώντας την πυκνότητα του κλάσματος ( $H_2S + C_{2+}$ ) και την πυκνότητα  $CO_2$  σε τυπικές συνθήκες, π.χ.  $P = 14,7$  psi και  $T = 520$  °R.

Στη συνέχεια, η πυκνότητα του κλάσματος ( $H_2S + C_{2+}$ ) συν τα συστατικά  $C_1$  και  $N_2$  υπολογίζεται σε κανονική συνθήκη ως εξής:

$$\rho_0 = \rho_{(CO_2+H_2S+C_{2+})} - B_0 - B_1 b_1 \quad (3.19)$$

όπου τα  $B_0$ ,  $B_1$ ,  $B_2$ ,  $b_1$ ,  $b_2$  και  $b_3$  προκύπτουν από

$$B_0 = 0.088255 - 0.095509b_2 + 0.007403b_3 - 0.00603b_4 \quad (3.20)$$

$$B_1 = 0.142079 - 0.150175b_2 + 0.006679b_3 + 0.001163b_4 \quad (3.21)$$

$$b_1 = \rho_{(CO_2+H_2S+C_{2+})} - 0.65 \quad (3.22)$$

$$b_2 = 1 - 10w_1 \quad (3.23)$$

$$b_3 = 1 + 30w_1(5w_1 - 1) \quad (3.24)$$

$$b_4 = 1 - 60w_1 + 750w_1^2 - 2500w_1^3 \quad (3.25)$$

και  $w_1$  είναι το μοριακό κλάσμα του ( $C_1 + N_2$ ).

Στη συνέχεια, η πυκνότητα στις κανονικές συνθήκες θα πρέπει να ρυθμιστεί στις επιθυμητές συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης. Αρχικά, υπολογίζεται η πυκνότητα στην επικρατούσα πίεση και στην τυπική θερμοκρασία:

$$\rho_p = \rho_0 - C_0 - C_1 c_1 - C_2 c_2 - C_3 c_3 \quad (3.26)$$

Τα  $C_0$ ,  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$ ,  $c_1$ ,  $c_2$  και  $c_3$  παρουσιάζονται παρακάτω:

$$C_0 = -0.034674 + 0.026806c_4 + 0.003705c_5 + 0.000465c_6 \quad (3.27)$$

$$C_1 = -0.022712 + 0.015148c_4 + 0.004263c_5 + 0.000218c_6 \quad (3.28)$$

$$C_2 = -0.007692 + 0.0035218c_4 + 0.002482c_5 + 0.000397c_6 \quad (3.29)$$

$$C_3 = -0.001261 - 0.0002948c_4 + 0.000941c_5 + 0.000313c_6 \quad (3.30)$$

$$c_1 = 1 - \frac{2(P-500)}{10000} \quad (3.31)$$

$$c_2 = 1 + 6(P-500) \left[ \frac{(P-500)}{10000} - 1 \right] / 10000 \quad (3.32)$$

$$c_3 = 1 - \frac{12(P-500)}{10000} + 30 \left[ \frac{(P-500)}{10000} \right]^2 - 20 \left[ \frac{(P-500)}{10000} \right]^3 \quad (3.33)$$

$$c_4 = 3.4 - 5\rho_0 \quad (3.34)$$

$$c_5 = 1 + 15(\rho_0 - 0.48)(2.5\rho_0 - 2.2) \quad (3.35)$$

$$c_6 = 1 - 30(\rho_0 - 0.48) + 187.5(\rho_0 - 0.48)^2 - 312.5(\rho_0 - 0.48)^3 \quad (3.36)$$

όπου το **P** είναι σε psi. Τέλος, το  $\rho_p$  πρέπει να διορθωθεί για τη θερμοκρασία.

$$\rho = \rho_p - E_0 - E_1 e_1 - E_2 e_2 - E_3 e_3 \quad (3.37)$$

Όπου

$$E_0 = 0.055846 - 0.060601e_4 + 0.005275e_5 - 0.000750e_6 \quad (3.38)$$

$$E_1 = 0.037809 - 0.060601e_4 + 0.012043e_5 + 0.000455e_6 \quad (3.39)$$

$$E_2 = 0.021769 - 0.032396e_4 + 0.011015e_5 + 0.000247e_6 \quad (3.40)$$

$$E_3 = 0.009675 - 0.015500e_4 + 0.006520e_5 - 0.000653e_6 \quad (3.41)$$

$$e_1 = 1 - 2 \left[ \frac{(T-520)}{200} \right] \quad (3.42)$$

$$e_2 = 1 + 6 \left[ \frac{(T-520)}{200} \right] \left[ \frac{(T-520)}{200} - 1 \right] \quad (3.43)$$

$$e_3 = 1 - 12 \left[ \frac{(T-520)}{200} \right] + 30 \left[ \frac{(T-520)}{200} \right]^2 - 20 \left[ \frac{(T-520)}{200} \right]^3 \quad (3.44)$$

$$e_4 = 3.6 - 5\rho_r \quad (3.45)$$

$$e_5 = 1 + 15(\rho_p - 0.52)(2.5\rho_p - 2.3) \quad (3.46)$$

$$e_6 = 1 - 30(\rho_p - 0.52) + 187.5(\rho_p - 0.52)^2 - 312.5(\rho_p - 0.52)^3 \quad (3.47)$$

Σημειώστε ότι το **T** είναι σε °R στις παραπάνω εξισώσεις.

### 3.1.4 Μέθοδος Αμερικανικού Ινστιτούτου Πετρελαίου

Το Αμερικανικό Ινστιτούτο Πετρελαίου (API) (Daubert and Danner, 1997) πρότεινε την ακόλουθη εξίσωση για την πυκνότητα ενός μείγματος στις κανονικές συνθήκες:

$$\rho_l = \frac{\sum_{i=1}^n x_i MW_i}{\sum_{i=1}^n \frac{x_i MW_i}{\rho_i^o}} \quad (3.48)$$

όπου  $\rho^o$  είναι η καθαρή πυκνότητα συστατικού σε κανονικές συνθήκες, g/cm<sup>3</sup>.

Οι τιμές της πυκνότητας για ορισμένους μη υδρογονάνθρακες και καθαρούς υδρογονάνθρακες δίνονται στον Πίνακα 3.3.

Component	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Component	Density (g/cm <sup>3</sup> )
N <sub>2</sub>	0.804	<i>i</i> -C <sub>4</sub>	0.563
CO <sub>2</sub>	0.809	<i>n</i> -C <sub>4</sub>	0.584
H <sub>2</sub> S	0.834	<i>i</i> -C <sub>5</sub>	0.625
C <sub>1</sub>	0.300	<i>n</i> -C <sub>5</sub>	0.631
C <sub>2</sub>	0.356	C <sub>6</sub>	0.664
C <sub>3</sub>	0.508		

**Πίνακας 3.3:** Πυκνότητα ορισμένων καθαρών συστατικών υδρογονανθράκων και μη υδρογονανθράκων

Η πυκνότητα σε κανονικές συνθήκες πρέπει να διορθωθεί με C1 και C2, που είναι οι συντελεστές συσχέτισης πυκνότητας για την κανονική συνθήκη και την πραγματική συνθήκη, αντίστοιχα. Οι πυκνότητες στην επιθυμητή συνθήκη και στην κανονική συνθήκη συσχετίζονται ως εξής:

$$\rho = \left( \frac{C_2}{C_1} \right) \rho_l \quad (3.49)$$

Γενικά, η παράμετρος **C** δίνεται από

$$C = A_1 + A_2 T_r' + A_3 T_r'^2 + A_4 T_r'^3 \quad (3.50)$$

όπου το **A<sub>i</sub>** μπορεί να εκφραστεί ως

$$A_i = B_1 + B_2 P_r' + B_3 P_r'^2 + B_4 P_r'^3 + B_5 P_r'^4 \quad (3.51)$$

Οι τιμές του **B<sub>i</sub>** για κάθε **A<sub>i</sub>** παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.4.

	<b>B<sub>1</sub></b>	<b>B<sub>2</sub></b>	<b>B<sub>3</sub></b>	<b>B<sub>4</sub></b>	<b>B<sub>5</sub></b>
A <sub>1</sub>	1.6368	-0.04615	$2.1138 \times 10^{-3}$	$-0.7845 \times 10^{-5}$	$0.6923 \times 10^{-6}$
A <sub>2</sub>	-1.9693	0.21874	$-8.0028 \times 10^{-3}$	$-8.2328 \times 10^{-5}$	$5.2604 \times 10^{-6}$
A <sub>3</sub>	2.4638	-0.36461	$12.8763 \times 10^{-3}$	$14.8059 \times 10^{-5}$	$-8.6895 \times 10^{-6}$
A <sub>4</sub>	-1.5841	0.25136	$-11.3805 \times 10^{-3}$	$9.5672 \times 10^{-5}$	$2.1812 \times 10^{-6}$

**Πίνακας 3.4:** B<sub>i</sub> Τιμές των εξισώσεων A<sub>1</sub> , A<sub>2</sub> , A<sub>3</sub> και A<sub>4</sub>

**T'<sub>r</sub>** (T/T<sub>c</sub>) και **P'<sub>r</sub>** (P/P<sub>c</sub>) είναι η μειωμένη θερμοκρασία και πίεση του μείγματος, αντίστοιχα. Για τον υπολογισμό των T'<sub>r</sub> και P'<sub>r</sub> για ένα μείγμα, απαιτείται μια μέθοδος για τον προσδιορισμό των **T<sub>c</sub>** και **P<sub>c</sub>** ενός μείγματος. Για το σκοπό αυτό, ο μοριακός μέσος όρος των κρίσιμων ιδιοτήτων μπορεί να εφαρμοστεί ως απλός κανόνας ανάμειξης.

### 3.1.5 Άλλες Μέθοδοι

Πάνω από την πίεση του σημείου φυσαλίδας, η πυκνότητα μπορεί να γραφτεί χρησιμοποιώντας τον ορισμό της συμπιεστότητας πετρελαίου ως

$$\rho_o = \rho_{ob} \exp[C_o(P - P_b)] \quad (3.52)$$

όπου **ρ<sub>ob</sub>** είναι η πυκνότητα του πετρελαίου στην πίεση του σημείου φυσαλίδας, lb/ft<sup>3</sup>, και **C<sub>o</sub>** είναι η συμπιεστότητα του πετρελαίου σε μέση πίεση P και P<sub>b</sub> , 1/psi.

Επομένως, η πυκνότητα του πετρελαίου μπορεί να υπολογιστεί ενσωματώνοντας την παραπάνω εξίσωση και τους εμπειρικούς συσχετισμούς συμπιεστότητας πετρελαίου, που θα συζητηθούν αργότερα.

Η ακόλουθη εξίσωση περιγράφει την πυκνότητα του πετρελαίου κάτω από την πίεση του σημείου φυσαλίδας χρησιμοποιώντας τον συντελεστή όγκου σχηματισμού πετρελαίου, την αναλογία αερίου διαλύματος, την ειδική βαρύτητα πετρελαίου και το ειδικό βάρος του αερίου, τα οποία θα οριστούν όλα αργότερα:

$$\rho_o = \frac{62.4 \gamma_o + 0.0136 R_s \gamma_g}{B_o} \quad (3.53)$$

όπου **γ<sub>o</sub>** είναι το ειδικό βάρος του πετρελαίου. Το **R<sub>s</sub>** είναι η αναλογία διαλύματος αερίου/ πετρελαίου, SCF/STB, **γ<sub>g</sub>** είναι η ειδική βαρύτητα του αερίου. και **B<sub>o</sub>** είναι ο συντελεστής όγκου σχηματισμού πετρελαίου, bbl/STB.

Πρέπει να σημειωθεί ότι υπάρχουν αρκετές συσχετίσεις για τον συντελεστή όγκου σχηματισμού πετρελαίου και την αναλογία αερίου διαλύματος που μπορεί να συζευχθεί με την παραπάνω εξίσωση για την εκτίμηση της πυκνότητας πετρελαίου κάτω από την πίεση του σημείου φυσαλίδας.

## 3.2 Πυκνότητα φυσικού αερίου

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η πυκνότητα ορίζεται ως ο λόγος της μάζας ανά μονάδα όγκου ενός υλικού. Χρησιμοποιώντας έναν νόμο πραγματικών αερίων προκύπτει η ακόλουθη εξίσωση για

την πυκνότητα του αερίου σε μια επικρατούσα πίεση και θερμοκρασία. Εδώ, το MW είναι μοριακό βάρος, το R είναι η καθολική σταθερά του αερίου και το Z είναι ο συντελεστής συμπιεστότητας του αερίου.

$$\rho = \frac{P \text{ MW}}{ZRT} \quad (3.54)$$

Σε αντίθεση με την υγρή φάση, οι κυβικές καταστατικές εξισώσεις δίνουν αξιόπιστες πυκνότητες αερίου. Επομένως, οι κυβικές καταστατικές εξισώσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως κατάλληλη μέθοδος για τον προσδιορισμό της πυκνότητας αερίου.

### Θεωρητικός Προσδιορισμός Πυκνότητας Αερίου

Για τον προσδιορισμό της πυκνότητας του αερίου σε μια καθορισμένη θερμοκρασία και πίεση απαιτείται ο συντελεστής συμπιεστότητας. Τα διαγράμματα Standing και Katz (1942a,b) για τον παράγοντα Z είναι χρήσιμα εργαλεία για μηχανικούς σκοπούς. Εξέφρασαν τον παράγοντα Z ως συνάρτηση των  $T_r$  και  $P_r$ . Οι Standing και Katz χρησιμοποίησαν δεδομένα από 16 μείγματα φυσικού αερίου σε ένα ευρύ φάσμα συνθέσεων. Η αποδεκτή ακρίβεια των διαγραμμάτων Standing-Katz ενθάρρυνε πολλούς ερευνητές να τα μετατρέψουν σε ένα σύνολο εξισώσεων. Ο Abou-Kassem (Dranchuk και Kassem, 1975) συσχέτισε τον παράγοντα Z με τα  $T_r$  και  $P_r$  σε περιοχές 1-3 και 2-30 για  $T_r$  και  $P_r$ , αντίστοιχα, ως εξής:

$$Z = 1 + \left( A_1 + \frac{A_2}{T_r} + \frac{A_3}{T_r^3} + \frac{A_4}{T_r^4} + \frac{A_5}{T_r^5} \right) \rho_r + \left( A_6 + \frac{A_7}{T_r} + \frac{A_8}{T_r^3} \right) \rho_r^2 \quad (3.55)$$

$$- A_9 \left( \frac{A_7}{T_r} + \frac{A_8}{T_r^3} \right) \rho_r^5 + A_{10} (1 + A_{11} \rho_r^2) \left( \frac{\rho_r^2}{T_r^3} \right) \exp(-A_{11} \rho_r^2)$$

όπου η ψευδο μειωμένη πυκνότητα ( $\rho_r$ ) ορίζεται ως εξής

$$\rho_r = \frac{0.27 P_r}{Z \times T_r} \quad (3.56)$$

Οι σταθερές παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.13 :

Constant	Value
A <sub>1</sub>	0.3265
A <sub>2</sub>	-1.0700
A <sub>3</sub>	-0.5339
A <sub>4</sub>	0.01569
A <sub>5</sub>	-0.05165
A <sub>6</sub>	0.5475
A <sub>7</sub>	-0.7361
A <sub>8</sub>	0.1844
A <sub>10</sub>	0.1056
A <sub>11</sub>	0.6134
A <sub>12</sub>	0.7210

**Πίνακας 3.5:** Συντελεστές της εξίσωσης Z

Η κρίσιμη πίεση και η κρίσιμη θερμοκρασία ενός μείγματος υπολογίζονται από

$$P_r = \frac{P}{P_c} \quad , \quad P_c = \sum_i z_i P_{ci} \quad (3.57)$$

$$T_r = \frac{T}{T_c} \quad , \quad T_c = \sum_i z_i T_{ci} \quad (3.58)$$

Συνήθως, τα ρευστά πετρελαίου περιέχουν ένα μη υδρογονανθρακικό συστατικό. Οι Wichert και Aziz (1972) παρουσίασαν τις ακόλουθες σχέσεις για να εξετάσουν τις επιδράσεις των μη υδρογονανθρακικών συστατικών σε υπολογισμούς κρίσιμης θερμοκρασίας και πίεσης:

$$P_{cp}^* = P_{cp} \frac{T_{cp} - \Delta T_{wa}}{T_{cp} + \gamma_{H_2S}(1 - \gamma_{H_2S})\Delta T_{wa}} \quad (3.59)$$

$$T_{cp}^* = T_{cp} - \Delta T_{wa} \quad (3.60)$$

Όπου

$$\Delta T_{wa} = a \left[ (\gamma_{CO_2} + \gamma_{H_2S})^{.9} - (\gamma_{CO_2} + \gamma_{H_2S})^{1.6} + 0.125 (\gamma_{CO_2}^{0.5} - \gamma_{H_2S}^4)^{.9} \right] \quad (3.61)$$

Σημειώστε ότι στην παραπάνω εξίσωση το  $a$  ισούται με 120 °R ή 66.666 °K.

### 3.3 Φυσικοχημικές ιδιότητες ρευστών

Η συμπεριφορά των ρευστών κατά τα διάφορα στάδια μελέτης, ερμηνεύεται από τις φυσικοχημικές τους ιδιότητες. Οι ιδιότητες αυτές εξαρτώνται από τη σύσταση που είναι αποτέλεσμα της προέλευσης του οργανικού υλικού, τις διάφορες επιδράσεις που δέχτηκε κατά τη διάρκεια της γεωλογικής του ιστορίας καθώς και τις διάφορες αλλοιώσεις που υπέστη.

Το πετρέλαιο αποτελεί ένα μείγμα πολλών συστατικών, κυρίως υδρογονανθράκων. Λόγω της μεγάλης ποικιλίας των υδρογονανθράκων, στα μίγματά τους υπάρχει μεγάλη ποικιλία από φυσικοχημικές ιδιότητες. Ως εκ τούτου, η πρόβλεψη και η θεωρητική διερεύνηση των μειγμάτων τους καθίσταται ιδιαίτερα δύσκολη. Η κατηγοριοποίησή τους σε 3 κατηγορίες υδρογονανθράκων (αλκάλια, αρωματικοί υδρογονάνθρακες, κυκλοαλκάνια) και το γεγονός ότι ένα μεγάλο ποσοστό τους (έως και άνω του 90% κατά βάρος) αποτελείται από 2 μόνο στοιχεία, άνθρακα και υδρογόνο, είναι δύο πλεονεκτήματα που βοηθούν στην κατανόηση της φυσικοχημικής συμπεριφοράς τους.

## 4 Κυβικές καταστατικές εξισώσεις

Οι περισσότεροι υπολογισμοί PVT που πραγματοποιούνται για μείγματα πετρελαίου και αερίου βασίζονται σε κάποια κυβική καταστατική εξίσωση. Αυτός ο τύπος εξισώσεων χρονολογείται πριν από περισσότερα από 100 χρόνια στη διάσημη εξίσωση van der Waals (van der Waals, 1873). Οι κυβικές καταστατικές εξισώσεις που χρησιμοποιούνται πιο συχνά στη βιομηχανία πετρελαίου σήμερα μοιάζουν πολύ με την εξίσωση van der Waals, αλλά χρειάστηκε σχεδόν ένας αιώνας για την βιομηχανία πετρελαίου να αποδεχθεί αυτό το είδος εξίσωσης ως πολύτιμο εργαλείο μηχανικής. Η πρώτη κυβική καταστατική εξίσωση για να αποκτήσει ευρεία χρήση ήταν αυτή που παρουσίασαν οι Redlich και Kwong το 1949. Ο Soave (1972) και οι Peng και Robinson (1976 και 1978) ανέπτυξαν περαιτέρω αυτήν την εξίσωση στη δεκαετία του 1970. Το 1982 Οι Peneloux και άλλοι παρουσίασαν μια ιδέα μετατόπισης όγκου με σκοπό τη βελτίωση της πυκνότητας του υγρού προβλέψεις των δύο προηγούμενων εξισώσεων. Η αυξημένη χρήση κυβικών καταστατικών εξισώσεων που παρατηρείται τα τελευταία 30 χρόνια οφείλονται σε μεγάλο βαθμό στη διαθεσιμότητα προσιτής ισχύος υπολογιστών που κάνουν εφικτό, μέσα σε δευτερόλεπτα, να εκτελεστούν εκατομμύρια ισορροπίας και φυσικής φάσης πολλαπλών συστατικών υπολογισμοί ιδιοτήτων χρησιμοποιώντας μια καταστατική εξίσωση ως θερμοδυναμική βάση. Αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζει μερικές από τις πιο δημοφιλείς κυβικές καταστατικές εξισώσεις. (Karen Schou Pedersen, Peter L. Christensen, 2007)

### 4.1 Εξίσωση Van Der Waals

Όταν εξήγαγε την πρώτη κυβική εξίσωση κατάστασης, ο van der Waals χρησιμοποίησε τη συμπεριφορά φάσης ενός καθαρού συστατικού ως σημείο εκκίνησης. Το σχήμα 4.1 δείχνει σχηματικά τις καμπύλες πίεσης (P) έναντι μοριακού όγκου (V) για ένα καθαρό συστατικό σε διάφορες θερμοκρασίες. Σε θερμοκρασίες πολύ πάνω από την κρίσιμη ( $T_1$  στο Σχήμα 4.1), οι καμπύλες PV παρουσιάζουν υπερβολικό σχήμα που υποδηλώνει ότι η πίεση είναι αντιστρόφως ανάλογη με τον μοριακό όγκο. Αυτή η συμπεριφορά είναι γνωστή από τον νόμο του ιδανικού αερίου:

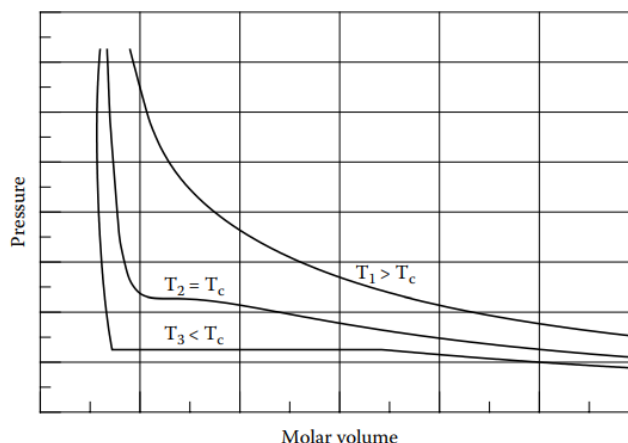
$$P = \frac{RT}{V} \quad (4.1)$$

όπου R ισούται με τη σταθερά αερίων και T την απόλυτη θερμοκρασία. Ο μοριακός όγκος ενός συστατικού που συμπεριφέρεται σαν ιδανικό αέριο επίσης σε υψηλές πιέσεις θα πλησίαζε ασυμπτωτικά το μηδέν για την πίεση που πηγαίνει προς το άπειρο. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.1, αυτό δεν συμβαίνει. Με την αύξηση της πίεσης, ο μοριακός όγκος πλησιάζει μια οριακή τιμή, την οποία ο van der Waals ονόμασε b.

$$V = \frac{RT}{P} \quad (4.2)$$

προτείνει ότι η παράμετρος b πρέπει να εισέλθει στην εξίσωση ως εξής:

$$V = \frac{RT}{P} + b \quad (4.3)$$



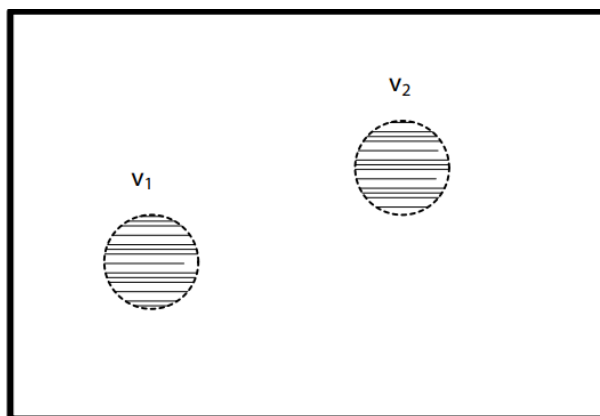
**Σχήμα 4.1:** Καμπύλη PV για καθαρό συστατικό

που θα έδινε την ακόλουθη έκφραση για το P:

$$P = \frac{RT}{V-b} \quad (4.4)$$

Σε θερμοκρασίες κάτω από την κρίσιμη ( $T_3$  στο Σχήμα 4.1), μπορεί να λάβει χώρα μια μετάβαση φάσης ατμού σε υγρό. Θεωρήστε ένα συστατικό σε θερμοκρασία  $T_3$  αρχικά σε χαμηλή πίεση και σε μορφή ατμού. Μειώνοντας τον όγκο διατηρώντας μια σταθερή θερμοκρασία,  $T_3$ , η πίεση θα αυξηθεί και σε κάποιο στάδιο μπορεί να αρχίσει να σχηματίζεται μια υγρή φάση που δείχνει ότι έχει επιτευχθεί η πίεση του σημείου δρόσου. Μια περαιτέρω μείωση του όγκου θα λάβει χώρα σε σταθερή πίεση έως ότου όλος ο ατμός μετατραπεί σε υγρό. Καθώς ένα υγρό είναι σχεδόν ασυμπίεστο, μια περαιτέρω μείωση του όγκου θα σχετίζεται με μια απότομη αύξηση της πίεσης, όπως φαίνεται επίσης στο Σχήμα 4.1. Το γεγονός ότι η ουσία μπορεί να υποστεί μια μετάβαση από μια αέρια μορφή με τα μόρια μακριά σε μια υγρή μορφή με τα μόρια πολύ πιο κοντά μεταξύ τους δείχνει την ύπαρξη ελκτικών δυνάμεων που δρουν μεταξύ των μορίων. Αυτές οι ελκτικές δυνάμεις δεν υπολογίζονται στην Εξίσωση 4.4, η οποία επομένως δεν είναι ικανή να περιγράψει μια μετάβαση φάσης ατμού σε υγρό.

Το σχήμα 4.2 δείχνει ένα δοχείο γεμάτο με αέριο. Τα δύο στοιχεία μικρού όγκου,  $v_1$  και  $v_2$ , περιέχουν αρχικά ένα μόριο το καθένα. Ας υποθέσουμε ότι η δύναμη μεταξύ των δύο στοιχείων όγκου είναι  $f$ . Εάν προστεθεί ένα άλλο μόριο στο  $v_2$  διατηρώντας ένα μόριο στο  $v_1$ , η δύναμη που ενεργεί μεταξύ των δύο στοιχείων θα είναι  $2f$ . Η προσθήκη ενός τρίτου μορίου στο  $v_2$  θα αυξήσει τη δύναμη σε  $3f$ , και ούτω καθεξής. Η δύναμη έλξης μεταξύ των δύο στοιχείων όγκου είναι επομένως ανάλογη με το  $c_2$ , τη συγκέντρωση των μορίων στο  $v_2$ . Εάν προστεθεί ένα δεύτερο, τρίτο, κ.λπ., μόριο στο  $v_1$ , διατηρώντας σταθερό τον αριθμό των μορίων στο  $v_2$ , η δύναμη θα διπλασιαστεί, θα τριπλασιαστεί κ.λπ. Η δύναμη είναι επομένως επίσης ανάλογη με το  $c_1$ , τη συγκέντρωση των μορίων στο  $v_1$ . Έτσι, η δύναμη που ασκείται μεταξύ των δύο στοιχείων όγκου είναι ανάλογη του  $c_1 \times c_2$ . Στην πραγματικότητα, η συγκέντρωση στο αέριο είναι παντού η ίδια, δηλ.  $c = c_1 = c_2$ , όπου  $c$  είναι η μοριακή συγκέντρωση στο δοχείο. Η συγκέντρωση  $c$  είναι αντιστρόφως ανάλογη με τον μοριακό όγκο,  $V$ , υπονοώντας ότι η ελκτική δύναμη είναι ανάλογη με το  $1/V^2$ . (Karen Schou Pedersen, Peter L. Christensen, 2007)



**Σχήμα 4.2:** Αλληλεπίδραση μεταξύ δύο στοιχείων όγκου σε ένα δοχείο γεμάτο με αέριο

Με βάση αυτόν τον τύπο εκτιμήσεων, ο van der Waals διαπίστωσε ότι ο ελκυστικός όρος πρέπει να είναι μια σταθερά επί  $1/V^2$  που οδηγεί σε:

$$P = \frac{RT}{V - b} - \frac{a}{V^2} \quad (4.5)$$

που είναι η τελική μορφή της εξίσωσης van der Waals. Οι σταθερές  $a$  και  $b$  είναι εξίσωση παραμέτρων κατάστασης, οι τιμές των οποίων βρίσκονται με την αξιολόγηση της καμπύλης  $PV$  για την κρίσιμη θερμοκρασία. Αυτή η καμπύλη ονομάζεται επίσης κρίσιμη ισόθερμη. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.1, αυτή η καμπύλη έχει ένα σημείο κάμψης ακριβώς στο κρίσιμο σημείο, υπονοώντας

$$v \left( \frac{\partial P}{\partial V} \right)_{T \text{ at } T=T_c, P=P_c} = \left( \frac{\partial^2 P}{\partial V^2} \right)_{T \text{ at } T=T_c, P=P_c} = 0 \quad (4.6)$$

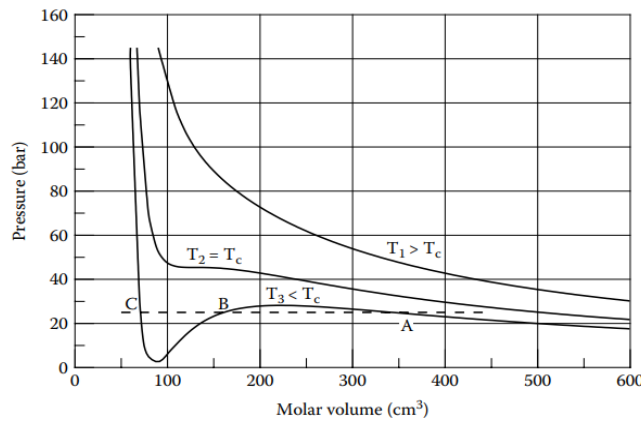
Στο κρίσιμο σημείο,  $V$  ισούται με τον μοριακό κρίσιμο όγκο  $V_c$ , ο οποίος σχετίζεται με το  $T_c$  και το  $P_c$  μέσω της εξίσωσης 4.5 και της εξίσωσης 4.6. Συνολικά πέντε σταθερές εισέρχονται στην Εξίσωση 4.5 και στην Εξίσωση 4.6 (σύνολο τρεις εξισώσεις), αυτές οι σταθερές είναι οι  $T_c$ ,  $P_c$ ,  $V_c$ ,  $a$  και  $b$ . Μία εξίσωση χρησιμοποιείται για την εξάλειψη του  $V_c$ . Οι δύο υπόλοιπες εξισώσεις αναδιατάσσονται για να δώσουν τις ακόλουθες εκφράσεις για τα  $a$  και  $b$ :

$$a = \frac{27R^2T_c^2}{64P_c} \quad (4.7)$$

$$b = \frac{RT_c}{8P_c} \quad (4.8)$$

Η εξίσωση 4.5 μπορεί να χρησιμοποιηθεί για οποιαδήποτε καθαρή ουσία για την οποία είναι γνωστά τα  $T_c$  και  $P_c$ . Με αναδιάταξη η εξίσωση :

$$V^3 - \left( b + \frac{RT}{P} \right) V^2 + \frac{a}{P} V - \frac{ab}{P} = 0 \quad (4.9)$$



**Σχήμα 4.3:** Καμπύλες PV για μεθάνιο σε  $T_1 = 248 \text{ K} (>T_c)$ ,  $T_2 = 190,6 \text{ K} (=T_c)$  και  $T_3 = 162 \text{ K} (<T_c)$  που υπολογίζονται από την εξίσωση van der Waals. Η διακεκομμένη γραμμή δείχνει τη θέση της τάσης ατμών στο  $T = T_3$

Φαίνεται ότι η εξίσωση van der Waals είναι κυβική σε  $V$ , γεγονός που εξηγεί γιατί ο van der Waals και οι σχετικές εξισώσεις ονομάζονται κυβικές καταστατικές εξισώσεις. Το σχήμα 4.3 δείχνει τις καμπύλες PV για το μεθάνιο που υπολογίζονται χρησιμοποιώντας την εξίσωση van der Waals. Στις θερμοκρασίες  $T_1 > T_c$  και  $T_2 = T_c$ , οι καμπύλες συμφωνούν ποιοτικά με τις πειραματικές παρατηρήσεις όπως σκιαγραφούνται στο Σχήμα 4.1. Στο  $T_3 < T_c$ , η μετάβαση φάσης ατμού σε υγρό δεν αντιπροσωπεύεται από μια σταθερή γραμμή στο  $P$  όπως στο σχήμα 4.1. Ξεκινώντας από την πλευρά του υψηλού όγκου (ατμών), η καμπύλη PV διασχίζει την πειραματική καμπύλη τάσης ατμών στο σημείο A μετά την οποία περνά από ένα μέγιστο, διασχίζει τη γραμμή πίεσης ατμών για δεύτερη φορά στο σημείο B, διέρχεται από ένα ελάχιστο, και τελικά διασχίζει τη γραμμή πίεσης ατμών για τρίτη φορά στο σημείο C. Ο μοριακός όγκος στο σημείο A ισούται με τον μοριακό όγκο της φάσης ατμού στο σημείο κορεσμού. Ο μοριακός όγκος στο σημείο C ισούται με τον μοριακό όγκο υγρής φάσης στο σημείο κορεσμού. Ο μοριακός όγκος στο σημείο B δεν έχει φυσική σημασία και ολόκληρο το τμήμα της καμπύλης PV μεταξύ A και Γ μπορεί να αγνοηθεί. Ως εκ τούτου, η εξίσωση van der Waals φαίνεται να περιγράφει ποιοτικά τη συμπεριφορά φάσης καθαρού συστατικού σε θερμοκρασίες πάνω, ίσες και κάτω από την κρίσιμη θερμοκρασία.

Οι μεταγενέστερες εξελίξεις των κυβικών καταστατικών εξισώσεων έχουν κυρίως χρησιμεύσει για τη βελτίωση των ποσοτικών προβλέψεων είτε της τάσης ατμών είτε των ιδιοτήτων φάσης. Επιπλέον, έχει καταβληθεί μεγάλη προσπάθεια για την επέκταση της περιοχής εφαρμογής των κυβικών καταστατικών εξισώσεων από καθαρά συστατικά σε μείγματα.

## 4.2 Εξίσωση Redlich–Kwong

Η εξίσωση Redlich-Kwong (1949) θεωρείται, από πολλούς, η πρώτη σύγχρονη καταστατική εξίσωση και παίρνει τη μορφή

$$P = \frac{RT}{V-b} - \frac{a}{\sqrt{T} V(V+b)} \quad (4.10)$$

Συγκρίνοντας αυτή την εξίσωση με την εξίσωση van der Waals (Εξίσωση 4.5), φαίνεται ότι ο ελκυστικός όρος έχει μια πιο περίπλοκη εξάρτηση από τη θερμοκρασία. Αυτή η τροποποίηση θερμοκρασίας χρησιμεύει για τη βελτίωση των προβλέψεων της τάσης ατμών. Για να βελτιωθούν

οι προβλέψεις των μοριακών όγκων υγρής φάσης, ο όρος  $V^2$  στον παρονομαστή του ελκυστικού όρου στην εξίσωση van der Waals, στην εξίσωση Redlich-Kwong, έχει αντικατασταθεί από  $V(V + b)$ . Οι παράμετροι  $a$  και  $b$  βρίσκονται επιβάλλοντας τα κριτήρια κρίσιμου σημείου που εκφράζονται στην Εξίσωση 4.6. Αυτό οδηγεί στις ακόλουθες εκφράσεις:

$$a = \frac{0.42748 R^2 T_c^{2.5}}{P_c} \quad (4.11)$$

$$b = \frac{0.08664 R T_c}{P_c} \quad (4.12)$$

Για ένα μείγμα N-συστατικών, οι παράμετροι  $a$  και  $b$  στην Εξίσωση 4.10 βρίσκονται χρησιμοποιώντας τους ακόλουθους κανόνες ανάμειξης:

$$a = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N z_i z_j a_{ij} \quad (4.13)$$

$$b = \sum_{i=1}^N z_i b_i \quad (4.14)$$

όπου  $z_i$  και  $z_j$  είναι τα μοριακά κλάσματα του συστατικού  $i$  και  $j$ , αντίστοιχα. Ο όρος  $b_i$  είναι η  $b$ -παράμετρος της συνιστώσας που βρήκα από την Εξίσωση 4.12. Ο όρος  $a_{ij}$  καθορίζεται από:

$$a_{ij} = \frac{0.42748 R^2 T_{cij}^{2.5}}{P_{cij}} \quad (4.15)$$

που αντιστοιχεί στην Εξίσωση 4.11, αλλά τα  $T_c$  και  $P_c$  της καθαρής συνιστώσας αντικαθίστανται, στην Εξίσωση 4.15, από τους διασταυρούμενους όρους  $T_{cij}$  και  $P_{cij}$ . Το  $T_{cij}$  σχετίζεται με τις καθарές κρίσιμες θερμοκρασίες  $T_{ci}$  και  $T_{cj}$  των συστατικών  $i$  και  $j$  ως εξής:

$$T_{cij} = \sqrt{T_{ci} T_{cj}} (1 - k_{ij}) \quad (4.16)$$

Σε αυτήν την έκφραση, το  $k_{ij}$  είναι μια παράμετρος δυαδικής αλληλεπίδρασης για τα στοιχεία  $i$  και  $j$ . Για δύο πανομοιότυπα συστατικά, το  $k_{ij}$  είναι μηδέν εξ ορισμού. Για δύο διαφορετικές μη πολικές ενώσεις, το  $k_{ij}$  είναι ίσο ή κοντά στο μηδέν. Για ένα δυαδικό ζεύγος τουλάχιστον μιας πολικής συνιστώσας, τα μη μηδενικά  $k_{ij}$  είναι συχνά κατάλληλα. Ο κανόνας ανάμειξης στην Εξίσωση 4.16 βασίζεται σε εκτιμήσεις σχετικά με την ελκυστική ενέργεια που δρα μεταξύ δύο μορίων ή δύο σωμάτων. Το  $P_{cij}$  βρίσκεται από:

$$P_{cij} = \frac{Z_{cij} R T_{cij}}{V_{cij}} \quad (4.17)$$

όπου

$$Z_{cij} = \frac{Z_{ci} + Z_{cj}}{2} \quad (4.18)$$

και

$$V_{cij} = \left( \frac{V_{ci}^{1/3} + V_{cj}^{1/3}}{2} \right)^3 \quad (4.19)$$

Οι  $Z_{ci}$  και  $Z_{cj}$  είναι οι συντελεστές συμπιεστότητας των συνιστωσών  $i$  και  $j$  στα κρίσιμα σημεία καθαρής συνιστώσας. Ο κανόνας ανάμειξης που χρησιμοποιείται για τον κρίσιμο όγκο βασίζεται στην ιδέα ότι τα μόρια των συστατικών  $i$  και  $j$  έχουν γραμμικές διαστάσεις ανάλογες με τις κυβικές ρίζες των  $V_{ci}$  και  $V_{cj}$ , αντίστοιχα. Ο όρος μέσα στην παρένθεση στην Εξίσωση 4.19 είναι τότε ανάλογος με το γραμμικό μήκος ενός μέσου μορίου των  $i$  και  $j$ .

### 4.3 Εξίσωση Soave–Redlich–Kwong (SRK)

Ο Soave (1972) βρήκε ότι οι πιέσεις ατμών καθαρού συστατικού που υπολογίστηκαν από την εξίσωση Redlich–Kwong (RK) ήταν κάπως ανακριβείς. Πρότεινε να αντικατασταθεί ο όρος στην εξίσωση RK από έναν γενικότερο όρο που εξαρτάται από τη θερμοκρασία,  $a(T)$ , δίνοντας μια εξίσωση κατάστασης της μορφής:

$$P = \frac{RT}{V - b} - \frac{a(T)}{V(V + b)} \quad (4.20)$$

Αυτή η εξίσωση αναφέρεται συνήθως ως εξίσωση Soave-Redlich-Kwong ή απλώς SRK. Ο Soave σχεδιάστηκε  $\sqrt{\frac{a}{a_c}}$  έναντι  $\sqrt{\frac{T}{T_c}}$  ενός αριθμού καθαρών υδρογονανθράκων. Ο όρος  $\sqrt{\frac{a}{a_c}}$  προσδιορίστηκε από δεδομένα τάσης ατμών. Ο τύπος των διαγραμμάτων που κατασκευάζει η Soave φαίνεται σχηματικά στο Σχήμα 4.4. Παρατήρησε μια σχεδόν γραμμική σχέση που δείχνει ότι θα πρέπει να επιλεγεί μια γραμμική εξάρτηση για την τετραγωνική ρίζα της παραπάνω αναλογίας παραμέτρου  $a$  έναντι της τετραγωνικής ρίζας της μειωμένης θερμοκρασίας  $T_r = T/T_c$ . Ο Soave πρότεινε την ακόλουθη εξάρτηση από τη θερμοκρασία:

$$a(T) = a_c \alpha(T) \quad (4.21)$$

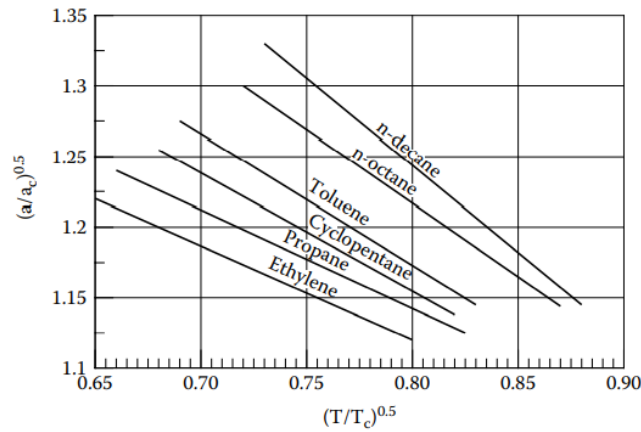
όπου

$$a_c = \frac{0.42747R^2T_c^2}{P_c} \quad (4.22)$$

$$b = \frac{0.08664R T_c}{P_c} \quad (4.23)$$

$$\alpha(T) = \left( 1 + m \left( 1 - \sqrt{\frac{T}{T_c}} \right) \right)^2 \quad (4.24)$$

$$m = 0.480 + 1.574\omega - 0.176\omega^2 \quad (4.25)$$



**Σχήμα 4.4:** Σχέση μεταξύ  $(a/a_c)^{0.5}$  και  $(T/T_c)^{0.5}$  που παρατηρήθηκε από τον Soave (1972)

Στην Εξίσωση 4.25, το  $\omega$  είναι ο ακεντρικός παράγοντας. Η εξίσωση 4.21 και η εξίσωση 4.24 μπορούν να συνδυαστούν για να δώσουν:

$$\sqrt{\frac{a(T)}{a_c}} = (1 + m) - m \sqrt{\frac{T}{T_c}} \quad (4.26)$$

που είναι σύμφωνη με τις παρατηρήσεις του Soave εκφράζει μια γραμμική σχέση μεταξύ  $\sqrt{\frac{a}{a_c}}$  και  $\sqrt{\frac{T}{T_c}}$ . Οι συντελεστές στην έκφραση για  $m$  (Εξίσωση 4.25) προσδιορίστηκαν με μια προσαρμογή δεδομένων σε πειραματικά δεδομένα πίεσης ατμών για εννέα καθαρούς υδρογονάνθρακες.

Το 1978 οι Graboski και Daubert προσάρμοσαν ξανά τους τρεις συντελεστές στην εξίσωση 4.25 σε 0,48508, 1,55171 και -0,15613 με βάση δεδομένα πίεσης ατμών για περισσότερα συστατικά, συμπεριλαμβανομένων των αρωματικών και ισοπαραφινών, αλλά αυτοί οι συντελεστές δεν έχουν ληφθεί όπως αυτοί που προτείνονται από την ευρεία χρήση.

Το 1983 οι Mathias και Copeman παρουσίασαν μια πιο ευέλικτη εξάρτηση από τη θερμοκρασία για το  $\alpha$ :

$$\alpha(T) = \left( 1 + C_1(1 - \sqrt{T_r}) + C_2(1 - \sqrt{T_r})^2 + C_3(1 - \sqrt{T_r})^3 \right)^2 \quad T_r < 1 \quad (4.27)$$

$$\alpha(T) = \left( 1 + C_1(1 - \sqrt{T_r}) \right)^2 \quad T_r \geq 1 \quad (4.28)$$

Φαίνεται ότι η έκφραση Mathias–Copeman μειώνεται στην Εξίσωση 4.24 για  $C_1 = m$  και  $C_2 = C_3 = 0$ . Οι Khashayar και Moshfeghian (1998) έχουν παρουσιάσει συντελεστές Mathias–Copeman για υδρογονάνθρακες C1–C4 για χρήση με την εξίσωση SRK όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.1. Ο Πίνακας 4.1 δείχνει επίσης τους συντελεστές Mathias–Copeman για νερό και μεθανόλη (Dahl και Michelsen, 1990). Γενικά, η εξάρτηση από τη θερμοκρασία Mathias και Copeman χρησιμοποιείται ευρύτερα για μη πολικές ενώσεις όπως, για παράδειγμα, νερό και μεθανόλη παρά για υδρογονάνθρακες.

Με την κλασική εξάρτηση από τη θερμοκρασία Soave,  $\alpha(T) = 1$  στην κρίσιμη θερμοκρασία, όπου το  $a(T)$  γίνεται επομένως ίσο με  $a_c$ . Οι όροι  $a_c$  και  $b$  στην Εξίσωση 4.22 και στην Εξίσωση 4.23 βρίσκονται κάνοντας χρήση των κριτηρίων κρίσιμου σημείου που εκφράζονται στην Εξίσωση 4.6.

Υπενθυμίζοντας ότι ο συντελεστής συμπιεστότητας  $Z$  ορίζεται ως εξής:

$$Z = \frac{PV}{RT} \quad (4.29)$$

Component	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	Reference
Methane	0.5857	-0.7206	1.2899	Khashayar and Moshfeghian (1998)
Ethane	0.7178	-0.7644	1.6396	Khashayar and Moshfeghian (1998)
Propane	0.7863	-0.7459	1.8454	Khashayar and Moshfeghian (1998)
<i>Iso</i> -butane	0.8284	-0.8285	2.3201	Khashayar and Moshfeghian (1998)
<i>N</i> -butane	0.8787	-0.9399	2.2666	Khashayar and Moshfeghian (1998)
Water	1.0873	-0.6377	0.6345	Dahl and Michelsen (1990)
Methanol	1.4450	-0.8150	0.2486	Dahl and Michelsen (1990)

**Πίνακας 4.1:** Mathias-Copeman Συντελεστές (Εξίσωση 4.27 και Εξίσωση 4.28) για χρήση με την εξίσωση SRK

Η εξίσωση 4.20 μπορεί να ξαναγραφτεί ως Z:

$$Z^3 - Z^2 + (A - B + B^2)Z - AB = 0 \quad (4.30)$$

όπου τα A και B δίνονται από τις ακόλουθες εκφράσεις:

$$A = \frac{a(T)P}{R^2 T^2} \quad (4.31)$$

$$B = \frac{bP}{RT} \quad (4.32)$$

Component Pair	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S
<b>Soave-Redlich-Kwong</b>			
N <sub>2</sub>	0.0000	-0.0315	0.1696
CO <sub>2</sub>	-0.0315	0.0000	0.0989
H <sub>2</sub> S	0.1696	0.0989	0.0000
C <sub>1</sub>	0.0278	0.1200	0.0800
C <sub>2</sub>	0.0407	0.1200	0.0852
C <sub>3</sub>	0.0763	0.1200	0.0885
iC <sub>4</sub>	0.0944	0.1200	0.0511
nC <sub>4</sub>	0.0700	0.1200	0.0600
iC <sub>5</sub>	0.0867	0.1200	0.0600
nC <sub>5</sub>	0.0878	0.1200	0.0689
C <sub>6</sub>	0.0800	0.1200	0.0500
C <sub>7+</sub>	0.0800	0.0100	0.0000
<b>Peng-Robinson</b>			
N <sub>2</sub>	0.0000	0.0170	0.1767
CO <sub>2</sub>	0.0170	0.0000	0.0974
H <sub>2</sub> S	0.1767	0.0974	0.0000
C <sub>1</sub>	0.0311	0.1200	0.0800
C <sub>2</sub>	0.0515	0.1200	0.0833
C <sub>3</sub>	0.0852	0.1200	0.0878
iC <sub>4</sub>	0.1033	0.1200	0.0474
nC <sub>4</sub>	0.0800	0.1200	0.0600
iC <sub>5</sub>	0.0922	0.1200	0.0600
nC <sub>5</sub>	0.1000	0.1200	0.0630
C <sub>6</sub>	0.0800	0.1200	0.0500
C <sub>7+</sub>	0.0800	0.0100	0.0000

**Πίνακας 4.2:** Μη μηδενικοί δυαδικοί συντελεστές αλληλεπίδρασης για συστατικά ρευστών ταμειυτήρων πετρελαίου για χρήση με την καταστατική εξίσωση SRK

Με την εξίσωση SRK, ο συντελεστής συμπιεστότητας ενός καθαρού στοιχείου στο κρίσιμο σημείο του θα είναι πάντα ίσος με 0,333.

Για ένα μείγμα N-συστατικών, ο Soave πρότεινε να βρείτε το a και το b από

$$a = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N z_i z_j a_{ij} \quad (4.33)$$

$$b = \sum_{i=1}^N z_i b_i \quad (4.34)$$

όπου z σημαίνει κλάσμα γραμμομορίων, i και j είναι δείκτες συστατικών και

$$a_{ij} = \sqrt{a_i a_j} (1 - k_{ij}) \quad (4.35)$$

Η παράμετρος  $k_{ij}$  είναι ένας δυαδικός συντελεστής αλληλεπίδρασης παρόμοιος με αυτόν που εισέρχεται στον κανόνα ανάμειξης RK της Εξίσωσης 4.16. Παραδείγματα παραμέτρων δυαδικής αλληλεπίδρασης που συνιστώνται για την εξίσωση SRK δίνονται στον Πίνακα 4.2. Ο κανόνας ανάμειξης που χρησιμοποιείται για το b υποδηλώνει ότι οι γραμμομοριακοί όγκοι καθαρού συστατικού σε υψηλές πιέσεις πρέπει να είναι προσθετικοί.

#### 4.4 Εξίσωση Peng–Robinson (PR)

Οι πυκνότητες υγρής φάσης που προβλέπονται χρησιμοποιώντας την εξίσωση SRK είναι γενικά πολύ χαμηλές. Οι Peng και Robinson (1976) εντόπισαν αυτή την ανεπάρκεια στο γεγονός ότι η εξίσωση SRK προβλέπει ότι ο κρίσιμος συντελεστής συμπιεστότητας καθαρού συστατικού είναι 0,333. Ο Πίνακας 4.3 παρουσιάζει πειραματικούς κρίσιμους συντελεστές συμπιεστότητας για τις C1-C10 n-παραφίνες. Οι κρίσιμοι συντελεστές συμπιεστότητας είναι γενικά της τάξεως 0,25 έως 0,29, δηλαδή κάπως χαμηλότεροι από ό,τι προσομοιώθηκαν χρησιμοποιώντας την εξίσωση SRK. Οι Peng και Robinson πρότειναν μια εξίσωση της μορφής:

$$P = \frac{RT}{V - b} - \frac{a(T)}{V(V + b) + b(V - b)} \quad (4.36)$$

όπου

$$a(T) = a_c \alpha(T) \quad (4.37)$$

$$a_c = 0.45724 \frac{R^2 T_c^2}{P_c} \quad (4.38)$$

$$\alpha(T) = \left( 1 + m \left( 1 - \sqrt{\frac{T}{T_c}} \right) \right)^2 \quad (4.39)$$

$$m = 0.37464 + 1.54226\omega - 0.26992\omega^2 \quad (4.40)$$

$$b = \frac{0.07780RT_c}{P_c} \quad (4.41)$$

Compound	$Z_c$
C <sub>1</sub>	0.288
C <sub>2</sub>	0.285
C <sub>3</sub>	0.281
nC <sub>4</sub>	0.274
nC <sub>5</sub>	0.251
nC <sub>6</sub>	0.260
nC <sub>7</sub>	0.263
nC <sub>8</sub>	0.259
nC <sub>9</sub>	0.260
nC <sub>10</sub>	0.247

**Πίνακας 4.3:** Κρίσιμοι συντελεστές συμπιεστότητας των C<sub>1</sub>-C<sub>10</sub> n-Παραφίνες

Η εξίσωση 4.36 δίνει έναν καθολικό κρίσιμο συντελεστή συμπιεστότητας 0,307 για καθαρές ουσίες, ο οποίος είναι χαμηλότερος από 0,333 που βρέθηκε με την εξίσωση SRK αλλά εξακολουθεί να είναι υψηλός σε σύγκριση με τους πειραματικούς κρίσιμους συντελεστές συμπιεστότητας που παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.3. Για μείγματα, οι Peng και Robinson συνιστούν τον υπολογισμό των  $a$  και  $b$  χρησιμοποιώντας τους κανόνες ανάμειξης που εμφανίζονται στην Εξίσωση 4.33 και στην Εξίσωση 4.34.

Δύο χρόνια αργότερα, οι Peng και Robinson (1978) παρουσίασαν μια τροποποίηση της Εξίσωσης 4.40 για να χρησιμοποιηθεί για  $\omega > 0.49$ :

$$m = 0.379642 + 1.48503\omega - 0.164423\omega^2 + 0.016666\omega^3 \quad (4.42)$$

## 4.5 Διόρθωση όγκου Péneloux

Μέχρι το 1982, η εφαρμογή της εξίσωσης SRK περιοριζόταν ουσιαστικά στους υπολογισμούς ισορροπίας φάσης και πυκνότητας αέριας φάσης. Λόγω των κακών προβλέψεων πυκνότητας υγρού, η εξίσωση SRK εφαρμοζόταν συχνά με εξωτερικούς συσχετισμούς πυκνότητας υγρού. Αυτό προκάλεσε προβλήματα, για παράδειγμα, για σχεδόν κρίσιμα συστήματα για τα οποία είναι δύσκολο να γίνει διάκριση μεταξύ μιας αέριας και μιας υγρής φάσης. Το 1982, η Péneloux et al. παρουσίασαν μια τροποποίηση SRK με μια παράμετρο μετάφρασης όγκου. Η εξίσωση Péneloux (SRK–Péneloux) έχει τη μορφή:

$$P = \frac{RT}{V-b} - \frac{a(T)}{(V+c)(V+b+2c)} \quad (4.43)$$

Η παράμετρος  $c$  ονομάζεται παράμετρος μετάφρασης όγκου ή παράμετρος μετατόπισης όγκου. Είναι δυνατός ο συσχετισμός των μοριακών όγκων και των παραμέτρων  $b$  που εισέρχονται στις εξισώσεις SRK και SRK–Péneloux ως εξής:

$$V_{Pen} = V_{SRK} - c \quad (4.44)$$

$$b_{Pen} = b_{SRK} - c \quad (4.45)$$

όπου ο υποδείκτης SRK αντιπροσωπεύει την εξίσωση SRK και το Pen για την εξίσωση SRK-Péneloux.

Η παράμετρος  $c$  δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα του υπολογισμού ισορροπίας φάσης αερίου-υγρής. Η εξίσωση SRK-Péneloux θα δώσει, για παράδειγμα, τις ίδιες πιέσεις ατμών καθαρού συστατικού και τις ίδιες πιέσεις δρόσου και σημείου φυσαλίδων μείγματος με την κλασική εξίσωση SRK, όπως παρουσιάζεται στην Εξίσωση 4.20. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο ο όρος μετάφραση όγκου ή παράμετρος μετατόπισης όγκου χρησιμοποιείται επίσης για το  $c$ . Είναι μια παράμετρος που επηρεάζει τους μοριακούς όγκους και τις πυκνότητες φάσεων χωρίς να επηρεάζει την ισορροπία φάσης. Αυτό έχει την ενδιαφέρουσα συνέπεια ότι στην παράμετρο  $c$  μπορεί να εκχωρηθεί μια τιμή που κάνει έναν υπολογισμένο μοριακό όγκο να συμφωνεί με τις πειραματικές παρατηρήσεις. Η Péneloux et al. συνέστησαν την ακόλουθη έκφραση να χρησιμοποιείται για  $c$  μη υδρογονανθράκων και υδρογονάνθρακες ελαφρύτερους από C7

$$c = \frac{0.40768 RT_c (0.29441 - Z_{RA})}{P_c} \quad (4.46)$$

όπου το  $Z_{RA}$  είναι ο παράγοντας συμπιεστότητας Rackett (Rackett, 1970; Spencer and Danner, 1973)

$$Z_{RA} = 0.29056 - 0.08775\omega \quad (4.47)$$

Οι σταθερές στην Εξίσωση 4.46 βρέθηκαν με προσαρμογή στις πυκνότητες κορεσμένου υγρού υδρογονανθράκων C1-C6 σε ατμοσφαιρική πίεση.

Η έννοια της διόρθωσης όγκου Péneloux δεν περιορίζεται στην εξίσωση SRK, αλλά είναι εξίσου εφαρμόσιμη και στην εξίσωση PR (Jhaveri and Youngren, 1988). Με τη διόρθωση όγκου Péneloux, η εξίσωση PR γίνεται (PR-Péneloux):

$$P = \frac{RT}{V - b} - \frac{a(T)}{(V + c)(V + 2c + b) + (b + c)(V - b)} \quad (4.48)$$

Για μη υδρογονάνθρακες και υδρογονάνθρακες ελαφρύτερους από C7, η παράμετρος διόρθωσης όγκου μπορεί να βρεθεί από:

$$c = \frac{0.50033 RT_c}{P_c} (0.25969 - Z_{RA}) \quad (4.49)$$

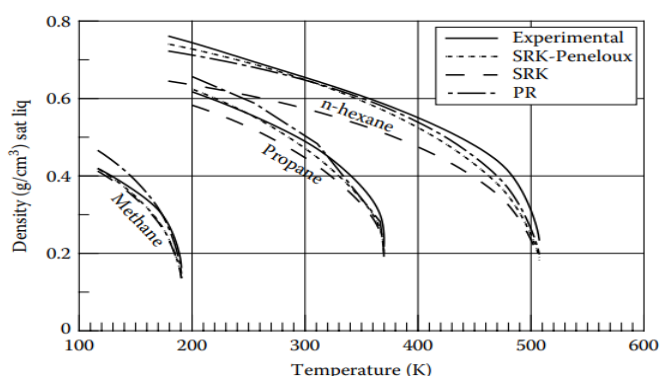
όπου  $Z_{RA}$  είναι ο συντελεστής συμπιεστότητας Rackett που ορίζεται στην Εξίσωση 4.47.

Όσον αφορά την εξίσωση SRK– Péneloux, οι σταθερές σε αυτή την εξίσωση βρέθηκαν με προσαρμογή στις πυκνότητες κορεσμένου υγρού υδρογονανθράκων C1–C6 σε ατμοσφαιρική πίεση.

Αν και είναι γενικά αποδεκτό ότι είναι απαραίτητη η διόρθωση όγκου των πυκνοτήτων υγρών SRK, είναι λιγότερο προφανές εάν μια τέτοια διόρθωση χρειάζεται για την εξίσωση PR, καθώς η εξίσωση PR αναπτύχθηκε με μεγαλύτερη εστίαση στις προβλέψεις πυκνότητας υγρού. Το σχήμα 4.5 δείχνει πειραματικές και υπολογισμένες πυκνότητες υγρών τριών n-παραφινών στα σημεία κορεσμού τους σε τρεις διαφορετικές θερμοκρασίες. Οι πυκνότητες έχουν υπολογιστεί χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις SRK, PR και SRK– Péneloux. Η υψηλότερη θερμοκρασία για την οποία εμφανίζονται τα αποτελέσματα είναι η κρίσιμη θερμοκρασία. Η καλύτερη συνολική συμφωνία με τα πειραματικά δεδομένα επιτυγχάνεται με την εξίσωση SRK– Péneloux. Η εξίσωση SRK χωρίς διόρθωση όγκου γενικά προβλέπει πολύ χαμηλές πυκνότητες υγρών. Αυτό είναι πιο έντονο για το προπάνιο και το n-εξάνιο παρά για το μεθάνιο. Για το μεθάνιο και το προπάνιο, η εξίσωση PR προβλέπει πολύ υψηλές πυκνότητες υγρών στις χαμηλότερες θερμοκρασίες. Τα αποτελέσματα που λαμβάνονται με την εξίσωση PR για το n-εξάνιο είναι υψηλότερης ποιότητας αλλά εξακολουθούν να μην είναι τόσο καλά όσο αυτά που λαμβάνονται με την εξίσωση SRK– Péneloux.

Τα αποτελέσματα ισορροπίας φάσης που λαμβάνονται με τις εξισώσεις SRK και PR με διόρθωση όγκου Péneloux είναι πανομοιότυπα με εκείνα που λαμβάνονται με τις αρχικές εξισώσεις χωρίς διόρθωση όγκου. Αυτό προκύπτει από το γεγονός ότι (λαμβάνοντας την εξίσωση SRK ως παράδειγμα) οι συντελεστές φυγοκέντρησης SRK και SRK– Péneloux της συνιστώσας i αλληλοσυνδέονται μέσω:

$$\ln \phi_{i,SRK} = \ln \phi_{i,Pen} + \frac{c_i P}{RT} \quad (4.50)$$



**Σχήμα 4.5:** Πειραματικές και υπολογισμένες πυκνότητες κορεσμένων υγρών. (Προσαρμοσμένο από το American Petroleum Institute, Technical Data Book — Petroleum Refining, API, Νέα Υόρκη, 1982)

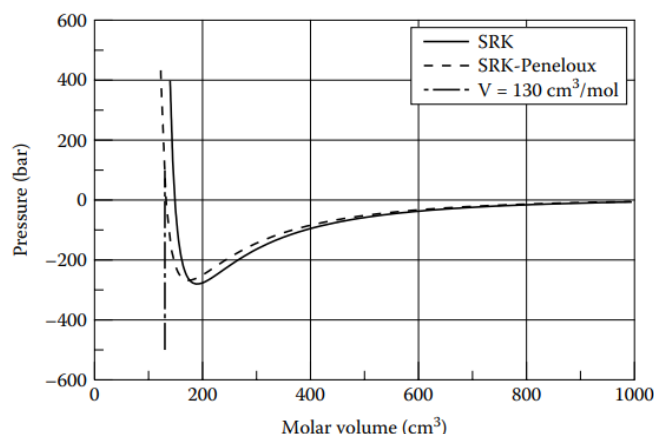
Σε κατάσταση ισορροπίας μεταξύ μιας φάσης ατμού (V) και μιας υγρής φάσης (L) θα ισχύει η ακόλουθη σχέση για το συστατικό i:

$$\frac{y_i}{x_i} = \frac{\phi_{i,SRK}^L}{\phi_{i,SRK}^V} \quad (4.51)$$

Το  $y_i$  είναι το μοριακό κλάσμα του συστατικού i στην αέρια φάση και το  $x_i$  το μοριακό κλάσμα του συστατικού i στην υγρή φάση. Χρησιμοποιώντας την εξίσωση 4.50, αυτή η σχέση ισορροπίας μπορεί να ξαναγραφτεί ως εξής:

$$\frac{y_i}{x_i} = \frac{\phi_{i, \text{Pen}}^L \exp\left(\frac{c_i P}{RT}\right)}{\phi_{i, \text{Pen}}^V \exp\left(\frac{c_i P}{RT}\right)} = \frac{\phi_{i, \text{Pen}}^L}{\phi_{i, \text{Pen}}^V} \quad (4.52)$$

δείχνοντας ότι οι εξισώσεις SRK και SRK– Péneloux θα παρέχουν ακριβώς τα ίδια αποτελέσματα για τις συνθέσεις φάσεων και επομένως και για τις ποσότητες φάσεων. Είναι μόνο ο μοριακός όγκος (πυκνότητες φάσης) και κάποιες άλλες φυσικές ιδιότητες που διαφέρουν. Το ίδιο ισχύει για τις εξισώσεις PR και PR– Péneloux (Εξίσωση 4.36 και Εξίσωση 4.48).



**Σχήμα 4.6:** Μοριακός όγκος n-εξανίου στους 15°C υπολογίστηκε χρησιμοποιώντας την εξίσωση SRK και την εξίσωση SRK– Péneloux. Η παράμετρος μετατόπισης όγκου έχει ρυθμιστεί σε μοριακό όγκο 130 cm<sup>3</sup> στο 1 bar

Η εξίσωση Péneloux όχι μόνο διορθώνει τις πυκνότητες υγρής φάσης αλλά και τις πυκνότητες αέριας φάσης. Αυτό απεικονίζεται στο Σχήμα 4.6, το οποίο δείχνει μια καμπύλη PV για n-εξάνιο στους 15°C που υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την εξίσωση SRK (Εξίσωση 4.20) και χρησιμοποιώντας την εξίσωση SRK– Péneloux (Εξίσωση 4.43). Σε 1 bar, ο γραμμομοριακός όγκος SRK βρέθηκε να είναι 148 cm<sup>3</sup>, ενώ ο μοριακός όγκος του n-εξανίου σε αυτές τις συνθήκες είναι στην πραγματικότητα 130 cm<sup>3</sup>. Εκχωρώντας στην παράμετρο μετατόπισης όγκου Péneloux (c στην Εξίσωση 4.43) μια τιμή 148 – 130 = 18 cm<sup>3</sup>/mol, είναι δυνατό να αντιστοιχιστεί ο όγκος υγρού του n-εξανίου στους 15°C και 1 bar. Η καμπύλη ΦΒ που υπολογίζεται με χρήση SRK–Peneloux φαίνεται επίσης στο Σχήμα 4.6. Οι μοριακοί όγκοι SRK– Péneloux είναι σταθερά σταθερά c (18 cm<sup>3</sup>/mol στο Σχήμα 4.6) χαμηλότεροι από τους όγκους SRK. Επειδή οι γραμμομοριακοί όγκοι αέριας φάσης είναι υψηλοί, η διόρθωση όγκου, έχει μόνο μικρή επίδραση στους όγκους αερίου αλλά σημαντική επίδραση στους όγκους του υγρού. Αυτή είναι η όλη ιδέα της διόρθωσης.

Οι πυκνότητες SRK που υπολογίζονται για ένα καθαρό συστατικό κοντά στο κρίσιμο σημείο είναι ανακριβείς. Η ακρίβεια βελτιώνεται εάν εφαρμοστεί διόρθωση όγκου Péneloux, αλλά οι υπολογισμένες πυκνότητες ενδέχεται να αποκλίνουν έως και 15% από την πειραματική πυκνότητα καθαρού συστατικού κοντά στο κρίσιμο σημείο. Αυτό το πρόβλημα μπορεί να ξεπεραστεί με την εισαγωγή παραμέτρων Péneloux που εξαρτώνται από τη θερμοκρασία. Ωστόσο, οι ανακρίβειες στην πυκνότητα που παρατηρούνται για καθαρά συστατικά κοντά στο κρίσιμο σημείο παρουσιάζουν μόνο οριακό ενδιαφέρον για μείγματα πολλαπλών συστατικών.

## 4.6 Άλλες κυβικές καταστατικές εξισώσεις

Η αυξανόμενη δημοτικότητα των κυβικών καταστατικών εξισώσεων στις δεκαετίες του 1970 και του 1980 ενέπνευσε ερευνητικές ομάδες θερμοδυναμικής να προτείνουν εναλλακτικές για τις εξισώσεις SRK και PR. Πολλές από αυτές τις εξισώσεις έχουν τη γενική μορφή:

$$P = \frac{RT}{V + \delta_1} - \frac{a(T)}{(V + \delta_2)(V + \delta_3)} \quad (4.53)$$

Οι εξισώσεις SRK, PR, SRK–Peneloux και PR–Peneloux (Εξίσωση 4.20, Εξίσωση 4.36, Εξίσωση 4.43 και Εξίσωση 4.48) ανήκουν όλες στη γενική κατηγορία εξισώσεων που εκφράζονται μέσω της Εξίσωσης 4.53. Οι τιμές των παραμέτρων  $\delta_1$ – $\delta_3$  για κάθε εξίσωση φαίνονται στον Πίνακα 4.4. Η εξίσωση 4.53 προσφέρει την ευκαιρία να συμπεριληφθούν τρεις διαφορετικές παραμέτρους ογκομετρικής διόρθωσης,  $\delta_1$ ,  $\delta_2$  και  $\delta_3$ . Οι εξισώσεις SRK και PR χρησιμοποιούν μόνο μία παράμετρο. Οι διορθωμένες εξισώσεις Peneloux SRK και PR χρησιμοποιούν δύο παραμέτρους διόρθωσης όγκου.

Ένα παράδειγμα εξίσωσης που χρησιμοποιεί πλήρως την επιπλέον ευελιξία που παρουσιάζεται από τις 3 παραμέτρους  $\delta$  στην Εξίσωση 4.53 είναι η εξίσωση Adachi–Lu–Sugie (ALS) (1983), η οποία έχει τη μορφή:

$$P = \frac{RT}{V - b_1} - \frac{a(T)}{(V - b_2)(V + b_3)} \quad (4.54)$$

Equation	$\delta_1$	$\delta_2$	$\delta_3$
Soave–Redlich–Kwong (Equation 4.20)	$-b$	0	$b$
Peng–Robinson (Equation 4.36)	$-b$	$(1 + \sqrt{2}) b$	$(1 - \sqrt{2}) b$
SRK–Peneloux (Equation 4.43)	$-b$	$c$	$b + 2c$
PR–Peneloux (Equation 4.48)	$-b$	$c + (1 + \sqrt{2})(b + c)$	$c + (1 - \sqrt{2})(b + c)$
Adachi–Lu–Sugie (Equation 4.54)	$-b_1$	$-b_2$	$b_3$

**Πίνακας 4.4:** Τιμές των παραμέτρων της καταστατικής εξίσωσης στη γενικευμένη καταστατική εξίσωση που εκφράζονται στην εξίσωση 4.53

Το ALS χρησιμοποιεί την ακόλουθη εξάρτηση από τη θερμοκρασία για την παράμετρο  $a$ :

$$a = a_c \alpha(T) \quad (4.55)$$

$$a_c = \frac{\Omega_a R^2 T_c^2}{P_c} \quad (4.56)$$

$$\alpha(T) = \left( 1 + m \left( 1 - \sqrt{\frac{T}{T_c}} \right) \right)^2 \quad (4.57)$$

$$\Omega_a = 0.44869 + 0.04024\omega + 0.01111\omega^2 - 0.00576\omega^3 \quad (4.58)$$

$$m = 0.4070 + 1.3787\omega - 0.2933\omega^2 \quad (4.59)$$

Οι παράμετροι διόρθωσης όγκου  $b_1 - b_3$  βρίσκονται από:

$$b_k = \frac{B_k T_c R}{P_c}, \quad k = 1, 2, 3 \quad (4.60)$$

όπου οι σταθερές  $B_1, B_2$  και  $B_3$  είναι συναρτήσεις του ακεντρικού παράγοντα:

$$B_1 = 0.08974 - 0.03452\omega + 0.00330\omega^2 \quad (4.61)$$

$$B_2 = 0.03686 + 0.00405\omega - 0.01073\omega^2 + 0.00157\omega^3 \quad (4.62)$$

$$B_3 = 0.15400 + 0.14122\omega - 0.00272\omega^2 - 0.00484\omega^3 \quad (4.63)$$

Οι παράμετροι που εισάγονται στην Εξίσωση 4.61 έως την Εξίσωση 4.63 προσδιορίστηκαν με παλινδρόμηση σε ογκομετρική ισορροπία φάσης και δεδομένα ενθαλπίας για καθαρά συστατικά και μείγματα. Ο κλασικός κανόνας ανάμειξης στην Εξίσωση 4.33 και στην Εξίσωση 4.34 χρησιμοποιείται για την παράμετρο  $a$  και  $b_1$  έως  $b_3$ .

Χρησιμοποιώντας και τις τρεις παραμέτρους όγκου στην Εξίσωση 4.54, η εξίσωση ALS είναι πιο εύελικτη από τις εξισώσεις SRK και PR, ακόμη και όταν οι δύο τελευταίες έχουν διορθωθεί ως προς τον όγκο. Ωστόσο, η εξίσωση ALS δεν έχει την ίδια δημοτικότητα με το SRK και το PR. Στη βιομηχανία πετρελαίου, είναι σημαντικό με κάποιο είδος βιομηχανικών προτύπων να επιτραπεί σε διαφορετικές εταιρείες που εργάζονται στο ίδιο έργο να παράγουν συνεπή αποτελέσματα υπολογισμού.

## 4.8 Μη κλασσικοί κανόνες ανάμειξης

Οι κυβικές καταστατικές εξισώσεις προορίζονταν αρχικά για υδρογονάνθρακες και άλλα ουσιαστικά μη πολικά συστήματα, αλλά η ευρεία χρήση κυβικών εξισώσεων για μείγματα πετρελαίου και αερίου έχει εμπνεύσει την εργασία για την επέκταση της περιοχής εφαρμογής τους σε μείγματα που περιέχουν πολικές ενώσεις. (Karen Schou Pedersen, Peter L. Christensen, 2007)

## 4.9 Άλλες καταστατικές εξισώσεις

Μεγάλη ερευνητική δραστηριότητα κατευθύνεται επί του παρόντος σε βαθύς ταμιευτήρες σε υψηλή θερμοκρασία και υψηλή πίεση. Η ικανότητα των κλασικών κυβικών καταστατικών εξισώσεων να αναπαραστήσουν τις μοριακές αλληλεπιδράσεις σε τέτοιες συνθήκες έχει συχνά αμφισβητηθεί. Έχουν προταθεί πιο περίπλοκες καταστατικές εξισώσεις, μερικές από τις οποίες περιλαμβάνουν όρους για να εξηγήσουν τις ισχυρές απωστικές δυνάμεις που δρουν σε υψηλές πιέσεις (Benedict et al. [1940], Donohue and Vimalchand [1988] και Lin et al. [1983]). Υπάρχουν

λίγα στοιχεία ότι οποιαδήποτε από αυτές τις εξισώσεις θα πρέπει να είναι πιο κατάλληλη για την αναπαράσταση των ιδιοτήτων PVT των ρευστών ταμειυτήρων πετρελαίου σε υψηλές πιέσεις και θερμοκρασίες από μια συμβατική κυβική καταστατική εξίσωση. Όταν πρόκειται για την προσομοίωση της διαίρεσης υδρογονάνθρακα υγρού-υγρού ως, για παράδειγμα, ισορροπίες πετρελαίου-ασφαλτίνης, πιο προηγμένες εξισώσεις κατάστασης, για παράδειγμα, η εξίσωση PC-SAFT (Chapman et al. [1988 και 1990] και Gross and Sadowski, [2001]), μπορεί να χρειαστεί.

#### 4.10 Κανόνες ανάμειξης για τις κυβικές καταστατικές εξισώσεις

Οι τρεις καταστατικές εξισώσεις που αναφέρθηκαν (Van Der Waals, Soave – Redlich – Kwong (SRK), Peng – Robinson (PR), αφορούν καθαρά συστατικά, καθώς μόνο για αυτά είναι γνωστές οι κρίσιμες συνθήκες. Για να έχουν εφαρμογή και σε μείγματα, θα πρέπει να εφαρμοστούν οι κανόνες ανάμειξης οι οποίοι συνδυάζουν τη σύσταση κάθε φάσης με τις τιμές των παραμέτρων  $a$  και  $b$  του κάθε συστατικού.

$$\alpha_m = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N y_i y_j a_{ij} \quad (4.64)$$

$$b_m = \sum_{i=1}^N y_i b_i \quad (4.65)$$

Όπου

$y_i, y_j$ : η σύσταση του μείγματος  
 $N$ : ο αριθμός των συστατικών

$$a_{ij} = (1 - k_{ij}) \sqrt{a_i a_j} \quad (4.66)$$

Η εξίσωση 4.66, περιλαμβάνει μια καινούρια παράμετρο η οποία ονομάζεται δυαδικός συντελεστής αλληλεπίδρασης (binary interaction parameter),  $k_{ij}$ , και εξαρτάται από την σύσταση. Η τιμή του προσεγγίζεται εμπειρικά. (Μιχαηλίδη Μελίνα, 2015)

#### 4.11 Ρύθμιση παραμέτρων καταστατικών εξισώσεων

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

προσδιορισμό των PVT ιδιοτήτων, ώστε αυτές να μπορούν στη συνέχεια να συγκριθούν με τις τιμές που προκύπτουν από τις καταστατικές εξισώσεις και οι τελευταίες να ρυθμιστούν κατάλληλα ώστε οι ώστε οι τιμές που προβλέπουν να συμπίπτουν με τις τιμές που έχουν προσδιοριστεί εργαστηριακά. Η ρύθμιση των παραμέτρων των εξισώσεων είναι πολύ σημαντική καθώς μέσω αυτών μπορούν να πραγματοποιηθούν όλοι οι υπολογισμοί των σύνθετων PVT ιδιοτήτων σε όλα τα στάδια προσομοίωσης και εκμετάλλευσης του ταμιευτήρα. Όσο πιο καλά ρυθμισμένη είναι η καταστατική εξίσωση, τόσο ακριβείς θα είναι και οι προβλέψεις που θα δώσει. (Μιχαηλίδη Μελίνα, 2015)

#### 4.12 Εύρεση πυκνότητας και συντελεστή απόκλισης μέσω των καταστατικών εξισώσεων

Ο υπολογισμός της πυκνότητας μέσω των καταστατικών εξισώσεων, γίνεται χρησιμοποιώντας την καταστατική εξίσωση των πραγματικών αερίων.

$$PV = nZRT \quad (4.67)$$

Η πυκνότητα εκφράζεται ως η μάζα που περιέχεται σε μια μονάδα όγκου του ρευστού.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (4.68)$$

Αντικαθιστώντας την εξίσωση (4.68) στην εξίσωση των πραγματικών αερίων, προκύπτει:

$$p \cdot \frac{m}{\rho} = n \cdot Z \cdot R \cdot T \rightarrow p \cdot m = \rho \cdot n \cdot Z \cdot R \cdot T \quad (4.69)$$

Αντικαθιστώντας και την μάζα από την σχέση

$$n = \frac{m}{MW} \rightarrow m = n \cdot MW \quad (4.70)$$

τελικά η πυκνότητα υπολογίζεται ως εξής :

$$\rho = \frac{p \cdot MW}{Z \cdot R \cdot T} \quad (4.71)$$

Από την τελευταία εξίσωση, προκύπτει η ανάγκη για εύρεση του συντελεστή απόκλισης Z.

Η καταστατική εξίσωση Van Der Waals, μπορεί να εκφραστεί και ως προς τον συντελεστή απόκλισης ως:

$$Z^3 - (B + 1) \cdot Z^2 + AZ - AB = 0 \quad (4.72)$$

Όπου

$$A = \frac{27}{64} \cdot \frac{p_r}{T_r^2} \text{ και } B = \frac{1}{9} \cdot \frac{p_r}{T_r} \quad (4.73)$$

Οι μεταβλητές στην εξίσωση (4.73), αποτελούν την ανηγμένη πίεση και θερμοκρασία, οι οποίες ορίζονται διαιρώντας την κάθε μεταβλητή με την αντίστοιχη κρίσιμη σταθερά, δηλαδή:

$$p_r = \frac{p}{p_c} \quad (4.74)$$

$$T_r = \frac{T}{T_c} \quad (4.75)$$

Αντίστοιχα, η εξίσωση των Soave – Redlich – Kwong (SRK), τροποποιείται ως εξής:

$$Z^3 - Z^2 + (A - B - B^2) \cdot Z - AB = 0 \quad (4.76)$$

Τέλος, η τροποποιημένη εξίσωση συμπιεστότητας κατά Peng-Robinson είναι:

$$Z^3 - (1 - B) \cdot Z^2 + (A - 3B^2 - 2B) \cdot Z - (AB - B^2 - B^3) = 0 \quad (4.77)$$

Ο συντελεστής απόκλισης, είναι δυνατό να υπολογιστεί από την διαφορίση της εκάστοτε καταστατικής εξίσωσης. Ορίζεται ως

$$C = -\frac{1}{v} \cdot \left( \frac{\partial v}{\partial p} \right)_T \quad (4.78)$$

Λύνοντας ως προς  $dV/dp$  την εξίσωση πραγματικών αερίων, προκύπτει η εξίσωση

$$p \cdot V_m = Z \cdot R \cdot T \rightarrow dp \cdot V + p \cdot dV = R \cdot T \cdot dZ \rightarrow V + p \cdot \frac{dV}{dp} = R \cdot T \cdot \frac{dZ}{dp} \rightarrow \quad (4.79)$$

$$\rightarrow \frac{dV}{dp} = \frac{R \cdot T}{p} \cdot \frac{dZ}{dp} - \frac{V}{p}$$

Ο λόγος  $dZ/dp$ , υπολογίζεται με διαφορίση των εξισώσεων (4.72),(4.76). (Μιχαηλίδη Μελίνα, 2015)

#### 4.13 Αντικείμενο διπλωματικής εργασίας

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, με την προσθήκη  $\text{CO}_2$ , υπάρχει δυνατότητα ανάκτησης μιας ποσότητας πετρελαίου που παραμένει στον ταμιευτήρα μετά την ολοκλήρωση των συμβατικών μεθόδων παραγωγής. Η μέθοδος ανάκτησης πετρελαίου με την προσθήκη  $\text{CO}_2$ , ονομάζεται μέθοδος επαυξημένης απόληψης ( $\text{CO}_2$ -EOR, Enhanced Oil Recovery). Για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς του ρευστού που προκύπτει μετά την εισαγωγή  $\text{CO}_2$  και τον υπολογισμό των ανακτήσιμων όγκων είναι απαραίτητη η εργαστηριακή μελέτη PVT ιδιοτήτων, μειγμάτων με  $\text{CO}_2$  και η ακριβής μέτρηση ιδιοτήτων όπως η πυκνότητα. Η πυκνότητα αποτελεί βασικό χαρακτηριστικό της ύλης και εκφράζει τη μάζα του υλικού που περιέχεται σε μια μονάδα όγκου. Η πυκνότητα είναι η ιδιότητα βάσει της οποίας τα ρευστά διαχωρίζονται όταν έρθουν σε επαφή λόγω βαρύτητας. Για την μέτρηση της πυκνότητας σε συνθήκες περιβάλλοντος, υπάρχουν πολλές συσκευές μέτρησης της πυκνότητας που ποικίλλουν με τη λειτουργία τους (πυκνόμετρα σταθερού

όγκου και μεταβλητού βάρους, πυκνόμετρα σταθερού βάρους και μεταβλητού όγκου κλπ.). Η εκτίμηση της πυκνότητας σε υψηλές πιέσεις και θερμοκρασίες γίνεται είτε με εκτόνωση του προς μελέτη ρευστού σε συνθήκες επιφανείας (μέθοδος flash), είτε με ειδικά πυκνόμετρα.

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να προσδιοριστούν εργαστηριακά οι τιμές της πυκνότητας μείγματος αέριων υδρογονανθράκων με CO<sub>2</sub> σε συνθήκες ταμιευτήρα οι οποίες θα βοηθήσουν στην εγκυρότερη προσομοίωση του ταμιευτήρα μέσω καταστατικών εξισώσεων (όπως περιεγράφηκε στο κεφάλαιο 4.11) και θα εμπλουτίσουν την ήδη υπάρχουσα βιβλιογραφία η οποία χρησιμοποιείται για την ρύθμιση των παραμέτρων των καταστατικών εξισώσεων. Για τις μετρήσεις κατασκευάστηκε μια πειραματική διάταξη η οποία παρουσιάζεται αναλυτικά στο κεφάλαιο 6 όπου αποτυπώνεται η λειτουργία της και περιγράφονται λεπτομερώς τα επιμέρους τμήματα που την αποτελούν. Επίσης περιγράφονται και οι διαδικασίες που ακολουθήθηκαν για να ελεγχθεί η ομαλή λειτουργία της διάταξης. Το κεφάλαιο 7 αποτελείται από την περιγραφή της βαθμονόμησης των οργάνων η οποία πραγματοποιείται για να εξασφαλιστεί η ορθή μέτρηση των μετρούμενων μεγεθών. Πιο συγκεκριμένα αναφέρονται τα καθαρά συστατικά που χρησιμοποιήθηκαν κατά την βαθμονόμηση του πυκνόμετρου, και ο τρόπος με τον οποίον οι βιβλιογραφικές πυκνότητες του καθενός συσχετίστηκαν με τις μετρούμενες πυκνότητες. Στη συνέχεια γίνεται παρουσίαση των αποκλίσεων των βιβλιογραφικών και πειραματικών πυκνοτήτων και με βάση τις χαμηλότερες αποκλίσεις επιλέγεται η εξίσωση που θα χρησιμοποιηθεί τελικά ώστε να συσχετισθεί η περίοδος ταλάντωσης της εκάστοτε φάσης του μείγματος με την πυκνότητα. Το τελευταίο κεφάλαιο περιλαμβάνει τις μετρήσεις του μείγματος (του οποίου παρουσιάζεται και η τελική σύσταση) και στη συνέχεια γίνεται σύγκριση της υπολογιζόμενης πυκνότητας της κάθε φάσης, με την προβλεπόμενη πυκνότητα που προκύπτει για τις ίδιες συνθήκες κάνοντας χρήση του προγράμματος WinProp της CMG.

Σ' έναν ταμιευτήρα πετρελαίου έχουμε παρουσία φάσεων πετρελαίου, αερίου και νερού. Οι φάσεις αυτές θα βρίσκονται και στη γεωτρητική στήλη κατά την άνοδο στην επιφάνεια. Μέχρι την άνοδο στην επιφάνεια, τα ρευστά αυτά υφίστανται μεταβολές ως προς τις ιδιότητές τους λόγω της αλλαγής των συνθηκών πίεσης, θερμοκρασίας και σύστασης. Για παράδειγμα ένα υγρό σε πίεση ταμιευτήρα 500 bar και θερμοκρασία 100 °C (συνθήκες ταμιευτήρα), θα υποστεί εκτόνωση στα 100 bar και 50 °C. Η εκτόνωση αυτή συνεπάγεται σε αύξηση του όγκου του και μεταβολή της πυκνότητας. Κατά συνέπεια η γνώση της πυκνότητας συνδέεται με την εκτίμηση των όγκων των παραγόμενων ρευστών με τη μεταβολή των ογκομετρικών παροχών. Γνωρίζοντας τον όγκο και το είδος του ρευστού μπορεί να γίνει μια εκτίμηση για τα οικονομικά αποτελέσματα μιας επιχείρησης, γνωρίζοντας την τιμή του πετρελαίου εκείνη την περίοδο.

## 5 Πειραματική διαδικασία και εργαστηριακός εξοπλισμός

Ο σκοπός της πειραματικής διαδικασίας μέτρησης περιόδων ταλάντωσης πυκνομέτρου είναι η εύρεση της πυκνότητας μειγμάτων υδρογονανθράκων με την προσθήκη διοξειδίου του άνθρακα σε συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας αντίστοιχες με αυτές που υπάρχουν σε έναν ταμειυτήρα πετρελαίου, για τη μελέτη της ακρίβειας πρόρρησης με κυβικές καταστατικές εξισώσεις. Τα μείγματα υδρογονανθράκων μελετήθηκαν σε εύρος πιέσεων 20-520 bar και θερμοκρασίες 20 , 60 , 90 °C και με σύσταση διοξειδίου του άνθρακα 0%, 30% και 60%. Για την μέτρηση πυκνοτήτων των πετρελαϊκών ρευστών σε συνθήκες υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας (συνθήκες ταμειυτήρα), απαιτήθηκε η κατασκευή πειραματικής διάταξης με κύριο όργανο ένα πυκνόμετρο υψηλών πιέσεων και θερμοκρασιών της Anton Paar.

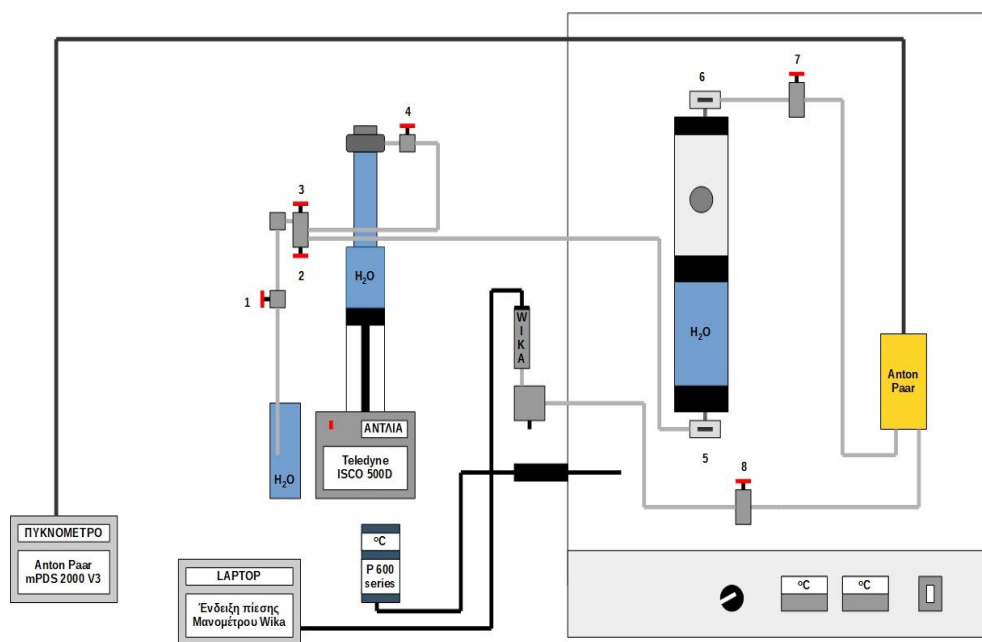
### 5.1 Εργαστηριακός εξοπλισμός

Η πειραματική διάταξη που τελικά κατασκευάστηκε, φαίνεται στο Σχήμα 5.1 και αποτελείται από τον εξής βασικό εξοπλισμό:

- δύο αντλίες θετικής εκτόπισης (1 και 2), μέσω των οποίων εφαρμόζεται η πίεση στα ρευστά. Επίσης, μέσω των αντλιών, επιτυγχάνεται η μεταφορά των ρευστών προς το πυκνόμετρο.
- έναν εμβολοφόρο κύλινδρο (αυτόκλειστο 1) τοποθετημένος μέσα στον κλίβανο. Ο κύλινδρος αυτός με το έμβολο χωρίζεται σε δύο τμήματα: στο ένα τμήμα υπάρχει το υπό μελέτη ρευστό, ενώ στο άλλο, υπάρχει το ρευστό μέσω του οποίου εφαρμόζεται η πίεση (απιονισμένο νερό). Είναι συνδεδεμένος με το πυκνόμετρο, μέσω κατάλληλων σωληνώσεων.
- έναν εργαστηριακό κλίβανο (αερόλουτρο), που διασφαλίζει σταθερή θερμοκρασία στο όλο εργαστηριακό σύστημα.
- Πυκνόμετρο υψηλών πιέσεων και θερμοκρασιών το οποίο είναι τοποθετημένο μέσα στον κλίβανο.

Για την ολοκλήρωση των πειραμάτων χρειάστηκαν ακόμα τα παρακάτω:

- |                         |                          |
|-------------------------|--------------------------|
| • μανόμετρο ακριβείας   | • θερμόμετρο             |
| • σύνδεσμοι             | • σωληνώσεις             |
| • βαλβίδες              | • φιάλες φόρτωσης αερίων |
| • χρωματογράφος         | • γυάλινη σύριγγα        |
| • δοχείο πλήρωσης νερού |                          |



Σχήμα 5.1: Πειραματική διάταξη

### 5.1.1 Εργαστηριακός κλίβανος

Ο εργαστηριακός κλίβανος (Σχήμα 5.2) που χρησιμοποιήθηκε είναι τύπου λουτρού αέρος (air bath) με θερμοστάτη για τον έλεγχο της θερμοκρασίας και τη διατήρησή της σε σταθερή τιμή με ακρίβεια  $\pm 0,1$  °C. Έχει κατασκευαστεί από την εταιρεία TEMCO Inc και το μοντέλο ονομάζεται LAC 2-18-4. Η μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας του είναι 260 °C και η ακρίβεια του θερμοστάτη είναι  $\pm 0.5$  °C. Για να εξασφαλιστεί η υψηλή ακρίβεια των μετρήσεων, τοποθετήθηκε ένα επιπρόσθετο θερμόμετρο (Σχήμα 5.3) μέσα στον κλίβανο και πλησίον του πυκνομέτρου.



Σχήμα 5.2: Εργαστηριακός κλίβανος (θερμοθάλαμος)



**Σχήμα 5.3:** Θερμόμετρο ακριβείας , οθόνη ακριβείας (αριστερά) και αισθητήρας (δεξιά)

### 5.1.2 Αντλίες ISCO

Οι αντλίες που χρησιμοποιούνται, είναι εμβολοφόρες ογκομετρικές αντλίες θετικής εκτόπισης (Positive Displacement Volumetric Pump) της εταιρείας Teledyne Isco (Σχήμα 5.4).



**Σχήμα 5.4:** Οι δύο αντλίες εισπίεσης νερού, Teledyne Isco 500D (αριστερά) και Teledyne Isco 260D (δεξιά)

Το έμβολο κινείται εντός του κυλίνδρου της αντλίας με τη βοήθεια ενός κοχλίου (spindle) ο οποίος περιστρέφεται με ηλεκτρικό κινητήρα. Οι αντλίες είναι εξοπλισμένες με όργανα ακριβείας για τη μέτρηση της πίεσης (μανόμετρα) και του όγκου του ρευστού που απομένει στον κύλινδρο της αντλίας σε κάθε χρονική στιγμή. Το ρευστό που χρησιμοποιείται σαν μέσο μετάδοσης της πίεσης, τοποθετείται στους κυλίνδρους των δύο αντλιών. Στην συγκεκριμένη πειραματική διάταξη, το ρευστό που επιλέχθηκε ήταν το απιονισμένο νερό καθώς παρουσιάζει χαμηλή (και γνωστή) συμπιεστότητα, έχει χαμηλό κόστος και δεν δημιουργεί μεγάλα προβλήματα σε περίπτωση που παρουσιαστούν διαρροές. Ο όγκος του νερού που εξέρχεται ή εισέρχεται στον κύλινδρο,

υπολογίζεται από τη διαφορά της θέσης του εμβόλου και η σχετική ένδειξη εμφανίζεται στην οθόνη της αντλίας.

Οι δύο αντλίες που χρησιμοποιήθηκαν διαφέρουν κυρίως ως προς την χωρητικότητα και την μέγιστη πίεση που μπορούν να φτάσουν. Τα χαρακτηριστικά της κάθε αντλίας δίνονται στους πίνακες 5.1 και 5.2.

500D Pump Module	
<b>Χωρητικότητα:</b>	<b>507 mL</b>
Παροχή (mL/min):	0.001 - 204
Ακρίβεια της παροχής:	0.5% of set point
Displacement Resolution:	31.71 nL
Motor Stability:	± 0.001% per year
<b>Μέγιστη πίεση (psi):</b>	<b>3750 (258 bar)</b>
Standard Pressure Accuracy:	0.5% FS
Optional Pressure Accuracy:	0.1% FS
Wetted Materials (standard):	Nitronic 50, PTFE, Hastelloy C-276
Plumbing Ports:	1/8" Valco
Operating Temperature:	5 - 40° C
Power required:	234 Vac, 50/60 Hz
Dimensions (HxWxD, cm):	103 x 27 x 45
Weight:	Pump module - 33 kg; controller - 3 kg

**Πίνακας 5.1:** Προδιαγραφές αντλίας 1

260D Pump Module	
<b>Χωρητικότητα:</b>	<b>266 mL</b>
Παροχή (mL/min):	0.001 - 107
Ακρίβεια της παροχής:	0.5% of set point
Displacement Resolution:	16.6 nL
Motor Stability:	± 0.001% per year
<b>Μέγιστη πίεση (psi):</b>	<b>7,500 (517 bar)</b>
Standard Pressure Accuracy:	0.5% FS
Optional Pressure Accuracy:	0.1% FS
Wetted Materials (standard):	Nitronic 50, PTFE, Hastelloy C-276
Plumbing Ports:	1/8" Valco
Operating Temperature:	5 - 40° C
Power required:	234 Vac, 50/60 Hz
Dimensions (HxWxD, cm):	103 x 27 x 45
Weight:	Pump module - 33 kg; controller - 3 kg

**Πίνακας 5.2:** Προδιαγραφές αντλίας 2

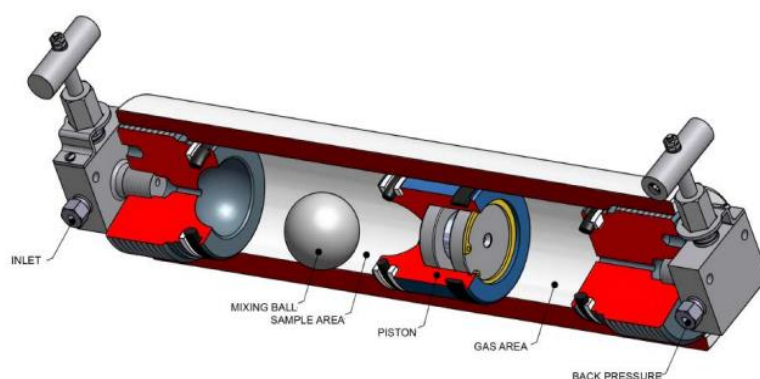
### 5.1.3 Αυτόκλειστος εμβολοφόρος κύλινδρος υψηλής πίεσης

Για τις ανάγκες του πειράματος χρειάστηκε ένας αυτόκλειστος εμβολοφόρος κύλινδρος από τιτάνιο, μοντέλο PROLIGHT TI-690-64-MB της εταιρείας PROSERV. Το αυτόκλειστο είναι κατασκευασμένο από τιτάνιο το οποίο είναι ιδιαίτερα ανθεκτικό υλικό σε υψηλές πιέσεις και θερμοκρασίες ανάλογες εκείνων που απαντώνται σε ταμειυτήρες πετρελαίου. Ο Πίνακας 5.3 αναφέρει τις προδιαγραφές αντοχής των κυλίνδρων.

PROSERV PROLIGHT TI-690-64-MB	
Μέγιστη πίεση	600 bar
Μέγιστη θερμοκρασία	149 °C
Χωρητικότητα	616 cc

**Πίνακας 5.3:** Χαρακτηριστικά αυτόκλειστου κελιού

Στο εσωτερικό του έχει ένα έμβολο που χωρίζει το δοχείο σε δυο θαλάμους. Στον κάτω θάλαμο περιέχει το ρευστό μέσω του οποίου εφαρμόζεται η πίεση (απιονισμένο νερό) και στον άλλο το μείγμα προς μελέτη καθώς και μια μεταλλική σφαίρα, η οποία βοηθά στην καλύτερη ανάμειξη του ρευστού (Σχήμα 5.5).



**Σχήμα 5.5:** Τομή εμβολοφόρου κυλίνδρου

Μετά από κάθε μεταβολή της πίεσης και της θερμοκρασίας, το ρευστό μέσα στο κελί μπορεί να καταστεί διφασικό. Για να εξασφαλιστεί η θερμοδυναμική ισορροπία μεταξύ των δύο φάσεων πρέπει να γίνει καλή ανάμειξη με τη βοήθεια της σφαίρας για αρκετό χρονικό διάστημα. Στην περίπτωση μονοφασικού συστήματος η ανάμειξη δεν είναι απαραίτητη. Στην Σχήμα 5.6 παρουσιάζεται η πειραματική διάταξη του αυτόκλειστου κελιού όπως τοποθετήθηκε εντός του θερμοθαλάμου.



**Σχήμα 5.6:** Το αυτόκλειστο κελί εντός του θερμοθαλάμου

### 5.1.4 Μανόμετρο ακριβείας

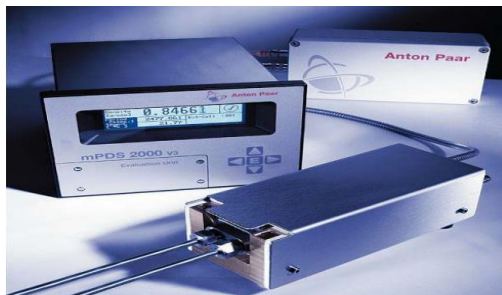
Το μανόμετρο που χρησιμοποιήθηκε είναι της εταιρείας Wika με εύρος πιέσεων έως και 600 barg. Διαθέτει κατάλληλο λογισμικό για σύνδεση με υπολογιστή στον οποίο καταγράφονται οι πιέσεις.

### 5.1.5 Πυκνόμετρο

Το πυκνόμετρο (Σχήμα 5.7) που χρησιμοποιήθηκε είναι της εταιρείας Anton Paar και αποτελείται από τρία βασικά τμήματα: την εσωτερική μονάδα DMA HPM που είναι τοποθετημένη εντός του κλιβάνου, την εξωτερική μονάδα συλλογής μετρήσεων mPDS 2000V3, την ενδιάμεση μονάδα, η οποία είναι συνδεδεμένη με τις προαναφερθείσες μονάδες και έχει ως στόχο την παροχή τάσης και την μετατροπή του σήματος.

Το πυκνόμετρο υψηλών πιέσεων και θερμοκρασιών, αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα όργανα για τα εργαστήρια PVT, καθώς έχει τη δυνατότητα να μετράει με ακρίβεια την πυκνότητα υγρών και αερίων, στις συνθήκες που επικρατούν στον ταμιευτήρα. Πλεονέκτημα αποτελεί και το γεγονός ότι για τη μέτρηση της πυκνότητας απαιτείται πολύ μικρή ποσότητα δείγματος (περίπου 2 mL).

Η εσωτερική μονάδα DMA HPM περιέχει σωλήνα σχήματος U ο οποίος ταλαντώνεται με μία χαρακτηριστική περίοδο. Όταν στο σωλήνα εισέλθει ρευστό με διαφορετική πυκνότητα, τότε η περίοδος ταλάντωσης του σωλήνα μεταβάλλεται αναλόγως. Το σήμα που στέλνει η μονάδα αυτή, φτάνει στην ενδιάμεση μονάδα, μετατρέπεται σε σήμα τάσης στην ενδιάμεση μονάδα και ψηφιοποιείται στην εξωτερική μονάδα όπου και απεικονίζεται σε ένδειξη διάρκειας περιόδου σε ms. Στην εξωτερική μονάδα είναι ορατές οι τιμές της περιόδου ταλάντωσης καθώς και της επικρατούσας θερμοκρασίας. Μέσω της περιόδου ταλάντωσης και με χρήση μαθηματικών εξισώσεων, είναι δυνατός ο ακριβής προσδιορισμός της πυκνότητας σε μεγάλο εύρος πιέσεων και θερμοκρασιών. Η εσωτερική μονάδα έχει τη δυνατότητα να "διαβάζει" ενδείξεις περιόδου σε πιέσεις 1-1400 bar και θερμοκρασίες από -10 έως 200°C.

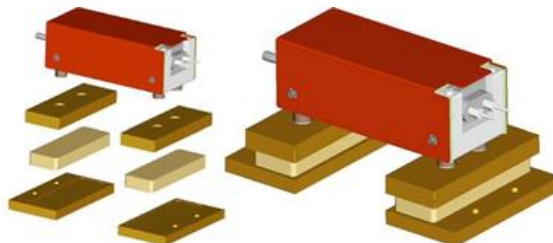


Σχήμα 5.7: Πυκνόμετρο Anton Paar



Σχήμα 5.8: Εσωτερική μονάδα πυκνόμετρου τοποθετημένη μέσα στο θερμοθάλαμο (αριστερά) και Εξωτερική μονάδα συλλογής μετρήσεων (δεξιά)

Για την ελαχιστοποίηση της επιρροής εξωτερικών κραδασμών που μπορεί να επηρεάσουν τις μετρήσεις της περιόδου ταλάντωσης του σωλήνα, χρησιμοποιήθηκαν βάσεις απορρόφησης των κραδασμών (Σχήμα 5.9). Η κάθε βάση αποτελείται από τρία κομμάτια: δύο μεταλλικές πλάκες μεγάλου βάρους και ένα ελαστομερές (τοποθετημένο μεταξύ των πλακών) το οποίο απορροφά τους κραδασμούς.



**Σχήμα 5.9:** Πυκνόμετρο τοποθετημένο στις βάσεις απορρόφησης κραδασμών

Οι προδιαγραφές του πυκνόμετρου που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα μελέτη δίνονται στον Πίνακα 5.4.

Density range	0 g/cm <sup>3</sup> to 3 g/cm <sup>3</sup>
Density resolution: (depends mainly on the resolution of the evaluation unit)	up to 0.00001 g/cm <sup>3</sup>
Density repeatability: (depends on the measuring conditions)*	0.0001 g/cm <sup>3</sup> to 0.00001 g/cm <sup>3</sup>
Density error: (depends on the measuring conditions)*	0.001 g/cm <sup>3</sup> to 0.0001 g/cm <sup>3</sup>
Cell material	Hastelloy C-276
Temperature range	-10 °C to +200 °C (14 °F to 392 °F)
Pressure range	0 bar to 1400 bar (0 psi to 20,300 psi)
Amount of sample in the measuring cell	approx. 2 mL
<b>Dimensions (L x W x H)</b>	
DMA HPM	210 mm x 78 mm x 86 mm (8.3 in. x 3.1 in. x 3.4 in.)
Interface module	220 x 120 x 80 mm (8.7 in. x 4.7 in. x 3.1 in.)
<b>Weight:</b>	
DMA HPM	8.3 kg (18.3 lbs)
Interface module	1.5 kg (3.3 lbs)

**Πίνακας 5.4:** Προδιαγραφές πυκνομέτρου

### 5.1.6 Σύνδεσμοι-σωληνώσεις

Οι σύνδεσμοι υψηλών πιέσεων που χρησιμοποιήθηκαν για την ένωση των σωληνώσεων στην πειραματική διάταξη είναι των εταιριών Autoclave (Parker), Nova και Swagelok (Σχήμα 5.10) με τις προδιαγραφές πίεσης και θερμοκρασίας να αναφέρονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 5.5).



**Σχήμα 5.10:** Σύνδεσμοι υψηλών πιέσεων Autoclave, Nova, Swagelok

Οι σωλήνες χρησιμοποιούνται για την μεταφορά και φόρτωση των ρευστών και την μετάδοση της πίεσης. Είναι κατασκευασμένοι από ανοξείδωτο χάλυβα SS 316 (stainless steel), διαμέτρου 1/8 ιντσών, με υψηλή αντοχή σε πίεση και θερμοκρασία.

	NOVA SWISS	AUTOCLAVE	SWAGELOK
<b>Μέγιστη πίεση</b>	1000 bar	1035 bar	720 bar
<b>Μέγιστη θερμοκρασία</b>	200 °C	-	204 °C

**Πίνακας 5.5:** Προδιαγραφές συνδέσμων

### 5.1.7 Βαλβίδες

Οι βαλβίδες είναι απαραίτητα στοιχεία της πειραματικής διάταξης καθώς ρυθμίζουν τη ροή των ρευστών στις επιθυμητές κατευθύνσεις. Έτσι επιτυγχάνεται απομόνωση ή επικοινωνία μεταξύ των τμημάτων της διάταξης ανάλογα με τις επιθυμητές διεργασίες. Στην παρούσα διπλωματική χρησιμοποιήθηκαν οι βαλβίδες των εταιρειών Auto-clave engineers - Parker και Nova Swiss (Σχήμα 5.11), με τα χαρακτηριστικά τους να δίνονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 5.6).



**Σχήμα 5.11:** Βαλβίδες Autoclave Engineers (αριστερά) και Nova Swiss (δεξιά)

	Autoclave engineers				Nova Swiss	
<b>Μοντέλο</b>	<b>10V2075</b>		<b>BTV 2F2P4</b>		<b>SN 989</b>	<b>SN 4793</b>
<b>Μέγιστη πίεση (psia)</b>	15000	14385	10000	9600	1000	1000
<b>Μέγιστη θερμοκρασία (°C)</b>	65	149	65	149	-	-
<b>Εξωτ. Διάμ. σωλήνα (in)</b>	1/8				1/8	

**Πίνακας 5.6:** Προδιαγραφές βαλβίδων

### **5.1.8 Φιάλες φόρτωσης αερίων – μανοεκτονωτής**

Κατά τη διάρκεια των εργαστηριακών πειραμάτων, χρησιμοποιήθηκαν τα αέρια μεθάνιο, αιθάνιο, προπάνιο, βουτάνιο και διοξείδιο του άνθρακα. Τα αέρια αυτά βρίσκονται υπό υψηλές πιέσεις σε φιάλες και για την φόρτωσή τους στα αυτόκλειστα απαιτήθηκε η χρήση μανοεκτονωτή ο οποίος συνδέεται στην βαλβίδα εξόδου των φιαλών και ελέγχει την πίεση εξόδου.

## **5.2 Μέτρα ασφαλείας για τη διεξαγωγή των πειραμάτων**

### **Για αποφυγή βραχυκυκλώματος:**

Η πειραματική διάταξη που αναπτύχθηκε, αποτελείται από συσκευές που χρησιμοποιούν ηλεκτρικό ρεύμα για την λειτουργία τους. Δεδομένου ότι ως μέσο άσκησης πίεσης χρησιμοποιήθηκε το νερό, και ως μετρούμενα ρευστά ορισμένοι αέριοι υδρογονάνθρακες, κρίθηκε σκόπιμο τα καλώδια όλων των συσκευών να βρίσκονται πίσω από τον πάγκο εργασίας και όσο το δυνατόν πιο μακριά από το δοχείο του νερού και τους κλάδους από τους οποίους διέρχονται υγρά.

### **Για προστασία από τις υψηλές πιέσεις:**

Τα πειράματα έλαβαν χώρα σε υψηλές πιέσεις έως 500 bar. Προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν οι πιθανότητες διαρροής και να εξασφαλιστεί ο καλύτερος δυνατός έλεγχος, η διάταξη σχεδιάστηκε με τέτοιο τρόπο ώστε να υπάρχουν μόνο δύο κλάδοι υψηλής πίεσης συνδεδεμένοι με τις αντλίες. Οι υπόλοιποι κλάδοι από τους οποίους διέρχεται ρευστό υπό υψηλή πίεση, βρίσκονται εντός του κλιβάνου και σε απόσταση ασφαλείας από τους χειριστές της διάταξης. Επίσης, καθ' όλη τη διάρκεια διεξαγωγής των πειραμάτων, ελήφθησαν όλα τα προσωπικά μέτρα ασφαλείας (χρήση ειδικών γυαλιών για προστασία των οφθαλμών, διατήρηση απόστασης ασφαλείας από την διάταξη, προσεκτικός χειρισμός φιαλών υπό πίεση).

### **Για προστασία από τις υψηλές θερμοκρασίες:**

Οι υψηλές θερμοκρασίες ελέγχονται και περιορίζονται στον αεροθάλαμο του κλιβάνου, με αποτέλεσμα να μην είναι απαραίτητη η λήψη κάποιου επιπλέον μέτρου ασφαλείας. Επίσης, έγινε ενδελεχής έλεγχος των προδιαγραφών όλων των επιμέρους εξαρτημάτων (σωληνών, βαλβίδων, αυτοκλείστων κ.α.) που τοποθετήθηκαν εντός του κλιβάνου, προκειμένου να διαπιστωθεί αν είναι ασφαλής η χρήση τους στις προκαθορισμένες θερμοκρασίες πραγματοποίησης των πειραμάτων.

## **5.3 Προετοιμασία, λειτουργία και καθαρισμός πειραματικής διάταξης**

Πριν την έναρξη κάθε πειράματος, είναι απαραίτητη η κατάλληλη προετοιμασία της πειραματικής διάταξης. Αρχικά, γίνεται καθαρισμός στο εσωτερικό της με απιονισμένο νερό έτσι ώστε να απομακρυνθούν τυχόν υπολείμματα ρευστών από προηγούμενα πειράματα. Ακολουθεί έλεγχος για διαρροές και όπου εντοπιστούν στεγανοποιούνται. Αφού είναι βέβαιο ότι το νερό έχει περάσει από όλες τις σωληνώσεις της διάταξης, απομακρύνεται από αυτές με τη χρήση πεπιεσμένου αέρα. Έπειτα για να είναι σίγουρο πως δεν έχει μείνει κανένα απολύτως σταγονίδιο νερού στα τοιχώματα των σωληνώσεων, εφαρμόζεται κενό. Η διαδικασία γίνεται ακολουθώντας τα παρακάτω βήματα.

### 5.3.1 Πλήρωση αντλιών με νερό

Αρχικά, οι αντλίες γεμίζονται με απιονισμένο νερό από το δοχείο πλήρωσης. Οι κατάλληλες βαλβίδες κλείνονται και ανοίγουν πρώτα η βαλβίδα που επιτρέπει την πλήρωση της αντλίας 1 (500D) και έπειτα η βαλβίδα που αντιστοιχεί στην αντλία 2 (260D), από τις οποίες εισάγεται νερό στους κυλίνδρους (λειτουργία REFILL). Το νερό ρέει μέσα στη σωλήνωση που συνδέεται με τον κλάδο γ. Οι αντλίες γεμίζουν με νερό, ωστόσο είναι αναγκαίο να γίνει εξαέρωση, για τυχόν φυσαλίδες που έχουν εγκλωβιστεί. Ανοίγονται οι κατάλληλες βαλβίδες και οι αντλίες εισπιέζουν νερό προκειμένου να αποβληθεί ο αέρας από τους κυλίνδρους τους. Έτσι εξασφαλίζεται ότι υπάρχει μόνο νερό εντός των αντλιών και οι ενδείξεις της πίεσης είναι αντιπροσωπευτικές της υδραυλικής επικοινωνίας. Με το πέρας της εξαέρωσης οι βαλβίδες κλείνονται.

### 5.3.2 Πλήρωση θαλάμου αυτοκλείστου με νερό

Επόμενο στάδιο είναι η πλήρωση του αυτοκλείστου με νερό στον θάλαμο (κάτω). Γεμίζεται ο κάτω θάλαμος του αυτοκλείστου αφού οι αντλίες τεθούν σε λειτουργία εισπίεσης. Πραγματοποιείται εξαέρωση και σε αυτό το στάδιο. Το αυτόκλειστο αναποδογυρίζεται έτσι ώστε η βαλβίδα 7 να βρεθεί προς τα πάνω. Ο σύνδεσμος της βαλβίδας 7 με το αυτόκλειστο λύνεται αρκετά για να διαφύγει ο αέρας. Η αντλία πιέζει νερό, μέχρις ότου αυτό εμφανιστεί από τη σύνδεση για να βεβαιωθούμε ότι ο αέρας έχει διαφύγει από το κάτω σκέλος του αυτοκλείστου. Η αντλία πιέζει νερό στο αυτόκλειστο με αποτέλεσμα τη μετατόπιση του εμβόλου της αντλίας προς τα πάνω. Όταν ο όγκος της αντλίας, ο οποίος αναγράφεται στην οθόνη μηδενιστεί, σημαίνει πως η αντλία έχει αδειάσει και το έμβολό της έχει μετατοπιστεί στην ανώτερη θέση. Η χωρητικότητα της αντλίας σε νερό είναι 507ml. Επαναλαμβάνεται η διαδικασία πλήρωσης της αντλίας με νερό και η εξαέρωση. Σε αυτό το σημείο είναι βέβαιο πως η αντλία είναι γεμάτη με νερό και εξαερωμένες, το ίδιο και το αυτόκλειστο στον θάλαμο υποδοχής νερού.

### 5.3.3 Πλήρωση αυτοκλείστου άνωθεν και κάτωθεν με νερό

Αφού προηγηθούν τα παραπάνω, προχωράμε στην πλήρωση των εναπομεινάντων άδειων κελίων με νερό προκειμένου να λάβει χώρα η δοκιμή διαρροών (leak test) και πίεσης (pressure test). Ανοίγονται οι κατάλληλες βαλβίδες και γεμίζουν τα κελιά με νερό το οποίο περνάει μέσα από το πυκνόμετρο και το μανόμετρο. Γίνεται εξαέρωση και σε αυτό το στάδιο. Όταν παρατηρηθεί σταθερή ροή νερού από τη διπλή βαλβίδα, κλείνεται και ταπώνεται. Το σύστημα βρίσκεται σε υδραυλική ισορροπία.

### 5.3.4 Δοκιμή πίεσης (pressure test)

Η πίεση αυξάνεται έως τα 50 bar και από εκεί και έπειτα σταδιακά ανά 50 bar έως ότου φτάσει περί τα 520 bar. Η πίεση αυξάνεται με την εισπίεση νερού στο σύστημα από την αντλία. Σε κάθε πίεση έγινε οπτικός έλεγχος για τυχόν διαρροές από όλα τα σημεία της συνδεσμολογίας. Η διαρροή στο σύστημα γίνεται αντιληπτή οπτικά καθώς και μέσω της εμφάνισης μόνιμης παροχής από την αντλία. Εάν η τιμή της παροχής δεν τείνει στο μηδέν, τότε σημαίνει ότι υπάρχει διαρροή στο σύστημα.

### 5.3.5 Αποστράγγιση νερού

Μετά το pressure test, αδειάζει η διάταξη από νερό (εκτός φυσικά από τους τομείς που είναι απαραίτητο να περιέχουν νερό, δηλαδή κελί αυτοκλείστου κάτωθεν) με εφαρμογή κενού και ξήρανση με αύξηση της θερμοκρασίας.

### 5.4 Πιθανές αστοχίες κατά τη διάρκεια του πειράματος

Παρότι η διάταξη σχεδιάστηκε και υλοποιήθηκε ώστε να είναι αξιόπιστη ως προς την επίτευξη υψηλών πιέσεων και θερμοκρασιών, ορισμένα αναλώσιμα όπως είναι οι στεγανοποιητικοί δακτύλιοι και οι αντίστοιχες πλαστικές βάσεις τους μπορεί να χρειαστούν αντικατάσταση κατά τη διάρκεια της μελέτης. Συγκεκριμένα, τα πιστόνια εντός του θερμοθαλάμου στο πάνω και κάτω μέρος τους διαθέτουν πώματα τα οποία στεγανοποιούνται με O-ring (Σχήμα 5.12). Τα O-ring έπειτα από πολύωρη καταπόνηση καταστρέφονται. Αποτέλεσμα αυτού είναι η διαρροή του αυτοκλείστου με συνέπεια την πτώση της πίεσης.



Σχήμα 5.12: O-ring με τα αντίστοιχα καπάκια

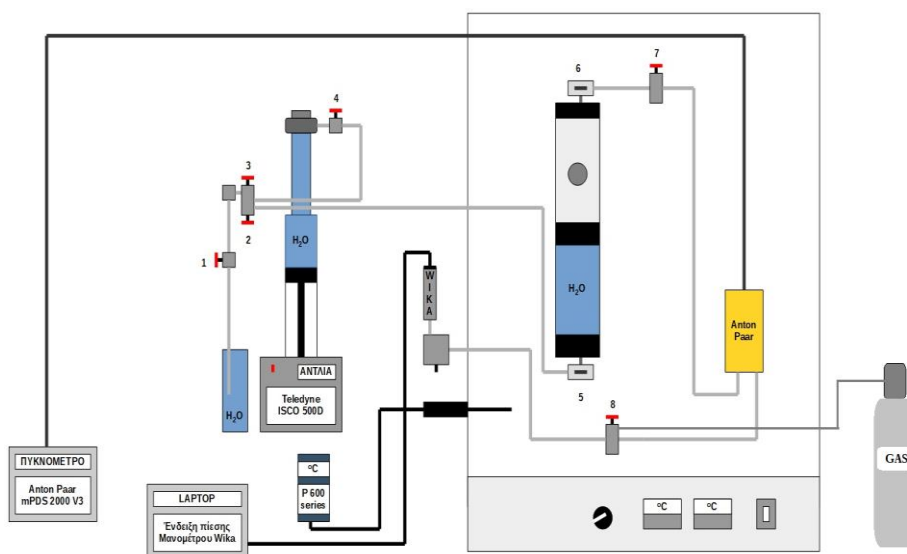
Μια άλλη πιθανή αστοχία στεγανοποίησης είναι αυτή του εμβόλου που περιέχουν στο εσωτερικό τους τα αυτόκλειστα κελιά. Το έμβολο διαχωρίζει το πιστόνι σε δυο θαλάμους το περιεχόμενο των οποίων δεν έρχεται σε επαφή. Ωστόσο σε σπάνιες περιπτώσεις η στεγανοποίηση που περιβάλλει το έμβολο διαταράσσεται και εν τελεί τα ρευστά αναμειγνύονται εντός του πιστονιού. Αυτό επιφέρει αλλαγές στις τιμές της πυκνότητας, οπότε παύει πλέον να υπάρχει ακεραιότητα στη διαδικασία μέτρησης. Συνήθως εντοπίζεται από τις αλματώδεις διαφορές μεταξύ των τιμών της πυκνότητας στην οθόνη του πυκνόμετρου. Σε αυτή την περίπτωση ο χειριστής είναι αναγκαίο να σταματήσει το πείραμα, να αντικαταστήσει το έμβολο και να επαναλάβει όλες τις παραπάνω διαδικασίες καθαρισμού, πλήρωσης και φόρτωσης των ρευστών του.

### 5.5 Φόρτωση αερίων υδρογονανθράκων και διοξειδίου του άνθρακα

Τα αέρια συστατικά, είναι αποθηκευμένα σε ειδικές φιάλες υπό πίεση. Για να μεταφερθεί ποσότητα αερίου από τη φιάλη στα αυτόκλειστα ακολουθείται η εξής διαδικασία: Αρχικά η φιάλη αερίου συνδέεται στο σύστημα μέσω βαλβίδας. Στην έξοδο της φιάλης έχει τοποθετηθεί ρυθμιστής της πίεσης εξόδου του αερίου. Το έμβολο του αυτοκλείστου έχει μεταφερθεί στο αρχικό σημείο (δηλαδή στο σημείο που φτάνει όταν δεν υπάρχει νερό στο θάλαμο για να ασκήσει πίεση) προκειμένου να υπάρχει χώρος για να εισέλθει το αέριο. Για τη μεταφορά, ανοίγονται οι κατάλληλες βαλβίδες της διάταξης καθώς και η βαλβίδα της φιάλης. Όταν μεταφερθεί η απαραίτητη ποσότητα, οι βαλβίδες κλείνονται.

Στην πειραματική διάταξη φορτώθηκαν οι εξής αέριοι υδρογονάνθρακες και μείγματα υδρογονανθράκων: Μεθάνιο, Αιθάνιο, Προπάνιο, Μεθάνιο-Αιθάνιο, Μεθάνιο-Αιθάνιο-CO<sub>2</sub> (30%), Μεθάνιο-Αιθάνιο-CO<sub>2</sub> (60%), Μεθάνιο-Προπάνιο, Μεθάνιο-Προπάνιο-CO<sub>2</sub> (30%), Μεθάνιο-Προπάνιο-CO<sub>2</sub> (60%), Μεθάνιο-Βουτάνιο, Μεθάνιο-Βουτάνιο-CO<sub>2</sub> (30%), Μεθάνιο-Βουτάνιο-CO<sub>2</sub> (60%).

Αρχικά η φιάλη αερίου συνδέεται στο σύστημα μέσω της βαλβίδας 8 (Σχήμα 5.17). Στην έξοδο της φιάλης έχει τοποθετηθεί ρυθμιστής μείωσης της πίεσης εξόδου του αερίου καθώς εντός της φιάλης το αέριο βρίσκεται σε υψηλή πίεση. Το έμβολο του αυτοκλείστου έχει μεταφερθεί στο αρχικό σημείο (δηλαδή στο σημείο που φτάνει όταν δεν υπάρχει νερό στον θάλαμο για να ασκήσει πίεση) προκειμένου να υπάρχει χώρος για να εισέλθει το αέριο. Για τη μεταφορά, ανοίγονται οι βαλβίδες 8,7,6 καθώς και η βαλβίδα της φιάλης. Όταν μεταφερθεί η επιθυμητή ποσότητα, οι βαλβίδες κλείνονται.



Σχήμα 5.13: Φόρτωση αερίου στην πειραματική διάταξη

## 5.6 Πειραματική διαδικασία μέτρησης πυκνότητας αερίων υδρογονανθράκων

Από την στιγμή που έχει πραγματοποιηθεί η φόρτωση του αερίου ή του μείγματος αερίων στην πειραματική διάταξη, για να μετρηθεί πειραματικά η πυκνότητά τους σε διαφορετικές θερμοκρασίες και πιέσεις λαμβάνουν χώρα τα παρακάτω βήματα. Ξεκινώντας από την χαμηλότερη πίεση αμέσως μετά την φόρτωση των αερίων και όντας κλειστές όλες οι βαλβίδες, ανοίγουμε τις βαλβίδες 2,4,5,6,7 και 8. Στην συνέχεια αφού έχει οριστεί και σταθεροποιηθεί η εκάστοτε θερμοκρασία που έχουμε επιλέξει στον κλίβανο ξεκινάμε το πείραμα. Συγκεκριμένα ορίζουμε στην αντλία την πίεση που επιθυμούμε ( αυξάνεται με βήμα μέχρι τα 500 bar περίπου και στην συνέχεια αντίστροφα μειώνεται μέχρι τα αρχικά bar ) και πατάμε το κουμπί RUN έτσι ώστε το έμβολο που κινείται εντός του κυλίνδρου της αντλίας να ανέβει ή να κατέβει αντίστοιχα προκειμένου να επιτευχθεί η πίεση στο σύστημα που έχουμε επιλέξει. Στο τέλος κάθε ενέργειας αναμένουμε μέχρι να ισορροπήσει το σύστημα και να σταθεροποιηθεί η τιμή ένδειξης της περιόδου ταλάντωσης που φαίνεται στην εξωτερική μονάδα συλλογής μετρήσεων του πυκνομέτρου, ώστε να την καταγράψουμε, όπως επίσης και την πίεση και την θερμοκρασία που πραγματοποιήθηκε η μέτρηση.

## 6 Βαθμονόμηση

Πολύ σημαντικό κομμάτι πριν την διεξαγωγή των πειραματικών μετρήσεων, αποτελεί το κομμάτι της βαθμονόμησης των οργάνων. Η βαθμονόμηση ενός οργάνου μέτρησης είναι η συσχέτιση των ενδείξεων του οργάνου με τις τιμές προτύπων αναφοράς οι οποίες έχουν προσδιοριστεί με ακρίβεια. Με αυτή τη διαδικασία εξασφαλίζεται η σωστή αντιστοίχιση μεταξύ ένδειξης του οργάνου και πραγματικής τιμής. Οι βαθμονομήσεις έγιναν στα μανομέτρα των αντλιών και στο πυκνομέτρο. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιούνται οι διορθώσεις από προαναφερθείσα εργασία (Ατσάρος Φώτης, 2021). Ως γνωστόν, κάθε μέτρηση υπόκειται σε ένα βαθμό αβεβαιότητας που καταγράφεται ως σφάλμα της συγκεκριμένης μέτρησης. Το σφάλμα είναι δείγμα της ποιότητας της μέτρησης. Το αποτέλεσμα μιας μέτρησης είναι ολοκληρωμένο όταν συνοδεύεται από τη δήλωση του σφάλματος. Στη περίπτωση δε, που οι μετρήσεις είναι μέρος βαθμονόμησης, το σφάλμα είναι απαραίτητο να αναφερθεί.

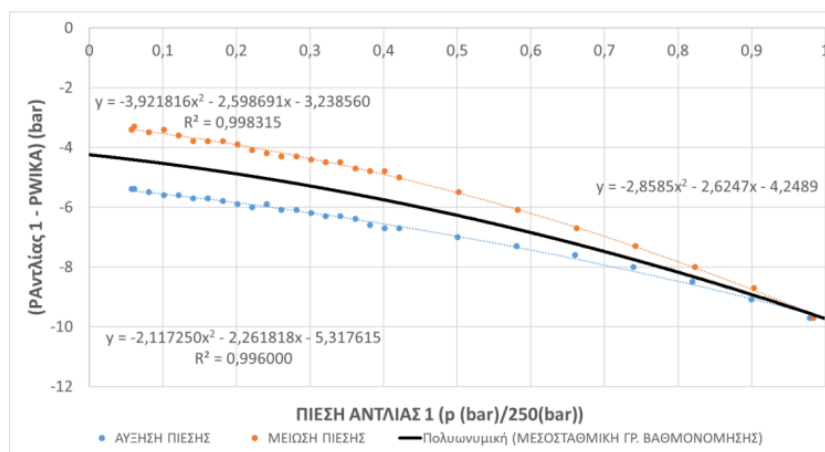
### 6.1 Βαθμονόμηση μανομέτρων αντλιών

Τα μανόμετρα των αντλιών της παρούσας εργασίας έχουν ακρίβεια  $\pm 0,5\%$  FS (Full Scale) δηλαδή  $\pm 0,5\%$  της μέγιστης τιμής πίεσης που μπορούν να φτάσουν σύμφωνα με τον κατασκευαστή. Η μέγιστη τιμή πίεσης που μπορούν να επιτύχουν οι αντλίες είναι 258 και 517 bar αντίστοιχα. Η μέγιστη πίεση της εκάστοτε αντλίας πολλαπλασιασμένη με την ακρίβεια δίνει την διαφορά σε bar από την πραγματική τιμή. Άρα πρακτικά η πραγματική τιμή της πίεσης της αντλίας 1 μπορεί να διαφέρει κατά  $\pm 1,3\text{bar}$  σε σχέση με την ένδειξη της αντλίας 1 ( $258\text{bar} \cdot (\pm 0,005) = \pm 1,3\text{bar}$ ), ενώ της αντλίας 2 κατά  $\pm 2,6\text{bar}$  ( $517\text{bar} \cdot (\pm 0,005) = \pm 2,6\text{bar}$ ).

Για να έχουμε καλύτερη εικόνα σε ότι αφορά τη τιμή της πίεσης εντός της διάταξης, χρησιμοποιήθηκε μανόμετρο μεγαλύτερης ακρίβειας. Σύμφωνα με τον κατασκευαστή, η ακρίβεια του οργάνου είναι  $\pm 0,1\%$  FS (Full Scale) σε θερμοκρασιακό εύρος  $0^\circ\text{C}$  έως  $50^\circ\text{C}$ . Άρα η πραγματική τιμή της πίεσης κυμαίνεται  $\pm 0,6\text{ bar}$  από την τιμή ανάγνωσης εφόσον η μέγιστη τιμή πίεσης για την οποία είναι φτιαγμένο είναι έως και  $600\text{bar}$  άρα  $600 \cdot \pm 0,001 = \pm 0,6\text{bar}$ . Πρέπει να επισημανθεί ότι οι τιμές πίεσης που λαμβάνουμε από τα όργανα είναι σχετικές, άρα πρέπει σε αυτές να προστεθεί η ατμοσφαιρική πίεση ώστε να προκύψει η απολυτή τιμή.

Επίσης, κατά την πραγματοποίηση των μετρήσεων, παρατηρήθηκε ότι η ένδειξη της πίεσης της αντλίας 1 διαφέρει έναντι της ένδειξης της αντλίας 2. Άρα, για να εξασφαλιστεί όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια στις πιέσεις, είναι αναγκαία η βαθμονόμηση των μανομέτρων των αντλιών βάσει του μανομέτρου ακριβείας (μανόμετρο WIKA). Το μανόμετρο αυτό βρίσκεται σε υδραυλική επικοινωνία με τις αντλίες και το αυτόκλειστο κελί που περιέχει το ρευστό βαθμονόμησης (νερό) και πραγματοποιήθηκε η διαδικασία παίρνοντας ενδείξεις ταυτόχρονα και από τα τρία μανόμετρα. Η βαθμονόμηση έγινε σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και σε πιέσεις από 5 έως  $500\text{ bar}$ , οι οποίες αποτελούν το εύρος των πιέσεων που διενεργήθηκε το πείραμα. Επιλέχθηκε ως ρευστό βαθμονόμησης απιονισμένο νερό λόγω της πρακτικά μηδενικής του συμπιεστότητας σε αυτή την περιοχή πιέσεων.

Από την βαθμονόμηση των μανομέτρων των αντλιών αναπτύχθηκαν δύο εξισώσεις (μία για τη συμπίεση και μία για την αποσυμπίεση σε κάθε αντλία) οι οποίες διορθώνουν την ένδειξη της πίεσης του μανομέτρου της κάθε αντλίας ως προς την ένδειξη της πίεσης του μανομέτρου ακριβείας. Οι διαφορές μεταξύ των μετρήσεων της αντλίας 1 και του μανομέτρου ακριβείας παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.1.



**Σχήμα 6.1:** Βαθμονόμηση μανομέτρου αντλίας 1

Οι πιέσεις του μανομέτρου ακριβείας θεωρούνται ως πραγματικές και στόχος είναι να συσχετισθούν με τις αναγραφόμενες πιέσεις των αντλιών 1 και 2. Έτσι, στο Σχήμα 6.1 τοποθετήθηκε στον κάθετο άξονα η διαφορά  $\Delta P$  των πιέσεων μεταξύ μανομέτρου ακριβείας ( $P_{real}$ ) και αντλίας ( $P_{pump}$ ) ενώ στον οριζόντιο άξονα, οι κανονικοποιημένες τιμές της πίεσης της αντλίας και εφαρμόστηκε η μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων χρησιμοποιώντας πολυωνυμική συνάρτηση δευτέρου βαθμού. Η κανονικοποίηση έγινε διαιρώντας τις τιμές της πίεσης της αντλίας 1 με 250 bar και της αντλίας 2 με 500 bar, ώστε εφαρμόζοντας τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων το πεδίο ορισμού της πίεσης να είναι μεταξύ 0 και 1.

Οι ενδείξεις των δύο μανομέτρων ελήφθησαν τόσο κατά την αύξηση (από 5 έως 250 bar για την αντλία 1 και 5 έως 500 bar για την αντλία 2) όσο και κατά την μείωση (από 250 έως 5 bar και από 500 έως 5 bar αντιστοίχως) της πίεσης. Παρατηρείται ότι οι τιμές της αύξησης και της μείωσης της ένδειξης της πίεσης του μανομέτρου της αντλίας δεν βρίσκονται σε συμφωνία εξαιτίας της ύπαρξης υστέρησης η οποία παρατηρείται συχνά σε μετρητικά όργανα. Κατά συνέπεια, η ένδειξη της πίεσης κατά την άνοδο, είναι μεγαλύτερη από την πραγματική πίεση, ενώ κατά την κάθοδο είναι μικρότερη από την πραγματική πίεση.

Προκειμένου να προκύψει η μέση τιμή της διαφοράς πίεσης ως προς το μανόμετρο ακρίβειας WIKA για φάση συμπίεσης/αποσυμπίεσης, κατασκευάστηκε στο Σχήμα 6.1 η μεσοσταθμική εξίσωση, η λύση της οποίας δίνει την μέση τιμή των  $\Delta P$ . Συνεπώς η «πραγματική» απολυτή πίεση σε σχέση με τις ενδείξεις της αντλίας 1, προκύπτει μέσω της ακόλουθης εξίσωσης:

$$P_{real1} = P_{pump1} + \Delta P_{M1} + P_{atm} \quad (6.1)$$

όπου  $P_{atm} = 1,013$  bar (τυπικό) και το  $\Delta P_{M1}$  δίδεται από την επίλυση της παρακάτω εξίσωσης:

$$\Delta P_{M1} = 2,8585 \cdot P_{pump1}^2 - 2,6247 \cdot P_{pump1} - 4,2489 \quad (6.2)$$

Για παράδειγμα, στην περίπτωση που η ένδειξη της αντλίας 1 είναι 100 bar( $P_{pump1}$ ) τότε η πραγματική τιμή της πίεσης βρίσκεται ακολούθως:

$$\begin{aligned} \Delta P_{M1} &= -2,8585 \cdot (P_{pump1})^2 - 2,6247 \cdot (P_{pump1}) - 4,2489 \Leftrightarrow \\ \Delta P_{M1} &= -2,8585 \cdot (100)^2 - 2,6247 \cdot (100) - 4,2489 \Leftrightarrow \\ \Delta P_{M1} &= -5,3033 \text{ barg} \end{aligned}$$

Επομένως:

$$\begin{aligned} P_{real1} &= 100 + \Delta P_{M1} + P_{atm} \Leftrightarrow \\ P_{real1} &= 100 - 5,3033 + 1,013 = 94,6966 + 1,013 = 95,7096 \text{ bar} \end{aligned}$$

Αντίστοιχη διαδικασία ακολουθήθηκε στον υπολογισμό της «πραγματικής» απόλυτης τιμής της πίεσης σε σχέση με τις ενδείξεις της αντλίας 2. Οι διαφορές μεταξύ των μετρήσεων της αντλίας 2 και του μανομέτρου ακριβείας παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.2, μαζί με τη μεσοσταθμική εξίσωση.

Η «πραγματική» απόλυτη πίεση σε σχέση με τις ενδείξεις της αντλίας 2, προκύπτει μέσω της ακόλουθης εξίσωσης:

$$P_{\text{real2}} = P_{\text{pump2}} + \Delta P_{M2} + P_{\text{atm}} \quad (6.3)$$

όπου  $P_{\text{atm}} = 1,013 \text{ bar}$  (τυπικό) και το  $\Delta P_{M2}$  δίδεται από την επίλυση της παρακάτω εξίσωσης:

$$\Delta P_{M2} = -3,6624 \cdot P_{\text{pump2}}^2 + 2,9427 \cdot P_{\text{pump2}} - 5,0356 \quad (6.4)$$

Για παράδειγμα, στην περίπτωση που η ένδειξη της αντλίας 2 είναι 300 bar ( $P_{\text{pump2}}$ ) τότε η πραγματική τιμή της πίεσης βρίσκεται ακολούθως:

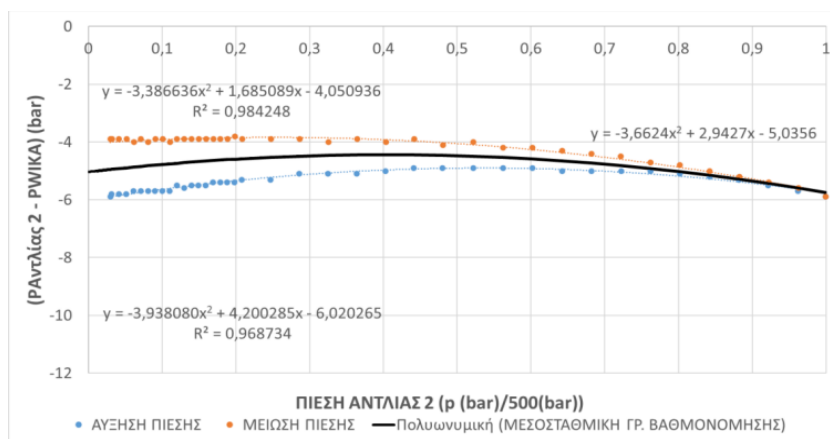
$$\begin{aligned} \Delta P_{M2} &= -3,6624 \cdot (P_{\text{pump2}})^2 + 2,9427 \cdot (P_{\text{pump2}}) - 5,0356 \Leftrightarrow \\ \Delta P_{M2} &= -3,6624 \cdot (300)^2 + 2,9427 \cdot (300) - 5,0356 \Leftrightarrow \\ \Delta P_{M2} &= -3,2743 \text{ barg} \end{aligned}$$

Επομένως:

$$\begin{aligned} P_{\text{real2}} &= 300 + \Delta P_{M2} + P_{\text{atm}} \Leftrightarrow \\ P_{\text{real2}} &= 300 - 3,274 + 1,013 = 296,7257 + 1,013 = 297,7387 \text{ bar} \end{aligned}$$

Παρατηρούμε ότι το εύρος των διαφορών μεταξύ ανόδου και καθόδου της πίεσης (δλδ. η διαφορά των διαφορών  $\Delta P$ ) βαίνει μειούμεeno όσο αυξάνεται η ανηγμένη πίεση. Παρά το γεγονός ότι κάποιος θα ανέμενε να είναι ίσες οι τιμές της διαφοράς στον κύκλο συμπίεσης-αποσυμπίεσης, ωστόσο αυτό δεν παρατηρείται. Αυτό πιθανότατα οφείλεται στον ρυθμό απορρόφησης της πίεσης του θαλάμου λόγω των ποσοτήτων αέρα που ενδέχεται να είναι διαλελυμένα μέσα στο απιονισμένο νερό.

Μακροσκοπικά τα μανόμετρα των αντλιών δεν είναι κατασκευασμένα για ακριβείς μετρήσεις και το σφάλμα τους δεν είναι σταθερό καθ' όλο το εύρος πιέσεων όπως είναι του μανομέτρου ακριβείας (WIKA). Όπως παρατηρούμε για την αντλία 1 (Σχήμα 6.1) η απόκλιση του μανομέτρου της ως προς το WIKA είναι κατά απόλυτη τιμή μικρότερο του 3,88%, το οποίο παρατηρείται στην μέγιστη πίεση (250 bar). Για την αντλία 2 (Σχήμα 6.2) η απόκλιση του μανομέτρου της ως προς το WIKA είναι κατά απόλυτη τιμή μικρότερο του 1,18% και παρατηρείται στην ελάχιστη πίεση της βαθμονόμησης (6 bar). Δεν κρίθηκε απαραίτητη η βαθμονόμηση των όγκων των αντλιών καθώς η πυκνότητα δεν υπολογίστηκε ογκομετρικά αλλά από την περίοδο ταλάντωσης του σωλήνα του πυκνόμετρου.



Σχήμα 6.2: Βαθμονόμηση μανομέτρου αντλίας 2

## 6.2 Βαθμονόμηση πυκνομέτρου

Η βαθμονόμηση του πυκνόμετρου είναι μια πολύπλοκη διαδικασία λόγω της εξάρτησης της ένδειξης του πυκνομέτρου ταυτόχρονα από την πίεση, τη θερμοκρασία και την πυκνότητα του ρευστού. Για τον πειραματικό προσδιορισμό της πυκνότητας υπάρχουν μέθοδοι οι οποίες στηρίζονται σε διαφορετικές αρχές και στοχεύουν στη βελτίωση της ακρίβειας της μέτρησης. Ορισμένες από τις μεθόδους μετρούν απευθείας την πυκνότητα ενώ άλλες την υπολογίζουν έμμεσα. Στις έμμεσες μεθόδους, η πλέον χρησιμοποιούμενη είναι αυτή του πυκνόμετρου με δονούμενο σωλήνα (Kratky et al.1969) η οποία στηρίζεται στη μέτρηση της περιόδου ταλάντωσης ενός σωλήνα ο οποίος περιέχει το υπό μελέτη ρευστό. Χρησιμοποιείται ευρέως στην έρευνα και στη βιομηχανία λόγω της ακρίβειάς που προσφέρει αλλά και της ευκολίας στη χρήση του. Ωστόσο, η ακρίβεια της μεθόδου εξαρτάται κατά κύριο λόγο από τη διαδικασία βαθμονόμησης που έχει προηγηθεί της μέτρησης.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, ως εξίσωση βαθμονόμησης χρησιμοποιήθηκε αυτή που προτείνει ο κατασκευαστής του πυκνομέτρου και περιγράφεται αναλυτικά παρακάτω. Για την όσο το δυνατόν αναλυτικότερη βαθμονόμηση του πυκνομέτρου, σχεδιάστηκε μια σειρά μετρήσεων με τρία διαφορετικά καθαρά συστατικά αέριας μορφής, τα οποία καλύπτουν το εύρος των πιθανών πυκνοτήτων που θα μετρηθούν από το όργανο κατά τη διάρκεια των πειραμάτων της παρούσας διπλωματικής με πολυσυστατικά μείγματα.

Η βαθμονόμηση του πυκνομέτρου έγινε συναρτήσει της θερμοκρασίας, της πίεσης και της πυκνότητας του ρευστού. Χρησιμοποιήθηκαν οι ακόλουθες εξισώσεις για τη μετατροπή της περιόδου ταλάντωσης σε πυκνότητα.

### 6.2.1 Μετατροπή περιόδου ταλάντωσης σε πυκνότητα

Για να προσδιοριστεί η πυκνότητα δειγμάτων τα οποία μετρούνται σε μεγάλο εύρος πιέσεων και θερμοκρασιών από την περίοδο ταλάντωσης, ο κατασκευαστής προτείνει μια εξίσωση της μορφής

$$Y = C + Bx + Ax^2 \quad (6.5)$$

που είναι ένα πολυώνυμο 2<sup>ου</sup> βαθμού ως προς την περίοδο ταλάντωσης.

Το x ισούται με  $dp^2$  που είναι το τετράγωνο της περιόδου ταλάντωσης, ενώ οι συντελεστές της εξίσωσης είναι:

$$C = AA + AB * dt + AC * dd + AD * dt^2 + AE * dd^2 \quad (6.6)$$

$$B = AF + AG * dt + AH * dd + AI * dt^2 + AJ * dd^2 \quad (6.7)$$

$$A=AK \quad (6.8)$$

Αναλυτικά η εξίσωση γράφεται ως :

$$\text{Density} = AA + AB * dt + AC * dd + AD * dt^2 + AE * dd^2 + (AF + AG * dt + AH * dd + AI * dt^2 + AJ * dd^2) * dp^2 + AK * dp^4 \quad (6.9)$$

Όπου: dt = θερμοκρασία (°C) , dd = πίεση (bar), dp = περίοδος ταλάντωσης (msec), AA-AK: σταθερές της εξίσωσης

Με βάση τις βιβλιογραφικές πυκνότητες (NIST) οι οποίες έχουν συσχετισθεί με τις συνθήκες διεξαγωγής του πειράματος, προσδιορίζονται οι συντελεστές της εξίσωσης (6.9) και εν συνεχεία, εισάγονται στην εξίσωση οι μετρούμενες τιμές των περιόδων ταλάντωσης καθώς και οι αντίστοιχες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας. Εισάγοντας στην εξίσωση τα δεδομένα αυτά, προκύπτουν οι πειραματικές τιμές της πυκνότητας οι οποίες συγκρίνονται με τις αντίστοιχες βιβλιογραφικές τιμές ώστε να ελεγχθεί η ακρίβεια της εξίσωσης (και κατά συνέπεια και η ακρίβεια των μετρήσεων περιόδου, καθώς η εξίσωση μετατρέπει τις μετρούμενες περιόδους σε τιμές πυκνότητας).

## 6.2.2 Πειραματικές μετρήσεις συστατικών

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε στο εργαστήριο ήταν η εξής:

Σχεδιάστηκε μια σειρά μετρήσεων με τρία διαφορετικά καθαρά συστατικά αέριας μορφής, τα οποία καλύπτουν το εύρος των πιθανών πυκνοτήτων που θα μετρηθούν από το όργανο στη διάρκεια του πειράματος της παρούσας διπλωματικής. Η πυκνότητα του κάθε συστατικού μετρήθηκε σε τέσσερις διαφορετικές θερμοκρασίες (συνθήκες περιβάλλοντος περί τους 22°C, 50°C 70°C και 90°C) και σε πιέσεις από 0 έως 500 bar. Από την βιβλιογραφία βρέθηκαν τιμές πυκνότητας για το πεντάνιο, το εξάνιο και το νερό σε θερμοκρασιακό εύρος 10 έως 100°C και σε πιέσεις από 1 έως 600 bar. Σαφώς δεν είναι δυνατόν να υπάρχουν βιβλιογραφικές τιμές πυκνότητας στις ακριβείς συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας που πραγματοποιήθηκε το πείραμα. Ωστόσο, εφόσον οι συνθήκες του πειράματος είναι εντός του εύρους που καθορίστηκε παραπάνω, μπορούμε με μαθηματικά εργαλεία να βρούμε τις αντίστοιχες πυκνότητες στις συνθήκες που μετρήσαμε στο εργαστήριο.

Οι πιέσεις αναφέρονται σε απόλυτη πίεση, όπου ισχύει :

Απόλυτη πίεση (Absolute pressure) = Μανομετρική/σχετική πίεση (Gauge pressure) + Ατμοσφαιρική πίεση (Atmospheric pressure) =>  $P_{abs} = P_g + P_{atm}$

## 6.2.3 Παράμετροι της εξίσωσης μετατροπής περιόδου ταλάντωσης σε πυκνότητα

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, το συγκεκριμένο πυκνόμετρο που χρησιμοποιήθηκε, μετράει την περίοδο ταλάντωσης του ρευστού που περιέχεται στο σωλήνα U. Η περίοδος αυτή, είναι συνάρτηση της πίεσης, της θερμοκρασίας αλλά και της πυκνότητας του μετρούμενου ρευστού. Οι μετρήσεις περιόδου του πυκνομέτρου, καθώς και οι επικρατούσες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας, χρησιμοποιήθηκαν ώστε να ρυθμιστούν οι συντελεστές της εξίσωσης (6.9). Τα νούμερα των συντελεστών βρέθηκαν πραγματοποιώντας παλινδρόμηση (regression) στο excel χρησιμοποιώντας ως δεδομένα τα αποτελέσματα των βιβλιογραφικών πυκνοτήτων του μεθανίου και αιθανίου σε συγκεκριμένες θερμοκρασίες και πιέσεις και των περιόδων. Οι συντελεστές αυτοί, παρουσιάζονται στον πίνακα 6.1 ενώ στους παρακάτω πίνακες φαίνονται οι απόλυτες και σχετικές αποκλίσεις των βιβλιογραφικών και πειραματικών πυκνοτήτων των συστατικών μεθανίου και αιθανίου, οι περίοδοι των οποίων χρησιμοποιήθηκαν για τη ρύθμιση των συντελεστών ΑΚ έως ΑΑ (Πίνακας 6.1) της εξίσωσης (6.9). Οι αποκλίσεις αυτές, αποτελούν μία ένδειξη του πόσο καλά περιγράφει η εξίσωση τα αποτελέσματα που έχουν προκύψει από τις εργαστηριακές μετρήσεις.

<b>AK</b>	-2,16E-14	<b>AE</b>	1,62E-06
<b>AJ</b>	-2,34E-13	<b>AD</b>	-3,31E-05
<b>AI</b>	4,83E-12	<b>AC</b>	-4,17E-04
<b>AH</b>	5,83E-11	<b>AB</b>	2,77E-03
<b>AG</b>	-1,05E-09	<b>AA</b>	-1,71E+01
<b>AF</b>	2,76E-06	<b>R<sup>2</sup></b>	1,00E+00

**Πίνακας 6.1:** Συντελεστές εξίσωσης (6.9) όπως προέκυψαν χρησιμοποιώντας τα δεδομένα πίεσης, θερμοκρασίας και περιόδου των συστατικών μεθανίου και αιθανίου

<b>ΜΕΘΑΝΙΟ</b>			
Θερμοκρασία (°C)	Μέγιστη απόλυτη απόκλιση (g/ml)	Ελάχιστη απόλυτη απόκλιση (g/ml)	Μέση απόλυτη απόκλιση (g/ml)
22	0,000363626	8,64616E-06	0,000134052
50	0,000178231	6,28246E-06	6,28733E-05
90	0,000518731	3,11689E-05	0,000312433
<b>Συνολικά</b>	0,000518731	6,28246E-06	0,000166955
Θερμοκρασία (°C)	Μέγιστη σχετική απόκλιση (g/ml)	Ελάχιστη σχετική απόκλιση (g/ml)	Μέση σχετική απόκλιση
22	10,01%	0,07%	1,55%
50	3,48%	0,05%	0,59%
90	15,79%	0,20%	3,67%
<b>Συνολικά</b>	15,79%	0,05%	1,90%
<b>ΑΙΘΑΝΙΟ</b>			
Θερμοκρασία (°C)	Μέγιστη απόλυτη απόκλιση (g/ml)	Ελάχιστη απόλυτη απόκλιση (g/ml)	Μέση απόλυτη απόκλιση (g/ml)
50	0,000629141	2,44913E-06	0,000143338
70	0,003568285	7,91775E-08	0,000329413
90	0,011618001	3,58142E-05	0,000780746
<b>Συνολικά</b>	0,011618001	7,91775E-08	0,000411583
Θερμοκρασία (°C)	Μέγιστη σχετική απόκλιση	Ελάχιστη σχετική απόκλιση (g/ml)	Μέση σχετική απόκλιση
50	0,35%	0,00%	0,06%
70	1,86%	0,00%	0,16%
90	3,36%	0,02%	0,27%
<b>Συνολικά</b>	3,36%	0,00%	0,16%

**Πίνακας 6.2:** Μέγιστες, ελάχιστες, μέσες απόλυτες και σχετικές αποκλίσεις εξίσωσης κατασκευαστή

Παρατηρούμε όσον αφορά το μεθάνιο, πως σε χαμηλές πιέσεις και στις τρεις θερμοκρασίες, οι αποκλίσεις των βιβλιογραφικών πυκνοτήτων με αυτές της εξίσωσης του κατασκευαστή είναι μεγάλες. Όσο η πίεση ανεβαίνει οι αποκλίσεις μικραίνουν και παραμένουν σχετικά σταθερές με μικρές διακυμάνσεις. Πιο συγκεκριμένα οι μέγιστες, οι ελάχιστες και οι μέσες απόλυτες και σχετικές αποκλίσεις για κάθε θερμοκρασία καθώς και συνολικά παρουσιάζονται παρακάτω στον πίνακα (6.2). Όσον αφορά το αιθάνιο παρατηρούμε οι αποκλίσεις της εξίσωσης του κατασκευαστή να είναι αρκετά μικρότερες από εκείνες του μεθανίου.

Η εξίσωση φαίνεται να δίνει σχετικά καλά αποτελέσματα για το αιθάνιο όμως στο μεθάνιο υπάρχουν σοβαρές αποκλίσεις. Από την στιγμή που τα αποτελέσματα δεν είναι ικανοποιητικά έγινε δοκιμή να ρυθμιστούν οι συντελεστές της εξίσωσης. Παρατηρείται ότι ο συντελεστής AK της εξίσωσης (6.9) δεν εξαρτάται από την πίεση και την θερμοκρασία. Προκειμένου να βελτιωθούν οι αποκλίσεις μεταξύ βιβλιογραφικών και πειραματικών τιμών της πυκνότητας, επιχειρήθηκε να συνδεθούν τα μεγέθη της πίεσης και της θερμοκρασίας με το συντελεστή AK. Ο τελευταίος,

αντικαταστάθηκε από πέντε νέους συντελεστές οι οποίοι εξαρτώνται από την πίεση και την θερμοκρασία με αντίστοιχο τρόπο όπως και οι συντελεστές B,C της εξίσωσης (6.5).

$$AK=AL+AM*dt + AN*dd +AO*dt^2+AP*dd^2$$

Η τροποποιημένη εξίσωση που προέκυψε, η οποία βασίζεται στην εξίσωση (6.9), είναι η (6.10).

$$\text{Density} = AA + AB*dt + AC*dd + AD*dt^2 + AE*dd^2 + (AF + AG*dt + AH*dd + AI*dt^2 + AJ*dd^2)*dp^2 + (AL+AM*dt + AN*dd + AO*dt^2 + AP*dd^2)*dp^4 \quad (6.10)$$

Οι συντελεστές, παρουσιάζονται στον πίνακα 6.3 ενώ στους παρακάτω πίνακες φαίνονται οι απόλυτες και σχετικές αποκλίσεις των βιβλιογραφικών και πειραματικών τιμών των ρευστών (μεθάνιο, αιθάνιο) που χρησιμοποιήθηκαν για την ρύθμιση των συντελεστών.

<b>AP</b>	-1,69E-18	<b>AG</b>	-2,52E-08
<b>AO</b>	7,84E-18	<b>AF</b>	4,75E-06
<b>AN</b>	-2,85E-17	<b>AE</b>	-7,78E-05
<b>AL</b>	1,85E-15	<b>AD</b>	3,65E-04
<b>AM</b>	-1,71E-13	<b>AC</b>	-1,54E-03
<b>AJ</b>	2,30E-11	<b>AB</b>	8,14E-02
<b>AI</b>	-1,07E-10	<b>AA</b>	-2,38E+01
<b>AH</b>	4,18E-10	<b>R<sup>2</sup></b>	1,00E+00

**Πίνακας 6.3:** Συντελεστές εξίσωσης (6.10) όπως προέκυψαν χρησιμοποιώντας τα δεδομένα πίεσης, θερμοκρασίας και περιόδου των συστατικών μεθανίου και αιθανίου

<b>ΜΕΘΑΝΙΟ</b>			
<b>Θερμοκρασία (°C)</b>	<b>Μέγιστη απόλυτη απόκλιση (g/ml)</b>	<b>Ελάχιστη απόλυτη απόκλιση (g/ml)</b>	<b>Μέση απόλυτη απόκλιση (g/ml)</b>
22	0,00023998	5,64255E-07	6,48023E-05
50	0,000231042	2,55449E-06	5,47402E-05
90	0,000472773	7,63788E-06	0,000281477
<b>Συνολικά</b>	0,000472773	5,64255E-07	0,000130234
<b>Θερμοκρασία (°C)</b>	<b>Μέγιστη σχετική απόκλιση (g/ml)</b>	<b>Ελάχιστη σχετική απόκλιση (g/ml)</b>	<b>Μέση σχετική απόκλιση</b>
22	6,72%	0,01%	0,76%
50	1,68%	0,04%	0,32%
90	12,51%	0,06%	2,95%
<b>Συνολικά</b>	12,51%	0,01%	1,31%
<b>ΑΙΘΑΝΙΟ</b>			
<b>Θερμοκρασία (°C)</b>	<b>Μέγιστη απόλυτη απόκλιση (g/ml)</b>	<b>Ελάχιστη απόλυτη απόκλιση (g/ml)</b>	<b>Μέση απόλυτη απόκλιση (g/ml)</b>
50	0,000810097	1,01158E-05	0,000153432
70	0,003531881	1,3314E-05	0,000334249
90	0,011485202	2,2922E-05	0,000826495
<b>Συνολικά</b>	0,011485202	1,01158E-05	0,00043146
<b>Θερμοκρασία (°C)</b>	<b>Μέγιστη σχετική απόκλιση</b>	<b>Ελάχιστη σχετική απόκλιση (g/ml)</b>	<b>Μέση σχετική απόκλιση</b>
50	0,45%	0,00%	0,07%
70	1,84%	0,00%	0,16%
90	3,32%	0,01%	0,28%
<b>Συνολικά</b>	3,32%	0,00%	0,17%

**Πίνακας 6.4:** Μέγιστες, ελάχιστες, μέσες απόλυτες και σχετικές αποκλίσεις εξίσωσης κατασκευαστή (6.10)

Με την χρήση της εξίσωσης (6.10) η μέγιστη σχετική απόκλιση για το μεθάνιο μειώνεται κατά 3,28%, η ελάχιστη σχετική απόκλιση κατά 0,04% και η μέση σχετική απόκλιση κατά 0,59% ως προς τις σχετικές αποκλίσεις που προκύπτουν χρησιμοποιώντας την εξίσωση (6.9).

Όσον αφορά το αιθάνιο, με την χρήση της εξίσωσης (6.10) η μέγιστη σχετική απόκλιση μειώνεται κατά 0,04%, η ελάχιστη σχετική απόκλιση παραμένει σταθερή και η μέση σχετική απόκλιση αυξάνεται κατά 0,01% ως προς τις σχετικές αποκλίσεις που προκύπτουν χρησιμοποιώντας την εξίσωση (6.9).

Με βάση τις μειώσεις αυτές, ως τελική εξίσωση για τα ρευστά μεθανίου και αιθανίου, επιλέγεται η εξίσωση (6.10).

ΜΕΘΑΝΙΟ			
Εξίσωση κατασκευαστή (6.9)			
Θερμοκρασία (oC)	Μέγιστη σχετική απόκλιση (g/ml)	Ελάχιστη σχετική απόκλιση (g/ml)	Μέση σχετική απόκλιση
22	10,01%	0,07%	1,55%
50	3,48%	0,05%	0,59%
90	15,79%	0,20%	3,67%
Συνολικά	15,79%	0,05%	1,90%
Εξίσωση κατασκευαστή (6.10)			
Θερμοκρασία (oC)	Μέγιστη σχετική απόκλιση (g/ml)	Ελάχιστη σχετική απόκλιση (g/ml)	Μέση σχετική απόκλιση
22	6,72%	0,01%	0,76%
50	1,68%	0,04%	0,32%
90	12,51%	0,06%	2,95%
Συνολικά	12,51%	0,01%	1,31%

ΑΙΘΑΝΙΟ			
Εξίσωση κατασκευαστή (6.9)			
Θερμοκρασία (oC)	Μέγιστη σχετική απόκλιση	Ελάχιστη σχετική απόκλιση (g/ml)	Μέση σχετική απόκλιση
50	0,35%	0,00%	0,06%
70	1,86%	0,00%	0,16%
90	3,36%	0,02%	0,27%
Συνολικά	3,36%	0,00%	0,16%
Εξίσωση κατασκευαστή (6.10)			
Θερμοκρασία (oC)	Μέγιστη σχετική απόκλιση	Ελάχιστη σχετική απόκλιση (g/ml)	Μέση σχετική απόκλιση
50	0,45%	0,00%	0,07%
70	1,84%	0,00%	0,16%
90	3,32%	0,01%	0,28%
Συνολικά	3,32%	0,00%	0,17%

**Πίνακας 6.5:** Αποκλίσεις εξίσωσης κατασκευαστή (6.9) και εξίσωσης κατασκευαστή (6.10)

## 6.3 Έλεγχος αξιοπιστίας πυκνομέτρου

Για τον έλεγχο της αξιοπιστίας των μετρήσεων του πυκνόμετρου, χρησιμοποιήθηκαν ρευστά γνωστής πυκνότητας και έγινε σύγκριση των τιμών του οργάνου με τις αντίστοιχες ονομαστικές τιμές της βιβλιογραφίας. Πιο συγκεκριμένα, αναφέρεται ο τρόπος με τον οποίο οι βιβλιογραφικές πυκνότητες των ρευστών συσχετίστηκαν με τις μετρούμενες πυκνότητες και γίνεται παρουσίαση των αποκλίσεων μεταξύ τους. Το πυκνόμετρο που χρησιμοποιήθηκε μετράει την περίοδο

ταλάντωσης του σωλήνα σε σχήμα U, ο οποίος περιέχει το εκάστοτε ρευστό προς μελέτη. Η περίοδος μετατρέπεται σε μονάδες πυκνότητας ( $\text{kg/m}^3$ ) κάνοντας χρήση εξίσωσης που έχει αναπτυχθεί από τον κατασκευαστή του οργάνου (DMA HPM instruction manual). Οι παράγοντες που εξετάζονται κατά τον έλεγχο του πυκνόμετρου είναι η θερμοκρασία, η πίεση και η πυκνότητα του ρευστού. Επειδή η εργασία εστίασε στην μελέτη αέριων δειγμάτων χρησιμοποιήθηκαν τιμές των συντελεστών της εξίσωσης του κατασκευαστή του οργάνου που προσδιορίστηκαν από την παραπάνω μελέτη για αέρια δείγματα. Έτσι η πυκνότητα υπολογίζεται από την εξίσωση (6.10) :

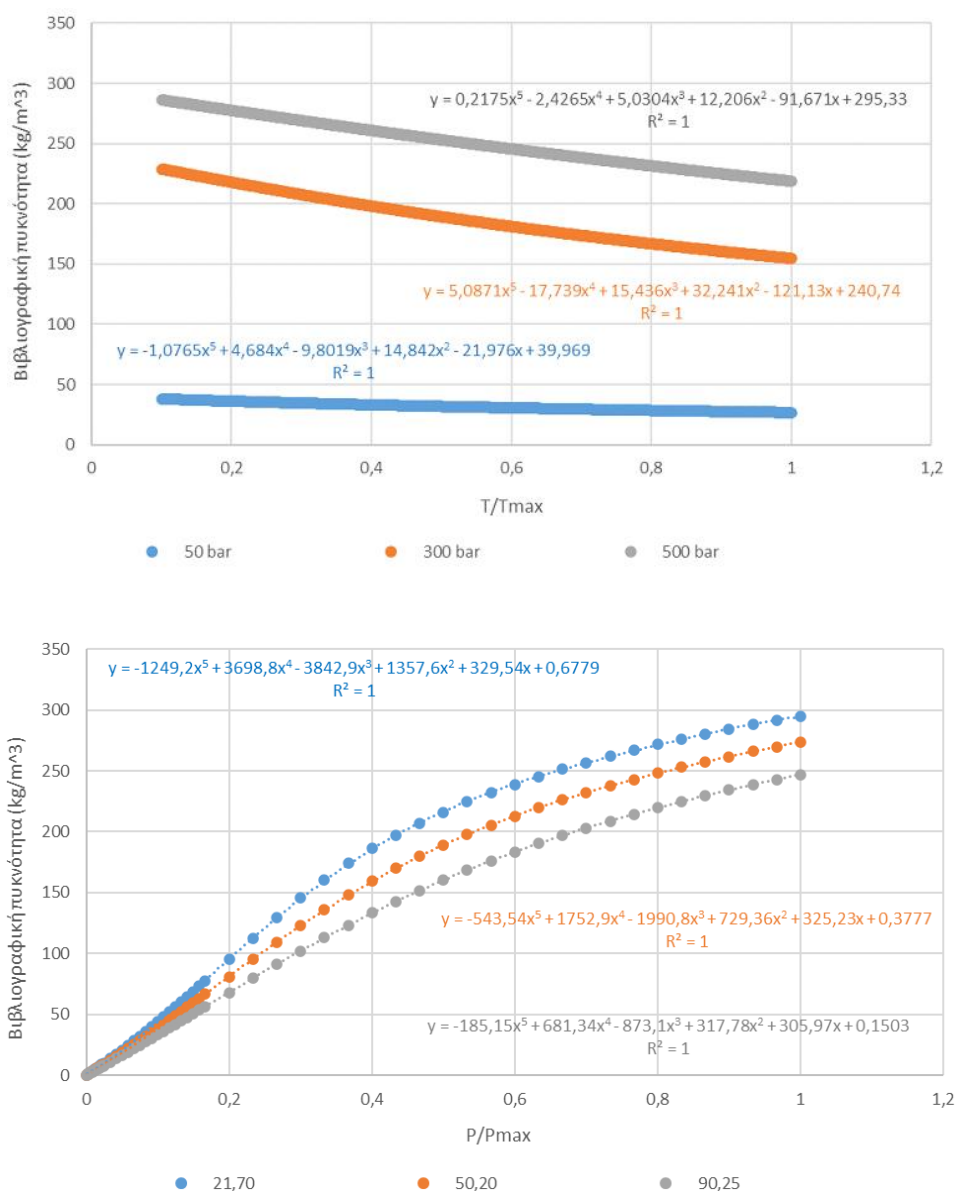
$$\text{Density} = \text{AA} + \text{AB} \cdot \text{dt} + \text{AC} \cdot \text{dd} + \text{AD} \cdot \text{dt}^2 + \text{AE} \cdot \text{dd}^2 + (\text{AF} + \text{AG} \cdot \text{dt} + \text{AH} \cdot \text{dd} + \text{AI} \cdot \text{dt}^2 + \text{AJ} \cdot \text{dd}^2) \cdot \text{dp}^2 + (\text{AL} + \text{AM} \cdot \text{dt} + \text{AN} \cdot \text{dd} + \text{AO} \cdot \text{dt}^2 + \text{AP} \cdot \text{dd}^2) \cdot \text{dp}^4 \quad (6.10)$$

Όπου: dt = θερμοκρασία ( $^{\circ}\text{C}$ ) , dd = πίεση (bar), dp = περίοδος ταλάντωσης (msec), AA-AP= σταθερές της εξίσωσης

<b>AP</b>	-1,69E-18	<b>AG</b>	-2,52E-08
<b>AO</b>	7,84E-18	<b>AF</b>	4,75E-06
<b>AN</b>	-2,85E-17	<b>AE</b>	-7,78E-05
<b>AL</b>	1,85E-15	<b>AD</b>	3,65E-04
<b>AM</b>	-1,71E-13	<b>AC</b>	-1,54E-03
<b>AJ</b>	2,30E-11	<b>AB</b>	8,14E-02
<b>AI</b>	-1,07E-10	<b>AA</b>	-2,38E+01
<b>AH</b>	4,18E-10	<b>R<sup>2</sup></b>	1,00E+00

**Πίνακας 6.6:** Συντελεστές εξίσωσης (6.10)

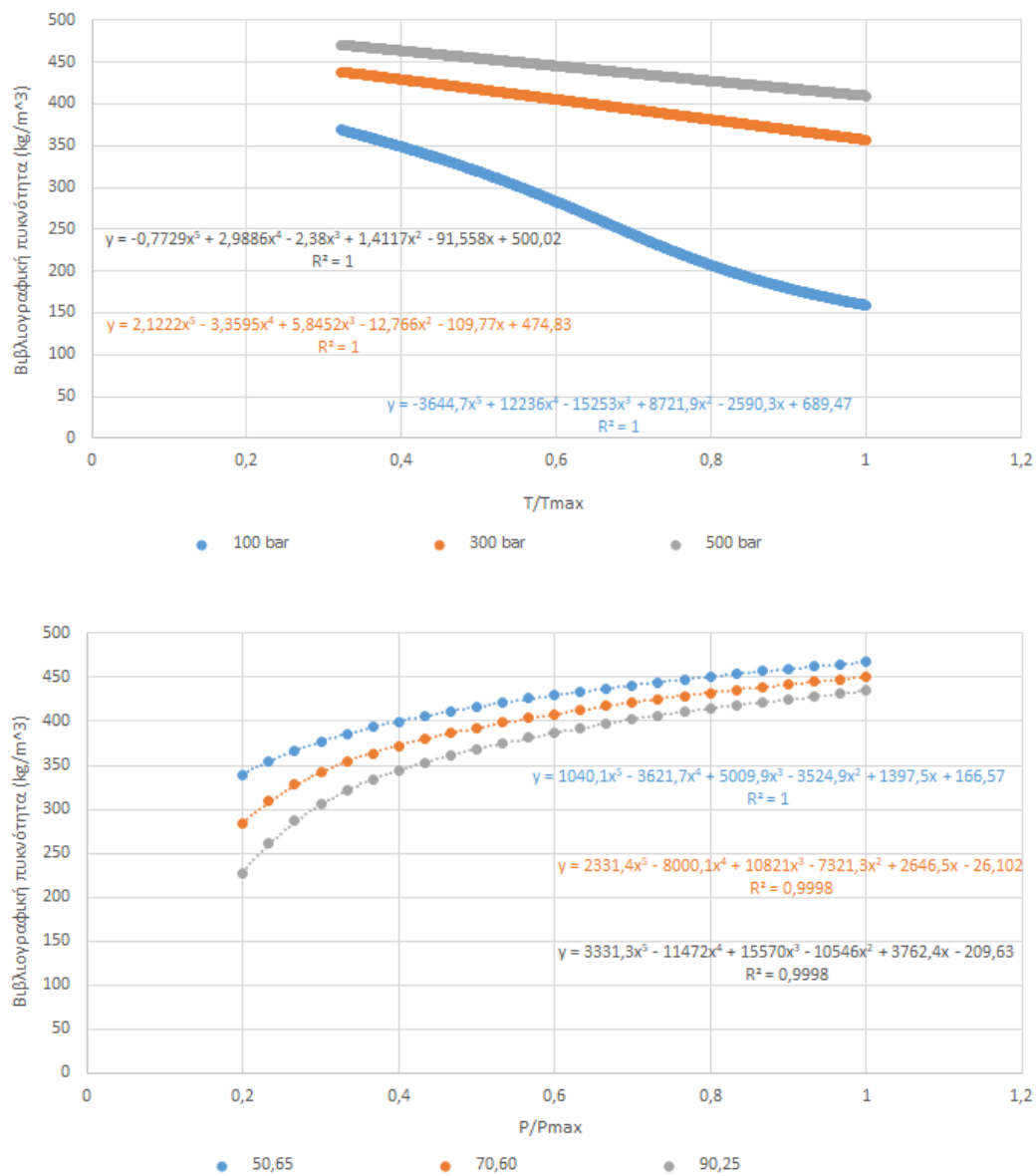
Η διαδικασία που ακολουθήθηκε στο εργαστήριο ήταν η εξής: σχεδιάστηκε μια σειρά μετρήσεων με τρία διαφορετικά καθαρά συστατικά αέριας μορφής, τα οποία καλύπτουν το εύρος των πιθανών πυκνοτήτων που θα μετρηθούν από το όργανο στη διάρκεια των πειραμάτων της παρούσας διπλωματικής με τα μείγματα δύο και τριών συστατικών. Η πυκνότητα του κάθε συστατικού μετρήθηκε σε τέσσερις διαφορετικές θερμοκρασίες (συνθήκες περιβάλλοντος περί τους  $22^{\circ}\text{C}$ ,  $50^{\circ}\text{C}$ ,  $70^{\circ}\text{C}$  και  $90^{\circ}\text{C}$ ) και σε πιέσεις από 0 έως 500 bar. Από την βιβλιογραφία βρέθηκαν τιμές πυκνότητας για το μεθάνιο, το αιθάνιο και το προπάνιο σε θερμοκρασιακό εύρος 10 έως  $100^{\circ}\text{C}$  και σε πιέσεις από 1 έως 600 bar. Σαφώς δεν είναι δυνατόν να υπάρχουν βιβλιογραφικές τιμές πυκνότητας στις ακριβείς συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας που πραγματοποιήθηκαν τα πειράματα. Ωστόσο, εφόσον οι συνθήκες των πειραμάτων είναι εντός του εύρους που καθορίστηκε παραπάνω, μπορούμε με μαθηματικά εργαλεία να βρούμε τις αντίστοιχες πυκνότητες στις συνθήκες που μετρήσαμε στο εργαστήριο. Η μέθοδος της πολυωνυμικής παρεμβολής αποτέλεσε αρωγό σε αυτό το στάδιο. Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζονται ενδεικτικά οι πολυωνυμικές/γραμμικές παλινδρομήσεις που πραγματοποιήθηκαν για το μεθάνιο (Σχήμα 6.3, Πίνακας 6.7), το αιθάνιο (Σχήμα 6.4, Πίνακας 6.8) και το προπάνιο (Σχήμα 6.5, Πίνακας 6.9) σε τρεις πιέσεις και θερμοκρασίες.



**Σχήμα 6.3 :** Παρεμβολή ονομαστικών τιμών πυκνότητας μεθανίου από βιβλιογραφία, για μέγιστη θερμοκρασία 100°C (άνω) και για μέγιστη πίεση 600 bar (κάτω)

$T_{\max}=100^{\circ}\text{C}$	<b>P=50 bar</b>	$\rho=-1,0765(T/T_{\max})^5+4,684(T/T_{\max})^4-9,8019(T/T_{\max})^3+14,842(T/T_{\max})^2-21,976(T/T_{\max})+39,969$
	<b>P=300 bar</b>	$\rho=5,0871(T/T_{\max})^5-17,739(T/T_{\max})^4+15,436(T/T_{\max})^3+32,241(T/T_{\max})^2-121,13(T/T_{\max})+240,74$
	<b>P=500 bar</b>	$\rho=0,2175(T/T_{\max})^5-2,4265(T/T_{\max})^4+5,0304(T/T_{\max})^3+12,206(T/T_{\max})^2-91,671(T/T_{\max})+295,33$
$P_{\max}=600\text{bar}$	<b>T=22°C</b>	$\rho=-1249,2(P/P_{\max})^5+3698,8(P/P_{\max})^4-3842,9(P/P_{\max})^3+1357,6(P/P_{\max})^2+329,54(P/P_{\max})+0,6779$
	<b>T=50°C</b>	$\rho=-543,54(P/P_{\max})^5+1752,9(P/P_{\max})^4-1990,8(P/P_{\max})^3+729,36(P/P_{\max})^2+325,23(P/P_{\max})+0,3777$
	<b>T=90°C</b>	$\rho=-185,15(P/P_{\max})^5+681,34(P/P_{\max})^4-873,1(P/P_{\max})^3+317,78(P/P_{\max})^2+305,97(P/P_{\max})+0,1503$

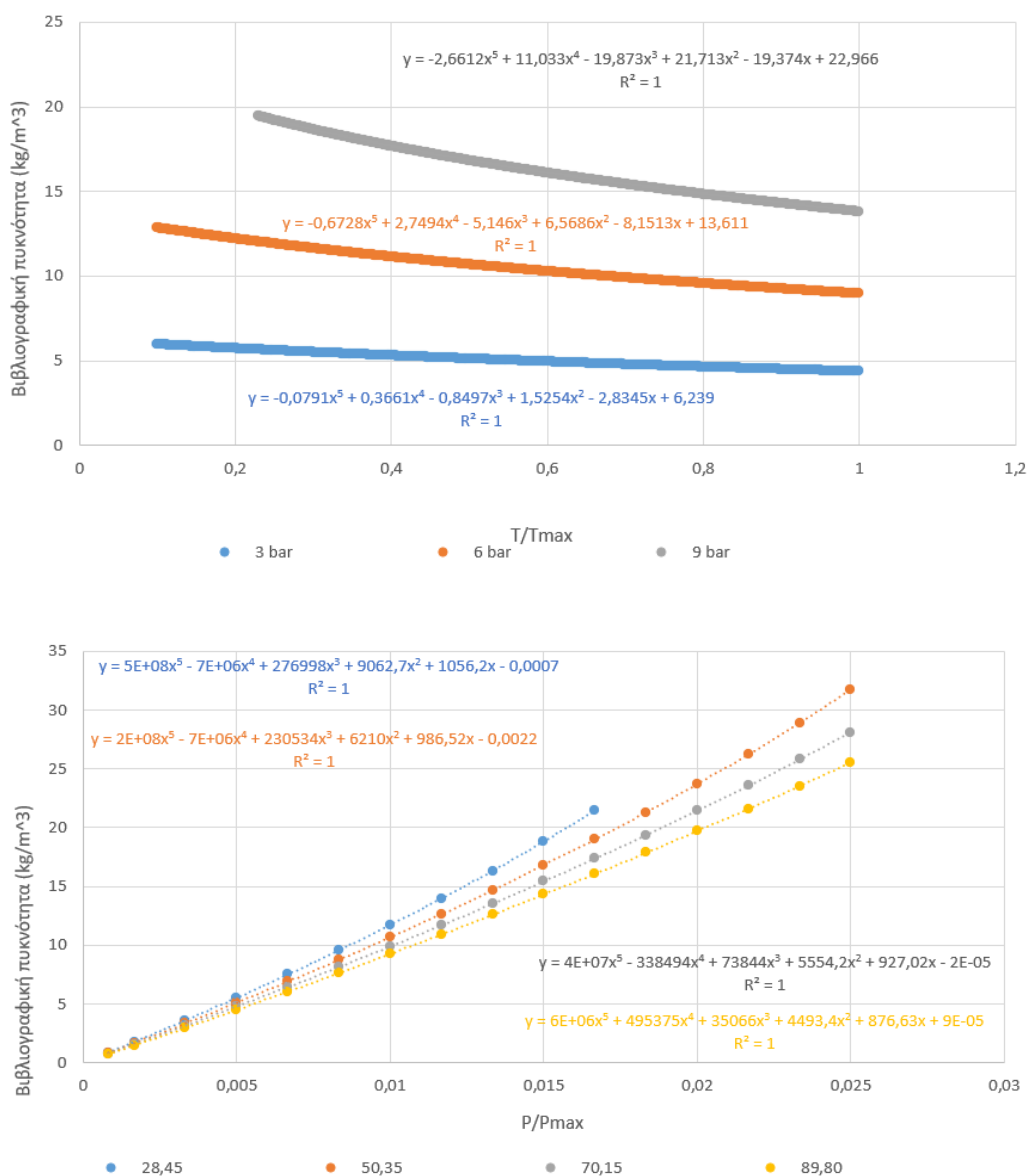
**Πίνακας 6.7:** Πολυωνυμικές εξισώσεις παρεμβολής τιμών πυκνότητας μεθανίου από βιβλιογραφία (kg/m3)



**Σχήμα 6.4 :** Παρεμβολή ονομαστικών τιμών πυκνότητας αιθανίου από βιβλιογραφία, για μέγιστη θερμοκρασία 100°C (άνω) και για μέγιστη πίεση 600 bar (κάτω)

$T_{\max}=100^{\circ}\text{C}$	<b>P=100 bar</b>	$\rho=-3644,7(T/T_{\max})^5+12236(T/T_{\max})^4-15253(T/T_{\max})^3+8721,9(T/T_{\max})^2-2590,3(T/T_{\max})+689,47$
	<b>P=300 bar</b>	$\rho=2,1222(T/T_{\max})^5-3,3595(T/T_{\max})^4+5,8452(T/T_{\max})^3-12,766(T/T_{\max})^2-109,77(T/T_{\max})+474,83$
	<b>P=500 bar</b>	$\rho=-0,7729(T/T_{\max})^5+2,9886(T/T_{\max})^4-2,38(T/T_{\max})^3+1,4117(T/T_{\max})^2-91,558(T/T_{\max})+500,02$
$P_{\max}=600\text{bar}$	<b>T=50°C</b>	$\rho=1040,1(P/P_{\max})^5-3621,7(P/P_{\max})^4+5009,9(P/P_{\max})^3-3524,9(P/P_{\max})^2+1397,5(P/P_{\max})+166,57$
	<b>T=70°C</b>	$\rho=2331,4(P/P_{\max})^5-8000,1(P/P_{\max})^4+10821(P/P_{\max})^3-7321,3(P/P_{\max})^2+2646,5(P/P_{\max})-26,102$
	<b>T=90°C</b>	$\rho=3331,3(P/P_{\max})^5-11472(P/P_{\max})^4+15570(P/P_{\max})^3-10546(P/P_{\max})^2+3762,4(P/P_{\max})-209,63$

**Πίνακας 6.8:** Πολυωνυμικές εξισώσεις παρεμβολής τιμών πυκνότητας αιθανίου από βιβλιογραφία (kg/m3)



**Σχήμα 6.5 :** Παρεμβολή ονομαστικών τιμών πυκνότητας προπανίου από βιβλιογραφία, για μέγιστη θερμοκρασία 100°C (άνω) και για μέγιστη πίεση 600 bar (κάτω)

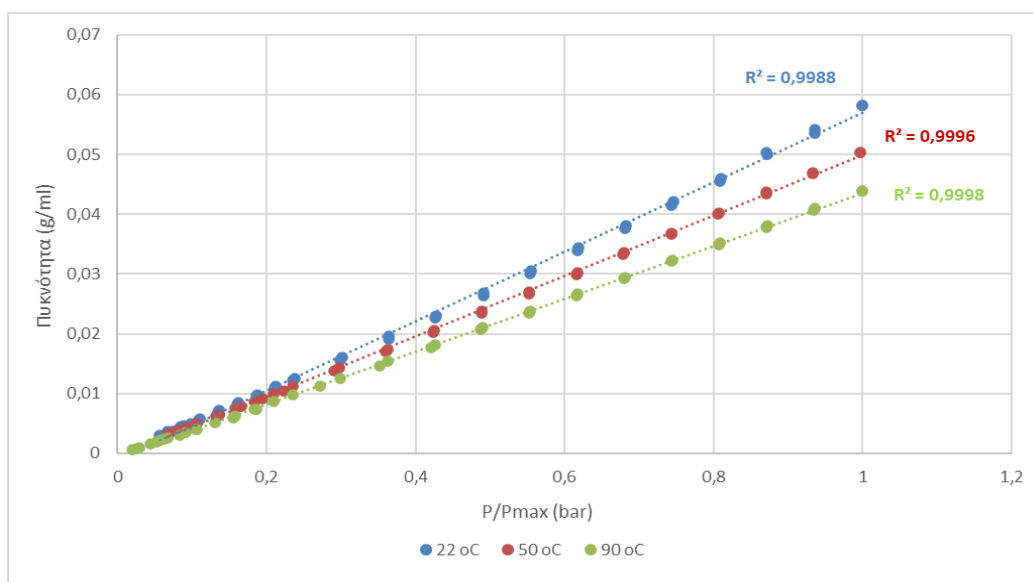
<b>T<sub>max</sub>=100°C</b>	<b>P=3 bar</b>	$\rho = -2,6612(T/T_{max})^5 + 11,033(T/T_{max})^4 - 19,873(T/T_{max})^3 + 21,713(T/T_{max})^2 - 19,374(T/T_{max}) + 22,966$
	<b>P=6 bar</b>	$\rho = -0,6728(T/T_{max})^5 + 2,7494(T/T_{max})^4 - 5,146(T/T_{max})^3 + 6,5686(T/T_{max})^2 - 8,1513(T/T_{max}) + 13,611$
	<b>P=9 bar</b>	$\rho = -0,0791(T/T_{max})^5 + 0,3661(T/T_{max})^4 - 0,8497(T/T_{max})^3 + 1,5254(T/T_{max})^2 - 2,8345(T/T_{max}) + 6,239$
<b>P<sub>max</sub>=600bar</b>	<b>T=28°C</b>	$\rho = 5E+08(P/P_{max})^5 - 7E+06(P/P_{max})^4 + 276998(P/P_{max})^3 + 9062,7(P/P_{max})^2 + 1056,2(P/P_{max}) - 0,0007$
	<b>T=50°C</b>	$\rho = 2E+08(P/P_{max})^5 - 7E+06(P/P_{max})^4 + 230534(P/P_{max})^3 + 6210(P/P_{max})^2 + 986,52(P/P_{max}) - 0,0022$
	<b>T=70°C</b>	$\rho = 4E+07(P/P_{max})^5 - 338494(P/P_{max})^4 + 73844(P/P_{max})^3 + 5554,2(P/P_{max})^2 + 927,02(P/P_{max}) - 2E-05$
	<b>T=90°C</b>	$\rho = 6E+06(P/P_{max})^5 + 495375(P/P_{max})^4 + 35066(P/P_{max})^3 + 4493,4(P/P_{max})^2 + 876,63(P/P_{max}) + 9E-05$

**Πίνακας 6.9:** Πολυωνυμικές εξισώσεις παρεμβολής τιμών πυκνότητας προπανίου από βιβλιογραφία (kg/m³)

## 6.4 Επαναληψιμότητα μετρήσεων πυκνότητας

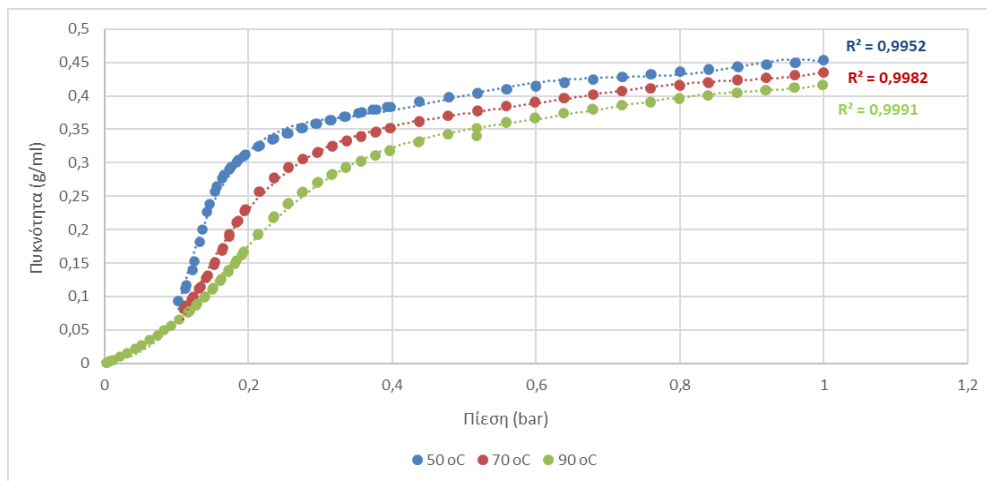
Η επαναληψιμότητα είναι μια έννοια που περιγράφει το βαθμό συμφωνίας μεταξύ των αριθμητικών τιμών για δύο ή περισσότερες επαναλαμβανόμενες μετρήσεις οι οποίες έχουν ληφθεί υπό τις ίδιες πειραματικές συνθήκες. Η επαναληψιμότητα θεωρείται ικανοποιητική, όταν η διασπορά των τιμών σε σχέση με τη μέση τιμή του μετρούμενου μεγέθους είναι μικρή, δηλαδή τα πειραματικά αποτελέσματα βρίσκονται κοντά μεταξύ τους.

Το διάγραμμα στο Σχήμα 6.6 δείχνει για τρεις θερμοκρασίες (22 °C / 50 °C / 90 °C) για το μεθάνιο ως ρευστό ελέγχου, 2 σετ μετρήσεων, ήτοι ένας κύκλος συμπίεσης – αποσυμπίεσης. Χρησιμοποιώντας το πυκνόμετρο μετρήθηκαν οι περίοδοι ταλάντωσης του ρευστού και μετατράπηκαν σε πυκνότητες σύμφωνα με την εξίσωση που προτείνει ο κατασκευαστής του πυκνόμετρου (6.10). Γενικά παρατηρείται ένας πολύ καλός βαθμός επαναληψιμότητας όπου ο συντελεστής συσχέτισης  $R^2$  των πειραματικών δεδομένων ως προς την αναμενόμενη γραμμική συμπεριφορά κυμαίνεται από 99,98% έως 99,96%.



**Σχήμα 6.6 :** Επαναληψιμότητα μετρήσεων για το μεθάνιο στους 22 °C, 50 °C και 90 °C με  $P_{max}= 77,763$  bar

Αντίστοιχη διαδικασία εκτελέστηκε και για το αιθάνιο. Το διάγραμμα στο Σχήμα 6.7 δείχνει για τρεις θερμοκρασίες (50 °C / 70 °C / 90 °C) για το αιθάνιο ως ρευστό ελέγχου, 2 σετ μετρήσεων, ήτοι ένας κύκλος συμπίεσης – αποσυμπίεσης. Χρησιμοποιώντας το πυκνόμετρο μετρήθηκαν οι περίοδοι ταλάντωσης του ρευστού και μετατράπηκαν σε πυκνότητες σύμφωνα με την εξίσωση που προτείνει ο κατασκευαστής του πυκνόμετρου (6.10). Γενικά παρατηρείται ένας πολύ καλός βαθμός επαναληψιμότητας όπου ο συντελεστής συσχέτισης  $R^2$  των πειραματικών δεδομένων ως προς την αναμενόμενη γραμμική συμπεριφορά κυμαίνεται από 99,91% έως 99,52%. Κατόπιν των ανωτέρω συμπεραίνουμε ότι το πυκνόμετρο παρουσιάζει συνέπεια στις μετρήσεις (measurement consistency) και συνεπώς το θεωρούμε αξιόπιστο για τη χρήση του στο εν λόγω πείραμα.



**Σχήμα 6.7 :** Επαναληψιμότητα μετρήσεων για το αιθάνιο στους 50 °C, 70 °C και 90 °C με  $P_{max} = 493,563$  bar

## 6.4 Υπολογισμός αβεβαιότητας μετρήσεων

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως οι παράγοντες βάσει των οποίων γίνεται η βαθμονόμηση στο όργανο, είναι η θερμοκρασία και η πίεση. Η θερμοκρασία του δείγματος εντός του σωλήνα μετρείται από το ίδιο το όργανο και έχει αβεβαιότητα  $\pm 0,5$  °C ενώ το μανόμετρο ακριβείας δίνεται από τον κατασκευαστή του η αβεβαιότητα σε  $\pm 0.6$  bar. Τουτέστιν, λαμβάνοντας υπόψιν μας τα παραπάνω πρέπει να βρεθεί μια σχέση που να συνδέει τα προαναφερθέντα και να λαμβάνεται σαν αποτέλεσμα η τιμή της πυκνότητας συνυπολογίζοντας και τους δυο παράγοντες αβεβαιότητας.

Η θερμοκρασία δεν παραμένει ίδια καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος. Έτσι βρέθηκε η μέση τιμή των καταγεγραμμένων θερμοκρασιών και γύρω από αυτή σε εύρος  $\pm 0,5$  °C σημειώθηκαν δυο θερμοκρασίες, μια  $+0,5$  °C της μέσης τιμής και μια  $-0,5$  °C. Σε αυτές τις θερμοκρασίες σημειώθηκαν και οι τιμές της αντίστοιχης πυκνότητας. Αυτό πραγματοποιήθηκε με σταθερή την πίεση. Κατόπιν, υπολογίστηκε η διαφορά μεταξύ των δυο θερμοκρασιών και των δυο πυκνοτήτων. Προκειμένου να βρεθεί η κλίση ή ο ρυθμός μεταβολής της μιας διαφοράς  $\Delta d$  σε σχέση με την άλλη  $\Delta T$ , διαιρέθηκε από το  $\Delta d$  το  $\Delta T$  ( $\Delta d / \Delta T$ ). Πρακτικά αυτό σημαίνει ότι αν η θερμοκρασία αλλάξει κατά ένα ποσοστό θα έχει το αντίστοιχο αντίκτυπο στην τιμή της πυκνότητας.

Για παράδειγμα, έστω η μέση τιμή της θερμοκρασίας διεξαγωγής του πειράματος, για το μεθάνιο, είναι 21,50 °C. Άρα  $T_K = 21,00$  °C και  $T_A = 22,00$  °C. Με σταθερή την πίεση 5 bar βρίσκουμε εκ της βιβλιογραφίας τις τιμές της πυκνότητας του μεθανίου στις αντίστοιχες θερμοκρασίες,  $d_A = 0,00330980$  g/ml και  $d_K = 0,00329820$  g/ml. Επομένως  $\Delta d = 0,00001160$  g/ml και  $\Delta T = 1$  °C. Η κλίση προκύπτει από  $\Delta d / \Delta T$  και ισούται με  $0,00001160$  (g/ml)/°C. Άρα στα 5 bar για κάθε βαθμό κελσίου που μεταβάλλεται η θερμοκρασία, η πυκνότητα του νερού αλλάζει κατά  $0,00001160$  g/ml. Η κλίση πολλαπλασιασμένη με την αβεβαιότητα του θερμομέτρου μας δίνει την θερμοκρασιακή αβεβαιότητα. Οπότε με βάση το προηγούμενο παράδειγμα η αβεβαιότητα λόγω θερμοκρασίας είναι:  $0,5 \cdot 0,00001160 = 0,00000580 \Rightarrow \pm 0,00000580$  g/ml της βιβλιογραφικής τιμής σε αυτές τις συνθήκες. Η παραπάνω διαδικασία έγινε συνολικά για τιμές πίεσης 5-75 bar για το μεθάνιο και 50-500 bar για το αιθάνιο.

Ταυτόχρονα με σταθερή αυτή τη φορά τη θερμοκρασία (π.χ. για 21,50 °C) σε δυο διαφορετικές τιμές πίεσης π.χ. 5 και 6 bar, καταγράφηκαν οι αντίστοιχες τιμές της πυκνότητας του νερού  $d_5 = 0,00330400$  g/ml και  $d_6 = 0,00397200$  g/ml αντίστοιχα. Επομένως  $\Delta d = 0,00066800$  g/ml και  $\Delta p = 1$  bar. Η κλίση προκύπτει από  $\Delta d / \Delta p$  και ισούται με  $0,00066800$  (g/ml)/bar. Άρα στους 21,50 °C για κάθε 1 bar που μεταβάλλεται η πίεση, η πυκνότητα αλλάζει κατά  $0,00066800$  g/ml. Η ίδια

διαδικασία τηρήθηκε και για τις υπόλοιπες τιμές πίεσης, 5-75 bar για το μεθάνιο και 50-500 bar για το αιθάνιο. Οπότε προέκυψε ο ρυθμός μεταβολής της πυκνότητας βάσει της πίεσης. Η κλίση αυτή τη φορά πολλαπλασιάστηκε με 0,6 για να βρεθεί η αβεβαιότητα στην μέτρηση της πυκνότητας λόγω της πίεσης. Άρα σύμφωνα με το παραπάνω παράδειγμα  $0,6 \cdot 0,00066800 = 0,00040080 \Rightarrow \pm 0,00040080 \text{ g/ml}$  της βιβλιογραφικής τιμής σε αυτές τις συνθήκες. Έπειτα βρέθηκε η συνολική αβεβαιότητα και από τους 2 παράγοντες από τη σχέση:

$$\text{Συνολική αβεβαιότητα} = \sqrt{(\text{αβεβαιότητα θερμοκρασίας})^2 + (\text{αβεβαιότητα πίεσης})^2} \quad (6.11)$$

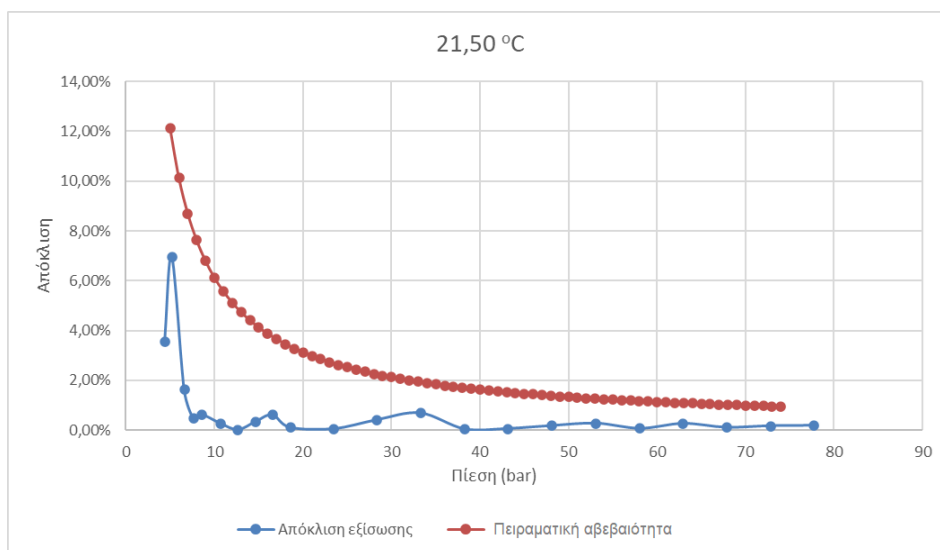
Άρα, για το παράδειγμα στους 21,50 °C και σε 5 bar η συνολική αβεβαιότητα ισούται με :

$$\text{Συνολική αβεβαιότητα} = \sqrt{((0,00000580)^2 + (0,00040080)^2)} = 0,00040084 = \pm 0,00040084 \text{ g/ml}$$

Ομοίως, βρέθηκε η αβεβαιότητα των μετρήσεων και για τις υπόλοιπες τιμές πίεσης εντός του καθορισμένου εύρους και στις τρεις θερμοκρασίες. Η προαναφερθείσα διαδικασία πραγματοποιήθηκε για όλα τα ρευστά βαθμονόμησης (μεθάνιο και αιθάνιο). Συγκρίνοντας μεταξύ τους τις μετρούμενες πυκνότητες και τις πυκνότητες από την βιβλιογραφία βγάζουμε συμπέρασμα για τον αν η διαφορά τους είναι εντός του εύρους αβεβαιότητας που υπολογίστηκε.

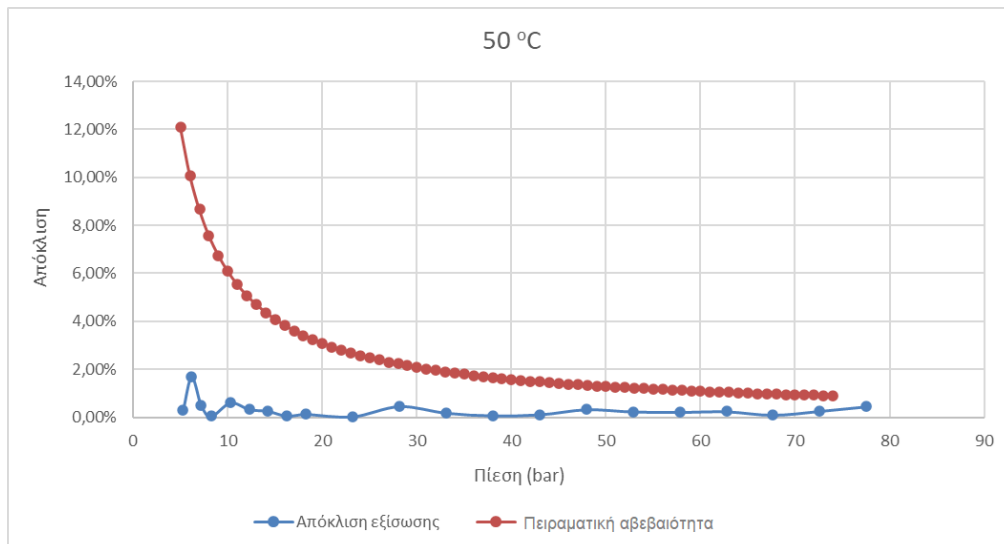
Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζονται ενδεικτικά οι αποκλίσεις που προέκυψαν από τη σύγκριση των πειραματικών μετρήσεων και των τιμών πυκνότητας εκ της βιβλιογραφίας για το μεθάνιο και το αιθάνιο για κάθε θερμοκρασία σε όλο το εύρος των πιέσεων, καθώς και οι αποκλίσεις που προκύπτουν από τις τιμές της πυκνότητας εκ της βιβλιογραφίας, λαμβάνοντας υπόψιν την συνολική αβεβαιότητα για τις αντίστοιχες θερμοκρασίες και πιέσεις των πειραματικών μετρήσεων. Επιλέχθηκαν τα δεδομένα με αύξουσα την πίεση, από τις δύο μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν.

Παρατηρείται ότι στο μεθάνιο και στις τρεις θερμοκρασίες υπάρχει παρόμοια συμπεριφορά όσον αφορά στις αποκλίσεις. Πιο συγκεκριμένα, φαίνεται στις πρώτες μετρήσεις που καταγράφηκαν σε χαμηλές πιέσεις να υπάρχει σχετικά μεγάλη απόκλιση και καθώς αυξάνεται η πίεση, αυτές οι αποκλίσεις αρχίζουν να μειώνονται αισθητά και να φτάνουν κάτω από το 1%. Να αναφερθεί πως παρόλο που οι αρχικές μετρήσεις φαίνονται να έχουν μεγάλη απόκλιση, αυτές δεν ξεπερνάνε τις αναμενόμενες αποκλίσεις λόγω της συνολικής αβεβαιότητας με εξαίρεση κάποιες τιμές στους 90 °C που είναι ελάχιστα μεγαλύτερες.



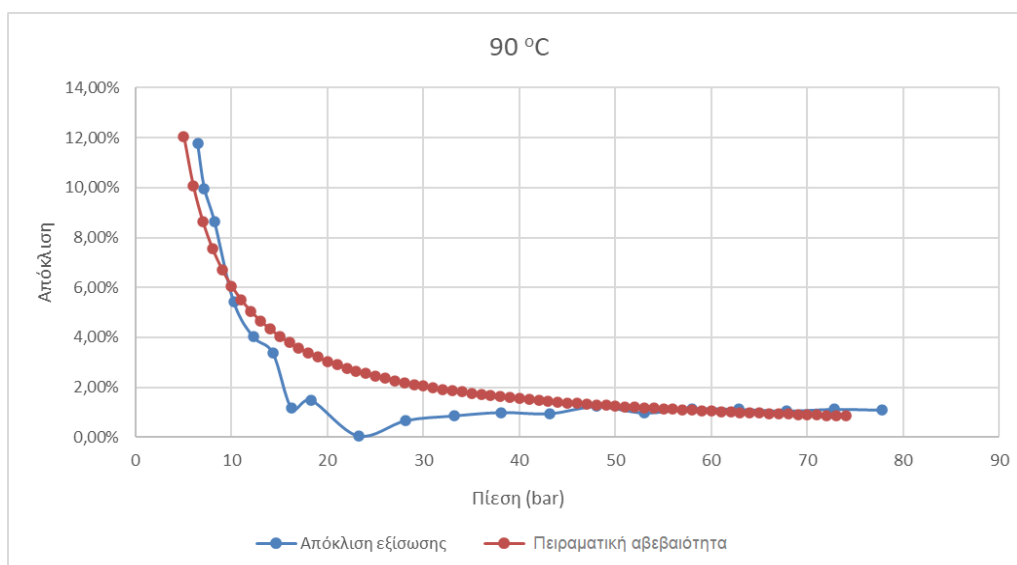
**Σχήμα 6.10 :** Γραφική απεικόνιση απόκλισης εξίσωσης και πειραματικής αβεβαιότητας πυκνότητας από τις βιβλιογραφικές τιμές στους 21,50 °C

Στους 21,50 °C σε εύρος πιέσεων από 4 έως 6 bar οι αποκλίσεις είναι άνω του 1% με αποκορύφωμα την απόκλιση 6,95% στα 5,2 bar. Από τα 7 έως τα 78 bar που είναι η μέγιστη πειραματική πίεση, οι αποκλίσεις είναι μικρότερες του 1%. Όλες οι αποκλίσεις είναι μικρότερες από εκείνες που προσεγγιστικά προβλέπονται λόγω της συνολικής αβεβαιότητας στις αντίστοιχες συνθήκες.



**Σχήμα 6.11 :** Γραφική απεικόνιση αποκλίσης εξίσωσης και πειραματικής αβεβαιότητας πυκνότητας από τις βιβλιογραφικές τιμές στους 50 °C

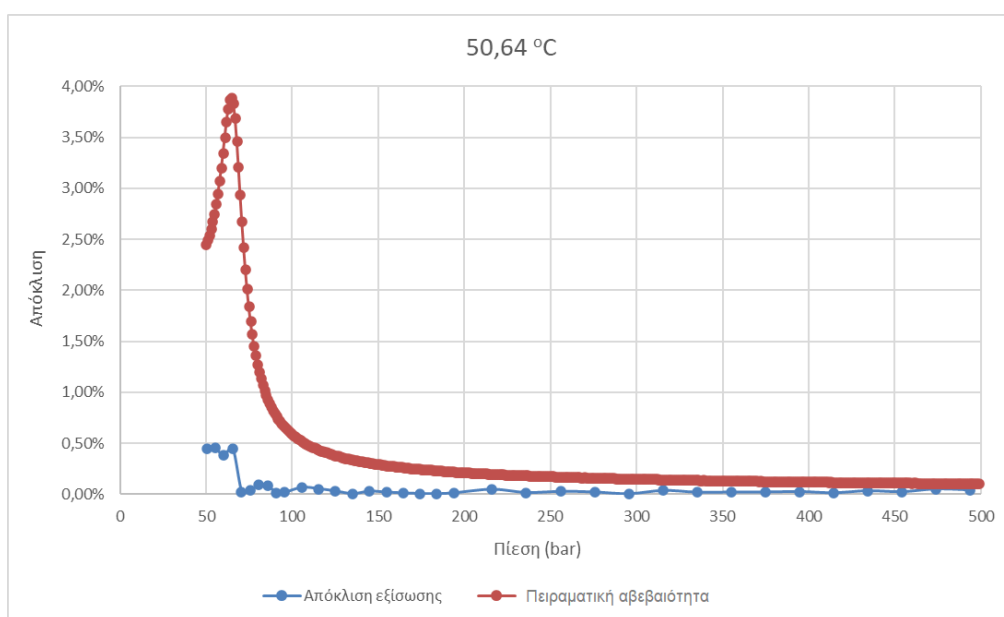
Στους 50 °C σε εύρος πιέσεων από 5 έως 78 bar που είναι η μέγιστη πειραματική πίεση, οι αποκλίσεις είναι μικρότερες του 1%, με μοναδική εξαίρεση στα 6,2 bar όπου παρατηρείται απόκλιση 1,7%. Όλες οι αποκλίσεις είναι μικρότερες από εκείνες που προσεγγιστικά προβλέπονται λόγω της συνολικής αβεβαιότητας στις αντίστοιχες συνθήκες.



**Σχήμα 6.12 :** Γραφική απεικόνιση αποκλίσης εξίσωσης και πειραματικής αβεβαιότητας πυκνότητας από τις βιβλιογραφικές τιμές στους 90 °C

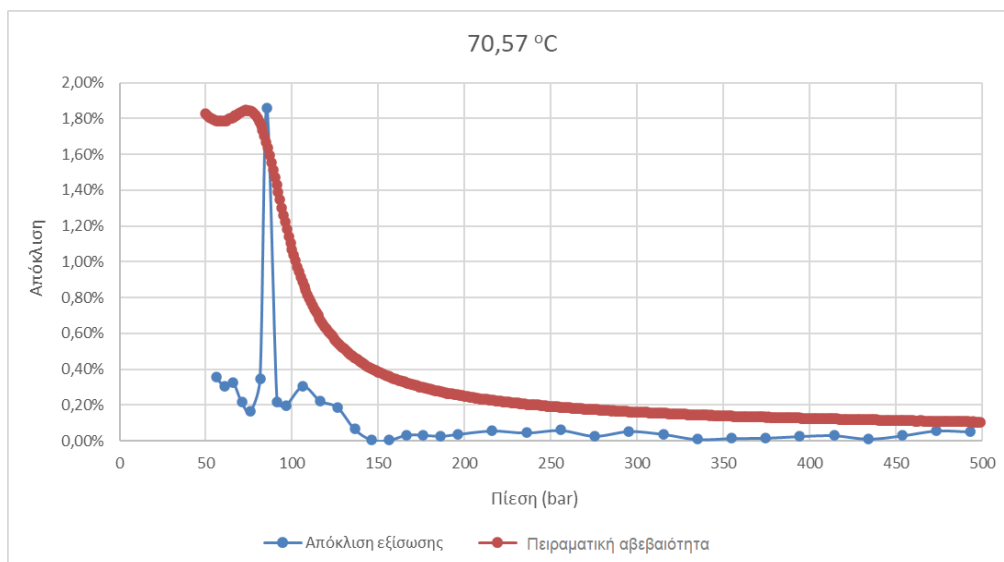
Στους 90 °C σε εύρος πιέσεων από 6 έως 14 bar οι αποκλίσεις είναι αρκετά άνω του 1% με αποκορύφωμα την απόκλιση 11,77% στα 6,4 bar. Από τα 16 έως τα 78 bar που είναι η μέγιστη πειραματική πίεση, οι αποκλίσεις είναι κοντά στο 1%. Οι περισσότερες αποκλίσεις είναι μικρότερες από εκείνες που προσεγγιστικά προβλέπονται λόγω της συνολικής αβεβαιότητας στις αντίστοιχες συνθήκες, εκτός από εκείνες στα 6 έως 8 bar και στα 58 έως 78 bar.

Τα παραπάνω διαγράμματα (Σχήμα 6.10, Σχήμα 6.11, Σχήμα 6.12) μας δείχνουν ουσιαστικά κατά πόσο αποκλίνουν οι μετρούμενες τιμές με τις βιβλιογραφικές για το μεθάνιο, στις θερμοκρασίες και πιέσεις μελέτης, καθώς και τις αποκλίσεις που προκύπτουν από τις τιμές της πυκνότητας εκ της βιβλιογραφίας, λαμβάνοντας υπόψιν την συνολική αβεβαιότητα για τις αντίστοιχες θερμοκρασίες και πιέσεις των πειραματικών μετρήσεων. Γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι στην πλειοψηφία οι αποκλίσεις είναι μικρότερες του 1% με ελάχιστες εξαιρέσεις. Η τάξη μεγέθους των αποκλίσεων μας επιβεβαιώνει ότι τόσο το πυκνόμετρο όσο και η εξίσωση βαθμονόμησης που χρησιμοποιήθηκε, θεωρούνται αποδεκτά για χρήση τους για τους σκοπούς της εν λόγω διπλωματικής εργασίας.



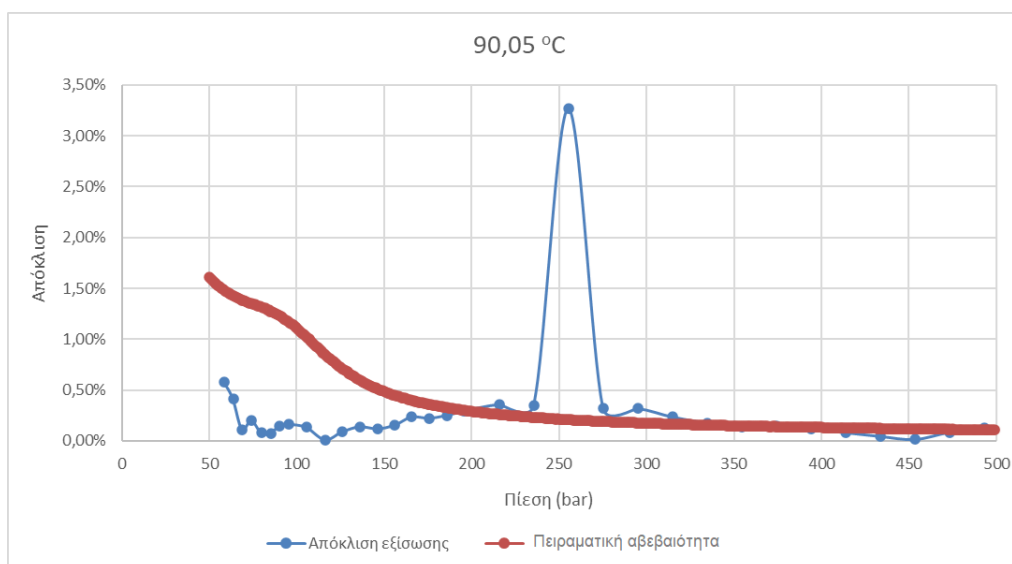
**Σχήμα 6.13 :** Γραφική απεικόνιση απόκλισης εξίσωσης και πειραματικής αβεβαιότητας πυκνότητας από τις βιβλιογραφικές τιμές στους 50 °C

Στους 50 °C σε εύρος πιέσεων από 50 έως 494 bar που είναι η μέγιστη πειραματική πίεση, οι αποκλίσεις είναι μικρότερες του 1%. Η μέγιστη απόκλιση παρατηρείται στα 55 και 65 bar και είναι στο 0,45%. Όλες οι αποκλίσεις είναι μικρότερες από εκείνες που προσεγγιστικά προβλέπονται λόγω της συνολικής αβεβαιότητας στις αντίστοιχες συνθήκες.



**Σχήμα 6.14 :** Γραφική απεικόνιση απόκλισης εξίσωσης και πειραματικής αβεβαιότητας πυκνότητας από τις βιβλιογραφικές τιμές στους 70 °C

Στους 70 °C σε εύρος πιέσεων από 55 έως 494 bar που είναι η μέγιστη πειραματική πίεση, οι αποκλίσεις είναι μικρότερες του 1%, με μοναδική εξαίρεση στα 85,3 bar όπου παρατηρείται απόκλιση 1,86%. Όλες οι αποκλίσεις είναι μικρότερες από εκείνες που προσεγγιστικά προβλέπονται λόγω της συνολικής αβεβαιότητας στις αντίστοιχες συνθήκες, εκτός από εκείνη στα 85,3 bar.



**Σχήμα 6.15 :** Γραφική απεικόνιση απόκλισης εξίσωσης και πειραματικής αβεβαιότητας πυκνότητας από τις βιβλιογραφικές τιμές στους 90 °C

Στους 90 °C σε εύρος πιέσεων από 58 έως 493 bar που είναι η μέγιστη πειραματική πίεση, οι αποκλίσεις είναι χαμηλότερες από 1%. Μοναδική εξαίρεση αποτελεί η τιμή στα 255,46 bar που έχει απόκλιση 3,27%. Οι περισσότερες αποκλίσεις είναι μικρότερες από εκείνες που προσεγγιστικά

προβλέπονται λόγω της συνολικής αβεβαιότητας στις αντίστοιχες συνθήκες, εκτός από εκείνες στα 195 έως 334 bar και στα 374 και 492 bar.

Τα παραπάνω διαγράμματα (Σχήμα 6.13, Σχήμα 6.14, Σχήμα 6.15) μας δείχνουν ουσιαστικά κατά πόσο αποκλίνουν οι μετρούμενες τιμές με τις βιβλιογραφικές για το αιθάνιο, στις θερμοκρασίες και πιέσεις μελέτης, καθώς και τις αποκλίσεις που προκύπτουν από τις τιμές της πυκνότητας εκ της βιβλιογραφίας, λαμβάνοντας υπόψιν την συνολική αβεβαιότητα για τις αντίστοιχες θερμοκρασίες και πιέσεις των πειραματικών μετρήσεων. Γίνεται εύκολα αντιληπτό ότι στην πλειοψηφία οι αποκλίσεις είναι μικρότερες του 1% με ελάχιστες εξαιρέσεις. Η τάξη μεγέθους των αποκλίσεων μας επιβεβαιώνει ότι τόσο το πυκνόμετρο όσο και η εξίσωση βαθμονόμησης που χρησιμοποιήθηκε, θεωρούνται αποδεκτά για χρήση τους για τους σκοπούς της εν λόγω διπλωματικής εργασίας.

## 7 Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Στόχος της παρούσης εργασίας, ήταν να παρασκευαστούν και να μετρηθούν μείγματα αέριων υδρογονανθράκων με διοξείδιο του άνθρακα προκειμένου να μελετηθεί η μεταβολή, ως προς τη θερμοκρασία και την πίεση, της πυκνότητας του. Με τη βοήθεια του λογισμικού αριθμητικής προσομοίωσης WinProp της εταιρείας CMG (Computer Modelling Group Ltd.) δοκιμάστηκαν μείγματα μεθανίου, αιθανίου, προπανίου, βουτανίου και διοξειδίου του άνθρακα σε διάφορες συστάσεις. Με βάση τη σύσταση υπολογίστηκαν οι όγκοι του κάθε συστατικού που πρέπει να εισαχθούν στη διάταξη. Το WinProp είναι λογισμικό πακέτο με το οποίο καθίσταται δυνατή η θεωρητική εξαγωγή δεδομένων που σχετίζονται με την ογκομετρική συμπεριφορά των μειγμάτων του πετρελαίου σε διάφορες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας για την περαιτέρω χρησιμοποίησή τους καθώς και για τη σύγκριση και επεξεργασία με τα αντίστοιχα πειραματικά δεδομένα.

### 7.1 Παραγωγή μειγμάτων

Ο στόχος ήταν οι παρασκευές μειγμάτων με τις ακόλουθες αναλογίες (% mol/mol):

- Μεθάνιο 50% - Αιθάνιο 50%
- Μεθάνιο 35% - Αιθάνιο 35% - CO<sub>2</sub> 30%
- Μεθάνιο 20% - Αιθάνιο 20% - CO<sub>2</sub> 60%
- Μεθάνιο 50% - Προπάνιο 50%
- Μεθάνιο 35% - Προπάνιο 35% - CO<sub>2</sub> 30%
- Μεθάνιο 20% - Προπάνιο 20% - CO<sub>2</sub> 60%
- Μεθάνιο 50% - Βουτάνιο 50%
- Μεθάνιο 35% - Βουτάνιο 35% - CO<sub>2</sub> 30%
- Μεθάνιο 20% - Βουτάνιο 20% - CO<sub>2</sub> 60%

Για να ελεγχθούν οι ακριβείς συστάσεις των μειγμάτων, πάρθηκαν δείγματα μετά την ολοκλήρωση των μετρήσεων, με την βοήθεια μιας γυάλινης σύριγγας, τα οποία εισήχθησαν απευθείας στον αέριο χρωματογράφο, ώστε να μετρηθούν. Ωστόσο οι ακριβείς συστάσεις των μειγμάτων που προέκυψαν παρουσιάζουν διαφοροποιήσεις ως προς τις ανωτέρω συστάσεις. Εν τέλει παράχθηκαν τρία μείγματα στις παρακάτω αναλογίες (% mol/mol):

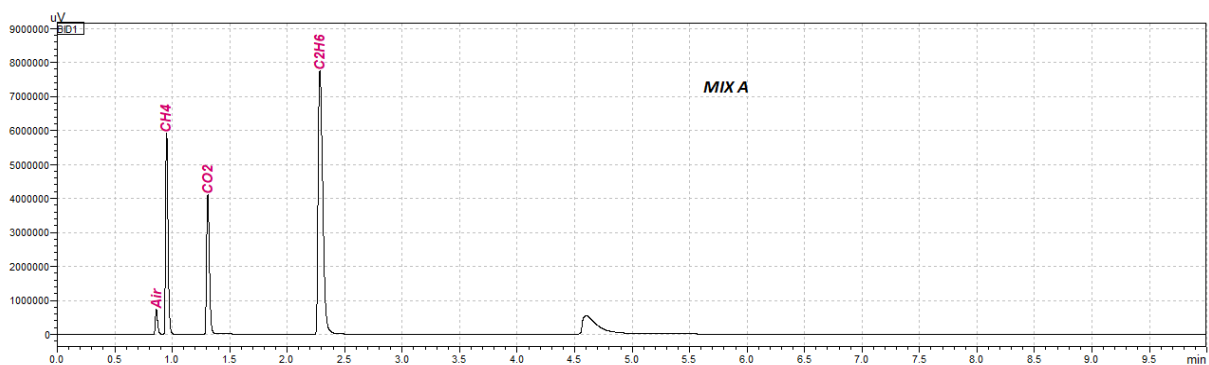
- Μεθάνιο 39,33 % - Αιθάνιο 60,67 %
- Μεθάνιο 28,30% - Αιθάνιο 45,80% - CO<sub>2</sub> 25,90%
- Μεθάνιο 13,60% - Αιθάνιο 20% - CO<sub>2</sub> 66,40%
- Μεθάνιο 41,40 % - Προπάνιο 58,60 %
- Μεθάνιο 34,40% - Προπάνιο 47,10% - CO<sub>2</sub> 18,60%
- Μεθάνιο 12,50% - Προπάνιο 18,30% - CO<sub>2</sub> 69,20%
- Μεθάνιο 58,17 % - Βουτάνιο 41,83 %
- Μεθάνιο 36,30% - Βουτάνιο 26,10% - CO<sub>2</sub> 37,60%
- Μεθάνιο 25,60% - Βουτάνιο 9,30% - CO<sub>2</sub> 65%

Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν σε θερμοκρασίες 22, 50 και 90 °C και πιέσεις έως 500 bar.

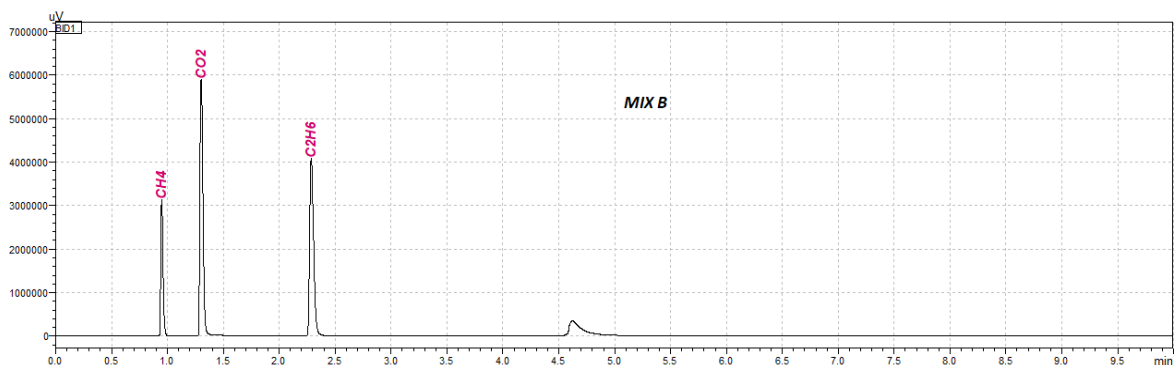
## 7.2 Αναλυτικός προσδιορισμός σύστασης αέριων δειγμάτων

Τα δείγματα αναλύθηκαν σε αέριο χρωματογράφο και παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα.

Τα χρωματογραφήματα των δειγμάτων Α και Β παρατίθενται στα Σχήματα 7.1 και 7.2 αντίστοιχα, ενώ στον Πίνακα 7.1 δίνονται τα ποσοστά του μεθανίου, του αιθανίου και του διοξειδίου του άνθρακα σε (% v/v). Σημειώνεται ότι, ο οριζόντιος άξονας είναι ο χρόνος έκλουσης των συστατικών (σε min) και ο κατακόρυφος η απόκριση του ανιχνευτή (σε  $\mu V$ ).



Σχήμα 7.1: Χρωματογράφημα δείγματος Α (στήλη HP-Plot Q)

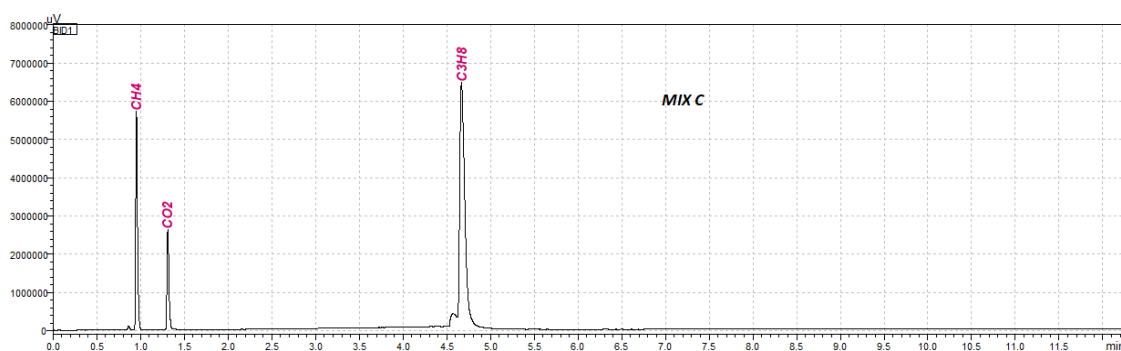


Σχήμα 7.2: Χρωματογράφημα δείγματος Β (στήλη HP-Plot Q)

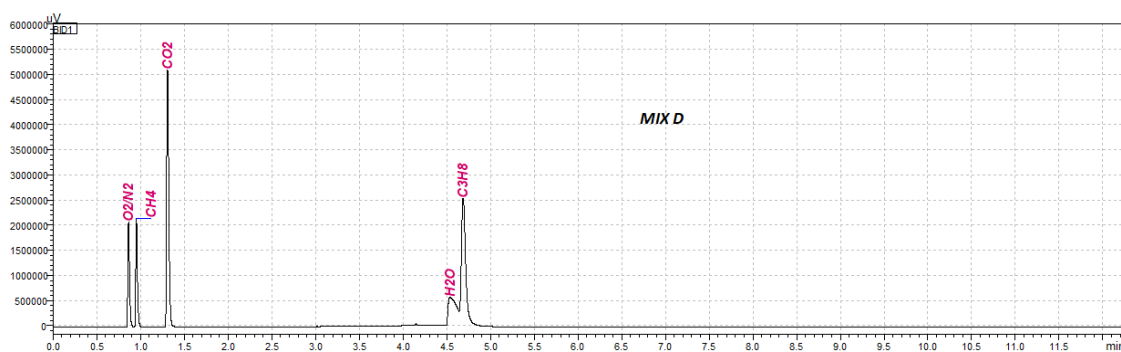
ΔΕΙΓΜΑ	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	CO <sub>2</sub>
	% v/v		
MIX A	28.3	45.8	25.9
MIX A (rep)	28.3	45.9	25.8
MIX B	13.6	20.0	66.4
MIX B (rep)	13.5	20.2	66.3

Πίνακας 7.1: Ποσοτική σύσταση (% v/v) των δειγμάτων Α και Β

Τα χρωματογραφήματα των δειγμάτων C και D παρατίθενται στα Σχήματα 7.3 και 7.4 αντίστοιχα, ενώ στον Πίνακα 7.2 δίνονται τα ποσοστά του μεθανίου, του προπανίου και του διοξειδίου του άνθρακα σε (% v/v).



Σχήμα 7.3: Χρωματογράφημα δείγματος C (στήλη HP-Plot Q)

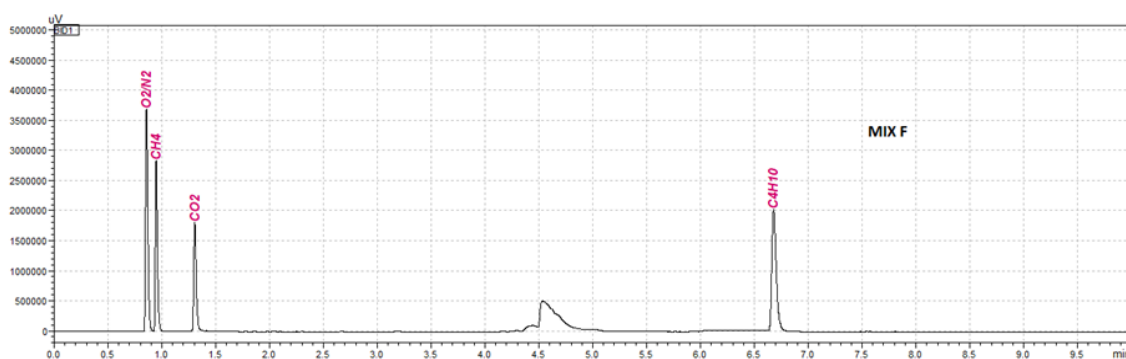


Σχήμα 7.4: Χρωματογράφημα δείγματος D (στήλη HP-Plot Q)

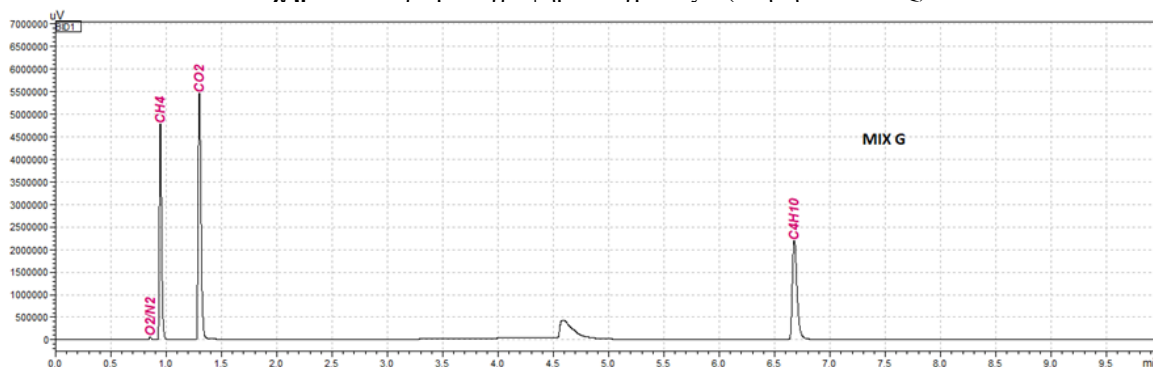
ΔΕΙΓΜΑ	CH <sub>4</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	CO <sub>2</sub>
	% v/v		
MIX C	34.4	47.1	18.6
MIX D	12.5	18.3	69.2

Πίνακας 7.2: Ποσοτική σύσταση (% v/v) των δειγμάτων C και D

Τα χρωματογραφήματα των δειγμάτων F και G δίνονται στα Σχήματα 7.5 και 7.6 αντίστοιχα, ενώ στον Πίνακα 7.3 δίνονται τα ποσοστά του μεθανίου, του βουτανίου και του διοξειδίου του άνθρακα σε (% v/v).



Σχήμα 7.5: Χρωματογράφημα δείγματος F (στήλη HP-Plot Q)



Σχήμα 7.6: Χρωματογράφημα δείγματος G (στήλη HP-Plot Q)

ΔΕΙΓΜΑ	CH <sub>4</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	CO <sub>2</sub>
	% v/v		
MIX F	36.3	26.1	37.6
MIX G	25.6	9.3	65.0

Πίνακας 7.3: Ποσοτική σύσταση (% v/v) των δειγμάτων F και G

### 7.3 Υπολογισμός πυκνότητας

Η παρούσα διπλωματική προσβλέπει στη σύγκριση των τιμών πυκνότητας μειγμάτων που μετρήθηκαν πειραματικά στο εργαστήριο με αυτές που μπορούν να υπολογιστούν μέσω προσομοίωσης χρησιμοποιώντας το λογισμικό WinProp της CMG (Computer Modelling Group).

Για την προσομοίωση των μειγμάτων και τον υπολογισμό των πυκνοτήτων χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο κυβικής καταστατικής εξίσωσης των Peng – Robinson (PR 1978). Για την βέλτιστη προσέγγιση των τιμών πυκνότητας ρυθμίστηκαν οι παράμετροι της διόρθωσης όγκου (Volume Shift), του Volume Shift Coefficient, της κρίσιμης πίεσης ( $P_c$ ) και της κρίσιμης θερμοκρασίας ( $T_c$ ).

Volume shift είναι ο διορθωμένος όγκος ρευστών τον οποίο δεν υπολογίζουν με ακρίβεια οι καταστατικές εξισώσεις. Παρά την ευρεία χρήση των καταστατικών εξισώσεων στην πετρελαϊκή βιομηχανία, κάποιες από τις παραμέτρους τους (όγκος, πίεση) χρειάζονται προσαρμογή (tuning) πριν την εφαρμογή τους. Αυτό συμβαίνει λόγω της ευρείας ποικιλίας των ρευστών σε έναν ταμιευτήρα, πράγμα το οποίο σημαίνει μεγάλο εύρος θερμοδυναμικών παραμέτρων. Μία παράμετρος η οποία προσαρμόζεται πριν την εφαρμογή της στις καταστατικές εξισώσεις είναι ο όγκος των ρευστών. Ο διορθωμένος αυτός όγκος προκύπτει από την πρόσθεση ή αφαίρεση μίας παραμέτρου η οποία εξαρτάται από κάποιες σταθερές και από θερμοδυναμικές μεταβλητές όπως η κρίσιμη πίεση και θερμοκρασία. Οι πιο διαδεδομένες διορθώσεις του όγκου είναι αυτή του Rackett, του Watson και του Peneloux.

Κρίσιμο σημείο είναι η μέγιστη θερμοκρασία και πίεση όπου και οι δύο φάσεις μπορούν να συνυπάρξουν σε ισορροπία. Μόνο μία υπερκρίσιμη φάση μπορεί να υπάρξει πάνω από την κρίσιμη πίεση ( $P_c$ ) ή την κρίσιμη θερμοκρασία ( $T_c$ ). Υπερκρίσιμο ρευστό έχει ιδιότητες και υγρής και αέριας φάσης. Πάνω από την κρίσιμη θερμοκρασία ( $T_c$ ), ένα ρευστό δεν μπορεί να συμπυκνωθεί ανεξαρτήτως πόσο υψηλή γίνεται η πίεση. Πάνω από την κρίσιμη πίεση ( $P_c$ ), ένα ρευστό δεν μπορεί να εξατμιστεί ανεξαρτήτως πόσο υψηλή γίνεται η θερμοκρασία.

Στα παρακάτω διαγράμματα απεικονίζονται οι πειραματικές και οι εκτιμώμενες (WinProp) τιμές των πυκνοτήτων, οι φάκελοι φάσεων, οι απόλυτες αποκλίσεις των πυκνοτήτων και οι αποκλίσεις % των πυκνοτήτων για κάθε μείγμα.

## 7.4 Μεθάνιο-Αιθάνιο-CO<sub>2</sub>

Το μείγμα μελετήθηκε σε 3 διαφορετικές περιεκτικότητες CO<sub>2</sub> (0% , 25,90% , 66,40%) και σε 3 διαφορετικές θερμοκρασίες (22°C , 50°C , 90°C).

### 7.4.1 Μεθάνιο 39,33% - Αιθάνιο 60,67% - CO<sub>2</sub> 0%

#### Στους 22°C

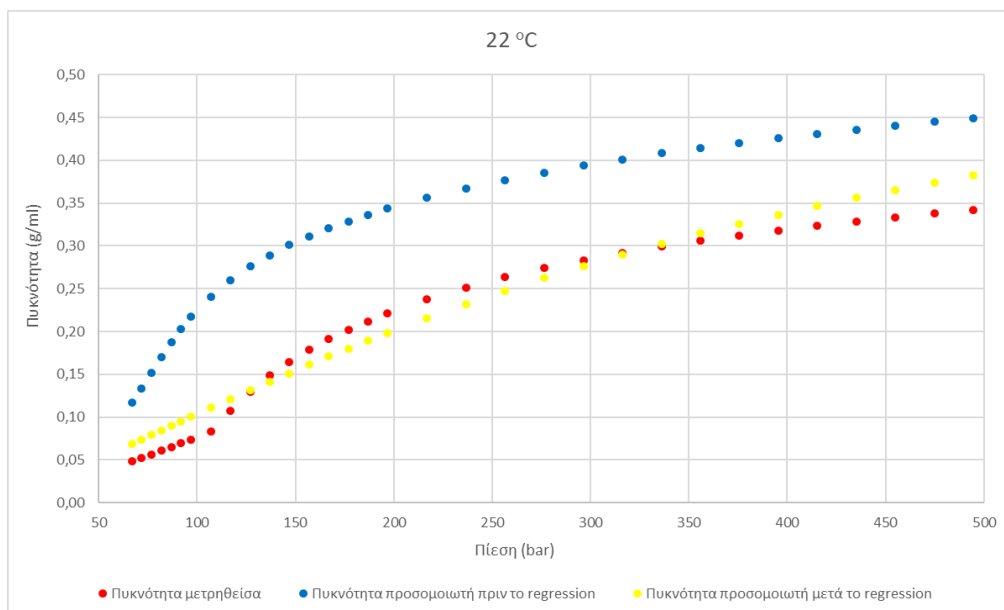
Ο Πίνακας Η.1 παρουσιάζει τις μετρηθείσες πυκνότητες, τις πυκνότητες του προσομοιωτή WinProp (πριν και μετά το regression), τις απόλυτες αποκλίσεις και τις αποκλίσεις % του μείγματος Μεθάνιο 39,33% - Αιθάνιο 60,67% - CO<sub>2</sub> 0% σε θερμοκρασία  $T \approx 22^\circ\text{C}$  και σε εύρος πιέσεων από 66,86 έως 494,46 bar.

Παρατηρείται μεγάλη απόκλιση, σε όλες τις τιμές των πιέσεων, μεταξύ των μετρηθείσας πυκνοτήτων και των πυκνοτήτων του προσομοιωτή πριν το regression. Η μεγαλύτερη απόκλιση είναι 194,36% στα 96,86 bar, ενώ η μικρότερη 31,36% στα 494,46 bar.

Μετά το regression, οι αποκλίσεις μεταξύ των μετρηθείσας πυκνοτήτων και των πυκνοτήτων του προσομοιωτή είναι εμφανώς αρκετά βελτιωμένες σε όλο το εύρος των πιέσεων. Η μεγαλύτερη απόκλιση είναι 42,62% στα 66,86 bar, ενώ η μικρότερη 0,53% στα 316,26 bar.

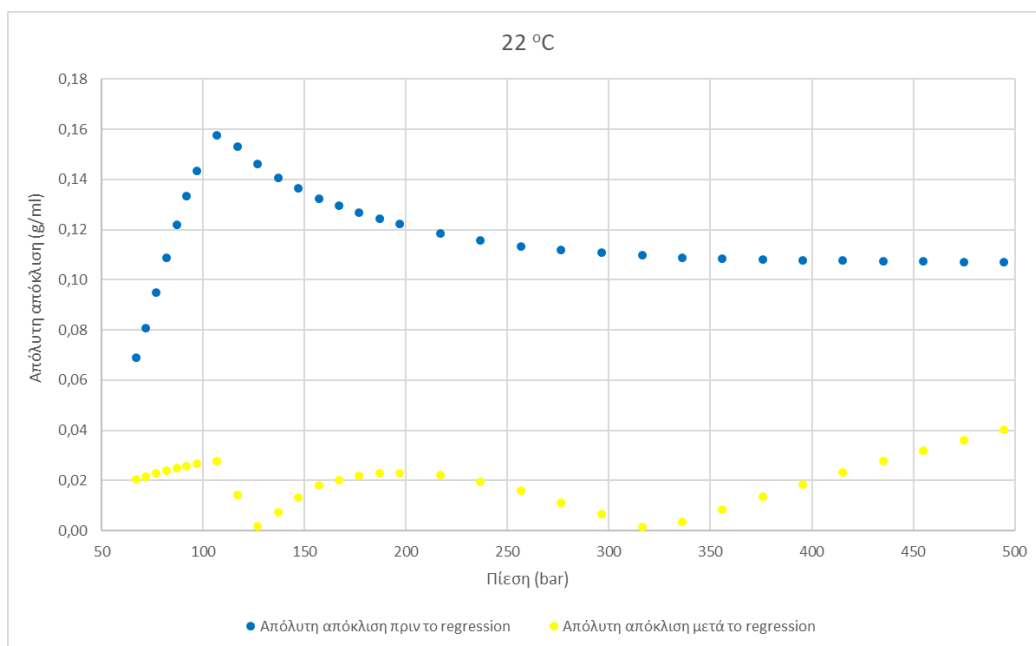
Στον Πίνακα Η.2 φαίνεται πως διαμορφώνονται οι τιμές των παραμέτρων του προσομοιωτή πριν και μετά το regression αντίστοιχα.

Στο Σχήμα 7.7 αναπαρίστανται γραφικά οι πειραματικές πυκνότητες και οι πυκνότητες του προσομοιωτή πριν και μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων (regression) στους 22°C και σε διαφορετικές πιέσεις. Είναι εμφανής η σύγκλιση των τιμών των μετρηθείσας πειραματικά πυκνοτήτων με αυτές που προκύπτουν από την προσομοίωση μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων.

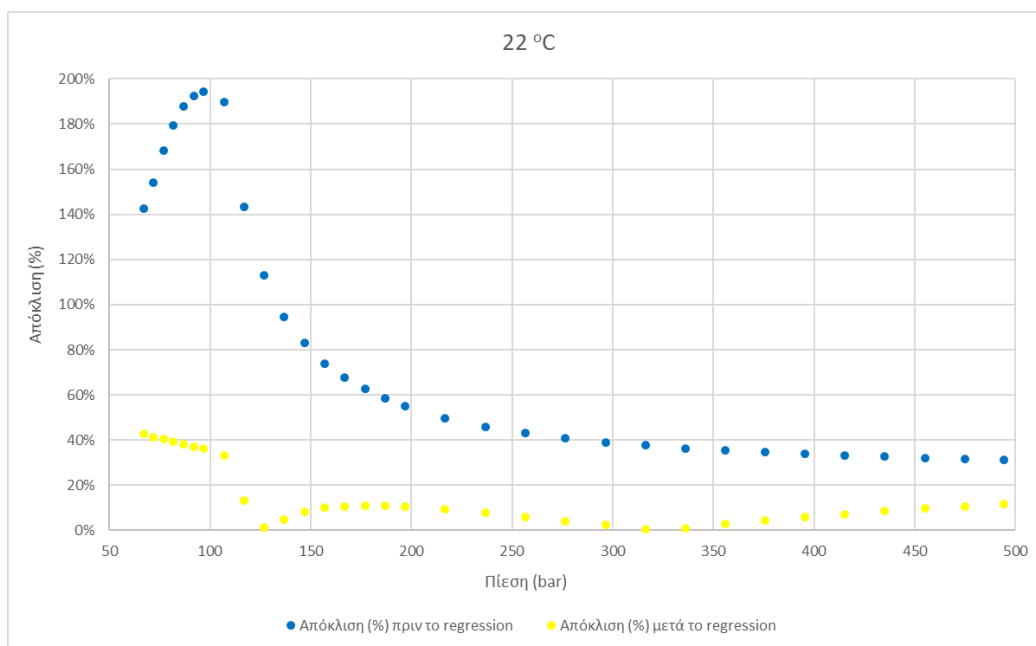


**Σχήμα 7.7:** Διάγραμμα πυκνοτήτων για το μείγμα Μεθάνιο 39,33% - Αιθάνιο 60,67% - CO<sub>2</sub> 0% στους 22°C

Στα Σχήματα 7.8 και 7.9 αναπαρίστανται γραφικά οι απόλυτες αποκλίσεις και οι αποκλίσεις % αντίστοιχα, των πυκνοτήτων του προσομοιωτή (πριν και μετά το regression) με τις πειραματικές πυκνότητες στους 22°C και σε διαφορετικές πιέσεις. Παρατηρείται και στα δύο σχήματα, οι αποκλίσεις των πυκνοτήτων του προσομοιωτή μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων (regression) να είναι αρκετά μικρότερες από τις αποκλίσεις του προσομοιωτή πριν το regression, σε όλο το εύρος των πιέσεων στους 22°C.



**Σχήμα 7.8:** Διάγραμμα απόλυτης απόκλισης πυκνοτήτων προσομοιωτή με τις πειραματικές πυκνότητες, για το μείγμα Μεθάνιο 39,33% - Αιθάνιο 60,67% - CO<sub>2</sub> 0% στους 22°C



**Σχήμα 7.9:** Διάγραμμα απόκλισης % πυκνοτήτων προσομοιωτή με τις πειραματικές πυκνότητες, για το μείγμα Μεθάνιο 39,33% - Αιθάνιο 60,67% - CO<sub>2</sub> 0% στους 22°C

### Στους 50°C

Ο Πίνακας Η.3 παρουσιάζει τις μετρηθείσες πυκνότητες, τις πυκνότητες του προσομοιωτή WinProp (πριν και μετά το regression), τις απόλυτες αποκλίσεις και τις αποκλίσεις % του μείγματος Μεθάνιο 39,33% - Αιθάνιο 60,67% - CO<sub>2</sub> 0% σε θερμοκρασία  $T \approx 50^\circ\text{C}$  και σε εύρος πιέσεων από 86,46 έως 493,96 bar.

Παρατηρείται σχετικά χαμηλή απόκλιση, σε όλες τις τιμές των πιέσεων, μεταξύ των μετρηθείσας πυκνοτήτων και των πυκνοτήτων του προσομοιωτή πριν το regression. Η μεγαλύτερη απόκλιση είναι 15,64% στα 91,56 bar, ενώ η μικρότερη 8,54% στα 186,26 bar.

Μετά το regression, οι αποκλίσεις μεταξύ των μετρηθείσας πυκνοτήτων και των πυκνοτήτων του προσομοιωτή είναι εμφανώς αρκετά βελτιωμένες σε όλο το εύρος των πιέσεων. Η μεγαλύτερη απόκλιση είναι 1,37% στα 86,46 bar, ενώ η μικρότερη 0,00% στα 256,46 bar.

Στον Πίνακα Η.4 φαίνεται πως διαμορφώνονται οι τιμές των παραμέτρων του προσομοιωτή πριν και μετά το regression αντίστοιχα.

Στο Σχήμα Θ.1 αναπαρίστανται γραφικά οι πειραματικές πυκνότητες και οι πυκνότητες του προσομοιωτή πριν και μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων (regression) στους 50°C και σε διαφορετικές πιέσεις. Είναι εμφανής η ταύτιση των τιμών των μετρηθείσας πειραματικά πυκνοτήτων με αυτές που προκύπτουν από την προσομοίωση μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων. Αξίζει να σημειωθεί πως οι πυκνότητες του προσομοιωτή πριν το regression είναι αρκετά κοντά με αυτές των πειραματικών πυκνοτήτων.

Στα Σχήματα Θ.2 και Θ.3 αναπαρίστανται γραφικά οι απόλυτες αποκλίσεις και οι αποκλίσεις % αντίστοιχα, των πυκνοτήτων του προσομοιωτή (πριν και μετά το regression) με τις πειραματικές πυκνότητες στους 50°C και σε διαφορετικές πιέσεις. Παρατηρείται και στα δύο σχήματα, οι αποκλίσεις των πυκνοτήτων του προσομοιωτή μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων (regression) να είναι μικρότερες από τις αποκλίσεις του προσομοιωτή πριν το regression, σε όλο το εύρος των πιέσεων στους 50°C.

### Στους 90°C

Ο Πίνακας Η.5 παρουσιάζει τις μετρηθείσες πυκνότητες, τις πυκνότητες του προσομοιωτή WinProp (πριν και μετά το regression), τις απόλυτες αποκλίσεις και τις αποκλίσεις % του μείγματος Μεθάνιο 39,33% - Αιθάνιο 60,67% - CO<sub>2</sub> 0% σε θερμοκρασία  $T \approx 90^\circ\text{C}$  και σε εύρος πιέσεων από 77,16 έως 492,56 bar.

Παρατηρείται σχετικά χαμηλή απόκλιση, σε όλες τις τιμές των πιέσεων, μεταξύ των μετρηθείσας πυκνοτήτων και των πυκνοτήτων του προσομοιωτή πριν το regression. Η μεγαλύτερη απόκλιση είναι 10,85% στα 492,56 bar, ενώ η μικρότερη 7,77% στα 215,26 bar.

Μετά το regression, οι αποκλίσεις μεταξύ των μετρηθείσας πυκνοτήτων και των πυκνοτήτων του προσομοιωτή είναι εμφανώς αρκετά βελτιωμένες σε όλο το εύρος των πιέσεων. Η μεγαλύτερη απόκλιση είναι 2,37% στα 77,16 bar, ενώ η μικρότερη 0,00% στα 334,36 bar.

Στον παραπάνω Πίνακα Η.6 φαίνεται πως διαμορφώνονται οι τιμές των παραμέτρων του προσομοιωτή πριν και μετά το regression αντίστοιχα.

Στο Σχήμα Θ.4 αναπαρίστανται γραφικά οι πειραματικές πυκνότητες και οι πυκνότητες του προσομοιωτή πριν και μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων (regression) στους 90°C και σε διαφορετικές πιέσεις. Είναι εμφανής η ταύτιση των τιμών των μετρηθείσας πειραματικά πυκνοτήτων με αυτές που προκύπτουν από την προσομοίωση μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων. Αξίζει να σημειωθεί πως οι πυκνότητες του προσομοιωτή πριν το regression είναι αρκετά κοντά με αυτές των πειραματικών πυκνοτήτων.

Στα Σχήματα Θ.5 και Θ.6 αναπαρίστανται γραφικά οι απόλυτες αποκλίσεις και οι αποκλίσεις % αντίστοιχα, των πυκνοτήτων του προσομοιωτή (πριν και μετά το regression) με τις πειραματικές πυκνότητες στους 90°C και σε διαφορετικές πιέσεις. Παρατηρείται και στα δύο σχήματα, οι αποκλίσεις των πυκνοτήτων του προσομοιωτή μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων (regression) να είναι μικρότερες από τις αποκλίσεις του προσομοιωτή πριν το regression, σε όλο το εύρος των πιέσεων στους 90°C.

#### **7.4.2 Μεθάνιο 28,30% - Αιθάνιο 45,80% - CO<sub>2</sub> 25,90%**

##### **Στους 22°C**

Ο Πίνακας Η.7 παρουσιάζει τις μετρηθείσες πυκνότητες, τις πυκνότητες του προσομοιωτή WinProp (πριν και μετά το regression), τις απόλυτες αποκλίσεις και τις αποκλίσεις % του μείγματος Μεθάνιο 28,30% - Αιθάνιο 45,80% - CO<sub>2</sub> 25,90% σε θερμοκρασία  $T \approx 22^\circ\text{C}$  και σε εύρος πιέσεων από 67,01 έως 494,01 bar.

Παρατηρείται σχετικά χαμηλή απόκλιση, σε όλες τις τιμές των πιέσεων, μεταξύ των μετρηθείσας πυκνοτήτων και των πυκνοτήτων του προσομοιωτή πριν το regression. Η μεγαλύτερη απόκλιση είναι 7,86% στα 81,91 bar, ενώ η μικρότερη 0,01% στα 256,11 bar.

Μετά το regression, οι αποκλίσεις μεταξύ των μετρηθείσας πυκνοτήτων και των πυκνοτήτων του προσομοιωτή είναι ελαφρώς βελτιωμένες σε όλο το εύρος των πιέσεων. Η μεγαλύτερη απόκλιση είναι 11,22% στα 67,01 bar, ενώ η μικρότερη 0,07% στα 275,96 bar.

Στον Πίνακα Η.8 φαίνεται πως διαμορφώνονται οι τιμές των παραμέτρων του προσομοιωτή πριν και μετά το regression αντίστοιχα.

Στο Σχήμα Θ.7 αναπαρίστανται γραφικά οι πειραματικές πυκνότητες και οι πυκνότητες του προσομοιωτή πριν και μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων (regression) στους 22°C και σε διαφορετικές πιέσεις. Είναι εμφανής η ταύτιση των τιμών των μετρηθείσας πειραματικά πυκνοτήτων με αυτές που προκύπτουν από την προσομοίωση πριν και μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων. Παρατηρείται μία ελαφρώς καλύτερη ταύτιση των πειραματικών πυκνοτήτων με των πυκνοτήτων του προσομοιωτή μετά το regression.

Στα Σχήματα Θ.8 και Θ.9 αναπαρίστανται γραφικά οι απόλυτες αποκλίσεις και οι αποκλίσεις % αντίστοιχα, των πυκνοτήτων του προσομοιωτή (πριν και μετά το regression) με τις πειραματικές πυκνότητες στους 22°C και σε διαφορετικές πιέσεις. Παρατηρείται και στα δύο σχήματα, οι αποκλίσεις των πυκνοτήτων του προσομοιωτή μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων (regression) να είναι μικρότερες από τις αποκλίσεις του προσομοιωτή πριν το regression, στο μεγαλύτερο εύρος των πιέσεων στους 22°C. Μοναδικές εξαιρέσεις αποτελούν τρεις περιπτώσεις που οι αποκλίσεις των πυκνοτήτων του προσομοιωτή πριν το regression είναι μικρότερες στα 67,01 , 236,11 και 256,11 bar. Τέλος, υπάρχει και μία περίπτωση στα 216,31 bar όπου η απόκλιση πριν και μετά το regression είναι ίδια.

##### **Στους 50°C**

Ο Πίνακας Η.9 παρουσιάζει τις μετρηθείσες πυκνότητες, τις πυκνότητες του προσομοιωτή WinProp (πριν και μετά το regression), τις απόλυτες αποκλίσεις και τις αποκλίσεις % του μείγματος Μεθάνιο 28,30% - Αιθάνιο 45,80% - CO<sub>2</sub> 25,90% σε θερμοκρασία  $T \approx 50^\circ\text{C}$  και σε εύρος πιέσεων από 60,91 έως 493,46 bar.

Παρατηρείται σχετικά χαμηλή απόκλιση, σε όλες τις τιμές των πιέσεων, μεταξύ των μετρηθείσας πυκνοτήτων και των πυκνοτήτων του προσομοιωτή πριν το regression. Η μεγαλύτερη απόκλιση είναι 3,23% στα 86,16 bar, ενώ η μικρότερη 0,13% στα 315,16 bar.

Μετά το regression, οι αποκλίσεις μεταξύ των μετρηθείσας πυκνοτήτων και των πυκνοτήτων του προσομοιωτή είναι ελαφρώς βελτιωμένες σε όλο το εύρος των πιέσεων. Η μεγαλύτερη απόκλιση είναι 1,12% στα 60,91 bar, ενώ η μικρότερη 0,01% στα 156,31 bar.

Στον Πίνακα Η.10 φαίνεται πως διαμορφώνονται οι τιμές των παραμέτρων του προσομοιωτή πριν και μετά το regression αντίστοιχα.

Στο Σχήμα Θ.10 αναπαρίστανται γραφικά οι πειραματικές πυκνότητες και οι πυκνότητες του προσομοιωτή πριν και μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων (regression) στους 50°C και σε διαφορετικές πιέσεις. Είναι εμφανής η ταύτιση των τιμών των μετρηθείσας πειραματικά πυκνοτήτων με αυτές που προκύπτουν από την προσομοίωση πριν και μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων. Παρατηρείται μία ελαφρώς καλύτερη ταύτιση των πειραματικών πυκνοτήτων με των πυκνοτήτων του προσομοιωτή μετά το regression.

Στα Σχήματα Θ.11 και Θ.12 αναπαρίστανται γραφικά οι απόλυτες αποκλίσεις και οι αποκλίσεις % αντίστοιχα, των πυκνοτήτων του προσομοιωτή (πριν και μετά το regression) με τις πειραματικές πυκνότητες στους 50°C και σε διαφορετικές πιέσεις. Παρατηρείται και στα δύο σχήματα, οι αποκλίσεις των πυκνοτήτων του προσομοιωτή μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων (regression) να είναι μικρότερες από τις αποκλίσεις του προσομοιωτή πριν το regression, στο μεγαλύτερο εύρος των πιέσεων στους 50°C. Μοναδικές εξαιρέσεις αποτελούν δύο περιπτώσεις που οι αποκλίσεις των πυκνοτήτων του προσομοιωτή πριν το regression είναι μικρότερες στα 126,36 και 136,36 bar. Τέλος, υπάρχει και μία περίπτωση στα 315,16 bar όπου η απόκλιση πριν και μετά το regression είναι ίδια.

## Στους 90°C

Ο Πίνακας Η.11 παρουσιάζει τις μετρηθείσες πυκνότητες, τις πυκνότητες του προσομοιωτή WinProp (πριν και μετά το regression), τις απόλυτες αποκλίσεις και τις αποκλίσεις % του μείγματος Μεθάνιο 28,30% - Αιθάνιο 45,80% - CO<sub>2</sub> 25,90% σε θερμοκρασία T≈90°C και σε εύρος πιέσεων από 73,46 έως 492,16 bar.

Παρατηρείται σχετικά χαμηλή απόκλιση, σε όλες τις τιμές των πιέσεων, μεταξύ των μετρηθείσας πυκνοτήτων και των πυκνοτήτων του προσομοιωτή πριν το regression. Η μεγαλύτερη απόκλιση είναι 9,94% στα 73,46 bar, ενώ η μικρότερη 0,07% στα 393,16 bar.

Μετά το regression, οι αποκλίσεις μεταξύ των μετρηθείσας πυκνοτήτων και των πυκνοτήτων του προσομοιωτή είναι ελαφρώς βελτιωμένες στο μεγαλύτερο εύρος των πιέσεων. Η μεγαλύτερη απόκλιση είναι 8,21% στα 73,46 bar, ενώ η μικρότερη 0,01% στα 173,76 bar.

Στον Πίνακα Η.12 φαίνεται πως διαμορφώνονται οι τιμές των παραμέτρων του προσομοιωτή πριν και μετά το regression αντίστοιχα.

Στο Σχήμα Θ.13 αναπαρίστανται γραφικά οι πειραματικές πυκνότητες και οι πυκνότητες του προσομοιωτή πριν και μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων (regression) στους 90°C και σε διαφορετικές πιέσεις. Είναι εμφανής η ταύτιση των τιμών των μετρηθείσας πειραματικά πυκνοτήτων με αυτές που προκύπτουν από την προσομοίωση πριν και μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων. Παρατηρείται μία ελαφρώς καλύτερη ταύτιση των πειραματικών πυκνοτήτων με των πυκνοτήτων του προσομοιωτή μετά το regression.

Στα Σχήματα Θ.14 και Θ.15 αναπαρίστανται γραφικά οι απόλυτες αποκλίσεις και οι αποκλίσεις % αντίστοιχα, των πυκνοτήτων του προσομοιωτή (πριν και μετά το regression) με τις πειραματικές πυκνότητες στους 90°C και σε διαφορετικές πιέσεις. Παρατηρείται και στα δύο σχήματα, οι αποκλίσεις των πυκνοτήτων του προσομοιωτή μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων (regression) να είναι ελαφρώς μικρότερες από τις αποκλίσεις του προσομοιωτή πριν το regression, στο μεγαλύτερο

εύρος των πιέσεων στους 90°C. Εξαιρέσεις αποτελούν δέκα περιπτώσεις που οι αποκλίσεις των πυκνοτήτων του προσομοιωτή πριν το regression είναι μικρότερες στο εύρος 89,06 έως 153,66 και στο εύρος 393,16 έως 492,16 bar.

### **7.4.3 Μεθάνιο 13,60% - Αιθάνιο 20,00% - CO<sub>2</sub> 66,40%**

#### **Στους 25°C**

Ο Πίνακας H.13 παρουσιάζει τις μετρηθείσες πυκνότητες, τις πυκνότητες του προσομοιωτή WinProp (πριν και μετά το regression), τις απόλυτες αποκλίσεις και τις αποκλίσεις % του μείγματος Μεθάνιο 13,60% - Αιθάνιο 20% - CO<sub>2</sub> 66,40% σε θερμοκρασία  $T \approx 25^\circ\text{C}$  και σε εύρος πιέσεων από 66,56 έως 493,66 bar.

Παρατηρείται σχετικά μεγάλη απόκλιση, σε όλες τις τιμές των πιέσεων, μεταξύ των μετρηθείσας πυκνοτήτων και των πυκνοτήτων του προσομοιωτή πριν το regression. Η μεγαλύτερη απόκλιση είναι 26,66% στα 66,56 bar, ενώ η μικρότερη 4,35% στα 126,46 bar.

Μετά το regression, οι αποκλίσεις μεταξύ των μετρηθείσας πυκνοτήτων και των πυκνοτήτων του προσομοιωτή είναι αρκετά βελτιωμένες σε όλο το εύρος των πιέσεων. Η μεγαλύτερη απόκλιση είναι 28,68% στα 66,56 bar, ενώ η μικρότερη 1,60% στα 106,51 bar.

Στον Πίνακα H.14 φαίνεται πως διαμορφώνονται οι τιμές των παραμέτρων του προσομοιωτή πριν και μετά το regression αντίστοιχα.

Στο Σχήμα Θ.16 αναπαρίστανται γραφικά οι πειραματικές πυκνότητες και οι πυκνότητες του προσομοιωτή πριν και μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων (regression) στους 25°C και σε διαφορετικές πιέσεις. Είναι εμφανής η σύγκλιση των τιμών των μετρηθείσας πειραματικά πυκνοτήτων με αυτές που προκύπτουν από την προσομοίωση μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων.

Στα Σχήματα Θ.17 και Θ.18 αναπαρίστανται γραφικά οι απόλυτες αποκλίσεις και οι αποκλίσεις % αντίστοιχα, των πυκνοτήτων του προσομοιωτή (πριν και μετά το regression) με τις πειραματικές πυκνότητες στους 25°C και σε διαφορετικές πιέσεις. Παρατηρείται και στα δύο σχήματα, οι αποκλίσεις των πυκνοτήτων του προσομοιωτή μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων (regression) να είναι μικρότερες από τις αποκλίσεις του προσομοιωτή πριν το regression, σε όλο το εύρος των πιέσεων στους 25°C. Μοναδικές εξαιρέσεις αποτελούν δύο περιπτώσεις που οι αποκλίσεις των πυκνοτήτων του προσομοιωτή πριν το regression είναι μικρότερες στα 66,56 και 71,56 bar.

#### **Στους 50°C**

Ο Πίνακας H.15 παρουσιάζει τις μετρηθείσες πυκνότητες, τις πυκνότητες του προσομοιωτή WinProp (πριν και μετά το regression), τις απόλυτες αποκλίσεις και τις αποκλίσεις % του μείγματος Μεθάνιο 13,60% - Αιθάνιο 20% - CO<sub>2</sub> 66,40% σε θερμοκρασία  $T \approx 50^\circ\text{C}$  και σε εύρος πιέσεων από 81,61 έως 492,16 bar.

Παρατηρείται σχετικά μεγάλη απόκλιση, σε όλες τις τιμές των πιέσεων, μεταξύ των μετρηθείσας πυκνοτήτων και των πυκνοτήτων του προσομοιωτή πριν το regression. Η μεγαλύτερη απόκλιση είναι 11,78% στα 492,16 bar, ενώ η μικρότερη 3,53% στα 156,01 bar.

Μετά το regression, οι αποκλίσεις μεταξύ των μετρηθείσας πυκνοτήτων και των πυκνοτήτων του προσομοιωτή είναι αρκετά βελτιωμένες σε όλο το εύρος των πιέσεων. Η μεγαλύτερη απόκλιση είναι 0,95% στα 81,61 bar, ενώ η μικρότερη 0,04% στα 273,81 bar.

Στον παρακάτω Πίνακα H.16 φαίνεται πως διαμορφώνονται οι τιμές των παραμέτρων του προσομοιωτή πριν και μετά το regression αντίστοιχα.

Στο Σχήμα Θ.19 αναπαρίστανται γραφικά οι πειραματικές πυκνότητες και οι πυκνότητες του προσομοιωτή πριν και μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων (regression) στους 50°C και σε

διαφορετικές πιέσεις. Είναι εμφανής η ταύτιση των τιμών των μετρηθείσας πειραματικά πυκνοτήτων με αυτές που προκύπτουν από την προσομοίωση μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων.

Στα Σχήματα Θ.20 και Θ.21 αναπαρίστανται γραφικά οι απόλυτες αποκλίσεις και οι αποκλίσεις % αντίστοιχα, των πυκνοτήτων του προσομοιωτή (πριν και μετά το regression) με τις πειραματικές πυκνότητες στους 50°C και σε διαφορετικές πιέσεις. Παρατηρείται και στα δύο σχήματα, οι αποκλίσεις των πυκνοτήτων του προσομοιωτή μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων (regression) να είναι μικρότερες από τις αποκλίσεις του προσομοιωτή πριν το regression, σε όλο το εύρος των πιέσεων στους 50°C.

### Στους 90°C

Ο Πίνακας Η.17 παρουσιάζει τις μετρηθείσες πυκνότητες, τις πυκνότητες του προσομοιωτή WinProp (πριν και μετά το regression), τις απόλυτες αποκλίσεις και τις αποκλίσεις % του μείγματος Μεθάνιο 13,60% - Αιθάνιο 20% - CO<sub>2</sub> 66,40% σε θερμοκρασία  $T \approx 90^\circ\text{C}$  και σε εύρος πιέσεων από 93,36 έως 492,21 bar.

Παρατηρείται σχετικά μικρή απόκλιση, σε όλες τις τιμές των πιέσεων, μεταξύ των μετρηθείσας πυκνοτήτων και των πυκνοτήτων του προσομοιωτή πριν το regression. Η μεγαλύτερη απόκλιση είναι 9,83% στα 492,21 bar, ενώ η μικρότερη 2,91% στα 213,36 bar.

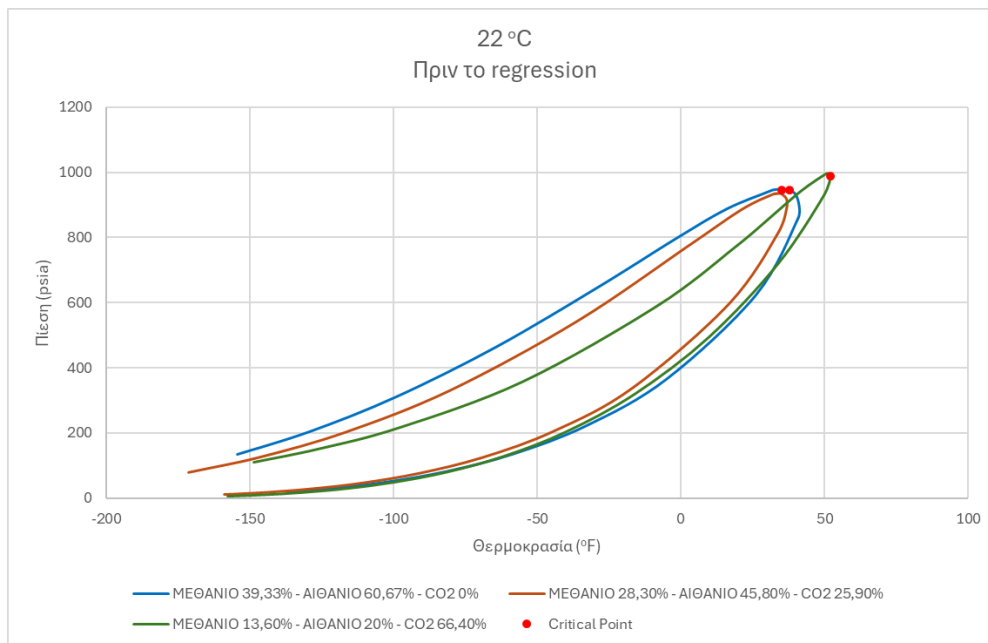
Μετά το regression, οι αποκλίσεις μεταξύ των μετρηθείσας πυκνοτήτων και των πυκνοτήτων του προσομοιωτή είναι αρκετά βελτιωμένες σε όλο το εύρος των πιέσεων. Η μεγαλύτερη απόκλιση είναι 1,24% στα 93,36 bar, ενώ η μικρότερη 0,00% στα 144,86 bar.

Στον Πίνακα Η.18 φαίνεται πως διαμορφώνονται οι τιμές των παραμέτρων του προσομοιωτή πριν και μετά το regression αντίστοιχα.

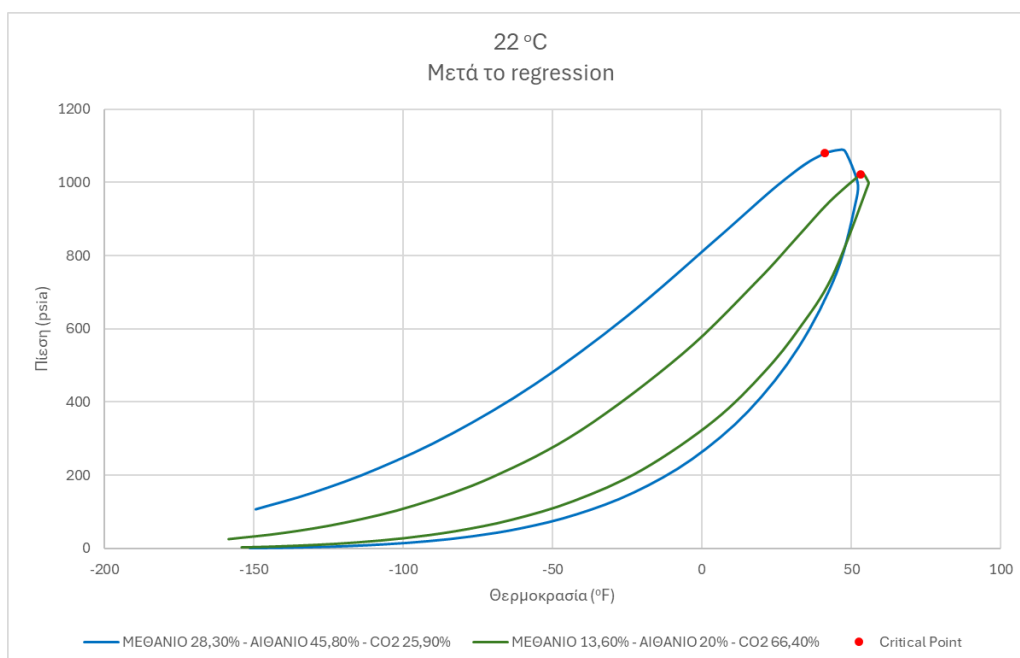
Στο Σχήμα Θ.22 αναπαρίστανται γραφικά οι πειραματικές πυκνότητες και οι πυκνότητες του προσομοιωτή πριν και μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων (regression) στους 90°C και σε διαφορετικές πιέσεις. Είναι εμφανής η ταύτιση των τιμών των μετρηθείσας πειραματικά πυκνοτήτων με αυτές που προκύπτουν από την προσομοίωση μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων. Αξίζει να σημειωθεί πως οι πυκνότητες του προσομοιωτή πριν το regression είναι αρκετά κοντά με αυτές των πειραματικών πυκνοτήτων.

Στα Σχήματα Θ.23 και Θ.24 αναπαρίστανται γραφικά οι απόλυτες αποκλίσεις και οι αποκλίσεις % αντίστοιχα, των πυκνοτήτων του προσομοιωτή (πριν και μετά το regression) με τις πειραματικές πυκνότητες στους 90°C και σε διαφορετικές πιέσεις. Παρατηρείται και στα δύο σχήματα, οι αποκλίσεις των πυκνοτήτων του προσομοιωτή μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων (regression) να είναι μικρότερες από τις αποκλίσεις του προσομοιωτή πριν το regression, σε όλο το εύρος των πιέσεων στους 90°C.

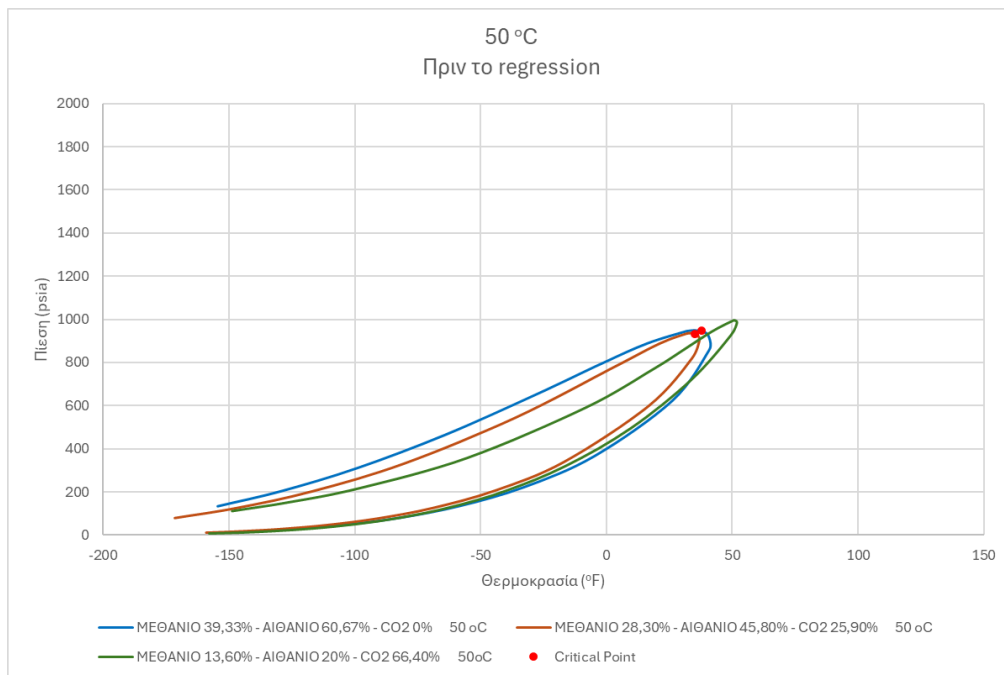
#### 7.4.4 Φάκελοι φάσεων



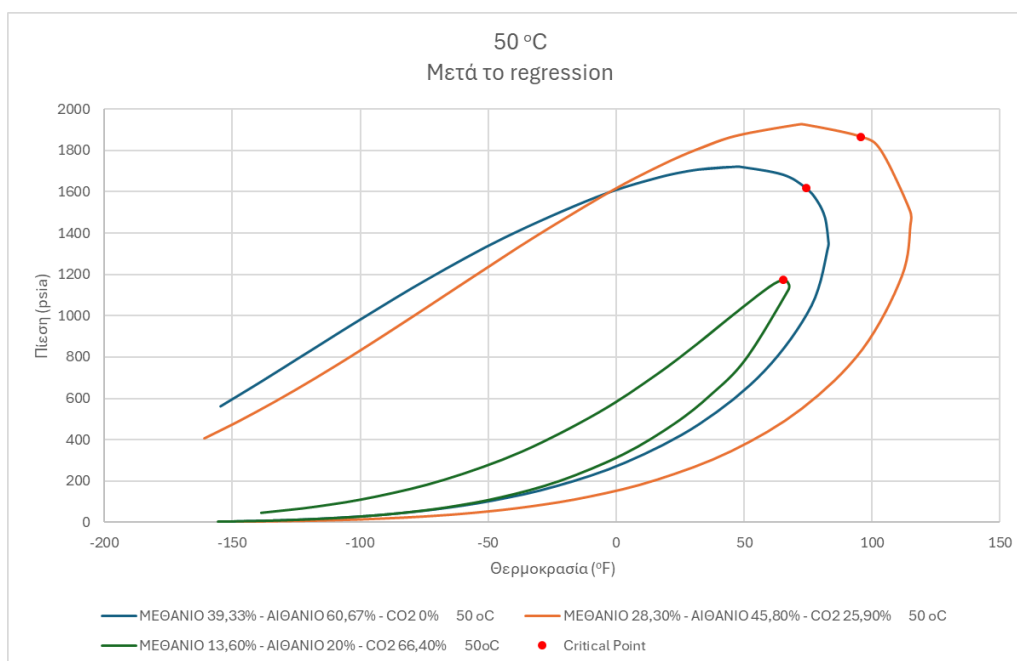
Σχήμα 7.10: Διάγραμμα φακέλων φάσεων μειγμάτων μεθανίου-αιθανίου-CO<sub>2</sub> σε τρεις διαφορετικές συστάσεις πριν το regression στους 22°C



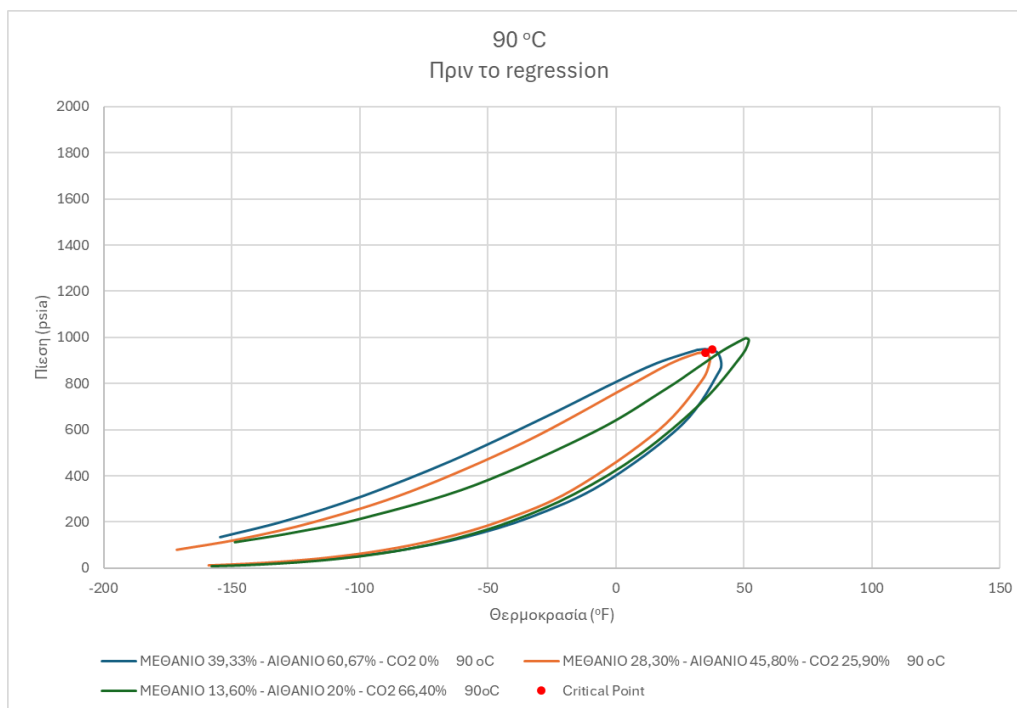
Σχήμα 7.11: Διάγραμμα φακέλων φάσεων μειγμάτων μεθανίου-αιθανίου-CO<sub>2</sub> σε δύο διαφορετικές συστάσεις μετά το regression στους 22°C



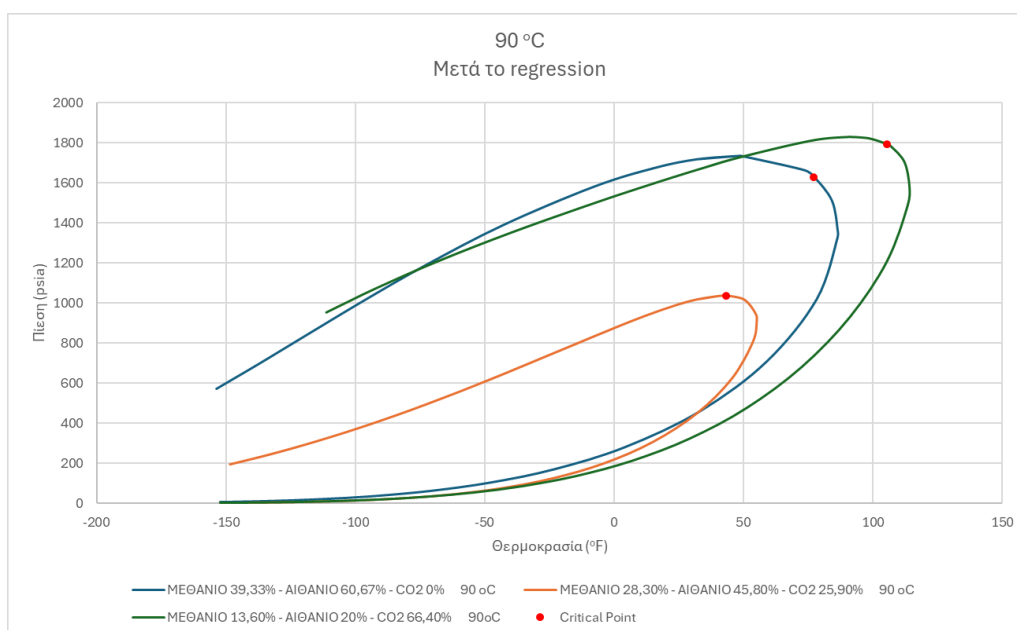
**Σχήμα 7.12:** Διάγραμμα φακέλων φάσεων μειγμάτων μεθανίου-αιθανίου-CO<sub>2</sub> σε τρεις διαφορετικές συστάσεις πριν το regression στους 50°C



**Σχήμα 7.13:** Διάγραμμα φακέλων φάσεων μειγμάτων μεθανίου-αιθανίου-CO<sub>2</sub> σε τρεις διαφορετικές συστάσεις μετά το regression στους 50°C



**Σχήμα 7.14:** Διάγραμμα φακέλων φάσεων μειγμάτων μεθανίου-αιθανίου-CO<sub>2</sub> σε τρεις διαφορετικές συστάσεις πριν το regression στους 90°C



**Σχήμα 7.15:** Διάγραμμα φακέλων φάσεων μειγμάτων μεθανίου-αιθανίου-CO<sub>2</sub> σε τρεις διαφορετικές συστάσεις μετά το regression στους 90°C

## 7.5 Μεθάνιο-Προπάνιο-CO<sub>2</sub>

Το μείγμα μελετήθηκε σε 3 διαφορετικές περιεκτικότητες CO<sub>2</sub> (0% , 18,60% , 69,20%) και σε 3 διαφορετικές θερμοκρασίες (29°C , 50°C , 90°C).

### 7.5.1 Μεθάνιο 41,40% - Προπάνιο 58,60% - CO<sub>2</sub> 0%

#### Στους 27°C

Ο Πίνακας Η.19 παρουσιάζει τις μετρηθείσες πυκνότητες, τις πυκνότητες του προσομοιωτή WinProp (πριν και μετά το regression), τις απόλυτες αποκλίσεις και τις αποκλίσεις % του μείγματος Μεθάνιο 41,40% - Προπάνιο 58,60% - CO<sub>2</sub> 0% σε θερμοκρασία  $T \approx 27^\circ\text{C}$  και σε εύρος πιέσεων από 20,31 έως 493,16 bar.

Παρατηρείται πολύ μεγάλη απόκλιση, σε όλες τις τιμές των πιέσεων, μεταξύ των μετρηθείσας πυκνοτήτων και των πυκνοτήτων του προσομοιωτή πριν το regression. Η μεγαλύτερη απόκλιση είναι 194,79% στα 80,01 bar, ενώ η μικρότερη 5,07% στα 75,06 bar.

Μετά το regression, οι αποκλίσεις μεταξύ των μετρηθείσας πυκνοτήτων και των πυκνοτήτων του προσομοιωτή είναι εμφανώς αρκετά βελτιωμένες σε όλο το εύρος των πιέσεων. Η μεγαλύτερη απόκλιση είναι 98,78% στα 20,31 bar, ενώ η μικρότερη 0,16% στα 294,76 bar.

Στον Πίνακα Η.19, στις στήλες που παρουσιάζονται οι πυκνότητες του προσομοιωτή πριν και μετά το regression, υπάρχει διαφορετικός χρωματισμός για κάθε τιμή ανάλογα με την φάση στην οποία βρίσκεται το ρευστό στις συγκεκριμένες συνθήκες, σύμφωνα με το πως το αντιλαμβάνεται το πρόγραμμα WinProp. Συγκεκριμένα, όσες τιμές βρίσκονται με πράσινη απόχρωση δηλώνει πως το ρευστό στις συγκεκριμένες συνθήκες ο προσομοιωτής το αναγνωρίζει ως διφασικό, ενώ για τις τιμές με μπλε απόχρωση ως υγρό.

Στον Πίνακα Η.20 φαίνεται πως διαμορφώνονται οι τιμές των παραμέτρων του προσομοιωτή πριν και μετά το regression αντίστοιχα.

Στο Σχήμα Θ.25 αναπαρίστανται γραφικά οι πειραματικές πυκνότητες και οι πυκνότητες του προσομοιωτή πριν και μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων (regression) στους 27°C και σε διαφορετικές πιέσεις. Είναι εμφανής η σύγκλιση των τιμών των μετρηθείσας πειραματικά πυκνοτήτων με αυτές που προκύπτουν από την προσομοίωση μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων.

Στα Σχήματα Θ.26 και Θ.27 αναπαρίστανται γραφικά οι απόλυτες αποκλίσεις και οι αποκλίσεις % αντίστοιχα, των πυκνοτήτων του προσομοιωτή (πριν και μετά το regression) με τις πειραματικές πυκνότητες στους 27°C και σε διαφορετικές πιέσεις. Παρατηρείται και στα δύο σχήματα, οι αποκλίσεις των πυκνοτήτων του προσομοιωτή μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων (regression) να είναι μικρότερες από τις αποκλίσεις του προσομοιωτή πριν το regression, στο μεγαλύτερο εύρος των πιέσεων στους 27°C. Εξαιρέσεις αποτελούν πέντε περιπτώσεις που οι αποκλίσεις των πυκνοτήτων του προσομοιωτή πριν το regression είναι μικρότερες στο εύρος 55,26 έως 75,06 bar.

#### Στους 50°C

Ο Πίνακας Η.21 παρουσιάζει τις μετρηθείσες πυκνότητες, τις πυκνότητες του προσομοιωτή WinProp (πριν και μετά το regression), τις απόλυτες αποκλίσεις και τις αποκλίσεις % του μείγματος Μεθάνιο 41,40% - Προπάνιο 58,60% - CO<sub>2</sub> 0% σε θερμοκρασία  $T \approx 50^\circ\text{C}$  και σε εύρος πιέσεων από 20,31 έως 493,16 bar.

Παρατηρείται μεγάλη απόκλιση, σε όλες τις τιμές των πιέσεων, μεταξύ των μετρηθείσας πυκνοτήτων και των πυκνοτήτων του προσομοιωτή πριν το regression. Η μεγαλύτερη απόκλιση είναι 72,77% στα 80,56 bar, ενώ η μικρότερη 3,65% στα 70,76 bar.

Μετά το regression, οι αποκλίσεις μεταξύ των μετρηθείσας πυκνοτήτων και των πυκνοτήτων του προσομοιωτή είναι εμφανώς αρκετά βελτιωμένες σε όλο το εύρος των πιέσεων. Η μεγαλύτερη απόκλιση είναι 12,04% στα 31,21 bar, ενώ η μικρότερη 0,22% στα 195,41 bar.

Στον Πίνακα Η.22 φαίνεται πως διαμορφώνονται οι τιμές των παραμέτρων του προσομοιωτή πριν και μετά το regression αντίστοιχα.

Στο Σχήμα Θ.28 αναπαρίστανται γραφικά οι πειραματικές πυκνότητες και οι πυκνότητες του προσομοιωτή πριν και μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων (regression) στους 50°C και σε διαφορετικές πιέσεις. Είναι εμφανής η τάνυση των τιμών των μετρηθείσας πειραματικά πυκνοτήτων με αυτές που προκύπτουν από την προσομοίωση μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων.

Στα Σχήματα Θ.29 και Θ.30 αναπαρίστανται γραφικά οι απόλυτες αποκλίσεις και οι αποκλίσεις % αντίστοιχα, των πυκνοτήτων του προσομοιωτή (πριν και μετά το regression) με τις πειραματικές πυκνότητες στους 50°C και σε διαφορετικές πιέσεις. Παρατηρείται και στα δύο σχήματα, οι αποκλίσεις των πυκνοτήτων του προσομοιωτή μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων (regression) να είναι μικρότερες από τις αποκλίσεις του προσομοιωτή πριν το regression, σε όλο το εύρος των πιέσεων στους 50°C.

### **Στους 90°C**

Ο Πίνακας Η.23 παρουσιάζει τις μετρηθείσες πυκνότητες, τις πυκνότητες του προσομοιωτή WinProp (πριν και μετά το regression), τις απόλυτες αποκλίσεις και τις αποκλίσεις % του μείγματος Μεθάνιο 41,40% - Προπάνιο 58,60% - CO<sub>2</sub> 0% σε θερμοκρασία T≈90°C και σε εύρος πιέσεων από 40,71 έως 492,56 bar.

Παρατηρείται μεγάλη απόκλιση, σε όλες τις τιμές των πιέσεων, μεταξύ των μετρηθείσας πυκνοτήτων και των πυκνοτήτων του προσομοιωτή πριν το regression. Η μεγαλύτερη απόκλιση είναι 38,87% στα 95,41 bar, ενώ η μικρότερη 17,94% στα 433,16 , 452,96 και 472,76 bar.

Μετά το regression, οι αποκλίσεις μεταξύ των μετρηθείσας πυκνοτήτων και των πυκνοτήτων του προσομοιωτή είναι εμφανώς αρκετά βελτιωμένες σε όλο το εύρος των πιέσεων. Η μεγαλύτερη απόκλιση είναι 9,59% στα 40,71 bar, ενώ η μικρότερη 0,09% στα 294,16 bar.

Στον Πίνακα Η.24 φαίνεται πως διαμορφώνονται οι τιμές των παραμέτρων του προσομοιωτή πριν και μετά το regression αντίστοιχα.

Στο Σχήμα Θ.31 αναπαρίστανται γραφικά οι πειραματικές πυκνότητες και οι πυκνότητες του προσομοιωτή πριν και μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων (regression) στους 90°C και σε διαφορετικές πιέσεις. Είναι εμφανής η τάνυση των τιμών των μετρηθείσας πειραματικά πυκνοτήτων με αυτές που προκύπτουν από την προσομοίωση μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων.

Στα Σχήματα Θ.32 και Θ.33 αναπαρίστανται γραφικά οι απόλυτες αποκλίσεις και οι αποκλίσεις % αντίστοιχα, των πυκνοτήτων του προσομοιωτή (πριν και μετά το regression) με τις πειραματικές πυκνότητες στους 90°C και σε διαφορετικές πιέσεις. Παρατηρείται και στα δύο σχήματα, οι αποκλίσεις των πυκνοτήτων του προσομοιωτή μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων (regression) να είναι μικρότερες από τις αποκλίσεις του προσομοιωτή πριν το regression, σε όλο το εύρος των πιέσεων στους 90°C.

## **7.5.2 Μεθάνιο 34,40% - Προπάνιο 47,10% - CO<sub>2</sub> 18,60%**

### **Στους 30°C**

Ο Πίνακας Η.25 παρουσιάζει τις μετρηθείσες πυκνότητες, τις πυκνότητες του προσομοιωτή WinProp (πριν και μετά το regression), τις απόλυτες αποκλίσεις και τις αποκλίσεις % του μείγματος Μεθάνιο 34,40% - Προπάνιο 47,10% - CO<sub>2</sub> 18,60% σε θερμοκρασία T≈30°C και σε εύρος πιέσεων από 26,31 έως 493,26 bar.

Παρατηρείται μεγάλη απόκλιση, σε όλες τις τιμές των πιέσεων, μεταξύ των μετρηθείσας πυκνοτήτων και των πυκνοτήτων του προσομοιωτή πριν το regression. Η μεγαλύτερη απόκλιση είναι 95,63% στα 80,26 bar, ενώ η μικρότερη 0,13% στα 41,01 bar.

Μετά το regression, οι αποκλίσεις μεταξύ των μετρηθείσας πυκνοτήτων και των πυκνοτήτων του προσομοιωτή είναι εμφανώς αρκετά βελτιωμένες σε όλο το εύρος των πιέσεων. Η μεγαλύτερη απόκλιση είναι 17,14% στα 26,31 bar, ενώ η μικρότερη 0,09% στα 45,91 bar.

Στον Πίνακα Η.26 φαίνεται πως διαμορφώνονται οι τιμές των παραμέτρων του προσομοιωτή πριν και μετά το regression αντίστοιχα.

Στο Σχήμα Θ.34 αναπαρίστανται γραφικά οι πειραματικές πυκνότητες και οι πυκνότητες του προσομοιωτή πριν και μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων (regression) στους 30°C και σε διαφορετικές πιέσεις. Είναι εμφανής η σύγκλιση των τιμών των μετρηθείσας πειραματικά πυκνοτήτων με αυτές που προκύπτουν από την προσομοίωση μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων.

Στα Σχήματα Θ.35 και Θ.36 αναπαρίστανται γραφικά οι απόλυτες αποκλίσεις και οι αποκλίσεις % αντίστοιχα, των πυκνοτήτων του προσομοιωτή (πριν και μετά το regression) με τις πειραματικές πυκνότητες στους 30°C και σε διαφορετικές πιέσεις. Παρατηρείται και στα δύο σχήματα, οι αποκλίσεις των πυκνοτήτων του προσομοιωτή μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων (regression) να είναι μικρότερες από τις αποκλίσεις του προσομοιωτή πριν το regression, στο μεγαλύτερο εύρος των πιέσεων στους 30°C. Εξαιρέσεις αποτελούν έξι περιπτώσεις που οι αποκλίσεις των πυκνοτήτων του προσομοιωτή πριν το regression είναι μικρότερες στα 26,31 , 36,46 , 41,01 , 65,46 , 70,31 και 75,31 bar.

## Στους 50°C

Ο Πίνακας Η.27 παρουσιάζει τις μετρηθείσες πυκνότητες, τις πυκνότητες του προσομοιωτή WinProp (πριν και μετά το regression), τις απόλυτες αποκλίσεις και τις αποκλίσεις % του μείγματος Μεθάνιο 34,40% - Προπάνιο 47,10% - CO<sub>2</sub> 18,60% σε θερμοκρασία T≈50°C και σε εύρος πιέσεων από 30,46 έως 492,96 bar.

Παρατηρείται μεγάλη απόκλιση, σε όλες τις τιμές των πιέσεων, μεταξύ των μετρηθείσας πυκνοτήτων και των πυκνοτήτων του προσομοιωτή πριν το regression. Η μεγαλύτερη απόκλιση είναι 52,58% στα 80,31 bar, ενώ η μικρότερη 9,96% στα 433,51 bar.

Μετά το regression, οι αποκλίσεις μεταξύ των μετρηθείσας πυκνοτήτων και των πυκνοτήτων του προσομοιωτή είναι εμφανώς αρκετά βελτιωμένες σε όλο το εύρος των πιέσεων. Η μεγαλύτερη απόκλιση είναι 4,96% στα 36,61 bar, ενώ η μικρότερη 0,10% στα 215,01 bar.

Στον Πίνακα Η.28 φαίνεται πως διαμορφώνονται οι τιμές των παραμέτρων του προσομοιωτή πριν και μετά το regression αντίστοιχα.

Στο Σχήμα Θ.37 αναπαρίστανται γραφικά οι πειραματικές πυκνότητες και οι πυκνότητες του προσομοιωτή πριν και μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων (regression) στους 50°C και σε διαφορετικές πιέσεις. Είναι εμφανής η ταύτιση των τιμών των μετρηθείσας πειραματικά πυκνοτήτων με αυτές που προκύπτουν από την προσομοίωση μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων.

Στα Σχήματα Θ.38 και Θ.39 αναπαρίστανται γραφικά οι απόλυτες αποκλίσεις και οι αποκλίσεις % αντίστοιχα, των πυκνοτήτων του προσομοιωτή (πριν και μετά το regression) με τις πειραματικές πυκνότητες στους 50°C και σε διαφορετικές πιέσεις. Παρατηρείται και στα δύο σχήματα, οι αποκλίσεις των πυκνοτήτων του προσομοιωτή μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων (regression) να είναι μικρότερες από τις αποκλίσεις του προσομοιωτή πριν το regression, σε όλο το εύρος των πιέσεων στους 50°C.

## Στους 90°C

Ο Πίνακας H.29 παρουσιάζει τις μετρηθείσες πυκνότητες, τις πυκνότητες του προσομοιωτή WinProp (πριν και μετά το regression), τις απόλυτες αποκλίσεις και τις αποκλίσεις % του μείγματος Μεθάνιο 34,40% - Προπάνιο 47,10% - CO<sub>2</sub> 18,60% σε θερμοκρασία T≈90°C και σε εύρος πιέσεων από 41,46 έως 492,26 bar.

Παρατηρείται μεγάλη απόκλιση, σε όλες τις τιμές των πιέσεων, μεταξύ των μετρηθείσας πυκνοτήτων και των πυκνοτήτων του προσομοιωτή πριν το regression. Η μεγαλύτερη απόκλιση είναι 24,23% στα 105,16 bar, ενώ η μικρότερη 9,72% στα 353,51 bar.

Μετά το regression, οι αποκλίσεις μεταξύ των μετρηθείσας πυκνοτήτων και των πυκνοτήτων του προσομοιωτή είναι εμφανώς αρκετά βελτιωμένες σε όλο το εύρος των πιέσεων. Η μεγαλύτερη απόκλιση είναι 5,72% στα 41,46 bar, ενώ η μικρότερη 0,01% στα 333,61 bar.

Στον Πίνακα H.30 φαίνεται πως διαμορφώνονται οι τιμές των παραμέτρων του προσομοιωτή πριν και μετά το regression αντίστοιχα.

Στο Σχήμα Θ.40 αναπαρίστανται γραφικά οι πειραματικές πυκνότητες και οι πυκνότητες του προσομοιωτή πριν και μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων (regression) στους 90°C και σε διαφορετικές πιέσεις. Είναι εμφανής η ταύτιση των τιμών των μετρηθείσας πειραματικά πυκνοτήτων με αυτές που προκύπτουν από την προσομοίωση μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων.

Στα Σχήματα Θ.41 και Θ.42 αναπαρίστανται γραφικά οι απόλυτες αποκλίσεις και οι αποκλίσεις % αντίστοιχα, των πυκνοτήτων του προσομοιωτή (πριν και μετά το regression) με τις πειραματικές πυκνότητες στους 90°C και σε διαφορετικές πιέσεις. Παρατηρείται και στα δύο σχήματα, οι αποκλίσεις των πυκνοτήτων του προσομοιωτή μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων (regression) να είναι μικρότερες από τις αποκλίσεις του προσομοιωτή πριν το regression, σε όλο το εύρος των πιέσεων στους 90°C.

### **7.5.3 Μεθάνιο 12,50% - Προπάνιο 18,30% - CO<sub>2</sub> 69,20%**

#### **Στους 29°C**

Ο Πίνακας H.31 παρουσιάζει τις μετρηθείσες πυκνότητες, τις πυκνότητες του προσομοιωτή WinProp (πριν και μετά το regression), τις απόλυτες αποκλίσεις και τις αποκλίσεις % του μείγματος Μεθάνιο 12,50% - Προπάνιο 18,30% - CO<sub>2</sub> 69,20% σε θερμοκρασία T≈29°C και σε εύρος πιέσεων από 14,91 έως 254,11 bar.

Παρατηρείται μεγάλη απόκλιση, σε όλες τις τιμές των πιέσεων, μεταξύ των μετρηθείσας πυκνοτήτων και των πυκνοτήτων του προσομοιωτή πριν το regression. Η μεγαλύτερη απόκλιση είναι 74,80% στα 75,21 bar, ενώ η μικρότερη 15,37% στα 14,91 bar.

Μετά το regression, οι αποκλίσεις μεταξύ των μετρηθείσας πυκνοτήτων και των πυκνοτήτων του προσομοιωτή είναι εμφανώς αρκετά βελτιωμένες σε όλο το εύρος των πιέσεων. Η μεγαλύτερη απόκλιση είναι 13,36% στα 20,21 bar, ενώ η μικρότερη 0,56% στα 145,26 bar.

Στον Πίνακα H.32 φαίνεται πως διαμορφώνονται οι τιμές των παραμέτρων του προσομοιωτή πριν και μετά το regression αντίστοιχα.

Στο Σχήμα Θ.43 αναπαρίστανται γραφικά οι πειραματικές πυκνότητες και οι πυκνότητες του προσομοιωτή πριν και μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων (regression) στους 29°C και σε διαφορετικές πιέσεις. Είναι εμφανής η σύγκλιση των τιμών των μετρηθείσας πειραματικά πυκνοτήτων με αυτές που προκύπτουν από την προσομοίωση μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων.

Στα Σχήματα Θ.44 και Θ.45 αναπαρίστανται γραφικά οι απόλυτες αποκλίσεις και οι αποκλίσεις % αντίστοιχα, των πυκνοτήτων του προσομοιωτή (πριν και μετά το regression) με τις πειραματικές πυκνότητες στους 29°C και σε διαφορετικές πιέσεις. Παρατηρείται και στα δύο σχήματα, οι αποκλίσεις των πυκνοτήτων του προσομοιωτή μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων (regression) να είναι μικρότερες από τις αποκλίσεις του προσομοιωτή πριν το regression, σε όλο το εύρος των πιέσεων στους 29°C.

## Στους 50°C

Ο Πίνακας H.33 παρουσιάζει τις μετρηθείσες πυκνότητες, τις πυκνότητες του προσομοιωτή WinProp (πριν και μετά το regression), τις απόλυτες αποκλίσεις και τις αποκλίσεις % του μείγματος Μεθάνιο 12,50% - Προπάνιο 18,30% - CO<sub>2</sub> 69,20% σε θερμοκρασία  $T \approx 50^\circ\text{C}$  και σε εύρος πιέσεων από 15,01 έως 234,71 bar.

Παρατηρείται μεγάλη απόκλιση, σε όλες τις τιμές των πιέσεων, μεταξύ των μετρηθείσας πυκνοτήτων και των πυκνοτήτων του προσομοιωτή πριν το regression. Η μεγαλύτερη απόκλιση είναι 33,31% στα 115,01 bar, ενώ η μικρότερη 16,15% στα 15,01 bar.

Μετά το regression, οι αποκλίσεις μεταξύ των μετρηθείσας πυκνοτήτων και των πυκνοτήτων του προσομοιωτή είναι εμφανώς αρκετά βελτιωμένες σε όλο το εύρος των πιέσεων. Η μεγαλύτερη απόκλιση είναι 13,33% στα 15,01 bar, ενώ η μικρότερη 0,32% στα 75,36 bar.

Στον Πίνακα H.34 φαίνεται πως διαμορφώνονται οι τιμές των παραμέτρων του προσομοιωτή πριν και μετά το regression αντίστοιχα.

Στο Σχήμα Θ.46 αναπαρίστανται γραφικά οι πειραματικές πυκνότητες και οι πυκνότητες του προσομοιωτή πριν και μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων (regression) στους 50°C και σε διαφορετικές πιέσεις. Είναι εμφανής η σύγκλιση των τιμών των μετρηθείσας πειραματικά πυκνοτήτων με αυτές που προκύπτουν από την προσομοίωση μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων.

Στα Σχήματα Θ.47 και Θ.48 αναπαρίστανται γραφικά οι απόλυτες αποκλίσεις και οι αποκλίσεις % αντίστοιχα, των πυκνοτήτων του προσομοιωτή (πριν και μετά το regression) με τις πειραματικές πυκνότητες στους 50°C και σε διαφορετικές πιέσεις. Παρατηρείται και στα δύο σχήματα, οι αποκλίσεις των πυκνοτήτων του προσομοιωτή μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων (regression) να είναι μικρότερες από τις αποκλίσεις του προσομοιωτή πριν το regression, σε όλο το εύρος των πιέσεων στους 50°C.

## Στους 90°C

Ο Πίνακας H.35 παρουσιάζει τις μετρηθείσες πυκνότητες, τις πυκνότητες του προσομοιωτή WinProp (πριν και μετά το regression), τις απόλυτες αποκλίσεις και τις αποκλίσεις % του μείγματος Μεθάνιο 12,50% - Προπάνιο 18,30% - CO<sub>2</sub> 69,20% σε θερμοκρασία  $T \approx 90^\circ\text{C}$  και σε εύρος πιέσεων από 16,76 έως 413,16 bar.

Παρατηρείται μεγάλη απόκλιση, σε όλες τις τιμές των πιέσεων, μεταξύ των μετρηθείσας πυκνοτήτων και των πυκνοτήτων του προσομοιωτή πριν το regression. Η μεγαλύτερη απόκλιση είναι 30,46% στα 413,16 bar, ενώ η μικρότερη 18,74% στα 30,36 bar.

Μετά το regression, οι αποκλίσεις μεταξύ των μετρηθείσας πυκνοτήτων και των πυκνοτήτων του προσομοιωτή είναι εμφανώς αρκετά βελτιωμένες σε όλο το εύρος των πιέσεων. Η μεγαλύτερη απόκλιση είναι 15,87% στα 16,76 bar, ενώ η μικρότερη 0,16% στα 273,96 bar.

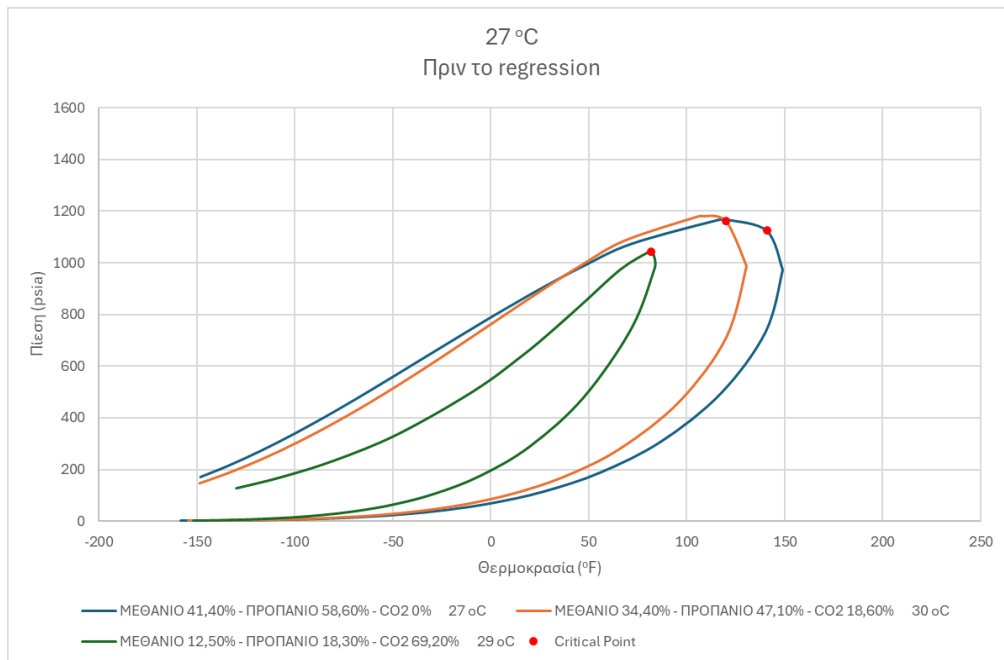
Στον Πίνακα H.36 φαίνεται πως διαμορφώνονται οι τιμές των παραμέτρων του προσομοιωτή πριν και μετά το regression αντίστοιχα.

Στο Σχήμα Θ.49 αναπαρίστανται γραφικά οι πειραματικές πυκνότητες και οι πυκνότητες του προσομοιωτή πριν και μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων (regression) στους 90°C και σε διαφορετικές πιέσεις. Είναι εμφανής η σύγκλιση των τιμών των μετρηθείσας πειραματικά πυκνοτήτων με αυτές που προκύπτουν από την προσομοίωση μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων.

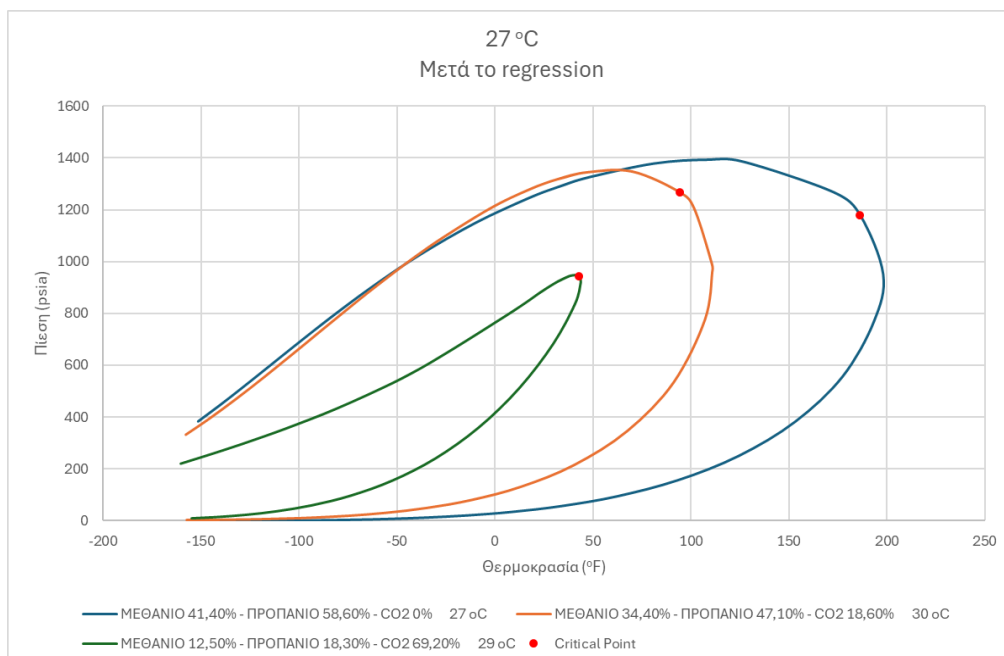
Στα Σχήματα Θ.50 και Θ.51 αναπαρίστανται γραφικά οι απόλυτες αποκλίσεις και οι αποκλίσεις % αντίστοιχα, των πυκνοτήτων του προσομοιωτή (πριν και μετά το regression) με τις πειραματικές πυκνότητες στους 90°C και σε διαφορετικές πιέσεις. Παρατηρείται και στα δύο σχήματα, οι αποκλίσεις των πυκνοτήτων του προσομοιωτή μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων (regression) να

είναι μικρότερες από τις αποκλίσεις του προσομοιωτή πριν το regression, σε όλο το εύρος των πιέσεων στους 90°C.

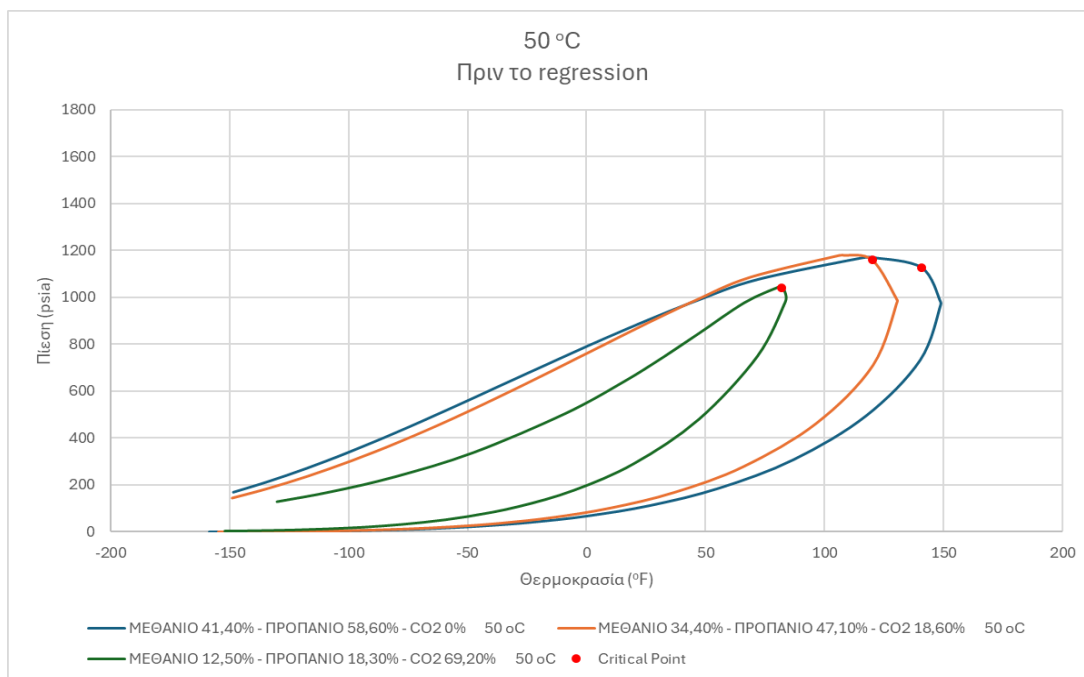
## 7.5.4 Φάκελοι φάσεων



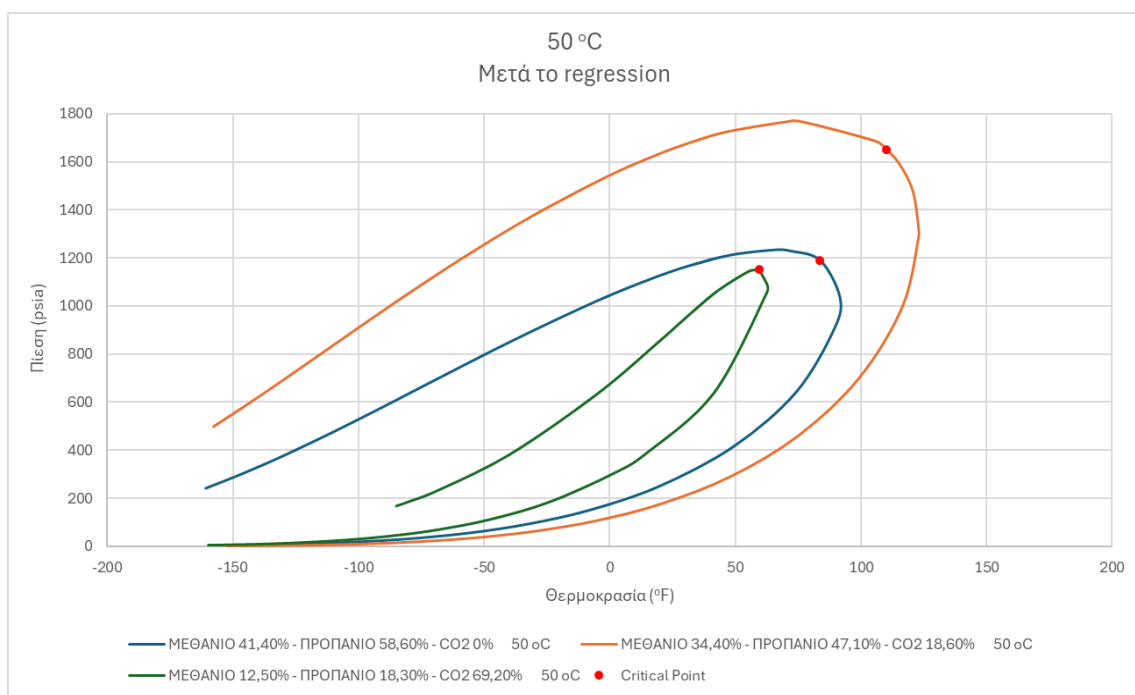
**Σχήμα 7.16:** Διάγραμμα φακέλων φάσεων μειγμάτων μεθανίου-προπανίου-CO<sub>2</sub> σε τρεις διαφορετικές συστάσεις πριν το regression στους 27°C



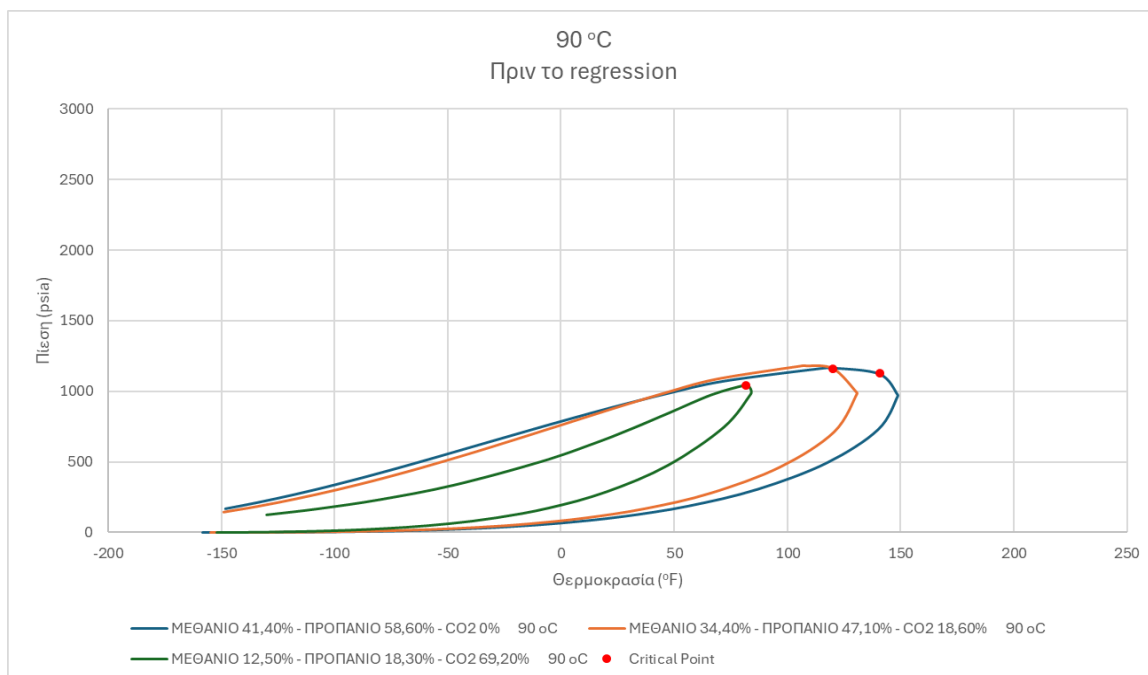
**Σχήμα 7.17:** Διάγραμμα φακέλων φάσεων μειγμάτων μεθανίου-προπανίου-CO<sub>2</sub> σε τρεις διαφορετικές συστάσεις μετά το regression στους 27°C



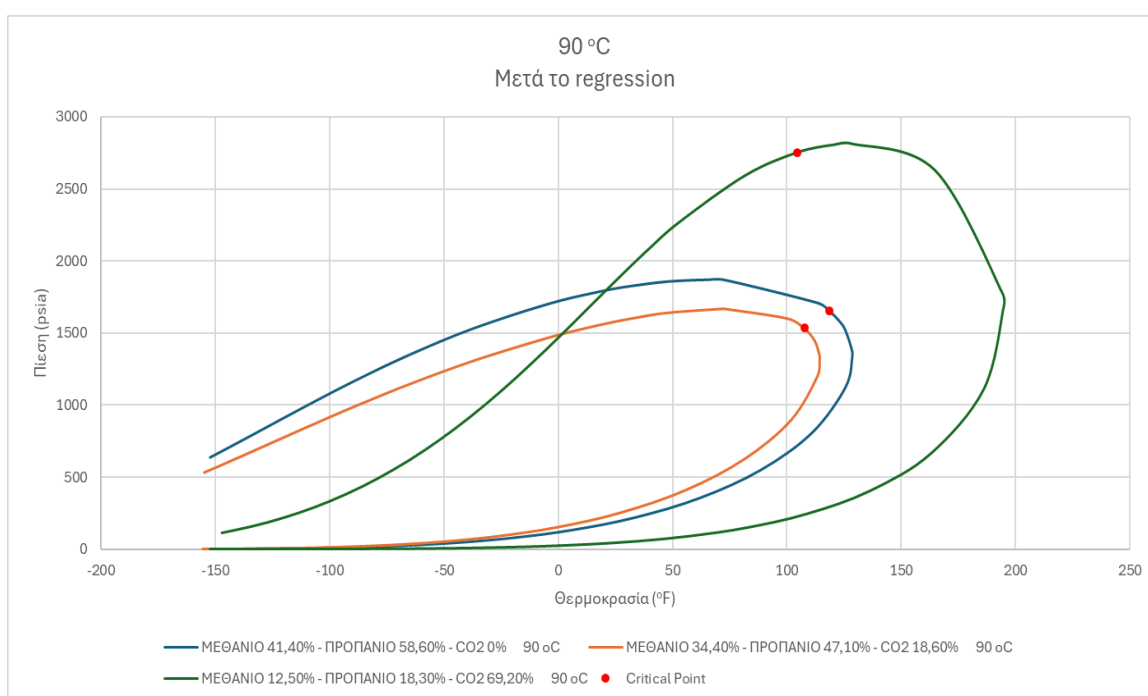
**Σχήμα 7.18:** Διάγραμμα φακέλων φάσεων μειγμάτων μεθανίου-προπανίου-CO<sub>2</sub> σε τρεις διαφορετικές συστάσεις πριν το regression στους 50°C



**Σχήμα 7.19:** Διάγραμμα φακέλων φάσεων μειγμάτων μεθανίου-προπανίου-CO<sub>2</sub> σε τρεις διαφορετικές συστάσεις μετά το regression στους 50°C



**Σχήμα 7.20:** Διάγραμμα φακέλων φάσεων μειγμάτων μεθανίου-προπανίου-CO<sub>2</sub> σε τρεις διαφορετικές συστάσεις πριν το regression στους 90°C



**Σχήμα 7.21:** Διάγραμμα φακέλων φάσεων μειγμάτων μεθανίου-προπανίου-CO<sub>2</sub> σε τρεις διαφορετικές συστάσεις μετά το regression στους 90°C

## 7.6 Μεθάνιο-Βουτάνιο-CO<sub>2</sub>

Το μείγμα μελετήθηκε σε 3 διαφορετικές περιεκτικότητες CO<sub>2</sub> (0% , 37,60% , 65%) και σε 3 διαφορετικές θερμοκρασίες (29°C , 50°C , 90°C).

### 7.6.1 Μεθάνιο 58,17% - Βουτάνιο 41,83% - CO<sub>2</sub> 0%

#### Στους 29°C

Ο Πίνακας H.37 παρουσιάζει τις μετρηθείσες πυκνότητες, τις πυκνότητες του προσομοιωτή WinProp (πριν και μετά το regression), τις απόλυτες αποκλίσεις και τις αποκλίσεις % του μείγματος Μεθάνιο 58,17% - Βουτάνιο 41,83% - CO<sub>2</sub> 0% σε θερμοκρασία  $T \approx 29^\circ\text{C}$  και σε εύρος πιέσεων από 7,06 έως 116,11 bar.

Παρατηρείται μεγάλη απόκλιση, σε όλες τις τιμές των πιέσεων, μεταξύ των μετρηθείσας πυκνοτήτων και των πυκνοτήτων του προσομοιωτή πριν το regression. Η μεγαλύτερη απόκλιση είναι 98,13% στα 7,06 bar, ενώ η μικρότερη 1,65% στα 86,26 bar.

Μετά το regression, οι αποκλίσεις μεταξύ των μετρηθείσας πυκνοτήτων και των πυκνοτήτων του προσομοιωτή δεν έχουν βελτίωση στο μεγαλύτερο εύρος των πιέσεων. Η μεγαλύτερη απόκλιση είναι 35,31% στα 7,06 bar, ενώ η μικρότερη 1,17% στα 81,21 bar.

Στον Πίνακα H.38 φαίνεται πως διαμορφώνονται οι τιμές των παραμέτρων του προσομοιωτή πριν και μετά το regression αντίστοιχα.

Στο Σχήμα Θ.52 αναπαρίστανται γραφικά οι πειραματικές πυκνότητες και οι πυκνότητες του προσομοιωτή πριν και μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων (regression) στους 29°C και σε διαφορετικές πιέσεις. Σε αντίθεση με όλες τις παραπάνω περιπτώσεις, παρατηρείται μεγαλύτερη σύγκλιση των τιμών των μετρηθείσας πειραματικά πυκνοτήτων με αυτές που προκύπτουν από την προσομοίωση πριν τη ρύθμιση των παραμέτρων στο μεγαλύτερο εύρος των πιέσεων, και όχι μετά την ρύθμιση των παραμέτρων.

Στα Σχήματα Θ.53 και Θ.54 αναπαρίστανται γραφικά οι απόλυτες αποκλίσεις και οι αποκλίσεις % αντίστοιχα, των πυκνοτήτων του προσομοιωτή (πριν και μετά το regression) με τις πειραματικές πυκνότητες στους 29°C και σε διαφορετικές πιέσεις. Παρατηρείται και στα δύο σχήματα, οι αποκλίσεις των πυκνοτήτων του προσομοιωτή πριν τη ρύθμιση των παραμέτρων (regression) να είναι μικρότερες από τις αποκλίσεις του προσομοιωτή μετά το regression, στο μεγαλύτερο εύρος των πιέσεων στους 29°C. Εξαιρέσεις αποτελούν οχτώ περιπτώσεις που οι αποκλίσεις των πυκνοτήτων του προσομοιωτή μετά το regression είναι μικρότερες στα 7,06 , 10,96 και στο εύρος 56,61 έως 81,21 bar.

#### Στους 50°C

Ο Πίνακας H.39 παρουσιάζει τις μετρηθείσες πυκνότητες, τις πυκνότητες του προσομοιωτή WinProp (πριν και μετά το regression), τις απόλυτες αποκλίσεις και τις αποκλίσεις % του μείγματος Μεθάνιο 58,17% - Βουτάνιο 41,83% - CO<sub>2</sub> 0% σε θερμοκρασία  $T \approx 50^\circ\text{C}$  και σε εύρος πιέσεων από 10,26 έως 119,46 bar.

Παρατηρείται μεγάλη απόκλιση, σε χαμηλές και υψηλές τιμές των πιέσεων και μικρή απόκλιση στις μεσαίες τιμές των πιέσεων, μεταξύ των μετρηθείσας πυκνοτήτων και των πυκνοτήτων του προσομοιωτή πριν το regression. Η μεγαλύτερη απόκλιση είναι 47,64% στα 10,26 bar, ενώ η μικρότερη 0,10% στα 80,76 bar.

Μετά το regression, οι αποκλίσεις μεταξύ των μετρηθείσας πυκνοτήτων και των πυκνοτήτων του προσομοιωτή είναι βελτιωμένες στις χαμηλές και υψηλές τιμές των πιέσεων ενώ στις μεσαίες τιμές

των πιέσεων υπάρχει αύξηση των αποκλίσεων. Η μεγαλύτερη απόκλιση είναι 22,01% στα 10,26 bar, ενώ η μικρότερη 0,41% στα 90,66 bar.

Στον Πίνακα Η.40 φαίνεται πως διαμορφώνονται οι τιμές των παραμέτρων του προσομοιωτή πριν και μετά το regression αντίστοιχα.

Στο Σχήμα Θ.55 αναπαρίστανται γραφικά οι πειραματικές πυκνότητες και οι πυκνότητες του προσομοιωτή πριν και μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων (regression) στους 50°C και σε διαφορετικές πιέσεις. Παρατηρείται παρόμοια σύγκλιση των τιμών των μετρηθείσας πειραματικά πυκνοτήτων με αυτές που προκύπτουν από την προσομοίωση πριν τη ρύθμιση των παραμέτρων στο μεγαλύτερο εύρος των πιέσεων και μετά την ρύθμιση των παραμέτρων.

Στα Σχήματα Θ.56 και Θ.57 αναπαρίστανται γραφικά οι απόλυτες αποκλίσεις και οι αποκλίσεις % αντίστοιχα, των πυκνοτήτων του προσομοιωτή (πριν και μετά το regression) με τις πειραματικές πυκνότητες στους 50°C και σε διαφορετικές πιέσεις. Παρατηρείται και στα δύο σχήματα, οι αποκλίσεις των πυκνοτήτων του προσομοιωτή πριν τη ρύθμιση των παραμέτρων (regression) να είναι μικρότερες από τις αποκλίσεις του προσομοιωτή μετά το regression, στις μεσαίες τιμές πιέσεων στους 50°C, ενώ στις χαμηλές και υψηλές πιέσεις οι αποκλίσεις του προσομοιωτή είναι μικρότερες μετά το regression.

## Στους 90°C

Ο Πίνακας Η.41 παρουσιάζει τις μετρηθείσες πυκνότητες, τις πυκνότητες του προσομοιωτή WinProp (πριν και μετά το regression), τις απόλυτες αποκλίσεις και τις αποκλίσεις % του μείγματος Μεθάνιο 58,17% - Βουτάνιο 41,83% - CO<sub>2</sub> 0% σε θερμοκρασία T≈90°C και σε εύρος πιέσεων από 7,31 έως 134,11 bar.

Παρατηρείται μεγάλη απόκλιση, σε όλες τις τιμές των πιέσεων, μεταξύ των μετρηθείσας πυκνοτήτων και των πυκνοτήτων του προσομοιωτή πριν το regression. Η μεγαλύτερη απόκλιση είναι 115,15% στα 114,66 bar, ενώ η μικρότερη 35,29% στα 7,31 bar.

Μετά το regression, οι αποκλίσεις μεταξύ των μετρηθείσας πυκνοτήτων και των πυκνοτήτων του προσομοιωτή είναι εμφανώς αρκετά βελτιωμένες σε όλο το εύρος των πιέσεων. Η μεγαλύτερη απόκλιση είναι 29,77% στα 7,31 bar, ενώ η μικρότερη 0,95% στα 114,66 bar.

Στον Πίνακα Η.42 φαίνεται πως διαμορφώνονται οι τιμές των παραμέτρων του προσομοιωτή πριν και μετά το regression αντίστοιχα.

Στο Σχήμα Θ.58 αναπαρίστανται γραφικά οι πειραματικές πυκνότητες και οι πυκνότητες του προσομοιωτή πριν και μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων (regression) στους 90°C και σε διαφορετικές πιέσεις. Είναι εμφανής η σύγκλιση των τιμών των μετρηθείσας πειραματικά πυκνοτήτων με αυτές που προκύπτουν από την προσομοίωση μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων.

Στα Σχήματα Θ.59 και Θ.60 αναπαρίστανται γραφικά οι απόλυτες αποκλίσεις και οι αποκλίσεις % αντίστοιχα, των πυκνοτήτων του προσομοιωτή (πριν και μετά το regression) με τις πειραματικές πυκνότητες στους 90°C και σε διαφορετικές πιέσεις. Παρατηρείται και στα δύο σχήματα, οι αποκλίσεις των πυκνοτήτων του προσομοιωτή μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων (regression) να είναι μικρότερες από τις αποκλίσεις του προσομοιωτή πριν το regression, σε όλο το εύρος των πιέσεων στους 90°C.

## 7.6.2 Μεθάνιο 36,30% - Βουτάνιο 26,10% - CO<sub>2</sub> 37,60%

### Στους 32°C

Ο Πίνακας Η.43 παρουσιάζει τις μετρηθείσες πυκνότητες, τις πυκνότητες του προσομοιωτή WinProp (πριν και μετά το regression), τις απόλυτες αποκλίσεις και τις αποκλίσεις % του μείγματος

Μεθάνιο 36,30% - Βουτάνιο 26,10% - CO<sub>2</sub> 37,60% σε θερμοκρασία  $T \approx 32^{\circ}\text{C}$  και σε εύρος πιέσεων από 9,66 έως 128,06 bar.

Παρατηρείται μεγάλη απόκλιση, σε όλες τις τιμές των πιέσεων, μεταξύ των μετρηθείσας πυκνοτήτων και των πυκνοτήτων του προσομοιωτή πριν το regression. Η μεγαλύτερη απόκλιση είναι 101,86% στα 105,36 bar, ενώ η μικρότερη 1,16% στα 14,56 bar.

Μετά το regression, οι αποκλίσεις μεταξύ των μετρηθείσας πυκνοτήτων και των πυκνοτήτων του προσομοιωτή είναι εμφανώς αρκετά βελτιωμένες σε όλο το εύρος των πιέσεων. Η μεγαλύτερη απόκλιση είναι 15,83% στα 9,66 bar, ενώ η μικρότερη 0,02% στα 49,81 bar.

Στον Πίνακα Η.44 φαίνεται πως διαμορφώνονται οι τιμές των παραμέτρων του προσομοιωτή πριν και μετά το regression αντίστοιχα.

Στο Σχήμα Θ.61 αναπαρίστανται γραφικά οι πειραματικές πυκνότητες και οι πυκνότητες του προσομοιωτή πριν και μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων (regression) στους  $32^{\circ}\text{C}$  και σε διαφορετικές πιέσεις. Είναι εμφανής η σύγκλιση των τιμών των μετρηθείσας πειραματικά πυκνοτήτων με αυτές που προκύπτουν από την προσομοίωση μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων.

Στα Σχήματα Θ.62 και Θ.63 αναπαρίστανται γραφικά οι απόλυτες αποκλίσεις και οι αποκλίσεις % αντίστοιχα, των πυκνοτήτων του προσομοιωτή (πριν και μετά το regression) με τις πειραματικές πυκνότητες στους  $32^{\circ}\text{C}$  και σε διαφορετικές πιέσεις. Παρατηρείται και στα δύο σχήματα, οι αποκλίσεις των πυκνοτήτων του προσομοιωτή μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων (regression) να είναι μικρότερες από τις αποκλίσεις του προσομοιωτή πριν το regression, σε όλο το εύρος των πιέσεων στους  $32^{\circ}\text{C}$ . Εξαιρέσεις αποτελούν δύο περιπτώσεις που οι αποκλίσεις των πυκνοτήτων του προσομοιωτή πριν το regression είναι μικρότερες στα 9,66 και 14,56 bar.

## Στους $50^{\circ}\text{C}$

Ο Πίνακας Η.45 παρουσιάζει τις μετρηθείσες πυκνότητες, τις πυκνότητες του προσομοιωτή WinProp (πριν και μετά το regression), τις απόλυτες αποκλίσεις και τις αποκλίσεις % του μείγματος Μεθάνιο 36,30% - Βουτάνιο 26,10% - CO<sub>2</sub> 37,60% σε θερμοκρασία  $T \approx 50^{\circ}\text{C}$  και σε εύρος πιέσεων από 9,61 έως 150,36 bar.

Παρατηρείται μεγάλη απόκλιση, σε όλες τις τιμές των πιέσεων, μεταξύ των μετρηθείσας πυκνοτήτων και των πυκνοτήτων του προσομοιωτή πριν το regression. Η μεγαλύτερη απόκλιση είναι 82,58% στα 114,31 bar, ενώ η μικρότερη 10,58% στα 9,61 bar.

Μετά το regression, οι αποκλίσεις μεταξύ των μετρηθείσας πυκνοτήτων και των πυκνοτήτων του προσομοιωτή είναι εμφανώς αρκετά βελτιωμένες σε όλο το εύρος των πιέσεων. Η μεγαλύτερη απόκλιση είναι 3,70% στα 19,41 bar, ενώ η μικρότερη 0,16% στα 69,46 bar.

Στον Πίνακα Η.46 φαίνεται πως διαμορφώνονται οι τιμές των παραμέτρων του προσομοιωτή πριν και μετά το regression αντίστοιχα.

Στο Σχήμα Θ.64 αναπαρίστανται γραφικά οι πειραματικές πυκνότητες και οι πυκνότητες του προσομοιωτή πριν και μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων (regression) στους  $50^{\circ}\text{C}$  και σε διαφορετικές πιέσεις. Είναι εμφανής η ταύτιση των τιμών των μετρηθείσας πειραματικά πυκνοτήτων με αυτές που προκύπτουν από την προσομοίωση μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων.

Στα Σχήματα Θ.65 και Θ.66 αναπαρίστανται γραφικά οι απόλυτες αποκλίσεις και οι αποκλίσεις % αντίστοιχα, των πυκνοτήτων του προσομοιωτή (πριν και μετά το regression) με τις πειραματικές πυκνότητες στους  $50^{\circ}\text{C}$  και σε διαφορετικές πιέσεις. Παρατηρείται και στα δύο σχήματα, οι αποκλίσεις των πυκνοτήτων του προσομοιωτή μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων (regression) να είναι μικρότερες από τις αποκλίσεις του προσομοιωτή πριν το regression, σε όλο το εύρος των πιέσεων στους  $50^{\circ}\text{C}$ .

## Στους 90°C

Ο Πίνακας H.47 παρουσιάζει τις μετρηθείσες πυκνότητες, τις πυκνότητες του προσομοιωτή WinProp (πριν και μετά το regression), τις απόλυτες αποκλίσεις και τις αποκλίσεις % του μείγματος Μεθάνιο 36,30% - Βουτάνιο 26,10% - CO<sub>2</sub> 37,60% σε θερμοκρασία  $T \approx 90^\circ\text{C}$  και σε εύρος πιέσεων από 13,71 έως 183,21 bar.

Παρατηρείται μεγάλη απόκλιση, σε όλες τις τιμές των πιέσεων, μεταξύ των μετρηθείσας πυκνοτήτων και των πυκνοτήτων του προσομοιωτή πριν το regression. Η μεγαλύτερη απόκλιση είναι 53,91% στα 114,21 bar, ενώ η μικρότερη 20,77% στα 13,71 bar.

Μετά το regression, οι αποκλίσεις μεταξύ των μετρηθείσας πυκνοτήτων και των πυκνοτήτων του προσομοιωτή είναι εμφανώς αρκετά βελτιωμένες σε όλο το εύρος των πιέσεων. Η μεγαλύτερη απόκλιση είναι 16,52% στα 24,11 bar, ενώ η μικρότερη 0,72% στα 93,41 bar.

Στον Πίνακα H.48 φαίνεται πως διαμορφώνονται οι τιμές των παραμέτρων του προσομοιωτή πριν και μετά το regression αντίστοιχα.

Στο Σχήμα Θ.67 αναπαρίστανται γραφικά οι πειραματικές πυκνότητες και οι πυκνότητες του προσομοιωτή πριν και μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων (regression) στους 90°C και σε διαφορετικές πιέσεις. Είναι εμφανής η σύγκλιση των τιμών των μετρηθείσας πειραματικά πυκνοτήτων με αυτές που προκύπτουν από την προσομοίωση μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων.

Στα Σχήματα Θ.68 και Θ.69 αναπαρίστανται γραφικά οι απόλυτες αποκλίσεις και οι αποκλίσεις % αντίστοιχα, των πυκνοτήτων του προσομοιωτή (πριν και μετά το regression) με τις πειραματικές πυκνότητες στους 90°C και σε διαφορετικές πιέσεις. Παρατηρείται και στα δύο σχήματα, οι αποκλίσεις των πυκνοτήτων του προσομοιωτή μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων (regression) να είναι μικρότερες από τις αποκλίσεις του προσομοιωτή πριν το regression, σε όλο το εύρος των πιέσεων στους 90°C.

## 7.6.3 Μεθάνιο 25,60% - Βουτάνιο 9,30% - CO<sub>2</sub> 65%

### Στους 30°C

Ο Πίνακας H.49 παρουσιάζει τις μετρηθείσες πυκνότητες, τις πυκνότητες του προσομοιωτή WinProp (πριν και μετά το regression), τις απόλυτες αποκλίσεις και τις αποκλίσεις % του μείγματος Μεθάνιο 25,60% - Βουτάνιο 9,30% - CO<sub>2</sub> 65% σε θερμοκρασία  $T \approx 30^\circ\text{C}$  και σε εύρος πιέσεων από 19,31 έως 164,16 bar.

Παρατηρείται μεγάλη απόκλιση, σε όλες τις τιμές των πιέσεων, μεταξύ των μετρηθείσας πυκνοτήτων και των πυκνοτήτων του προσομοιωτή πριν το regression. Η μεγαλύτερη απόκλιση είναι 25,78% στα 88,66 bar, ενώ η μικρότερη 3,68% στα 19,31 bar.

Μετά το regression, οι αποκλίσεις μεταξύ των μετρηθείσας πυκνοτήτων και των πυκνοτήτων του προσομοιωτή είναι εμφανώς αρκετά βελτιωμένες σε όλο το εύρος των πιέσεων. Η μεγαλύτερη απόκλιση είναι 1,95% στα 29,86 bar, ενώ η μικρότερη 0,05% στα 69,01 bar.

Στον Πίνακα H.50 φαίνεται πως διαμορφώνονται οι τιμές των παραμέτρων του προσομοιωτή πριν και μετά το regression αντίστοιχα.

Στο Σχήμα Θ.70 αναπαρίστανται γραφικά οι πειραματικές πυκνότητες και οι πυκνότητες του προσομοιωτή πριν και μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων (regression) στους 30°C και σε διαφορετικές πιέσεις. Είναι εμφανής η ταύτιση των τιμών των μετρηθείσας πειραματικά πυκνοτήτων με αυτές που προκύπτουν από την προσομοίωση μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων.

Στα Σχήματα Θ.71 και Θ.72 αναπαρίστανται γραφικά οι απόλυτες αποκλίσεις και οι αποκλίσεις % αντίστοιχα, των πυκνοτήτων του προσομοιωτή (πριν και μετά το regression) με τις πειραματικές πυκνότητες στους 30°C και σε διαφορετικές πιέσεις. Παρατηρείται και στα δύο σχήματα, οι αποκλίσεις των πυκνοτήτων του προσομοιωτή μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων (regression) να

είναι μικρότερες από τις αποκλίσεις του προσομοιωτή πριν το regression, σε όλο το εύρος των πιέσεων στους 30°C.

### Στους 50°C

Ο Πίνακας H.51 παρουσιάζει τις μετρηθείσες πυκνότητες, τις πυκνότητες του προσομοιωτή WinProp (πριν και μετά το regression), τις απόλυτες αποκλίσεις και τις αποκλίσεις % του μείγματος Μεθάνιο 25,60% - Βουτάνιο 9,30% - CO<sub>2</sub> 65% σε θερμοκρασία T≈50°C και σε εύρος πιέσεων από 24,51 έως 213,81 bar.

Παρατηρείται μεγάλη απόκλιση, σε όλες τις τιμές των πιέσεων, μεταξύ των μετρηθείσας πυκνοτήτων και των πυκνοτήτων του προσομοιωτή πριν το regression. Η μεγαλύτερη απόκλιση είναι 14,40% στα 104,61 bar, ενώ η μικρότερη 4,51% στα 213,81 bar.

Μετά το regression, οι αποκλίσεις μεταξύ των μετρηθείσας πυκνοτήτων και των πυκνοτήτων του προσομοιωτή είναι εμφανώς αρκετά βελτιωμένες σε όλο το εύρος των πιέσεων. Η μεγαλύτερη απόκλιση είναι 2,36% στα 24,51 bar, ενώ η μικρότερη 0,01% στα 79,11 και 153,81 bar.

Στον Πίνακα H.52 φαίνεται πως διαμορφώνονται οι τιμές των παραμέτρων του προσομοιωτή πριν και μετά το regression αντίστοιχα.

Στο Σχήμα Θ.73 αναπαρίστανται γραφικά οι πειραματικές πυκνότητες και οι πυκνότητες του προσομοιωτή πριν και μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων (regression) στους 50°C και σε διαφορετικές πιέσεις. Είναι εμφανής η ταύτιση των τιμών των μετρηθείσας πειραματικά πυκνοτήτων με αυτές που προκύπτουν από την προσομοίωση μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων.

Στα Σχήματα Θ.74 και Θ.75 αναπαρίστανται γραφικά οι απόλυτες αποκλίσεις και οι αποκλίσεις % αντίστοιχα, των πυκνοτήτων του προσομοιωτή (πριν και μετά το regression) με τις πειραματικές πυκνότητες στους 50°C και σε διαφορετικές πιέσεις. Παρατηρείται και στα δύο σχήματα, οι αποκλίσεις των πυκνοτήτων του προσομοιωτή μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων (regression) να είναι μικρότερες από τις αποκλίσεις του προσομοιωτή πριν το regression, σε όλο το εύρος των πιέσεων στους 50°C.

### Στους 90°C

Ο Πίνακας H.53 παρουσιάζει τις μετρηθείσες πυκνότητες, τις πυκνότητες του προσομοιωτή WinProp (πριν και μετά το regression), τις απόλυτες αποκλίσεις και τις αποκλίσεις % του μείγματος Μεθάνιο 25,60% - Βουτάνιο 9,30% - CO<sub>2</sub> 65% σε θερμοκρασία T≈90°C και σε εύρος πιέσεων από 27,91 έως 252,41 bar.

Παρατηρείται μεγάλη απόκλιση, σε όλες τις τιμές των πιέσεων, μεταξύ των μετρηθείσας πυκνοτήτων και των πυκνοτήτων του προσομοιωτή πριν το regression. Η μεγαλύτερη απόκλιση είναι 9,02% στα 104,56 bar, ενώ η μικρότερη 3,91% στα 252,41 bar.

Μετά το regression, οι αποκλίσεις μεταξύ των μετρηθείσας πυκνοτήτων και των πυκνοτήτων του προσομοιωτή είναι εμφανώς αρκετά βελτιωμένες σε όλο το εύρος των πιέσεων. Η μεγαλύτερη απόκλιση είναι 4,19% στα 27,91 bar, ενώ η μικρότερη 0,15% στα 93,61 bar.

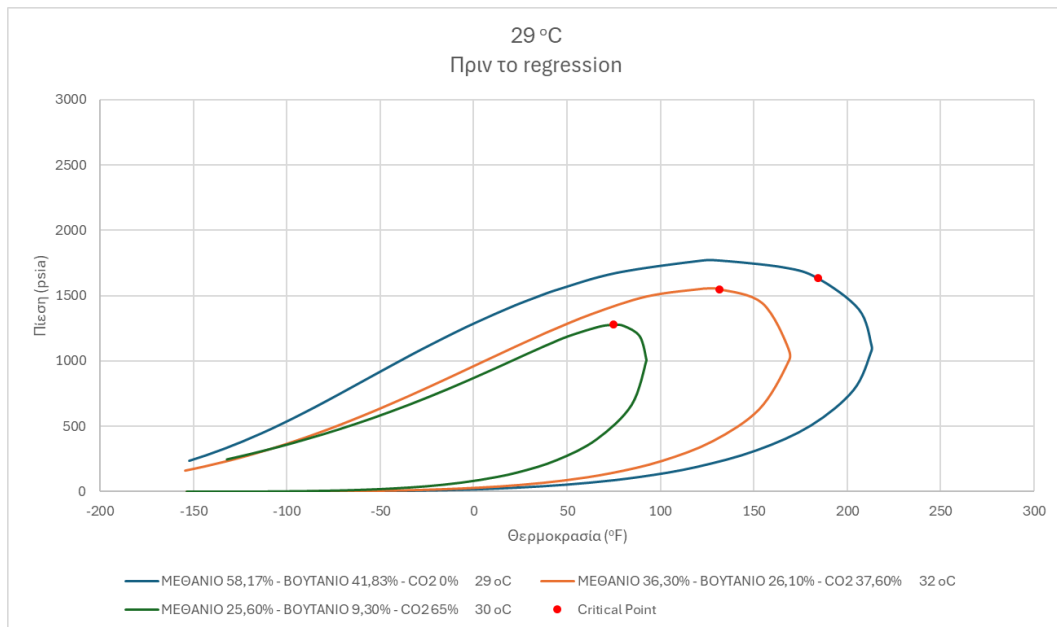
Στον Πίνακα H.54 φαίνεται πως διαμορφώνονται οι τιμές των παραμέτρων του προσομοιωτή πριν και μετά το regression αντίστοιχα.

Στο Σχήμα Θ.76 αναπαρίστανται γραφικά οι πειραματικές πυκνότητες και οι πυκνότητες του προσομοιωτή πριν και μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων (regression) στους 90°C και σε διαφορετικές πιέσεις. Είναι εμφανής η ταύτιση των τιμών των μετρηθείσας πειραματικά πυκνοτήτων με αυτές που προκύπτουν από την προσομοίωση μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων.

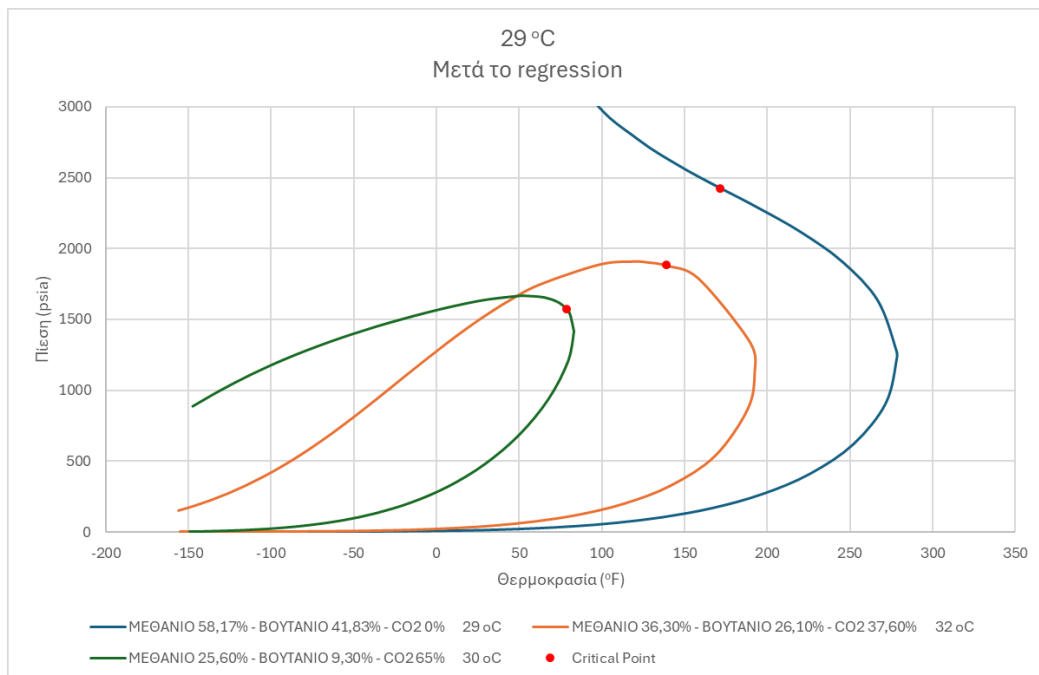
Στα Σχήματα Θ.77 και Θ.78 αναπαρίστανται γραφικά οι απόλυτες αποκλίσεις και οι αποκλίσεις % αντίστοιχα, των πυκνοτήτων του προσομοιωτή (πριν και μετά το regression) με τις πειραματικές πυκνότητες στους 90°C και σε διαφορετικές πιέσεις. Παρατηρείται και στα δύο σχήματα, οι

αποκλίσεις των πυκνοτήτων του προσομοιωτή μετά τη ρύθμιση των παραμέτρων (regression) να είναι μικρότερες από τις αποκλίσεις του προσομοιωτή πριν το regression, σε όλο το εύρος των πιέσεων στους 90°C.

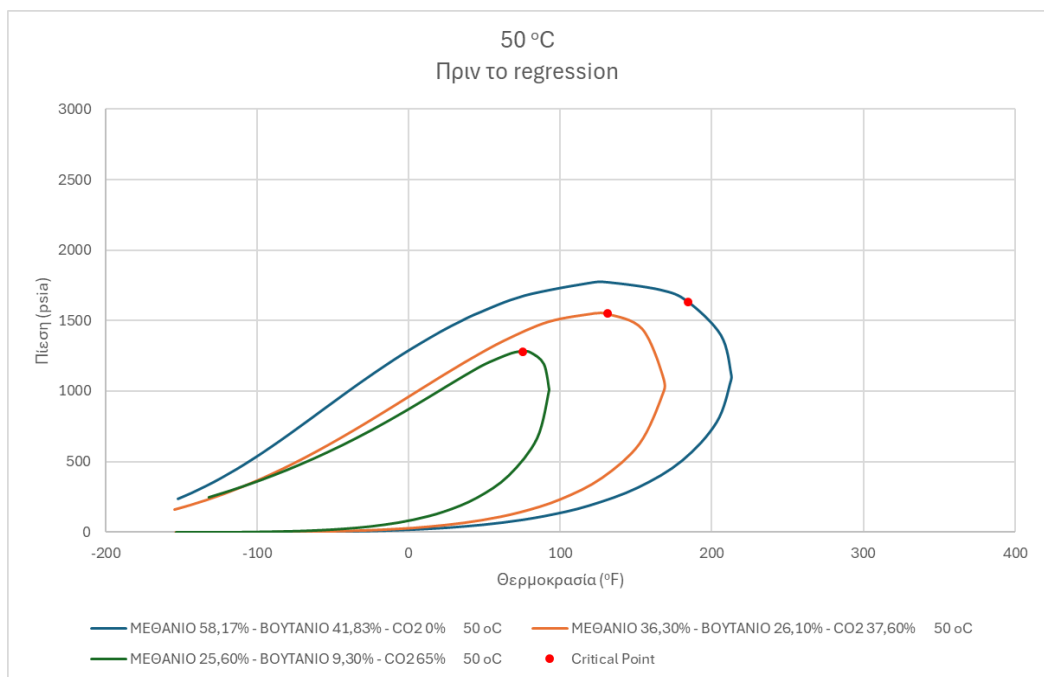
#### 7.6.4 Φάκελοι φάσεων



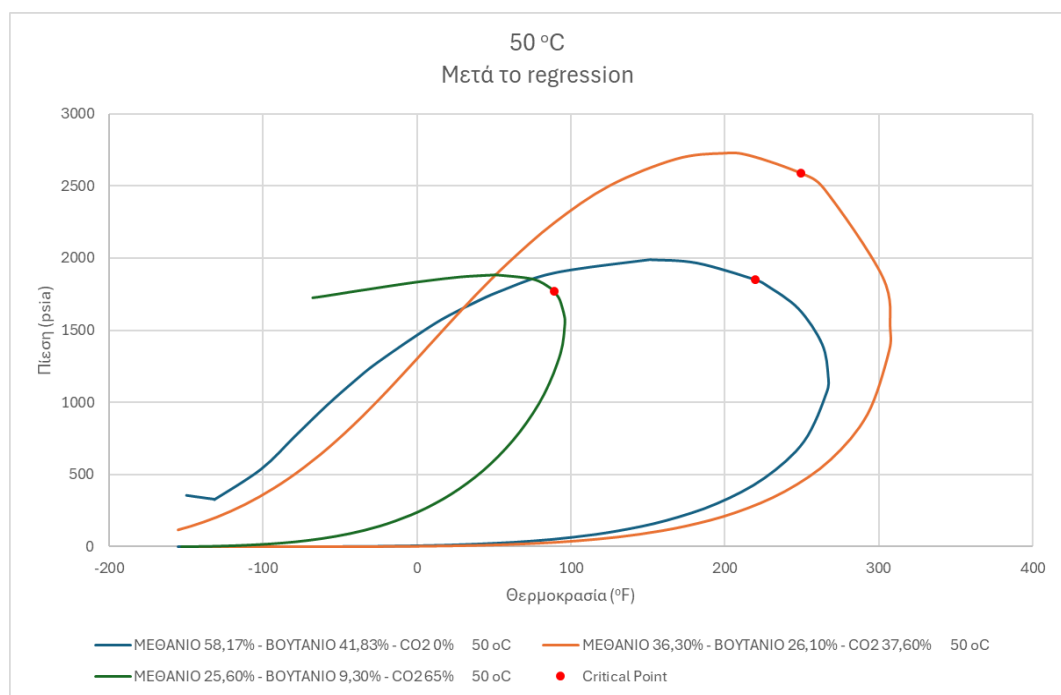
**Σχήμα 7.22:** Διάγραμμα φακέλων φάσεων μειγμάτων μεθανίου-βουτανίου-CO<sub>2</sub> σε τρεις διαφορετικές συστάσεις πριν το regression στους 29°C



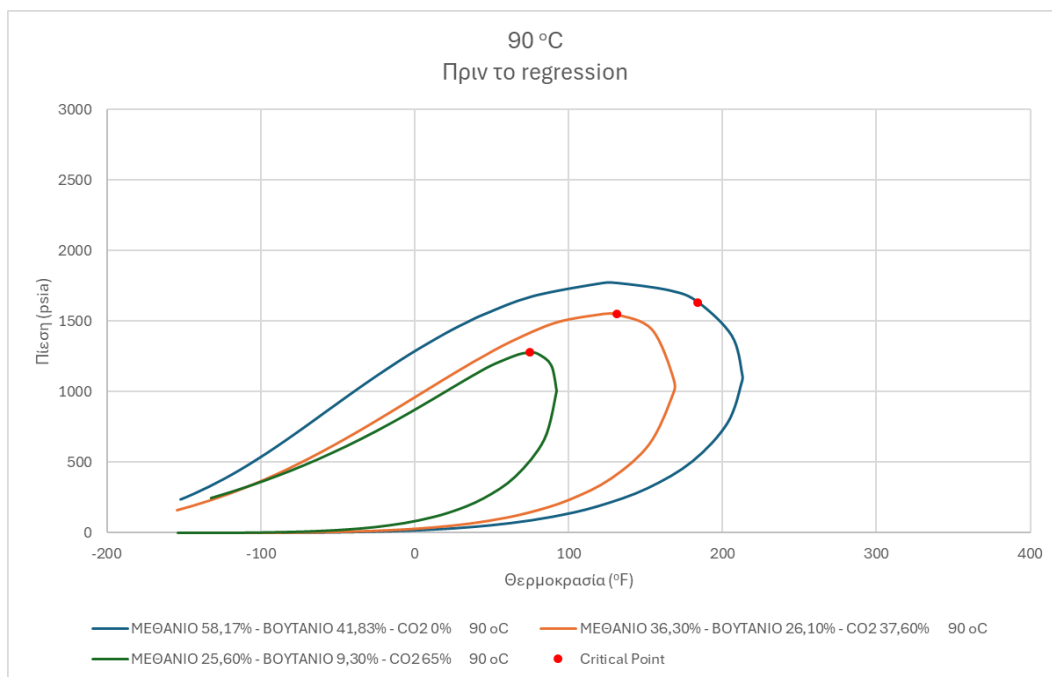
**Σχήμα 7.23:** Διάγραμμα φακέλων φάσεων μειγμάτων μεθανίου-βουτανίου-CO<sub>2</sub> σε τρεις διαφορετικές συστάσεις μετά το regression στους 29°C



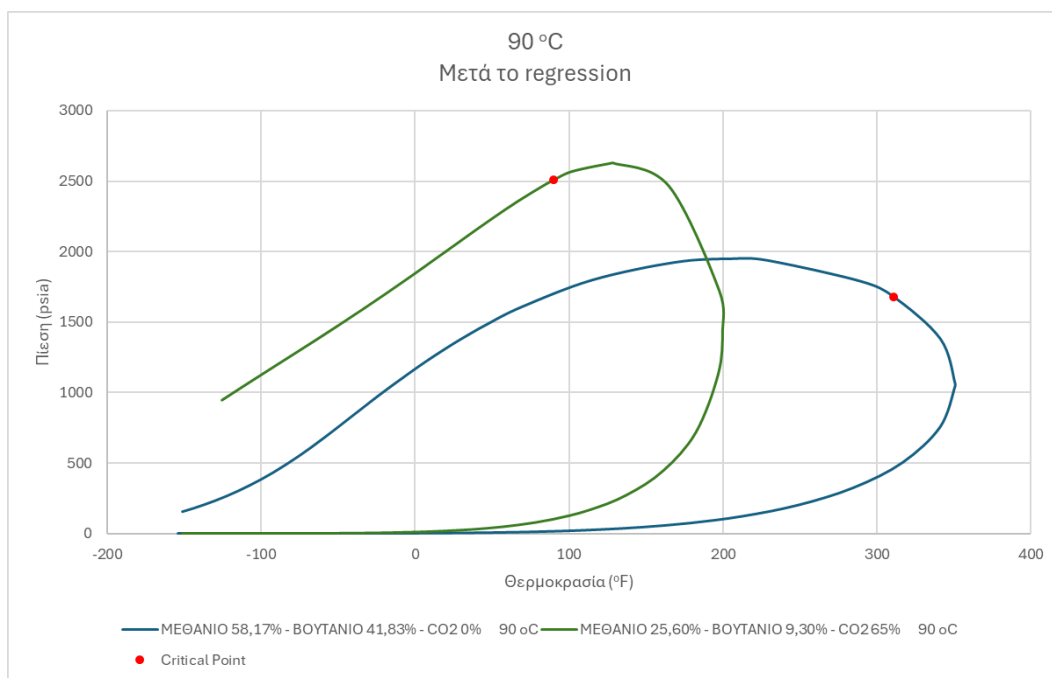
**Σχήμα 7.24:** Διάγραμμα φακέλων φάσεων μειγμάτων μεθανίου-βουτανίου-CO<sub>2</sub> σε τρεις διαφορετικές συστάσεις πριν το regression στους 50°C



**Σχήμα 7.25:** Διάγραμμα φακέλων φάσεων μειγμάτων μεθανίου-βουτανίου-CO<sub>2</sub> σε τρεις διαφορετικές συστάσεις μετά το regression στους 50°C



**Σχήμα 7.26:** Διάγραμμα φακέλων φάσεων μειγμάτων μεθανίου-βουτανίου-CO<sub>2</sub> σε τρεις διαφορετικές συστάσεις πριν το regression στους 90°C



**Σχήμα 7.27:** Διάγραμμα φακέλων φάσεων μειγμάτων μεθανίου-βουτανίου-CO<sub>2</sub> σε δύο διαφορετικές συστάσεις μετά το regression στους 90°C

## 8 Συμπεράσματα

Σημαντικό κομμάτι της εργασίας, αποτέλεσε η βαθμονόμηση του πυκνόμετρου και η επιλογή της κατάλληλης εξίσωσης η οποία περιγράφει με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια τη συμπεριφορά των ρευστών που εισέρχονται στο πυκνόμετρο της πειραματικής διάταξης. Η εξίσωση μετατρέπει την περίοδο ταλάντωσης που μετράει το πυκνόμετρο, σε πυκνότητα, ως συνάρτηση της πίεσης της θερμοκρασίας και της περιόδου ταλάντωσης.

Αρχικά δοκιμάστηκε η εξίσωση που προτείνει ο κατασκευαστής του πυκνομέτρου (εξίσωση 6.9). Παρατηρήθηκε όσον αφορά το μεθάνιο, πως σε χαμηλές πιέσεις και στις τρεις θερμοκρασίες, οι αποκλίσεις των βιβλιογραφικών πυκνοτήτων με αυτές της εξίσωσης του κατασκευαστή είναι μεγάλες. Όσο η πίεση ανεβαίνει οι αποκλίσεις μικραίνουν και παραμένουν σχετικά σταθερές με μικρές διακυμάνσεις. Όσον αφορά το αιθάνιο παρατηρήθηκε, οι αποκλίσεις της εξίσωσης του κατασκευαστή να είναι αρκετά μικρότερες από εκείνες του μεθανίου. Η εξίσωση (6.9) φαίνεται να δίνει σχετικά καλά αποτελέσματα για το αιθάνιο όμως στο μεθάνιο υπάρχουν σοβαρές αποκλίσεις.

Από την στιγμή που τα αποτελέσματα δεν ήταν ικανοποιητικά έγινε δοκιμή να ρυθμιστούν οι συντελεστές της εξίσωσης. Παρατηρήθηκε ότι ο συντελεστής AK της εξίσωσης (6.9) δεν εξαρτάται από την πίεση και την θερμοκρασία. Προκειμένου να βελτιωθούν οι αποκλίσεις μεταξύ βιβλιογραφικών και πειραματικών τιμών της πυκνότητας, επιχειρήθηκε να συνδεθούν τα μεγέθη της πίεσης και της θερμοκρασίας με το συντελεστή AK. Ο τελευταίος, αντικαταστάθηκε από πέντε νέους συντελεστές οι οποίοι εξαρτώνται από την πίεση και την θερμοκρασία με αντίστοιχο τρόπο όπως και οι συντελεστές B,C της εξίσωσης (6.5). Η τροποποιημένη εξίσωση που προέκυψε, η οποία βασίζεται στην εξίσωση (6.9), είναι η (6.10).

Με την χρήση της εξίσωσης (6.10) η μέγιστη σχετική απόκλιση για το μεθάνιο μειώνεται κατά 3,28%, η ελάχιστη σχετική απόκλιση κατά 0,04% και η μέση σχετική απόκλιση κατά 0,59% ως προς τις σχετικές αποκλίσεις που προκύπτουν χρησιμοποιώντας την εξίσωση (6.9). Όσον αφορά το αιθάνιο, με την χρήση της εξίσωσης (6.10) η μέγιστη σχετική απόκλιση μειώνεται κατά 0,04%, η ελάχιστη σχετική απόκλιση παραμένει σταθερή και η μέση σχετική απόκλιση αυξάνεται κατά 0,01% ως προς τις σχετικές αποκλίσεις που προκύπτουν χρησιμοποιώντας την εξίσωση (6.9). Με βάση τις μειώσεις αυτές, ως τελική εξίσωση για τα ρευστά μεθανίου και αιθανίου, επιλέχθηκε η εξίσωση (6.10).

Οι μηχανικοί ταμειυτήρων προκειμένου να σχεδιάσουν την εκμετάλλευση ενός κοιτάσματος μείγματος υδρογονανθράκων χρειάζονται μια όσο το δυνατό ακριβέστερη πρόβλεψη του φακέλου φάσεων των ρευστών στις συνθήκες ταμειυτήρα καθώς και τον χαρακτηρισμό αυτών των ρευστών για την μετέπειτα προσομοίωσή του.

Στην παρούσα διπλωματική μελετήθηκε κατά πόσο ένα εξειδικευμένο σχετικό λογισμικό προσομοίωσης μπορεί να προσεγγίσει με ακρίβεια την πυκνότητα των μειγμάτων μεθανίου-αιθανίου-διοξειδίου του άνθρακα, μεθανίου-προπανίου- διοξειδίου του άνθρακα και μεθανίου-βουτανίου- διοξειδίου του άνθρακα, σε σχέση με τις πραγματικές τους πυκνότητες όπως αυτές μετριοούνται στο εργαστήριο, για διάφορες αναλογίες και συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας.

Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε ήταν το WinProp v.2015 της εταιρίας Computer Modelling Group. Για την προσομοίωση του μείγματος και τον υπολογισμό των πυκνοτήτων επιλέχθηκε το μοντέλο κυβικής καταστατικής εξίσωσης των Peng–Robinson (PR 78), ενώ για την βέλτιστη προσέγγιση της πυκνότητας ρυθμίστηκαν οι παράμετροι της διόρθωσης όγκου (Volume Shift), του Volume Shift Coefficient, της κρίσιμης πίεσης ( $P_c$ ) και της κρίσιμης θερμοκρασίας ( $T_c$ ).

Παρατηρήθηκε εν γένει σχετικά καλή προσέγγιση των πραγματικών τιμών της πυκνότητας για όλα τα μείγματα. Παρακάτω στον Πίνακα 8.1 παρουσιάζονται αναλυτικά οι μέσες αποκλίσεις % του κάθε μείγματος σε κάθε θερμοκρασία αλλά και συνολικά.

ΜΕΘΑΝΙΟ 39,33% - ΑΙΘΑΝΙΟ 60,67% - CO2 0%				ΜΕΘΑΝΙΟ 28,30% - ΑΙΘΑΝΙΟ 45,80% - CO2 25,90%				ΜΕΘΑΝΙΟ 13,60% - ΑΙΘΑΝΙΟ 20% - CO2 66,40%			
Μέση Απόκλιση				Μέση Απόκλιση				Μέση Απόκλιση			
22°C	50°C	90°C	Συνολική	22°C	50°C	90°C	Συνολική	25°C	50°C	90°C	Συνολική
15,02%	0,47%	0,67%	5,77%	1,44%	0,39%	1,79%	1,18%	4,22%	0,39%	0,26%	1,76%
ΜΕΘΑΝΙΟ 41,40% - ΠΡΟΠΑΝΙΟ 58,60% - CO2 0%				ΜΕΘΑΝΙΟ 34,40% - ΠΡΟΠΑΝΙΟ 47,10% - CO2 18,60%				ΜΕΘΑΝΙΟ 12,50% - ΠΡΟΠΑΝΙΟ 18,30% - CO2 69,20%			
Μέση Απόκλιση				Μέση Απόκλιση				Μέση Απόκλιση			
27°C	50°C	90°C	Συνολική	30°C	50°C	90°C	Συνολική	29°C	50°C	90°C	Συνολική
18,86%	2,91%	2,41%	8,34%	3,39%	1,34%	1,67%	2,15%	6,29%	5,28%	5,51%	5,68%
ΜΕΘΑΝΙΟ 58,17% - ΒΟΥΤΑΝΙΟ 41,83% - CO2 0%				ΜΕΘΑΝΙΟ 36,30% - ΒΟΥΤΑΝΙΟ 26,10% - CO2 37,60%				ΜΕΘΑΝΙΟ 25,60% - ΒΟΥΤΑΝΙΟ 9,30% - CO2 65%			
Μέση Απόκλιση				Μέση Απόκλιση				Μέση Απόκλιση			
29°C	50°C	90°C	Συνολική	32°C	50°C	90°C	Συνολική	30°C	50°C	90°C	Συνολική
18,82%	7,64%	8,12%	11,42%	4,14%	1,55%	7,56%	4,51%	0,81%	0,86%	1,71%	1,15%

**Πίνακας 8.1:** Μέσες αποκλίσεις % των πυκνοτήτων του προσομοιωτή μετά το regression, με τις πειραματικές πυκνότητες, σε κάθε θερμοκρασία και συνολικά

Η παρούσα εργασία καταλήγει στο συμπέρασμα ότι ο υπολογισμός της πυκνότητας μείγματος υδρογονανθράκων μέσω αριθμητικής προσομοίωσης δύναται να επιτύχει ακρίβεια που κρίνεται ικανοποιητική και επαρκής κατά την φάση προκαταρκτικής μελέτης της οικονομοτεχνικής απόδοσης ενός ταμειυτήρα πετρελαίου.

Προτείνεται, μελέτη για τα ίδια μείγματα σε διαφορετικές αναλογίες των αρχικών συστατικών πριν την προσθήκη διοξειδίου του άνθρακα καθώς και σε διαφορετικά ποσοστά συμμετοχής του με στόχο την πληρέστερη μελέτη συμπεριφοράς αέριων μειγμάτων. Ακόμα, εκτενέστερη μελέτη για τις εξισώσεις 6.9 και 6.10. Τέλος, ρύθμιση διαφορετικών παραμέτρων στον προσομοιωτή WinProp προκειμένου να επιτευχθεί ακόμα μεγαλύτερη ακρίβεια και μικρότερες τιμές απόκλισης.

## Βιβλιογραφία

Alireza Bahadori, 2017. Fluid Phase Behavior for Conventional and Unconventional Oil and Gas Reservoirs.

Karen Schou Pedersen, Peter L. Christensen, 2007. Phase Behavior of Petroleum Reservoir Fluids.

DMA HPM instruction manual - Density measuring cell for high pressures and high temperatures. Anton Paar GmbH, Graz, Austria.

Computer Modelling Group Ltd., 2015. WINPROP User Guide Phase-Behaviour & Fluid Property Program, Calgary, Alberta Canada.

Βαρότσης Νικόλαος, 2014. Μηχανική ταμιευτήρων. Χανιά.

Βαρότσης Νικόλαος, 2013. Εκμετάλλευση ταμιευτήρων. Χανιά.

Πασαδάκης Νικόλαος, 2010. Ορυκτά καύσιμα. Χανιά.

Μιχαηλίδη Μελίνα, 2015. Πειραματικός προσδιορισμός πυκνοτήτων και συντελεστή ισοθερμοκρασιακής συμπιεστότητας μειγμάτων υδρογονανθράκων με διοξείδιο του άνθρακα, σε κατάσταση διαφασικής ισορροπίας.

Παναγιώτης Ασλανίδης, 2016. Πειραματικός προσδιορισμός της μεταβολής της πυκνότητας και της διόγκωσης μειγμάτων υδρογονανθράκων με προσθήκη CO<sub>2</sub> σε υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις.

Ατσάρος Φώτης, 2021. Εργαστηριακές μετρήσεις πυκνοτήτων μειγμάτων υδρογονανθράκων σε υψηλές πιέσεις και θερμοκρασίες και έλεγχος, δι' αυτών, της ακρίβειας της μεθόδου διόρθωσης όγκου για την πρόγνωση τους με χρήση κυβικών καταστατικών εξισώσεων.

<https://www.wikipedia.org/>

<https://petrowiki.spe.org/PetroWiki>

<https://www.bp.com/>

<https://www.statista.com/>

[www.energyinst.org/statistical-review](http://www.energyinst.org/statistical-review)

[webbook.nist.gov/chemistry/](http://webbook.nist.gov/chemistry/)

## Παράρτημα Α

### Πειραματικές μετρήσεις μεθανίου

Θερμοκρασία Πυκνομέτρου (°C)	Απόλυτη Πίεση (bar)	Περίοδος (μsec)	Πυκνότητα (g/ml)
21,33	4,413	2566,658	0,002918897
21,35	5,213	2566,719	0,003449328
21,36	6,613	2566,786	0,00438615
21,37	7,613	2566,837	0,005057724
21,39	8,563	2566,901	0,005697923
21,4	10,663	2567,02	0,007121722
21,41	12,663	2567,134	0,008487907
21,42	14,613	2567,25	0,009829425
21,43	16,563	2567,368	0,011191909
21,44	18,563	2567,48	0,012592368
21,45	23,463	2567,768	0,016056211
21,45	28,363	2568,063	0,019570571
21,61	33,263	2568,39	0,02313494
21,61	38,263	2568,706	0,026850393
21,62	43,163	2569,012	0,030553327
21,62	48,163	2569,323	0,034396337
21,63	53,113	2569,639	0,038261444
21,63	58,063	2569,966	0,042188551
21,64	62,963	2570,284	0,046132218
21,64	67,863	2570,616	0,050134044
21,64	72,813	2570,947	0,054230887
21,65	77,763	2571,287	0,058375885

**Πίνακας Α.1:** Πειραματικές μετρήσεις μεθανίου στους 22 °C

Θερμοκρασία Πυκνομέτρου (°C)	Απόλυτη Πίεση (bar)	Περίοδος (μsec)	Πυκνότητα (g/ml)
49,34	5,263	2576,118	0,003171797
49,46	6,163	2576,21	0,003715843
49,59	7,163	2576,298	0,004322167
49,67	8,213	2576,38	0,004960887
49,76	10,263	2576,512	0,006213248
49,83	12,263	2576,643	0,007440884
49,87	14,263	2576,759	0,008675124
49,91	16,263	2576,875	0,009923469
49,95	18,263	2576,991	0,011176707
49,99	23,163	2577,262	0,014257332
50,04	28,163	2577,535	0,017425328
50,09	33,063	2577,816	0,020568421
50,12	38,013	2578,094	0,02378102
50,15	42,963	2578,372	0,027029036
50,18	47,963	2578,651	0,030343819
50,21	52,863	2578,934	0,03362348
50,23	57,813	2579,217	0,036968363
50,25	62,763	2579,501	0,040342923
50,27	67,663	2579,79	0,043710853
50,29	72,613	2580,073	0,047138813
50,32	77,563	2580,359	0,050587898

**Πίνακας Α.2:** Πειραματικές μετρήσεις μεθανίου στους 50 °C

Θερμοκρασία Πυκνομέτρου (°C)	Απόλυτη Πίεση (bar)	Περίοδος (μsec)	Πυκνότητα (g/ml)
89,69	6,463	2590,087	0,003455112
89,78	7,163	2590,152	0,003829476
89,83	8,213	2590,217	0,004393576
89,87	10,213	2590,328	0,005470843
89,9	12,263	2590,434	0,00657828
89,95	14,313	2590,545	0,007688579
89,97	16,263	2590,654	0,008755572
90	18,313	2590,755	0,009878907
90,02	23,213	2590,999	0,012563213
90,04	28,163	2591,241	0,015282356
90,05	33,163	2591,48	0,018051054
90,07	38,063	2591,719	0,0207812
90,15	43,113	2591,984	0,023606903
90,16	48,063	2592,228	0,026396361
90,18	53,013	2592,465	0,029198672
90,19	57,963	2592,709	0,032014708
90,2	62,863	2592,947	0,034813488
90,21	67,863	2593,189	0,037680645
90,22	72,763	2593,431	0,040500157
90,23	77,763	2593,675	0,043385455

**Πίνακας Α.3:** Πειραματικές μετρήσεις μεθανίου στους 90 °C

### Πειραματικές μετρήσεις αιθανίου

Θερμοκρασία Πυκνομέτρου (°C)	Απόλυτη Πίεση (bar)	Περίοδος (μsec)	Πυκνότητα (g/ml)
50,55	50,563	2583,743	0,092205203
50,55	55,163	2585,234	0,110760137
50,55	60,113	2587,427	0,138216102
50,56	65,313	2590,797	0,180204636
50,58	70,513	2594,387	0,225983403
50,6	75,613	2596,843	0,256702189
50,6	80,663	2598,386	0,27641139
50,61	85,663	2599,505	0,290362441
50,62	90,613	2600,383	0,301106073
50,62	95,613	2601,096	0,310025028
50,63	105,463	2602,216	0,324102177
50,63	115,313	2603,098	0,335031292
50,63	125,163	2603,822	0,343935913
50,64	134,963	2604,447	0,3515451
50,64	144,813	2604,991	0,358156879
50,64	154,663	2605,464	0,364156519
50,65	164,463	2605,903	0,36949146
50,65	174,263	2606,306	0,3744289
50,65	184,063	2606,676	0,378955381
50,65	193,813	2607,014	0,383159071
50,66	216,063	2607,736	0,391755503
50,66	235,963	2608,272	0,398557426
50,67	255,863	2608,772	0,404689172
50,67	275,713	2609,231	0,410288153
50,67	295,613	2609,66	0,415459651
50,67	315,463	2610,038	0,420249701
50,68	335,213	2610,409	0,424691338
50,68	355,063	2610,751	0,428899999
50,68	374,863	2611,072	0,43285714
50,69	394,663	2611,377	0,436598587
50,69	414,463	2611,678	0,440165141
50,69	434,263	2611,959	0,443558614
50,69	454,063	2612,217	0,446805764
50,69	473,813	2612,476	0,449907764
50,7	493,563	2612,714	0,452876555

**Πίνακας Α.4:** Πειραματικές μετρήσεις αιθανίου στους 50 °C

Θερμοκρασία Πυκνομέτρου (°C)	Απόλυτη Πίεση (bar)	Περίοδος (μsec)	Πυκνότητα (g/ml)
70,38	55,963	2590,133	0,087006508
70,37	60,963	2591,188	0,100155706
70,39	65,913	2592,374	0,114900677
70,4	70,863	2593,729	0,131662757
70,42	75,963	2595,29	0,15103062
70,46	81,463	2597,079	0,173570121
70,46	85,363	2598,71	0,189863554
70,48	91,463	2600,302	0,213677619
70,49	96,463	2601,671	0,230771239
70,5	106,363	2603,835	0,258135219
70,51	116,363	2605,457	0,278202941
70,52	126,363	2606,714	0,293779138
70,54	136,263	2607,725	0,30594519
70,55	146,263	2608,568	0,31620309
70,55	156,163	2609,278	0,325018824
70,56	166,213	2609,921	0,332827797
70,57	176,063	2610,476	0,339657037
70,58	186,163	2610,988	0,345964911
70,58	196,063	2611,448	0,351611019
70,59	215,913	2612,269	0,361621538
70,59	235,863	2612,976	0,370356912
70,6	255,663	2613,607	0,378006551
70,67	275,463	2614,16	0,384807428
70,67	295,213	2614,696	0,391056048
70,67	315,113	2615,164	0,396829726
70,68	334,963	2615,594	0,402141063
70,68	354,763	2616,002	0,407083249
70,69	374,563	2616,386	0,411699981
70,69	394,363	2616,748	0,41605149
70,69	414,163	2617,089	0,420160974
70,69	433,963	2617,405	0,424057251
70,69	453,763	2617,698	0,427765248
70,7	473,463	2617,983	0,431266945
70,7	493,263	2618,266	0,434645337

**Πίνακας Α.5:** Πειραματικές μετρήσεις αιθανίου στους 70 °C

Θερμοκρασία Πυκνομέτρου (°C)	Απόλυτη Πίεση (bar)	Περίοδος (μsec)	Πυκνότητα (g/ml)
89,42	58,563	2596,167	0,079404762
89,49	63,663	2597,004	0,089377647
89,54	68,863	2597,942	0,100315876
89,58	74,263	2598,949	0,112537184
89,62	79,763	2600,025	0,125875504
89,67	85,163	2601,139	0,139736765
89,72	90,363	2602,258	0,153599747
89,76	95,463	2603,377	0,167437918
89,79	105,563	2605,53	0,194200268
89,92	116,363	2607,634	0,219712311
89,94	126,263	2609,28	0,239981872
89,96	136,213	2610,648	0,256861236
89,98	146,263	2611,806	0,271278208
90,06	156,063	2612,785	0,283039697
90,15	165,813	2613,649	0,293166895
90,17	175,863	2614,403	0,302483306
90,18	185,813	2615,074	0,310680411
90,19	195,713	2615,68	0,318018569
90,2	215,663	2616,742	0,330877147
90,21	235,563	2617,627	0,341758274
90,23	255,463	2617,396	0,351191019
90,24	275,363	2619,082	0,35953992
90,25	295,213	2619,7	0,36701572
90,26	314,963	2620,236	0,373770092
90,28	334,813	2620,739	0,379973146
90,3	354,663	2621,21	0,385700603
90,31	374,363	2621,661	0,390994681
90,32	394,263	2622,074	0,395995576
90,33	414,063	2622,461	0,400663224
90,34	433,813	2622,826	0,405051333
90,35	453,563	2623,167	0,409213448
90,37	473,313	2623,49	0,413153512
90,38	492,963	2623,804	0,416895369

**Πίνακας Α.6:** Πειραματικές μετρήσεις αιθανίου στους 90 °C

### Πειραματικές μετρήσεις προπανίου

Θερμοκρασία Πυκνομέτρου (°C)	Απόλυτη Πίεση (bar)	Περίοδος (μsec)	Πυκνότητα (g/ml)
50,30	1,013	2576,324	0,001675423
50,29	2,063	2576,47	0,003486832
50,29	3,063	2576,615	0,005228843
50,30	4,063	2576,762	0,007027657
50,30	4,713	2576,852	0,008234224
50,30	6,063	2577,063	0,010795106
50,31	7,013	2577,22	0,012671331
50,31	7,963	2577,378	0,014610855
50,32	8,913	2577,548	0,016618333
50,36	10,163	2577,785	0,019373261

**Πίνακας Α.7:** Πειραματικές μετρήσεις προπανίου στους 50 °C

Θερμοκρασία Πυκνομέτρου (°C)	Απόλυτη Πίεση (bar)	Περίοδος (μsec)	Πυκνότητα (g/ml)
70,16	1,013	2583,118	0,001575145
70,15	2,013	2583,255	0,00317837
70,13	3,063	2583,379	0,004891999
70,11	4,063	2583,516	0,006558026
70,10	5,063	2583,64	0,00826499
70,09	6,063	2583,777	0,010014659
70,07	7,013	2583,913	0,011718895
70,06	8,063	2584,066	0,013653098
70,05	9,063	2584,218	0,015548223
70,04	10,013	2584,36	0,017399791

**Πίνακας Α.8:** Πειραματικές μετρήσεις προπανίου στους 70 °C

Θερμοκρασία Πυκνομέτρου (°C)	Απόλυτη Πίεση (bar)	Περίοδος (μsec)	Πυκνότητα (g/ml)
89,92	1,013	2589,991	0,001486876
89,91	2,063	2590,123	0,003081076
89,90	3,013	2590,237	0,004519924
89,89	4,013	2590,362	0,006074548
89,88	5,013	2590,486	0,007659411
89,88	6,063	2590,615	0,009357522
89,88	7,013	2590,7448	0,010924079
89,88	7,613	2590,825	0,011931712
89,88	9,013	2591,02	0,014327374
89,89	9,963	2591,154	0,015995928

**Πίνακας Α.9:** Πειραματικές μετρήσεις προπανίου στους 90 °C

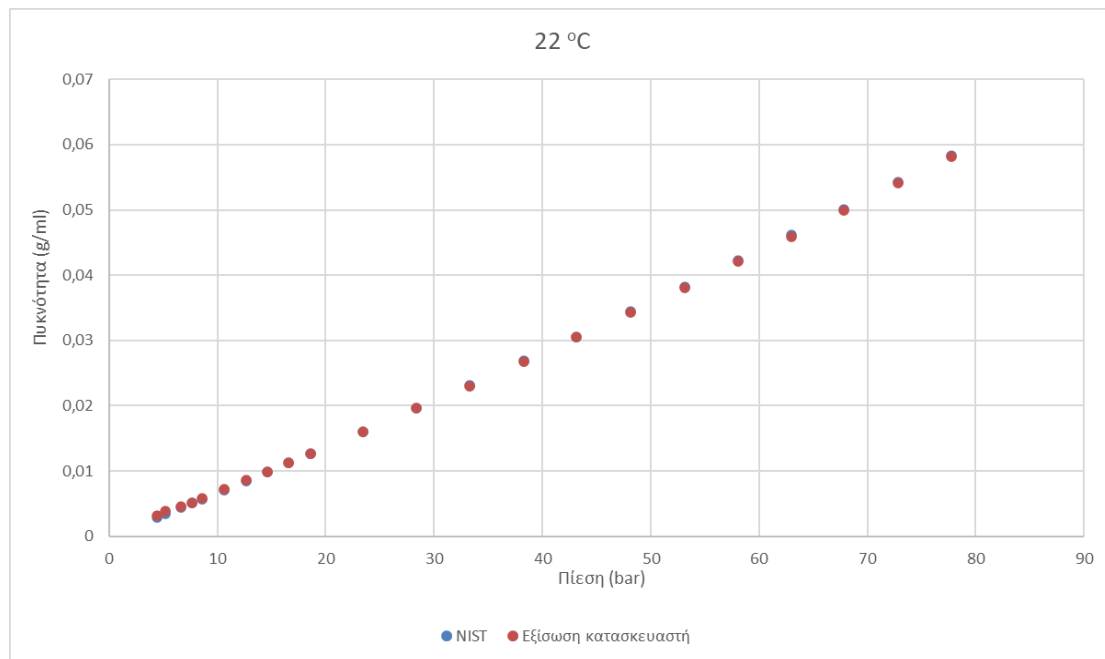
## Παράρτημα Β

### ΜΕΘΑΝΙΟ

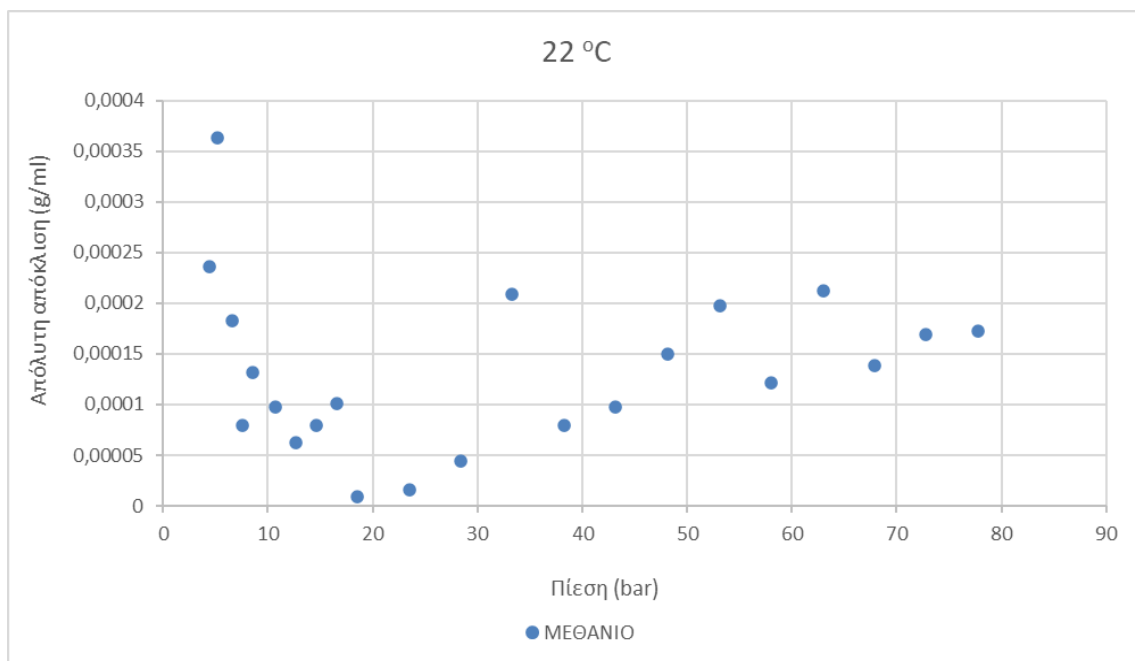
Στους 22 °C

T	p	NIST	Εξίσωση κατασκευαστή	Απόκλιση %	Απόκλιση	Απόλυτη απόκλιση
21,33	4,413	0,002918897	0,003154659	7,76%	0,000235762	0,000235762
21,35	5,213	0,003449328	0,003812955	10,01%	0,000363626	0,000363626
21,36	6,613	0,00438615	0,004569393	4,09%	0,000183243	0,000183243
21,37	7,613	0,005057724	0,005137538	1,57%	7,98137E-05	7,98137E-05
21,39	8,563	0,005697923	0,005829303	2,28%	0,000131379	0,000131379
21,4	10,663	0,007121722	0,007219283	1,36%	9,75601E-05	9,75601E-05
21,41	12,663	0,008487907	0,008550243	0,73%	6,23366E-05	6,23366E-05
21,42	14,613	0,009829425	0,00990869	0,80%	7,92647E-05	7,92647E-05
21,43	16,563	0,011191909	0,011293045	0,90%	0,000101136	0,000101136
21,44	18,563	0,012592368	0,012601015	0,07%	8,64616E-06	8,64616E-06
21,45	23,463	0,016056211	0,016040744	0,10%	-1,54666E-05	1,54666E-05
21,45	28,363	0,019570571	0,019615051	0,23%	4,44802E-05	4,44802E-05
21,61	33,263	0,02313494	0,022926247	0,91%	-0,000208693	0,000208693
21,61	38,263	0,026850393	0,026771275	0,30%	-7,91178E-05	7,91178E-05
21,62	43,163	0,030553327	0,030455504	0,32%	-9,78235E-05	9,78235E-05
21,62	48,163	0,034396337	0,034246502	0,44%	-0,000149835	0,000149835
21,63	53,113	0,038261444	0,038064282	0,52%	-0,000197162	0,000197162
21,63	58,063	0,042188551	0,042067139	0,29%	-0,000121412	0,000121412
21,64	62,963	0,046132218	0,045919948	0,46%	-0,000212271	0,000212271
21,64	67,863	0,050134044	0,04999558	0,28%	-0,000138463	0,000138463
21,64	72,813	0,054230887	0,054061662	0,31%	-0,000169225	0,000169225
21,65	77,763	0,058375885	0,05820346	0,30%	-0,000172425	0,000172425

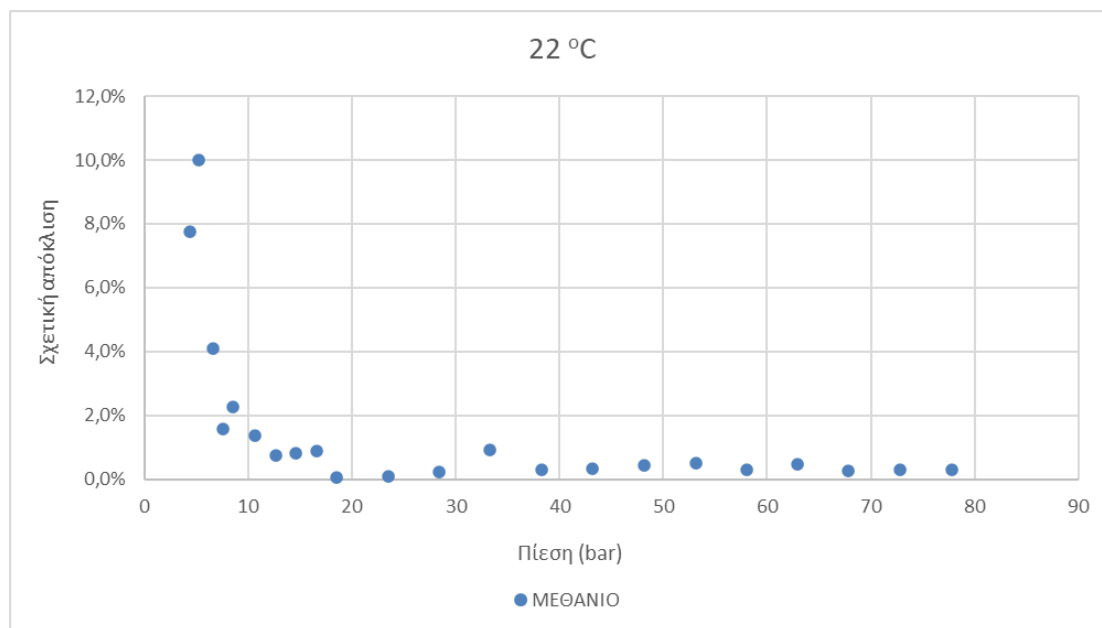
**Πίνακας Β.1:** Αποκλίσεις εξίσωσης κατασκευαστή για το μεθάνιο στους 22°C



**Σχήμα Β.1:** Γραφική απεικόνιση αποκλίσεων εξίσωσης κατασκευαστή για το μεθάνιο στους 22°C



**Σχήμα Β.2:** Γραφική απεικόνιση απόλυτων αποκλίσεων εξίσωσης κατασκευαστή για το μεθάνιο στους 22°C

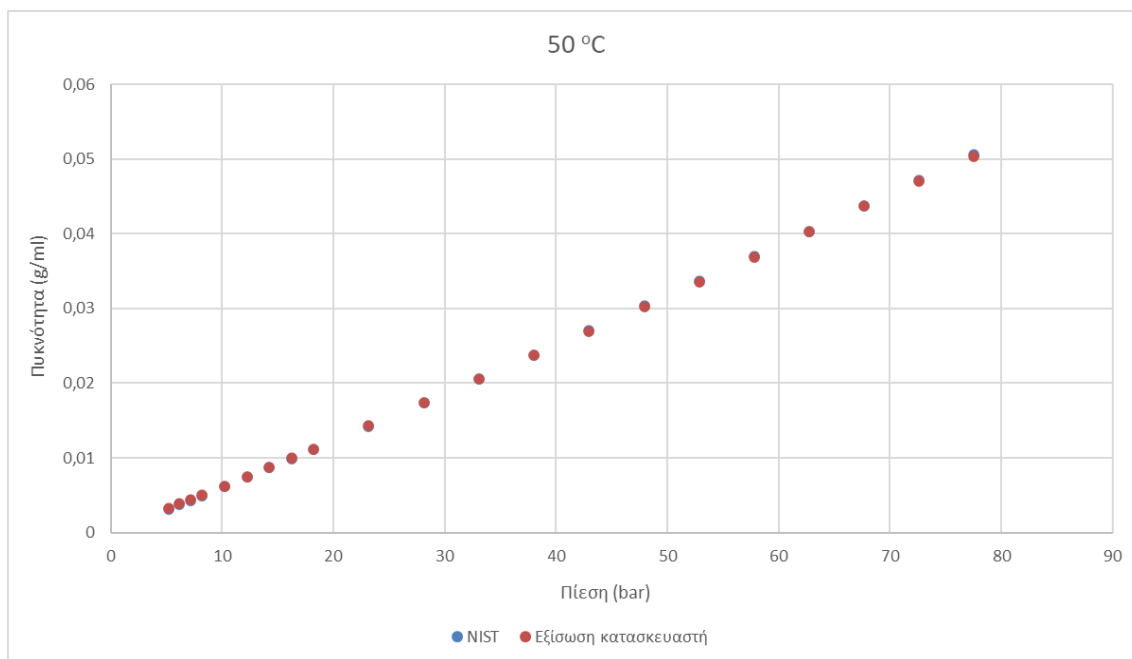


**Σχήμα Β.3:** Γραφική απεικόνιση σχετικών αποκλίσεων εξίσωσης κατασκευαστή για το μεθάνιο στους 22°C

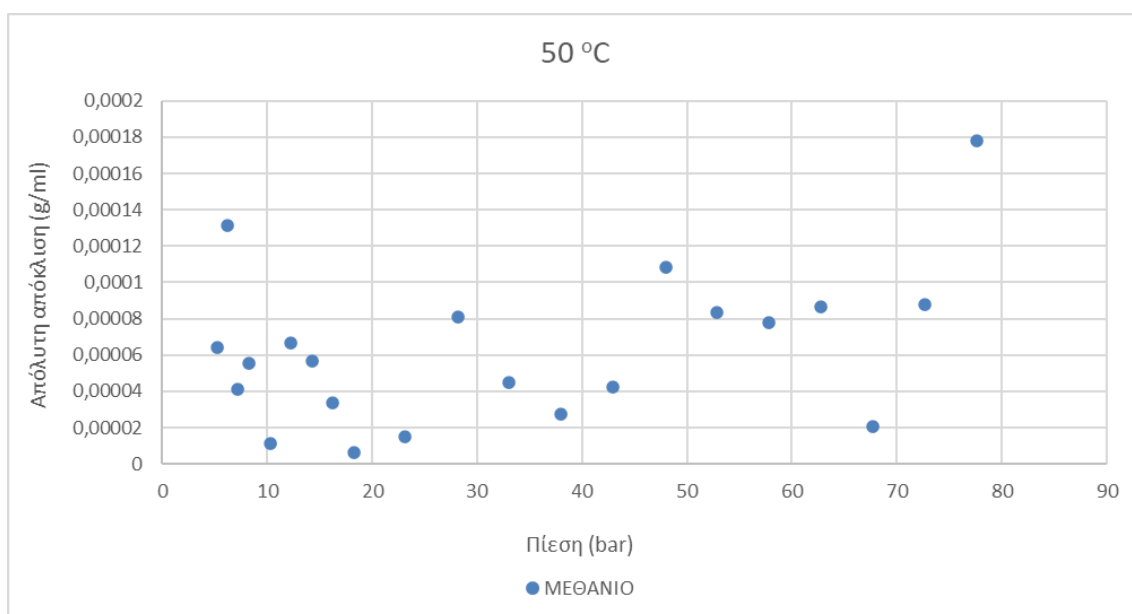
**Στους 50 °C**

T	p	NIST	Εξίσωση κατασκευαστή	Απόκλιση %	Απόκλιση	Απόλυτη απόκλιση
49,34	5,263	0,003171797	0,003235725	2,00%	6,39284E-05	6,39284E-05
49,46	6,163	0,003715843	0,003847263	3,48%	0,00013142	0,00013142
49,59	7,163	0,004322167	0,004362992	0,94%	4,08251E-05	4,08251E-05
49,67	8,213	0,004960887	0,005016433	1,11%	5,55466E-05	5,55466E-05
49,76	10,263	0,006213248	0,006224366	0,18%	1,11179E-05	1,11179E-05
49,83	12,263	0,007440884	0,007507573	0,89%	6,6689E-05	6,6689E-05
49,87	14,263	0,008675124	0,008732077	0,65%	5,69535E-05	5,69535E-05
49,91	16,263	0,009923469	0,009957217	0,34%	3,37484E-05	3,37484E-05
49,95	18,263	0,011176707	0,01118299	0,06%	6,28246E-06	6,28246E-06
49,99	23,163	0,014257332	0,014272059	0,10%	1,47265E-05	1,47265E-05
50,04	28,163	0,017425328	0,01734443	0,47%	-8,08984E-05	8,08984E-05
50,09	33,063	0,020568421	0,020523542	0,22%	-4,48788E-05	4,48788E-05
50,12	38,013	0,02378102	0,023753294	0,12%	-2,77264E-05	2,77264E-05
50,15	42,963	0,027029036	0,026986794	0,16%	-4,22413E-05	4,22413E-05
50,18	47,963	0,030343819	0,030235336	0,36%	-0,000108483	0,000108483
50,21	52,863	0,03362348	0,033540107	0,25%	-8,33731E-05	8,33731E-05
50,23	57,813	0,036968363	0,036890235	0,21%	-7,8128E-05	7,8128E-05
50,25	62,763	0,040342923	0,040256496	0,21%	-8,64266E-05	8,64266E-05
50,27	67,663	0,043710853	0,043690117	0,05%	-2,07355E-05	2,07355E-05
50,29	72,613	0,047138813	0,047050833	0,19%	-8,79802E-05	8,79802E-05
50,32	77,563	0,050587898	0,050409667	0,35%	-0,000178231	0,000178231

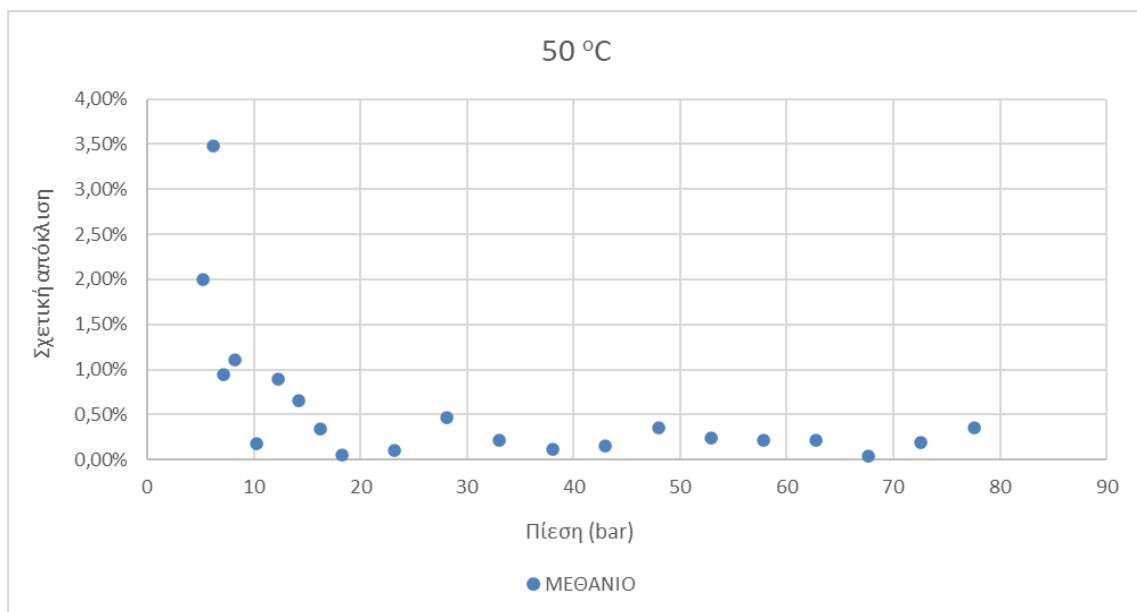
**Πίνακας Β.2:** Αποκλίσεις εξίσωσης κατασκευαστή για το μεθάνιο στους 50°C



**Σχήμα B.4:** Γραφική απεικόνιση αποκλίσεων εξίσωσης κατασκευαστή για το μεθάνιο στους 50°C



**Σχήμα B.5:** Γραφική απεικόνιση απόλυτων αποκλίσεων εξίσωσης κατασκευαστή για το μεθάνιο στους 50°C

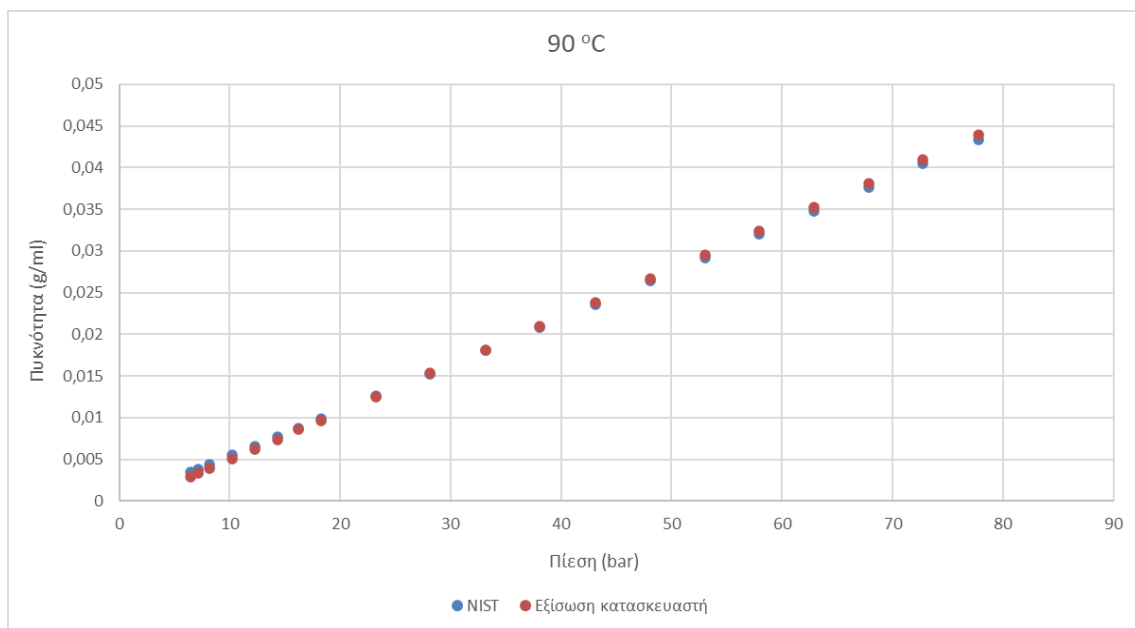


**Σχήμα Β.6:** Γραφική απεικόνιση σχετικών αποκλίσεων εξίσωσης κατασκευαστή για το μεθάνιο στους 50°C

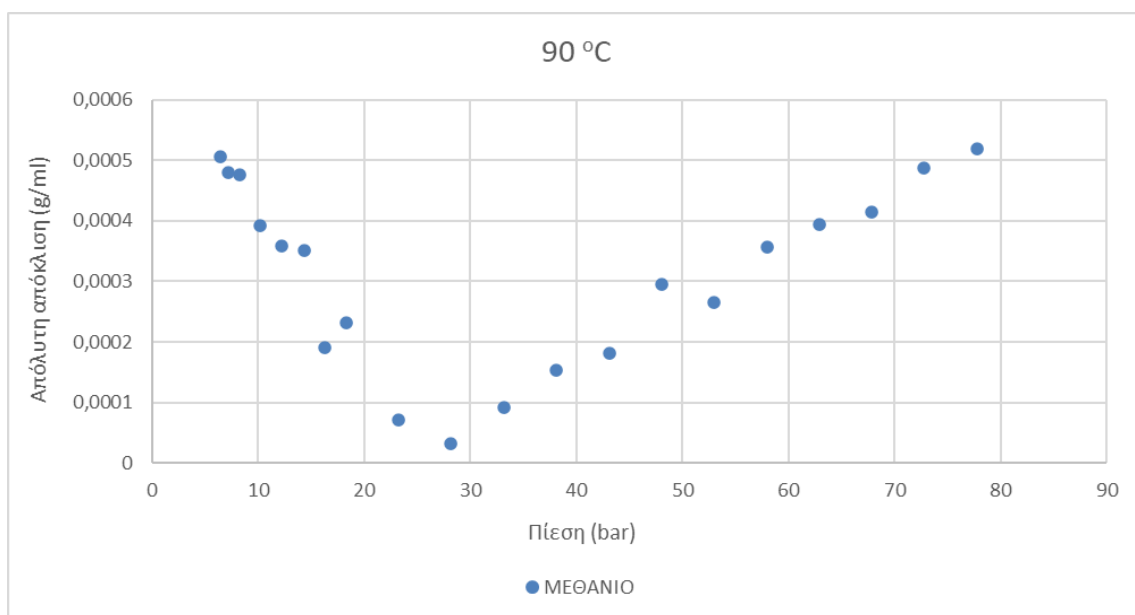
## Στους 90 °C

Τ	ρ	NIST	Εξίσωση κατασκευαστή	Απόκλιση %	Απόκλιση	Απόλυτη απόκλιση
89,69	6,463	0,003455112	0,002949549	15,79%	-0,000505563	0,000505563
89,78	7,163	0,003829476	0,00334997	13,36%	-0,000479506	0,000479506
89,83	8,213	0,004393576	0,003916687	11,48%	-0,00047689	0,00047689
89,87	10,213	0,005470843	0,005078305	7,44%	-0,000392538	0,000392538
89,9	12,263	0,00657828	0,006220475	5,59%	-0,000357805	0,000357805
89,95	14,313	0,007688579	0,007338103	4,66%	-0,000350476	0,000350476
89,97	16,263	0,008755572	0,008565096	2,20%	-0,000190477	0,000190477
90	18,313	0,009878907	0,009646313	2,38%	-0,000232594	0,000232594
90,02	23,213	0,012563213	0,01249155	0,57%	-7,16626E-05	7,16626E-05
90,04	28,163	0,015282356	0,015313525	0,20%	3,11689E-05	3,11689E-05
90,05	33,163	0,018051054	0,018143547	0,51%	9,24928E-05	9,24928E-05
90,07	38,063	0,0207812	0,02093493	0,74%	0,00015373	0,00015373
90,15	43,113	0,023606903	0,023788316	0,77%	0,000181413	0,000181413
90,16	48,063	0,026396361	0,026690628	1,11%	0,000294268	0,000294268
90,18	53,013	0,029198672	0,029464267	0,91%	0,000265594	0,000265594
90,19	57,963	0,032014708	0,032372041	1,11%	0,000357333	0,000357333
90,2	62,863	0,034813488	0,03520837	1,13%	0,000394881	0,000394881
90,21	67,863	0,037680645	0,038095388	1,09%	0,000414743	0,000414743
90,22	72,763	0,040500157	0,040986953	1,19%	0,000486796	0,000486796
90,23	77,763	0,043385455	0,043904185	1,19%	0,000518731	0,000518731

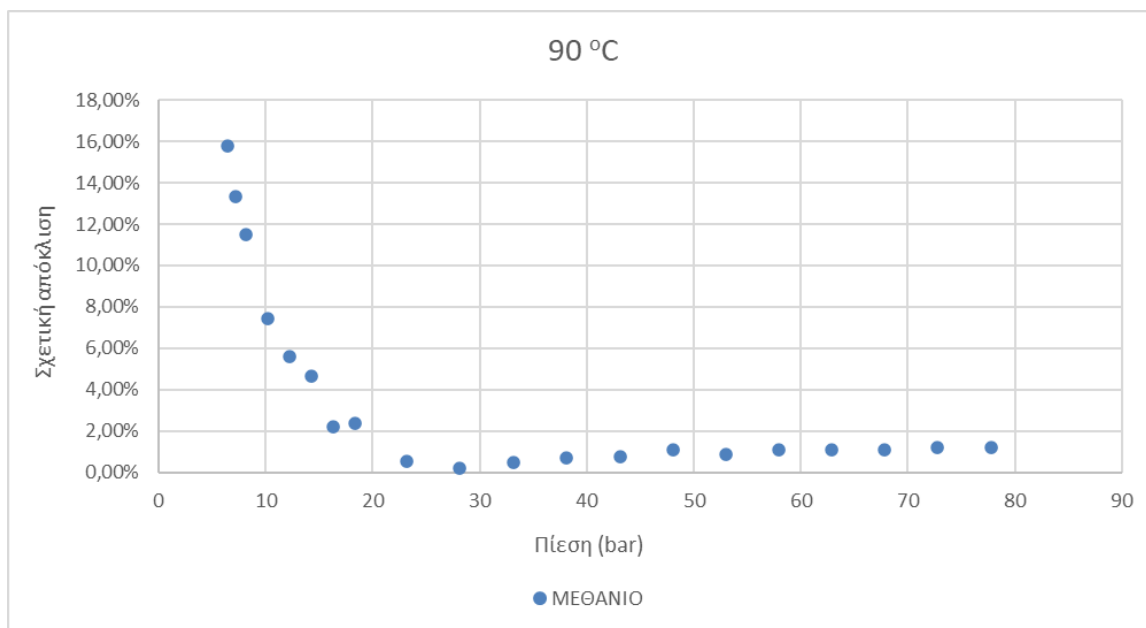
**Πίνακας Β.3:** Αποκλίσεις εξίσωσης κατασκευαστή για το μεθάνιο στους 90°C



**Σχήμα Β.7:** Γραφική απεικόνιση αποκλίσεων εξίσωσης κατασκευαστή για το μεθάνιο στους 90°C



**Σχήμα Β.8:** Γραφική απεικόνιση απόλυτων αποκλίσεων εξίσωσης κατασκευαστή για το μεθάνιο στους 90°C



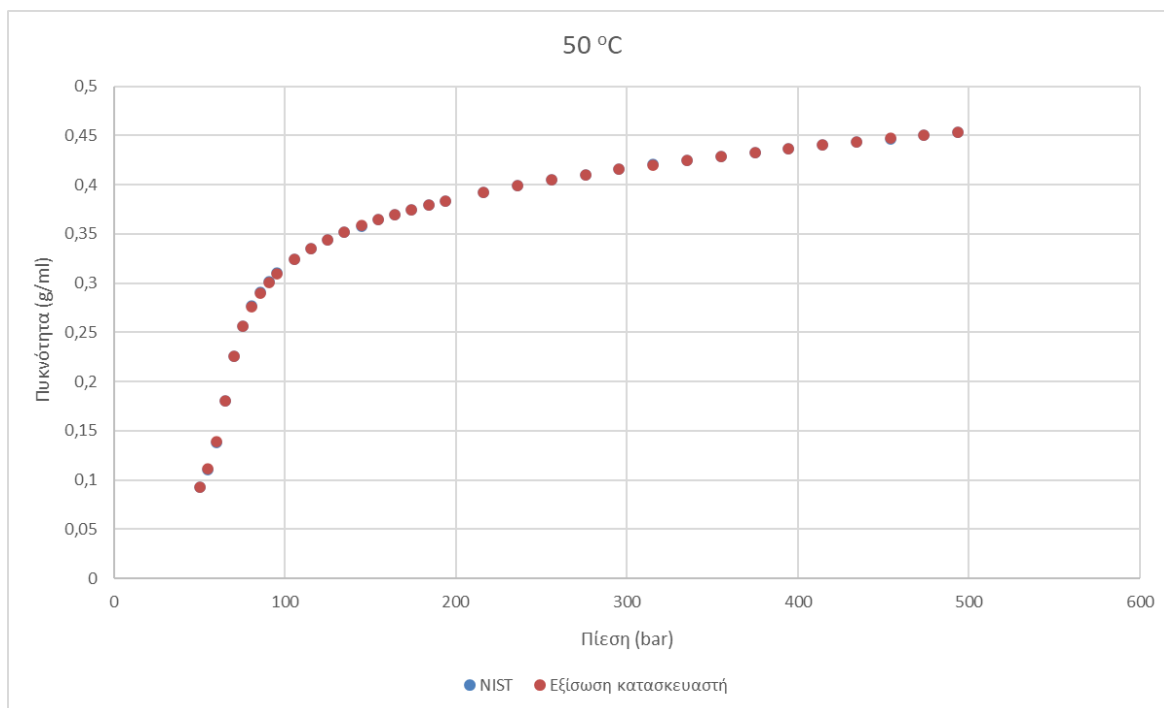
**Σχήμα Β.9:** Γραφική απεικόνιση σχετικών αποκλίσεων εξίσωσης κατασκευαστή για το μεθάνιο στους 90°C

## ΑΙΘΑΝΙΟ

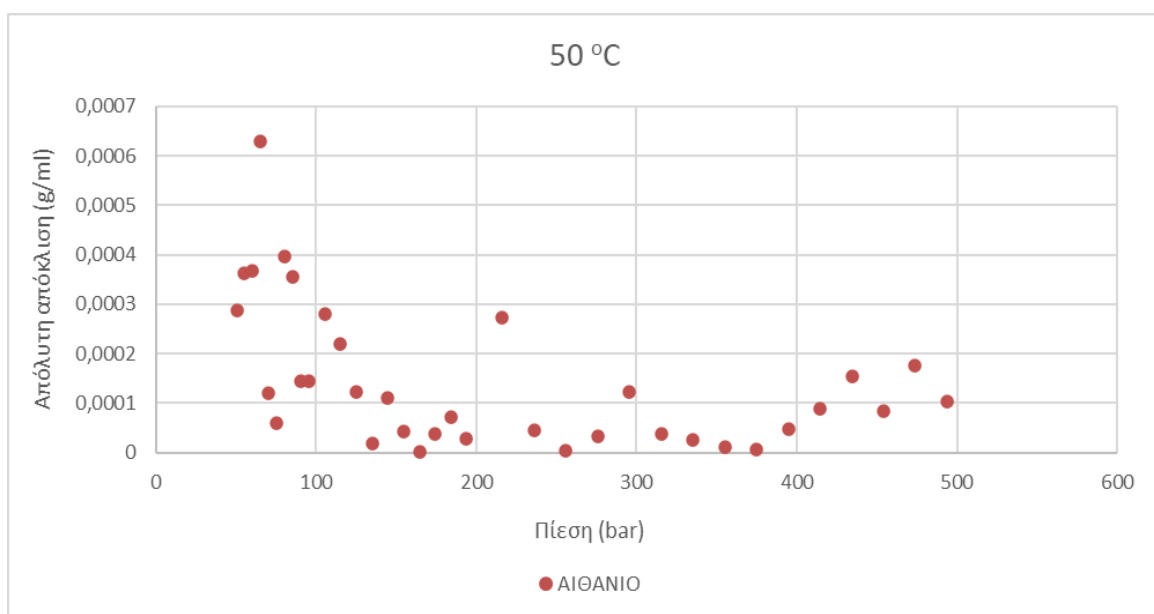
Στους 50 °C

T	p	NIST	Εξίσωση κατασκευαστή	Απόκλιση %	Απόκλιση	Απόλυτη απόκλιση
50,55	50,563	0,092205203	0,092493353	0,31%	0,00028815	0,00028815
50,55	55,163	0,110760137	0,111122171	0,33%	0,000362034	0,000362034
50,55	60,113	0,138216102	0,138583246	0,27%	0,000367144	0,000367144
50,56	65,313	0,180204636	0,180833777	0,35%	0,000629141	0,000629141
50,58	70,513	0,225983403	0,225862617	0,05%	-0,000120786	0,000120786
50,6	75,613	0,256702189	0,256642957	0,02%	-5,92319E-05	5,92319E-05
50,6	80,663	0,27641139	0,276015957	0,14%	-0,000395433	0,000395433
50,61	85,663	0,290362441	0,290006033	0,12%	-0,000356408	0,000356408
50,62	90,613	0,301106073	0,300961136	0,05%	-0,000144937	0,000144937
50,62	95,613	0,310025028	0,309880153	0,05%	-0,000144874	0,000144874
50,63	105,463	0,324102177	0,32382249	0,09%	-0,000279686	0,000279686
50,63	115,313	0,335031292	0,334812063	0,07%	-0,00021923	0,00021923
50,63	125,163	0,343935913	0,34381335	0,04%	-0,000122563	0,000122563
50,64	134,963	0,3515451	0,351527491	0,01%	-1,76086E-05	1,76086E-05
50,64	144,813	0,358156879	0,358266875	0,03%	0,000109996	0,000109996
50,64	154,663	0,364156519	0,364114261	0,01%	-4,22581E-05	4,22581E-05
50,65	164,463	0,36949146	0,369493909	0,00%	2,44913E-06	2,44913E-06
50,65	174,263	0,3744289	0,374466872	0,01%	3,79719E-05	3,79719E-05
50,65	184,063	0,378955381	0,379027056	0,02%	7,16755E-05	7,16755E-05
50,65	193,813	0,383159071	0,383187418	0,01%	2,83471E-05	2,83471E-05
50,66	216,063	0,391755503	0,392028669	0,07%	0,000273165	0,000273165
50,66	235,963	0,398557426	0,398603555	0,01%	4,61292E-05	4,61292E-05
50,67	255,863	0,404689172	0,404693354	0,00%	4,18178E-06	4,18178E-06
50,67	275,713	0,410288153	0,410321893	0,01%	3,37399E-05	3,37399E-05
50,67	295,613	0,415459651	0,415582716	0,03%	0,000123065	0,000123065
50,67	315,463	0,420249701	0,42021094	0,01%	-3,8761E-05	3,8761E-05
50,68	335,213	0,424691338	0,424717816	0,01%	2,64786E-05	2,64786E-05
50,68	355,063	0,428899999	0,428911609	0,00%	1,16102E-05	1,16102E-05
50,68	374,863	0,43285714	0,432849972	0,00%	-7,16838E-06	7,16838E-06
50,69	394,663	0,436598587	0,436551347	0,01%	-4,72398E-05	4,72398E-05
50,69	414,463	0,440165141	0,440253951	0,02%	8,88093E-05	8,88093E-05
50,69	434,263	0,443558614	0,44371235	0,03%	0,000153735	0,000153735
50,69	454,063	0,446805764	0,44688893	0,02%	8,31653E-05	8,31653E-05
50,69	473,813	0,449907764	0,450084611	0,04%	0,000176847	0,000176847
50,7	493,563	0,452876555	0,452979382	0,02%	0,000102827	0,000102827

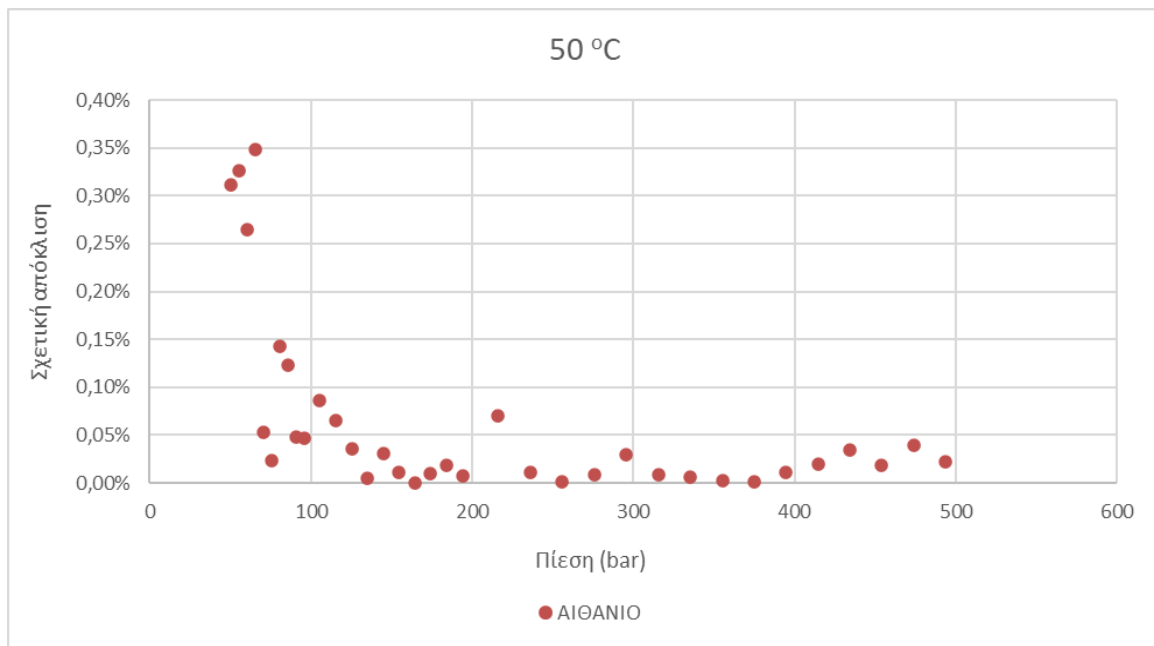
**Πίνακας Β.4:** Αποκλίσεις εξίσωσης κατασκευαστή για το αιθάνιο στους 50°C



**Σχήμα Β.10:** Γραφική απεικόνιση αποκλίσεων εξίσωσης κατασκευαστή για το αιθάνιο στους 50°C



**Σχήμα Β.11:** Γραφική απεικόνιση απόλυτων αποκλίσεων εξίσωσης κατασκευαστή για το αιθάνιο στους 50°C

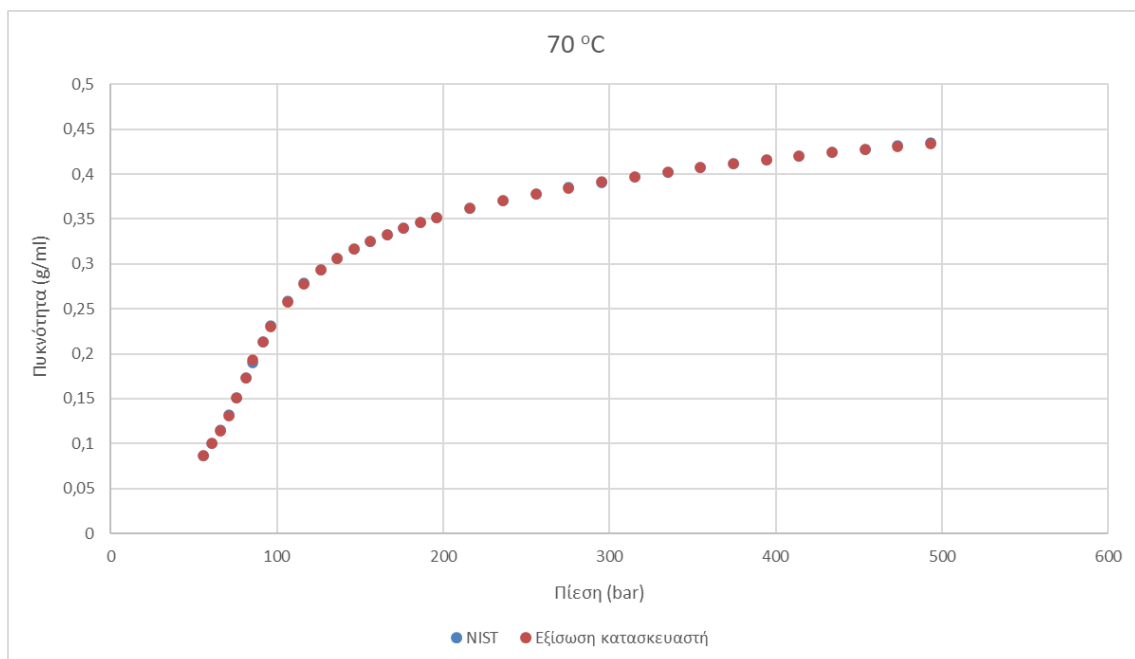


**Σχήμα Β.12:** Γραφική απεικόνιση σχετικών αποκλίσεων εξίσωσης κατασκευαστή για το αιθάνιο στους 50°C

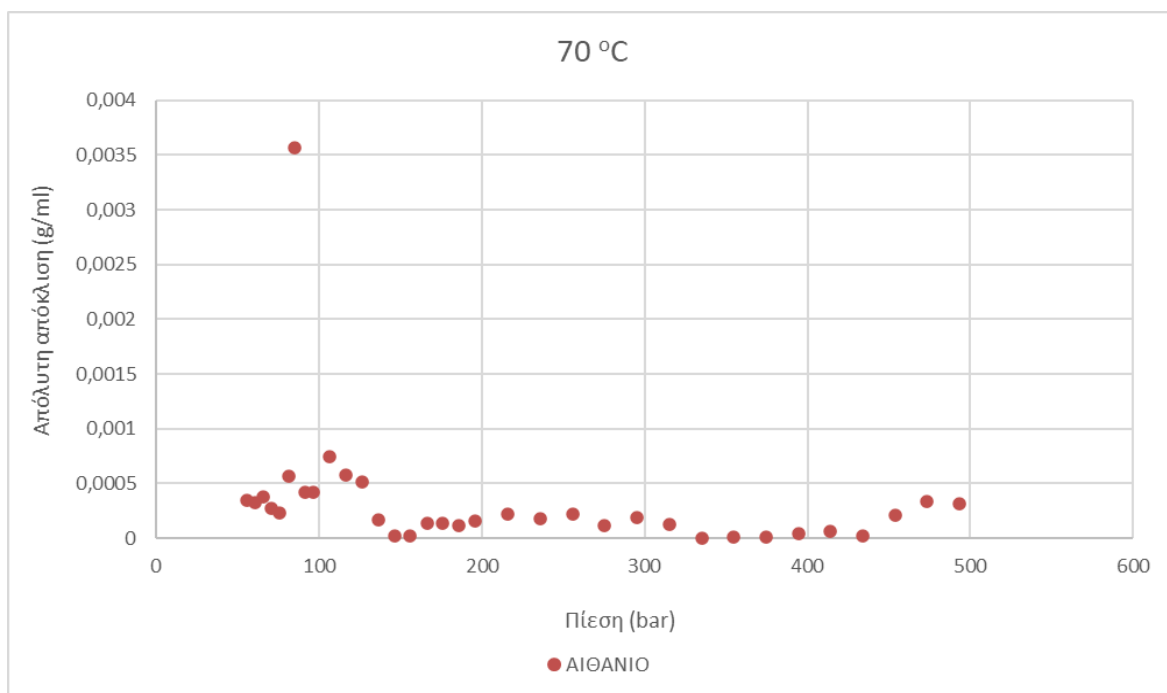
## Στους 70 °C

T	p	NIST	Εξίσωση κατασκευαστή	Απόκλιση %	Απόκλιση	Απόλυτη απόκλιση
70,38	55,963	0,087006508	0,086664208	0,39%	-0,0003423	0,0003423
70,37	60,963	0,100155706	0,099832785	0,32%	-0,000322921	0,000322921
70,39	65,913	0,114900677	0,114523244	0,33%	-0,000377434	0,000377434
70,4	70,863	0,131662757	0,131387469	0,21%	-0,000275288	0,000275288
70,42	75,963	0,15103062	0,15080277	0,15%	-0,00022785	0,00022785
70,46	81,463	0,173570121	0,173001201	0,33%	-0,00056892	0,00056892
70,46	85,363	0,189863554	0,193431839	1,86%	0,003568285	0,003568285
70,48	91,463	0,213677619	0,213258683	0,20%	-0,000418936	0,000418936
70,49	96,463	0,230771239	0,230354421	0,18%	-0,000416818	0,000416818
70,5	106,363	0,258135219	0,257390239	0,29%	-0,00074498	0,00074498
70,51	116,363	0,278202941	0,277619999	0,21%	-0,000582942	0,000582942
70,52	126,363	0,293779138	0,293264795	0,18%	-0,000514343	0,000514343
70,54	136,263	0,30594519	0,305776387	0,06%	-0,000168803	0,000168803
70,55	146,263	0,31620309	0,316219771	0,01%	1,66812E-05	1,66812E-05
70,55	156,163	0,325018824	0,325037282	0,01%	1,84586E-05	1,84586E-05
70,56	166,213	0,332827797	0,332968906	0,04%	0,000141109	0,000141109
70,57	176,063	0,339657037	0,339797518	0,04%	0,000140481	0,000140481
70,58	186,163	0,345964911	0,346084305	0,03%	0,000119394	0,000119394
70,58	196,063	0,351611019	0,351764954	0,04%	0,000153934	0,000153934
70,59	215,913	0,361621538	0,361841574	0,06%	0,000220036	0,000220036
70,59	235,863	0,370356912	0,370532989	0,05%	0,000176077	0,000176077
70,6	255,663	0,378006551	0,378231912	0,06%	0,000225361	0,000225361
70,67	275,463	0,384807428	0,384690443	0,03%	-0,000116985	0,000116985
70,67	295,213	0,391056048	0,391248746	0,05%	0,000192698	0,000192698
70,67	315,113	0,396829726	0,39695377	0,03%	0,000124043	0,000124043
70,68	334,963	0,402141063	0,402140984	0,00%	-7,91775E-08	7,91775E-08
70,68	354,763	0,407083249	0,407099188	0,00%	1,59392E-05	1,59392E-05
70,69	374,563	0,411699981	0,411714194	0,00%	1,4213E-05	1,4213E-05
70,69	394,363	0,41605149	0,416098781	0,01%	4,72907E-05	4,72907E-05
70,69	414,163	0,420160974	0,420221168	0,01%	6,01938E-05	6,01938E-05
70,69	433,963	0,424057251	0,42403105	0,01%	-2,62002E-05	2,62002E-05
70,69	453,763	0,427765248	0,427553541	0,05%	-0,000211707	0,000211707
70,7	473,463	0,431266945	0,430932853	0,08%	-0,000334092	0,000334092
70,7	493,263	0,434645337	0,434330094	0,07%	-0,000315243	0,000315243

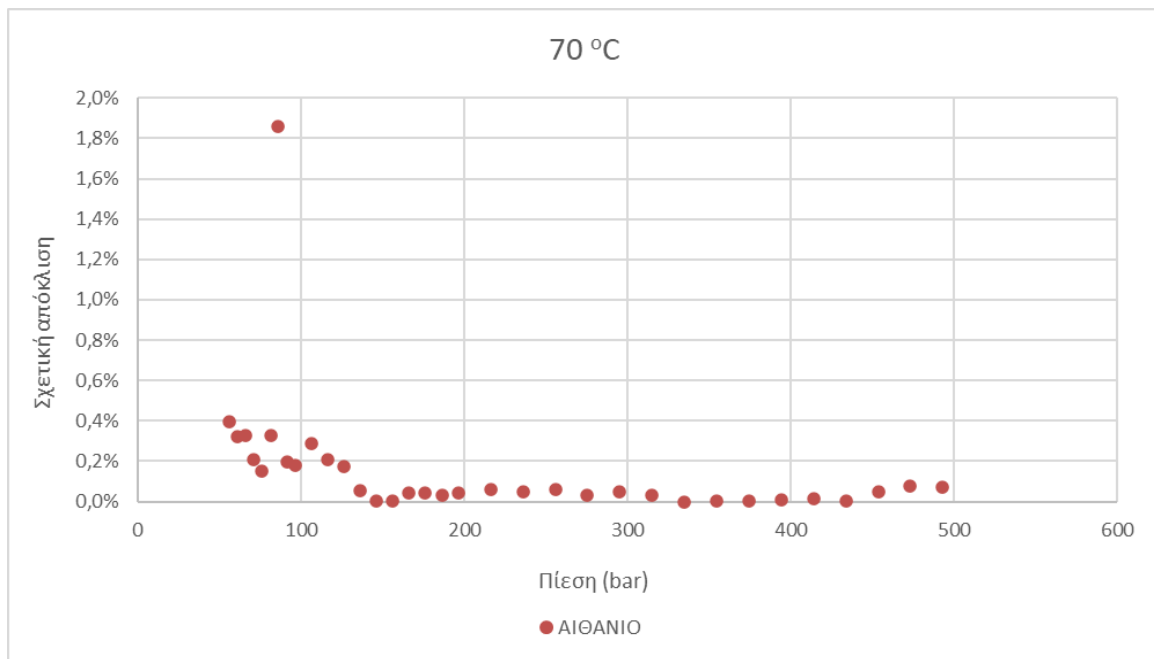
**Πίνακας B.5:** Αποκλίσεις εξίσωσης κατασκευαστή για το αιθάνιο στους 70°C



**Σχήμα B.13:** Γραφική απεικόνιση αποκλίσεων εξίσωσης κατασκευαστή για το αιθάνιο στους 70°C



**Σχήμα B.14:** Γραφική απεικόνιση απόλυτων αποκλίσεων εξίσωσης κατασκευαστή για το αιθάνιο στους 70°C

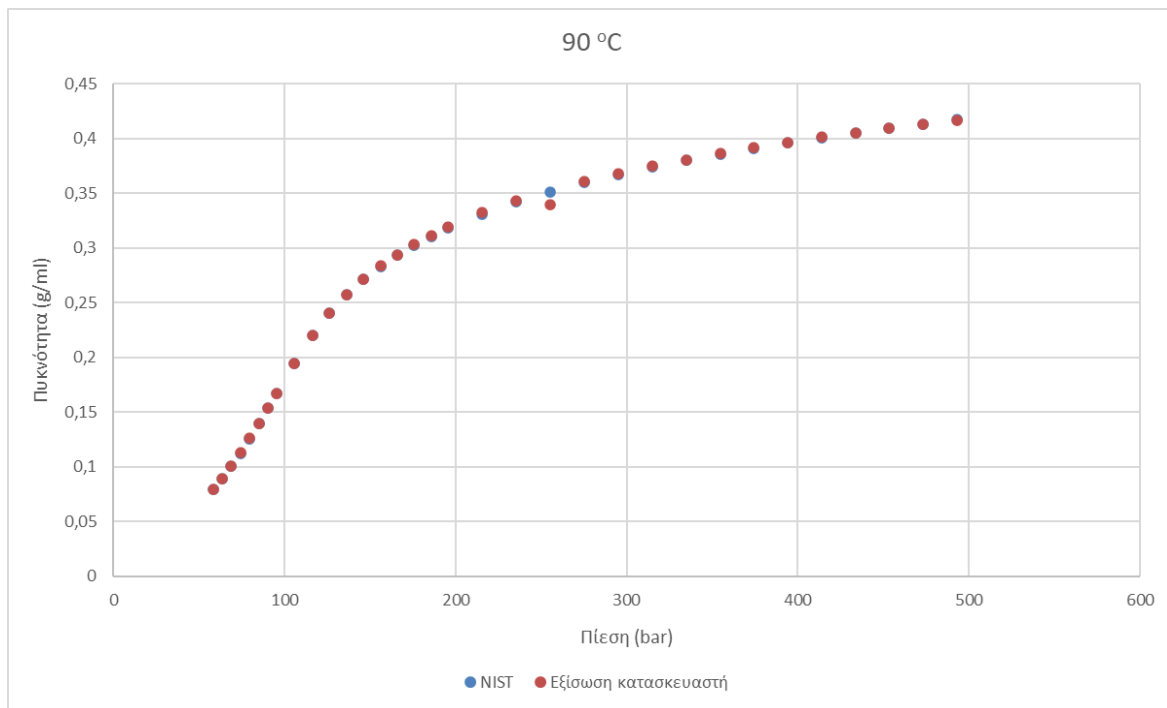


**Σχήμα Β.15:** Γραφική απεικόνιση σχετικών αποκλίσεων εξίσωσης κατασκευαστή για το αιθάνιο στους 70°C

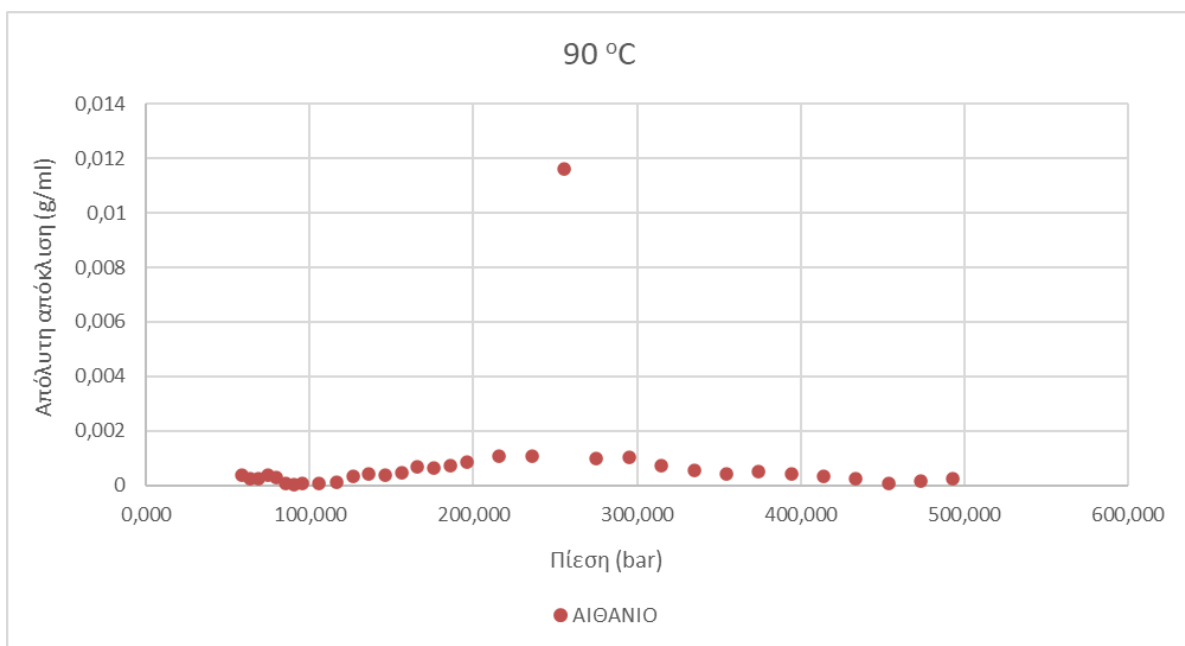
**Στους 90 °C**

T	p	NIST	Εξίσωση κατασκευαστή	Απόκλιση %	Απόκλιση	Απόλυτη απόκλιση
89,42	58,563	0,079404762	0,079049067	0,45%	-0,000355694	0,000355694
89,49	63,663	0,089377647	0,089133149	0,27%	-0,000244498	0,000244498
89,54	68,863	0,100315876	0,100575258	0,26%	0,000259382	0,000259382
89,58	74,263	0,112537184	0,11292952	0,35%	0,000392336	0,000392336
89,62	79,763	0,125875504	0,12615487	0,22%	0,000279366	0,000279366
89,67	85,163	0,139736765	0,139822581	0,06%	8,58163E-05	8,58163E-05
89,72	90,363	0,153599747	0,153563933	0,02%	-3,58142E-05	3,58142E-05
89,76	95,463	0,167437918	0,167357945	0,05%	-7,99732E-05	7,99732E-05
89,79	105,563	0,194200268	0,194118863	0,04%	-8,14047E-05	8,14047E-05
89,92	116,363	0,219712311	0,219837379	0,06%	0,000125068	0,000125068
89,94	126,263	0,239981872	0,24031058	0,14%	0,000328708	0,000328708
89,96	136,213	0,256861236	0,257296844	0,17%	0,000435608	0,000435608
89,98	146,263	0,271278208	0,271646905	0,14%	0,000368697	0,000368697
90,06	156,063	0,283039697	0,283488974	0,16%	0,000449277	0,000449277
90,15	165,813	0,293166895	0,293844076	0,23%	0,000677181	0,000677181
90,17	175,863	0,302483306	0,303121228	0,21%	0,000637922	0,000637922
90,18	185,813	0,310680411	0,311401082	0,23%	0,000720671	0,000720671
90,19	195,713	0,318018569	0,318865009	0,27%	0,00084644	0,00084644
90,2	215,663	0,330877147	0,331950255	0,32%	0,001073108	0,001073108
90,21	235,563	0,341758274	0,342810677	0,31%	0,001052403	0,001052403
90,23	255,463	0,351191019	0,339573018	3,36%	-0,011618001	0,011618001
90,24	275,363	0,35953992	0,360525738	0,27%	0,000985818	0,000985818
90,25	295,213	0,36701572	0,368027319	0,28%	0,001011599	0,001011599
90,26	314,963	0,373770092	0,374496869	0,19%	0,000726777	0,000726777
90,28	334,813	0,379973146	0,380504149	0,14%	0,000531003	0,000531003
90,3	354,663	0,385700603	0,386106287	0,11%	0,000405684	0,000405684
90,31	374,363	0,390994681	0,391499224	0,13%	0,000504543	0,000504543
90,32	394,263	0,395995576	0,396408402	0,10%	0,000412825	0,000412825
90,33	414,063	0,400663224	0,400987706	0,08%	0,000324482	0,000324482
90,34	433,813	0,405051333	0,405286465	0,06%	0,000235133	0,000235133
90,35	453,563	0,409213448	0,409278921	0,02%	6,54723E-05	6,54723E-05
90,37	473,313	0,413153512	0,412995945	0,04%	-0,000157567	0,000157567
90,38	492,963	0,416895369	0,416639038	0,06%	-0,000256331	0,000256331

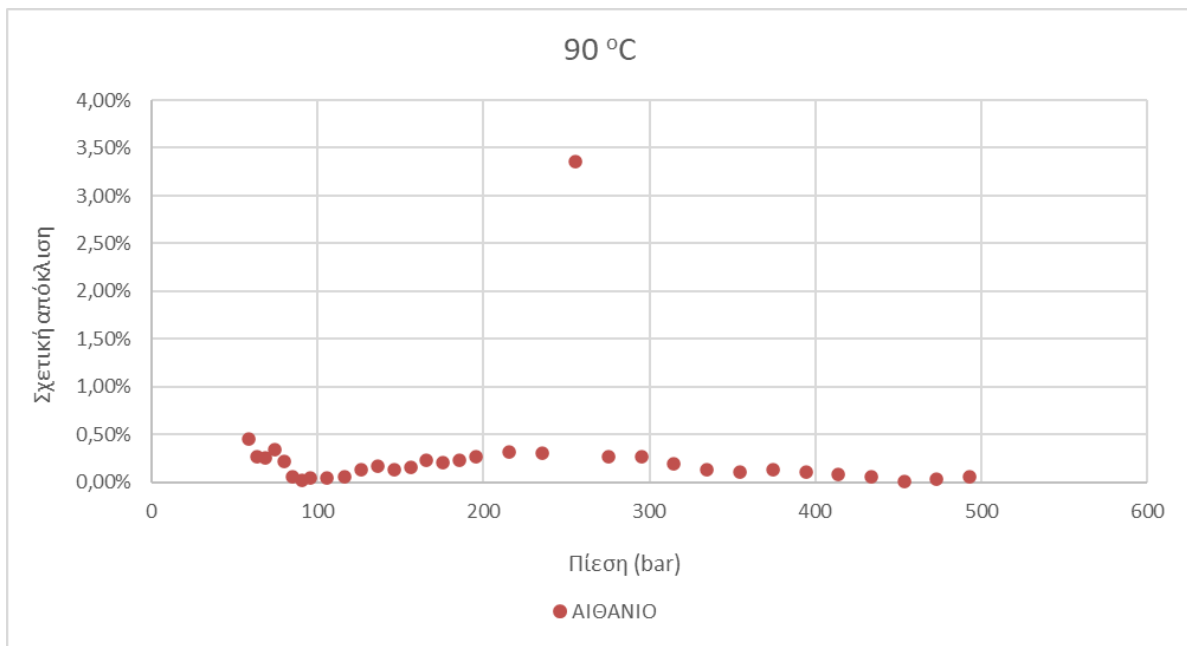
**Πίνακας Β.6:** Αποκλίσεις εξίσωσης κατασκευαστή για το αιθάνιο στους 90°C



**Σχήμα Β.16:** Γραφική απεικόνιση αποκλίσεων εξίσωσης κατασκευαστή για το αιθάνιο στους 90°C

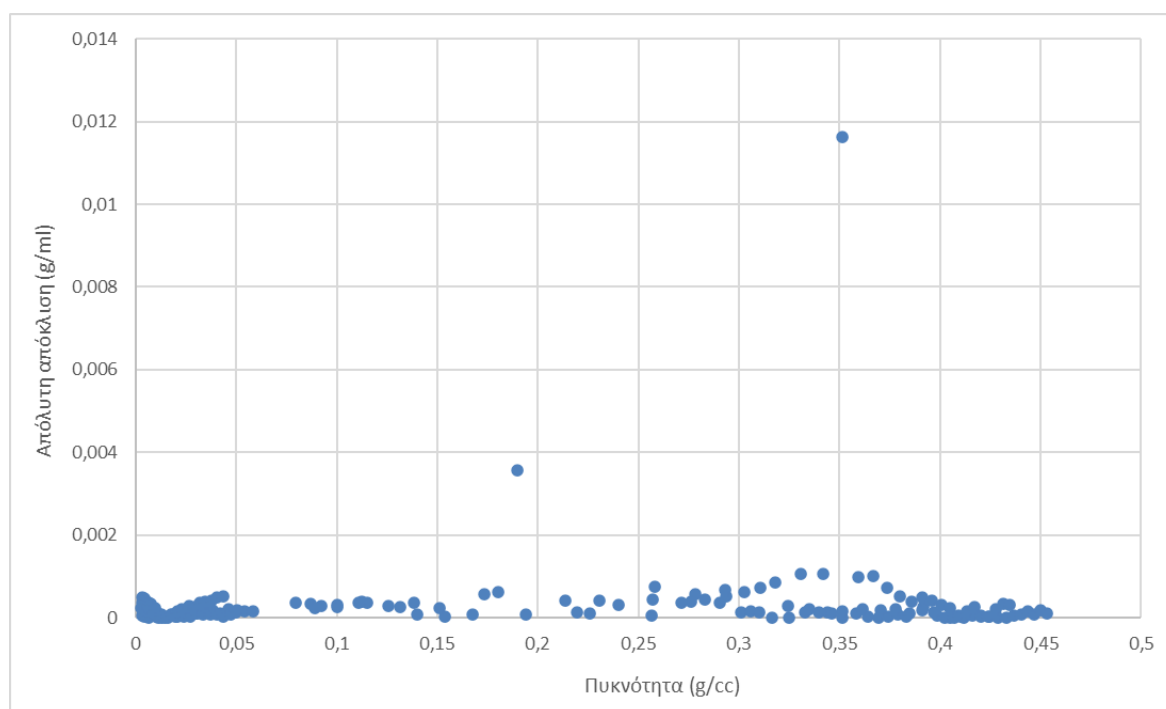


**Σχήμα Β.17:** Γραφική απεικόνιση απόλυτων αποκλίσεων εξίσωσης κατασκευαστή για το αιθάνιο στους 90°C

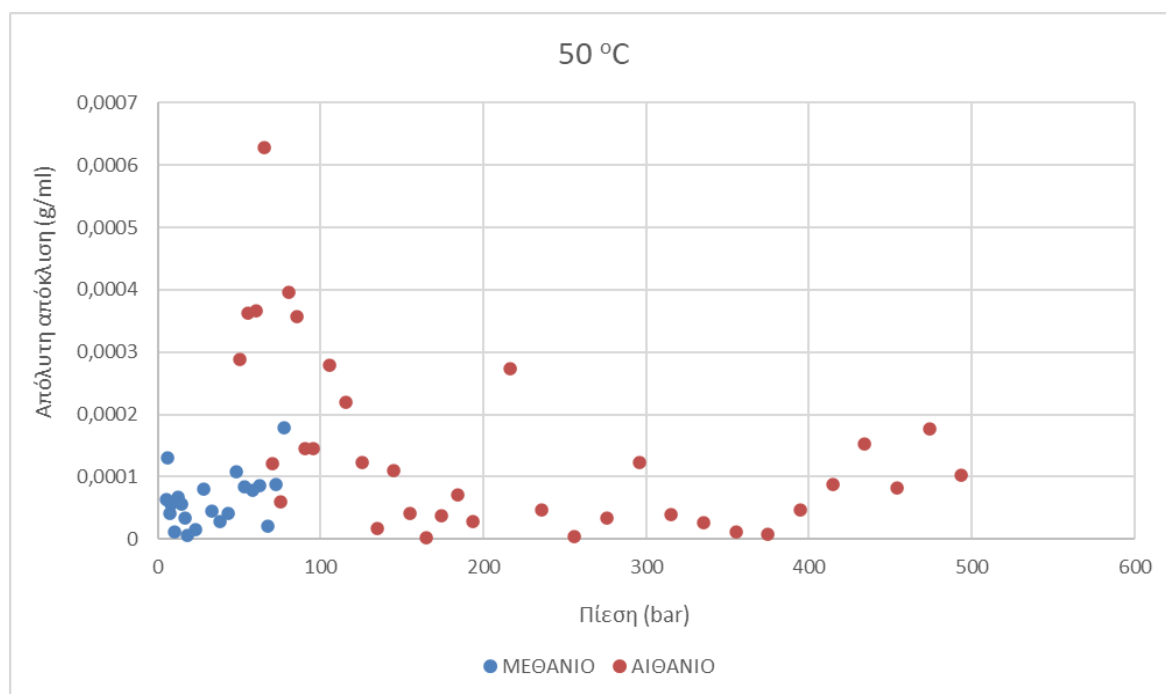


**Σχήμα Β.18:** Γραφική απεικόνιση σχετικών αποκλίσεων εξίσωσης κατασκευαστή για το αιθάνιο στους 90°C

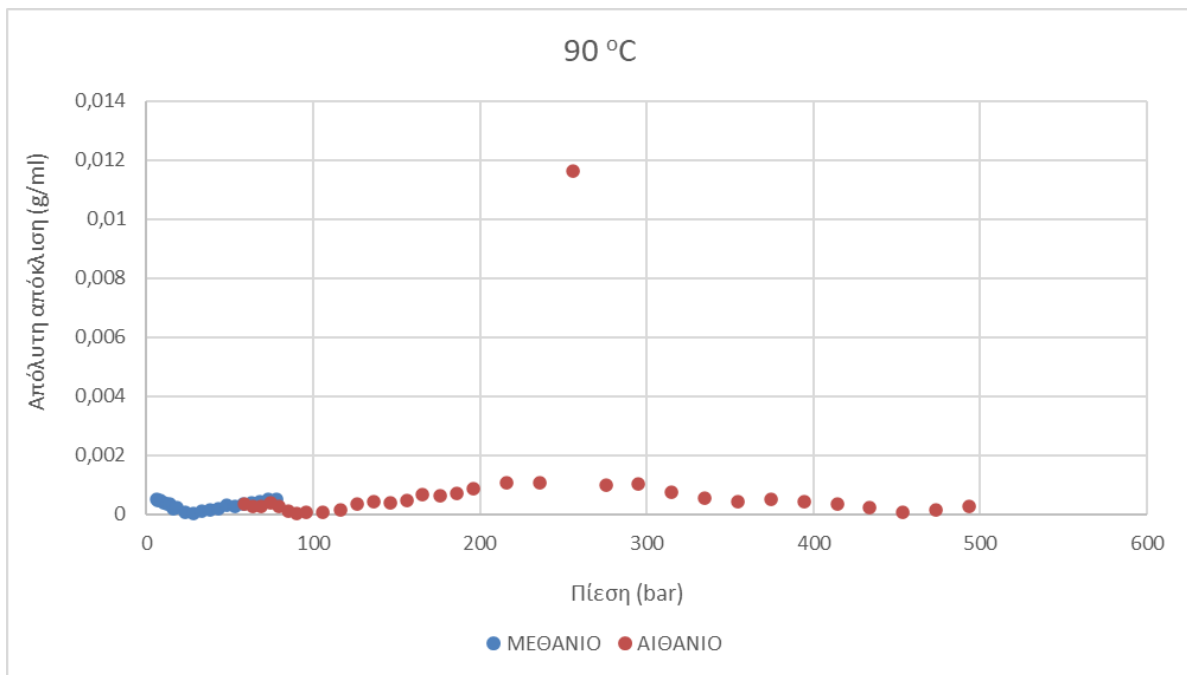
## ΜΕΘΑΝΙΟ-ΑΙΘΑΝΙΟ



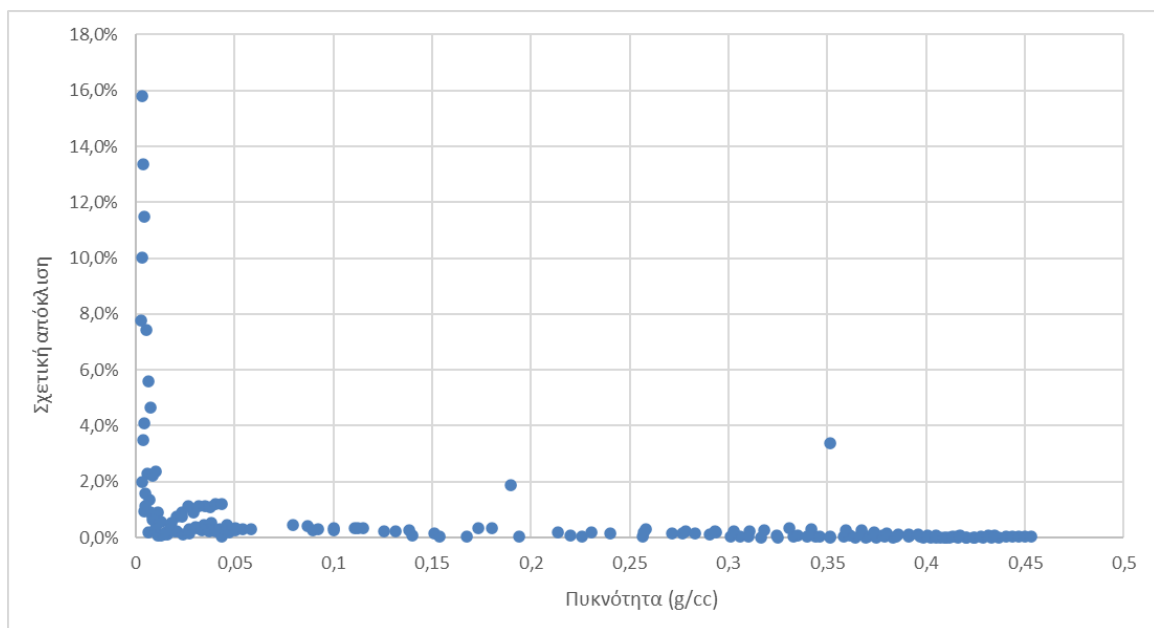
**Σχήμα Β.19:** Γραφική απεικόνιση απόλυτων αποκλίσεων εξίσωσης κατασκευαστή για το μεθάνιο και το αιθάνιο σε διαφορετικές θερμοκρασίες και πιέσεις



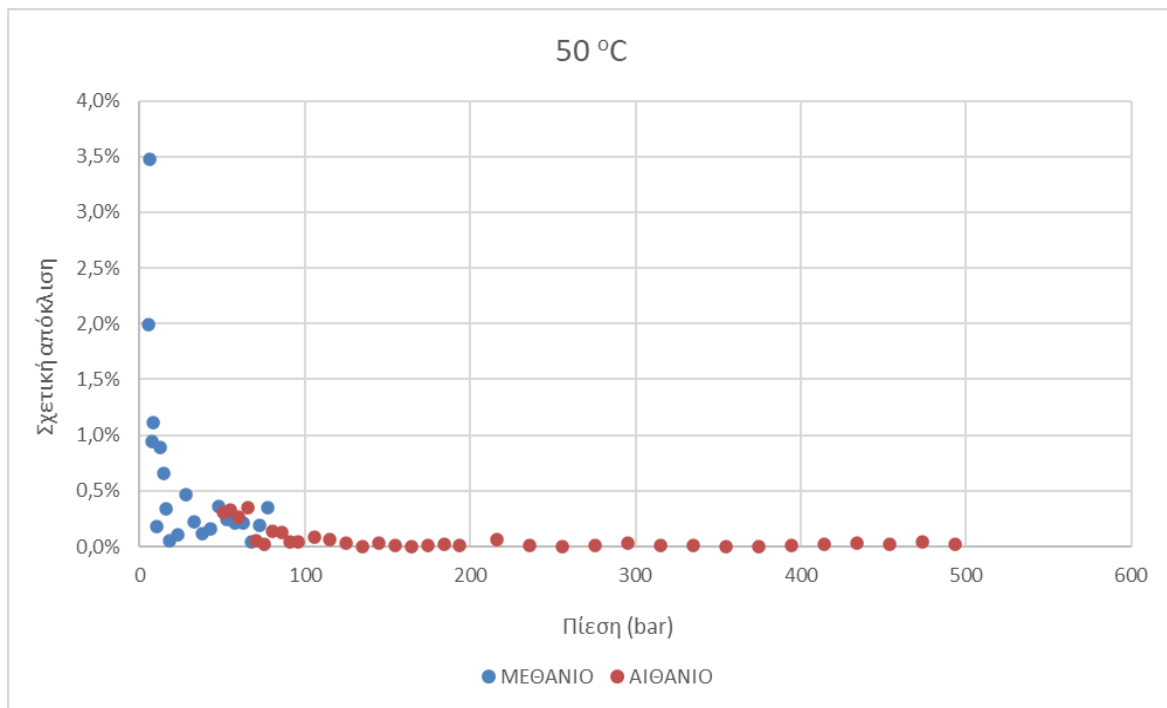
**Σχήμα Β.20:** Γραφική απεικόνιση απόλυτων αποκλίσεων εξίσωσης κατασκευαστή για το μεθάνιο και το αιθάνιο στους 50 °C



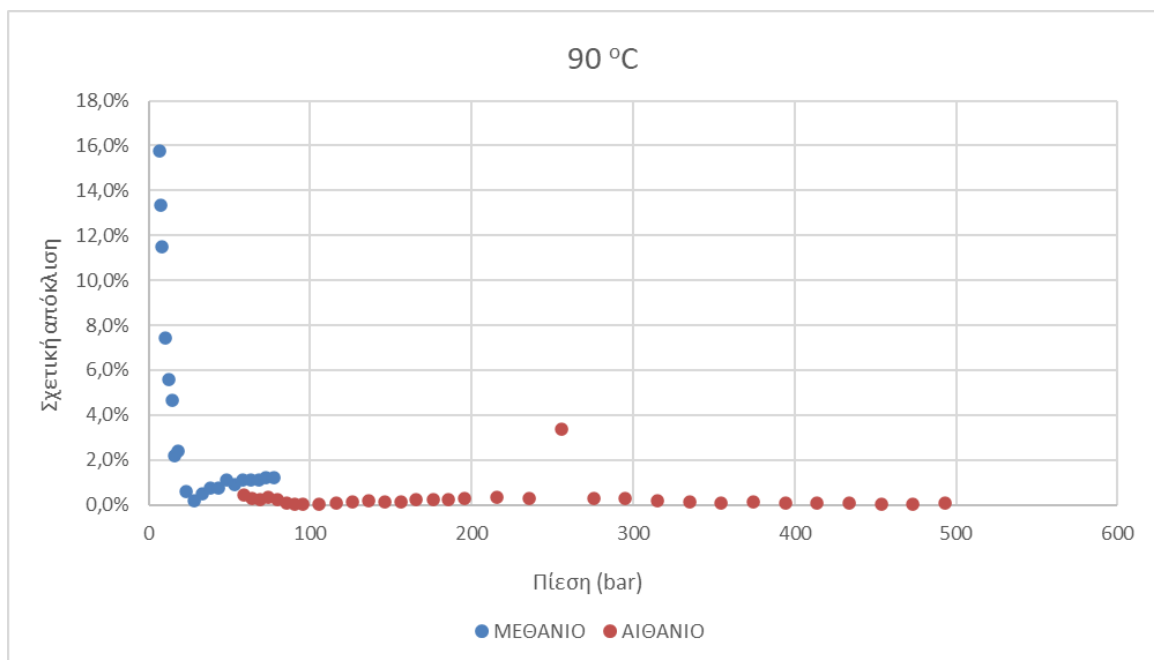
**Σχήμα B.21:** Γραφική απεικόνιση απόλυτων αποκλίσεων εξίσωσης κατασκευαστή για το μεθάνιο και το αιθάνιο στους 90 °C



**Σχήμα B.22:** Γραφική απεικόνιση σχετικών αποκλίσεων εξίσωσης κατασκευαστή για το μεθάνιο και το αιθάνιο σε διαφορετικές θερμοκρασίες και πιέσεις



**Σχήμα Β.23:** Γραφική απεικόνιση σχετικών αποκλίσεων εξίσωσης κατασκευαστή για το μεθάνιο και το αιθάνιο στους 50 °C



**Σχήμα Β.24:** Γραφική απεικόνιση σχετικών αποκλίσεων εξίσωσης κατασκευαστή για το μεθάνιο και το αιθάνιο στους 90 °C

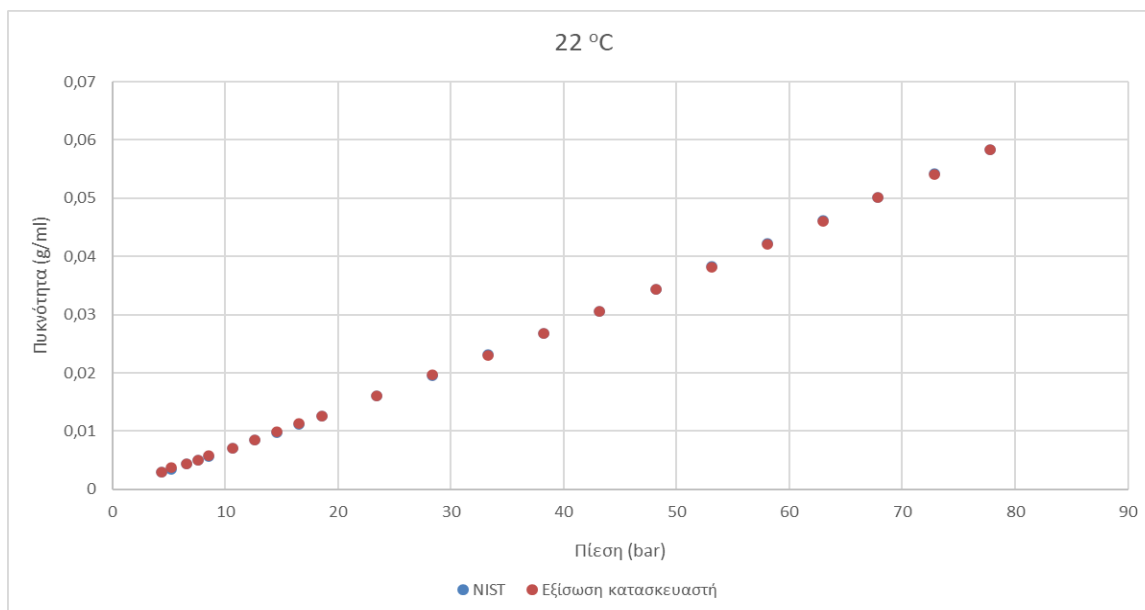
## Παράρτημα Γ

### ΜΕΘΑΝΙΟ

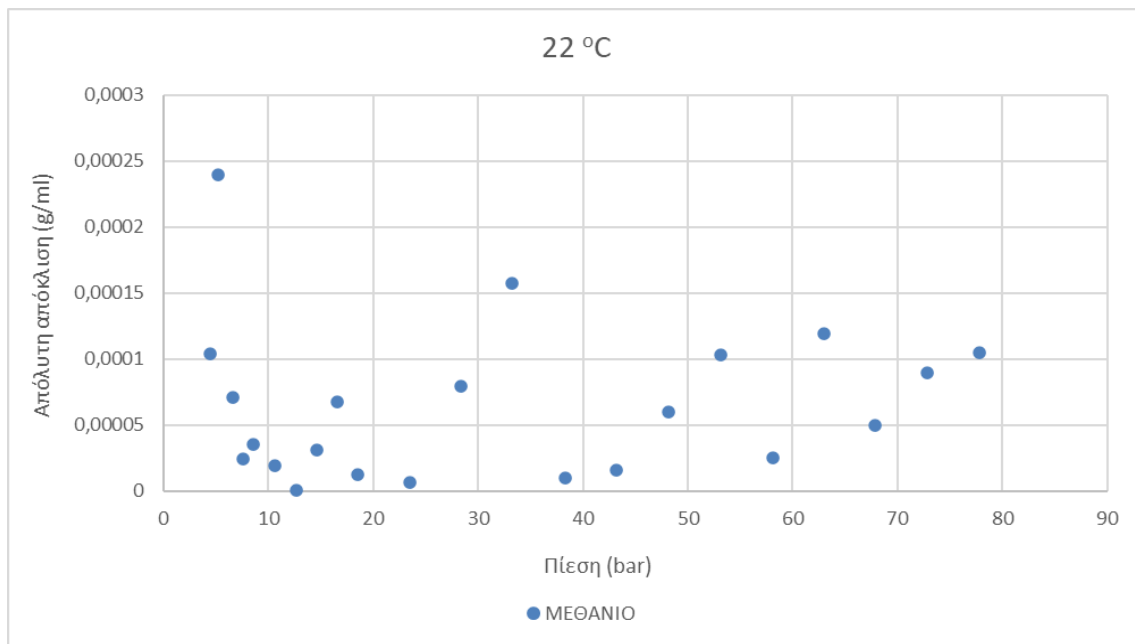
Στους 22 °C

T	p	NIST	Εξίσωση κατασκευαστή	Απόκλιση %	Απόκλιση	Απόλυτη απόκλιση
21,33	4,413	0,002918897	0,003022583	3,49%	0,00010369	0,000103686
21,35	5,213	0,003449328	0,003689308	6,72%	0,00023998	0,00023998
21,36	6,613	0,00438615	0,004457022	1,60%	7,0872E-05	7,08718E-05
21,37	7,613	0,005057724	0,005033148	0,49%	-2,458E-05	2,45755E-05
21,39	8,563	0,005697923	0,005733448	0,62%	3,5525E-05	3,55247E-05
21,4	10,663	0,007121722	0,007140761	0,27%	1,9039E-05	1,90388E-05
21,41	12,663	0,008487907	0,008487342	0,01%	-5,643E-07	5,64255E-07
21,42	14,613	0,009829425	0,009860648	0,32%	3,1222E-05	3,12225E-05
21,43	16,563	0,011191909	0,011259219	0,60%	6,731E-05	6,73095E-05
21,44	18,563	0,012592368	0,012579971	0,10%	-1,24E-05	1,23973E-05
21,45	23,463	0,016056211	0,016049473	0,04%	-6,738E-06	6,73803E-06
21,45	28,363	0,019570571	0,019649698	0,40%	7,9127E-05	7,91273E-05
21,61	33,263	0,02313494	0,022977525	0,68%	-0,0001574	0,000157415
21,61	38,263	0,026850393	0,026840627	0,04%	-9,766E-06	9,76573E-06
21,62	43,163	0,030553327	0,030537145	0,05%	-1,618E-05	1,61827E-05
21,62	48,163	0,034396337	0,03433656	0,17%	-5,978E-05	5,97766E-05
21,63	53,113	0,038261444	0,038158709	0,27%	-0,0001027	0,000102734
21,63	58,063	0,042188551	0,042163418	0,06%	-2,513E-05	2,51329E-05
21,64	62,963	0,046132218	0,046013164	0,26%	-0,0001191	0,000119054
21,64	67,863	0,050134044	0,05008395	0,10%	-5,009E-05	5,00941E-05
21,64	72,813	0,054230887	0,054141169	0,17%	-8,972E-05	8,9718E-05
21,65	77,763	0,058375885	0,058271144	0,18%	-0,0001047	0,00010474

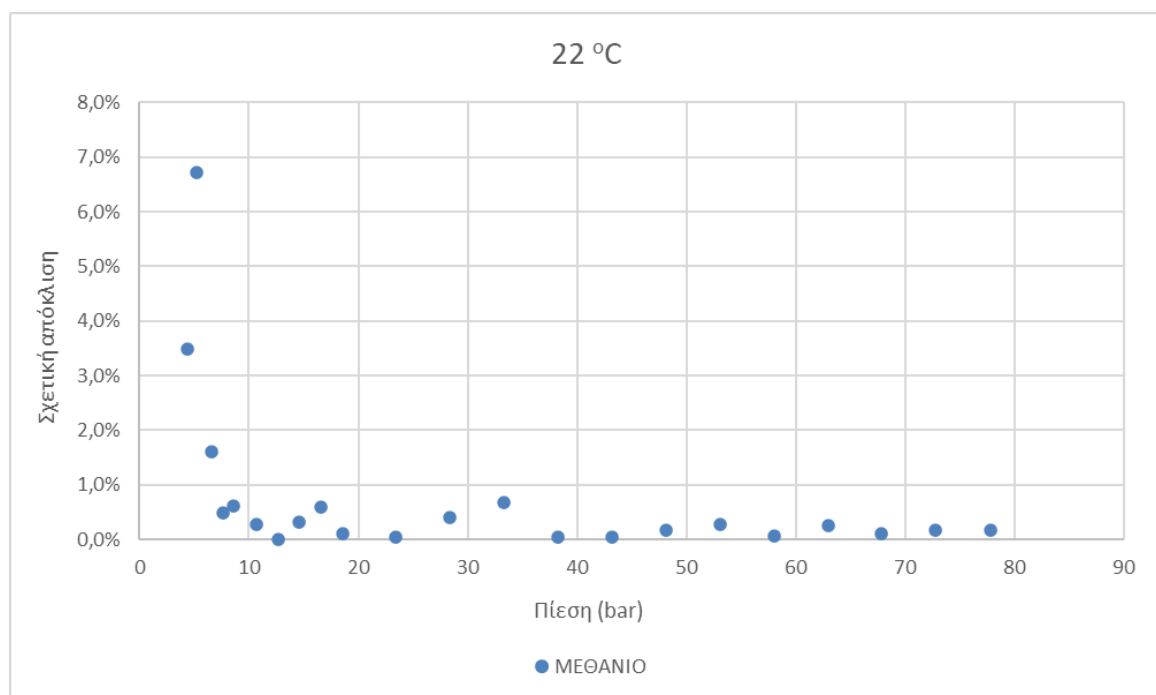
**Πίνακας Γ.1:** Αποκλίσεις εξίσωσης κατασκευαστή (6.10) για το μεθάνιο στους 22°C



**Σχήμα Γ.1:** Γραφική απεικόνιση αποκλίσεων εξίσωσης κατασκευαστή (6.10) για το μεθάνιο στους 22°C



**Σχήμα Γ.2:** Γραφική απεικόνιση απόλυτων αποκλίσεων εξίσωσης κατασκευαστή (6.10) για το μεθάνιο στους 22°C

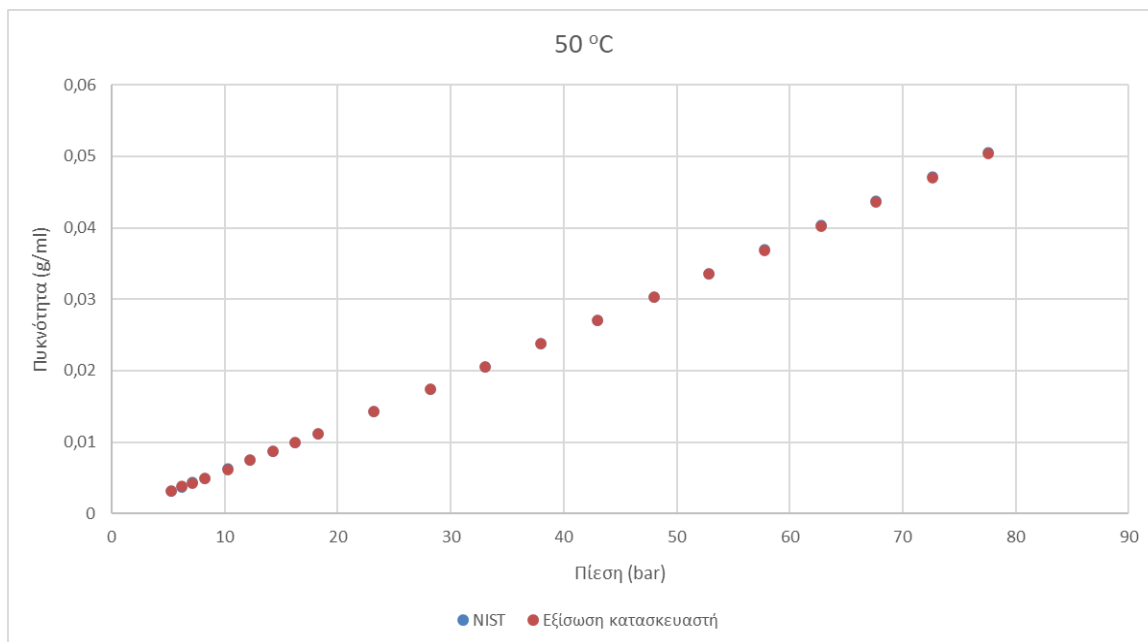


**Σχήμα Γ.3:** Γραφική απεικόνιση σχετικών αποκλίσεων εξίσωσης κατασκευαστή (6.10) για το μεθάνιο στους 22°C

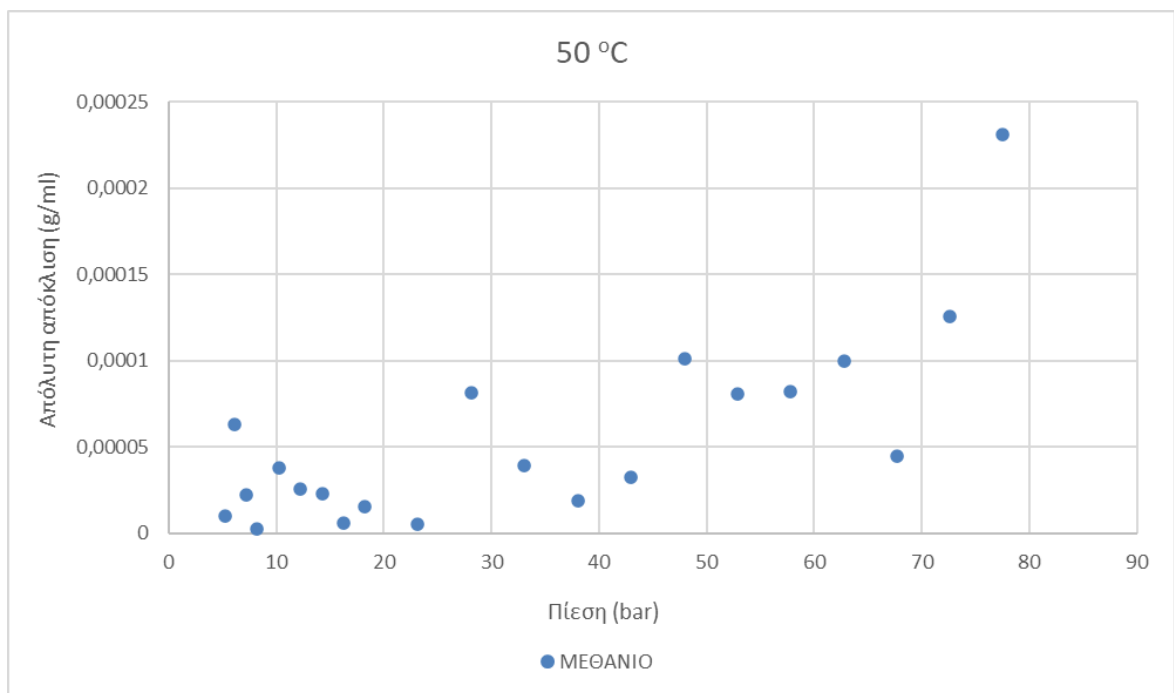
Στους 50 °C

T	p	NIST	Εξίσωση κατασκευαστή	Απόκλιση %	Απόκλιση	Απόλυτη απόκλιση
49,34	5,263	0,003171797	0,0031618	0,32%	-9,996E-06	9,99645E-06
49,46	6,163	0,003715843	0,003778682	1,68%	6,2839E-05	6,28393E-05
49,59	7,163	0,004322167	0,004299721	0,52%	-2,245E-05	2,24455E-05
49,67	8,213	0,004960887	0,004958332	0,05%	-2,554E-06	2,55449E-06
49,76	10,263	0,006213248	0,006175097	0,62%	-3,815E-05	3,81517E-05
49,83	12,263	0,007440884	0,007466402	0,34%	2,5518E-05	2,5518E-05
49,87	14,263	0,008675124	0,00869802	0,26%	2,2896E-05	2,28962E-05
49,91	16,263	0,009923469	0,0099297	0,06%	6,2313E-06	6,23129E-06
49,95	18,263	0,011176707	0,011161449	0,14%	-1,526E-05	1,52584E-05
49,99	23,163	0,014257332	0,014262629	0,04%	5,2969E-06	5,29689E-06
50,04	28,163	0,017425328	0,017343996	0,47%	-8,133E-05	8,13327E-05
50,09	33,063	0,020568421	0,020529271	0,19%	-3,915E-05	3,91499E-05
50,12	38,013	0,02378102	0,023762247	0,08%	-1,877E-05	1,87733E-05
50,15	42,963	0,027029036	0,026996186	0,12%	-3,285E-05	3,28498E-05
50,18	47,963	0,030343819	0,030242424	0,33%	-0,0001014	0,000101395
50,21	52,863	0,03362348	0,033542721	0,24%	-8,076E-05	8,07591E-05
50,23	57,813	0,036968363	0,036885926	0,22%	-8,244E-05	8,24373E-05
50,25	62,763	0,040342923	0,040243038	0,25%	-9,988E-05	9,9885E-05
50,27	67,663	0,043710853	0,043665756	0,10%	-4,51E-05	4,50966E-05
50,29	72,613	0,047138813	0,047013178	0,27%	-0,0001256	0,000125635
50,32	77,563	0,050587898	0,050356855	0,46%	-0,000231	0,000231042

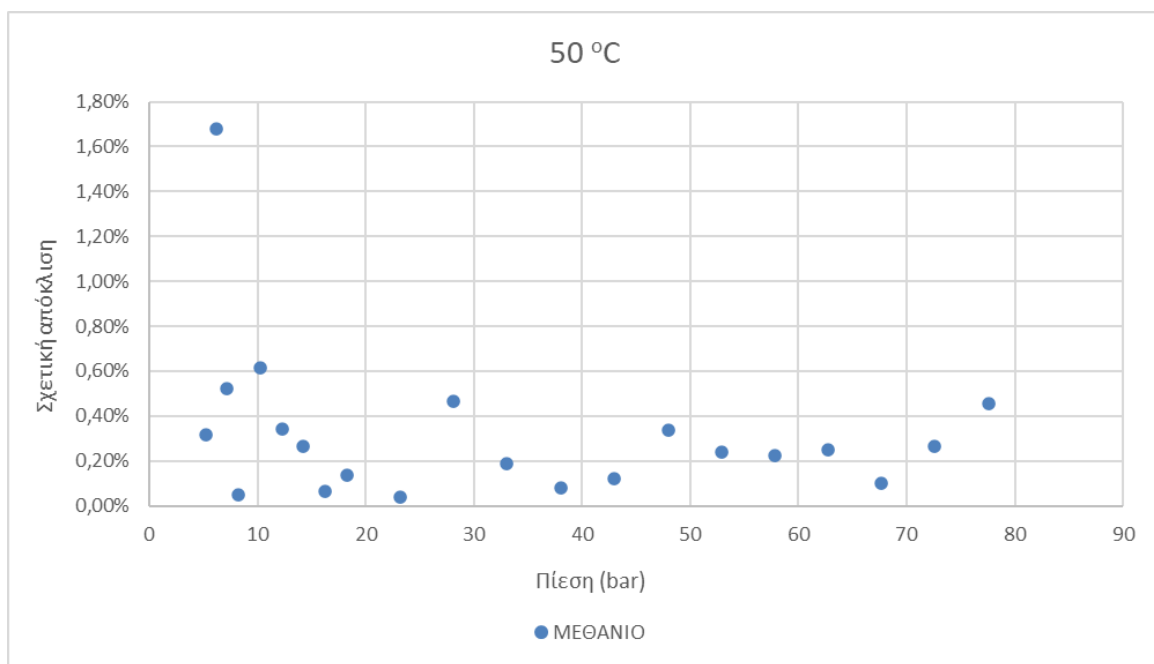
Πίνακας Γ.2: Αποκλίσεις εξίσωσης κατασκευαστή (6.10) για το μεθάνιο στους 50°C



Σχήμα Γ.4: Γραφική απεικόνιση αποκλίσεων εξίσωσης κατασκευαστή (6.10) για το μεθάνιο στους 50°C



**Σχήμα Γ.5:** Γραφική απεικόνιση απόλυτων αποκλίσεων εξίσωσης κατασκευαστή (6.10) για το μεθάνιο στους 50°C

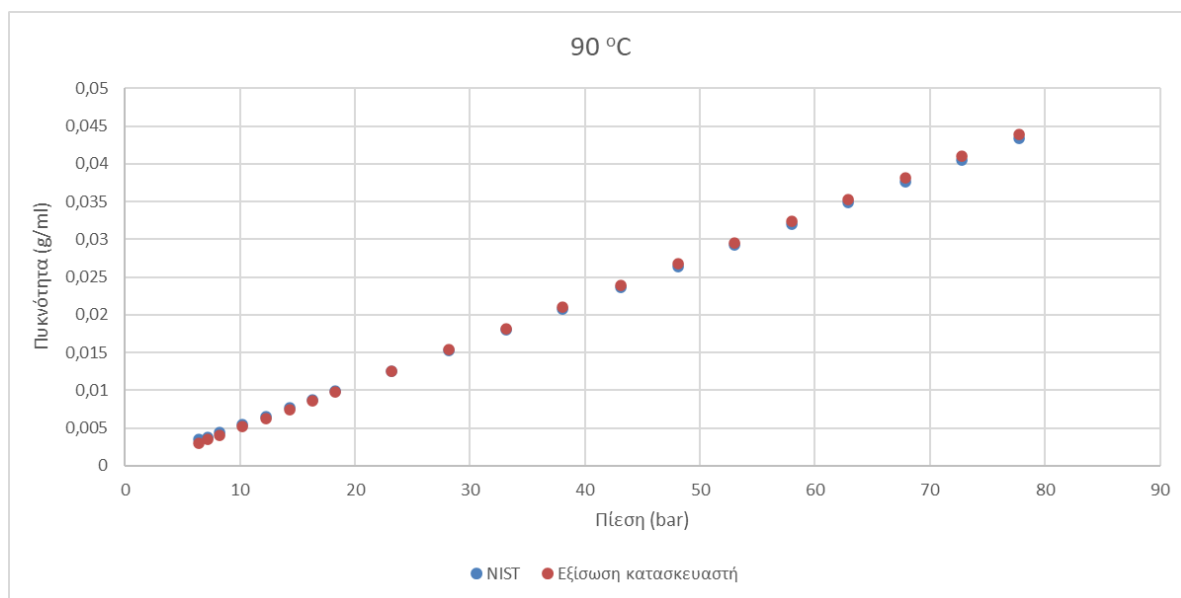


**Σχήμα Γ.6:** Γραφική απεικόνιση σχετικών αποκλίσεων εξίσωσης κατασκευαστή (6.10) για το μεθάνιο στους 50°C

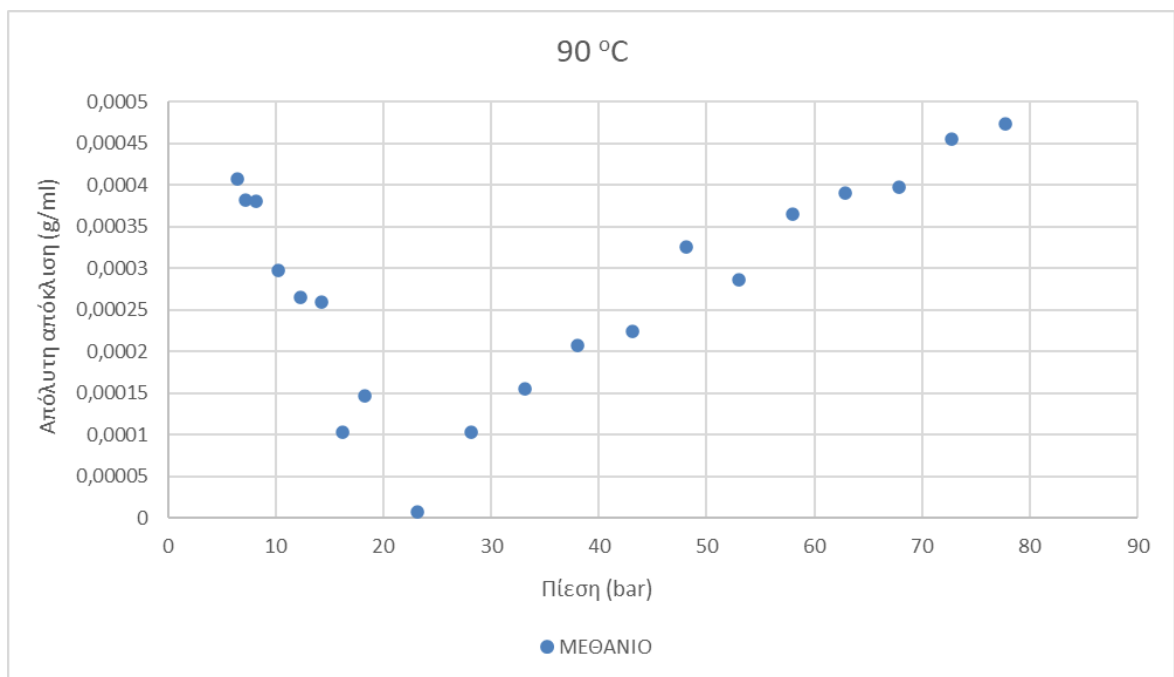
Στους 90 °C

T	ρ	NIST	Εξίσωση κατασκευαστή	Απόκλιση %	Απόκλιση	Απόλυτη απόκλιση
89,69	6,463	0,003455112	0,003048288	12,51%	-0,0004068	0,000406824
89,78	7,163	0,003829476	0,003447659	10,49%	-0,0003818	0,000381817
89,83	8,213	0,004393576	0,004013457	9,04%	-0,0003801	0,000380119
89,87	10,213	0,005470843	0,005173208	5,59%	-0,0002976	0,000297635
89,9	12,263	0,00657828	0,00631352	4,11%	-0,0002648	0,00026476
89,95	14,313	0,007688579	0,007429021	3,43%	-0,0002596	0,000259558
89,97	16,263	0,008755572	0,008653352	1,17%	-0,0001022	0,00010222
90	18,313	0,009878907	0,009732337	1,49%	-0,0001466	0,00014657
90,02	23,213	0,012563213	0,012570851	0,06%	7,6379E-06	7,63788E-06
90,04	28,163	0,015282356	0,015385222	0,67%	0,00010287	0,000102866
90,05	33,163	0,018051054	0,018206766	0,86%	0,00015571	0,000155712
90,07	38,063	0,0207812	0,020988818	0,99%	0,00020762	0,000207618
90,15	43,113	0,023606903	0,023831307	0,95%	0,0002244	0,000224403
90,16	48,063	0,026396361	0,026722446	1,23%	0,00032609	0,000326085
90,18	53,013	0,029198672	0,029484603	0,97%	0,00028593	0,00028593
90,19	57,963	0,032014708	0,032379955	1,13%	0,00036525	0,000365247
90,2	62,863	0,034813488	0,035203614	1,11%	0,00039013	0,000390126
90,21	67,863	0,037680645	0,038077268	1,05%	0,00039662	0,000396623
90,22	72,763	0,040500157	0,040955168	1,12%	0,00045501	0,000455011
90,23	77,763	0,043385455	0,043858227	1,08%	0,00047277	0,000472773

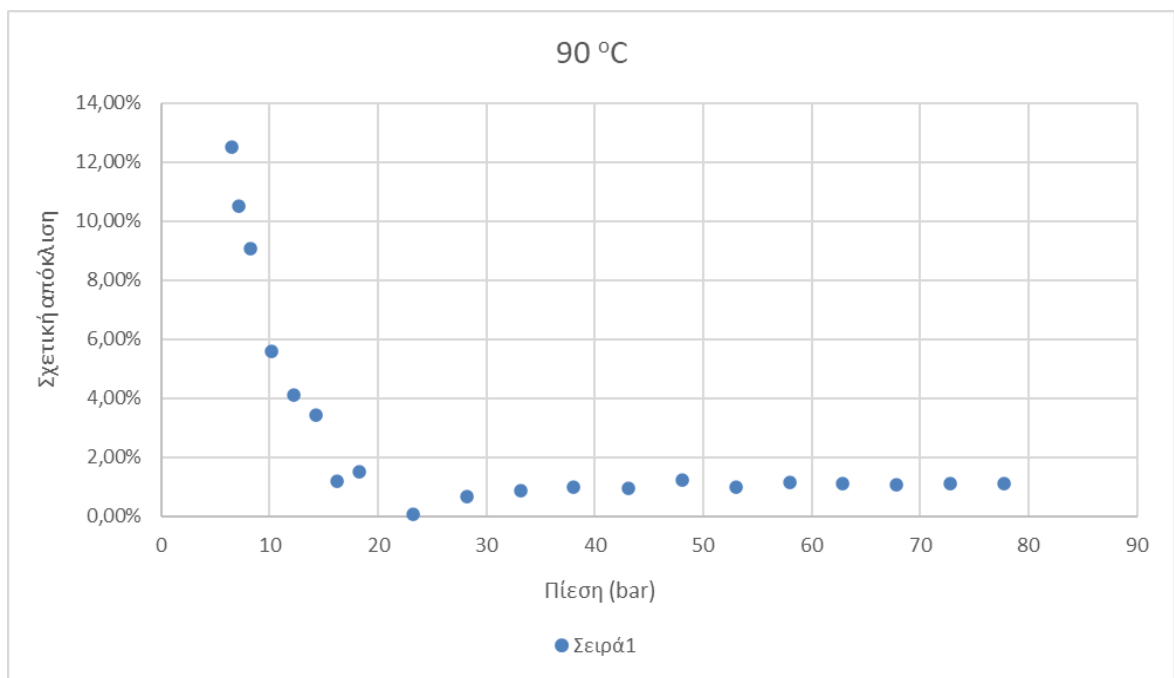
**Πίνακας Γ.3:** Αποκλίσεις εξίσωσης κατασκευαστή (6.10) για το μεθάνιο στους 90°C



**Σχήμα Γ.7:** Γραφική απεικόνιση αποκλίσεων εξίσωσης κατασκευαστή (6.10) για το μεθάνιο στους 90°C



**Σχήμα Γ.8:** Γραφική απεικόνιση απόλυτων αποκλίσεων εξίσωσης κατασκευαστή (6.10) για το μεθάνιο στους 90°C



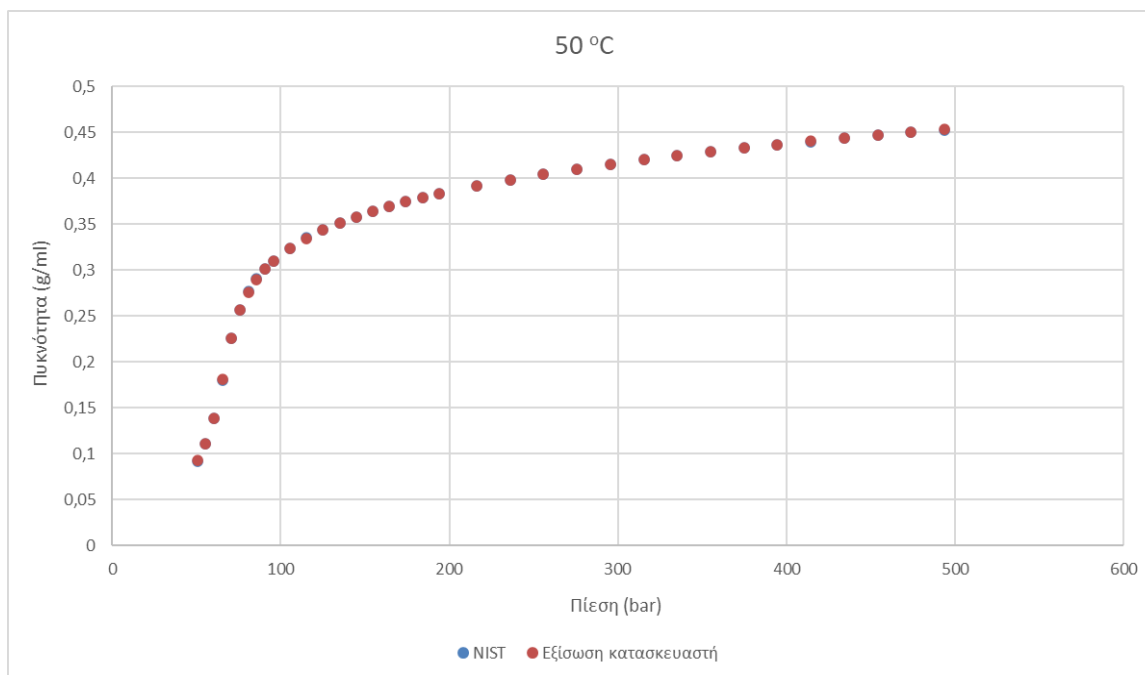
**Σχήμα Γ.9:** Γραφική απεικόνιση σχετικών αποκλίσεων εξίσωσης κατασκευαστή (6.10) για το μεθάνιο στους 90°C

## ΑΙΘΑΝΙΟ

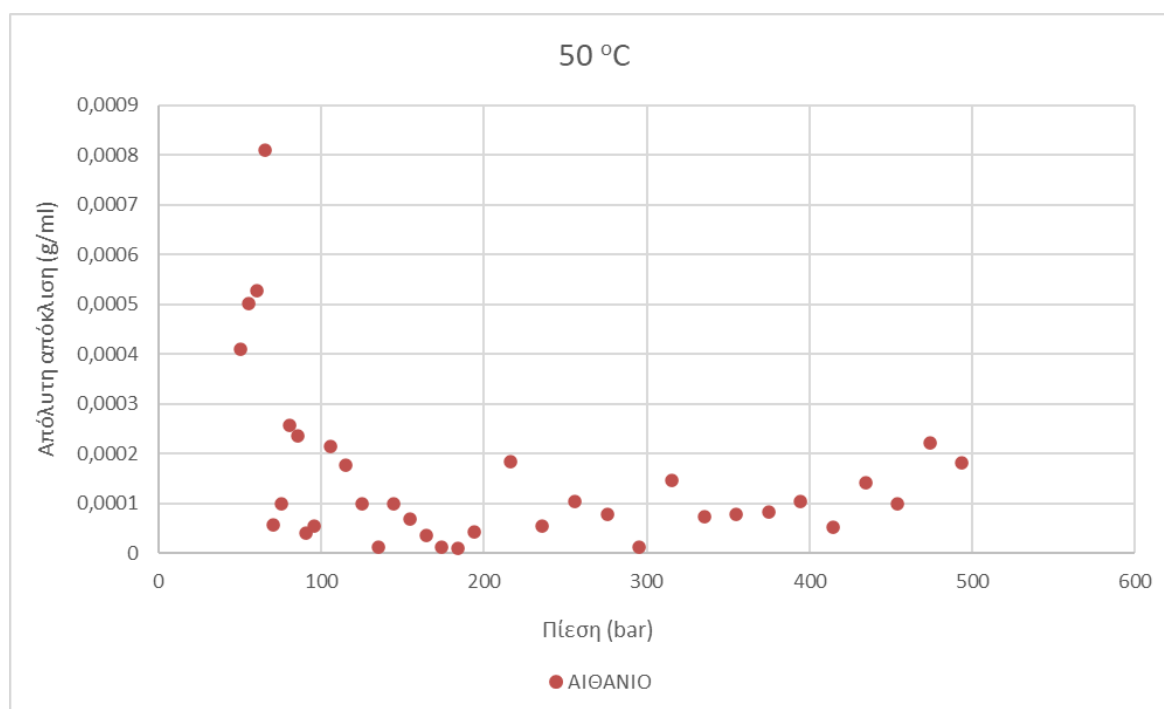
Στους 50 °C

Τ	ρ	NIST	Εξίσωση κατασκευαστή	Απόκλιση %	Απόκλιση	Απόλυτη απόκλιση
50,55	50,563	0,092205203	0,092613946	0,44%	0,00040874	0,000408743
50,55	55,163	0,110760137	0,111260761	0,45%	0,00050062	0,000500624
50,55	60,113	0,138216102	0,138744001	0,38%	0,0005279	0,000527898
50,56	65,313	0,180204636	0,181014733	0,45%	0,0008101	0,000810097
50,58	70,513	0,225983403	0,22604044	0,03%	5,7037E-05	5,70372E-05
50,6	75,613	0,256702189	0,256801918	0,04%	9,9729E-05	9,97292E-05
50,6	80,663	0,27641139	0,276155703	0,09%	-0,0002557	0,000255687
50,61	85,663	0,290362441	0,290128044	0,08%	-0,0002344	0,000234398
50,62	90,613	0,301106073	0,301067009	0,01%	-3,906E-05	3,90637E-05
50,62	95,613	0,310025028	0,309971455	0,02%	-5,357E-05	5,35728E-05
50,63	105,463	0,324102177	0,32388814	0,07%	-0,000214	0,000214037
50,63	115,313	0,335031292	0,334855264	0,05%	-0,000176	0,000176028
50,63	125,163	0,343935913	0,343836678	0,03%	-9,923E-05	9,92344E-05
50,64	134,963	0,3515451	0,351532819	0,00%	-1,228E-05	1,22804E-05
50,64	144,813	0,358156879	0,358255992	0,03%	9,9113E-05	9,9113E-05
50,64	154,663	0,364156519	0,364088972	0,02%	-6,755E-05	6,75467E-05
50,65	164,463	0,36949146	0,369455319	0,01%	-3,614E-05	3,61417E-05
50,65	174,263	0,3744289	0,37441618	0,00%	-1,272E-05	1,27204E-05
50,65	184,063	0,378955381	0,378965497	0,00%	1,0116E-05	1,01158E-05
50,65	193,813	0,383159071	0,383116276	0,01%	-4,28E-05	4,2795E-05
50,66	216,063	0,391755503	0,391938963	0,05%	0,00018346	0,000183459
50,66	235,963	0,398557426	0,398502639	0,01%	-5,479E-05	5,47866E-05
50,67	255,863	0,404689172	0,404584923	0,03%	-0,0001042	0,000104249
50,67	275,713	0,410288153	0,410209706	0,02%	-7,845E-05	7,84473E-05
50,67	295,613	0,415459651	0,415470456	0,00%	1,0805E-05	1,08047E-05
50,67	315,463	0,420249701	0,420102857	0,03%	-0,0001468	0,000146845
50,68	335,213	0,424691338	0,424617077	0,02%	-7,426E-05	7,42609E-05
50,68	355,063	0,428899999	0,428821888	0,02%	-7,811E-05	7,81106E-05
50,68	374,863	0,43285714	0,432774713	0,02%	-8,243E-05	8,24275E-05
50,69	394,663	0,436598587	0,436494052	0,02%	-0,0001045	0,000104535
50,69	414,463	0,440165141	0,440217378	0,01%	5,2236E-05	5,22362E-05
50,69	434,263	0,443558614	0,443699872	0,03%	0,00014126	0,000141257
50,69	454,063	0,446805764	0,446904026	0,02%	9,8262E-05	9,82618E-05
50,69	473,813	0,449907764	0,450129757	0,05%	0,00022199	0,000221993
50,7	493,563	0,452876555	0,453058129	0,04%	0,00018157	0,000181574

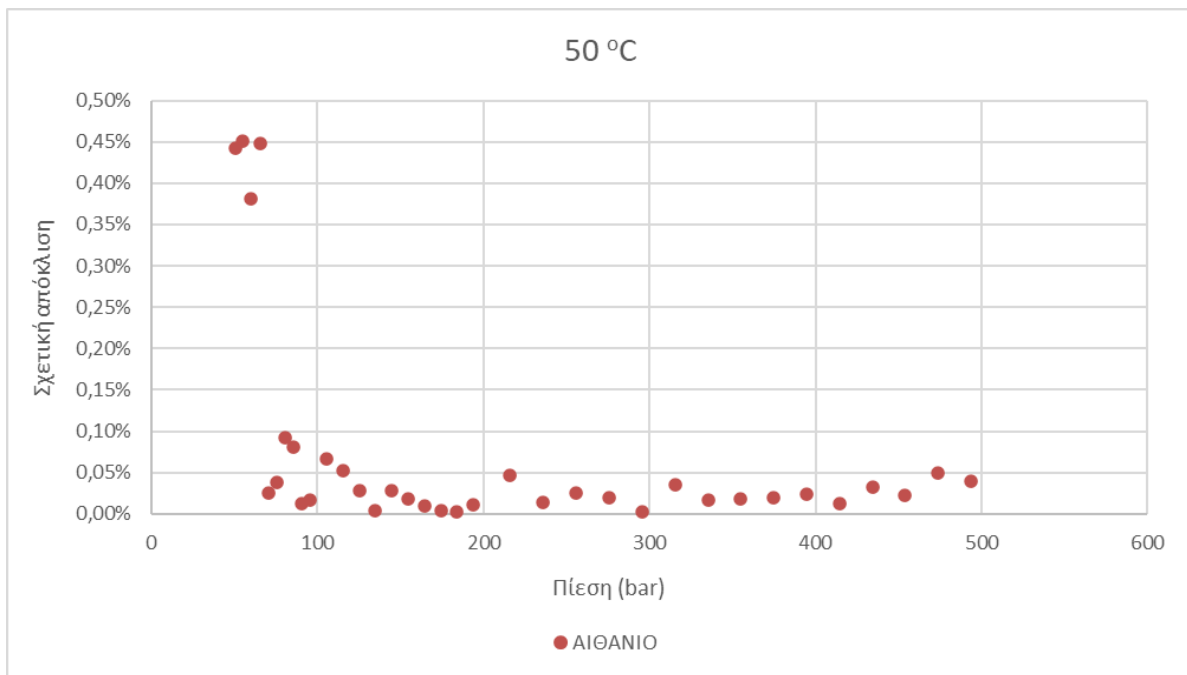
**Πίνακας Γ.4:** Αποκλίσεις εξίσωσης κατασκευαστή (6.10) για το αιθάνιο στους 50°C



**Σχήμα Γ.10:** Γραφική απεικόνιση αποκλίσεων εξίσωσης κατασκευαστή (6.10) για το αιθάνιο στους 50°C



**Σχήμα Γ.11:** Γραφική απεικόνιση απόλυτων αποκλίσεων εξίσωσης κατασκευαστή (6.10) για το αιθάνιο στους 50°C

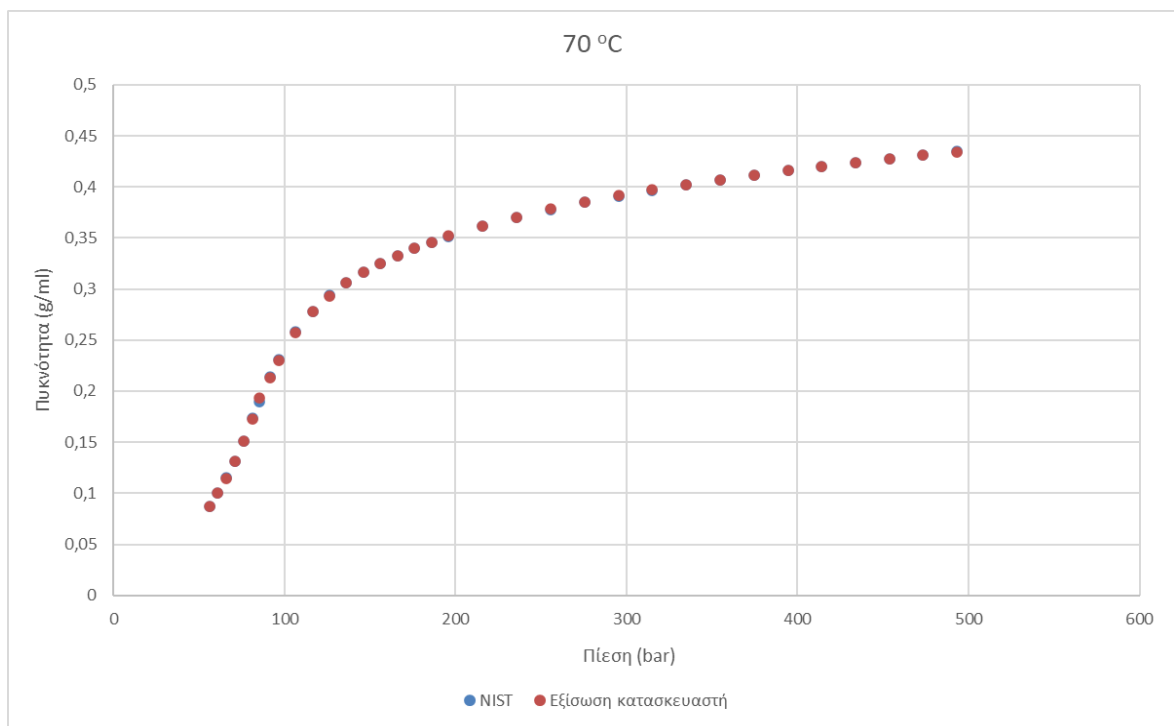


**Σχήμα Γ.12:** Γραφική απεικόνιση σχετικών αποκλίσεων εξίσωσης κατασκευαστή (6.10) για το αιθάνιο στους 50°C

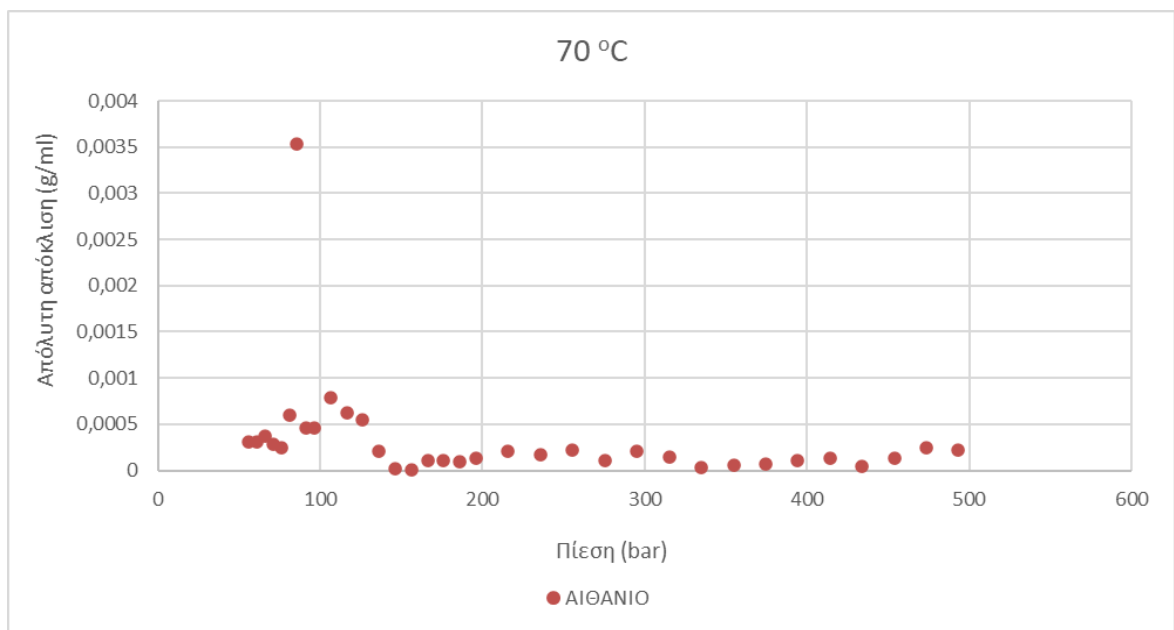
## Στους 70 °C

T	p	NIST	Εξίσωση κατασκευαστή	Απόκλιση %	Απόκλιση	Απόλυτη απόκλιση
70,38	55,963	0,087006508	0,08669449	0,36%	-0,000312	0,000312018
70,37	60,963	0,100155706	0,099849341	0,31%	-0,0003064	0,000306365
70,39	65,913	0,114900677	0,114526259	0,33%	-0,0003744	0,000374419
70,4	70,863	0,131662757	0,13137769	0,22%	-0,0002851	0,000285068
70,42	75,963	0,15103062	0,150781385	0,17%	-0,0002492	0,000249235
70,46	81,463	0,173570121	0,172969962	0,35%	-0,0006002	0,000600159
70,46	85,363	0,189863554	0,193395436	1,84%	0,00353188	0,003531881
70,48	91,463	0,213677619	0,213218027	0,22%	-0,0004596	0,000459592
70,49	96,463	0,230771239	0,230312154	0,20%	-0,0004591	0,000459086
70,5	106,363	0,258135219	0,257347796	0,31%	-0,0007874	0,000787423
70,51	116,363	0,278202941	0,277579044	0,22%	-0,0006239	0,000623897
70,52	126,363	0,293779138	0,293225896	0,19%	-0,0005532	0,000553242
70,54	136,263	0,30594519	0,30573974	0,07%	-0,0002054	0,00020545
70,55	146,263	0,31620309	0,316185525	0,01%	-1,756E-05	1,75649E-05
70,55	156,163	0,325018824	0,32500551	0,00%	-1,331E-05	1,3314E-05
70,56	166,213	0,332827797	0,3329398	0,03%	0,000112	0,000112004
70,57	176,063	0,339657037	0,339771162	0,03%	0,00011412	0,000114124
70,58	186,163	0,345964911	0,346060932	0,03%	9,602E-05	9,60204E-05
70,58	196,063	0,351611019	0,351744628	0,04%	0,00013361	0,000133609
70,59	215,913	0,361621538	0,361827881	0,06%	0,00020634	0,000206344
70,59	235,863	0,370356912	0,37052658	0,05%	0,00016967	0,000169667
70,6	255,663	0,378006551	0,378233326	0,06%	0,00022678	0,000226775
70,67	275,463	0,384807428	0,384701012	0,03%	-0,0001064	0,000106416
70,67	295,213	0,391056048	0,391267552	0,05%	0,0002115	0,000211504
70,67	315,113	0,396829726	0,396981568	0,04%	0,00015184	0,000151841
70,68	334,963	0,402141063	0,402178055	0,01%	3,6992E-05	3,69924E-05
70,68	354,763	0,407083249	0,407145006	0,02%	6,1758E-05	6,17578E-05
70,69	374,563	0,411699981	0,41176852	0,02%	6,8539E-05	6,8539E-05
70,69	394,363	0,41605149	0,416160892	0,03%	0,0001094	0,000109402
70,69	414,163	0,420160974	0,420290398	0,03%	0,00012942	0,000129423
70,69	433,963	0,424057251	0,424107039	0,01%	4,9788E-05	4,97879E-05
70,69	453,763	0,427765248	0,427635963	0,03%	-0,0001293	0,000129285
70,7	473,463	0,431266945	0,431020195	0,06%	-0,0002467	0,00024675
70,7	493,263	0,434645337	0,434419822	0,05%	-0,0002255	0,000225515

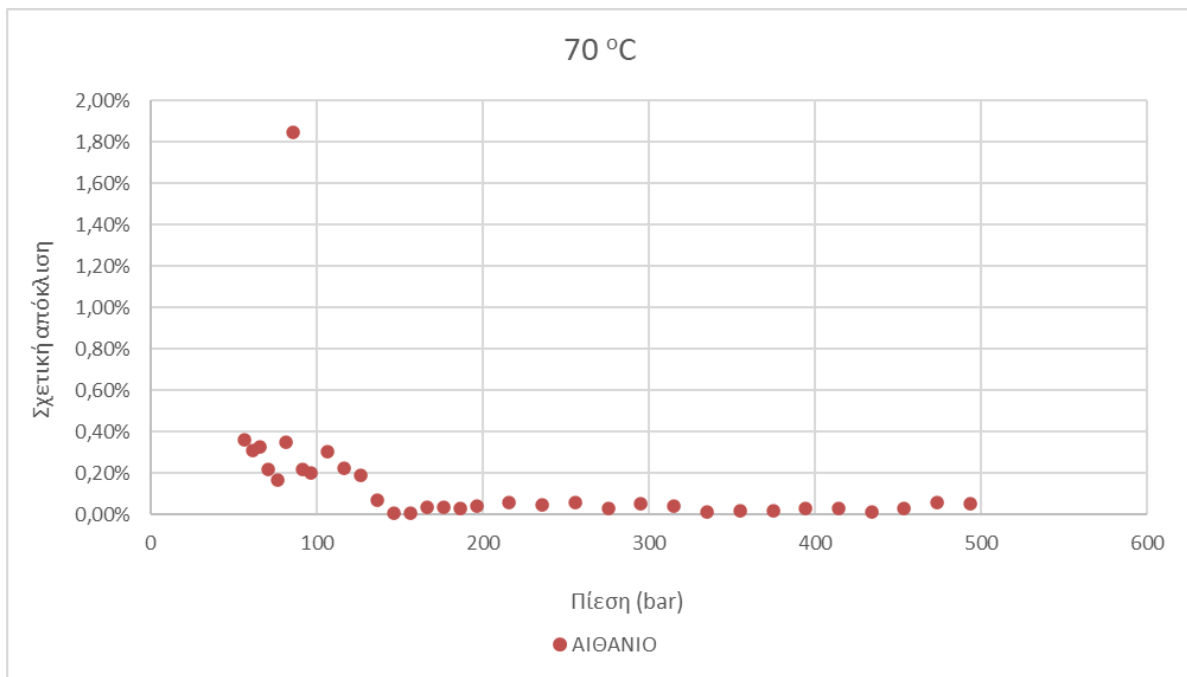
**Πίνακας Γ.5:** Αποκλίσεις εξίσωσης κατασκευαστή (6.10) για το αιθάνιο στους 70°C



**Σχήμα Γ.13:** Γραφική απεικόνιση αποκλίσεων εξίσωσης κατασκευαστή (6.10) για το αιθάνιο στους 70°C



**Σχήμα Γ.14:** Γραφική απεικόνιση απόλυτων αποκλίσεων εξίσωσης κατασκευαστή (6.10) για το αιθάνιο στους 70°C

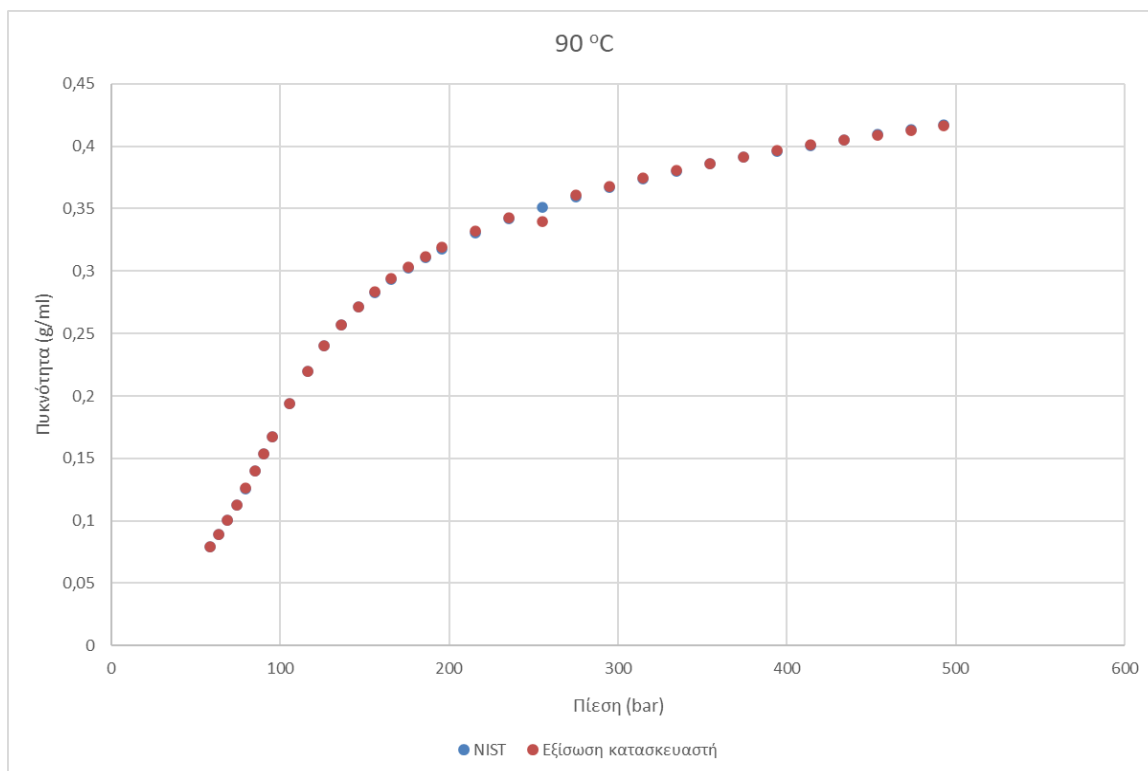


**Σχήμα Γ.15:** Γραφική απεικόνιση σχετικών αποκλίσεων εξίσωσης κατασκευαστή (6.10) για το αιθάνιο στους 70°C

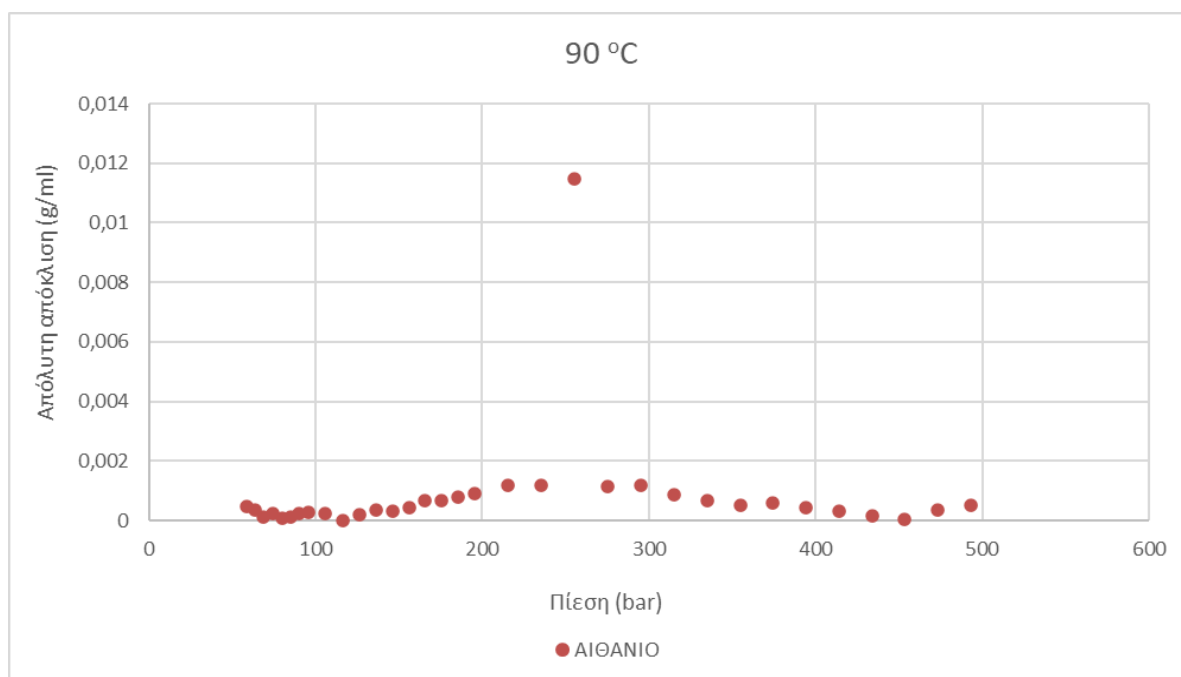
## Στους 90 °C

T	p	NIST	Εξίσωση κατασκευαστή	Απόκλιση %	Απόκλιση	Απόλυτη απόκλιση
89,42	58,563	0,079404762	0,078943959	0,58%	-0,0004608	0,000460802
89,49	63,663	0,089377647	0,08900689	0,42%	-0,0003708	0,000370757
89,54	68,863	0,100315876	0,100428701	0,11%	0,00011283	0,000112825
89,58	74,263	0,112537184	0,112765201	0,20%	0,00022802	0,000228017
89,62	79,763	0,125875504	0,125976248	0,08%	0,00010074	0,000100744
89,67	85,163	0,139736765	0,139634175	0,07%	-0,0001026	0,00010259
89,72	90,363	0,153599747	0,153370832	0,15%	-0,0002289	0,000228915
89,76	95,463	0,167437918	0,167165263	0,16%	-0,0002727	0,000272655
89,79	105,563	0,194200268	0,193941041	0,13%	-0,0002592	0,000259226
89,92	116,363	0,219712311	0,219689389	0,01%	-2,292E-05	2,2922E-05
89,94	126,263	0,239981872	0,240197092	0,09%	0,00021522	0,00021522
89,96	136,213	0,256861236	0,257218193	0,14%	0,00035696	0,000356957
89,98	146,263	0,271278208	0,271601533	0,12%	0,00032332	0,000323324
90,06	156,063	0,283039697	0,283473577	0,15%	0,00043388	0,00043388
90,15	165,813	0,293166895	0,293856375	0,23%	0,00068948	0,00068948
90,17	175,863	0,302483306	0,303158614	0,22%	0,00067531	0,000675308
90,18	185,813	0,310680411	0,311460843	0,25%	0,00078043	0,000780432
90,19	195,713	0,318018569	0,318944618	0,29%	0,00092605	0,000926048
90,2	215,663	0,330877147	0,332062536	0,36%	0,00118539	0,001185389
90,21	235,563	0,341758274	0,342946198	0,35%	0,00118792	0,001187924
90,23	255,463	0,351191019	0,339705816	3,32%	-0,0114852	0,011485202
90,24	275,363	0,35953992	0,360683811	0,32%	0,00114389	0,001143891
90,25	295,213	0,36701572	0,368185204	0,32%	0,00116948	0,001169484
90,26	314,963	0,373770092	0,374647265	0,23%	0,00087717	0,000877173
90,28	334,813	0,379973146	0,380639795	0,18%	0,00066665	0,000666649
90,3	354,663	0,385700603	0,38621956	0,13%	0,00051896	0,000518957
90,31	374,363	0,390994681	0,391581756	0,15%	0,00058708	0,000587075
90,32	394,263	0,395995576	0,396452352	0,12%	0,00045678	0,000456775
90,33	414,063	0,400663224	0,400984977	0,08%	0,00032175	0,000321753
90,34	433,813	0,405051333	0,405228665	0,04%	0,00017733	0,000177332
90,35	453,563	0,409213448	0,409157907	0,01%	-5,554E-05	5,55416E-05
90,37	473,313	0,413153512	0,412803222	0,08%	-0,0003503	0,00035029
90,38	492,963	0,416895369	0,41636456	0,13%	-0,0005308	0,000530808

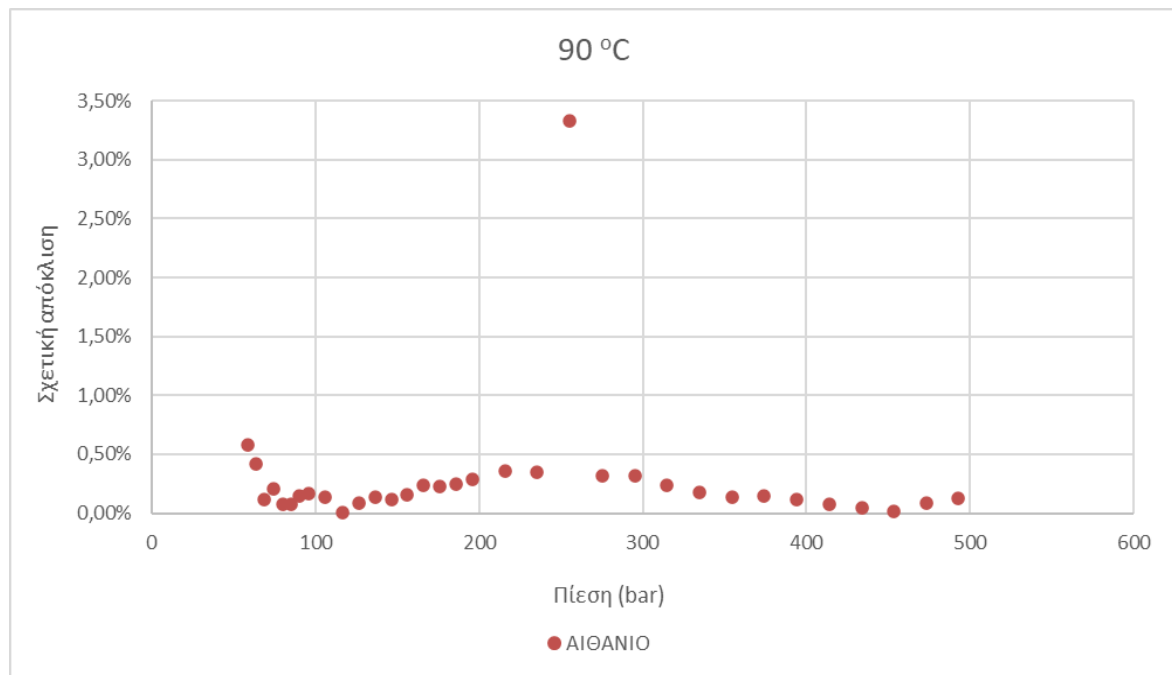
**Πίνακας Γ.6:** Αποκλίσεις εξίσωσης κατασκευαστή (6.10) για το αιθάνιο στους 90°C



**Σχήμα Γ.16:** Γραφική απεικόνιση αποκλίσεων εξίσωσης κατασκευαστή (6.10) για το αιθάνιο στους 90°C

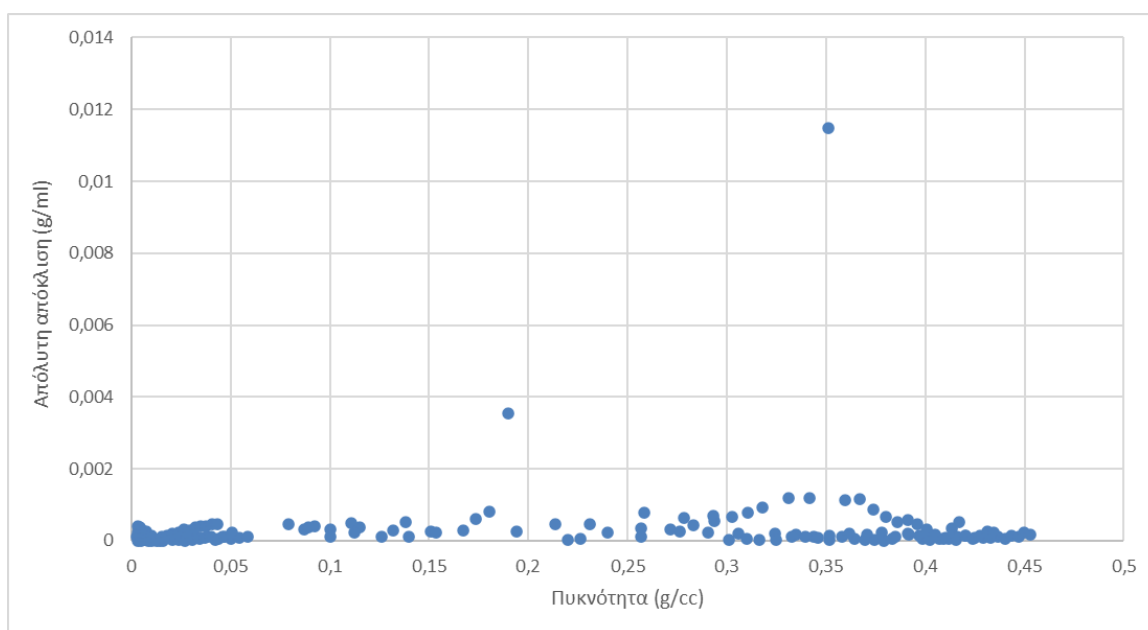


**Σχήμα Γ.17:** Γραφική απεικόνιση απόλυτων αποκλίσεων εξίσωσης κατασκευαστή (6.10) για το αιθάνιο στους 90°C

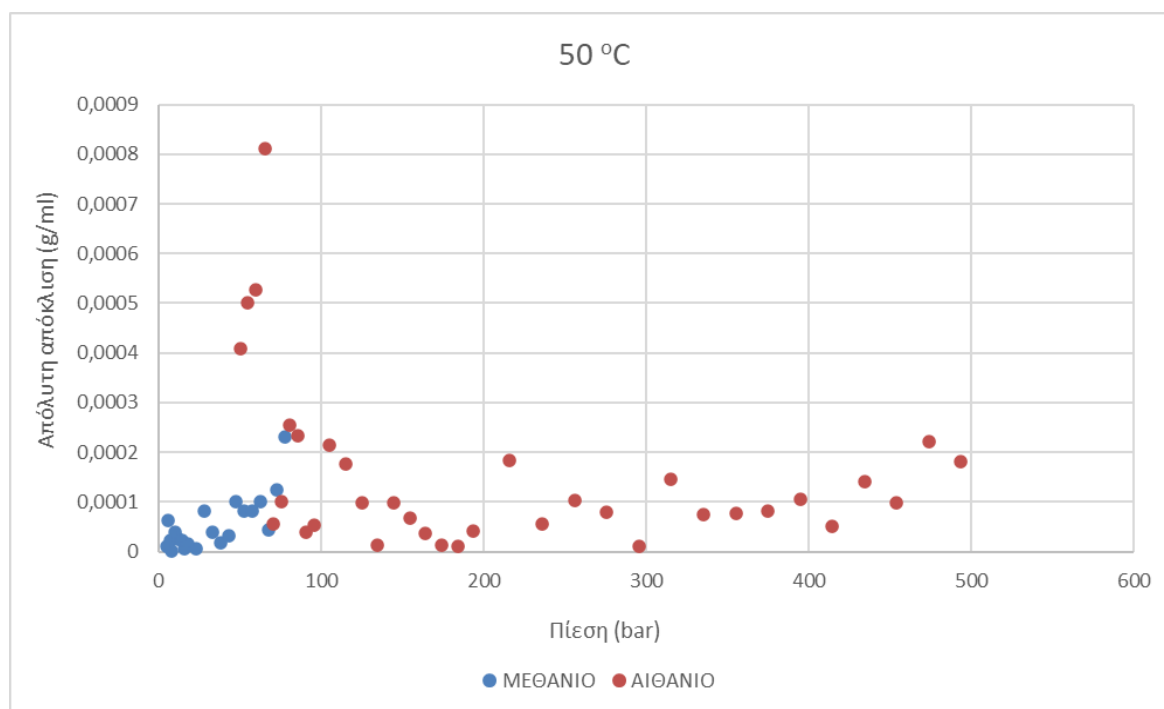


**Σχήμα Γ.18:** Γραφική απεικόνιση σχετικών αποκλίσεων εξίσωσης κατασκευαστή (6.10) για το αιθάνιο στους 90°C

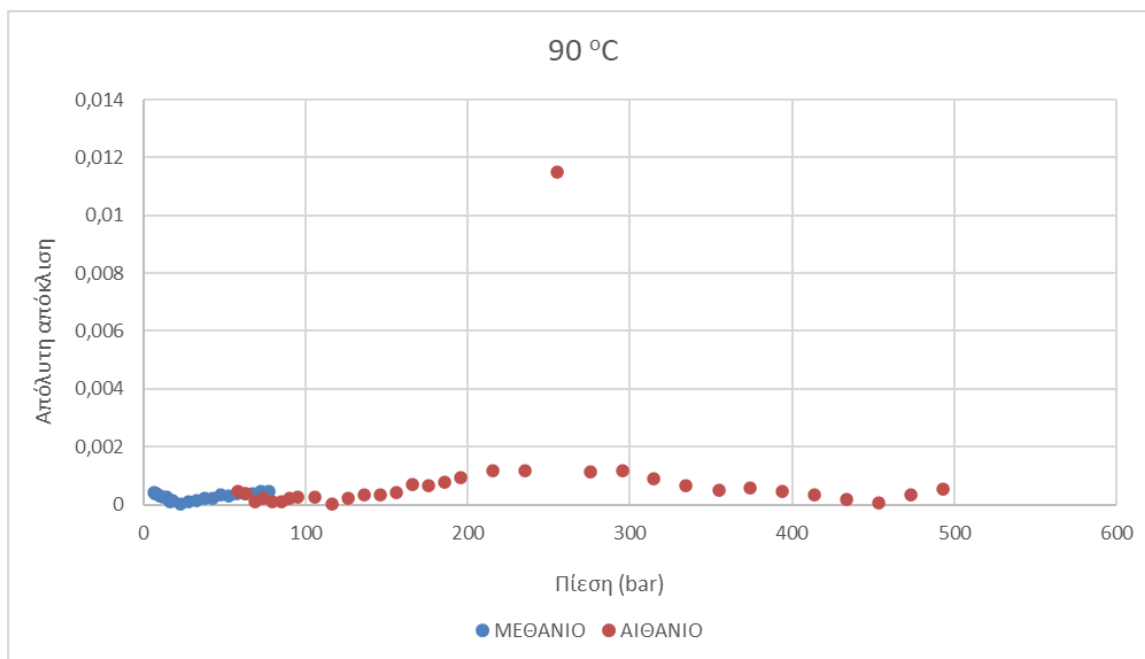
## ΜΕΘΑΝΙΟ-ΑΙΘΑΝΙΟ



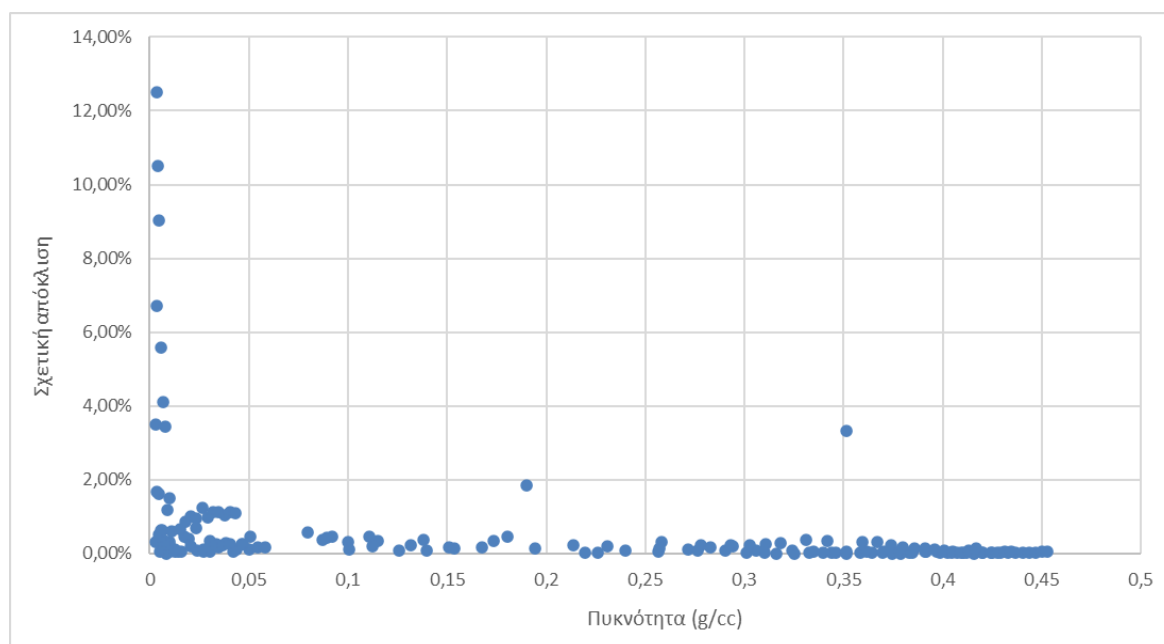
**Σχήμα Γ.19:** Γραφική απεικόνιση απόλυτων αποκλίσεων εξίσωσης κατασκευαστή (6.10) για το μεθάνιο και το αιθάνιο σε διαφορετικές θερμοκρασίες και πιέσεις



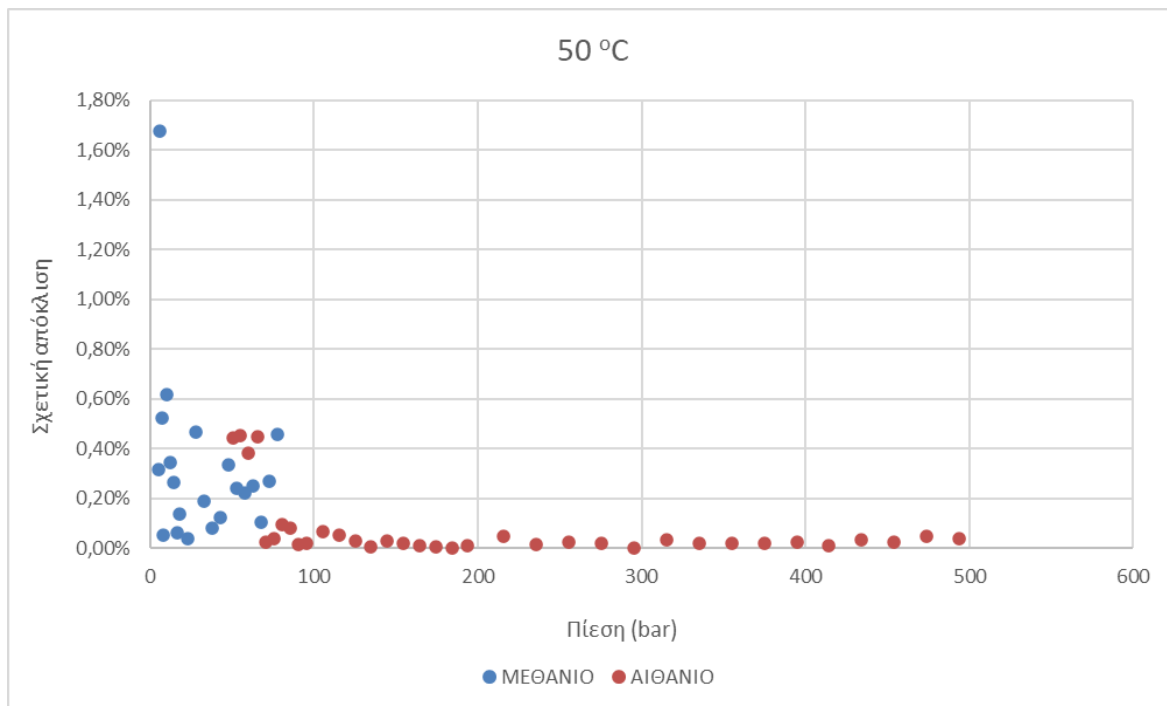
**Σχήμα Γ.20:** Γραφική απεικόνιση απόλυτων αποκλίσεων εξίσωσης κατασκευαστή (6.10) για το μεθάνιο και το αιθάνιο στους 50 °C



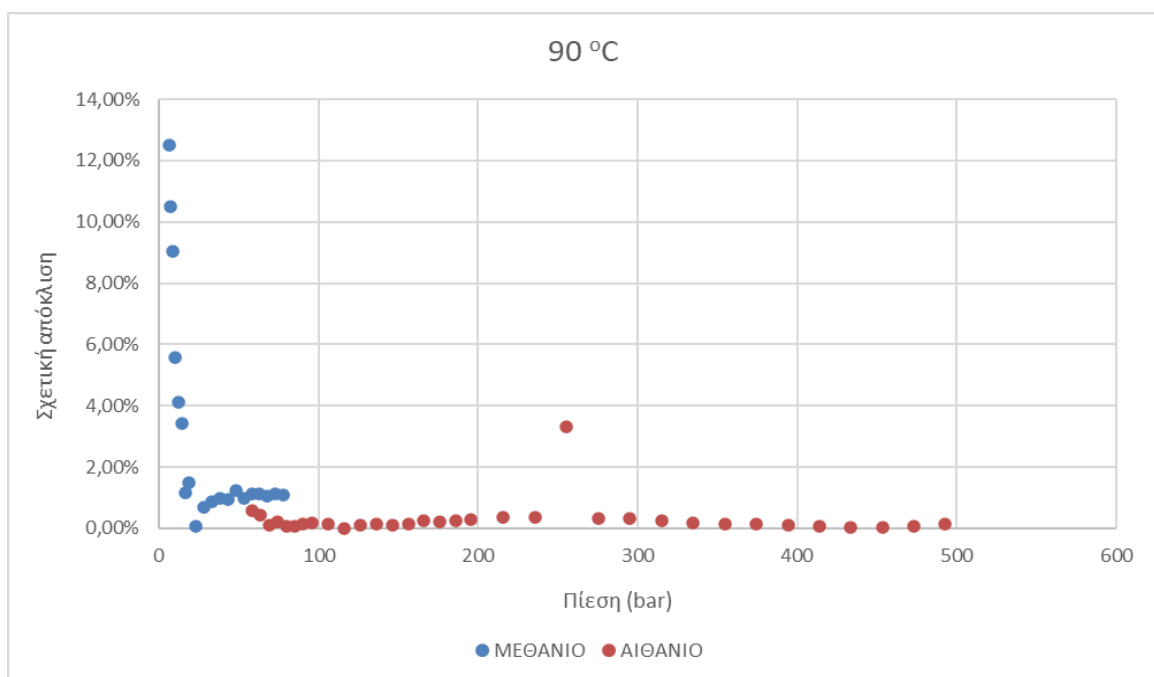
**Σχήμα Γ.21:** Γραφική απεικόνιση απόλυτων αποκλίσεων εξίσωσης κατασκευαστή (6.10) για το μεθάνιο και το αιθάνιο στους 90 °C



**Σχήμα Γ.22:** Γραφική απεικόνιση σχετικών αποκλίσεων εξίσωσης κατασκευαστή (6.10) για το μεθάνιο και το αιθάνιο σε διαφορετικές θερμοκρασίες και πιέσεις



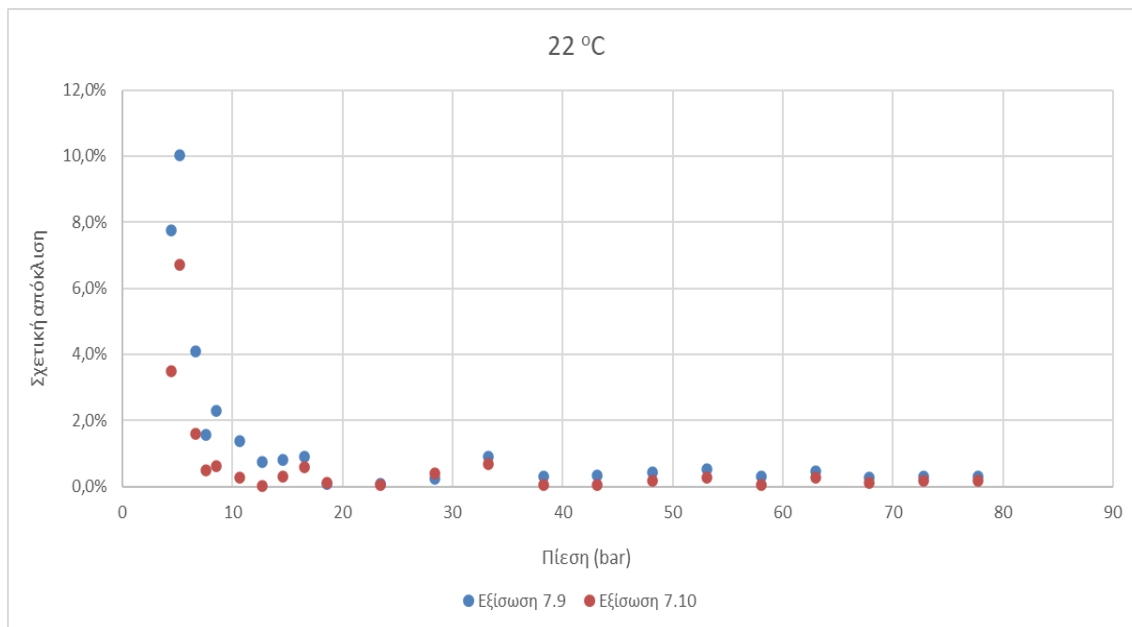
**Σχήμα Γ.23:** Γραφική απεικόνιση σχετικών αποκλίσεων εξίσωσης κατασκευαστή (6.10) για το μεθάνιο και το αιθάνιο στους 50 °C



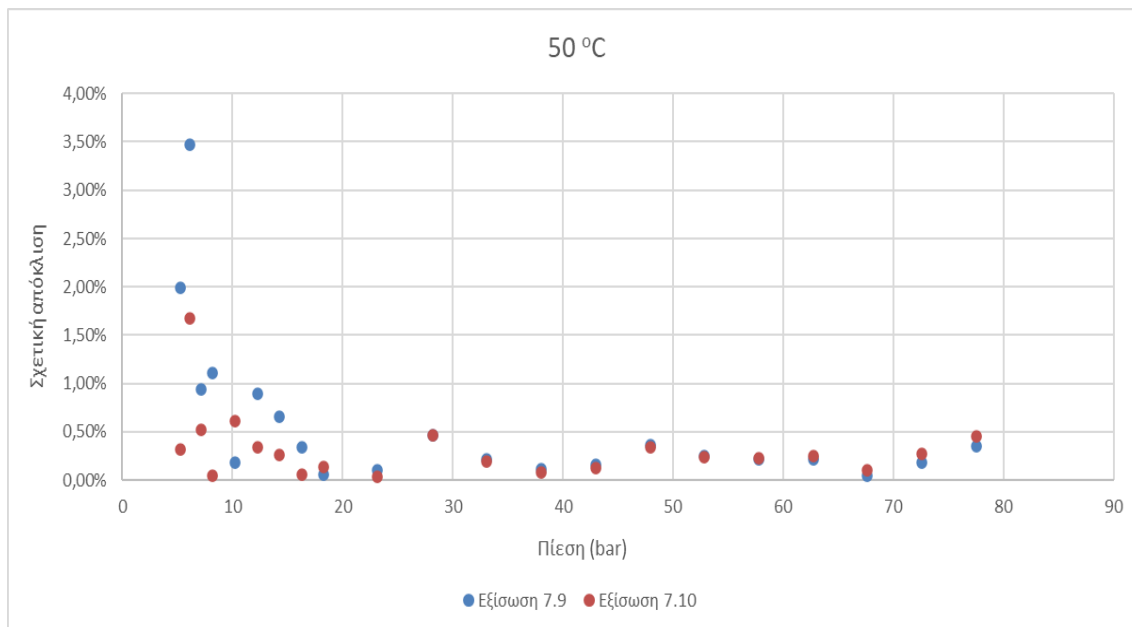
**Σχήμα Γ.24:** Γραφική απεικόνιση σχετικών αποκλίσεων εξίσωσης κατασκευαστή (6.10) για το μεθάνιο και το αιθάνιο στους 90 °C

## Παράρτημα Δ

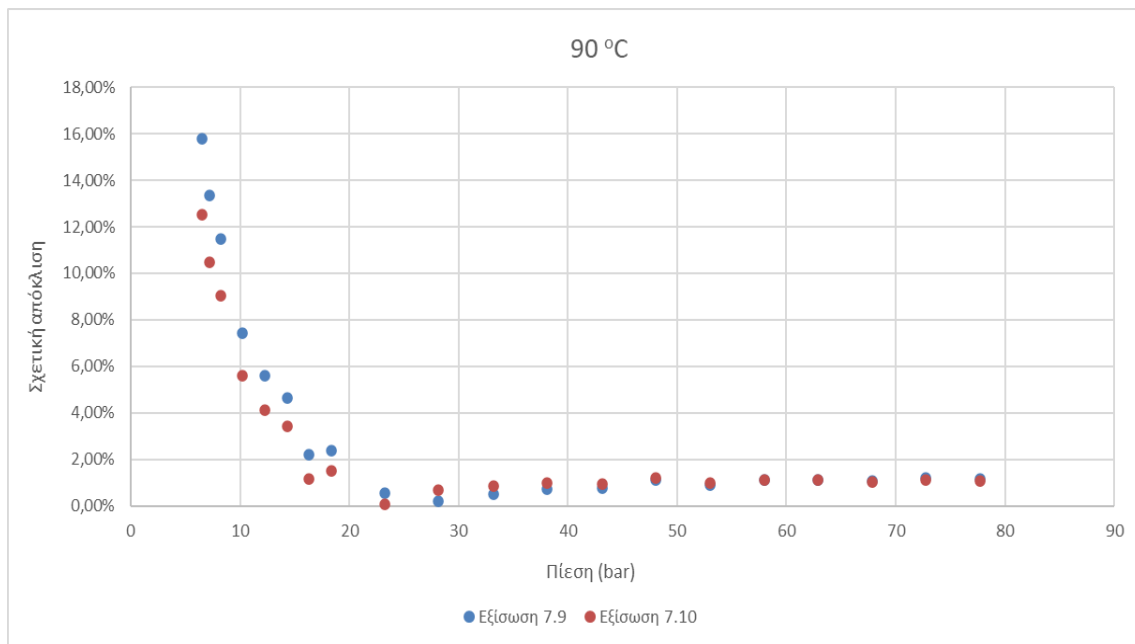
### ΜΕΘΑΝΙΟ



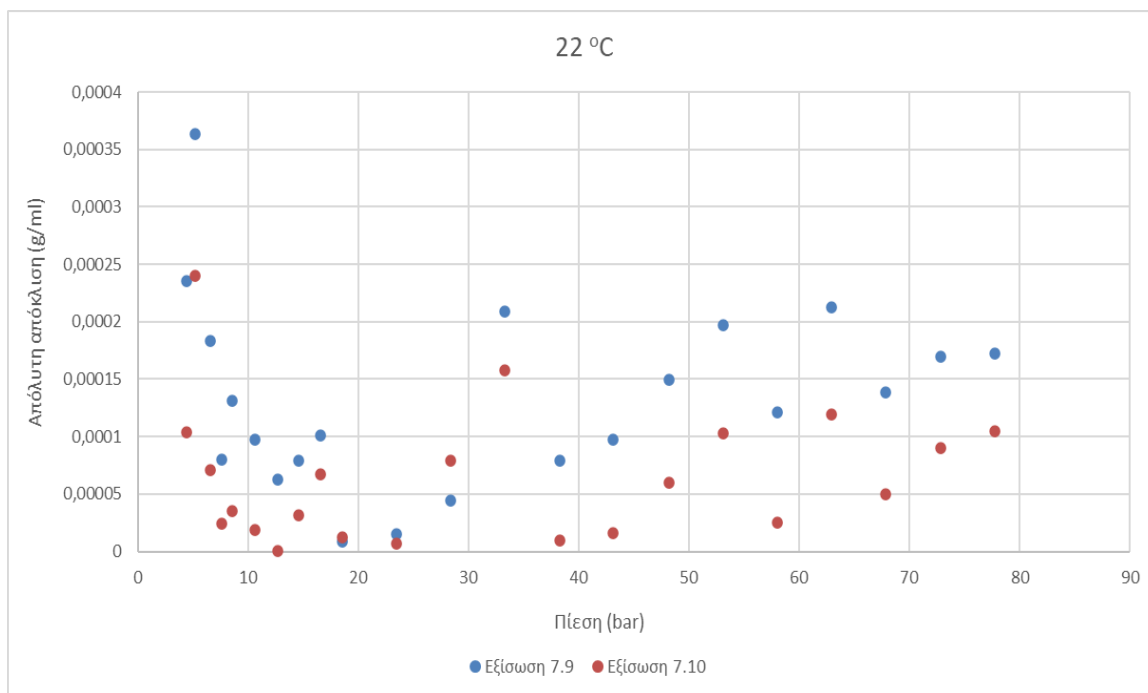
Σχήμα Δ.1 : Σχετική απόκλιση εξίσωσης (6.9) και εξίσωσης (6.10) στους 22°C



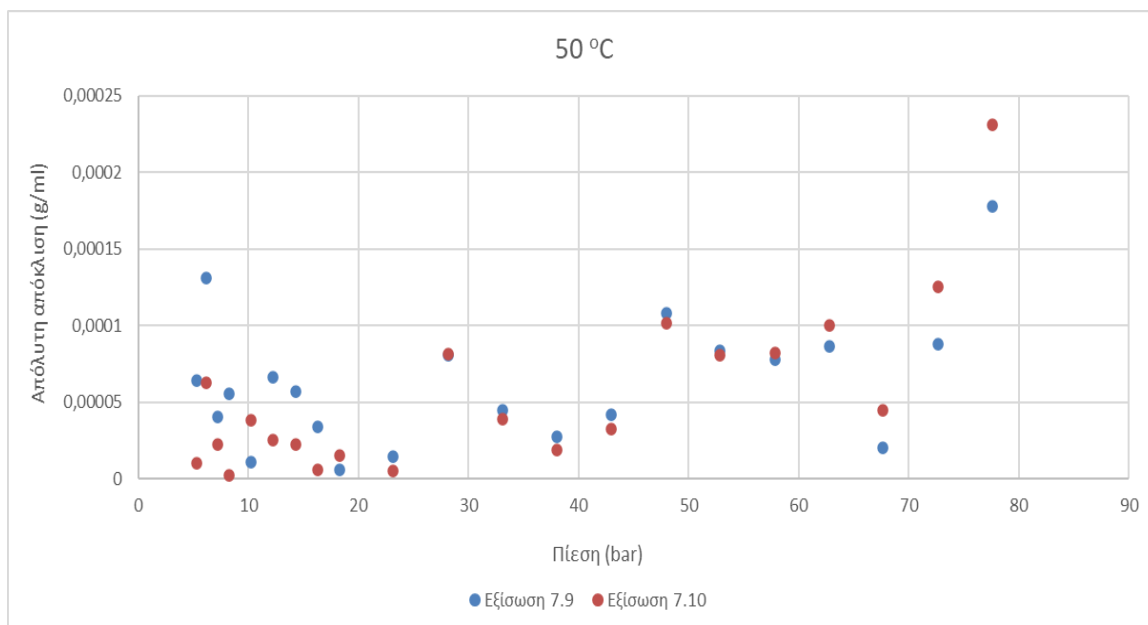
Σχήμα Δ.2 : Σχετική απόκλιση εξίσωσης (6.9) και εξίσωσης (6.10) στους 50°C



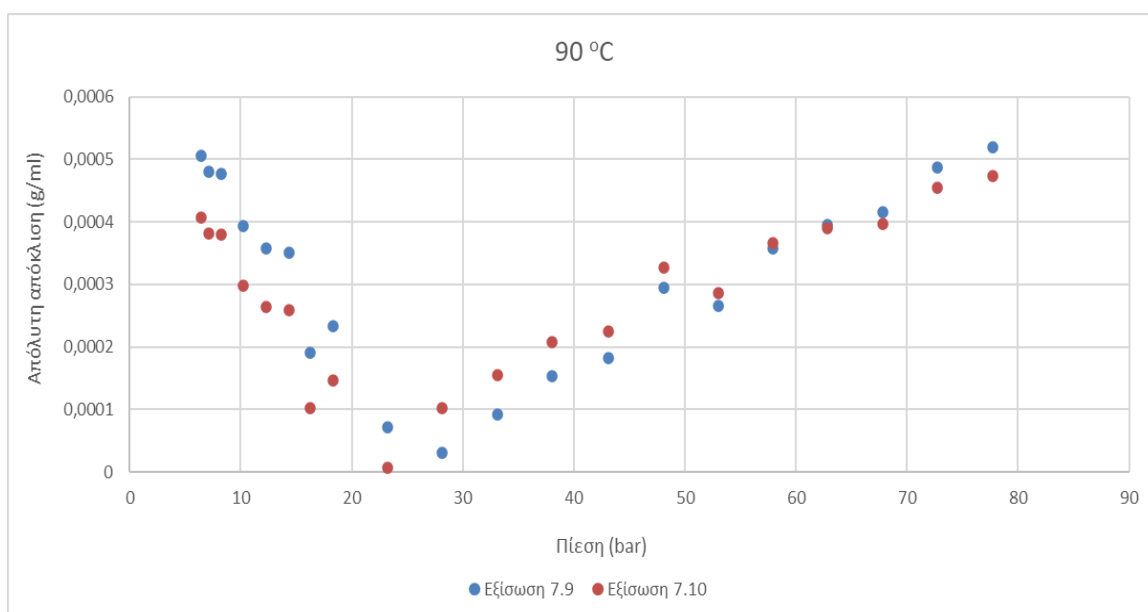
**Σχήμα Δ.3 :** Σχετική απόκλιση εξίσωσης (6.9) και εξίσωσης (6.10) στους 90°C



**Σχήμα Δ.4 :** Απόλυτη απόκλιση εξίσωσης (6.9) και εξίσωσης (6.10) στους 22°C

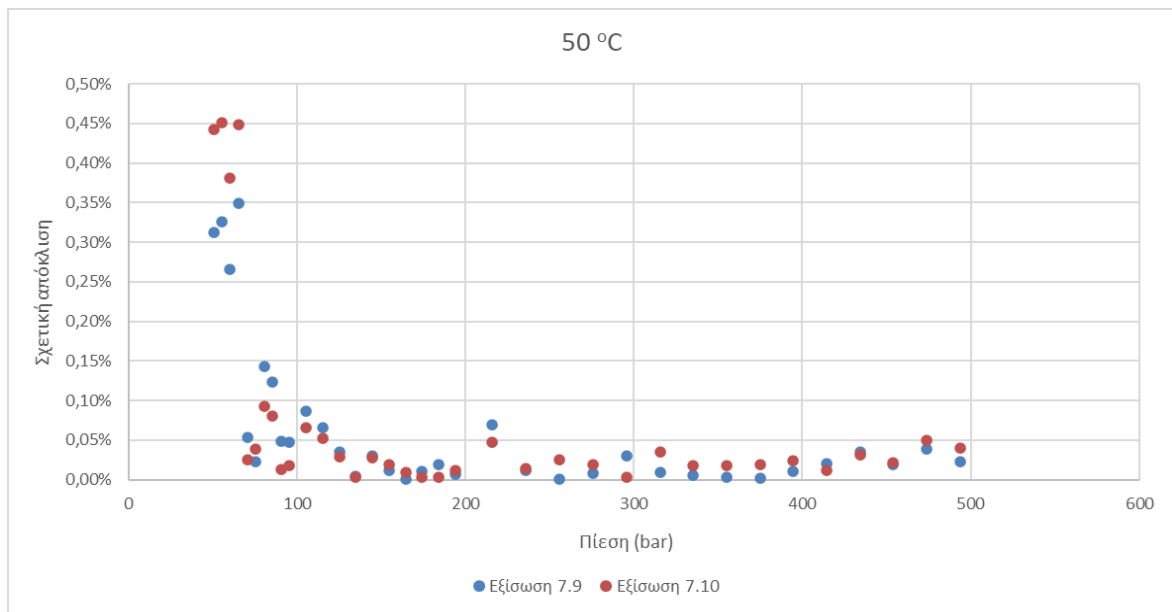


**Σχήμα Δ.5 :** Απόλυτη απόκλιση εξίσωσης (6.9) και εξίσωσης (6.10) στους 50°C

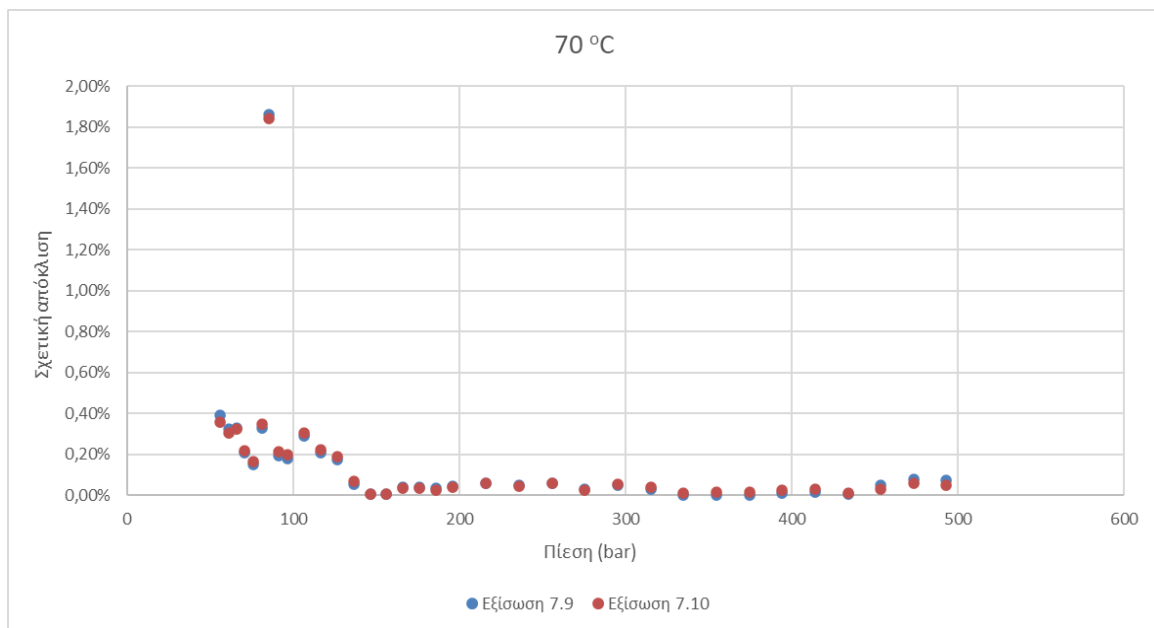


**Σχήμα Δ.6 :** Απόλυτη απόκλιση εξίσωσης (6.9) και εξίσωσης (6.10) στους 90°C

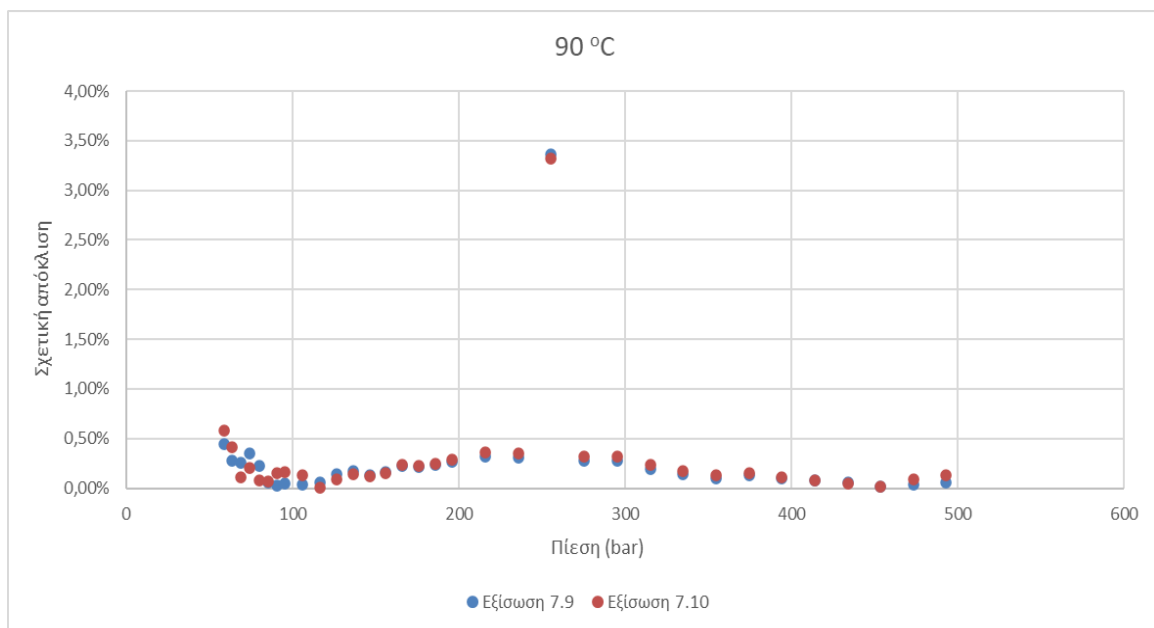
## ΑΙΘΑΝΙΟ



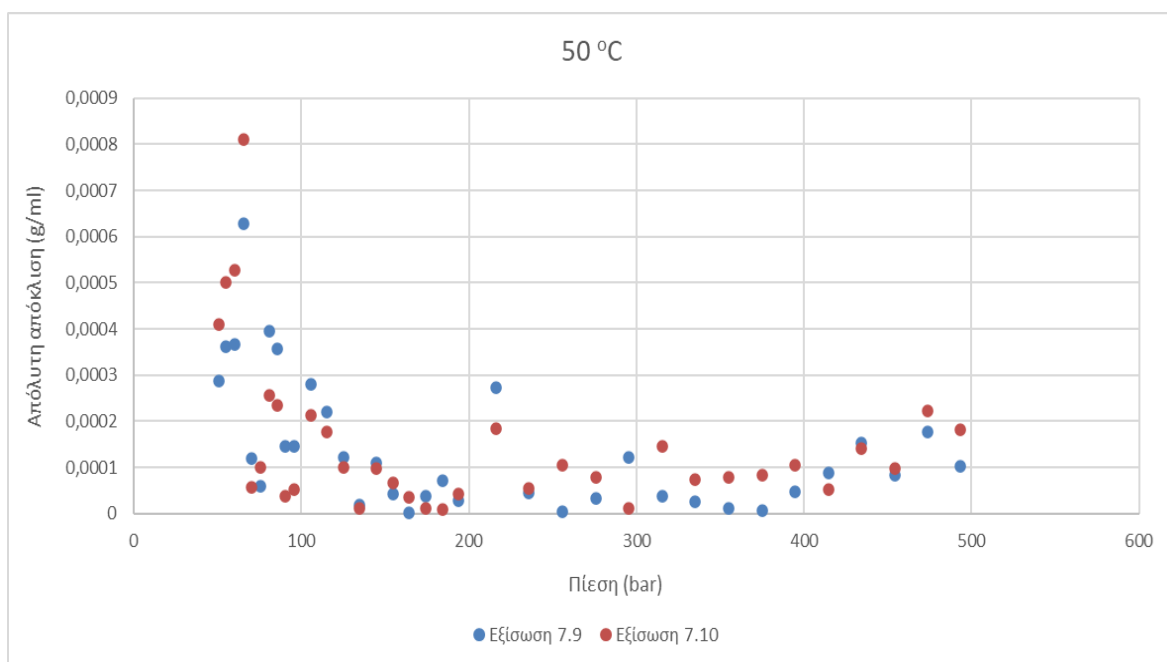
Σχήμα Δ.7 : Σχετική απόκλιση εξίσωσης (6.9) και εξίσωσης (6.10) στους 50°C



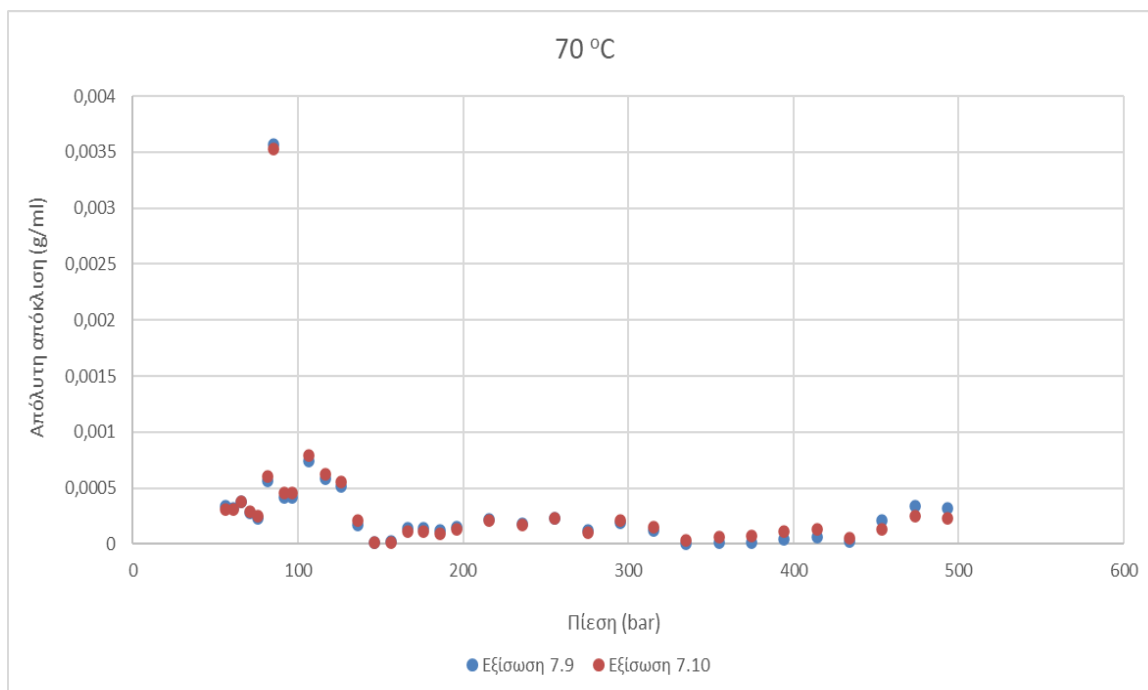
Σχήμα Δ.8 : Σχετική απόκλιση εξίσωσης (6.9) και εξίσωσης (6.10) στους 70°C



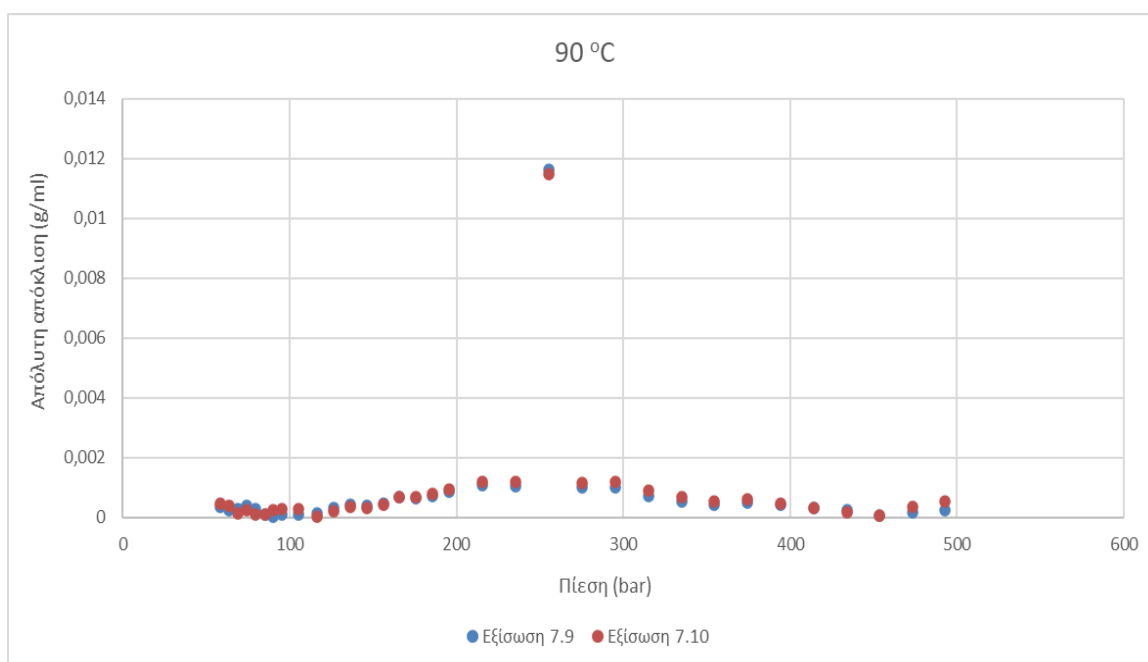
**Σχήμα Δ.9 :** Σχετική απόκλιση εξίσωσης (6.9) και εξίσωσης (6.10) στους 90°C



**Σχήμα Δ.10 :** Απόλυτη απόκλιση εξίσωσης (6.9) και εξίσωσης (6.10) στους 50°C

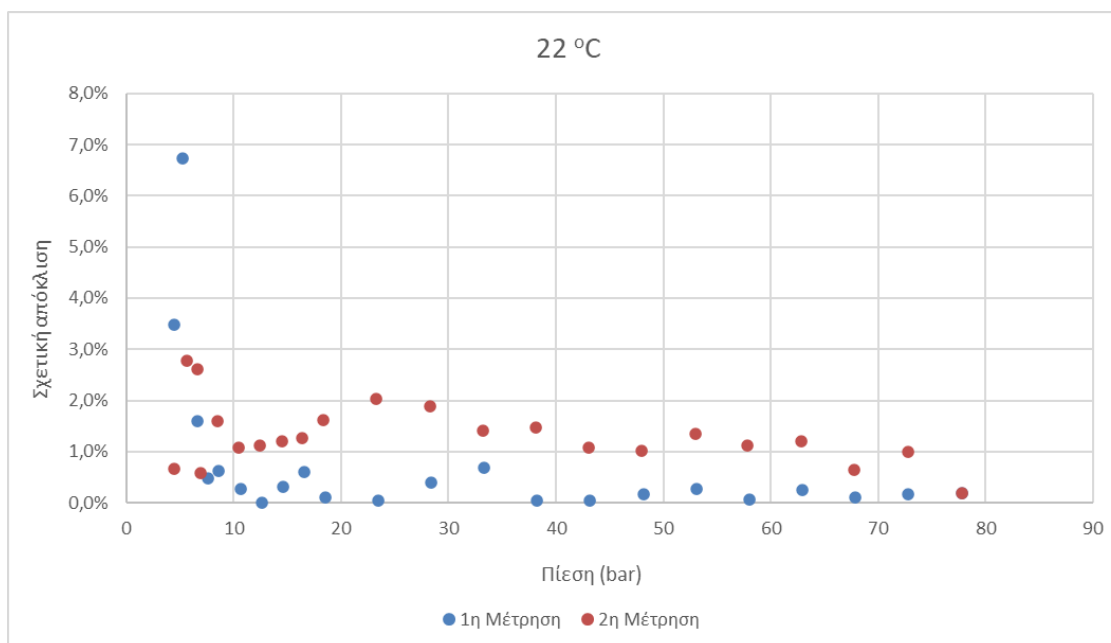


**Σχήμα Δ.11 :** Απόλυτη απόκλιση εξίσωσης (6.9) και εξίσωσης (6.10) στους 70°C

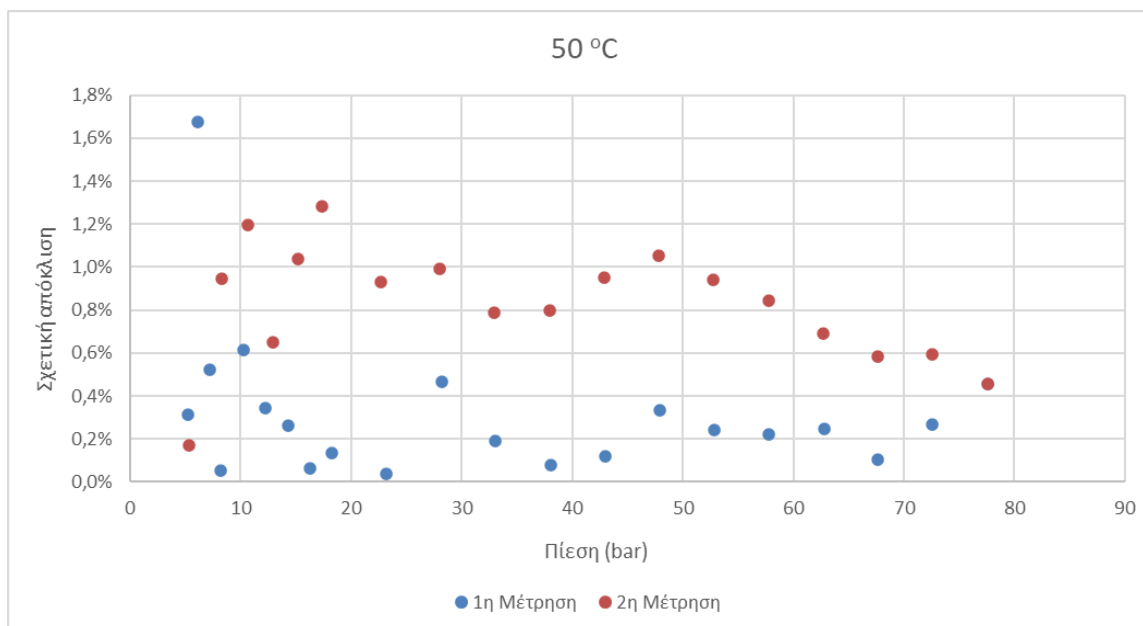


**Σχήμα Δ.12 :** Απόλυτη απόκλιση εξίσωσης (6.9) και εξίσωσης (6.10) στους 90°C

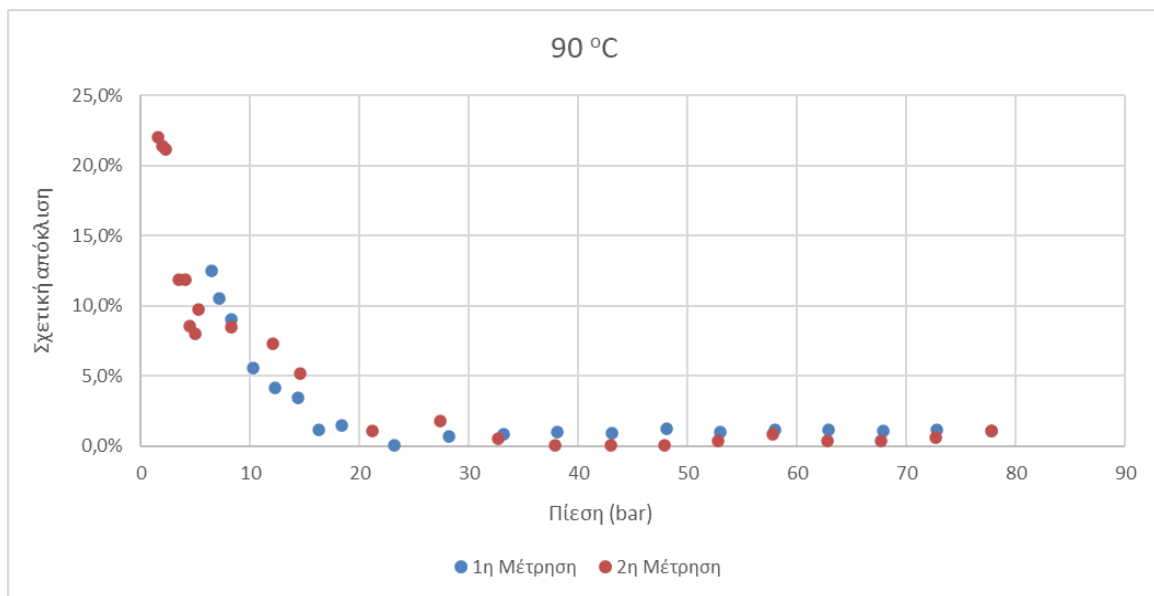
## Παράρτημα Ε



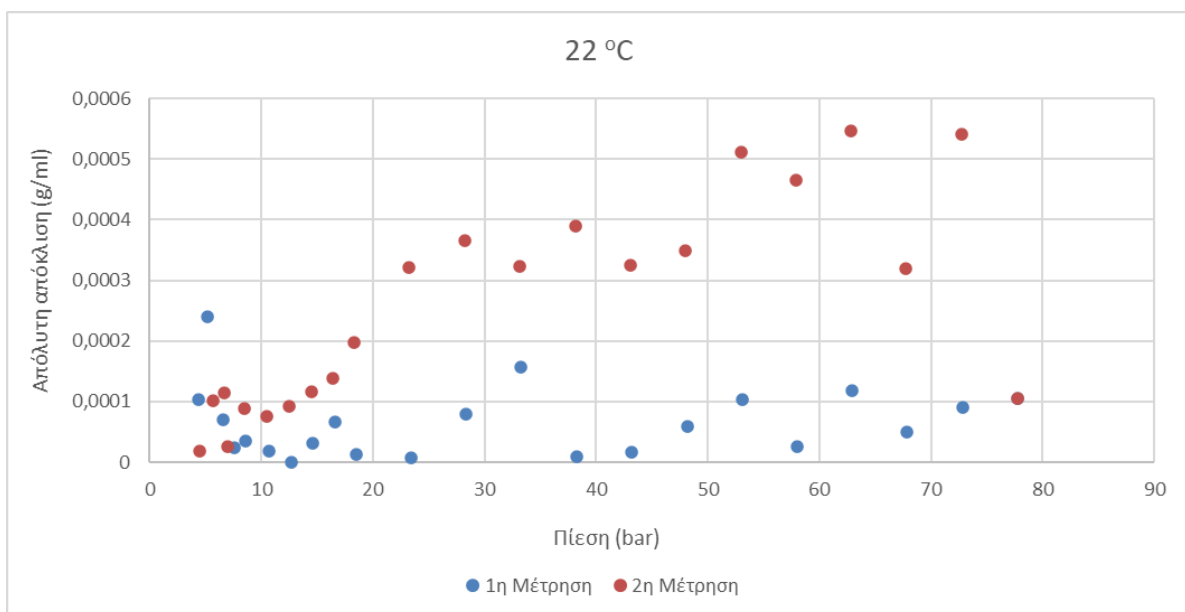
**Σχήμα Ε.1 :** Σχετική απόκλιση εξίσωσης (6.10) για δύο μετρήσεις στους 22 °C για το μεθάνιο



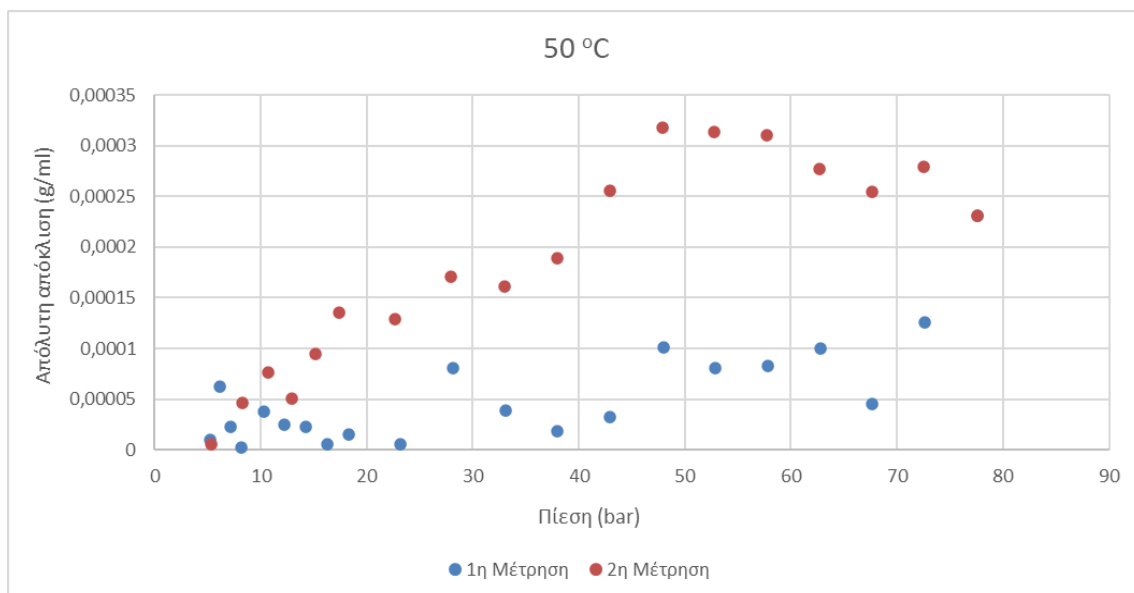
**Σχήμα Ε.2 :** Σχετική απόκλιση εξίσωσης (6.10) για δύο μετρήσεις στους 50 °C για το μεθάνιο



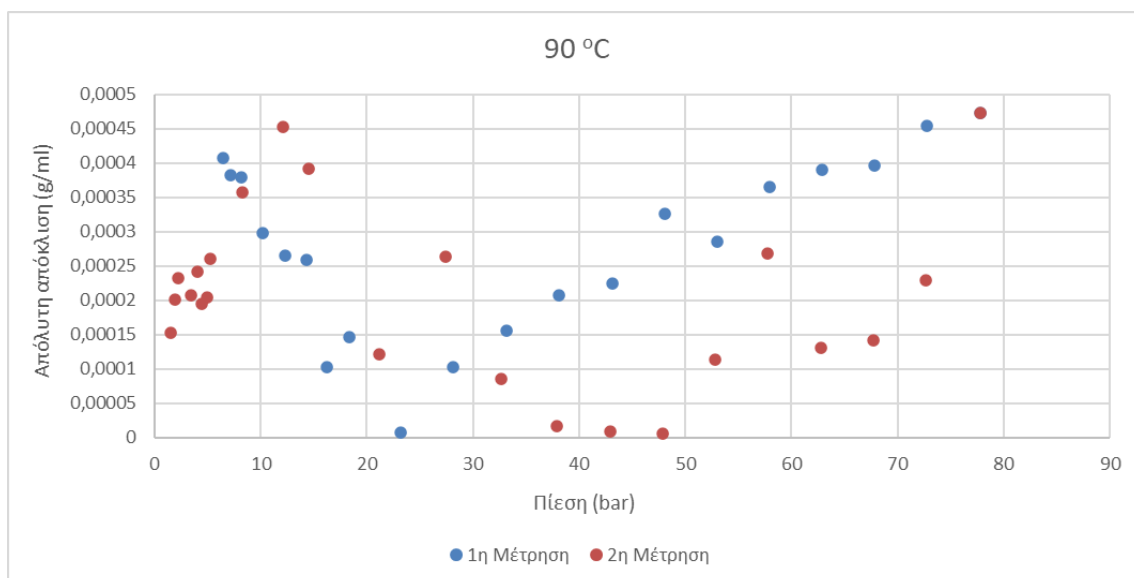
**Σχήμα Ε.3 :** Σχετική απόκλιση εξίσωσης (6.10) για δύο μετρήσεις στους 90 °C για το μεθάνιο



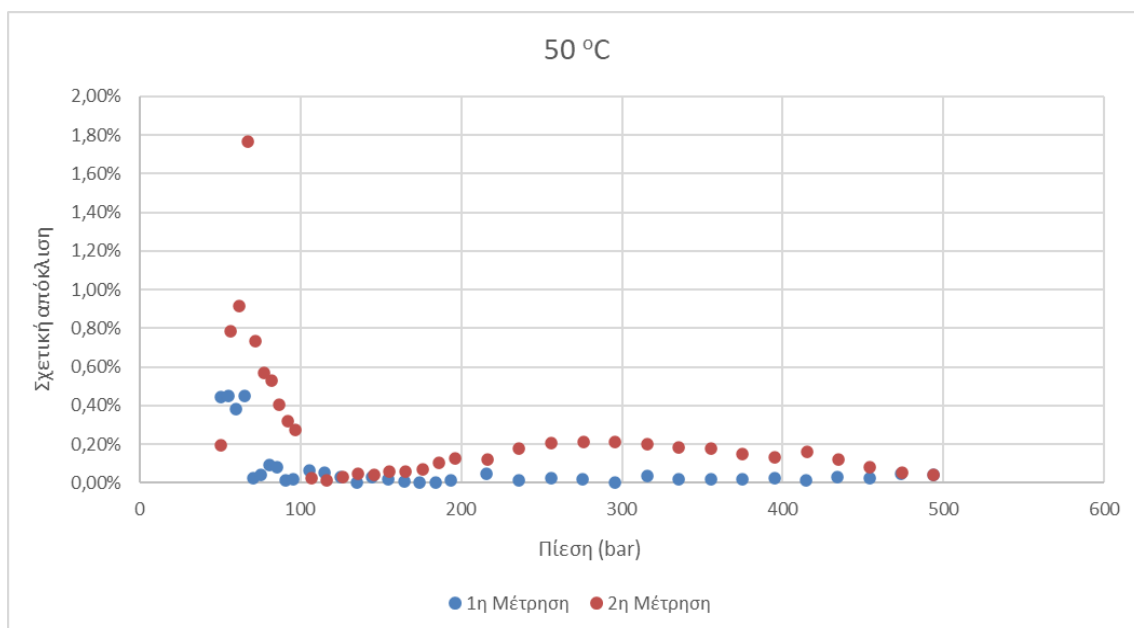
**Σχήμα Ε.4 :** Απόλυτη απόκλιση εξίσωσης (6.10) για δύο μετρήσεις στους 22 °C για το μεθάνιο



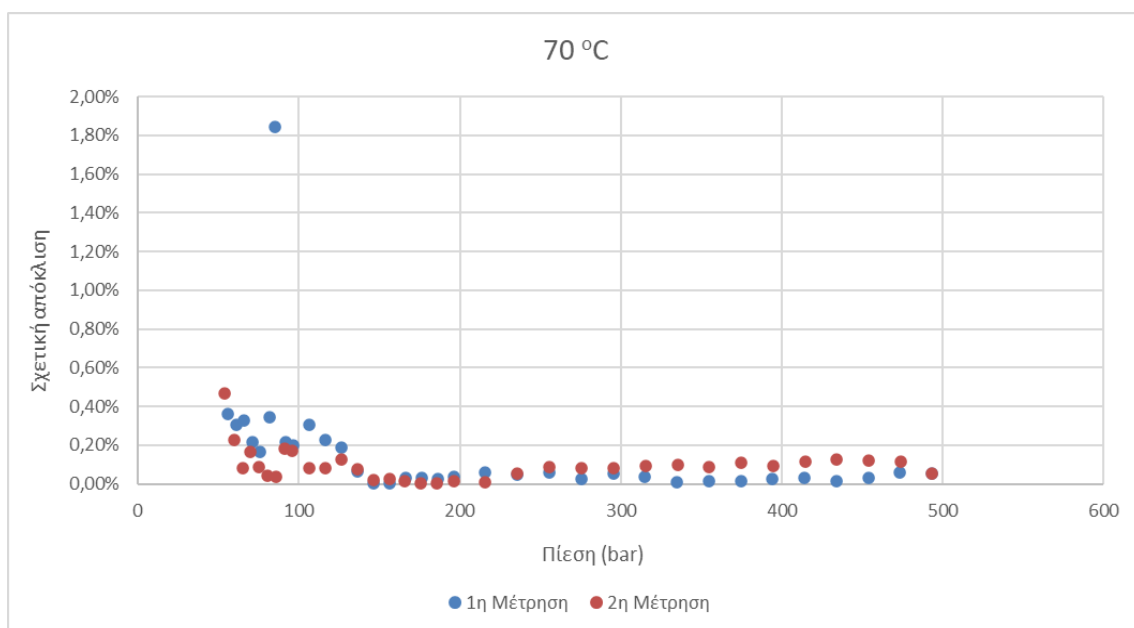
**Σχήμα Ε.5 :** Απόλυτη απόκλιση εξίσωσης (6.10) για δύο μετρήσεις στους 50 °C για το μεθάνιο



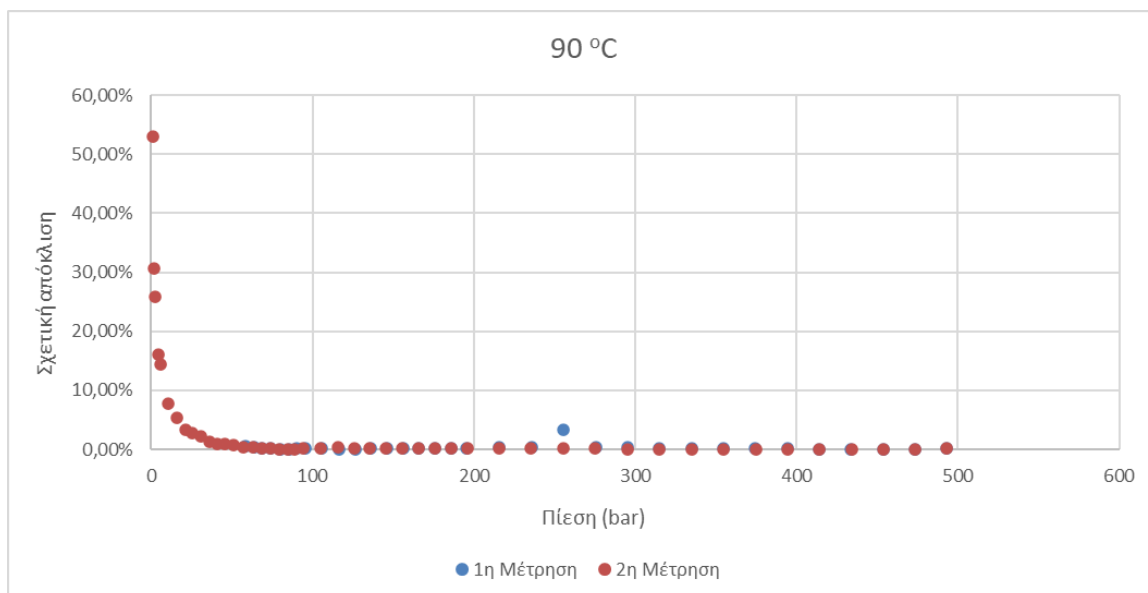
**Σχήμα Ε.6 :** Απόλυτη απόκλιση εξίσωσης (6.10) για δύο μετρήσεις στους 90 °C για το μεθάνιο



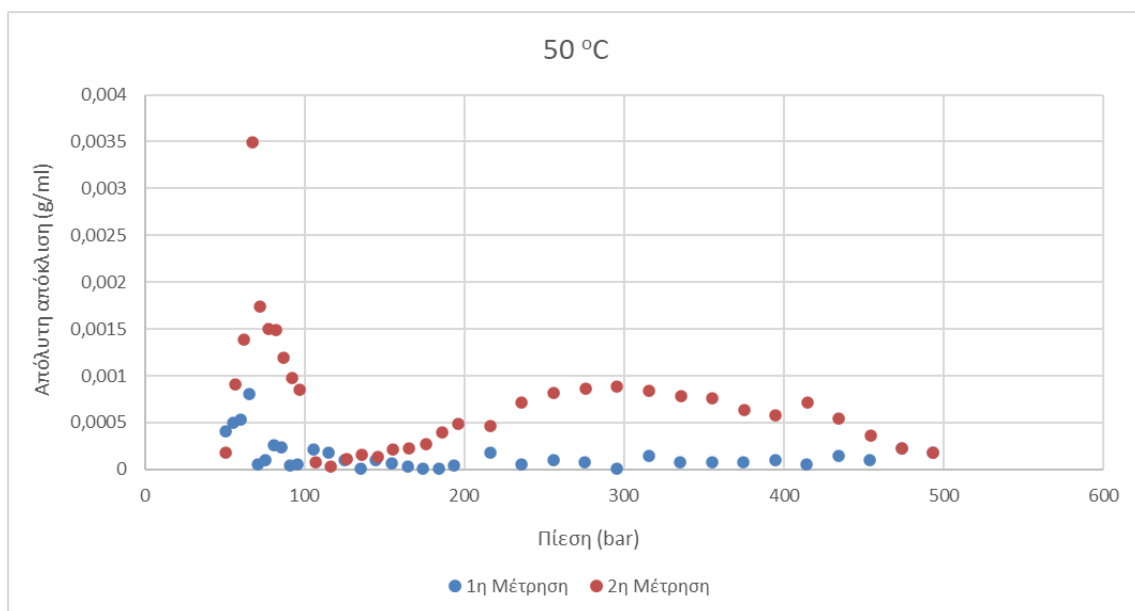
**Σχήμα Ε.7 :** Σχετική απόκλιση εξίσωσης (6.10) για δύο μετρήσεις στους 50 °C για το αιθάνιο



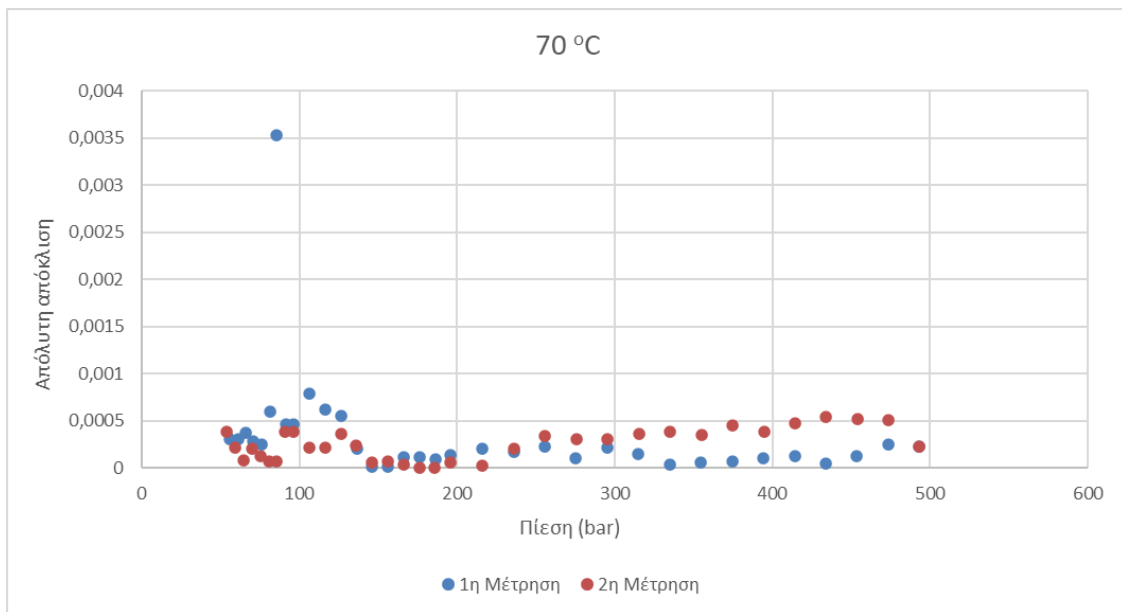
**Σχήμα Ε.8 :** Σχετική απόκλιση εξίσωσης (6.10) για δύο μετρήσεις στους 70 °C για το αιθάνιο



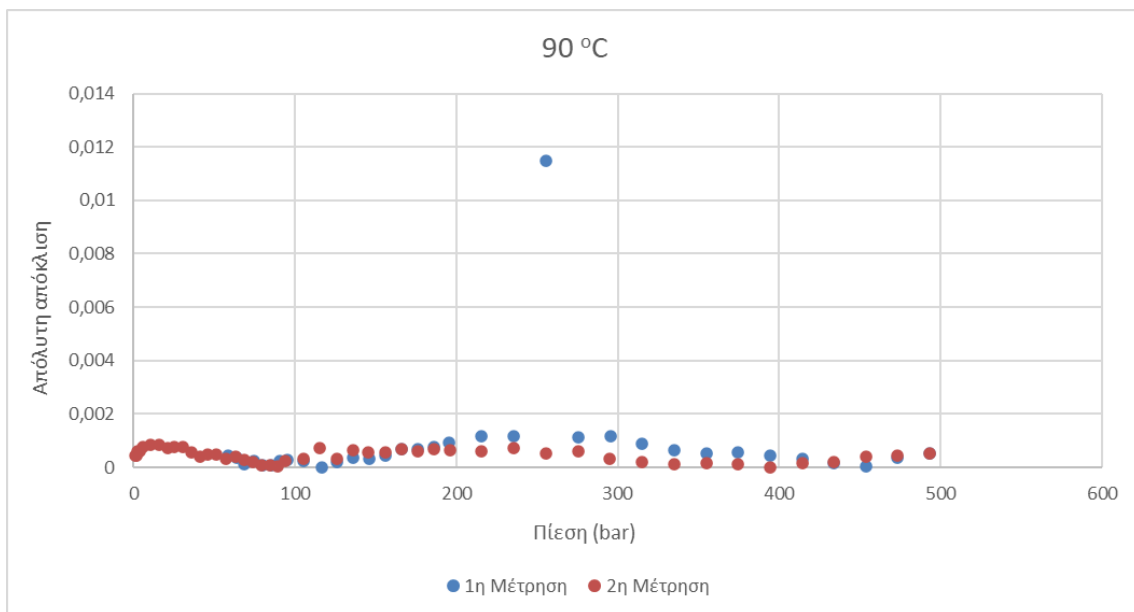
**Σχήμα E.9 :** Σχετική απόκλιση εξίσωσης (6.10) για δύο μετρήσεις στους 90 °C για το αιθάνιο



**Σχήμα E.10 :** Απόλυτη απόκλιση εξίσωσης (6.10) για δύο μετρήσεις στους 50 °C για το αιθάνιο



**Σχήμα E.11 :** Απόλυτη απόκλιση εξίσωσης (6.10) για δύο μετρήσεις στους 70 °C για το αιθάνιο



**Σχήμα E.12 :** Απόλυτη απόκλιση εξίσωσης (6.10) για δύο μετρήσεις στους 90 °C για το αιθάνιο

## Παράρτημα Ζ

### ΜΕΘΑΝΙΟ

Μέση θερμοκρασία πειράματος: 21,50 °C

Temperature (C)	Pressure (bar)	Density (g/ml)	Temperature (C)	Pressure (bar)	Density (g/ml)	Δd (g/ml)	Θερμοκρασιακή αβεβαιότητα (g/ml)
21	5	0,00330980	22	5	0,00329820	0,00001160	0,00000580
21	6	0,00397900	22	6	0,00396500	0,00001400	0,00000700
21	7	0,00465060	22	7	0,00463410	0,00001650	0,00000825
21	8	0,00532470	22	8	0,00530570	0,00001900	0,00000950
21	9	0,00600130	22	9	0,00597970	0,00002160	0,00001080
21	10	0,00668030	22	10	0,00665610	0,00002420	0,00001210
21	11	0,00736180	22	11	0,00733500	0,00002680	0,00001340
21	12	0,00804570	22	12	0,00801630	0,00002940	0,00001470
21	13	0,00873220	22	13	0,00870000	0,00003220	0,00001610
21	14	0,00942110	22	14	0,00938620	0,00003490	0,00001745
21	15	0,01011300	22	15	0,01007500	0,00003800	0,00001900
21	16	0,01080700	22	16	0,01076600	0,00004100	0,00002050
21	17	0,01150300	22	17	0,01145900	0,00004400	0,00002200
21	18	0,01220200	22	18	0,01215600	0,00004600	0,00002300
21	19	0,01290400	22	19	0,01285400	0,00005000	0,00002500
21	20	0,01360800	22	20	0,01355500	0,00005300	0,00002650
21	21	0,01431400	22	21	0,01425900	0,00005500	0,00002750
21	22	0,01502300	22	22	0,01496500	0,00005800	0,00002900
21	23	0,01573500	22	23	0,01567300	0,00006200	0,00003100
21	24	0,01644900	22	24	0,01638400	0,00006500	0,00003250
21	25	0,01716600	22	25	0,01709800	0,00006800	0,00003400
21	26	0,01788600	22	26	0,01781400	0,00007200	0,00003600
21	27	0,01860800	22	27	0,01853200	0,00007600	0,00003800
21	28	0,01933200	22	28	0,01925300	0,00007900	0,00003950
21	29	0,02005900	22	29	0,01997700	0,00008200	0,00004100
21	30	0,02078900	22	30	0,02070300	0,00008600	0,00004300
21	31	0,02152100	22	31	0,02143200	0,00008900	0,00004450
21	32	0,02225600	22	32	0,02216300	0,00009300	0,00004650
21	33	0,02299400	22	33	0,02289700	0,00009700	0,00004850
21	34	0,02373400	22	34	0,02363300	0,00010100	0,00005050
21	35	0,02447600	22	35	0,02437200	0,00010400	0,00005200
21	36	0,02522100	22	36	0,02511400	0,00010700	0,00005350
21	37	0,02596900	22	37	0,02585800	0,00011100	0,00005550
21	38	0,02672000	22	38	0,02660400	0,00011600	0,00005800
21	39	0,02747300	22	39	0,02735300	0,00012000	0,00006000
21	40	0,02822800	22	40	0,02810500	0,00012300	0,00006150
21	41	0,02898700	22	41	0,02885900	0,00012800	0,00006400
21	42	0,02974700	22	42	0,02961500	0,00013200	0,00006600
21	43	0,03051100	22	43	0,03037400	0,00013700	0,00006850
21	44	0,03127700	22	44	0,03113600	0,00014100	0,00007050
21	45	0,03204500	22	45	0,03190000	0,00014500	0,00007250
21	46	0,03281600	22	46	0,03266700	0,00014900	0,00007450
21	47	0,03359000	22	47	0,03343600	0,00015400	0,00007700
21	48	0,03436600	22	48	0,03420800	0,00015800	0,00007900
21	49	0,03514500	22	49	0,03498200	0,00016300	0,00008150
21	50	0,03592600	22	50	0,03575900	0,00016700	0,00008350
21	51	0,03671000	22	51	0,03653800	0,00017200	0,00008600
21	52	0,03749700	22	52	0,03732000	0,00017700	0,00008850
21	53	0,03828600	22	53	0,03810400	0,00018200	0,00009100
21	54	0,03907700	22	54	0,03889000	0,00018700	0,00009350
21	55	0,03987100	22	55	0,03967900	0,00019200	0,00009600
21	56	0,04066800	22	56	0,04047100	0,00019700	0,00009850
21	57	0,04146600	22	57	0,04126400	0,00020200	0,00010100
21	58	0,04226800	22	58	0,04206100	0,00020700	0,00010350
21	59	0,04307200	22	59	0,04285900	0,00021300	0,00010650
21	60	0,04387800	22	60	0,04366000	0,00021800	0,00010900
21	61	0,04468700	22	61	0,04446400	0,00022300	0,00011150
21	62	0,04549800	22	62	0,04526900	0,00022900	0,00011450
21	63	0,04631100	22	63	0,04607700	0,00023400	0,00011700
21	64	0,04712700	22	64	0,04688800	0,00023900	0,00011950
21	65	0,04794500	22	65	0,04770000	0,00024500	0,00012250
21	66	0,04876600	22	66	0,04851500	0,00025100	0,00012550
21	67	0,04958900	22	67	0,04933300	0,00025600	0,00012800
21	68	0,05041400	22	68	0,05015200	0,00026200	0,00013100
21	69	0,05124100	22	69	0,05097300	0,00026800	0,00013400
21	70	0,05207100	22	70	0,05179700	0,00027400	0,00013700
21	71	0,05290300	22	71	0,05262300	0,00028000	0,00014000
21	72	0,05373700	22	72	0,05345100	0,00028600	0,00014300
21	73	0,05457300	22	73	0,05428100	0,00029200	0,00014600
21	74	0,05541100	22	74	0,05511400	0,00029700	0,00014850
21	75	0,05625200	22	75	0,05594800	0,00030400	0,00015200

Πίνακας Ζ.1: Θερμοκρασιακή αβεβαιότητα με  $T_K=21,00$  °C και  $T_A=22,00$  °C και εύρος πίεσης 5 έως 75 bar

Temperature (C)	Pressure (bar)	Density (g/ml)	Δd (g/ml)	Αβεβαιότητα πίεσης (g/ml)	Συνολική αβεβαιότητα (g/ml)	Απόκλιση
21,50	5	0,00330400	0,00066800	0,00040080	0,00040084	12,13%
21,50	6	0,00397200	0,00067040	0,00040224	0,00040230	10,13%
21,50	7	0,00464240	0,00067280	0,00040368	0,00040376	8,70%
21,50	8	0,00531520	0,00067530	0,00040518	0,00040529	7,63%
21,50	9	0,00599050	0,00067770	0,00040662	0,00040676	6,79%
21,50	10	0,00666820	0,00068020	0,00040812	0,00040830	6,12%
21,50	11	0,00734840	0,00068260	0,00040956	0,00040978	5,58%
21,50	12	0,00803100	0,00068510	0,00041106	0,00041132	5,12%
21,50	13	0,00871610	0,00068750	0,00041250	0,00041281	4,74%
21,50	14	0,00940360	0,00069040	0,00041424	0,00041461	4,41%
21,50	15	0,01009400	0,00069200	0,00041520	0,00041563	4,12%
21,50	16	0,01078600	0,00069500	0,00041700	0,00041750	3,87%
21,50	17	0,01148100	0,00069800	0,00041880	0,00041938	3,65%
21,50	18	0,01217900	0,00070000	0,00042000	0,00042063	3,45%
21,50	19	0,01287900	0,00070200	0,00042120	0,00042194	3,28%
21,50	20	0,01358100	0,00070500	0,00042300	0,00042383	3,12%
21,50	21	0,01428600	0,00070800	0,00042480	0,00042569	2,98%
21,50	22	0,01499400	0,00071000	0,00042600	0,00042699	2,85%
21,50	23	0,01570400	0,00071300	0,00042780	0,00042892	2,73%
21,50	24	0,01641700	0,00071500	0,00042900	0,00043023	2,62%
21,50	25	0,01713200	0,00071800	0,00043080	0,00043214	2,52%
21,50	26	0,01785000	0,00072000	0,00043200	0,00043350	2,43%
21,50	27	0,01857000	0,00072300	0,00043380	0,00043546	2,34%
21,50	28	0,01929300	0,00072500	0,00043500	0,00043679	2,26%
21,50	29	0,02001800	0,00072800	0,00043680	0,00043872	2,19%
21,50	30	0,02074600	0,00073000	0,00043800	0,00044011	2,12%
21,50	31	0,02147600	0,00073400	0,00044040	0,00044264	2,06%
21,50	32	0,02221000	0,00073500	0,00044100	0,00044344	2,00%
21,50	33	0,02294500	0,00073800	0,00044280	0,00044545	1,94%
21,50	34	0,02368300	0,00074100	0,00044460	0,00044746	1,89%
21,50	35	0,02442400	0,00074300	0,00044580	0,00044882	1,84%
21,50	36	0,02516700	0,00074600	0,00044760	0,00045079	1,79%
21,50	37	0,02591300	0,00074900	0,00044940	0,00045281	1,75%
21,50	38	0,02666200	0,00075100	0,00045060	0,00045432	1,70%
21,50	39	0,02741300	0,00075300	0,00045180	0,00045577	1,66%
21,50	40	0,02816600	0,00075600	0,00045360	0,00045775	1,63%
21,50	41	0,02892200	0,00075900	0,00045540	0,00045988	1,59%
21,50	42	0,02968100	0,00076100	0,00045660	0,00046135	1,55%
21,50	43	0,03044200	0,00076400	0,00045840	0,00046349	1,52%
21,50	44	0,03120600	0,00076700	0,00046020	0,00046557	1,49%
21,50	45	0,03197300	0,00076800	0,00046080	0,00046647	1,46%
21,50	46	0,03274100	0,00077200	0,00046320	0,00046915	1,43%
21,50	47	0,03351300	0,00077400	0,00046440	0,00047074	1,40%
21,50	48	0,03428700	0,00077600	0,00046560	0,00047225	1,38%
21,50	49	0,03506300	0,00077900	0,00046740	0,00047445	1,35%
21,50	50	0,03584200	0,00078200	0,00046920	0,00047657	1,33%
21,50	51	0,03662400	0,00078400	0,00047040	0,00047820	1,31%
21,50	52	0,03740800	0,00078600	0,00047160	0,00047983	1,28%
21,50	53	0,03819400	0,00078900	0,00047340	0,00048207	1,26%
21,50	54	0,03898300	0,00079200	0,00047520	0,00048431	1,24%
21,50	55	0,03977500	0,00079400	0,00047640	0,00048598	1,22%
21,50	56	0,04056900	0,00079600	0,00047760	0,00048765	1,20%
21,50	57	0,04136500	0,00079900	0,00047940	0,00048992	1,18%
21,50	58	0,04216400	0,00080100	0,00048060	0,00049162	1,17%
21,50	59	0,04296500	0,00080400	0,00048240	0,00049402	1,15%
21,50	60	0,04376900	0,00080600	0,00048360	0,00049573	1,13%
21,50	61	0,04457500	0,00080800	0,00048480	0,00049746	1,12%
21,50	62	0,04538300	0,00081100	0,00048660	0,00049989	1,10%
21,50	63	0,04619400	0,00081300	0,00048780	0,00050164	1,09%
21,50	64	0,04700700	0,00081500	0,00048900	0,00050339	1,07%
21,50	65	0,04782200	0,00081800	0,00049080	0,00050586	1,06%
21,50	66	0,04864000	0,00082000	0,00049200	0,00050775	1,04%
21,50	67	0,04946000	0,00082200	0,00049320	0,00050954	1,03%
21,50	68	0,05028200	0,00082500	0,00049500	0,00051204	1,02%
21,50	69	0,05110700	0,00082700	0,00049620	0,00051398	1,01%
21,50	70	0,05193400	0,00082800	0,00049680	0,00051534	0,99%
21,50	71	0,05276200	0,00083100	0,00049860	0,00051788	0,98%
21,50	72	0,05359300	0,00083400	0,00050040	0,00052043	0,97%
21,50	73	0,05442700	0,00083500	0,00050100	0,00052184	0,96%
21,50	74	0,05526200	0,00083700	0,00050220	0,00052370	0,95%
21,50	75	0,05609900				

**Πίνακας Ζ.2:** Αβεβαιότητα πίεσης και συνολική αβεβαιότητα με μέση θερμοκρασία 21,50 °C και εύρος πίεσης 5 έως 75 bar

Temperature (C)	Pressure (bar)	Density (g/ml)	E.K. Density (g/ml)	Απόλυτη απόκλιση (g/ml)	Απόκλιση
21,33	4,413	0,00291890	0,00302258	0,00010369	3,55%
21,35	5,213	0,00344933	0,00368931	0,00023998	6,96%
21,36	6,613	0,00438615	0,00445702	0,00007087	1,62%
21,37	7,613	0,00505772	0,00503315	0,00002458	0,49%
21,39	8,563	0,00569792	0,00573345	0,00003552	0,62%
21,4	10,663	0,00712172	0,00714076	0,00001904	0,27%
21,41	12,663	0,00848791	0,00848734	0,00000056	0,01%
21,42	14,613	0,00982943	0,00986065	0,00003122	0,32%
21,43	16,563	0,01119191	0,01125922	0,00006731	0,60%
21,44	18,563	0,01259237	0,01257997	0,00001240	0,10%
21,45	23,463	0,01605621	0,01604947	0,00000674	0,04%
21,45	28,363	0,01957057	0,01964970	0,00007913	0,40%
21,61	33,263	0,02313494	0,02297752	0,00015742	0,68%
21,61	38,263	0,02685039	0,02684063	0,00000977	0,04%
21,62	43,163	0,03055333	0,03053714	0,00001618	0,05%
21,62	48,163	0,03439634	0,03433656	0,00005978	0,17%
21,63	53,113	0,03826144	0,03815871	0,00010273	0,27%
21,63	58,063	0,04218855	0,04216342	0,00002513	0,06%
21,64	62,963	0,04613222	0,04601316	0,00011905	0,26%
21,64	67,863	0,05013404	0,05008395	0,00005009	0,10%
21,64	72,813	0,05423089	0,05414117	0,00008972	0,17%
21,65	77,763	0,05837588	0,05827114	0,00010474	0,18%

**Πίνακας Ζ.3:** Αποκλίσεις πυκνότητας μεθανίου βιβλιογραφικών δεδομένων και πυκνότητας υπολογισμένης από εξίσωση σε θερμοκρασία 22 °C και εύρος πίεσης 4 έως 78 bar

Temperature (C)	Pressure (bar)	Density (g/ml)	Συνολική αβεβαιότητα (g/ml)	Απόκλιση
-	-	-	-	-
21,50	5	0,00330400	0,00040084	12,13%
21,50	7	0,00464240	0,00040376	8,70%
21,50	8	0,00531520	0,00040529	7,63%
21,50	9	0,00599050	0,00040676	6,79%
21,50	11	0,00734840	0,00040978	5,58%
21,50	13	0,00871610	0,00041281	4,74%
21,50	15	0,01009400	0,00041563	4,12%
21,50	17	0,01148100	0,00041938	3,65%
21,50	19	0,01287900	0,00042194	3,28%
21,50	23	0,01570400	0,00042892	2,73%
21,50	28	0,01929300	0,00043679	2,26%
21,50	33	0,02294500	0,00044545	1,94%
21,50	38	0,02666200	0,00045432	1,70%
21,50	43	0,03044200	0,00046349	1,52%
21,50	48	0,03428700	0,00047225	1,38%
21,50	53	0,03819400	0,00048207	1,26%
21,50	58	0,04216400	0,00049162	1,17%
21,50	63	0,04619400	0,00050164	1,09%
21,50	68	0,05028200	0,00051204	1,02%
21,50	73	0,05442700	0,00052184	0,96%
-	-	-	-	-

**Πίνακας Ζ.4:** Αποκλίσεις πυκνότητας μεθανίου βιβλιογραφικών δεδομένων λαμβάνοντας υπόψη την συνολική αβεβαιότητα σε αντίστοιχες συνθήκες πειράματος

## Μέση θερμοκρασία πειράματος: 49,98 °C

Temperature (C)	Pressure (bar)	Density (g/ml)	Temperature (C)	Pressure (bar)	Density (g/ml)	Δd (g/ml)	Θερμοκρασιακή αβεβαιότητα (g/ml)
49,48	5	0,00300950	50,48	5	0,00299990	0,00000960	0,00000480
49,48	6	0,00361600	50,48	6	0,00360440	0,00001160	0,00000580
49,48	7	0,00422400	50,48	7	0,00421050	0,00001350	0,00000675
49,48	8	0,00483360	50,48	8	0,00481800	0,00001560	0,00000780
49,48	9	0,00544470	50,48	9	0,00542710	0,00001760	0,00000880
49,48	10	0,00605730	50,48	10	0,00603760	0,00001970	0,00000985
49,48	11	0,00667150	50,48	11	0,00664970	0,00002180	0,00001090
49,48	12	0,00728720	50,48	12	0,00726330	0,00002390	0,00001195
49,48	13	0,00790440	50,48	13	0,00787830	0,00002610	0,00001305
49,48	14	0,00852320	50,48	14	0,00849490	0,00002830	0,00001415
49,48	15	0,00914340	50,48	15	0,00911300	0,00003040	0,00001520
49,48	16	0,00976530	50,48	16	0,00973260	0,00003270	0,00001635
49,48	17	0,01038900	50,48	17	0,01035400	0,00003500	0,00001750
49,48	18	0,01101300	50,48	18	0,01097600	0,00003700	0,00001850
49,48	19	0,01164000	50,48	19	0,01160000	0,00004000	0,00002000
49,48	20	0,01226800	50,48	20	0,01222600	0,00004200	0,00002100
49,48	21	0,01289700	50,48	21	0,01285300	0,00004400	0,00002200
49,48	22	0,01352800	50,48	22	0,01348100	0,00004700	0,00002350
49,48	23	0,01416100	50,48	23	0,01411100	0,00005000	0,00002500
49,48	24	0,01479400	50,48	24	0,01474300	0,00005100	0,00002550
49,48	25	0,01543000	50,48	25	0,01537600	0,00005400	0,00002700
49,48	26	0,01606700	50,48	26	0,01601000	0,00005700	0,00002850
49,48	27	0,01670500	50,48	27	0,01664600	0,00005900	0,00002950
49,48	28	0,01734500	50,48	28	0,01728400	0,00006100	0,00003050
49,48	29	0,01798700	50,48	29	0,01792300	0,00006400	0,00003200
49,48	30	0,01863000	50,48	30	0,01856300	0,00006700	0,00003350
49,48	31	0,01927400	50,48	31	0,01920500	0,00006900	0,00003450
49,48	32	0,01992000	50,48	32	0,01984800	0,00007200	0,00003600
49,48	33	0,02056700	50,48	33	0,02049200	0,00007500	0,00003750
49,48	34	0,02121600	50,48	34	0,02113900	0,00007700	0,00003850
49,48	35	0,02186600	50,48	35	0,02178600	0,00008000	0,00004000
49,48	36	0,02251800	50,48	36	0,02243500	0,00008300	0,00004150
49,48	37	0,02317100	50,48	37	0,02308500	0,00008600	0,00004300
49,48	38	0,02382600	50,48	38	0,02373700	0,00008900	0,00004450
49,48	39	0,02448200	50,48	39	0,02439000	0,00009200	0,00004600
49,48	40	0,02513900	50,48	40	0,02504500	0,00009400	0,00004700
49,48	41	0,02579800	50,48	41	0,02570100	0,00009700	0,00004850
49,48	42	0,02645800	50,48	42	0,02635800	0,00010000	0,00005000
49,48	43	0,02712000	50,48	43	0,02701700	0,00010300	0,00005150
49,48	44	0,02778300	50,48	44	0,02767700	0,00010600	0,00005300
49,48	45	0,02844800	50,48	45	0,02833800	0,00011000	0,00005500
49,48	46	0,02911300	50,48	46	0,02900100	0,00011200	0,00005600
49,48	47	0,02978100	50,48	47	0,02966500	0,00011600	0,00005800
49,48	48	0,03044900	50,48	48	0,03033100	0,00011800	0,00005900
49,48	49	0,03111900	50,48	49	0,03099800	0,00012100	0,00006050
49,48	50	0,03179100	50,48	50	0,03166600	0,00012500	0,00006250
49,48	51	0,03246300	50,48	51	0,03233500	0,00012800	0,00006400
49,48	52	0,03313700	50,48	52	0,03300600	0,00013100	0,00006550
49,48	53	0,03381200	50,48	53	0,03367800	0,00013400	0,00006700
49,48	54	0,03448900	50,48	54	0,03435100	0,00013800	0,00006900
49,48	55	0,03516700	50,48	55	0,03502600	0,00014100	0,00007050
49,48	56	0,03584600	50,48	56	0,03570100	0,00014500	0,00007250
49,48	57	0,03652600	50,48	57	0,03637800	0,00014800	0,00007400
49,48	58	0,03720800	50,48	58	0,03705700	0,00015100	0,00007550
49,48	59	0,03789100	50,48	59	0,03773600	0,00015500	0,00007750
49,48	60	0,03857500	50,48	60	0,03841700	0,00015800	0,00007900
49,48	61	0,03926000	50,48	61	0,03909900	0,00016100	0,00008050
49,48	62	0,03994700	50,48	62	0,03978200	0,00016500	0,00008250
49,48	63	0,04063500	50,48	63	0,04046600	0,00016900	0,00008450
49,48	64	0,04132400	50,48	64	0,04115100	0,00017300	0,00008650
49,48	65	0,04201400	50,48	65	0,04183800	0,00017600	0,00008800
49,48	66	0,04270500	50,48	66	0,04252500	0,00018000	0,00009000
49,48	67	0,04339700	50,48	67	0,04321400	0,00018300	0,00009150
49,48	68	0,04409100	50,48	68	0,04390400	0,00018700	0,00009350
49,48	69	0,04478500	50,48	69	0,04459500	0,00019000	0,00009500
49,48	70	0,04548100	50,48	70	0,04528700	0,00019400	0,00009700
49,48	71	0,04617800	50,48	71	0,04598000	0,00019800	0,00009900
49,48	72	0,04687500	50,48	72	0,04667400	0,00020100	0,00010050
49,48	73	0,04757400	50,48	73	0,04736900	0,00020500	0,00010250
49,48	74	0,04827400	50,48	74	0,04806500	0,00020900	0,00010450
49,48	75	0,04897500	50,48	75	0,04876100	0,00021400	0,00010700

**Πίνακας Ζ.5:** Θερμοκρασιακή αβεβαιότητα με  $T_K=49,48$  °C και  $T_A=50,48$  °C και εύρος πίεσης 5 έως 75 bar

Temperature (C)	Pressure (bar)	Density (g/ml)	Δd (g/ml)	Αβεβαιότητα πίεσης (g/ml)	Συνολική αβεβαιότητα (g/ml)	Απόκλιση
49,98	5	0,00300470	0,00060550	0,00036330	0,00036333	12,09%
49,98	6	0,00361020	0,00060700	0,00036420	0,00036425	10,09%
49,98	7	0,00421720	0,00060860	0,00036516	0,00036522	8,66%
49,98	8	0,00482580	0,00061000	0,00036600	0,00036608	7,59%
49,98	9	0,00543580	0,00061160	0,00036696	0,00036707	6,75%
49,98	10	0,00604740	0,00061320	0,00036792	0,00036805	6,09%
49,98	11	0,00666060	0,00061460	0,00036876	0,00036892	5,54%
49,98	12	0,00727520	0,00061610	0,00036966	0,00036985	5,08%
49,98	13	0,00789130	0,00061770	0,00037062	0,00037085	4,70%
49,98	14	0,00850900	0,00061920	0,00037152	0,00037179	4,37%
49,98	15	0,00912820	0,00062070	0,00037242	0,00037273	4,08%
49,98	16	0,00974890	0,00062210	0,00037326	0,00037362	3,83%
49,98	17	0,01037100	0,00062400	0,00037440	0,00037481	3,61%
49,98	18	0,01099500	0,00062500	0,00037500	0,00037546	3,41%
49,98	19	0,01162000	0,00062700	0,00037620	0,00037673	3,24%
49,98	20	0,01224700	0,00062800	0,00037680	0,00037738	3,08%
49,98	21	0,01287500	0,00063000	0,00037800	0,00037864	2,94%
49,98	22	0,01350500	0,00063100	0,00037860	0,00037933	2,81%
49,98	23	0,01413600	0,00063300	0,00037980	0,00038062	2,69%
49,98	24	0,01476900	0,00063400	0,00038040	0,00038125	2,58%
49,98	25	0,01540300	0,00063600	0,00038160	0,00038255	2,48%
49,98	26	0,01603900	0,00063700	0,00038220	0,00038326	2,39%
49,98	27	0,01667600	0,00063800	0,00038280	0,00038394	2,30%
49,98	28	0,01731400	0,00064100	0,00038460	0,00038581	2,23%
49,98	29	0,01795500	0,00064100	0,00038460	0,00038593	2,15%
49,98	30	0,01859600	0,00064300	0,00038580	0,00038725	2,08%
49,98	31	0,01923900	0,00064500	0,00038700	0,00038853	2,02%
49,98	32	0,01988400	0,00064600	0,00038760	0,00038927	1,96%
49,98	33	0,02053000	0,00064700	0,00038820	0,00039001	1,90%
49,98	34	0,02117700	0,00064900	0,00038940	0,00039130	1,85%
49,98	35	0,02182600	0,00065000	0,00039000	0,00039205	1,80%
49,98	36	0,02247600	0,00065200	0,00039120	0,00039340	1,75%
49,98	37	0,02312800	0,00065300	0,00039180	0,00039415	1,70%
49,98	38	0,02378100	0,00065500	0,00039300	0,00039551	1,66%
49,98	39	0,02443600	0,00065600	0,00039360	0,00039628	1,62%
49,98	40	0,02509200	0,00065700	0,00039420	0,00039699	1,58%
49,98	41	0,02574900	0,00065900	0,00039540	0,00039836	1,55%
49,98	42	0,02640800	0,00066000	0,00039600	0,00039914	1,51%
49,98	43	0,02706800	0,00066200	0,00039720	0,00040052	1,48%
49,98	44	0,02773000	0,00066300	0,00039780	0,00040132	1,45%
49,98	45	0,02839300	0,00066400	0,00039840	0,00040218	1,42%
49,98	46	0,02905700	0,00066600	0,00039960	0,00040350	1,39%
49,98	47	0,02972300	0,00066700	0,00040020	0,00040438	1,36%
49,98	48	0,03039000	0,00066800	0,00040080	0,00040512	1,33%
49,98	49	0,03105800	0,00067000	0,00040200	0,00040653	1,31%
49,98	50	0,03172800	0,00067100	0,00040260	0,00040742	1,28%
49,98	51	0,03239900	0,00067200	0,00040320	0,00040825	1,26%
49,98	52	0,03307100	0,00067400	0,00040440	0,00040967	1,24%
49,98	53	0,03374500	0,00067500	0,00040500	0,00041050	1,22%
49,98	54	0,03442000	0,00067600	0,00040560	0,00041143	1,20%
49,98	55	0,03509600	0,00067700	0,00040620	0,00041227	1,17%
49,98	56	0,03577300	0,00067900	0,00040740	0,00041380	1,16%
49,98	57	0,03645200	0,00068000	0,00040800	0,00041466	1,14%
49,98	58	0,03713200	0,00068100	0,00040860	0,00041552	1,12%
49,98	59	0,03781300	0,00068300	0,00040980	0,00041706	1,10%
49,98	60	0,03849600	0,00068300	0,00040980	0,00041735	1,08%
49,98	61	0,03917900	0,00068500	0,00041100	0,00041881	1,07%
49,98	62	0,03986400	0,00068600	0,00041160	0,00041979	1,05%
49,98	63	0,04055000	0,00068700	0,00041220	0,00042077	1,04%
49,98	64	0,04123700	0,00068800	0,00041280	0,00042177	1,02%
49,98	65	0,04192500	0,00069000	0,00041400	0,00042325	1,01%
49,98	66	0,04261500	0,00069000	0,00041400	0,00042367	0,99%
49,98	67	0,04330500	0,00069200	0,00041520	0,00042516	0,98%
49,98	68	0,04399700	0,00069300	0,00041580	0,00042618	0,97%
49,98	69	0,04469000	0,00069300	0,00041580	0,00042651	0,95%
49,98	70	0,04538300	0,00069500	0,00041700	0,00042813	0,94%
49,98	71	0,04607800	0,00069600	0,00041760	0,00042917	0,93%
49,98	72	0,04677400	0,00069700	0,00041820	0,00043011	0,92%
49,98	73	0,04747100	0,00069800	0,00041880	0,00043116	0,91%
49,98	74	0,04816900	0,00069900	0,00041940	0,00043222	0,90%
49,98	75	0,04886800				

**Πίνακας Ζ.6:** Αβεβαιότητα πίεσης και συνολική αβεβαιότητα με μέση θερμοκρασία 49,98 °C και εύρος πίεσης 5 έως 75 bar

Temperature (C)	Pressure (bar)	Density (g/ml)	E.K. Density (g/ml)	Απόλυτη απόκλιση	Απόκλιση
49,34	5,263	0,00317180	0,00316180	0,00001000	0,32%
49,46	6,163	0,00371584	0,00377868	0,00006284	1,69%
49,59	7,163	0,00432217	0,00429972	0,00002245	0,52%
49,67	8,213	0,00496089	0,00495833	0,00000255	0,05%
49,76	10,263	0,00621325	0,00617510	0,00003815	0,61%
49,83	12,263	0,00744088	0,00746640	0,00002552	0,34%
49,87	14,263	0,00867512	0,00869802	0,00002290	0,26%
49,91	16,263	0,00992347	0,00992970	0,00000623	0,06%
49,95	18,263	0,01117671	0,01116145	0,00001526	0,14%
49,99	23,163	0,01425733	0,01426263	0,00000530	0,04%
50,04	28,163	0,01742533	0,01734400	0,00008133	0,47%
50,09	33,063	0,02056842	0,02052927	0,00003915	0,19%
50,12	38,013	0,02378102	0,02376225	0,00001877	0,08%
50,15	42,963	0,02702904	0,02699619	0,00003285	0,12%
50,18	47,963	0,03034382	0,03024242	0,00010139	0,33%
50,21	52,863	0,03362348	0,03354272	0,00008076	0,24%
50,23	57,813	0,03696836	0,03688593	0,00008244	0,22%
50,25	62,763	0,04034292	0,04024304	0,00009988	0,25%
50,27	67,663	0,04371085	0,04366576	0,00004510	0,10%
50,29	72,613	0,04713881	0,04701318	0,00012564	0,27%
50,32	77,563	0,05058790	0,05035686	0,00023104	0,46%

**Πίνακας Ζ.7:** Αποκλίσεις πυκνότητας μεθανίου βιβλιογραφικών δεδομένων και πυκνότητας υπολογισμένης από εξίσωση σε θερμοκρασία 50 °C και εύρος πίεσης 5 έως 78 bar

Temperature (C)	Pressure (bar)	Density (g/ml)	Συνολική αβεβαιότητα	Απόκλιση
49,98	5	0,00300470	0,00036333	12,09%
49,98	6	0,00361020	0,00036425	10,09%
49,98	7	0,00421720	0,00036522	8,66%
49,98	8	0,00482580	0,00036608	7,59%
49,98	10	0,00604740	0,00036805	6,09%
49,98	12	0,00727520	0,00036985	5,08%
49,98	14	0,00850900	0,00037179	4,37%
49,98	16	0,00974890	0,00037362	3,83%
49,98	18	0,01099500	0,00037546	3,41%
49,98	23	0,01413600	0,00038062	2,69%
49,98	28	0,01731400	0,00038581	2,23%
49,98	33	0,02053000	0,00039001	1,90%
49,98	38	0,02378100	0,00039551	1,66%
49,98	43	0,02706800	0,00040052	1,48%
49,98	48	0,03039000	0,00040512	1,33%
49,98	53	0,03374500	0,00041050	1,22%
49,98	58	0,03713200	0,00041552	1,12%
49,98	63	0,04055000	0,00042077	1,04%
49,98	68	0,04399700	0,00042618	0,97%
49,98	73	0,04747100	0,00043116	0,91%
-	-	-	-	-

**Πίνακας Ζ.8:** Αποκλίσεις πυκνότητας μεθανίου βιβλιογραφικών δεδομένων λαμβάνοντας υπόψιν την συνολική αβεβαιότητα σε αντίστοιχες συνθήκες πειράματος

## Μέση θερμοκρασία πειράματος: 90,04 °C

Temperature (C)	Pressure (bar)	Density (g/ml)	Temperature (C)	Pressure (bar)	Density (g/ml)	Δd (g/ml)	Θερμοκρασιακή αβεβαιότητα (g/ml)
89,54	5	0,00267030	90,54	5	0,00266280	0,00000750	0,00000375
89,54	6	0,00320670	90,54	6	0,00319770	0,00000900	0,00000450
89,54	7	0,00374410	90,54	7	0,00373350	0,00001060	0,00000530
89,54	8	0,00428220	90,54	8	0,00427000	0,00001220	0,00000610
89,54	9	0,00482110	90,54	9	0,00480740	0,00001370	0,00000685
89,54	10	0,00536080	90,54	10	0,00534550	0,00001530	0,00000765
89,54	11	0,00590130	90,54	11	0,00588440	0,00001690	0,00000845
89,54	12	0,00644250	90,54	12	0,00642400	0,00001850	0,00000925
89,54	13	0,00698460	90,54	13	0,00696450	0,00002010	0,00001005
89,54	14	0,00752740	90,54	14	0,00750570	0,00002170	0,00001085
89,54	15	0,00807110	90,54	15	0,00804760	0,00002350	0,00001175
89,54	16	0,00861540	90,54	16	0,00859040	0,00002500	0,00001250
89,54	17	0,00916060	90,54	17	0,00913380	0,00002680	0,00001340
89,54	18	0,00970650	90,54	18	0,00967810	0,00002840	0,00001420
89,54	19	0,01025300	90,54	19	0,01022300	0,00003000	0,00001500
89,54	20	0,01080100	90,54	20	0,01076900	0,00003200	0,00001600
89,54	21	0,01134900	90,54	21	0,01131500	0,00003400	0,00001700
89,54	22	0,01189800	90,54	22	0,01186200	0,00003600	0,00001800
89,54	23	0,01244700	90,54	23	0,01241000	0,00003700	0,00001850
89,54	24	0,01299800	90,54	24	0,01295900	0,00003900	0,00001950
89,54	25	0,01354900	90,54	25	0,01350800	0,00004100	0,00002050
89,54	26	0,01410100	90,54	26	0,01405800	0,00004300	0,00002150
89,54	27	0,01465300	90,54	27	0,01460900	0,00004400	0,00002200
89,54	28	0,01520600	90,54	28	0,01516000	0,00004600	0,00002300
89,54	29	0,01576000	90,54	29	0,01571300	0,00004700	0,00002350
89,54	30	0,01631500	90,54	30	0,01626500	0,00005000	0,00002500
89,54	31	0,01687000	90,54	31	0,01681900	0,00005100	0,00002550
89,54	32	0,01742700	90,54	32	0,01737300	0,00005400	0,00002700
89,54	33	0,01798300	90,54	33	0,01792800	0,00005500	0,00002750
89,54	34	0,01854100	90,54	34	0,01848300	0,00005800	0,00002900
89,54	35	0,01909900	90,54	35	0,01904000	0,00005900	0,00002950
89,54	36	0,01965700	90,54	36	0,01959600	0,00006100	0,00003050
89,54	37	0,02021700	90,54	37	0,02015400	0,00006300	0,00003150
89,54	38	0,02077700	90,54	38	0,02071200	0,00006500	0,00003250
89,54	39	0,02133800	90,54	39	0,02127100	0,00006700	0,00003350
89,54	40	0,02189900	90,54	40	0,02183000	0,00006900	0,00003450
89,54	41	0,02246100	90,54	41	0,02239000	0,00007100	0,00003550
89,54	42	0,02302400	90,54	42	0,02295100	0,00007300	0,00003650
89,54	43	0,02358700	90,54	43	0,02351200	0,00007500	0,00003750
89,54	44	0,02415100	90,54	44	0,02407400	0,00007700	0,00003850
89,54	45	0,02471500	90,54	45	0,02463600	0,00007900	0,00003950
89,54	46	0,02528000	90,54	46	0,02519900	0,00008100	0,00004050
89,54	47	0,02584600	90,54	47	0,02576200	0,00008400	0,00004200
89,54	48	0,02641200	90,54	48	0,02632700	0,00008500	0,00004250
89,54	49	0,02697900	90,54	49	0,02689100	0,00008800	0,00004400
89,54	50	0,02754600	90,54	50	0,02745600	0,00009000	0,00004500
89,54	51	0,02811400	90,54	51	0,02802200	0,00009200	0,00004600
89,54	52	0,02868200	90,54	52	0,02858900	0,00009300	0,00004650
89,54	53	0,02925100	90,54	53	0,02915500	0,00009600	0,00004800
89,54	54	0,02982100	90,54	54	0,02972300	0,00009800	0,00004900
89,54	55	0,03039100	90,54	55	0,03029100	0,00010000	0,00005000
89,54	56	0,03096100	90,54	56	0,03085900	0,00010200	0,00005100
89,54	57	0,03153300	90,54	57	0,03142800	0,00010500	0,00005250
89,54	58	0,03210400	90,54	58	0,03199700	0,00010700	0,00005350
89,54	59	0,03267600	90,54	59	0,03256700	0,00010900	0,00005450
89,54	60	0,03324900	90,54	60	0,03313700	0,00011200	0,00005600
89,54	61	0,03382200	90,54	61	0,03370800	0,00011400	0,00005700
89,54	62	0,03439500	90,54	62	0,03428000	0,00011500	0,00005750
89,54	63	0,03496900	90,54	63	0,03485100	0,00011800	0,00005900
89,54	64	0,03554400	90,54	64	0,03542300	0,00012100	0,00006050
89,54	65	0,03611900	90,54	65	0,03599600	0,00012300	0,00006150
89,54	66	0,03669400	90,54	66	0,03656900	0,00012500	0,00006250
89,54	67	0,03727000	90,54	67	0,03714200	0,00012800	0,00006400
89,54	68	0,03784600	90,54	68	0,03771600	0,00013000	0,00006500
89,54	69	0,03842200	90,54	69	0,03829000	0,00013200	0,00006600
89,54	70	0,03899900	90,54	70	0,03886500	0,00013400	0,00006700
89,54	71	0,03957600	90,54	71	0,03944000	0,00013600	0,00006800
89,54	72	0,04015400	90,54	72	0,04001500	0,00013900	0,00006950
89,54	73	0,04073200	90,54	73	0,04059100	0,00014100	0,00007050
89,54	74	0,04131100	90,54	74	0,04116700	0,00014400	0,00007200
89,54	75	0,04188900	90,54	75	0,04174300	0,00014600	0,00007300

**Πίνακας Ζ.9:** Θερμοκρασιακή αβεβαιότητα με  $T_K=89,54$  °C και  $T_A=90,54$  °C και εύρος πίεσης 5 έως 75 bar

Temperature (C)	Pressure (bar)	Density (g/ml)	Δd (g/ml)	Αβεβαιότητα πίεσης (g/ml)	Συνολική αβεβαιότητα (g/ml)	Απόκλιση
90,04	5	0,00266650	0,00053570	0,00032142	0,00032144	12,05%
90,04	6	0,00320220	0,00053660	0,00032196	0,00032199	10,06%
90,04	7	0,00373880	0,00053730	0,00032238	0,00032242	8,62%
90,04	8	0,00427610	0,00053810	0,00032286	0,00032292	7,55%
90,04	9	0,00481420	0,00053890	0,00032334	0,00032341	6,72%
90,04	10	0,00535310	0,00053970	0,00032382	0,00032391	6,05%
90,04	11	0,00589280	0,00054050	0,00032430	0,00032441	5,51%
90,04	12	0,00643330	0,00054120	0,00032472	0,00032485	5,05%
90,04	13	0,00697450	0,00054200	0,00032520	0,00032536	4,66%
90,04	14	0,00751650	0,00054280	0,00032568	0,00032586	4,34%
90,04	15	0,00805930	0,00054360	0,00032616	0,00032637	4,05%
90,04	16	0,00860290	0,00054430	0,00032658	0,00032682	3,80%
90,04	17	0,00914720	0,00054510	0,00032706	0,00032733	3,58%
90,04	18	0,00969230	0,00054570	0,00032742	0,00032773	3,38%
90,04	19	0,01023800	0,00054700	0,00032820	0,00032854	3,21%
90,04	20	0,01078500	0,00054700	0,00032820	0,00032859	3,05%
90,04	21	0,01133200	0,00054800	0,00032880	0,00032924	2,91%
90,04	22	0,01188000	0,00054900	0,00032940	0,00032989	2,78%
90,04	23	0,01242900	0,00054900	0,00032940	0,00032992	2,65%
90,04	24	0,01297800	0,00055000	0,00033000	0,00033058	2,55%
90,04	25	0,01352800	0,00055100	0,00033060	0,00033123	2,45%
90,04	26	0,01407900	0,00055200	0,00033120	0,00033190	2,36%
90,04	27	0,01463100	0,00055200	0,00033120	0,00033193	2,27%
90,04	28	0,01518300	0,00055300	0,00033180	0,00033260	2,19%
90,04	29	0,01573600	0,00055400	0,00033240	0,00033323	2,12%
90,04	30	0,01629000	0,00055500	0,00033300	0,00033394	2,05%
90,04	31	0,01684500	0,00055500	0,00033300	0,00033397	1,98%
90,04	32	0,01740000	0,00055600	0,00033360	0,00033469	1,92%
90,04	33	0,01795600	0,00055600	0,00033360	0,00033473	1,86%
90,04	34	0,01851200	0,00055700	0,00033420	0,00033546	1,81%
90,04	35	0,01906900	0,00055800	0,00033480	0,00033610	1,76%
90,04	36	0,01962700	0,00055800	0,00033480	0,00033619	1,71%
90,04	37	0,02018500	0,00055900	0,00033540	0,00033688	1,67%
90,04	38	0,02074400	0,00056000	0,00033600	0,00033757	1,63%
90,04	39	0,02130400	0,00056000	0,00033600	0,00033767	1,58%
90,04	40	0,02186400	0,00056100	0,00033660	0,00033836	1,55%
90,04	41	0,02242500	0,00056200	0,00033720	0,00033906	1,51%
90,04	42	0,02298700	0,00056200	0,00033720	0,00033917	1,48%
90,04	43	0,02354900	0,00056300	0,00033780	0,00033988	1,44%
90,04	44	0,02411200	0,00056300	0,00033780	0,00033999	1,41%
90,04	45	0,02467500	0,00056400	0,00033840	0,00034070	1,38%
90,04	46	0,02523900	0,00056500	0,00033900	0,00034141	1,35%
90,04	47	0,02580400	0,00056500	0,00033900	0,00034159	1,32%
90,04	48	0,02636900	0,00056600	0,00033960	0,00034225	1,30%
90,04	49	0,02693500	0,00056600	0,00033960	0,00034244	1,27%
90,04	50	0,02750100	0,00056700	0,00034020	0,00034316	1,25%
90,04	51	0,02806800	0,00056700	0,00034020	0,00034330	1,22%
90,04	52	0,02863500	0,00056800	0,00034080	0,00034396	1,20%
90,04	53	0,02920300	0,00056900	0,00034140	0,00034476	1,18%
90,04	54	0,02977200	0,00056900	0,00034140	0,00034490	1,16%
90,04	55	0,03034100	0,00056900	0,00034140	0,00034504	1,14%
90,04	56	0,03091000	0,00057000	0,00034200	0,00034578	1,12%
90,04	57	0,03148000	0,00057100	0,00034260	0,00034660	1,10%
90,04	58	0,03205100	0,00057100	0,00034260	0,00034675	1,08%
90,04	59	0,03262200	0,00057100	0,00034260	0,00034691	1,06%
90,04	60	0,03319300	0,00057200	0,00034320	0,00034774	1,05%
90,04	61	0,03376500	0,00057200	0,00034320	0,00034790	1,03%
90,04	62	0,03433700	0,00057300	0,00034380	0,00034858	1,02%
90,04	63	0,03491000	0,00057300	0,00034380	0,00034883	1,00%
90,04	64	0,03548300	0,00057400	0,00034440	0,00034967	0,99%
90,04	65	0,03605700	0,00057400	0,00034440	0,00034985	0,97%
90,04	66	0,03663100	0,00057500	0,00034500	0,00035062	0,96%
90,04	67	0,03720600	0,00057500	0,00034500	0,00035089	0,94%
90,04	68	0,03778100	0,00057500	0,00034500	0,00035107	0,93%
90,04	69	0,03835600	0,00057600	0,00034560	0,00035185	0,92%
90,04	70	0,03893200	0,00057600	0,00034560	0,00035203	0,90%
90,04	71	0,03950800	0,00057700	0,00034620	0,00035282	0,89%
90,04	72	0,04008500	0,00057600	0,00034560	0,00035252	0,88%
90,04	73	0,04066100	0,00057800	0,00034680	0,00035389	0,87%
90,04	74	0,04123900	0,00057700	0,00034620	0,00035361	0,86%
90,04	75	0,04181600				

**Πίνακας Ζ.10:** Αβεβαιότητα πίεσης και συνολική αβεβαιότητα με μέση θερμοκρασία 90,04 °C και εύρος πίεσης 5 έως 75 bar

Temperature (C)	Pressure (bar)	Density (g/ml)	E.K. Density (g/ml)	Απόλυτη απόκλιση	Απόκλιση
89,69	6,463	0,00345511	0,00304829	0,00040682	11,77%
89,78	7,163	0,00382948	0,00344766	0,00038182	9,97%
89,83	8,213	0,00439358	0,00401346	0,00038012	8,65%
89,87	10,213	0,00547084	0,00517321	0,00029763	5,44%
89,9	12,263	0,00657828	0,00631352	0,00026476	4,02%
89,95	14,313	0,00768858	0,00742902	0,00025956	3,38%
89,97	16,263	0,00875557	0,00865335	0,00010222	1,17%
90	18,313	0,00987891	0,00973234	0,00014657	1,48%
90,02	23,213	0,01256321	0,01257085	0,00000764	0,06%
90,04	28,163	0,01528236	0,01538522	0,00010287	0,67%
90,05	33,163	0,01805105	0,01820677	0,00015571	0,86%
90,07	38,063	0,02078120	0,02098882	0,00020762	1,00%
90,15	43,113	0,02360690	0,02383131	0,00022440	0,95%
90,16	48,063	0,02639636	0,02672245	0,00032609	1,24%
90,18	53,013	0,02919867	0,02948460	0,00028593	0,98%
90,19	57,963	0,03201471	0,03237995	0,00036525	1,14%
90,2	62,863	0,03481349	0,03520361	0,00039013	1,12%
90,21	67,863	0,03768064	0,03807727	0,00039662	1,05%
90,22	72,763	0,04050016	0,04095517	0,00045501	1,12%
90,23	77,763	0,04338545	0,04385823	0,00047277	1,09%

**Πίνακας Z.11:** Αποκλίσεις πυκνότητας μεθανίου βιβλιογραφικών δεδομένων και πυκνότητας υπολογισμένης από εξίσωση σε θερμοκρασία 90 °C και εύρος πίεσης 6 έως 78 bar

Temperature (C)	Pressure (bar)	Density (g/ml)	Συνολική αβεβαιότητα	Απόκλιση
90,04	6	0,00320220	0,00032199	10,06%
90,04	7	0,00373880	0,00032242	8,62%
90,04	8	0,00427610	0,00032292	7,55%
90,04	10	0,00535310	0,00032391	6,05%
90,04	12	0,00643330	0,00032485	5,05%
90,04	14	0,00751650	0,00032586	4,34%
90,04	16	0,00860290	0,00032682	3,80%
90,04	18	0,00969230	0,00032773	3,38%
90,04	23	0,01242900	0,00032992	2,65%
90,04	28	0,01518300	0,00033260	2,19%
90,04	33	0,01795600	0,00033473	1,86%
90,04	38	0,02074400	0,00033757	1,63%
90,04	43	0,02354900	0,00033988	1,44%
90,04	48	0,02636900	0,00034225	1,30%
90,04	53	0,02920300	0,00034476	1,18%
90,04	58	0,03205100	0,00034675	1,08%
90,04	63	0,03491000	0,00034883	1,00%
90,04	68	0,03778100	0,00035107	0,93%
90,04	73	0,04066100	0,00035389	0,87%
-	-	-	-	-

**Πίνακας Z.12:** Αποκλίσεις πυκνότητας μεθανίου βιβλιογραφικών δεδομένων λαμβάνοντας υπόψιν την συνολική αβεβαιότητα σε αντίστοιχες συνθήκες πειράματος

## ΑΙΘΑΝΙΟ

Μέση θερμοκρασία πειράματος: 50,64 °C

Temperature (C)	Pressure (bar)	Density (g/ml)	E.K. Density (g/ml)	Απόλυτη απόκλιση (g/ml)	Απόκλιση
50,55	50,563	0,09220520	0,09261395	0,00040874	0,44%
50,55	55,163	0,11076014	0,11126076	0,00050062	0,45%
50,55	60,113	0,13821610	0,13874400	0,00052790	0,38%
50,56	65,313	0,18020464	0,18101473	0,00081010	0,45%
50,58	70,513	0,22598340	0,22604044	0,00005704	0,03%
50,60	75,613	0,25670219	0,25680192	0,00009973	0,04%
50,60	80,663	0,27641139	0,27615570	0,00025569	0,09%
50,61	85,663	0,29036244	0,29012804	0,00023440	0,08%
50,62	90,613	0,30110607	0,30106701	0,00003906	0,01%
50,62	95,613	0,31002503	0,30997146	0,00005357	0,02%
50,63	105,463	0,32410218	0,32388814	0,00021404	0,07%
50,63	115,313	0,33503129	0,33485526	0,00017603	0,05%
50,63	125,163	0,34393591	0,34383668	0,00009923	0,03%
50,64	134,963	0,35154510	0,35153282	0,00001228	0,00%
50,64	144,813	0,35815688	0,35825599	0,00009911	0,03%
50,64	154,663	0,36415652	0,36408897	0,00006755	0,02%
50,65	164,463	0,36949146	0,36945532	0,00003614	0,01%
50,65	174,263	0,37442890	0,37441618	0,00001272	0,00%
50,65	184,063	0,37895538	0,37896550	0,00001012	0,00%
50,65	193,813	0,38315907	0,38311628	0,00004280	0,01%
50,66	216,063	0,39175550	0,39193896	0,00018346	0,05%
50,66	235,963	0,39855743	0,39850264	0,00005479	0,01%
50,67	255,863	0,40468917	0,40458492	0,00010425	0,03%
50,67	275,713	0,41028815	0,41020971	0,00007845	0,02%
50,67	295,613	0,41545965	0,41547046	0,00001080	0,00%
50,67	315,463	0,42024970	0,42010286	0,00014684	0,03%
50,68	335,213	0,42469134	0,42461708	0,00007426	0,02%
50,68	355,063	0,42890000	0,42882189	0,00007811	0,02%
50,68	374,863	0,43285714	0,43277471	0,00008243	0,02%
50,69	394,663	0,43659859	0,43649405	0,00010453	0,02%
50,69	414,463	0,44016514	0,44021738	0,00005224	0,01%
50,69	434,263	0,44355861	0,44369987	0,00014126	0,03%
50,69	454,063	0,44680576	0,44690403	0,00009826	0,02%
50,69	473,813	0,44990776	0,45012976	0,00022199	0,05%
50,70	493,563	0,45287656	0,45305813	0,00018157	0,04%

**Πίνακας Z.13:** Αποκλίσεις πυκνότητας αιθανίου βιβλιογραφικών δεδομένων και πυκνότητας υπολογισμένης από εξίσωση σε θερμοκρασία 50 °C και εύρος πίεσης 50 έως 494 bar

Temperature (C)	Pressure (bar)	Density (g/ml)	Συνολική αβεβαιότητα (g/ml)	Απόκλιση
50,64	51	0,09365200	0,00233151	2,49%
50,64	55	0,10982000	0,00301593	2,75%
50,64	60	0,13705000	0,00458269	3,34%
50,64	65	0,17674000	0,00687143	3,89%
50,64	71	0,22915000	0,00611549	2,67%
50,64	76	0,25817000	0,00436772	1,69%
50,64	81	0,27724000	0,00331740	1,20%
50,64	86	0,29103000	0,00270320	0,93%
50,64	91	0,30177000	0,00230347	0,76%
50,64	96	0,31057000	0,00202835	0,65%
50,64	105	0,32329000	0,00169419	0,52%
50,64	115	0,33444000	0,00146118	0,44%
50,64	125	0,34360000	0,00129462	0,38%
50,64	135	0,35140000	0,00118179	0,34%
50,64	145	0,35822000	0,00108989	0,30%
50,64	155	0,36429000	0,00101439	0,28%
50,64	164	0,36924000	0,00096396	0,26%
50,64	174	0,37429000	0,00091168	0,24%
50,64	184	0,37893000	0,00087097	0,23%
50,64	194	0,38324000	0,00083219	0,22%
50,64	216	0,39175000	0,00076608	0,20%
50,64	236	0,39859000	0,00071622	0,18%
50,64	256	0,40476000	0,00067928	0,17%
50,64	276	0,41040000	0,00065050	0,16%
50,64	296	0,41559000	0,00061847	0,15%
50,64	315	0,42018000	0,00059619	0,14%
50,64	335	0,42469000	0,00057535	0,14%
50,64	355	0,42893000	0,00055451	0,13%
50,64	375	0,43293000	0,00053723	0,12%
50,64	395	0,43671000	0,00052131	0,12%
50,64	414	0,44013000	0,00051030	0,12%
50,64	434	0,44356000	0,00050050	0,11%
50,64	454	0,44684000	0,00048460	0,11%
50,64	474	0,44998000	0,00047481	0,11%
50,64	494	0,45300000	0,00046382	0,10%

**Πίνακας Ζ.14:** Αποκλίσεις πυκνότητας αιθανίου βιβλιογραφικών δεδομένων λαμβάνοντας υπόψιν την συνολική αβεβαιότητα σε αντίστοιχες συνθήκες πειράματος

## Μέση θερμοκρασία πειράματος: 70,57 °C

Temperature (C)	Pressure (bar)	Density (g/ml)	E.K. Density (g/ml)	Απόλυτη απόκλιση (g/ml)	Απόκλιση
70,38	55,963	0,08700651	0,08669449	0,00031202	0,36%
70,37	60,963	0,10015571	0,09984934	0,00030637	0,31%
70,39	65,913	0,11490068	0,11452626	0,00037442	0,33%
70,40	70,863	0,13166276	0,13137769	0,00028507	0,22%
70,42	75,963	0,15103062	0,15078138	0,00024924	0,17%
70,46	81,463	0,17357012	0,17296996	0,00060016	0,35%
70,46	85,363	0,18986355	0,19339544	0,00353188	1,86%
70,48	91,463	0,21367762	0,21321803	0,00045959	0,22%
70,49	96,463	0,23077124	0,23031215	0,00045909	0,20%
70,50	106,363	0,25813522	0,25734780	0,00078742	0,31%
70,51	116,363	0,27820294	0,27757904	0,00062390	0,22%
70,52	126,363	0,29377914	0,29322590	0,00055324	0,19%
70,54	136,263	0,30594519	0,30573974	0,00020545	0,07%
70,55	146,263	0,31620309	0,31618552	0,00001756	0,01%
70,55	156,163	0,32501882	0,32500551	0,00001331	0,00%
70,56	166,213	0,33282780	0,33293980	0,00011200	0,03%
70,57	176,063	0,33965704	0,33977116	0,00011412	0,03%
70,58	186,163	0,34596491	0,34606093	0,00009602	0,03%
70,58	196,063	0,35161102	0,35174463	0,00013361	0,04%
70,59	215,913	0,36162154	0,36182788	0,00020634	0,06%
70,59	235,863	0,37035691	0,37052658	0,00016967	0,05%
70,60	255,663	0,37800655	0,37823333	0,00022678	0,06%
70,67	275,463	0,38480743	0,38470101	0,00010642	0,03%
70,67	295,213	0,39105605	0,39126755	0,00021150	0,05%
70,67	315,113	0,39682973	0,39698157	0,00015184	0,04%
70,68	334,963	0,40214106	0,40217806	0,00003699	0,01%
70,68	354,763	0,40708325	0,40714501	0,00006176	0,02%
70,69	374,563	0,41169998	0,41176852	0,00006854	0,02%
70,69	394,363	0,41605149	0,41616089	0,00010940	0,03%
70,69	414,163	0,42016097	0,42029040	0,00012942	0,03%
70,69	433,963	0,42405725	0,42410704	0,00004979	0,01%
70,69	453,763	0,42776525	0,42763596	0,00012928	0,03%
70,70	473,463	0,43126695	0,43102020	0,00024675	0,06%
70,70	493,263	0,43464534	0,43441982	0,00022551	0,05%

**Πίνακας Z.15:** Αποκλίσεις πυκνότητας αιθανίου βιβλιογραφικών δεδομένων και πυκνότητας υπολογισμένης από εξίσωση σε θερμοκρασία 70 °C και εύρος πίεσης 55 έως 494 bar

Temperature (C)	Pressure (bar)	Density (g/ml)	Συνολική αβεβαιότητα (g/ml)	Απόκλιση
70,57	56	0,08693500	0,00155358	1,79%
70,57	61	0,10003000	0,00178703	1,79%
70,57	66	0,11489000	0,00207795	1,81%
70,57	71	0,13179000	0,00242006	1,84%
70,57	76	0,15075000	0,00277866	1,84%
70,57	81	0,17125000	0,00305174	1,78%
70,57	85	0,18794000	0,00313602	1,67%
70,57	91	0,21161000	0,00302126	1,43%
70,57	96	0,22896000	0,00279687	1,22%
70,57	106	0,25660000	0,00227971	0,89%
70,57	116	0,27696000	0,00188959	0,68%
70,57	126	0,29262000	0,00161793	0,55%
70,57	136	0,30523000	0,00142204	0,47%
70,57	146	0,31573000	0,00127725	0,40%
70,57	156	0,32472000	0,00116663	0,36%
70,57	166	0,33258000	0,00107799	0,32%
70,57	176	0,33956000	0,00101080	0,30%
70,57	186	0,34585000	0,00094853	0,27%
70,57	196	0,35157000	0,00090032	0,26%
70,57	216	0,36168000	0,00082001	0,23%
70,57	236	0,37044000	0,00075420	0,20%
70,57	256	0,37817000	0,00071348	0,19%
70,57	275	0,38478000	0,00066993	0,17%
70,57	295	0,39111000	0,00063600	0,16%
70,57	315	0,39691000	0,00061345	0,15%
70,57	335	0,40227000	0,00058614	0,15%
70,57	355	0,40726000	0,00056370	0,14%
70,57	375	0,41192000	0,00054283	0,13%
70,57	394	0,41610000	0,00053019	0,13%
70,57	414	0,42025000	0,00051420	0,12%
70,57	434	0,42418000	0,00049822	0,12%
70,57	454	0,42792000	0,00048225	0,11%
70,57	473	0,43131000	0,00047117	0,11%
70,57	493	0,43472000	0,00046142	0,11%

**Πίνακας Z.16:** Αποκλίσεις πυκνότητας αιθανίου βιβλιογραφικών δεδομένων λαμβάνοντας υπόψιν την συνολική αβεβαιότητα σε αντίστοιχες συνθήκες πειράματος

## Μέση θερμοκρασία πειράματος: 90,05 °C

Temperature (C)	Pressure (bar)	Density (g/ml)	E.K. Density (g/ml)	Απόλυτη απόκλιση (g/ml)	Απόκλιση
89,42	58,563	0,07940476	0,07894396	0,00046080	0,58%
89,49	63,663	0,08937765	0,08900689	0,00037076	0,41%
89,54	68,863	0,10031588	0,10042870	0,00011283	0,11%
89,58	74,263	0,11253718	0,11276520	0,00022802	0,20%
89,62	79,763	0,12587550	0,12597625	0,00010074	0,08%
89,67	85,163	0,13973676	0,13963418	0,00010259	0,07%
89,72	90,363	0,15359975	0,15337083	0,00022892	0,15%
89,76	95,463	0,16743792	0,16716526	0,00027266	0,16%
89,79	105,563	0,19420027	0,19394104	0,00025923	0,13%
89,92	116,363	0,21971231	0,21968939	0,00002292	0,01%
89,94	126,263	0,23998187	0,24019709	0,00021522	0,09%
89,96	136,213	0,25686124	0,25721819	0,00035696	0,14%
89,98	146,263	0,27127821	0,27160153	0,00032332	0,12%
90,06	156,063	0,28303970	0,28347358	0,00043388	0,15%
90,15	165,813	0,29316689	0,29385637	0,00068948	0,24%
90,17	175,863	0,30248331	0,30315861	0,00067531	0,22%
90,18	185,813	0,31068041	0,31146084	0,00078043	0,25%
90,19	195,713	0,31801857	0,31894462	0,00092605	0,29%
90,20	215,663	0,33087715	0,33206254	0,00118539	0,36%
90,21	235,563	0,34175827	0,34294620	0,00118792	0,35%
90,23	255,463	0,35119102	0,33970582	0,01148520	3,27%
90,24	275,363	0,35953992	0,36068381	0,00114389	0,32%
90,25	295,213	0,36701572	0,36818520	0,00116948	0,32%
90,26	314,963	0,37377009	0,37464726	0,00087717	0,23%
90,28	334,813	0,37997315	0,38063980	0,00066665	0,18%
90,30	354,663	0,38570060	0,38621956	0,00051896	0,13%
90,31	374,363	0,39099468	0,39158176	0,00058708	0,15%
90,32	394,263	0,39599558	0,39645235	0,00045678	0,12%
90,33	414,063	0,40066322	0,40098498	0,00032175	0,08%
90,34	433,813	0,40505133	0,40522867	0,00017733	0,04%
90,35	453,563	0,40921345	0,40915791	0,00005554	0,01%
90,37	473,313	0,41315351	0,41280322	0,00035029	0,08%
90,38	492,963	0,41689537	0,41636456	0,00053081	0,13%

**Πίνακας Ζ.17:** Αποκλίσεις πυκνότητας αιθανίου βιβλιογραφικών δεδομένων και πυκνότητας υπολογισμένης από εξίσωση σε θερμοκρασία 90 °C και εύρος πίεσης 58 έως 493 bar

Temperature (C)	Pressure (bar)	Density (g/ml)	Συνολική αβεβαιότητα (g/ml)	Απόκλιση
90,05	59	0,07986900	0,00117802	1,47%
90,05	64	0,08966200	0,00127587	1,42%
90,05	69	0,10016000	0,00138603	1,38%
90,05	74	0,11141000	0,00150427	1,35%
90,05	80	0,12589000	0,00165240	1,31%
90,05	85	0,13869000	0,00176613	1,27%
90,05	90	0,15199000	0,00187297	1,23%
90,05	95	0,16555000	0,00195149	1,18%
90,05	106	0,19476000	0,00197599	1,01%
90,05	116	0,21865000	0,00187101	0,86%
90,05	126	0,23907000	0,00170196	0,71%
90,05	136	0,25619000	0,00153769	0,60%
90,05	146	0,27060000	0,00138882	0,51%
90,05	156	0,28286000	0,00126672	0,45%
90,05	166	0,29346000	0,00116437	0,40%
90,05	176	0,30276000	0,00108109	0,36%
90,05	186	0,31101000	0,00101441	0,33%
90,05	196	0,31842000	0,00095525	0,30%
90,05	216	0,33129000	0,00086113	0,26%
90,05	236	0,34220000	0,00078924	0,23%
90,05	255	0,35122000	0,00072945	0,21%
90,05	275	0,35964000	0,00068613	0,19%
90,05	295	0,36718000	0,00064711	0,18%
90,05	315	0,37402000	0,00062234	0,17%
90,05	335	0,38028000	0,00059298	0,16%
90,05	355	0,38606000	0,00056553	0,15%
90,05	374	0,39117000	0,00054769	0,14%
90,05	394	0,39620000	0,00052994	0,13%
90,05	414	0,40092000	0,00051388	0,13%
90,05	434	0,40537000	0,00049782	0,12%
90,05	454	0,40958000	0,00048660	0,12%
90,05	473	0,41338000	0,00047539	0,12%
90,05	493	0,41719000	0,00045937	0,11%

**Πίνακας Ζ.18:** Αποκλίσεις πυκνότητας αιθανίου βιβλιογραφικών δεδομένων λαμβάνοντας υπόψιν την συνολική αβεβαιότητα σε αντίστοιχες συνθήκες πειράματος

## Παράρτημα Η

Πίεση (bar)	Θερμοκρασία (°C)	Πυκνότητα μετρηθείσα (g/ml)	Πυκνότητα προσομοιωτή (g/ml)		Απόλυτη απόκλιση (g/ml)		Απόκλιση (%)	
			Πριν regression	Μετά regression	Πριν regression	Μετά regression	Πριν regression	Μετά regression
66,86	22,83	0,04834741	0,11730161	0,06895308	0,06895420	0,02060567	142,62%	42,62%
71,66	22,82	0,05245052	0,13329604	0,07399249	0,08084552	0,02154196	154,14%	41,07%
76,81	22,81	0,05653108	0,15162116	0,07940192	0,09509009	0,02287084	168,21%	40,46%
81,81	22,80	0,06070621	0,16966276	0,08464957	0,10895655	0,02394336	179,48%	39,44%
86,86	22,79	0,06500814	0,18710687	0,08994047	0,12209872	0,02493232	187,82%	38,35%
91,86	22,79	0,06935934	0,20288986	0,09516569	0,13353051	0,02580635	192,52%	37,21%
96,86	22,78	0,07374184	0,21706299	0,10038451	0,14332115	0,02664266	194,36%	36,13%
106,86	22,78	0,08308826	0,24081197	0,11075646	0,15772370	0,02766820	189,83%	33,30%
116,91	22,77	0,10691197	0,26000048	0,12109798	0,15308852	0,01418601	143,19%	13,27%
126,91	22,77	0,12953967	0,27577547	0,13127611	0,14623580	0,00173645	112,89%	1,34%
136,86	22,76	0,14861082	0,28915569	0,14128765	0,14054487	0,00732316	94,57%	4,93%
146,91	22,76	0,16450524	0,30086999	0,15124793	0,13636475	0,01325731	82,89%	8,06%
156,96	22,75	0,17897888	0,31124675	0,16105924	0,13226788	0,01791964	73,90%	10,01%
166,96	22,74	0,19089270	0,32049902	0,17064950	0,12960631	0,02024321	67,89%	10,60%
176,91	22,74	0,20192302	0,32881741	0,18000268	0,12689438	0,02192034	62,84%	10,86%
186,86	22,74	0,21202165	0,33642778	0,18916364	0,12440613	0,02285801	58,68%	10,78%
196,86	22,74	0,22123783	0,34347590	0,19817402	0,12223807	0,02306381	55,25%	10,42%
216,76	22,74	0,23762524	0,35604399	0,21549479	0,11841874	0,02213046	49,83%	9,31%
236,71	22,73	0,25152995	0,36711595	0,23204346	0,11558600	0,01948649	45,95%	7,75%
256,61	22,73	0,26355323	0,37693527	0,24770792	0,11338204	0,01584531	43,02%	6,01%
276,51	22,73	0,27384864	0,38578867	0,26256024	0,11194003	0,01128841	40,88%	4,12%
296,41	22,73	0,28314265	0,39384916	0,27662765	0,11070651	0,00651500	39,10%	2,30%
316,26	22,73	0,29145936	0,40122727	0,28991336	0,10976791	0,00154599	37,66%	0,53%
336,11	22,73	0,29910379	0,40804312	0,30249266	0,10893933	0,00338887	36,42%	1,13%
355,96	22,72	0,30605347	0,41438323	0,31441841	0,10832976	0,00836494	35,40%	2,73%
375,66	22,72	0,31218290	0,42025240	0,32562493	0,10806949	0,01344202	34,62%	4,31%
395,56	22,72	0,31787767	0,42580920	0,33636210	0,10793153	0,01848443	33,95%	5,81%
415,36	22,72	0,32328091	0,43101040	0,34650179	0,10772949	0,02322088	33,32%	7,18%
435,16	22,72	0,32837816	0,43592166	0,35613850	0,10754349	0,02776033	32,75%	8,45%
454,96	22,72	0,33320737	0,44057021	0,36530426	0,10736285	0,03209690	32,22%	9,63%
474,76	22,72	0,33781945	0,44498330	0,37403272	0,10716385	0,03621327	31,72%	10,72%
494,46	22,72	0,34194270	0,44915931	0,38231106	0,10721662	0,04036837	31,36%	11,81%

**Πίνακας Η.1:** Μετρηθείσα πυκνότητα, πυκνότητα προσομοιωτή και αποκλίσεις για το μείγμα Μεθάνιο 39,33% - Αιθάνιο 60,67% - CO<sub>2</sub> 0% στους 22°C σε διαφορετικές πιέσεις

Component	HC	Pc (atm)	Tc (K)	Acentric fact.	Mol. weight	Vol. Shift	V Shift Coef1 (1/deg F)
CH <sub>4</sub>	1	45.4	190.6	0.008	16.043	0	0
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	1	48.2	305.4	0.098	30.07	0	0

Component	HC	Pc (atm)	Tc (K)	Acentric fact.	Mol. weight	Vol. Shift	V Shift Coef1 (1/deg F)
CH <sub>4</sub>	1	29.056	121.97	0.008	16.043	-0.2540225	-0.0027780967
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	1	69.408	195.45	0.098	30.07	-0.49651524	-0.0062501919

**Πίνακας Η.2:** Τιμές παραμέτρων του προσομοιωτή πριν το regression (άνω) και μετά το regression (κάτω) για το μείγμα Μεθάνιο 39,33% - Αιθάνιο 60,67% - CO<sub>2</sub> 0% στους 22°C

Πίεση (bar)	Θερμοκρασία (°C)	Πυκνότητα μετρηθείσα (g/ml)	Πυκνότητα προσομοιωτή (g/ml)		Απόλυτη απόκλιση (g/ml)		Απόκλιση (%)	
			Πριν regression	Μετά regression	Πριν regression	Μετά regression	Πριν regression	Μετά regression
86,46	50,06	0,10730823	0,12372821	0,10877658	0,01641999	0,00146835	15,30%	1,37%
91,56	50,10	0,11596295	0,13410017	0,11742174	0,01813722	0,00145880	15,64%	1,26%
96,46	50,13	0,12489653	0,14413093	0,12590993	0,01923440	0,00101340	15,40%	0,81%
106,56	50,16	0,14253453	0,16455447	0,14375610	0,02201994	0,00122157	15,45%	0,86%
116,56	50,19	0,16026797	0,18376221	0,16139403	0,02349424	0,00112606	14,66%	0,70%
126,46	50,23	0,17833062	0,20127840	0,17821341	0,02294778	0,00011720	12,87%	0,07%
136,46	50,28	0,19521627	0,21730808	0,19407650	0,02209180	0,00113977	11,32%	0,58%
146,41	50,31	0,21070290	0,23172149	0,20854598	0,02101859	0,00215693	9,98%	1,02%
156,36	50,34	0,22389242	0,24473489	0,22162986	0,02084247	0,00226256	9,31%	1,01%
166,36	50,37	0,23555227	0,25656292	0,23343066	0,02101066	0,00212161	8,92%	0,90%
176,31	50,39	0,24601664	0,26730170	0,24401726	0,02128506	0,00199937	8,65%	0,81%
186,26	50,40	0,25532145	0,27713864	0,25357708	0,02181718	0,00174437	8,54%	0,68%
196,21	50,43	0,26342343	0,28615543	0,26219501	0,02273200	0,00122842	8,63%	0,47%
216,51	50,53	0,27815870	0,30245582	0,27739013	0,02429712	0,00076858	8,73%	0,28%
236,56	50,54	0,29057683	0,31659211	0,29023213	0,02601528	0,00034470	8,95%	0,12%
256,46	50,55	0,30120335	0,32898400	0,30120798	0,02778065	0,00000463	9,22%	0,00%
276,36	50,56	0,31036295	0,34007358	0,31081586	0,02971062	0,00045290	9,57%	0,15%
296,06	50,57	0,31846007	0,35000022	0,31925118	0,03154015	0,00079111	9,90%	0,25%
316,01	50,58	0,32603413	0,35917560	0,32692082	0,03314146	0,00088668	10,17%	0,27%
335,76	50,59	0,33273273	0,36750840	0,33377832	0,03477567	0,00104559	10,45%	0,31%
355,66	50,59	0,33917865	0,37528376	0,34010081	0,03610511	0,00092216	10,64%	0,27%
375,51	50,60	0,34506969	0,38246965	0,34586425	0,03739996	0,00079457	10,84%	0,23%
395,16	50,61	0,35024674	0,38911090	0,35113273	0,03886416	0,00088599	11,10%	0,25%
415,06	50,61	0,35534635	0,39542858	0,35610486	0,04008224	0,00075851	11,28%	0,21%
434,76	50,62	0,36012938	0,40129454	0,36066852	0,04116516	0,00053914	11,43%	0,15%
454,46	50,62	0,36468248	0,40684494	0,36496147	0,04216246	0,00027899	11,56%	0,08%
474,31	50,63	0,36893092	0,41212783	0,36901254	0,04319691	0,00008161	11,71%	0,02%
493,96	50,64	0,37300558	0,41708234	0,37277848	0,04407676	0,00022710	11,82%	0,06%

**Πίνακας Η.3:** Μετρηθείσα πυκνότητα, πυκνότητα προσομοιωτή και αποκλίσεις για το μείγμα Μεθάνιο 39,33% - Αιθάνιο 60,67% - CO<sub>2</sub> 0% στους 50°C σε διαφορετικές πιέσεις

Component	HC	Pc (atm)	Tc (K)	Acentric fact.	Mol. weight	Vol. Shift	V Shift Coef1 (1/deg F)
CH4	1	45.4	190.6	0.008	16.043	0	0
C2H6	1	48.2	305.4	0.098	30.07	0	0

Component	HC	Pc (atm)	Tc (K)	Acentric fact.	Mol. weight	Vol. Shift	V Shift Coef1 (1/deg F)
CH4	1	54.48	152.47	0.008	16.043	-0.26225795	-0.0044716008
C2H6	1	57.84	329.86151	0.098	30.07	-0.28740101	-0.0030861438

**Πίνακας Η.4:** Τιμές παραμέτρων του προσομοιωτή πριν το regression (άνω) και μετά το regression (κάτω) για το μείγμα Μεθάνιο 39,33% - Αιθάνιο 60,67% - CO<sub>2</sub> 0% στους 50°C

Πίεση (bar)	Θερμοκρασία (°C)	Πυκνότητα μετρηθείσα (g/ml)	Πυκνότητα προσομοιωτή (g/ml)		Απόλυτη απόκλιση (g/ml)		Απόκλιση (%)	
			Πριν regression	Μετά regression	Πριν regression	Μετά regression	Πριν regression	Μετά regression
77,16	90,31	0,07195769	0,07894860	0,07366251	0,00699091	0,00170482	9,72%	2,37%
82,16	90,32	0,07753523	0,08515735	0,07916805	0,00762212	0,00163282	9,83%	2,11%
88,06	90,33	0,08420154	0,09260594	0,08575645	0,00840440	0,00155491	9,98%	1,85%
93,76	90,34	0,09085194	0,09989915	0,09219747	0,00904721	0,00134553	9,96%	1,48%
104,16	90,36	0,10307036	0,11336907	0,10410239	0,01029872	0,00103203	9,99%	1,00%
114,46	90,37	0,11545210	0,12678133	0,11601212	0,01132923	0,00056002	9,81%	0,49%
124,96	90,38	0,12794805	0,14034737	0,12815732	0,01239932	0,00020927	9,69%	0,16%
135,76	90,39	0,14087081	0,15400471	0,14051877	0,01313390	0,00035204	9,32%	0,25%
145,76	90,40	0,15252762	0,16625563	0,15173329	0,01372802	0,00079432	9,00%	0,52%
155,66	90,40	0,16375296	0,17794270	0,16254095	0,01418974	0,00121201	8,67%	0,74%
165,66	90,41	0,17447967	0,18922130	0,17306188	0,01474164	0,00141779	8,45%	0,81%
175,56	90,41	0,18468376	0,19986877	0,18305580	0,01518501	0,00162797	8,22%	0,88%
185,46	90,42	0,19433731	0,20996681	0,19257397	0,01562950	0,00176335	8,04%	0,91%
195,46	90,42	0,20362671	0,21965318	0,20171891	0,01602647	0,00190780	7,87%	0,94%
215,26	90,43	0,22023278	0,23734237	0,21839893	0,01710959	0,00183384	7,77%	0,83%
235,11	90,44	0,23495819	0,25327914	0,23332334	0,01832094	0,00163486	7,80%	0,70%
254,96	90,45	0,24802435	0,26765731	0,24664910	0,01963296	0,00137526	7,92%	0,55%
274,86	90,45	0,25965951	0,28074439	0,25863091	0,02108488	0,00102861	8,12%	0,40%
294,76	90,46	0,27001223	0,29266373	0,26939531	0,02265150	0,00061692	8,39%	0,23%
314,56	90,48	0,27933278	0,30352906	0,27907687	0,02419628	0,00025591	8,66%	0,09%
334,36	90,48	0,28791438	0,31356462	0,28791106	0,02565025	0,00000332	8,91%	0,00%
354,21	90,49	0,29576151	0,32286815	0,29599557	0,02710663	0,00023406	9,17%	0,08%
374,01	90,50	0,30286775	0,33149729	0,30340732	0,02862954	0,00053956	9,45%	0,18%
393,81	90,50	0,30955225	0,33956740	0,31026802	0,03001514	0,00071577	9,70%	0,23%
413,61	90,51	0,31575117	0,34711690	0,31661454	0,03136573	0,00086337	9,93%	0,27%
433,36	90,51	0,32143997	0,35420827	0,32252535	0,03276830	0,00108538	10,19%	0,34%
453,11	90,52	0,32685481	0,36088156	0,32803250	0,03402675	0,00117769	10,41%	0,36%
472,86	90,52	0,33198329	0,36720405	0,33321127	0,03522076	0,00122798	10,61%	0,37%
492,56	90,53	0,33666297	0,37317413	0,33806006	0,03651116	0,00139708	10,85%	0,41%

**Πίνακας Η.5:** Μετρηθείσα πυκνότητα, πυκνότητα προσομοιωτή και αποκλίσεις για το μείγμα Μεθάνιο 39,33% - Αιθάνιο 60,67% - CO<sub>2</sub> 0% στους 90°C σε διαφορετικές πιέσεις

Component	HC	Pc (atm)	Tc (K)	Acentric fact.	Mol. weight	Vol. Shift	V Shift Coef1 (1/deg F)
CH4	1	45.4	190.6	0.008	16.043	0	0
C2H6	1	48.2	305.4	0.098	30.07	0	0

Component	HC	Pc (atm)	Tc (K)	Acentric fact.	Mol. weight	Vol. Shift	V Shift Coef1 (1/deg F)
CH4	1	54.48	152.47	0.008	16.043	-0.23101515	-0.0041669399
C2H6	1	57.84	331.75423	0.098	30.07	-0.17011967	-0.0015868229

**Πίνακας Η.6:** Τιμές παραμέτρων του προσομοιωτή πριν το regression (άνω) και μετά το regression (κάτω) για το μείγμα Μεθάνιο 39,33% - Αιθάνιο 60,67% - CO<sub>2</sub> 0% στους 90°C

Πίεση (bar)	Θερμοκρασία (°C)	Πυκνότητα μετρηθείσα (g/ml)	Πυκνότητα προσομοιωτή (g/ml)		Απόλυτη απόκλιση (g/ml)		Απόκλιση (%)	
			Πριν regression	Μετά regression	Πριν regression	Μετά regression	Πριν regression	Μετά regression
67,01	22,55	0,14758905	0,13845238	0,131023021	0,00913666	0,01656603	6,19%	11,22%
71,96	22,56	0,15127524	0,15792283	0,148883608	0,00664758	0,00239164	4,39%	1,58%
76,81	22,56	0,16695600	0,17885255	0,168506225	0,01189655	0,00155023	7,13%	0,93%
81,91	22,56	0,18736827	0,20209054	0,191247638	0,01472227	0,00387937	7,86%	2,07%
86,86	22,57	0,20938054	0,22456604	0,214538484	0,01518550	0,00515794	7,25%	2,46%
91,86	22,57	0,23212099	0,24606442	0,237962283	0,01394343	0,00584130	6,01%	2,52%
96,91	22,58	0,25474157	0,26573830	0,259979661	0,01099673	0,00523809	4,32%	2,06%
106,86	22,58	0,29470701	0,29839674	0,296461711	0,00368973	0,00175470	1,25%	0,60%
116,91	22,58	0,32660754	0,32461416	0,324904094	0,00199338	0,00170345	0,61%	0,52%
126,76	22,59	0,35143684	0,34558553	0,346966324	0,00585131	0,00447052	1,66%	1,27%
136,76	22,59	0,37125522	0,36356946	0,365446825	0,00768576	0,00580839	2,07%	1,56%
146,71	22,60	0,38750164	0,37895520	0,380963911	0,00854644	0,00653772	2,21%	1,69%
156,56	22,60	0,40104953	0,39239148	0,394334522	0,00865805	0,00671501	2,16%	1,67%
166,56	22,60	0,41291628	0,40456551	0,406317935	0,00835076	0,00659834	2,02%	1,60%
176,51	22,61	0,42309943	0,41546448	0,416936574	0,00763496	0,00616286	1,80%	1,46%
186,56	22,61	0,43224110	0,42553368	0,426683809	0,00670741	0,00555729	1,55%	1,29%
196,46	22,61	0,44047826	0,43464819	0,435452316	0,00583007	0,00502595	1,32%	1,14%
216,31	22,63	0,45487976	0,45093736	0,450987022	0,00394240	0,00389274	0,87%	0,86%
236,11	22,64	0,46712881	0,46516817	0,464448938	0,00196065	0,00267987	0,42%	0,57%
256,11	22,64	0,47801974	0,47797333	0,476493221	0,00004642	0,00152652	0,01%	0,32%
275,96	22,64	0,48751166	0,48940891	0,487193554	0,00189725	0,00031811	0,39%	0,07%
295,86	22,64	0,49625981	0,49983372	0,496903947	0,00357391	0,00064414	0,72%	0,13%
315,76	22,65	0,50415721	0,50936631	0,505733324	0,00520910	0,00157611	1,03%	0,31%
335,51	22,65	0,51144255	0,51812361	0,513832259	0,00668106	0,00238971	1,31%	0,47%
355,41	22,65	0,51827226	0,52631545	0,521388168	0,00804318	0,00311590	1,55%	0,60%
375,26	22,65	0,52443259	0,53394024	0,528401051	0,00950765	0,00396846	1,81%	0,76%
395,11	22,66	0,53034574	0,54106525	0,534920566	0,01071950	0,00457482	2,02%	0,86%
414,91	22,66	0,53597207	0,54777058	0,541058841	0,01179851	0,00508678	2,20%	0,95%
434,71	22,66	0,54125503	0,55409787	0,546843108	0,01284284	0,00558808	2,37%	1,03%
454,46	22,67	0,54632651	0,56005514	0,552258951	0,01372863	0,00593244	2,51%	1,09%
474,21	22,67	0,55123507	0,56572567	0,557424905	0,01449060	0,00618983	2,63%	1,12%
494,01	22,67	0,55579940	0,57113671	0,562345777	0,01533731	0,00654638	2,76%	1,18%

**Πίνακας Η.7:** Μετρηθείσα πυκνότητα, πυκνότητα προσομοιωτή και αποκλίσεις για το μείγμα Μεθάνιο 28,30% - Αιθάνιο 45,80% - CO<sub>2</sub> 25,90% στους 22°C σε διαφορετικές πιέσεις

Component	HC	Pc (atm)	Tc (K)	Acentric fact.	Mol. weight	Vol. Shift	V Shift Coef1 (1/deg F)
CH <sub>4</sub>	1	45.4	190.6	0.008	16.043	0	0
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	1	48.2	305.4	0.098	30.07	0	0
CO <sub>2</sub>	3	72.8	304.2	0.225	44.01	0	0

Component	HC	Pc (atm)	Tc (K)	Acentric fact.	Mol. weight	Vol. Shift	V Shift Coef1 (1/deg F)
CH <sub>4</sub>	1	45.890093	201.77171	0.008	16.043	-0.099779403	-0.0027967449
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	1	56.749434	270.88283	0.098	30.07	-0.089936769	-0.0029112647
CO <sub>2</sub>	3	70.969994	365.04	0.225	44.01	-0.13845894	-0.0027777778

**Πίνακας Η.8:** Τιμές παραμέτρων του προσομοιωτή πριν το regression (άνω) και μετά το regression (κάτω) για το μείγμα Μεθάνιο 28,30% - Αιθάνιο 45,80% - CO<sub>2</sub> 25,90% στους 22°C

Πίεση (bar)	Θερμοκρασία (°C)	Πυκνότητα μετρηθείσα (g/ml)	Πυκνότητα προσομοιωτή (g/ml)		Απόλυτη απόκλιση (g/ml)		Απόκλιση (%)	
			Πριν regression	Μετά regression	Πριν regression	Μετά regression	Πριν regression	Μετά regression
60,91	50,20	0,08837559	0,09006381	0,087387125	0,001688225	0,00098846	1,91%	1,12%
66,16	50,20	0,09843006	0,10065362	0,097496377	0,002223552	0,000933687	2,26%	0,95%
71,16	50,22	0,10837107	0,11121939	0,107610435	0,002848329	0,000760631	2,63%	0,70%
76,11	50,25	0,11860196	0,12214078	0,118116945	0,003538828	0,00048501	2,98%	0,41%
81,11	50,27	0,12959763	0,13361641	0,129240166	0,004018776	0,000357469	3,10%	0,28%
86,16	50,30	0,14103279	0,14559502	0,140976894	0,004562225	5,5898E-05	3,23%	0,04%
91,36	50,36	0,15329775	0,15820155	0,153498527	0,004903802	0,000200781	3,20%	0,13%
96,36	50,38	0,16544366	0,17059824	0,166016956	0,005154576	0,000573296	3,12%	0,35%
106,36	50,41	0,19055207	0,19552617	0,191851534	0,004974095	0,001299459	2,61%	0,68%
116,41	50,43	0,21630526	0,21998156	0,218000074	0,003676296	0,001694812	1,70%	0,78%
126,36	50,45	0,24117268	0,24277903	0,242814275	0,001606352	0,001641593	0,67%	0,68%
136,36	50,47	0,26451776	0,26387535	0,265828002	0,00064241	0,001310241	0,24%	0,50%
146,31	50,49	0,28584669	0,28298538	0,286472597	0,002861316	0,000625903	1,00%	0,22%
156,31	50,50	0,30503436	0,30040385	0,304991543	0,004630502	4,28142E-05	1,52%	0,01%
166,16	50,52	0,32193058	0,31593536	0,321202228	0,005995225	0,000728354	1,86%	0,23%
176,21	50,53	0,33731024	0,33040323	0,336049741	0,006907006	0,001260497	2,05%	0,37%
186,16	50,54	0,35091756	0,34348071	0,349242548	0,007436856	0,001675015	2,12%	0,48%
196,06	50,55	0,36302841	0,35543689	0,361125044	0,007591523	0,001903366	2,09%	0,52%
215,76	50,69	0,38363358	0,37633938	0,381394807	0,007294197	0,00223877	1,90%	0,58%
235,66	50,69	0,40132633	0,39499769	0,39923457	0,006328642	0,002091758	1,58%	0,52%
255,56	50,69	0,41654179	0,41143744	0,414693989	0,005104356	0,001847802	1,23%	0,44%
275,46	50,70	0,42966329	0,42608472	0,428269637	0,003578567	0,001393649	0,83%	0,32%
295,26	50,70	0,44134496	0,43925510	0,440352364	0,002089862	0,000992597	0,47%	0,22%
315,16	50,70	0,45186796	0,45130259	0,451300983	0,000565374	0,000566976	0,13%	0,13%
335,11	50,70	0,46157133	0,46237295	0,46128369	0,000801614	0,000287641	0,17%	0,06%
354,86	50,71	0,47004846	0,47246618	0,470305288	0,002417723	0,000256832	0,51%	0,05%
374,76	50,71	0,47814960	0,48192188	0,478721389	0,003772281	0,000571792	0,79%	0,12%
394,51	50,71	0,48553147	0,49067276	0,48646952	0,005141299	0,000938054	1,06%	0,19%
414,31	50,71	0,49241799	0,49888703	0,493708263	0,006469045	0,001290276	1,31%	0,26%
434,11	50,71	0,49890883	0,50660793	0,50048087	0,007699102	0,001572039	1,54%	0,32%
453,91	50,72	0,50494745	0,51386750	0,506809765	0,008920045	0,00186231	1,77%	0,37%
473,66	50,72	0,51067099	0,52073461	0,512791059	0,010063628	0,002120072	1,97%	0,42%
493,46	50,72	0,51614640	0,52726054	0,518456789	0,011114133	0,002310385	2,15%	0,45%

**Πίνακας Η.9:** Μετρηθείσα πυκνότητα, πυκνότητα προσομοιωτή και αποκλίσεις για το μείγμα Μεθάνιο 28,30% - Αιθάνιο 45,80% - CO<sub>2</sub> 25,90% στους 50°C σε διαφορετικές πιέσεις

Component	HC	Pc (atm)	Tc (K)	Acentric fact.	Mol. weight	Vol. Shift	V Shift Coef1 (1/deg F)
CH <sub>4</sub>	1	45.4	190.6	0.008	16.043	0	0
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	1	48.2	305.4	0.098	30.07	0	0
CO <sub>2</sub>	3	72.8	304.2	0.225	44.01	0	0

Component	HC	Pc (atm)	Tc (K)	Acentric fact.	Mol. weight	Vol. Shift	V Shift Coef1 (1/deg F)
CH <sub>4</sub>	1	54.48	152.47	0.008	16.043	0.21430646	-0.0041669399
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	1	57.84	366.47	0.098	30.07	-0.154	-0.0027778536
CO <sub>2</sub>	3	74.663572	254.23853	0.225	44.01	0.16449055	-0.003408731

**Πίνακας Η.10:** Τιμές παραμέτρων του προσομοιωτή πριν το regression (άνω) και μετά το regression (κάτω) για το μείγμα Μεθάνιο 28,30% - Αιθάνιο 45,80% - CO<sub>2</sub> 25,90% στους 50°C

Πίεση (bar)	Θερμοκρασία (°C)	Πυκνότητα μετρηθείσα (g/ml)	Πυκνότητα προσομοιωτή (g/ml)		Απόλυτη απόκλιση (g/ml)		Απόκλιση (%)	
			Πριν regression	Μετά regression	Πριν regression	Μετά regression	Πριν regression	Μετά regression
73,46	90,05	0,09887763	0,08905144	0,090755808	0,009826183	0,008121818	9,94%	8,21%
78,51	90,07	0,10582189	0,09641513	0,098335745	0,009406759	0,007486145	8,89%	7,07%
83,76	90,09	0,10947122	0,10421612	0,106357791	0,005255095	0,003113427	4,80%	2,84%
89,06	90,16	0,11316597	0,11218259	0,114541624	0,000983382	0,001375657	0,87%	1,22%
94,16	90,19	0,11948813	0,11997829	0,122536439	0,000490166	0,003048314	0,41%	2,55%
104,26	90,21	0,13425576	0,13567318	0,138580532	0,00141742	0,004324771	1,06%	3,22%
114,36	90,22	0,15000423	0,15155389	0,154725541	0,001549659	0,004721315	1,03%	3,15%
124,21	90,24	0,16585874	0,16704054	0,170369173	0,001181796	0,004510433	0,71%	2,72%
134,21	90,25	0,18208877	0,18261048	0,185990378	0,000521709	0,003901605	0,29%	2,14%
144,26	90,27	0,19806598	0,19793214	0,201265585	0,000133841	0,003199601	0,07%	1,62%
153,66	90,30	0,21273974	0,21185699	0,215068695	0,000882743	0,002328959	0,41%	1,09%
163,56	90,31	0,22792395	0,22605095	0,229078443	0,001872993	0,001154496	0,82%	0,51%
173,76	90,32	0,24285185	0,24008313	0,242878349	0,002768727	2,6495E-05	1,14%	0,01%
183,86	90,33	0,25700934	0,25336083	0,255906165	0,003648509	0,001103176	1,42%	0,43%
193,96	90,34	0,27050598	0,26599940	0,268286836	0,004506585	0,002219148	1,67%	0,82%
213,96	90,35	0,29497336	0,28922457	0,291028248	0,005748791	0,003945112	1,95%	1,34%
233,96	90,36	0,31669634	0,31020075	0,311592751	0,006495597	0,005103593	2,05%	1,61%
253,86	90,37	0,33575293	0,32908652	0,330154947	0,006666415	0,005597984	1,99%	1,67%
273,86	90,38	0,35273835	0,34633680	0,347164953	0,006401554	0,005573399	1,81%	1,58%
293,76	90,39	0,36785107	0,36198844	0,362654807	0,005862635	0,005196267	1,59%	1,41%
313,66	90,40	0,38140118	0,37634579	0,376912841	0,00505539	0,004488336	1,33%	1,18%
333,56	90,41	0,39362519	0,38957544	0,39009924	0,004049756	0,003525953	1,03%	0,90%
353,46	90,42	0,40469736	0,40182315	0,402346957	0,002874207	0,002350404	0,71%	0,58%
373,26	90,43	0,41480614	0,41316102	0,41372327	0,001645113	0,001082865	0,40%	0,26%
393,16	90,44	0,42407304	0,42379087	0,424417196	0,000282166	0,000344156	0,07%	0,08%
412,96	90,45	0,43267505	0,43369509	0,434411116	0,001020043	0,001736068	0,24%	0,40%
432,76	90,46	0,44058541	0,44300502	0,44382837	0,002419613	0,003242962	0,55%	0,74%
452,56	90,47	0,44786646	0,45177994	0,452726627	0,003913479	0,00486017	0,87%	1,09%
472,36	90,48	0,45470354	0,46008070	0,461165153	0,005377159	0,006461608	1,18%	1,42%
492,16	90,48	0,46109095	0,46795218	0,4691872	0,006861227	0,00809625	1,49%	1,76%

**Πίνακας Η.11:** Μετρηθείσα πυκνότητα, πυκνότητα προσομοιωτή και αποκλίσεις για το μείγμα Μεθάνιο 28,30% - Αιθάνιο 45,80% - CO<sub>2</sub> 25,90% στους 90°C σε διαφορετικές πιέσεις

Component	HC	Pc (atm)	Tc (K)	Acentric fact.	Mol. weight	Vol. Shift	V Shift Coef1 (1/deg F)
CH <sub>4</sub>	1	45.4	190.6	0.008	16.043	0	0
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	1	48.2	305.4	0.098	30.07	0	0
CO <sub>2</sub>	3	72.8	304.2	0.225	44.01	0	0

Component	HC	Pc (atm)	Tc (K)	Acentric fact.	Mol. weight	Vol. Shift	V Shift Coef1 (1/deg F)
CH <sub>4</sub>	1	50.311809	174.7264	0.008	16.043	0.24177336	-0.0014154562
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	1	41.889603	272.56942	0.098	30.07	0.20055941	-0.0025391489
CO <sub>2</sub>	3	58.24	365.04	0.225	44.01	0.2	0.0027734521

**Πίνακας Η.12:** Τιμές παραμέτρων του προσομοιωτή πριν το regression (άνω) και μετά το regression (κάτω) για το μείγμα Μεθάνιο 28,30% - Αιθάνιο 45,80% - CO<sub>2</sub> 25,90% στους 90°C

Πίεση (bar)	Θερμοκρασία (°C)	Πυκνότητα μετρηθείσα (g/ml)	Πυκνότητα προσομοιωτή (g/ml)		Απόλυτη απόκλιση (g/ml)		Απόκλιση (%)	
			Πριν regression	Μετά regression	Πριν regression	Μετά regression	Πριν regression	Μετά regression
66,56	25,40	0,23167351	0,16991585	0,16522885	0,06175766	0,06644466	26,66%	28,68%
71,56	25,40	0,20968607	0,19646485	0,19020964	0,01322121	0,01947642	6,31%	9,29%
76,56	25,39	0,21075205	0,22822466	0,21980055	0,01747261	0,00904850	8,29%	4,29%
81,61	25,38	0,23902032	0,26619162	0,25475123	0,02717130	0,01573092	11,37%	6,58%
86,66	25,38	0,27563220	0,30791491	0,29264932	0,03228272	0,01701712	11,71%	6,17%
91,56	25,37	0,31439803	0,34707845	0,32777620	0,03268042	0,01337817	10,39%	4,26%
96,56	25,37	0,35113275	0,38167513	0,35847239	0,03054238	0,00733964	8,70%	2,09%
106,51	25,37	0,41124885	0,43439990	0,40466483	0,02315106	0,00658402	5,63%	1,60%
116,46	25,36	0,45204681	0,47281698	0,43787911	0,02077018	0,01416769	4,59%	3,13%
126,46	25,36	0,48184335	0,50280194	0,46353268	0,02095859	0,01831067	4,35%	3,80%
136,41	25,36	0,50458505	0,52725733	0,48428140	0,02267228	0,02030365	4,49%	4,02%
146,36	25,36	0,52291576	0,54803168	0,50178637	0,02511592	0,02112939	4,80%	4,04%
156,36	25,36	0,53820089	0,56620943	0,51701353	0,02800854	0,02118736	5,20%	3,94%
166,31	25,36	0,55149064	0,58225192	0,53038093	0,03076128	0,02110971	5,58%	3,83%
176,26	25,36	0,56294929	0,59668616	0,54235313	0,03373687	0,02059615	5,99%	3,66%
186,26	25,36	0,57334597	0,60988057	0,55325049	0,03653460	0,02009547	6,37%	3,50%
196,11	25,35	0,58267662	0,62186398	0,56312588	0,03918736	0,01955074	6,73%	3,36%
216,01	25,35	0,59904918	0,64338639	0,58074458	0,04433720	0,01830460	7,40%	3,06%
235,96	25,35	0,61313159	0,66224813	0,59609348	0,04911654	0,01703812	8,01%	2,78%
255,86	25,35	0,62537860	0,67897781	0,60963388	0,05359921	0,01574472	8,57%	2,52%
275,76	25,35	0,60851198	0,69405118	0,62177588	0,08553921	0,01326390	14,06%	2,18%
295,66	25,35	0,61881567	0,70777260	0,63278056	0,08895693	0,01396489	14,38%	2,26%
315,51	25,35	0,62825379	0,72033748	0,64281773	0,09208369	0,01456394	14,66%	2,32%
335,26	25,35	0,63678934	0,73189480	0,65201874	0,09510547	0,01522940	14,94%	2,39%
355,16	25,35	0,64473212	0,74272489	0,66061104	0,09799277	0,01587892	15,20%	2,46%
374,96	25,35	0,65205946	0,75279249	0,66857382	0,10073303	0,01651436	15,45%	2,53%
394,76	25,35	0,65894427	0,76224178	0,67602561	0,10329752	0,01708134	15,68%	2,59%
414,56	25,35	0,66538612	0,77114324	0,68302568	0,10575713	0,01763956	15,89%	2,65%
434,46	25,35	0,67150716	0,77959619	0,68965732	0,10808902	0,01815016	16,10%	2,70%
454,26	25,35	0,67724735	0,78756697	0,69589491	0,11031963	0,01864756	16,29%	2,75%
473,96	25,35	0,68266814	0,79510366	0,70177849	0,11243552	0,01911035	16,47%	2,80%
493,66	25,35	0,68782938	0,80228474	0,70737374	0,11445535	0,01954436	16,64%	2,84%

**Πίνακας Η.13:** Μετρηθείσα πυκνότητα, πυκνότητα προσομοιωτή και αποκλίσεις για το μείγμα Μεθάνιο 13,60% - Αιθάνιο 20% - CO<sub>2</sub> 66,40% στους 25°C σε διαφορετικές πιέσεις

Component	HC	Pc (atm)	Tc (K)	Acentric fact.	Mol. weight	Vol. Shift	V Shift Coef1 (1/deg F)
CH <sub>4</sub>	1	45.4	190.6	0.008	16.043	0	0
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	1	48.2	305.4	0.098	30.07	0	0
CO <sub>2</sub>	3	72.8	304.2	0.225	44.01	0	0

Component	HC	Pc (atm)	Tc (K)	Acentric fact.	Mol. weight	Vol. Shift	V Shift Coef1 (1/deg F)
CH <sub>4</sub>	1	53.169593	244.97	0.008	16.043	-0.15643044	-0.0028216169
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	1	57.84	366.46999	0.098	30.07	-0.15405015	-0.0027777778
CO <sub>2</sub>	3	67.369979	276.17124	0.225	44.01	-0.16418387	-0.0029614695

**Πίνακας Η.14:** Τιμές παραμέτρων του προσομοιωτή πριν το regression (άνω) και μετά το regression (κάτω) για το μείγμα Μεθάνιο 13,60% - Αιθάνιο 20% - CO<sub>2</sub> 66,40% στους 25°C

Πίεση (bar)	Θερμοκρασία (°C)	Πυκνότητα μετρηθείσα (g/ml)	Πυκνότητα προσομοιωτή (g/ml)		Απόλυτη απόκλιση (g/ml)		Απόκλιση (%)	
			Πριν regression	Μετά regression	Πριν regression	Μετά regression	Πριν regression	Μετά regression
81,61	50,16	0,16126568	0,17313556	0,16280525	0,01186988	0,00153958	7,36%	0,95%
85,81	50,18	0,17416837	0,18696270	0,17540538	0,01279433	0,00123701	7,35%	0,71%
90,96	50,22	0,19041053	0,20465830	0,19162728	0,01424777	0,00121675	7,48%	0,64%
95,96	50,26	0,20724267	0,22258456	0,20823522	0,01534189	0,00099255	7,40%	0,48%
105,96	50,29	0,24315033	0,26010140	0,24385387	0,01695107	0,00070355	6,97%	0,29%
116,16	50,36	0,28161908	0,29856974	0,28182084	0,01695066	0,00020176	6,02%	0,07%
126,16	50,40	0,31866783	0,33468337	0,31850151	0,01601553	0,00016632	5,03%	0,05%
136,11	50,44	0,35270500	0,36757568	0,35202976	0,01487068	0,00067524	4,22%	0,19%
146,06	50,47	0,38287083	0,39705286	0,38154538	0,01418202	0,00132545	3,70%	0,35%
156,01	50,49	0,40890790	0,42334076	0,40715250	0,01443286	0,00175540	3,53%	0,43%
166,01	50,52	0,43134314	0,44678057	0,42929161	0,01543743	0,00205153	3,58%	0,48%
175,96	50,53	0,45098830	0,46779359	0,44862109	0,01680529	0,00236721	3,73%	0,52%
185,91	50,55	0,46820236	0,48667135	0,46554620	0,01846899	0,00265615	3,94%	0,57%
194,01	50,59	0,48000252	0,50065867	0,47781795	0,02065615	0,00218457	4,30%	0,46%
213,56	50,63	0,50602733	0,53080062	0,50367655	0,02477329	0,00235077	4,90%	0,46%
233,61	50,64	0,52770317	0,55736884	0,52585091	0,02966567	0,00185226	5,62%	0,35%
253,96	50,66	0,54522434	0,58079424	0,54494492	0,03556991	0,00027942	6,52%	0,05%
273,81	50,67	0,56136588	0,60105279	0,56116842	0,03968692	0,00019746	7,07%	0,04%
293,76	50,67	0,57534089	0,61935709	0,57562669	0,04401620	0,00028579	7,65%	0,05%
313,66	50,68	0,58779204	0,63588975	0,58851354	0,04809771	0,00072150	8,18%	0,12%
333,51	50,68	0,59903210	0,65098394	0,60016217	0,05195184	0,00113006	8,67%	0,19%
353,41	50,69	0,60920979	0,66488477	0,61076959	0,05567498	0,00155980	9,14%	0,26%
373,21	50,69	0,61856432	0,67772997	0,62050882	0,05916565	0,00194450	9,56%	0,31%
393,06	50,69	0,62714917	0,68972460	0,62953682	0,06257543	0,00238765	9,98%	0,38%
412,96	50,70	0,63505688	0,70094073	0,63790006	0,06588385	0,00284319	10,37%	0,45%
432,81	50,70	0,64241356	0,71147767	0,64572989	0,06906411	0,00331633	10,75%	0,52%
452,56	50,70	0,64928760	0,72135786	0,65303110	0,07207026	0,00374351	11,10%	0,58%
472,31	50,70	0,65567703	0,73069983	0,65989982	0,07502280	0,00422279	11,44%	0,64%
492,16	50,71	0,66160906	0,73957566	0,66637288	0,07796660	0,00476382	11,78%	0,72%

**Πίνακας Η.15:** Μετρηθείσα πυκνότητα, πυκνότητα προσομοιωτή και αποκλίσεις για το μείγμα Μεθάνιο 13,60% - Αιθάνιο 20% - CO<sub>2</sub> 66,40% στους 50°C σε διαφορετικές πιέσεις

Component	HC	Pc (atm)	Tc (K)	Acentric fact.	Mol. weight	Vol. Shift	V Shift Coef1 (1/deg F)
CH <sub>4</sub>	1	45.4	190.6	0.008	16.043	0	0
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	1	48.2	305.4	0.098	30.07	0	0
CO <sub>2</sub>	3	72.8	304.2	0.225	44.01	0	0

Component	HC	Pc (atm)	Tc (K)	Acentric fact.	Mol. weight	Vol. Shift	V Shift Coef1 (1/deg F)
CH <sub>4</sub>	1	50.360614	244.97	0.008	16.043	-0.2004783	-0.0036161309
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	1	57.84	366.47	0.098	30.07	-0.1540042	-0.0027778536
CO <sub>2</sub>	3	87.36	288.65975	0.225	44.01	-0.19474886	-0.0035127861

**Πίνακας Η.16:** Τιμές παραμέτρων του προσομοιωτή πριν το regression (άνω) και μετά το regression (κάτω) για το μείγμα Μεθάνιο 13,60% - Αιθάνιο 20% - CO<sub>2</sub> 66,40% στους 50°C

Πίεση (bar)	Θερμοκρασία (°C)	Πυκνότητα μετρηθείσα (g/ml)	Πυκνότητα προσομοιωτή (g/ml)		Απόλυτη απόκλιση (g/ml)		Απόκλιση (%)	
			Πριν regression	Μετά regression	Πριν regression	Μετά regression	Πριν regression	Μετά regression
93,36	90,21	0,14199804	0,15046143	0,14375930	0,00846339	0,00176127	5,96%	1,24%
104,06	90,22	0,16306239	0,17228979	0,16434943	0,00922740	0,00128704	5,66%	0,79%
114,66	90,25	0,18449919	0,19450900	0,18548580	0,01000981	0,00098661	5,43%	0,53%
124,56	90,27	0,20520181	0,21560211	0,20577799	0,01040030	0,00057618	5,07%	0,28%
134,66	90,30	0,22662604	0,23721742	0,22682625	0,01059139	0,00020021	4,67%	0,09%
144,86	90,33	0,24819889	0,25890803	0,24820449	0,01070914	0,00000560	4,31%	0,00%
153,46	90,58	0,26595494	0,27641621	0,26555088	0,01046127	0,00040405	3,93%	0,15%
163,36	90,58	0,28641250	0,29668917	0,28582225	0,01027668	0,00059025	3,59%	0,21%
173,31	90,58	0,30627594	0,31641751	0,30559224	0,01014157	0,00068370	3,31%	0,22%
183,36	90,57	0,32543261	0,33559802	0,32476153	0,01016541	0,00067108	3,12%	0,21%
193,36	90,57	0,34362773	0,35384625	0,34286239	0,01021852	0,00076534	2,97%	0,22%
213,36	90,57	0,37684273	0,38781020	0,37596455	0,01096747	0,00087819	2,91%	0,23%
233,36	90,57	0,40579806	0,41849677	0,40497399	0,01269872	0,00082407	3,13%	0,20%
253,26	90,57	0,43129812	0,44606455	0,43018544	0,01476642	0,00111268	3,42%	0,26%
273,31	90,57	0,45341819	0,47120713	0,45244791	0,01772894	0,00103028	3,91%	0,23%
293,26	90,58	0,47301091	0,49393092	0,47197281	0,02092001	0,00103810	4,42%	0,22%
313,26	90,58	0,49035478	0,51475813	0,48940090	0,02440335	0,00095388	4,98%	0,19%
333,76	90,58	0,50623004	0,53433910	0,50539533	0,02810906	0,00083470	5,55%	0,16%
353,66	90,59	0,52000442	0,55183606	0,51937305	0,03183165	0,00063137	6,12%	0,12%
373,46	90,59	0,53248187	0,56800830	0,53206608	0,03552643	0,00041580	6,67%	0,08%
393,26	90,59	0,54385307	0,58307527	0,54369548	0,03922220	0,00015759	7,21%	0,03%
413,11	90,60	0,55418463	0,59716992	0,55439902	0,04298529	0,00021439	7,76%	0,04%
432,91	90,60	0,56365439	0,61038675	0,56431445	0,04673236	0,00066005	8,29%	0,12%
452,76	90,60	0,57238793	0,62285873	0,57355710	0,05047080	0,00116917	8,82%	0,20%
472,46	90,60	0,58041865	0,63454259	0,58211897	0,05412395	0,00170032	9,32%	0,29%
492,21	90,61	0,58782925	0,64560655	0,59013140	0,05777730	0,00230216	9,83%	0,39%

**Πίνακας Η.17:** Μετρηθείσα πυκνότητα, πυκνότητα προσομοιωτή και αποκλίσεις για το μείγμα Μεθάνιο 13,60% - Αιθάνιο 20% - CO<sub>2</sub> 66,40% στους 90°C σε διαφορετικές πιέσεις

Component	HC	Pc (atm)	Tc (K)	Acentric fact	Mol. weight	Vol. Shift	V Shift Coef1 (1/deg F)
CH4	1	45.4	190.6	0.008	16.043	0	0
C2H6	1	48.2	305.4	0.098	30.07	0	0
CO2	3	72.8	304.2	0.225	44.01	0	0

Component	HC	Pc (atm)	Tc (K)	Acentric fact	Mol. weight	Vol. Shift	V Shift Coef1 (1/deg F)
CH4	1	54.48	152.47	0.008	16.043	-0.37114232	-0.0066944864
C2H6	1	57.84	244.32	0.098	30.07	-0.231	-0.0041666667
CO2	3	87.36	348.0156	0.225	44.01	-0.16153345	-0.0015547229

**Πίνακας Η.18:** Τιμές παραμέτρων του προσομοιωτή πριν το regression (άνω) και μετά το regression (κάτω) για το μείγμα Μεθάνιο 13,60% - Αιθάνιο 20% - CO<sub>2</sub> 66,40% στους 90°C

Πίεση (bar)	Θερμοκρασία (°C)	Πυκνότητα μετρηθείσα (g/ml)	Πυκνότητα προσομοιωτή (g/ml)		Απόλυτη απόκλιση (g/ml)		Απόκλιση (%)	
			Πριν regression	Μετά regression	Πριν regression	Μετά regression	Πριν regression	Μετά regression
20,31	27,75	0,01314583	0,032193908	0,000159944	0,019048075	0,012985888	144,90%	98,78%
25,56	27,73	0,01877816	0,037814786	0,027013537	0,019036626	0,008235376	101,38%	43,86%
30,36	27,73	0,02896322	0,043249851	0,031304883	0,014286633	0,002341665	49,33%	8,08%
35,26	27,72	0,03598365	0,049111007	0,035815682	0,013127356	0,000167968	36,48%	0,47%
40,11	27,72	0,04279921	0,055268504	0,040416185	0,01246929	0,00238303	29,13%	5,57%
45,31	27,71	0,05045946	0,062310221	0,045508454	0,011850764	0,004951003	23,49%	9,81%
50,26	27,71	0,05833934	0,069512122	0,050522233	0,011172779	0,007817109	19,15%	13,40%
55,26	27,71	0,06715757	0,077357965	0,055761873	0,010200396	0,011395696	15,19%	16,97%
60,21	27,71	0,07685411	0,085801297	0,061134465	0,008947183	0,015719648	11,64%	20,45%
65,11	27,71	0,08782243	0,094959053	0,066646419	0,007136624	0,02117601	8,13%	24,11%
70,06	27,71	0,09964180	0,10522849	0,07243389	0,005586689	0,027207911	5,61%	27,31%
75,06	27,71	0,11131088	0,116954005	0,078519304	0,005643123	0,032791578	5,07%	29,46%
80,01	27,71	0,12328903	0,136343811	0,084809754	0,240149076	0,038479279	194,79%	31,21%
85,01	27,71	0,13614448	0,1369605218	0,091465426	0,233460742	0,04467905	171,48%	32,82%
90,06	27,71	0,14845700	0,1375320606	0,098537577	0,22686361	0,049919419	152,81%	33,63%
95,06	27,71	0,16052084	0,1380557042	0,105941311	0,220036203	0,054579527	137,08%	34,00%
105,06	27,71	0,18676544	0,1390006333	0,1306220159	0,203240894	0,119454719	108,82%	63,96%
115,06	27,71	0,21156611	0,1398377582	0,1311057735	0,18681147	0,099491622	88,30%	47,03%
125,11	27,71	0,23075964	0,1405941501	0,1315482034	0,175181863	0,084722397	75,92%	36,71%
135,11	27,71	0,24581800	0,1412789394	0,1319521891	0,166971395	0,073703892	67,92%	29,98%
145,11	27,72	0,25922050	0,1419052613	0,1323241378	0,159832109	0,064020874	61,66%	24,70%
155,16	27,72	0,27110255	0,1424900954	0,1326733403	0,1537984	0,055630849	56,73%	20,52%
165,16	27,72	0,28130768	0,1430315195	0,1329980346	0,149007511	0,048672662	52,97%	17,30%
175,11	27,72	0,29045700	0,1435359409	0,1333014242	0,144902408	0,042557242	49,89%	14,65%
185,11	27,72	0,29877675	0,1440124902	0,1335887955	0,141348154	0,037111208	47,31%	12,42%
195,11	27,72	0,30627997	0,1444621284	0,1338604686	0,138341314	0,032324716	45,17%	10,55%
215,06	27,72	0,31976308	0,1452901228	0,1343618465	0,133138151	0,023855389	41,64%	7,46%
235,01	27,73	0,33167255	0,1460397869	0,1348164505	0,128725322	0,016491958	38,81%	4,97%
254,96	27,73	0,34230903	0,1467263382	0,1352332509	0,124954349	0,010023476	36,50%	2,93%
274,86	27,73	0,35184400	0,1473573055	0,1356165728	0,121729058	0,00432173	34,60%	1,23%
294,76	27,74	0,36029543	0,1479410183	0,1359704206	0,119114755	0,000591222	33,06%	0,16%
314,66	27,74	0,36801589	0,148486447	0,1363013621	0,116848578	0,005002271	31,75%	1,36%
334,56	27,74	0,37504995	0,1489969554	0,136610999	0,114919602	0,008939963	30,64%	2,38%
354,41	27,74	0,38137140	0,1494757473	0,1369010933	0,11338607	0,012360469	29,73%	3,24%
374,26	27,74	0,38729726	0,1499273078	0,1371742081	0,111975821	0,015555176	28,91%	4,02%
394,11	27,74	0,39289049	0,15035436	0,1374324258	0,110653114	0,018566228	28,16%	4,73%
413,96	27,74	0,39830324	0,1507594669	0,1376768675	0,109291425	0,021534569	27,44%	5,41%
433,76	27,74	0,40345857	0,1511437499	0,1379084945	0,107978924	0,02437363	26,76%	6,04%
453,56	27,74	0,40834310	0,1515099319	0,1381289086	0,106756223	0,027054011	26,14%	6,63%
473,36	27,74	0,41300724	0,151859615	0,138339231	0,105588907	0,029614933	25,57%	7,17%
493,16	27,75	0,41735622	0,1521929592	0,138538821	0,104573372	0,03196801	25,06%	7,66%

**Πίνακας Η.19:** Μετρηθείσα πυκνότητα, πυκνότητα προσομοιωτή και αποκλίσεις για το μείγμα Μεθάνιο 41,40% - Προπάνιο 58,60% - CO<sub>2</sub> 0% στους 27°C σε διαφορετικές πιέσεις

Component	HC	Pc (atm)	Tc (K)	Acentric fact.	Mol. weight	Vol. Shift	V Shift Coef1 (1/deg F)
CH <sub>4</sub>	1	45.4	190.6	0.008	16.043	0	0
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	1	41.9	369.8	0.152	44.097	0	0

Component	HC	Pc (atm)	Tc (K)	Acentric fact.	Mol. weight	Vol. Shift	V Shift Coef1 (1/deg F)
CH <sub>4</sub>	1	36.32	159.36815	0.008	16.043	-0.063769264	-2.0833327E-06
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	1	33.52	395.01992	0.152	44.097	-0.15569634	-0.0013849309

**Πίνακας Η.20:** Τιμές παραμέτρων του προσομοιωτή πριν το regression (άνω) και μετά το regression (κάτω) για το μείγμα Μεθάνιο 41,40% - Προπάνιο 58,60% - CO<sub>2</sub> 0% στους 27°C

Πίεση (bar)	Θερμοκρασία (°C)	Πυκνότητα μετρηθείσα (g/ml)	Πυκνότητα προσομοιωτή (g/ml)		Απόλυτη απόκλιση (g/ml)		Απόκλιση (%)	
			Πριν regression	Μετά regression	Πριν regression	Μετά regression	Πριν regression	Μετά regression
31,21	50,53	0,03930615	0,050064105	0,044039561	0,01075796	0,004733416	27,37%	12,04%
36,26	50,52	0,04742405	0,06208436	0,052663902	0,014660306	0,005239847	30,91%	11,05%
41,26	50,53	0,05625220	0,070506868	0,061727149	0,014254664	0,005474944	25,34%	9,73%
46,36	50,55	0,06627047	0,078591387	0,071552874	0,012320921	0,005282408	18,59%	7,97%
51,26	50,55	0,07671122	0,087041126	0,081610867	0,01032991	0,004899651	13,47%	6,39%
56,06	50,56	0,08779508	0,096147623	0,092074127	0,008352547	0,004279052	9,51%	4,87%
60,96	50,57	0,10007675	0,106508365	0,103403987	0,006431617	0,003327239	6,43%	3,32%
65,86	50,57	0,11345193	0,118289945	0,115403418	0,004838019	0,001951491	4,26%	1,72%
70,76	50,58	0,12748249	0,132131499	0,128006745	0,004649006	0,000524252	3,65%	0,41%
75,66	50,59	0,14258999	0,149320912	0,14110344	0,006730918	0,001486554	4,72%	1,04%
80,56	50,60	0,15764152	0,272352322	0,154514098	0,114710798	0,003127426	72,77%	1,98%
85,56	50,61	0,17286163	0,285567554	0,168270754	0,112705925	0,004590875	65,20%	2,66%
90,51	50,61	0,18749039	0,296745238	0,181699032	0,109254849	0,005791357	58,27%	3,09%
95,51	50,62	0,20127441	0,306551741	0,194749274	0,105277328	0,006525139	52,31%	3,24%
105,56	50,64	0,22604702	0,323183711	0,218776969	0,097136691	0,007270052	42,97%	3,22%
115,51	50,64	0,24666501	0,336852266	0,239296621	0,090187258	0,007368388	36,56%	2,99%
125,46	50,65	0,26387390	0,348526522	0,256724709	0,084652618	0,007149196	32,08%	2,71%
135,46	50,66	0,27819241	0,358802367	0,271685954	0,080609954	0,006506459	28,98%	2,34%
145,46	50,66	0,29023039	0,367982548	0,284638483	0,077752162	0,005591903	26,79%	1,93%
155,46	50,66	0,30053571	0,376268899	0,295969944	0,075733191	0,004565764	25,20%	1,52%
165,46	50,67	0,30955586	0,383800781	0,305971873	0,07424492	0,003583988	23,98%	1,16%
175,41	50,67	0,31757992	0,390715951	0,31490537	0,073136036	0,002674546	23,03%	0,84%
185,41	50,67	0,32475164	0,397153772	0,323018721	0,072402131	0,00173292	22,29%	0,53%
195,41	50,68	0,33110330	0,40313827	0,330390418	0,072034965	0,000712886	21,76%	0,22%
215,31	50,68	0,34241042	0,413973158	0,343349355	0,071562741	0,000938938	20,90%	0,27%
235,11	50,71	0,35194267	0,423520162	0,354366854	0,071577496	0,002424188	20,34%	0,69%
254,96	50,71	0,36045140	0,432203771	0,364112487	0,071752373	0,003661089	19,91%	1,02%
274,86	50,71	0,36818331	0,440126503	0,372786485	0,071943195	0,004603177	19,54%	1,25%
294,76	50,71	0,37501163	0,447397284	0,380574662	0,072385657	0,005563035	19,30%	1,48%
314,66	50,71	0,38111242	0,454113826	0,387632397	0,073001407	0,006519978	19,15%	1,71%
334,56	50,72	0,38656768	0,460336999	0,394054199	0,073769318	0,007486519	19,08%	1,94%
354,36	50,72	0,39186820	0,466132479	0,399952197	0,074264279	0,008083998	18,95%	2,06%
374,26	50,72	0,39684270	0,471591571	0,405433715	0,07474887	0,008591014	18,84%	2,16%
394,06	50,72	0,40146623	0,476703063	0,410501957	0,075236832	0,009035727	18,74%	2,25%
413,86	50,72	0,40598968	0,481527824	0,415233811	0,075538139	0,009244126	18,61%	2,28%
433,71	50,72	0,41018615	0,486107502	0,419677333	0,07592135	0,00949118	18,51%	2,31%
453,46	50,72	0,41405565	0,490430886	0,423832522	0,076375232	0,009776869	18,45%	2,36%
473,31	50,73	0,41783041	0,494560446	0,42776025	0,076730033	0,009929837	18,36%	2,38%
493,06	50,73	0,42149679	0,498483367	0,43146532	0,076986575	0,009968528	18,27%	2,37%

**Πίνακας Η.21:** Μετρηθείσα πυκνότητα, πυκνότητα προσομοιωτή και αποκλίσεις για το μείγμα Μεθάνιο 41,40% - Προπάνιο 58,60% - CO<sub>2</sub> 0% στους 50°C σε διαφορετικές πιέσεις

Component	HC	Pc (atm)	Tc (K)	Acentric fact.	Mol. weight	Vol. Shift	V Shift Coef1 (1/deg F)
CH <sub>4</sub>	1	45.4	190.6	0.008	16.043	0	0
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	1	41.9	369.8	0.152	44.097	0	0

Component	HC	Pc (atm)	Tc (K)	Acentric fact.	Mol. weight	Vol. Shift	V Shift Coef1 (1/deg F)
CH <sub>4</sub>	1	47.039783	172.94581	0.008	16.043	-0.17585026	-0.0031719023
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	1	44.788978	335.31741	0.152	44.097	-0.18154682	-0.003274654

**Πίνακας Η.22:** Τιμές παραμέτρων του προσομοιωτή πριν το regression (άνω) και μετά το regression (κάτω) για το μείγμα Μεθάνιο 41,40% - Προπάνιο 58,60% - CO<sub>2</sub> 0% στους 50°C

Πίεση (bar)	Θερμοκρασία (°C)	Πυκνότητα μετρηθείσα (g/ml)	Πυκνότητα προσομοιωτή (g/ml)		Απόλυτη απόκλιση (g/ml)		Απόκλιση (%)	
			Πριν regression	Μετά regression	Πριν regression	Μετά regression	Πριν regression	Μετά regression
40,71	89,91	0,04459602	0,055568049	0,048873934	0,010972031	0,004277916	24,60%	9,59%
45,56	89,92	0,05096493	0,064274084	0,055427087	0,013309159	0,004462162	26,11%	8,76%
50,61	89,94	0,05800227	0,073958847	0,062419146	0,015956575	0,004416874	27,51%	7,62%
55,51	89,98	0,06511013	0,083983202	0,069366354	0,018873071	0,004256223	28,99%	6,54%
60,51	90,01	0,07262754	0,094883766	0,076619514	0,022256223	0,003991971	30,64%	5,50%
65,46	90,04	0,08028909	0,106333764	0,083962378	0,02604467	0,003673284	32,44%	4,58%
70,41	90,06	0,08822544	0,118389259	0,091457417	0,03016382	0,003231977	34,19%	3,66%
75,46	90,08	0,09655391	0,13120403	0,099250399	0,03465012	0,002696489	35,89%	2,79%
80,36	90,10	0,10496658	0,143954727	0,106931252	0,038988144	0,00196467	37,14%	1,87%
85,16	90,13	0,11336834	0,156540433	0,114549633	0,043172095	0,001181295	38,08%	1,04%
90,26	90,15	0,12237903	0,169803721	0,122731865	0,047424694	0,000352838	38,75%	0,29%
95,41	90,22	0,13158978	0,182735426	0,131003799	0,05114565	0,000585978	38,87%	0,45%
105,56	90,24	0,15005986	0,206775936	0,147461168	0,056716079	0,002598689	37,80%	1,73%
115,36	90,26	0,16729158	0,227406115	0,163173679	0,060114533	0,004117903	35,93%	2,46%
125,11	90,28	0,18371542	0,245470136	0,178389617	0,061754719	0,0053258	33,61%	2,90%
134,96	90,31	0,19926920	0,2614886	0,193084956	0,062219399	0,006184245	31,22%	3,10%
144,96	90,32	0,21389245	0,275911624	0,207205231	0,062019173	0,00668722	29,00%	3,13%
154,91	90,34	0,22716285	0,288687951	0,220322751	0,061525097	0,006840102	27,08%	3,01%
164,91	90,36	0,23924588	0,30022605	0,232541635	0,060980174	0,006704241	25,49%	2,80%
174,86	90,37	0,25022209	0,310655671	0,243791401	0,060433583	0,006430687	24,15%	2,57%
184,86	90,40	0,26011984	0,320202675	0,254188986	0,060082832	0,005930857	23,10%	2,28%
194,81	90,42	0,26912135	0,328948756	0,263739194	0,059827403	0,00538216	22,23%	2,00%
214,71	90,44	0,28507869	0,344613212	0,280776432	0,059534518	0,004302262	20,88%	1,51%
234,56	90,52	0,29845984	0,358142406	0,295285956	0,059682571	0,00317388	20,00%	1,06%
254,31	90,53	0,31012364	0,370193096	0,307991801	0,060069461	0,002131835	19,37%	0,69%
274,31	90,53	0,32050550	0,381146521	0,319328067	0,060641017	0,001177437	18,92%	0,37%
294,16	90,53	0,32962671	0,390996274	0,32932519	0,061369561	0,000301523	18,62%	0,09%
314,06	90,54	0,33785556	0,400001854	0,33829553	0,062146294	0,00043997	18,39%	0,13%
333,96	90,54	0,34529226	0,40830102	0,346423298	0,063008765	0,001131042	18,25%	0,33%
353,81	90,55	0,35206229	0,415946633	0,353785384	0,06388434	0,001723091	18,15%	0,49%
373,66	90,55	0,35836553	0,423073247	0,360548379	0,06470772	0,002182852	18,06%	0,61%
393,51	90,55	0,36418254	0,429732122	0,366779561	0,065549583	0,002597022	18,00%	0,71%
413,36	90,56	0,36956904	0,435966508	0,372526986	0,066397469	0,002957947	17,97%	0,80%
433,16	90,56	0,37463810	0,441830868	0,377877153	0,067192768	0,003239053	17,94%	0,86%
452,96	90,56	0,37930794	0,447368451	0,382870108	0,068060514	0,003562171	17,94%	0,94%
472,76	90,57	0,38377032	0,452600081	0,387526675	0,068829763	0,003756357	17,94%	0,98%
492,56	90,57	0,38785292	0,457578619	0,391922142	0,069725694	0,004069217	17,98%	1,05%

**Πίνακας Η.23:** Μετρηθείσα πυκνότητα, πυκνότητα προσομοιωτή και αποκλίσεις για το μείγμα Μεθάνιο 41,40% - Προπάνιο 58,60% - CO<sub>2</sub> 0% στους 90°C σε διαφορετικές πιέσεις

Component	HC	Pc (atm)	Tc (K)	Acentric fact.	Mol. weight	Vol. Shift	V Shift Coef1 (1/deg F)
CH4	1	45.4	190.6	0.008	16.043	0	0
C3H8	1	41.9	369.8	0.152	44.097	0	0

Component	HC	Pc (atm)	Tc (K)	Acentric fact.	Mol. weight	Vol. Shift	V Shift Coef1 (1/deg F)
CH4	1	54.48	152.47	0.008	16.043	-0.23101515	-0.0041669399
C3H8	1	50.279	354.97928	0.152	44.097	-0.19251175	-0.0027906595

**Πίνακας Η.24:** Τιμές παραμέτρων του προσομοιωτή πριν το regression (άνω) και μετά το regression (κάτω) για το μείγμα Μεθάνιο 41,40% - Προπάνιο 58,60% - CO<sub>2</sub> 0% στους 90°C

Πίεση (bar)	Θερμοκρασία (°C)	Πυκνότητα μετρηθείσα (g/ml)	Πυκνότητα προσομοιωτή (g/ml)		Απόλυτη απόκλιση (g/ml)		Απόκλιση (%)	
			Πριν regression	Μετά regression	Πριν regression	Μετά regression	Πριν regression	Μετά regression
26,31	31,11	0,05339727	0,045755139	0,044244598	0,007642135	0,009152676	14,31%	17,14%
30,71	30,97	0,06370161	0,053916546	0,053959796	0,009785065	0,009741815	15,36%	15,29%
36,46	30,9	0,06236086	0,063734262	0,066334059	0,001373403	0,0039732	2,20%	6,37%
41,01	30,43	0,07172174	0,071812373	0,074245578	9,06311E-05	0,002523836	0,13%	3,52%
45,91	30,4	0,08351117	0,081202396	0,083432166	0,002308769	7,89989E-05	2,76%	0,09%
50,81	30,37	0,09498700	0,091245973	0,093156976	0,003741028	0,001830025	3,94%	1,93%
55,81	30,35	0,10455929	0,102319537	0,103735569	0,002239755	0,000823722	2,14%	0,79%
60,76	30,28	0,11542631	0,114282125	0,114956502	0,001144184	0,000469807	0,99%	0,41%
65,46	30,24	0,12827648	0,126879045	0,12652824	0,001397433	0,001748237	1,09%	1,36%
70,31	30,22	0,14380103	0,141592003	0,139674593	0,002209023	0,004126433	1,54%	2,87%
75,31	30,17	0,16267145	0,159382109	0,154920967	0,003289343	0,007750485	2,02%	4,76%
80,26	30,14	0,18404486	0,360043798	0,172656609	0,175998938	0,01138825	95,63%	6,19%
85,26	30,11	0,20887813	0,371189444	0,193476512	0,162311319	0,013401614	77,71%	6,42%
90,21	30,09	0,23650868	0,38084217	0,235229533	0,144333491	0,001279147	61,03%	0,54%
95,26	30,06	0,28070066	0,389655529	0,287302354	0,108954869	0,006601694	38,82%	2,35%
105,26	30,05	0,31329202	0,404611968	0,310434616	0,091319948	0,002857403	29,15%	0,91%
115,26	30,03	0,32785189	0,417378684	0,329701624	0,089526797	0,001849738	27,31%	0,56%
125,26	30,01	0,34274999	0,428511516	0,346144577	0,085761524	0,003394585	25,02%	0,99%
135,26	29,99	0,35746689	0,438433352	0,360505129	0,080966458	0,003038235	22,65%	0,85%
145,26	29,98	0,37021199	0,447354034	0,373217382	0,077142046	0,003005394	20,84%	0,81%
155,26	29,96	0,38153986	0,45550583	0,384657768	0,073965968	0,003117906	19,39%	0,82%
165,26	29,94	0,39167241	0,463020091	0,395064964	0,071347683	0,003392556	18,22%	0,87%
175,26	29,93	0,40043924	0,469952882	0,404573524	0,06951364	0,004134282	17,36%	1,03%
185,26	29,91	0,40844584	0,476427545	0,413364457	0,067981705	0,004918617	16,64%	1,20%
195,26	29,89	0,41580032	0,48250495	0,421538678	0,06670463	0,005738358	16,04%	1,38%
215,11	29,7	0,42910481	0,49384442	0,436522349	0,064739615	0,007417543	15,09%	1,73%
235,01	29,7	0,44036312	0,503670146	0,449466869	0,063307025	0,009103748	14,38%	2,07%
254,96	29,69	0,45025400	0,512630874	0,46113632	0,06237687	0,010882316	13,85%	2,42%
274,96	29,68	0,45888507	0,520849948	0,47174695	0,061964874	0,012861876	13,50%	2,80%
294,86	29,66	0,46679329	0,528401051	0,481415695	0,061607757	0,0146224	13,20%	3,13%
314,71	29,65	0,47411771	0,535378694	0,490293127	0,061260984	0,016175417	12,92%	3,41%
334,61	29,63	0,48083044	0,541919033	0,498558654	0,061088593	0,017728215	12,70%	3,69%
354,51	29,62	0,48710929	0,548020465	0,506234702	0,060911171	0,019125408	12,50%	3,93%
374,36	29,61	0,49290914	0,55375027	0,513406168	0,060841133	0,020497031	12,34%	4,16%
394,21	29,6	0,49840575	0,559154899	0,520141932	0,060749151	0,021736183	12,19%	4,36%
414,01	29,59	0,50359870	0,564258382	0,52647403	0,060659686	0,022875334	12,05%	4,54%
433,86	29,57	0,50845564	0,569119985	0,532484158	0,060664341	0,024028514	11,93%	4,73%
453,66	29,57	0,51320991	0,573709275	0,538143481	0,060499364	0,02493357	11,79%	4,86%
473,46	29,56	0,51761508	0,578099936	0,543535296	0,060484854	0,025920214	11,69%	5,01%
493,26	29,53	0,52185270	0,582319199	0,548696444	0,060466501	0,026843746	11,59%	5,14%

**Πίνακας Η.25:** Μετρηθείσα πυκνότητα, πυκνότητα προσομοιωτή και αποκλίσεις για το μείγμα Μεθάνιο 34,40% - Προπάνιο 47,10% - CO<sub>2</sub> 18,60% στους 30°C σε διαφορετικές πιέσεις

Component	HC	Pc (atm)	Tc (K)	Acentric fact.	Mol. weight	Vol. Shift	V Shift Coef1 (1/deg F)
CH <sub>4</sub>	1	45.4	190.6	0.008	16.043	0	0
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	1	41.9	369.8	0.152	44.097	0	0
CO <sub>2</sub>	3	72.8	304.2	0.225	44.01	0	0

Component	HC	Pc (atm)	Tc (K)	Acentric fact.	Mol. weight	Vol. Shift	V Shift Coef1 (1/deg F)
CH <sub>4</sub>	1	36.701561	155.3838	0.008	16.043	0	0
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	1	34.137409	355.86743	0.152	44.097	0.12247562	0
CO <sub>2</sub>	3	72.8	243.36	0.225	44.01	0	0

**Πίνακας Η.26:** Τιμές παραμέτρων του προσομοιωτή πριν το regression (άνω) και μετά το regression (κάτω) για το μείγμα Μεθάνιο 34,40% - Προπάνιο 47,10% - CO<sub>2</sub> 18,60% στους 30°C

Πίεση (bar)	Θερμοκρασία (°C)	Πυκνότητα μετρηθείσα (g/ml)	Πυκνότητα προσομοιωτή (g/ml)		Απόλυτη απόκλιση (g/ml)		Απόκλιση (%)	
			Πριν regression	Μετά regression	Πριν regression	Μετά regression	Πριν regression	Μετά regression
30,46	50,68	0,04257544	0,048878739	0,044585791	0,0063033	0,002010352	14,81%	4,72%
36,61	50,65	0,05267435	0,062331045	0,055286124	0,009656694	0,002611774	18,33%	4,96%
41,01	50,64	0,06058670	0,073138702	0,063383458	0,012552003	0,002796759	20,72%	4,62%
46,16	50,64	0,07053977	0,087364699	0,073378979	0,01682493	0,002839209	23,85%	4,02%
51,01	50,64	0,08064295	0,102713591	0,083353676	0,022070643	0,002710729	27,37%	3,36%
55,41	50,64	0,09054752	0,115051011	0,092916699	0,024503488	0,002369175	27,06%	2,62%
61,16	50,64	0,10442529	0,131740648	0,106216829	0,027315355	0,001791535	26,16%	1,72%
65,66	50,64	0,11598578	0,147017457	0,117306411	0,031031679	0,001320633	26,75%	1,14%
70,66	50,64	0,12976816	0,167767774	0,130367866	0,037999612	0,000599704	29,28%	0,46%
75,46	50,65	0,14380783	0,195614271	0,143629552	0,051806446	0,000178273	36,02%	0,12%
80,31	50,65	0,15882825	0,242341731	0,157749827	0,083513484	0,001078419	52,58%	0,68%
85,21	50,65	0,17445924	0,263348343	0,172638989	0,088889107	0,001820247	50,95%	1,04%
90,16	50,66	0,19067033	0,281407559	0,188106417	0,09073723	0,002563911	47,59%	1,34%
95,11	50,66	0,20686898	0,296971098	0,203788493	0,090102122	0,003080483	43,56%	1,49%
105,16	50,66	0,23804796	0,322818491	0,234877127	0,084770529	0,003170835	35,61%	1,33%
115,16	50,67	0,26635746	0,343259652	0,262922252	0,076902196	0,003435204	28,87%	1,29%
125,11	50,68	0,29052322	0,360176751	0,287060475	0,069653528	0,003462748	23,98%	1,19%
135,16	50,68	0,31130056	0,374814423	0,307812394	0,063513858	0,00348817	20,40%	1,12%
145,11	50,68	0,32863268	0,387491435	0,325336593	0,058858756	0,003296085	17,91%	1,00%
155,11	50,68	0,34357480	0,398826099	0,340531707	0,055251303	0,003043089	16,08%	0,89%
165,06	50,69	0,35641107	0,408960981	0,35370369	0,052549913	0,002707378	14,74%	0,76%
175,06	50,69	0,36778167	0,418264505	0,365450029	0,050482831	0,002331645	13,73%	0,63%
185,06	50,69	0,37784472	0,426805549	0,375951734	0,048960833	0,001892983	12,96%	0,50%
195,06	50,69	0,38681415	0,434702652	0,38543146	0,047888506	0,001382686	12,38%	0,36%
215,01	50,7	0,40231069	0,448858168	0,401893635	0,046547479	0,000417054	11,57%	0,10%
234,86	50,71	0,41530969	0,461275681	0,415826494	0,045965988	0,000516801	11,07%	0,12%
254,66	50,71	0,42667244	0,472381281	0,427933249	0,045708841	0,001260809	10,71%	0,30%
274,66	50,71	0,43673002	0,482528978	0,438723286	0,045798954	0,001993262	10,49%	0,46%
294,51	50,71	0,44564850	0,491720372	0,448291114	0,046071868	0,00264261	10,34%	0,59%
314,46	50,72	0,45378425	0,500198945	0,456941084	0,046414699	0,003156839	10,23%	0,70%
334,31	50,72	0,46121290	0,508022362	0,46480615	0,046809462	0,00359325	10,15%	0,78%
354,21	50,72	0,46800246	0,515321976	0,472040088	0,047319512	0,004037624	10,11%	0,86%
374,06	50,72	0,47435389	0,522128221	0,478698963	0,047774326	0,004345069	10,07%	0,92%
393,86	50,72	0,48026664	0,528500366	0,484862868	0,04823373	0,004596232	10,04%	0,96%
413,71	50,72	0,48576495	0,534518502	0,490621505	0,048753555	0,004856558	10,04%	1,00%
433,51	50,72	0,49124796	0,54019064	0,495998904	0,048942682	0,004750945	9,96%	0,97%
453,36	50,72	0,49597968	0,54557765	0,50106234	0,049597968	0,005082658	10,00%	1,02%
473,16	50,72	0,50064545	0,550682734	0,505821425	0,050037286	0,005175978	9,99%	1,03%
492,96	50,72	0,50514456	0,555542736	0,51031941	0,050398172	0,005174846	9,98%	1,02%

**Πίνακας Η.27:** Μετρηθείσα πυκνότητα, πυκνότητα προσομοιωτή και αποκλίσεις για το μείγμα Μεθάνιο 34,40% - Προπάνιο 47,10% - CO<sub>2</sub> 18,60% στους 50°C σε διαφορετικές πιέσεις

Component	HC	Pc (atm)	Tc (K)	Acentric fact.	Mol. weight	Vol. Shift	V Shift Coef1 (1/deg F)
CH <sub>4</sub>	1	45.4	190.6	0.008	16.043	0	0
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	1	41.9	369.8	0.152	44.097	0	0
CO <sub>2</sub>	3	72.8	304.2	0.225	44.01	0	0

Component	HC	Pc (atm)	Tc (K)	Acentric fact.	Mol. weight	Vol. Shift	V Shift Coef1 (1/deg F)
CH <sub>4</sub>	1	51.609691	152.47	0.008	16.043	-0.21884399	-0.0039474024
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	1	50.279	363.57047	0.152	44.097	-0.18874098	-0.0034044189
CO <sub>2</sub>	3	80.152138	300.82587	0.225	44.01	-0.17145434	-0.0030926108

**Πίνακας Η.28:** Τιμές παραμέτρων του προσομοιωτή πριν το regression (άνω) και μετά το regression (κάτω) για το μείγμα Μεθάνιο 34,40% - Προπάνιο 47,10% - CO<sub>2</sub> 18,60% στους 50°C

Πίεση (bar)	Θερμοκρασία (°C)	Πυκνότητα μετρηθείσα (g/ml)	Πυκνότητα προσομοιωτή (g/ml)		Απόλυτη απόκλιση (g/ml)		Απόκλιση (%)	
			Πριν regression	Μετά regression	Πριν regression	Μετά regression	Πριν regression	Μετά regression
41,46	89,57	0,05027594	0,057946791	0,053149261	0,007670847	0,002873317	15,26%	5,72%
44,26	89,63	0,05432366	0,062781164	0,057184312	0,008457505	0,002860654	15,57%	5,27%
50,16	89,69	0,06300563	0,073452664	0,065899958	0,010447032	0,002894326	16,58%	4,59%
54,61	89,74	0,06978086	0,081931236	0,072656546	0,01215038	0,00287569	17,41%	4,12%
59,76	89,78	0,07780344	0,092231108	0,080676991	0,014427672	0,002873554	18,54%	3,69%
64,61	89,83	0,08564402	0,102385212	0,088413909	0,016741197	0,002769893	19,55%	3,23%
69,51	89,88	0,09383985	0,113083944	0,096415131	0,019244095	0,002575282	20,51%	2,74%
75,31	89,98	0,10383434	0,126227093	0,106085477	0,022392758	0,002251142	21,57%	2,17%
79,66	90,02	0,11139573	0,136426049	0,11350523	0,025030322	0,002109502	22,47%	1,89%
84,66	90,05	0,12063669	0,148431887	0,12219845	0,027795197	0,001561759	23,04%	1,29%
89,61	90,07	0,12980396	0,160498596	0,130950938	0,030694632	0,001146975	23,65%	0,88%
94,46	90,11	0,13895443	0,172341046	0,139621732	0,033386613	0,000667299	24,03%	0,48%
105,16	90,13	0,15954499	0,198199651	0,159093776	0,038654657	0,000451217	24,23%	0,28%
114,56	90,17	0,17787224	0,219752493	0,176265569	0,041880258	0,001606666	23,55%	0,90%
124,26	90,21	0,19651962	0,240419515	0,193815398	0,043899897	0,002704221	22,34%	1,38%
134,01	90,24	0,21456453	0,259425422	0,211032042	0,044860894	0,003532485	20,91%	1,65%
143,91	90,25	0,23233628	0,276968843	0,227856234	0,044632559	0,00448005	19,21%	1,93%
153,96	90,27	0,24895597	0,293062593	0,244028475	0,044106623	0,004927495	17,72%	1,98%
163,96	90,29	0,26431502	0,30760095	0,259145099	0,043285934	0,005169917	16,38%	1,96%
173,91	90,31	0,27859897	0,320769729	0,273164458	0,04217076	0,005434512	15,14%	1,95%
183,91	90,33	0,29162669	0,332906919	0,286270764	0,041280227	0,005355927	14,16%	1,84%
193,91	90,35	0,30367398	0,34406538	0,298414362	0,040391396	0,005259623	13,30%	1,73%
213,91	90,37	0,32495795	0,36401958	0,320183453	0,039061631	0,004774496	12,02%	1,47%
233,91	90,39	0,34303264	0,381398011	0,339032379	0,038365372	0,00400026	11,18%	1,17%
253,86	90,4	0,35866764	0,396722875	0,355460915	0,038055236	0,003206724	10,61%	0,89%
273,86	90,42	0,37231176	0,410441087	0,369960828	0,038129328	0,002350931	10,24%	0,63%
293,81	90,43	0,38436670	0,422831368	0,382868506	0,038464669	0,001498193	10,01%	0,39%
313,71	90,44	0,39517718	0,434085941	0,394422624	0,038908758	0,000754559	9,85%	0,19%
333,61	90,45	0,40484213	0,444416248	0,404884282	0,039574113	4,21475E-05	9,78%	0,01%
353,51	90,46	0,41374991	0,453955243	0,414418471	0,040205335	0,000668564	9,72%	0,16%
373,36	90,47	0,42162546	0,462791027	0,423143728	0,041165563	0,001518264	9,76%	0,36%
393,16	90,48	0,42903167	0,471021314	0,431180192	0,04198964	0,002148517	9,79%	0,50%
413,01	90,49	0,43584141	0,478742213	0,438638388	0,042900803	0,002796978	9,84%	0,64%
432,91	90,5	0,44216640	0,486017799	0,445595207	0,043851397	0,003428804	9,92%	0,78%
452,66	90,5	0,44826394	0,492841664	0,452066666	0,044577723	0,003802724	9,94%	0,85%
472,51	90,51	0,45357269	0,499313124	0,458145673	0,04574043	0,004572979	10,08%	1,01%
492,26	90,52	0,45865900	0,505419362	0,463835431	0,046760366	0,005176435	10,20%	1,13%

**Πίνακας Η.29:** Μετρηθείσα πυκνότητα, πυκνότητα προσομοιωτή και αποκλίσεις για το μείγμα Μεθάνιο 34,40% - Προπάνιο 47,10% - CO<sub>2</sub> 18,60% στους 90°C σε διαφορετικές πιέσεις

Component	HC	Pc (atm)	Tc (K)	Acentric fact.	Mol. weight	Vol. Shift	V Shift Coef1 (1/deg F)
CH <sub>4</sub>	1	45.4	190.6	0.008	16.043	0	0
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	1	41.9	369.8	0.152	44.097	0	0
CO <sub>2</sub>	3	72.8	304.2	0.225	44.01	0	0

Component	HC	Pc (atm)	Tc (K)	Acentric fact.	Mol. weight	Vol. Shift	V Shift Coef1 (1/deg F)
CH <sub>4</sub>	1	54.48	152.47	0.008	16.043	-0.23101515	-0.0041669399
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	1	50.279	348.84644	0.152	44.097	-0.19589616	-0.0011183158
CO <sub>2</sub>	3	87.36	365.04	0.225	44.01	-0.154	-0.0027777778

**Πίνακας Η.30:** Τιμές παραμέτρων του προσομοιωτή πριν το regression (άνω) και μετά το regression (κάτω) για το μείγμα Μεθάνιο 34,40% - Προπάνιο 47,10% - CO<sub>2</sub> 18,60% στους 90°C

Πίεση (bar)	Θερμοκρασία (°C)	Πυκνότητα μετρηθείσα (g/ml)	Πυκνότητα προσομοιωτή (g/ml)		Απόλυτη απόκλιση (g/ml)		Απόκλιση (%)	
			Πριν regression	Μετά regression	Πριν regression	Μετά regression	Πριν regression	Μετά regression
14,91	29,56	0,02286305	0,026376002	0,02589705	0,003512947	0,003033995	15,37%	13,27%
20,21	29,40	0,03191066	0,037156428	0,036172894	0,005245765	0,004262232	16,44%	13,36%
26,16	29,37	0,04295731	0,050376465	0,048486287	0,007419157	0,005528979	17,27%	12,87%
30,96	29,35	0,05279312	0,062103583	0,059117741	0,009310467	0,006324625	17,64%	11,98%
36,01	29,34	0,06387221	0,07570486	0,071062709	0,011832649	0,007190499	18,53%	11,26%
41,06	29,29	0,07616261	0,090975261	0,083930341	0,014812651	0,007767731	19,45%	10,20%
45,76	29,28	0,08880083	0,107081826	0,096809185	0,018280995	0,008008354	20,59%	9,02%
50,66	29,25	0,10369991	0,126560277	0,111337932	0,022860371	0,007638025	22,04%	7,37%
55,56	29,23	0,12045898	0,149953641	0,127141747	0,029494659	0,006682766	24,49%	5,55%
60,51	29,21	0,13713171	0,179836085	0,144585854	0,042704375	0,007454145	31,14%	5,44%
65,41	29,19	0,15562036	0,220446093	0,163516474	0,064825733	0,007896114	41,66%	5,07%
70,31	29,18	0,17677974	0,281514883	0,184199514	0,104735142	0,007419773	59,25%	4,20%
75,21	29,16	0,20325338	0,355278305	0,20667502	0,152024929	0,003421644	74,80%	1,68%
80,16	29,14	0,23672964	0,407926188	0,230936585	0,171196546	0,005793058	72,32%	2,45%
85,16	29,12	0,27060933	0,443543242	0,256285803	0,172933915	0,014323523	63,91%	5,29%
90,16	29,11	0,31488247	0,470068215	0,281447605	0,155185742	0,033434868	49,28%	10,62%
95,26	29,09	0,34151596	0,491845316	0,305941438	0,150329359	0,03557452	44,02%	10,42%
105,26	29,07	0,37371529	0,525029165	0,347848941	0,151313873	0,02586635	40,49%	6,92%
115,26	29,06	0,39757963	0,550854131	0,381633482	0,153274506	0,015946143	38,55%	4,01%
125,31	29,05	0,41785696	0,572285234	0,409145193	0,154428277	0,008711763	36,96%	2,08%
135,31	29,04	0,43465019	0,590536671	0,43184656	0,155886477	0,002803635	35,86%	0,65%
145,26	29,02	0,44857190	0,606502273	0,451075123	0,157930375	0,002503225	35,21%	0,56%
155,31	29,02	0,46050076	0,620813168	0,467824028	0,160312409	0,007323269	34,81%	1,59%
165,31	29,01	0,47091061	0,633744874	0,482562617	0,162834268	0,011652011	34,58%	2,47%
175,26	29,00	0,48020005	0,645508833	0,49566572	0,165308783	0,015465669	34,42%	3,22%
185,26	28,98	0,48862601	0,656455851	0,507613891	0,167829842	0,018987882	34,35%	3,89%
195,26	28,96	0,49619612	0,666592335	0,518480817	0,170396215	0,022284697	34,34%	4,49%
215,16	28,95	0,50951029	0,68475567	0,537504344	0,175245376	0,027994049	34,39%	5,49%
235,11	28,94	0,52106599	0,700908689	0,553977732	0,179842696	0,032911739	34,51%	6,32%
254,11	28,93	0,53096063	0,714779076	0,567817684	0,183818446	0,036857054	34,62%	6,94%

**Πίνακας Η.31:** Μετρηθείσα πυκνότητα, πυκνότητα προσομοιωτή και αποκλίσεις για το μείγμα Μεθάνιο 12,50% - Προπάνιο 18,30% - CO<sub>2</sub> 69,20% στους 29°C σε διαφορετικές πιέσεις

Component	HC	Pc (atm)	Tc (K)	Acentric fact.	Mol. weight	Vol. Shift	V Shift Coef1 (1/deg F)
CH <sub>4</sub>	1	45.4	190.6	0.008	16.043	0	0
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	1	41.9	369.8	0.152	44.097	0	0
CO <sub>2</sub>	3	72.8	304.2	0.225	44.01	0	0

Component	HC	Pc (atm)	Tc (K)	Acentric fact.	Mol. weight	Vol. Shift	V Shift Coef1 (1/deg F)
CH <sub>4</sub>	1	45.758914	152.47	0.008	16.043	-0.19403456	-0.0034999018
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	1	43.044081	284.46	0.152	44.097	-0.20566758	-0.0037097327
CO <sub>2</sub>	3	58.24	297.11702	0.225	44.01	-0.15399404	-0.0027776703

**Πίνακας Η.32:** Τιμές παραμέτρων του προσομοιωτή πριν το regression (άνω) και μετά το regression (κάτω) για το μείγμα Μεθάνιο 12,50% - Προπάνιο 18,30% - CO<sub>2</sub> 69,20% στους 29°C

Πίεση (bar)	Θερμοκρασία (°C)	Πυκνότητα μετρηθείσα (g/ml)	Πυκνότητα προσομοιωτή (g/ml)		Απόλυτη απόκλιση (g/ml)		Απόκλιση (%)	
			Πριν regression	Μετά regression	Πριν regression	Μετά regression	Πριν regression	Μετά regression
15,01	50,41	0,02099100	0,024381703	0,02378902	0,003390699	0,002798016	16,15%	13,33%
20,36	50,46	0,02907476	0,034040837	0,032877896	0,004966072	0,003803132	17,08%	13,08%
26,51	50,47	0,03913385	0,04591212	0,043780062	0,00677827	0,004646212	17,32%	11,87%
31,11	50,48	0,04701292	0,05539505	0,052273052	0,008382131	0,005260132	17,83%	11,19%
36,21	50,49	0,05616385	0,066591956	0,062050722	0,010428111	0,005886876	18,57%	10,48%
41,31	50,51	0,06607987	0,078599396	0,072230455	0,012519525	0,006150584	18,95%	9,31%
45,91	50,52	0,07547711	0,090230402	0,081793478	0,014753287	0,006316363	19,55%	8,37%
50,96	50,53	0,08645176	0,104006281	0,092730884	0,01755452	0,006279123	20,31%	7,26%
55,76	50,53	0,09778243	0,118217862	0,103581792	0,020435429	0,005799359	20,90%	5,93%
60,66	50,54	0,10990301	0,134010465	0,115137511	0,024107453	0,0052345	21,94%	4,76%
65,51	50,55	0,12298684	0,151119785	0,127080877	0,028132944	0,004094036	22,87%	3,33%
70,41	50,55	0,13726453	0,170128896	0,139695417	0,032864365	0,002430887	23,94%	1,77%
75,36	50,56	0,15251191	0,191247638	0,152992344	0,038735729	0,000480435	25,40%	0,32%
80,16	50,57	0,16844977	0,213678292	0,166433436	0,045228521	0,002016335	26,85%	1,20%
85,11	50,58	0,18562644	0,238745586	0,180862868	0,053119141	0,004763576	28,62%	2,57%
90,06	50,58	0,20367346	0,265328225	0,195840131	0,061654763	0,007833331	30,27%	3,85%
95,11	50,59	0,22212408	0,293016139	0,211587883	0,070892061	0,010536196	31,92%	4,74%
105,06	50,65	0,25898967	0,344824656	0,243480643	0,085834986	0,015509026	33,14%	5,99%
115,01	50,66	0,29215057	0,389471317	0,275754643	0,097320744	0,016395929	33,31%	5,61%
124,86	50,66	0,32185594	0,425937348	0,306546935	0,104081404	0,015309009	32,34%	4,76%
134,86	50,67	0,34706219	0,456558243	0,335338522	0,109496048	0,011723673	31,55%	3,38%
144,91	50,67	0,36828273	0,482605866	0,361296441	0,114323141	0,006986284	31,04%	1,90%
154,91	50,67	0,38655748	0,504946817	0,384108335	0,118389336	0,002449146	30,63%	0,63%
164,96	50,68	0,40204129	0,524627101	0,404278784	0,122585815	0,002237497	30,49%	0,56%
174,96	50,68	0,41567969	0,542088828	0,42204326	0,126409135	0,006363566	30,41%	1,53%
184,96	50,68	0,42756631	0,557831774	0,437853483	0,130265468	0,010287177	30,47%	2,41%
194,91	50,69	0,43811167	0,57204816	0,451914491	0,133936487	0,013802817	30,57%	3,15%
214,96	50,69	0,45621219	0,597440628	0,47644036	0,141228434	0,020228165	30,96%	4,43%
234,71	50,69	0,47136510	0,619063952	0,496690901	0,14769885	0,025325799	31,33%	5,37%

**Πίνακας Η.33:** Μετρηθείσα πυκνότητα, πυκνότητα προσομοιωτή και αποκλίσεις για το μείγμα Μεθάνιο 12,50% - Προπάνιο 18,30% - CO<sub>2</sub> 69,20% στους 50°C σε διαφορετικές πιέσεις

Component	HC	Pc (atm)	Tc (K)	Acentric fact.	Mol. weight	Vol. Shift	V Shift Coef1 (1/deg F)
CH <sub>4</sub>	1	45.4	190.6	0.008	16.043	0	0
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	1	41.9	369.8	0.152	44.097	0	0
CO <sub>2</sub>	3	72.8	304.2	0.225	44.01	0	0

Component	HC	Pc (atm)	Tc (K)	Acentric fact.	Mol. weight	Vol. Shift	V Shift Coef1 (1/deg F)
CH <sub>4</sub>	1	45.083128	330.57	0.008	16.043	-0.30698796	-0.0028423864
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	1	36.508165	341.35	0.152	44.097	-0.27671979	-0.0029545897
CO <sub>2</sub>	3	104.83	279.7813	0.225	44.01	-0.36736673	-0.0035073489

**Πίνακας Η.34:** Τιμές παραμέτρων του προσομοιωτή πριν το regression (άνω) και μετά το regression (κάτω) για το μείγμα Μεθάνιο 12,50% - Προπάνιο 18,30% - CO<sub>2</sub> 69,20% στους 50°C

Πίεση (bar)	Θερμοκρασία (°C)	Πυκνότητα μετρηθείσα (g/ml)	Πυκνότητα προσομοιωτή (g/ml)		Απόλυτη απόκλιση (g/ml)		Απόκλιση (%)	
			Πριν regression	Μετά regression	Πριν regression	Μετά regression	Πριν regression	Μετά regression
16,76	89,93	0,01997803	0,02380664	0,023148281	0,00382861	0,003170251	19,16%	15,87%
18,21	89,98	0,02179449	0,025991559	0,025208256	0,00419707	0,003413767	19,26%	15,66%
23,86	90,09	0,02918674	0,034718418	0,033331219	0,005531676	0,004144477	18,95%	14,20%
30,36	90,13	0,03806983	0,045202502	0,042870214	0,007132675	0,004800386	18,74%	12,61%
34,66	90,15	0,04410120	0,052404403	0,049292015	0,008303201	0,005190814	18,83%	11,77%
39,86	90,18	0,05155882	0,061414789	0,057174701	0,009855973	0,005615886	19,12%	10,89%
44,61	90,20	0,05867565	0,06994462	0,064490334	0,011268967	0,00581468	19,21%	9,91%
49,61	90,21	0,06644847	0,079246542	0,072310547	0,012798073	0,005862078	19,26%	8,82%
54,51	90,22	0,07421658	0,088689426	0,080089113	0,014472843	0,00587253	19,50%	7,91%
59,86	90,25	0,08301951	0,099373741	0,088705445	0,016354236	0,005685939	19,70%	6,85%
64,61	90,26	0,09104037	0,109207476	0,096469594	0,018167101	0,005429219	19,95%	5,96%
69,61	90,27	0,09983859	0,119907809	0,104754343	0,020069217	0,004915751	20,10%	4,92%
74,46	90,28	0,10849594	0,130633773	0,112894926	0,022137836	0,00439899	20,40%	4,05%
79,46	90,29	0,11778364	0,142035715	0,121387915	0,024252078	0,003604279	20,59%	3,06%
84,41	90,30	0,12722975	0,153660314	0,129892118	0,026430565	0,002662369	20,77%	2,09%
89,21	90,30	0,13670438	0,16524807	0,13823133	0,028543686	0,001526946	20,88%	1,12%
94,21	90,31	0,14664058	0,1775935	0,146988624	0,030952917	0,000348041	21,11%	0,24%
104,91	90,32	0,16885477	0,204856924	0,165980114	0,03600215	0,002874661	21,32%	1,70%
114,66	90,33	0,18890252	0,230353513	0,1834931	0,041450988	0,005409424	21,94%	2,86%
124,01	90,35	0,20866063	0,254914622	0,200349329	0,046253996	0,008311298	22,17%	3,98%
134,01	90,35	0,22957866	0,2809222	0,218386119	0,051343535	0,011192546	22,36%	4,88%
143,91	90,36	0,24953058	0,305894984	0,236078511	0,056364408	0,013452065	22,59%	5,39%
154,01	90,38	0,26906272	0,330246252	0,253831774	0,061183536	0,015230942	22,74%	5,66%
164,06	90,39	0,28713914	0,353171877	0,27109327	0,066032741	0,016045865	23,00%	5,59%
174,06	90,40	0,30402647	0,374591766	0,287750871	0,070565292	0,016275604	23,21%	5,35%
184,01	90,41	0,31964483	0,394529947	0,303726084	0,074885117	0,015918746	23,43%	4,98%
193,96	90,42	0,33405321	0,413156217	0,319044541	0,079103003	0,015008673	23,68%	4,49%
214,06	90,43	0,35975075	0,44718584	0,347888988	0,087435093	0,011861759	24,30%	3,30%
233,96	90,44	0,38155671	0,476714276	0,37358901	0,095157566	0,007967699	24,94%	2,09%
253,96	90,44	0,40037273	0,503002176	0,396751708	0,102629449	0,003621018	25,63%	0,90%
273,96	90,45	0,41676276	0,526437188	0,417449165	0,10967443	0,000686407	26,32%	0,16%
293,86	90,45	0,43127932	0,547474236	0,43595049	0,11619492	0,004671174	26,94%	1,08%
313,81	90,46	0,44401933	0,566598679	0,45262571	0,122579347	0,008606378	27,61%	1,94%
333,71	90,46	0,45551154	0,584076424	0,467708695	0,128564881	0,012197152	28,22%	2,68%
353,66	90,47	0,46591644	0,600173378	0,481426907	0,134256937	0,015510466	28,82%	3,33%
373,51	90,47	0,47532457	0,615025698	0,493932522	0,139701132	0,018607956	29,39%	3,91%
393,36	90,48	0,48393367	0,628828807	0,505404945	0,144895139	0,021471277	29,94%	4,44%
413,16	90,48	0,49188210	0,641704448	0,515977131	0,149822352	0,024095035	30,46%	4,90%

**Πίνακας Η.35:** Μετρηθείσα πυκνότητα, πυκνότητα προσομοιωτή και αποκλίσεις για το μείγμα Μεθάνιο 12,50% - Προπάνιο 18,30% - CO<sub>2</sub> 69,20% στους 90°C σε διαφορετικές πιέσεις

Component	HC	Pc (atm)	Tc (K)	Acentric fact.	Mol. weight	Vol. Shift	V Shift Coef1 (1/deg F)
CH4	1	45.4	190.6	0.008	16.043	0	0
C3H8	1	41.9	369.8	0.152	44.097	0	0
CO2	3	72.8	304.2	0.225	44.01	0	0

Component	HC	Pc (atm)	Tc (K)	Acentric fact.	Mol. weight	Vol. Shift	V Shift Coef1 (1/deg F)
CH4	1	51.810887	253.14485	0.008	16.043	-0.15589803	-0.0028120135
C3H8	1	47.414009	463.62708	0.152	44.097	-0.15875561	-0.002863557
CO2	3	104.83	246.07825	0.225	44.01	-0.39280494	-0.0049446744

**Πίνακας Η.36:** Τιμές παραμέτρων του προσομοιωτή πριν το regression (άνω) και μετά το regression (κάτω) για το μείγμα Μεθάνιο 12,50% - Προπάνιο 18,30% - CO<sub>2</sub> 69,20% στους 90°C

Πίεση (bar)	Θερμοκρασία (°C)	Πυκνότητα μετρηθείσα (g/ml)	Πυκνότητα προσομοιωτή (g/ml)		Απόλυτη απόκλιση (g/ml)		Απόκλιση (%)	
			Πριν regression	Μετά regression	Πριν regression	Μετά regression	Πριν regression	Μετά regression
7,06	29,52	0,005097414	0,010099641	0,00689755	0,005002227	0,001800136	98,13%	35,31%
10,96	29,48	0,009256164	0,013333769	0,009852957	0,004077605	0,000596793	44,05%	6,45%
16,51	29,42	0,019110067	0,017793309	0,014290071	0,001316757	0,004819995	6,89%	25,22%
21,86	29,41	0,026872106	0,022267266	0,018840917	0,00460484	0,008031189	17,14%	29,89%
26,86	29,37	0,034874003	0,026601862	0,023353318	0,008272141	0,011520686	23,72%	33,04%
31,71	29,34	0,041332221	0,030965292	0,027989061	0,01036693	0,01334316	25,08%	32,28%
36,81	29,33	0,047395157	0,03573559	0,033158219	0,011659567	0,014236938	24,60%	30,04%
41,66	29,31	0,053179657	0,040451426	0,038367423	0,012728232	0,014812234	23,93%	27,85%
46,71	29,30	0,058853593	0,045566121	0,044114848	0,013287472	0,014738744	22,58%	25,04%
51,61	29,28	0,064322376	0,050738483	0,050022457	0,013583893	0,014299918	21,12%	22,23%
56,61	29,27	0,069835619	0,056252038	0,056399408	0,013583581	0,013436211	19,45%	19,24%
61,46	29,25	0,075169198	0,061844083	0,062934941	0,013325115	0,012234258	17,73%	16,28%
66,36	29,06	0,080748145	0,067742082	0,069918991	0,013006063	0,010829154	16,11%	13,41%
71,31	29,00	0,086316785	0,074016514	0,077324326	0,012300271	0,008992458	14,25%	10,42%
76,26	28,99	0,091191637	0,080627334	0,085078865	0,010564303	0,006112772	11,58%	6,70%
81,21	28,97	0,09428499	0,08760818	0,093185809	0,00667681	0,001099181	7,08%	1,17%
86,26	28,96	0,096763148	0,095162487	0,101797335	0,001600661	0,005034187	1,65%	5,20%
91,11	28,93	0,098686363	0,102880183	0,110376824	0,00419382	0,011690461	4,25%	11,85%
96,21	28,91	0,10474795	0,111566996	0,119683551	0,006819046	0,014935601	6,51%	14,26%
106,26	28,90	0,120866889	0,130824392	0,138747124	0,009957503	0,017880235	8,24%	14,79%
116,11	28,88	0,138050371	0,153615462	0,158147085	0,01556509	0,020096714	11,27%	14,56%

**Πίνακας Η.37:** Μετρηθείσα πυκνότητα, πυκνότητα προσομοιωτή και αποκλίσεις για το μείγμα Μεθάνιο 58,17% - Βουτάνιο 41,83% - CO<sub>2</sub> 0% στους 29°C σε διαφορετικές πιέσεις

Component	HC	Pc (atm)	Tc (K)	Acentric fact.	Mol. weight	Vol. Shift	V Shift Coef1 (1/deg F)
CH4	1	45.4	190.6	0.008	16.043	0	0
NC4	1	37.5	425.2	0.193	58.124	0	0

Component	HC	Pc (atm)	Tc (K)	Acentric fact.	Mol. weight	Vol. Shift	V Shift Coef1 (1/deg F)
CH4	1	29.056	201.75691	0.008	16.043	0.20000025	0.0027777812
NC4	1	54	486.0751	0.193	58.124	-0.28361856	-0.0034234274

**Πίνακας Η.38:** Τιμές παραμέτρων του προσομοιωτή πριν το regression (άνω) και μετά το regression (κάτω) για το μείγμα Μεθάνιο 58,17% - Βουτάνιο 41,83% - CO<sub>2</sub> 0% στους 29°C

Πίεση (bar)	Θερμοκρασία (°C)	Πυκνότητα μετρηθείσα (g/ml)	Πυκνότητα προσομοιωτή (g/ml)		Απόλυτη απόκλιση (g/ml)		Απόκλιση (%)	
			Πριν regression	Μετά regression	Πριν regression	Μετά regression	Πριν regression	Μετά regression
10,26	50,51	0,009425024	0,013915239	0,011499655	0,004490215	0,002074631	47,64%	22,01%
16,16	50,57	0,015162688	0,021314167	0,016021667	0,006151479	0,000858979	40,57%	5,67%
21,26	50,58	0,020333999	0,025608717	0,020120792	0,005274718	0,000213208	25,94%	1,05%
25,96	50,58	0,025283926	0,02970624	0,024069343	0,004422315	0,001214583	17,49%	4,80%
30,06	50,61	0,02956932	0,033406505	0,027660683	0,003837186	0,001908637	12,98%	6,45%
36,71	50,61	0,037009268	0,039642493	0,033779736	0,002633225	0,003229533	7,12%	8,73%
40,76	50,62	0,041661585	0,043605461	0,037704259	0,001943876	0,003957326	4,67%	9,50%
46,06	50,62	0,047910046	0,048987665	0,043078454	0,001077618	0,004831593	2,25%	10,08%
50,81	50,63	0,053830315	0,054022268	0,048143492	0,000191952	0,005686824	0,36%	10,56%
55,86	50,63	0,060354335	0,059607906	0,053802815	0,000746429	0,00655152	1,24%	10,86%
60,86	50,63	0,06689503	0,065400182	0,05970722	0,001494848	0,00718781	2,23%	10,74%
65,86	50,63	0,073212176	0,071477587	0,065935199	0,001734589	0,007276977	2,37%	9,94%
70,76	50,64	0,079353097	0,07774401	0,072376223	0,001609087	0,006976874	2,03%	8,79%
75,76	50,64	0,085575384	0,08448458	0,079323431	0,001090804	0,006251953	1,27%	7,31%
80,76	50,65	0,091719749	0,091628814	0,086680711	9,09344E-05	0,005039038	0,10%	5,49%
85,66	50,65	0,09762307	0,099066187	0,094326323	0,001443117	0,003296747	1,48%	3,38%
90,66	50,65	0,103035778	0,107173131	0,102615878	0,004137353	0,0004199	4,02%	0,41%
95,66	50,66	0,109315255	0,115901592	0,111450061	0,006586337	0,002134806	6,03%	1,95%
105,96	50,67	0,126433502	0,136411632	0,131662158	0,00997813	0,005228655	7,89%	4,14%
115,81	50,67	0,143332621	0,160891048	0,154185719	0,017558427	0,010853098	12,25%	7,57%
119,46	50,67	0,14744418	0,171966214	0,163559724	0,024522033	0,016115543	16,63%	10,93%

**Πίνακας Η.39:** Μετρηθείσα πυκνότητα, πυκνότητα προσομοιωτή και αποκλίσεις για το μείγμα Μεθάνιο 58,17% - Βουτάνιο 41,83% - CO<sub>2</sub> 0% στους 50°C σε διαφορετικές πιέσεις

Component	HC	Pc (atm)	Tc (K)	Acentric fact.	Mol. weight	Vol. Shift	V Shift Coef1 (1/deg F)
CH4	1	45.4	190.6	0.008	16.043	0	0
NC4	1	37.5	425.2	0.193	58.124	0	0

Component	HC	Pc (atm)	Tc (K)	Acentric fact.	Mol. weight	Vol. Shift	V Shift Coef1 (1/deg F)
CH4	1	36.32	201.37099	0.008	16.043	0.20117815	0.0027941409
NC4	1	45	468.25318	0.193	58.124	-0.15410628	-0.0027796948

**Πίνακας Η.40:** Τιμές παραμέτρων του προσομοιωτή πριν το regression (άνω) και μετά το regression (κάτω) για το μείγμα Μεθάνιο 58,17% - Βουτάνιο 41,83% - CO<sub>2</sub> 0% στους 50°C

Πίεση (bar)	Θερμοκρασία (°C)	Πυκνότητα μετρηθείσα (g/ml)	Πυκνότητα προσομοιωτή (g/ml)		Απόλυτη απόκλιση (g/ml)		Απόκλιση (%)	
			Πριν regression	Μετά regression	Πριν regression	Μετά regression	Πριν regression	Μετά regression
7,31	89,62	0,006271759	0,00848498	0,008138981	0,002213221	0,001867223	35,29%	29,77%
8,26	89,66	0,006784151	0,009635106	0,008746081	0,002850955	0,00196193	42,02%	28,92%
13,96	89,78	0,010695579	0,016812979	0,012455957	0,0061174	0,001760378	57,20%	16,46%
19,66	89,85	0,01536414	0,024479416	0,016295583	0,009115276	0,000931443	59,33%	6,06%
24,51	89,95	0,01947569	0,031428225	0,019673877	0,011952535	0,000198187	61,37%	1,02%
29,11	90,02	0,023477393	0,038420284	0,022975282	0,014942891	0,000502111	63,65%	2,14%
34,06	90,05	0,027748506	0,046434322	0,026632297	0,018685815	0,001116209	67,34%	4,02%
39,06	90,08	0,032283311	0,055084292	0,030449497	0,022800981	0,001833814	70,63%	5,68%
43,96	90,12	0,036754628	0,064147538	0,034314752	0,027392911	0,002439876	74,53%	6,64%
49,06	90,15	0,041530599	0,070916941	0,038473145	0,029386342	0,003057454	70,76%	7,36%
53,96	90,17	0,04609573	0,077333937	0,042605909	0,031238207	0,003489822	67,77%	7,57%
59,06	90,18	0,051003425	0,084412496	0,04705744	0,033409072	0,003945985	65,50%	7,74%
63,96	90,21	0,055743571	0,091692888	0,051489749	0,035949317	0,004253822	64,49%	7,63%
69,01	90,22	0,060809148	0,099726147	0,056223205	0,038917	0,004585943	64,00%	7,54%
73,96	90,23	0,065805266	0,108239961	0,061036753	0,042434695	0,004768513	64,49%	7,25%
79,01	90,25	0,070846632	0,117753326	0,066140235	0,046906694	0,004706397	66,21%	6,64%
83,96	90,27	0,075956054	0,128085235	0,071343032	0,052129181	0,004613021	68,63%	6,07%
89,01	90,28	0,081186161	0,139967731	0,076871004	0,05878157	0,004315157	72,40%	5,32%
94,06	90,29	0,086445013	0,153836517	0,08264566	0,067391503	0,003799354	77,96%	4,40%
104,91	90,30	0,098082234	0,199763053	0,095995447	0,101680819	0,002086787	103,67%	2,13%
114,66	90,31	0,108325647	0,233060633	0,10935004	0,124734986	0,001024393	115,15%	0,95%
124,41	90,32	0,118607586	0,2508171	0,12444584	0,132209514	0,005838254	111,47%	4,92%
134,11	90,34	0,128633487	0,266334185	0,142090178	0,137700698	0,01345669	107,05%	10,46%

**Πίνακας Η.41:** Μετρηθείσα πυκνότητα, πυκνότητα προσομοιωτή και αποκλίσεις για το μείγμα Μεθάνιο 58,17% - Βουτάνιο 41,83% - CO<sub>2</sub> 0% στους 90°C σε διαφορετικές πιέσεις

Component	HC	Pc (atm)	Tc (K)	Acentric fact.	Mol. weight	Vol. Shift	V Shift Coef1 (1/deg F)
CH4	1	45.4	190.6	0.008	16.043	0	0
NC4	1	37.5	425.2	0.193	58.124	0	0

Component	HC	Pc (atm)	Tc (K)	Acentric fact.	Mol. weight	Vol. Shift	V Shift Coef1 (1/deg F)
CH4	1	36.319886	202.72637	0.008	16.043	-0.11583026	0.002089318
NC4	1	32.800787	510.23	0.193	58.124	-0.11225379	-0.0020247796

**Πίνακας Η.42:** Τιμές παραμέτρων του προσομοιωτή πριν το regression (άνω) και μετά το regression (κάτω) για το μείγμα Μεθάνιο 58,17% - Βουτάνιο 41,83% - CO<sub>2</sub> 0% στους 90°C

Πίεση (bar)	Θερμοκρασία (°C)	Πυκνότητα μετρηθείσα (g/ml)	Πυκνότητα προσομοιωτή (g/ml)		Απόλυτη απόκλιση (g/ml)		Απόκλιση (%)	
			Πριν regression	Μετά regression	Πριν regression	Μετά regression	Πριν regression	Μετά regression
9,66	33,93	0,01798291	0,01521754	0,015135846	0,002765368	0,002847062	15,38%	15,83%
14,56	33,58	0,02392316	0,023646456	0,021746666	0,000276703	0,002176493	1,16%	9,10%
20,46	33,45	0,02781185	0,032338074	0,029991369	0,004526222	0,002179518	16,27%	7,84%
25,26	32,77	0,03486140	0,039698558	0,036927364	0,004837161	0,002065967	13,88%	5,93%
30,16	32,61	0,04256187	0,04756042	0,044247801	0,004998549	0,001685931	11,74%	3,96%
35,61	31,75	0,05155598	0,056700555	0,052708754	0,005144579	0,001152777	9,98%	2,24%
39,86	31,72	0,05882617	0,064168362	0,059518203	0,005342195	0,000692035	9,08%	1,18%
44,96	31,68	0,06776180	0,073534358	0,067964738	0,005772558	0,000202939	8,52%	0,30%
49,81	31,65	0,07628433	0,082889141	0,076297543	0,006604807	1,3209E-05	8,66%	0,02%
54,81	31,61	0,08549335	0,093043245	0,085216623	0,007549893	0,000276729	8,83%	0,32%
59,76	31,58	0,09498010	0,103668291	0,094400008	0,008688196	0,000580087	9,15%	0,61%
64,76	31,54	0,10520756	0,115063826	0,104070355	0,009856265	0,001137206	9,37%	1,08%
69,71	31,50	0,11609803	0,127109711	0,114067478	0,011011678	0,002030555	9,48%	1,75%
74,71	31,48	0,12780392	0,140195193	0,124633256	0,012391276	0,003170661	9,70%	2,48%
79,66	31,45	0,14027965	0,154267413	0,135613913	0,013987763	0,004665738	9,97%	3,33%
84,71	31,43	0,15418300	0,17008084	0,147414715	0,015897842	0,006768283	10,31%	4,39%
89,66	31,40	0,16885806	0,187486503	0,159646413	0,018628439	0,00921165	11,03%	5,46%
93,96	30,51	0,18442163	0,204887359	0,171325475	0,020465731	0,013096154	11,10%	7,10%
105,36	30,50	0,21679311	0,43761641	0,20473198	0,220823301	0,012061128	101,86%	5,56%
115,06	30,48	0,24981880	0,454006502	0,238998677	0,204187702	0,010820123	81,73%	4,33%
124,61	30,43	0,27754191	0,468027463	0,282863637	0,190485551	0,005321725	68,63%	1,92%
128,06	30,41	0,28570970	0,472658401	0,304054463	0,186948697	0,018344759	65,43%	6,42%

**Πίνακας Η.43:** Μετρηθείσα πυκνότητα, πυκνότητα προσομοιωτή και αποκλίσεις για το μείγμα Μεθάνιο 36,30% - Βουτάνιο 26,10% - CO<sub>2</sub> 37,60% στους 32°C σε διαφορετικές πιέσεις

Component	HC	Pc (atm)	Tc (K)	Acentric fact.	Mol. weight	Vol. Shift	V Shift Coef1 (1/deg F)
CH4	1	45.4	190.6	0.008	16.043	0	0
NC4	1	37.5	425.2	0.193	58.124	0	0
CO2	3	72.8	304.2	0.225	44.01	0	0

Component	HC	Pc (atm)	Tc (K)	Acentric fact.	Mol. weight	Vol. Shift	V Shift Coef1 (1/deg F)
CH4	1	53.497346	200.2564	0.008	16.043	-0.13056516	0
NC4	1	30	433.21771	0.193	58.124	0.15703882	0.0021810948
CO2	3	72.8	243.36	0.225	44.01	0.25	0.0031965388

**Πίνακας Η.44:** Τιμές παραμέτρων του προσομοιωτή πριν το regression (άνω) και μετά το regression (κάτω) για το μείγμα Μεθάνιο 36,30% - Βουτάνιο 26,10% - CO<sub>2</sub> 37,60% στους 32°C

Πίεση (bar)	Θερμοκρασία (°C)	Πυκνότητα μετρηθείσα (g/ml)	Πυκνότητα προσομοιωτή (g/ml)		Απόλυτη απόκλιση (g/ml)		Απόκλιση (%)	
			Πριν regression	Μετά regression	Πριν regression	Μετά regression	Πριν regression	Μετά regression
9,61	50,64	0,01283925	0,014197164	0,012507216	0,001357914	0,000332034	10,58%	2,59%
13,61	50,64	0,01810672	0,020626975	0,017485755	0,002520253	0,000620968	13,92%	3,43%
19,41	50,64	0,02406873	0,030588858	0,02495997	0,006520123	0,000891235	27,09%	3,70%
23,66	50,65	0,02966615	0,038433099	0,030632108	0,008766945	0,000965954	29,55%	3,26%
30,11	50,65	0,03869302	0,048816267	0,039568808	0,010123248	0,000875789	26,16%	2,26%
34,06	50,65	0,04432010	0,055255689	0,045240946	0,010935586	0,000920842	24,67%	2,08%
39,46	50,65	0,05241275	0,064437473	0,053242169	0,012024726	0,000829422	22,94%	1,58%
44,21	50,65	0,05978353	0,072912842	0,060524162	0,013129309	0,00074063	21,96%	1,24%
48,96	50,67	0,06720926	0,081799885	0,068025608	0,014590622	0,000816345	21,71%	1,21%
54,06	50,67	0,07565879	0,091854675	0,076342395	0,016195882	0,000683602	21,41%	0,90%
63,21	50,67	0,09176409	0,111466079	0,091926758	0,019701992	0,00016267	21,47%	0,18%
63,76	50,67	0,09268198	0,112717121	0,092889467	0,020035137	0,000207483	21,62%	0,22%
69,46	50,67	0,10323074	0,126281556	0,103062793	0,023050819	0,000167944	22,33%	0,16%
74,06	50,67	0,11194734	0,138104784	0,111510931	0,026157448	0,000436405	23,37%	0,39%
79,11	50,68	0,12182311	0,152202633	0,121029102	0,030379523	0,000794009	24,94%	0,65%
83,96	50,69	0,13172069	0,16712223	0,130404708	0,035401536	0,001315985	26,88%	1,00%
88,51	50,73	0,14117186	0,182741834	0,139387863	0,041569969	0,001784002	29,45%	1,26%
93,66	50,73	0,15222420	0,203094893	0,149831901	0,050870696	0,002392297	33,42%	1,57%
104,61	50,73	0,17645005	0,268847482	0,172879266	0,092397437	0,003570779	52,36%	2,02%
114,31	50,73	0,19817636	0,361834662	0,194236683	0,163658303	0,003939675	82,58%	1,99%
124,26	50,73	0,22000510	0,384081104	0,217032558	0,164076006	0,002972539	74,58%	1,35%
134,06	50,73	0,24086996	0,402632086	0,240349034	0,16176213	0,000520923	67,16%	0,22%
143,91	50,73	0,26119426	0,418802725	0,26462982	0,157608465	0,003435561	60,34%	1,32%
150,36	50,73	0,27390755	0,428333711	0,280991079	0,154426166	0,007083534	56,38%	2,59%

**Πίνακας Η.45:** Μετρηθείσα πυκνότητα, πυκνότητα προσομοιωτή και αποκλίσεις για το μείγμα Μεθάνιο 36,30% - Βουτάνιο 26,10% - CO<sub>2</sub> 37,60% στους 50°C σε διαφορετικές πιέσεις

Component	HC	Pc (atm)	Tc (K)	Acentric fact.	Mol. weight	Vol. Shift	V Shift Coef1 (1/deg F)
CH4	1	45.4	190.6	0.008	16.043	0	0
NC4	1	37.5	425.2	0.193	58.124	0	0
CO2	3	72.8	304.2	0.225	44.01	0	0

Component	HC	Pc (atm)	Tc (K)	Acentric fact.	Mol. weight	Vol. Shift	V Shift Coef1 (1/deg F)
CH4	1	65.376	297.64912	0.008	16.043	-0.16224335	-0.0029264674
NC4	1	41.046647	510.23	0.193	58.124	-0.25403671	-0.0027781792
CO2	3	69.888	216.90209	0.225	44.01	-0.13099868	0.0028445808

**Πίνακας Η.46:** Τιμές παραμέτρων του προσομοιωτή πριν το regression (άνω) και μετά το regression (κάτω) για το μείγμα Μεθάνιο 36,30% - Βουτάνιο 26,10% - CO<sub>2</sub> 37,60% στους 50°C

Πίεση (bar)	Θερμοκρασία (°C)	Πυκνότητα μετρηθείσα (g/ml)	Πυκνότητα προσομοιωτή (g/ml)		Απόλυτη απόκλιση (g/ml)		Απόκλιση (%)	
			Πριν regression	Μετά regression	Πριν regression	Μετά regression	Πριν regression	Μετά regression
13,71	90,27	0,01492437	0,018023975	0,017067673	0,0030996	0,002143298	20,77%	14,36%
18,71	90,23	0,02046532	0,025132969	0,023308466	0,004667649	0,002843146	22,81%	13,89%
24,11	90,35	0,02578697	0,033143803	0,030045832	0,00735683	0,00425886	28,53%	16,52%
28,16	90,38	0,03045166	0,039410225	0,035106064	0,008958564	0,004654402	29,42%	15,28%
34,76	90,38	0,03822534	0,050123374	0,043368388	0,011898031	0,005143045	31,13%	13,45%
38,66	90,39	0,04290036	0,056758221	0,048254019	0,013857861	0,005353658	32,30%	12,48%
44,11	90,39	0,04952368	0,066430169	0,055090699	0,01690649	0,00556702	34,14%	11,24%
48,81	90,40	0,05541200	0,075157028	0,060991901	0,019745033	0,005579906	35,63%	10,07%
53,81	90,40	0,06176671	0,084854606	0,067275944	0,023087896	0,005509234	37,38%	8,92%
58,66	90,41	0,06808512	0,094665915	0,073375775	0,02658079	0,005290651	39,04%	7,77%
63,61	90,41	0,07467490	0,105105147	0,079610161	0,030430247	0,004935261	40,75%	6,61%
68,56	90,42	0,08138811	0,115952851	0,085847751	0,034564746	0,004459645	42,47%	5,48%
73,56	90,42	0,08814901	0,127321154	0,09215422	0,039172149	0,004005214	44,44%	4,54%
78,51	90,43	0,09509714	0,13893454	0,098403022	0,043837395	0,003305877	46,10%	3,48%
83,46	90,43	0,10209411	0,150871499	0,104658232	0,048777391	0,002564125	47,78%	2,51%
88,41	90,44	0,10921495	0,163042328	0,110913442	0,053827377	0,001698492	49,29%	1,56%
93,41	90,45	0,11640255	0,175506294	0,117237532	0,059103746	0,000834984	50,78%	0,72%
104,56	90,46	0,13308863	0,203474531	0,131359409	0,070385897	0,001729225	52,89%	1,30%
114,21	90,46	0,14763193	0,227213894	0,143600719	0,079581967	0,004031208	53,91%	2,73%
124,01	90,47	0,16275027	0,250226018	0,156042259	0,087475748	0,006708012	53,75%	4,12%
133,56	90,47	0,17728037	0,271282288	0,168182653	0,094001918	0,009097718	53,02%	5,13%
143,56	90,49	0,19237379	0,291664181	0,180898109	0,099290395	0,011475678	51,61%	5,97%
153,46	90,49	0,20735843	0,3102472	0,193504639	0,102888767	0,013853794	49,62%	6,68%
163,36	90,50	0,22192245	0,327278031	0,206114374	0,105355577	0,01580808	47,47%	7,12%
173,16	90,52	0,23585061	0,342745459	0,21859596	0,106894853	0,017254645	45,32%	7,32%
183,21	90,52	0,24982321	0,357405557	0,231415537	0,107582346	0,018407674	43,06%	7,37%

**Πίνακας Η.47:** Μετρηθείσα πυκνότητα, πυκνότητα προσομοιωτή και αποκλίσεις για το μείγμα Μεθάνιο 36,30% - Βουτάνιο 26,10% - CO<sub>2</sub> 37,60% στους 90°C σε διαφορετικές πιέσεις

Component	HC	Pc (atm)	Tc (K)	Acentric fact.	Mol. weight	Vol. Shift	V Shift Coef1 (1/deg F)
CH4	1	45.4	190.6	0.008	16.043	0	0
NC4	1	37.5	425.2	0.193	58.124	0	0
CO2	3	72.8	304.2	0.225	44.01	0	0

Component	HC	Pc (atm)	Tc (K)	Acentric fact.	Mol. weight	Vol. Shift	V Shift Coef1 (1/deg F)
CH4	1	94.141	152.47	0.008	16.043	-0.13101	0.0047999776
NC4	1	77.76	151.55	0.193	58.124	-0.35705	0.0031562917
CO2	3	150.94	124.59	0.225	44.01	-0.031	0.0093746535

**Πίνακας Η.48:** Τιμές παραμέτρων του προσομοιωτή πριν το regression (άνω) και μετά το regression (κάτω) για το μείγμα Μεθάνιο 36,30% - Βουτάνιο 26,10% - CO<sub>2</sub> 37,60% στους 90°C

Πίεση (bar)	Θερμοκρασία (°C)	Πυκνότητα μετρηθείσα (g/ml)	Πυκνότητα προσομοιωτή (g/ml)		Απόλυτη απόκλιση (g/ml)		Απόκλιση (%)	
			Πριν regression	Μετά regression	Πριν regression	Μετά regression	Πριν regression	Μετά regression
19,31	30,15	0,03138709	0,032541508	0,031799853	0,001154418	0,000412763	3,68%	1,32%
25,06	30,09	0,04171655	0,043807294	0,042448928	0,002090745	0,00073238	5,01%	1,76%
29,86	30,06	0,05084576	0,053918148	0,051837349	0,00307239	0,000991591	6,04%	1,95%
34,76	30,03	0,06094833	0,065014137	0,061954611	0,004065809	0,001006282	6,67%	1,65%
39,66	30,00	0,07147065	0,077018374	0,072674166	0,005547724	0,001203517	7,76%	1,68%
45,61	29,97	0,08532114	0,093054457	0,086613433	0,007733318	0,001292294	9,06%	1,51%
49,16	29,67	0,09444612	0,1034152	0,095686291	0,008969082	0,001240174	9,50%	1,31%
54,36	29,65	0,10834485	0,119038007	0,109579104	0,010693155	0,001234253	9,87%	1,14%
59,16	29,64	0,12243007	0,134989193	0,123435075	0,012559125	0,001005007	10,26%	0,82%
64,01	29,63	0,13803693	0,152960307	0,138620578	0,014923376	0,000583648	10,81%	0,42%
69,01	29,62	0,15565719	0,174000558	0,155731501	0,018343367	7,431E-05	11,78%	0,05%
73,91	29,60	0,17463123	0,198041068	0,174242437	0,023409841	0,00038879	13,41%	0,22%
78,91	29,60	0,19623053	0,227915502	0,195128912	0,031684976	0,001101615	16,15%	0,56%
83,76	29,58	0,21970833	0,26692847	0,217742176	0,047220145	0,001966149	21,49%	0,89%
88,66	29,56	0,24574526	0,309092269	0,243070571	0,063347007	0,002674691	25,78%	1,09%
93,81	29,55	0,27425447	0,343503132	0,272208155	0,069248661	0,002046316	25,25%	0,75%
104,36	29,54	0,33571566	0,400543279	0,335184744	0,064827621	0,000530913	19,31%	0,16%
114,01	29,52	0,38551067	0,439452126	0,386592799	0,05394146	0,001082132	13,99%	0,28%
123,91	29,52	0,42654197	0,470678519	0,428130276	0,044136552	0,001588309	10,35%	0,37%
133,96	29,51	0,46022387	0,496647651	0,461169959	0,036423784	0,000946091	7,91%	0,21%
144,06	29,50	0,48702497	0,518677844	0,487890357	0,031652878	0,000865392	6,50%	0,18%
154,11	29,49	0,50924930	0,537664529	0,510000642	0,028415231	0,000751344	5,58%	0,15%
164,16	29,47	0,52801515	0,554459888	0,528932864	0,026444741	0,000917717	5,01%	0,17%

**Πίνακας Η.49:** Μετρηθείσα πυκνότητα, πυκνότητα προσομοιωτή και αποκλίσεις για το μείγμα Μεθάνιο 25,60% - Βουτάνιο 9,30% - CO<sub>2</sub> 65% στους 30°C σε διαφορετικές πιέσεις

Component	HC	Pc (atm)	Tc (K)	Acentric fact.	Mol. weight	Vol. Shift	V Shift Coef1 (1/deg F)
CH <sub>4</sub>	1	45.4	190.6	0.008	16.043	0	0
NC <sub>4</sub>	1	37.5	425.2	0.193	58.124	0	0
CO <sub>2</sub>	3	72.8	304.2	0.225	44.01	0	0

Component	HC	Pc (atm)	Tc (K)	Acentric fact.	Mol. weight	Vol. Shift	V Shift Coef1 (1/deg F)
CH <sub>4</sub>	1	54.477537	152.47	0.008	16.043	-0.23100471	-0.0041667516
NC <sub>4</sub>	1	45	313.48	0.193	58.124	-0.2506602	-0.004521288
CO <sub>2</sub>	3	75.191308	326.1602	0.225	44.01	-0.15400321	-0.0027778357

**Πίνακας Η.50:** Τιμές παραμέτρων του προσομοιωτή πριν το regression (άνω) και μετά το regression (κάτω) για το μείγμα Μεθάνιο 25,60% - Βουτάνιο 9,30% - CO<sub>2</sub> 65% στους 30°C

Πίεση (bar)	Θερμοκρασία (°C)	Πυκνότητα μετρηθείσα (g/ml)	Πυκνότητα προσομοιωτή (g/ml)		Απόλυτη απόκλιση (g/ml)		Απόκλιση (%)	
			Πριν regression	Μετά regression	Πριν regression	Μετά regression	Πριν regression	Μετά regression
24,51	50,65	0,03682900	0,038788709	0,037697852	0,001959714	0,000868856	5,32%	2,36%
29,46	50,65	0,04519311	0,047776669	0,046126767	0,002583557	0,000933655	5,72%	2,07%
34,26	50,65	0,05351381	0,056942434	0,054606942	0,003428619	0,001093127	6,41%	2,04%
39,36	50,66	0,06277992	0,067207065	0,063969733	0,004427143	0,001189811	7,05%	1,90%
44,41	50,66	0,07232049	0,077963463	0,073630469	0,00564297	0,001309976	7,80%	1,81%
50,16	50,66	0,08387271	0,090992881	0,085136531	0,007120172	0,001263822	8,49%	1,51%
54,41	50,66	0,09286297	0,101212661	0,094018769	0,008349692	0,0011558	8,99%	1,24%
59,56	50,67	0,10417007	0,114317366	0,105234897	0,010147295	0,001064826	9,74%	1,02%
64,36	50,67	0,11533251	0,127317951	0,11618672	0,011985441	0,000854211	10,39%	0,74%
69,31	50,67	0,12735256	0,141564772	0,12801155	0,014212214	0,000658992	11,16%	0,52%
74,21	50,67	0,13992077	0,156556452	0,140291304	0,016635685	0,000370537	11,89%	0,26%
79,11	50,67	0,15316231	0,172456379	0,153176556	0,019294064	1,42413E-05	12,60%	0,01%
84,11	50,67	0,16747868	0,189605745	0,166987675	0,022127064	0,000491006	13,21%	0,29%
89,11	50,68	0,18233789	0,207607295	0,181484384	0,025269401	0,000853509	13,86%	0,47%
93,81	50,68	0,19732880	0,225211586	0,195774456	0,027882787	0,001554343	14,13%	0,79%
104,61	50,68	0,23344388	0,26705822	0,230934983	0,033614341	0,002508896	14,40%	1,07%
114,36	50,69	0,26749494	0,304422887	0,264911745	0,036927946	0,002583196	13,81%	0,97%
124,06	50,69	0,30196573	0,339248628	0,299657394	0,037282899	0,002308335	12,35%	0,76%
133,86	50,69	0,33539249	0,370992417	0,333946517	0,035599923	0,001445977	10,61%	0,43%
143,86	50,70	0,36671516	0,399641439	0,366390313	0,032926276	0,00032485	8,98%	0,09%
153,81	50,70	0,39533789	0,424864111	0,395388537	0,02952622	5,06456E-05	7,47%	0,01%
163,81	50,70	0,42027739	0,447362043	0,42108055	0,027084652	0,000803159	6,44%	0,19%
173,86	50,71	0,44233249	0,467518076	0,443685806	0,025185583	0,001353314	5,69%	0,31%
183,71	50,71	0,46175593	0,485380264	0,463292405	0,023624335	0,001536476	5,12%	0,33%
193,81	50,71	0,47874961	0,50202505	0,481156195	0,023275442	0,002406588	4,86%	0,50%
213,81	50,72	0,50803620	0,530939978	0,511216444	0,022903776	0,003180242	4,51%	0,63%

**Πίνακας Η.51:** Μετρηθείσα πυκνότητα, πυκνότητα προσομοιωτή και αποκλίσεις για το μείγμα Μεθάνιο 25,60% - Βουτάνιο 9,30% - CO<sub>2</sub> 65% στους 50°C σε διαφορετικές πιέσεις

Component	HC	Pc (atm)	Tc (K)	Acentric fact.	Mol. weight	Vol. Shift	V Shift Coef1 (1/deg F)
CH4	1	45.4	190.6	0.008	16.043	0	0
NC4	1	37.5	425.2	0.193	58.124	0	0
CO2	3	72.8	304.2	0.225	44.01	0	0

Component	HC	Pc (atm)	Tc (K)	Acentric fact.	Mol. weight	Vol. Shift	V Shift Coef1 (1/deg F)
CH4	1	51.893004	152.47	0.008	16.043	-0.22004534	-0.0039690718
NC4	1	42.000887	313.48	0.193	58.124	-0.23395446	-0.0042199578
CO2	3	87.36	338.54612	0.225	44.01	-0.16605171	-0.0029951606

**Πίνακας Η.52:** Τιμές παραμέτρων του προσομοιωτή πριν το regression (άνω) και μετά το regression (κάτω) για το μείγμα Μεθάνιο 25,60% - Βουτάνιο 9,30% - CO<sub>2</sub> 65% στους 50°C

Πίεση (bar)	Θερμοκρασία (°C)	Πυκνότητα μετρηθείσα (g/ml)	Πυκνότητα προσομοιωτή (g/ml)		Απόλυτη απόκλιση (g/ml)		Απόκλιση (%)	
			Πριν regression	Μετά regression	Πριν regression	Μετά regression	Πριν regression	Μετά regression
27,91	90,18	0,03594711	0,038276118	0,037454371	0,002329006	0,001507259	6,48%	4,19%
34,41	90,18	0,04511101	0,048130677	0,046842792	0,003019671	0,001731786	6,69%	3,84%
38,26	90,19	0,05072550	0,05414561	0,052526143	0,00342011	0,001800644	6,74%	3,55%
43,61	90,20	0,05860943	0,062731506	0,060578625	0,004122077	0,001969196	7,03%	3,36%
48,41	90,21	0,06586111	0,070667053	0,067961535	0,004805946	0,002100428	7,30%	3,19%
53,36	90,23	0,07349606	0,07907995	0,075727286	0,005583893	0,002231229	7,60%	3,04%
58,51	90,24	0,08168933	0,088087132	0,083979998	0,006397799	0,002290665	7,83%	2,80%
64,76	90,27	0,09193230	0,099356121	0,094219	0,007423822	0,0022867	8,08%	2,49%
68,76	90,28	0,09863390	0,106772669	0,100911514	0,008138771	0,002277615	8,25%	2,31%
74,01	90,29	0,10770873	0,116739357	0,109604734	0,00903063	0,001896007	8,38%	1,76%
78,76	90,30	0,11613551	0,125974002	0,117569114	0,009838495	0,001433607	8,47%	1,23%
83,76	90,31	0,12507790	0,135913458	0,126122973	0,010835554	0,001045069	8,66%	0,84%
88,56	90,32	0,13396765	0,145652684	0,134505435	0,011685031	0,000537782	8,72%	0,40%
93,61	90,33	0,14329870	0,156096722	0,143511015	0,012798025	0,000212318	8,93%	0,15%
104,56	90,35	0,16448022	0,179312281	0,163727918	0,014832064	0,000752299	9,02%	0,46%
114,11	90,36	0,18365869	0,200041774	0,182190799	0,016383086	0,001467889	8,92%	0,80%
124,06	90,37	0,20403859	0,221866931	0,202327609	0,017828344	0,001710978	8,74%	0,84%
133,66	90,37	0,22405111	0,242919997	0,222145652	0,018868883	0,001905462	8,42%	0,85%
143,36	90,39	0,24439884	0,263892971	0,241561631	0,019494134	0,002837206	7,98%	1,16%
153,31	90,39	0,26520392	0,284947639	0,261528646	0,019743717	0,003675277	7,44%	1,39%
163,21	90,40	0,28554057	0,30518857	0,281258587	0,019648003	0,004281979	6,88%	1,50%
173,11	90,41	0,30537226	0,324628577	0,300738641	0,019256313	0,004633623	6,31%	1,52%
183,11	90,42	0,32460503	0,343374985	0,320039287	0,018769954	0,004565744	5,78%	1,41%
193,06	90,43	0,34289533	0,361125044	0,338780889	0,018229715	0,00411444	5,32%	1,20%
213,16	90,44	0,37678518	0,394227198	0,374891311	0,017442023	0,001893865	4,63%	0,50%
232,36	90,57	0,40554815	0,422291546	0,406601461	0,016743397	0,001053312	4,13%	0,26%
252,41	90,57	0,43210811	0,449019954	0,437454624	0,016911845	0,005346514	3,91%	1,24%

**Πίνακας Η.53:** Μετρηθείσα πυκνότητα, πυκνότητα προσομοιωτή και αποκλίσεις για το μείγμα Μεθάνιο 25,60% - Βουτάνιο 9,30% - CO<sub>2</sub> 65% στους 90°C σε διαφορετικές πιέσεις

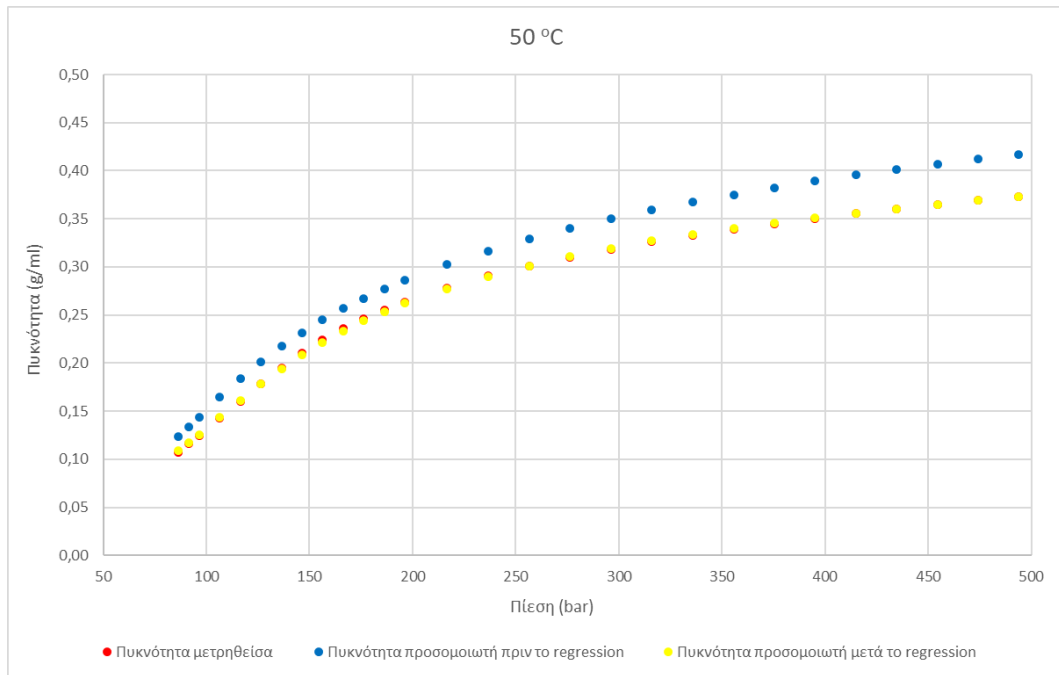
Component	HC	Pc (atm)	Tc (K)	Acentric fact.	Mol. weight	Vol. Shift	V Shift Coef1 (1/deg F)
CH4	1	45.4	190.6	0.008	16.043	0	0
NC4	1	37.5	425.2	0.193	58.124	0	0
CO2	3	72.8	304.2	0.225	44.01	0	0

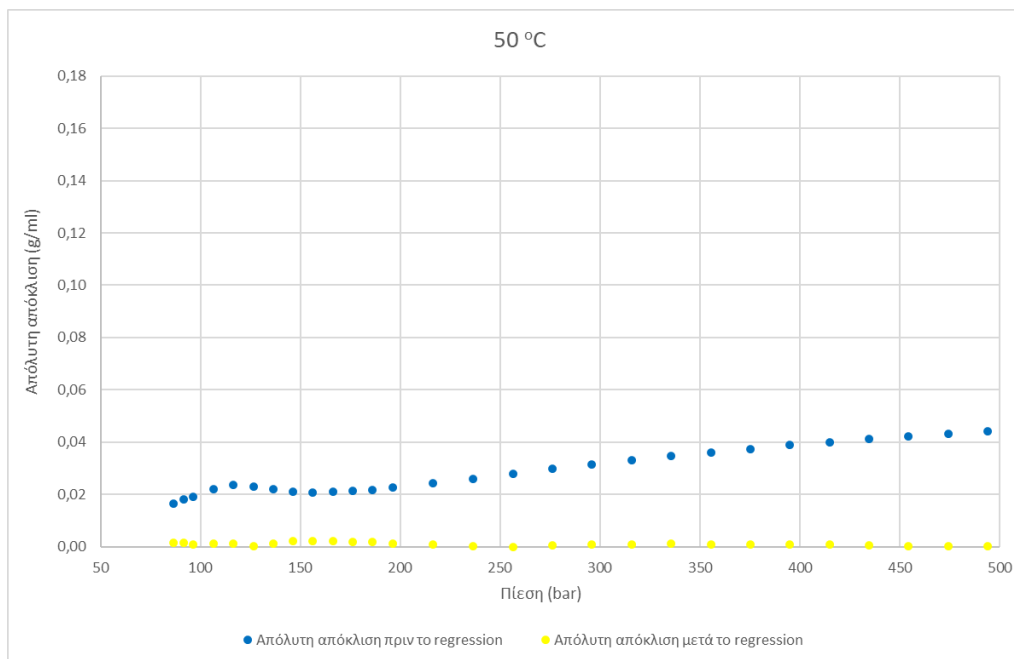
Component	HC	Pc (atm)	Tc (K)	Acentric fact.	Mol. weight	Vol. Shift	V Shift Coef1 (1/deg F)
CH4	1	54.48	152.47	0.008	16.043	-0.26197614	-0.0040351132
NC4	1	45	510.23	0.193	58.124	-0.154	-0.0027771252
CO2	3	87.36	294.43496	0.225	44.01	-0.19092896	0.0034438845

**Πίνακας Η.54:** Τιμές παραμέτρων του προσομοιωτή πριν το regression (άνω) και μετά το regression (κάτω) για το μείγμα Μεθάνιο 25,60% - Βουτάνιο 9,30% - CO<sub>2</sub> 65% στους 90°C

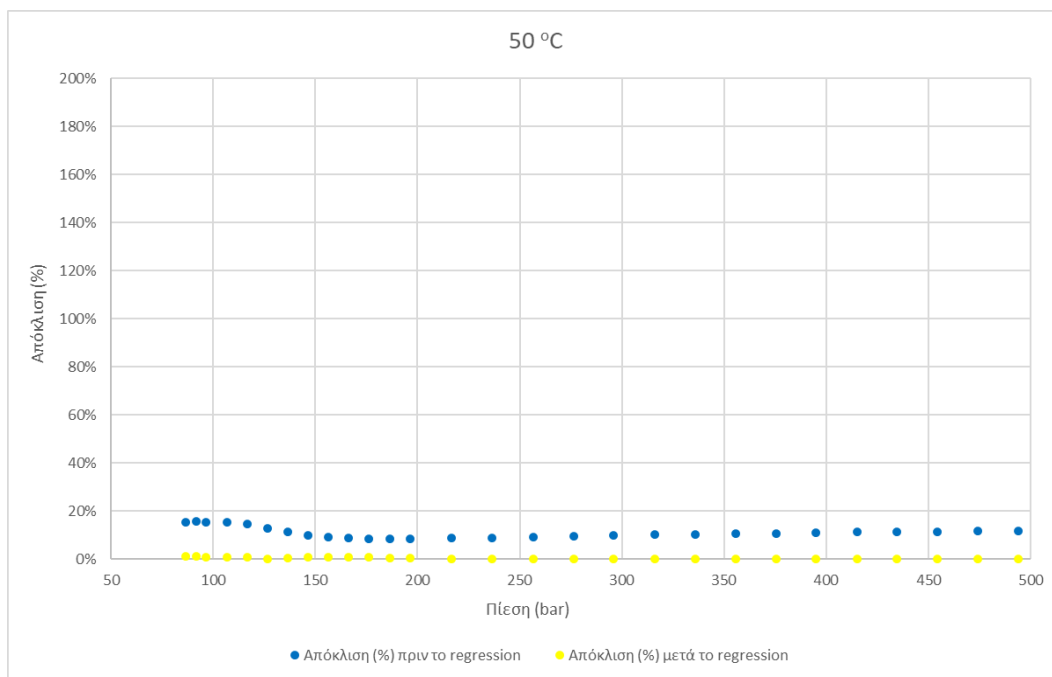
## Παράρτημα Θ



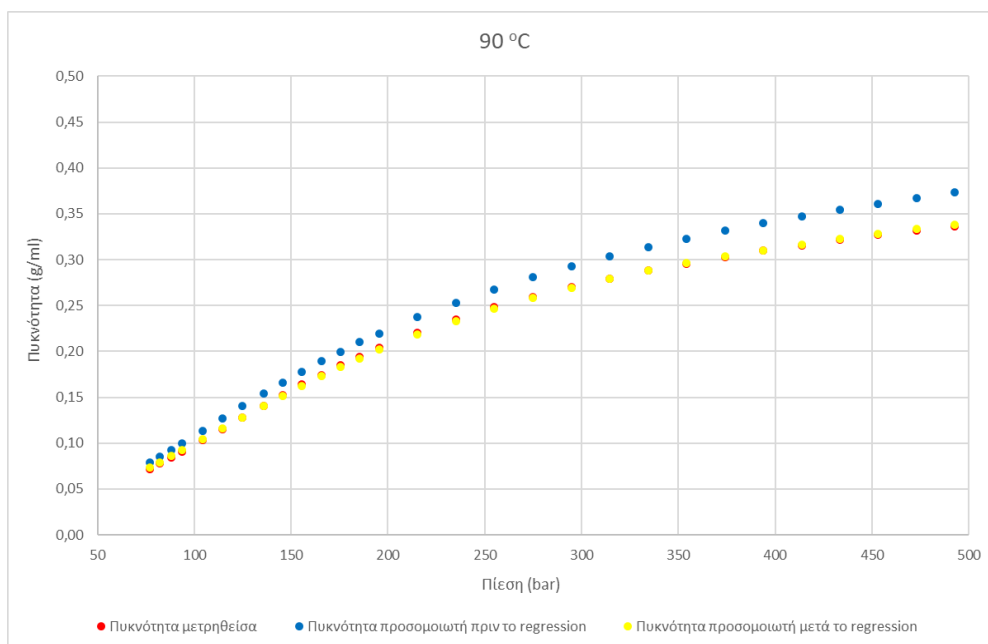
**Σχήμα Θ.1:** Διάγραμμα πυκνοτήτων για το μείγμα Μεθάνιο 39,33% - Αιθάνιο 60,67% - CO<sub>2</sub> 0% στους 50°C



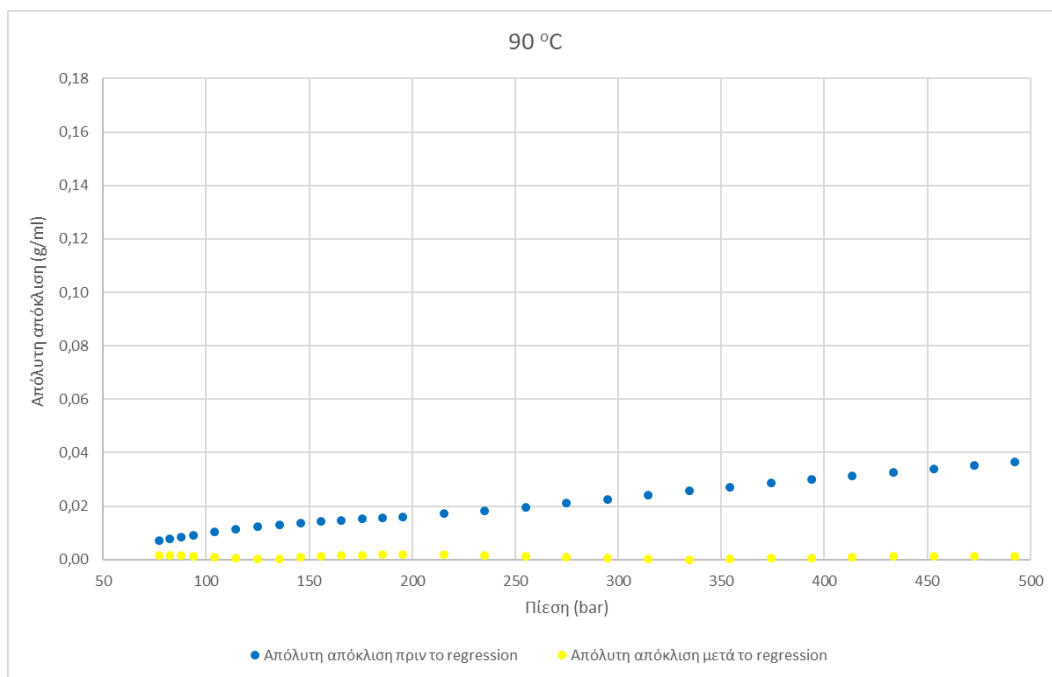
**Σχήμα Θ.2:** Διάγραμμα απόλυτης απόκλισης πυκνοτήτων προσομοιωτή με τις πειραματικές πυκνότητες, για το μείγμα Μεθάνιο 39,33% - Αιθάνιο 60,67% - CO<sub>2</sub> 0% στους 50°C



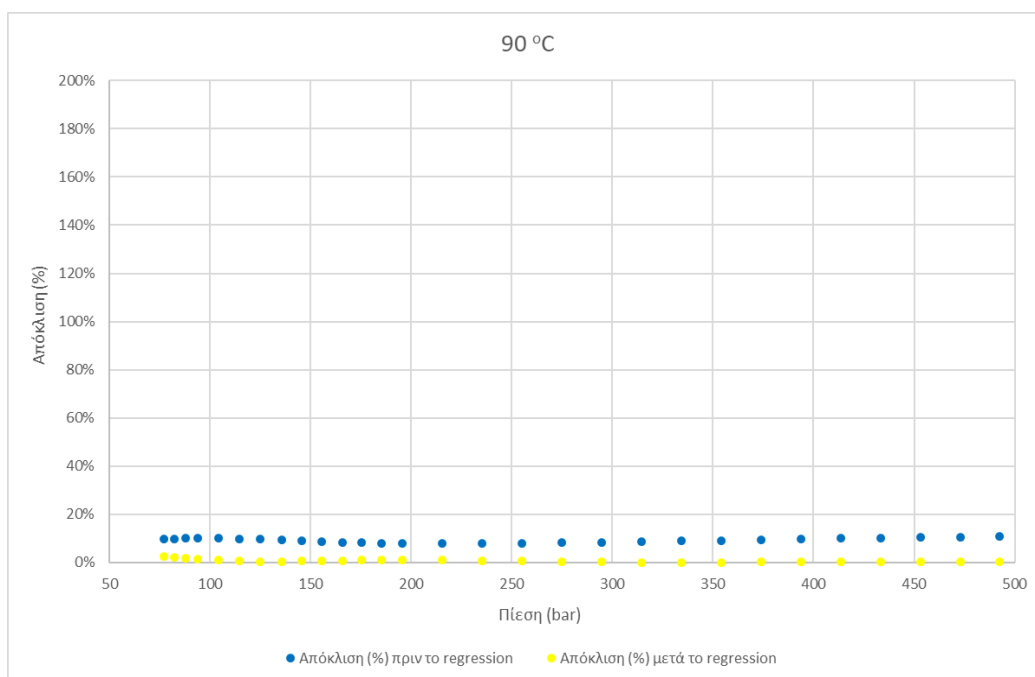
**Σχήμα Θ.3:** Διάγραμμα απόκλισης % πυκνοτήτων προσομοιωτή με τις πειραματικές πυκνότητες, για το μείγμα Μεθάνιο 39,33% - Αιθάνιο 60,67% - CO<sub>2</sub> 0% στους 50°C



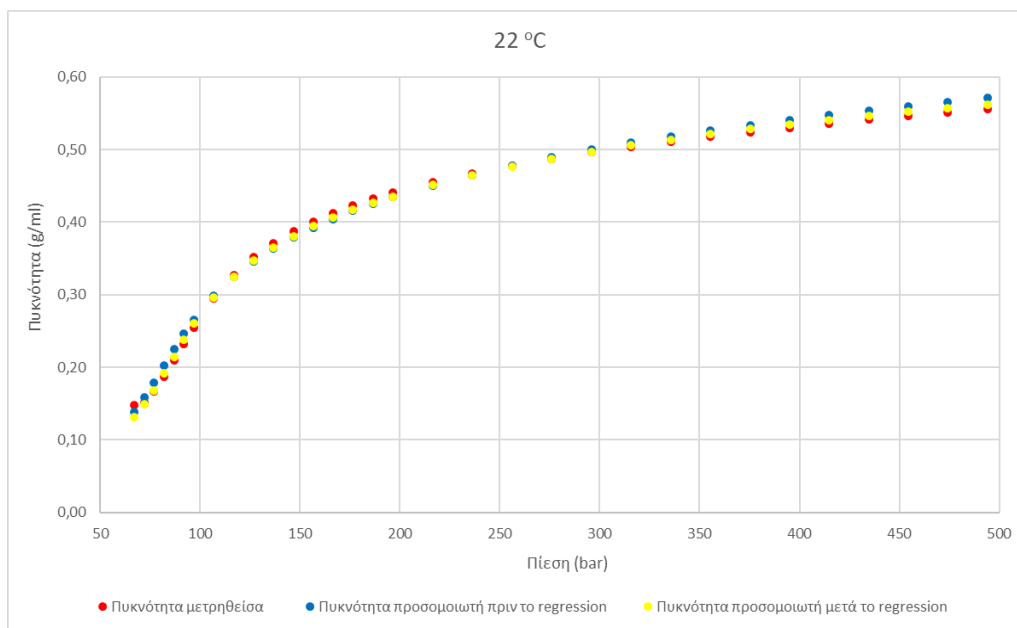
**Σχήμα Θ.4:** Διάγραμμα πυκνοτήτων για το μείγμα Μεθάνιο 39,33% - Αιθάνιο 60,67% - CO<sub>2</sub> 0% στους 90°C



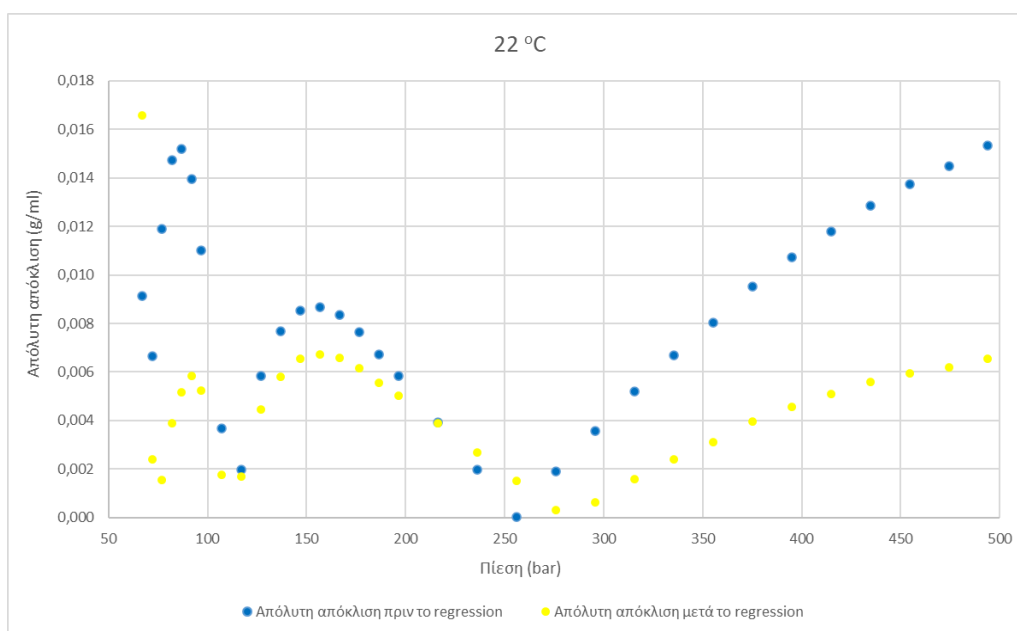
**Σχήμα Θ.5:** Διάγραμμα απόλυτης απόκλισης πυκνοτήτων προσομοιωτή με τις πειραματικές πυκνότητες, για το μείγμα Μεθάνιο 39,33% - Αιθάνιο 60,67% - CO<sub>2</sub> 0% στους 90°C



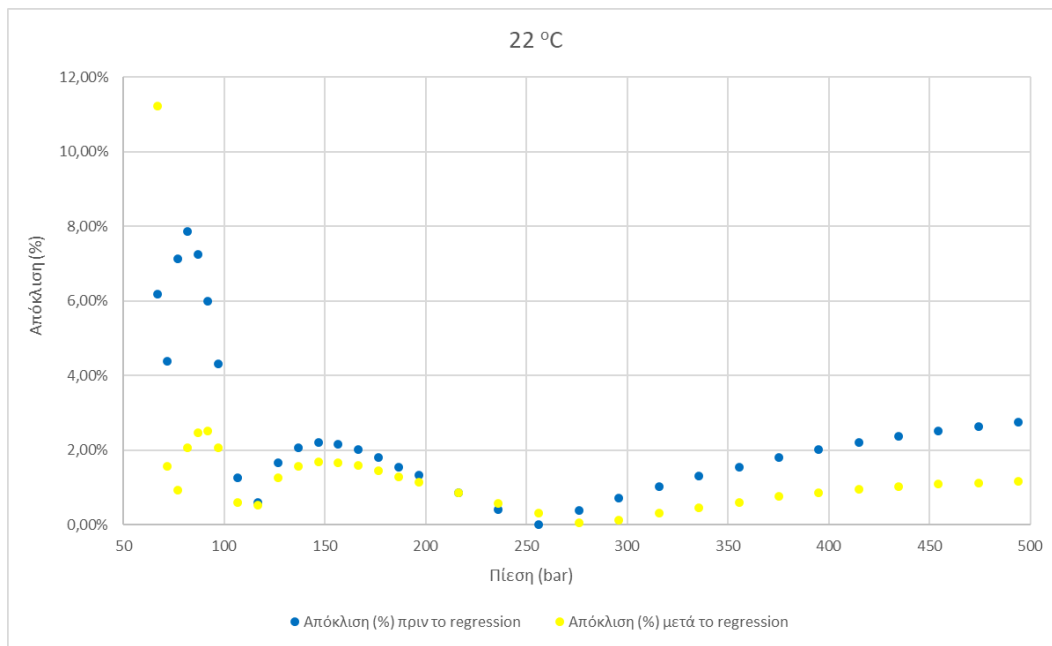
**Σχήμα Θ.6:** Διάγραμμα απόκλισης % πυκνοτήτων προσομοιωτή με τις πειραματικές πυκνότητες, για το μείγμα Μεθάνιο 39,33% - Αιθάνιο 60,67% - CO<sub>2</sub> 0% στους 90°C



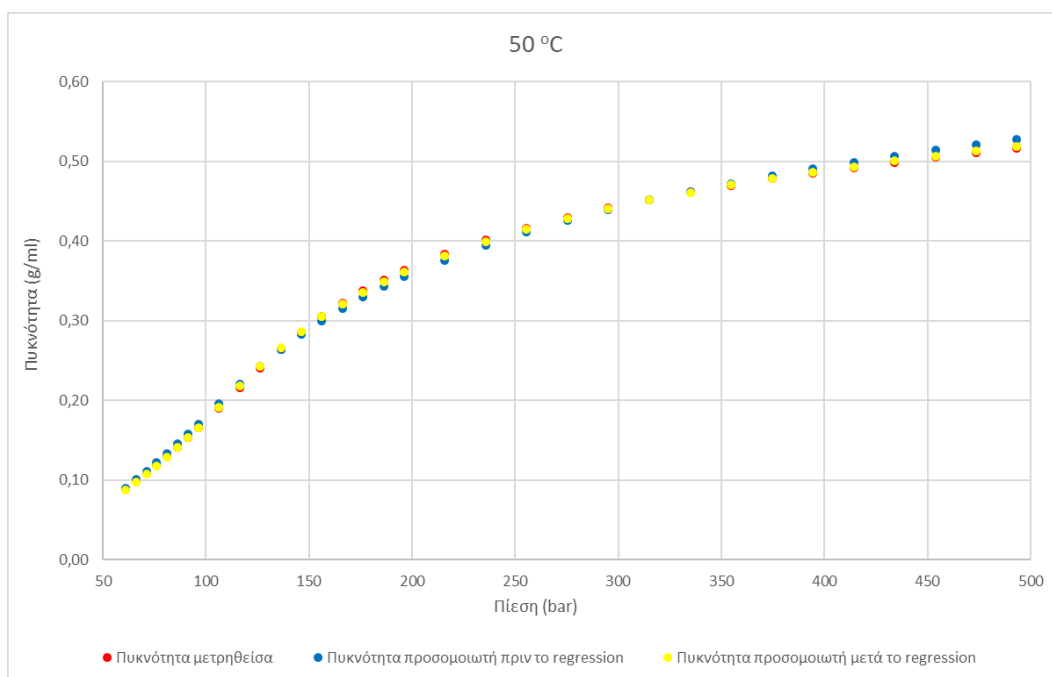
**Σχήμα Θ.7:** Διάγραμμα πυκνοτήτων για το μείγμα Μεθάνιο 28,30% - Αιθάνιο 45,80% - CO<sub>2</sub> 25,90% στους 22°C



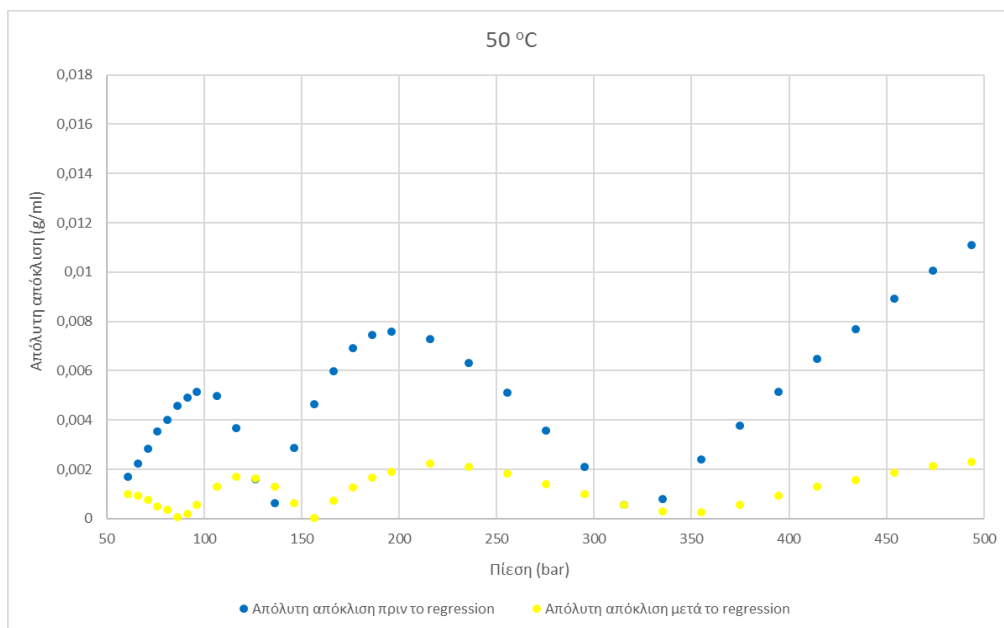
**Σχήμα Θ.8:** Διάγραμμα απόλυτης απόκλισης πυκνοτήτων προσομοιωτή με τις πειραματικές πυκνότητες, για το μείγμα Μεθάνιο 28,30% - Αιθάνιο 45,80% - CO<sub>2</sub> 25,90% στους 22°C



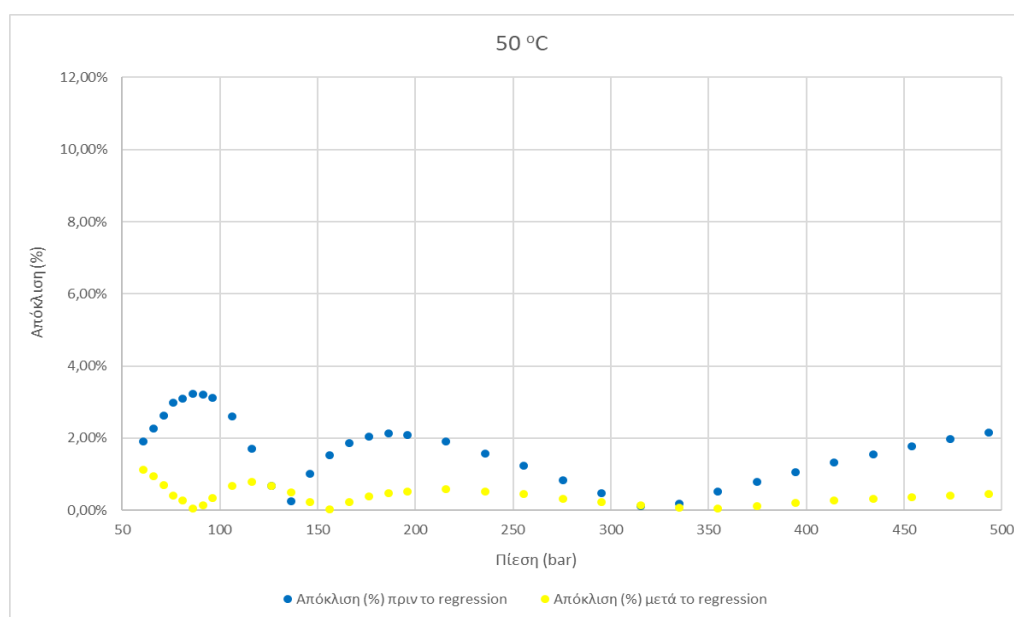
**Σχήμα Θ.9:** Διάγραμμα απόκλισης % πυκνοτήτων προσομοιωτή με τις πειραματικές πυκνότητες, για το μείγμα Μεθάνιο 28,30% - Αιθάνιο 45,80% - CO<sub>2</sub> 25,90% στους 22°C



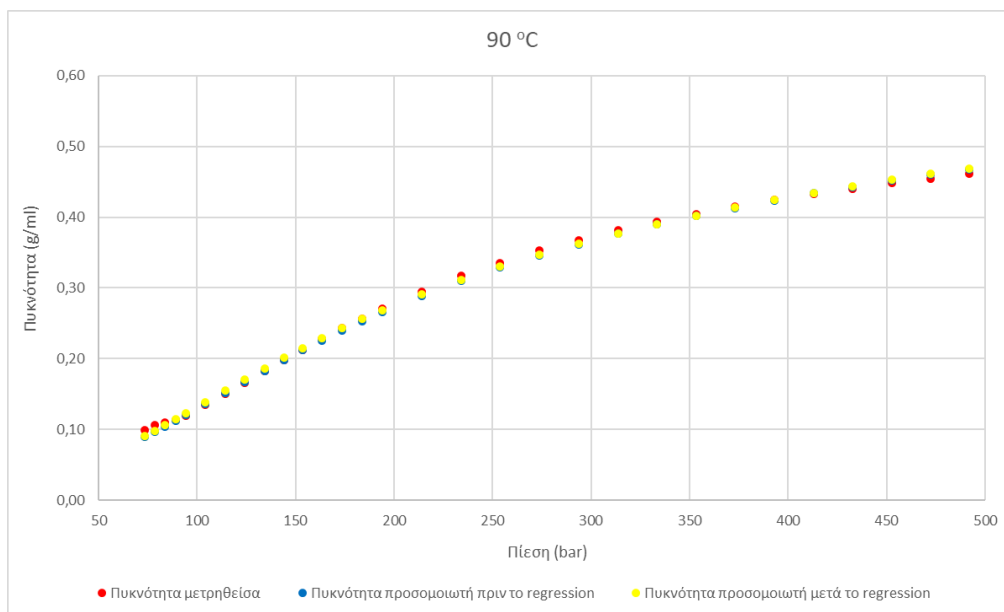
**Σχήμα Θ.10:** Διάγραμμα πυκνοτήτων για το μείγμα Μεθάνιο 28,30% - Αιθάνιο 45,80% - CO<sub>2</sub> 25,90% στους 50°C



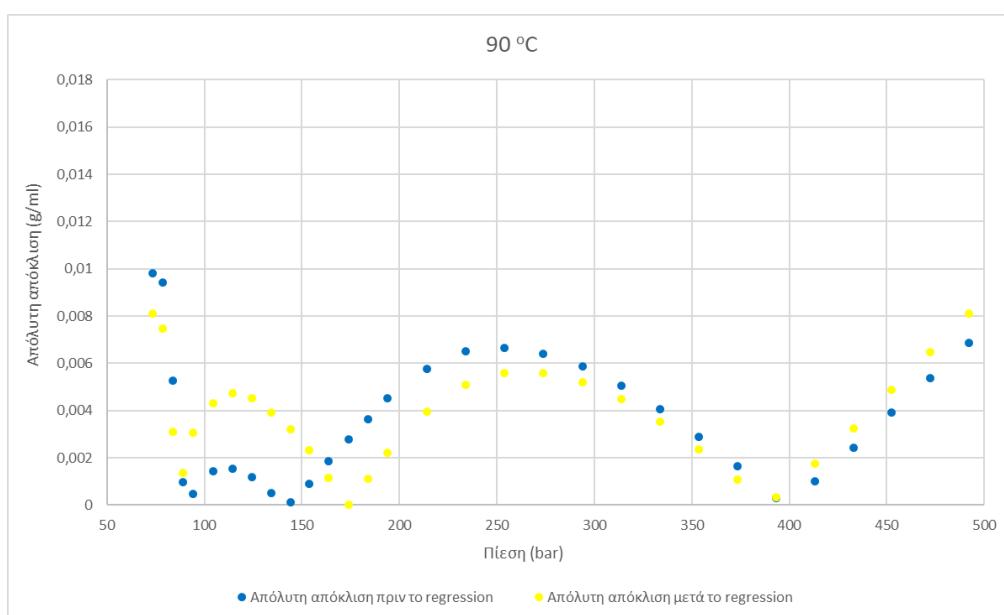
**Σχήμα Θ.11:** Διάγραμμα απόλυτης απόκλισης πυκνοτήτων προσομοιωτή με τις πειραματικές πυκνότητες, για το μείγμα Μεθάνιο 28,30% - Αιθάνιο 45,80% - CO<sub>2</sub> 25,90% στους 50°C



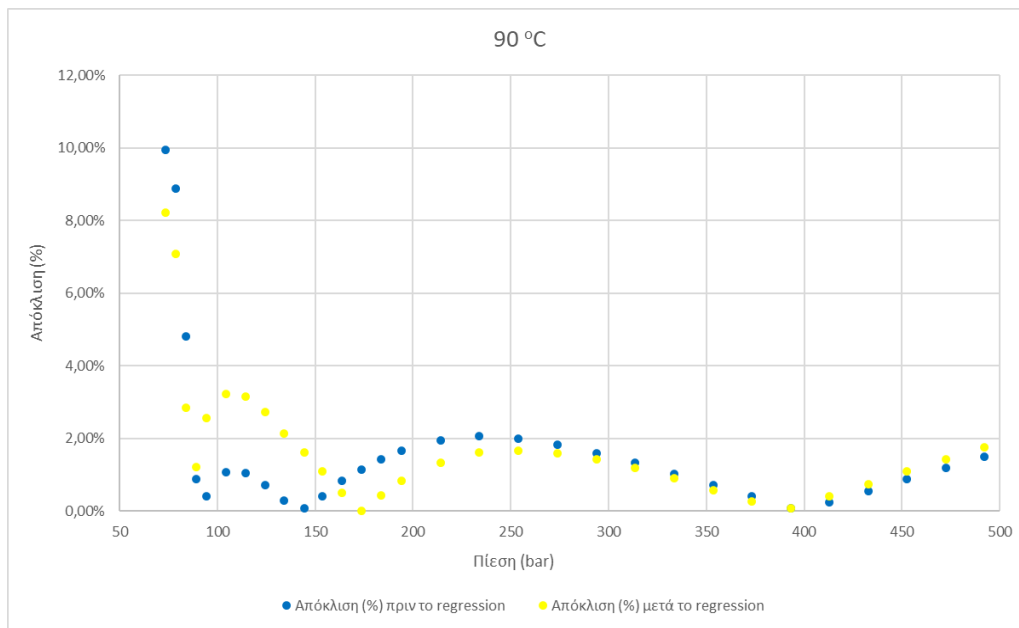
**Σχήμα Θ.12:** Διάγραμμα απόκλισης % πυκνοτήτων προσομοιωτή με τις πειραματικές πυκνότητες, για το μείγμα Μεθάνιο 28,30% - Αιθάνιο 45,80% - CO<sub>2</sub> 25,90% στους 50°C



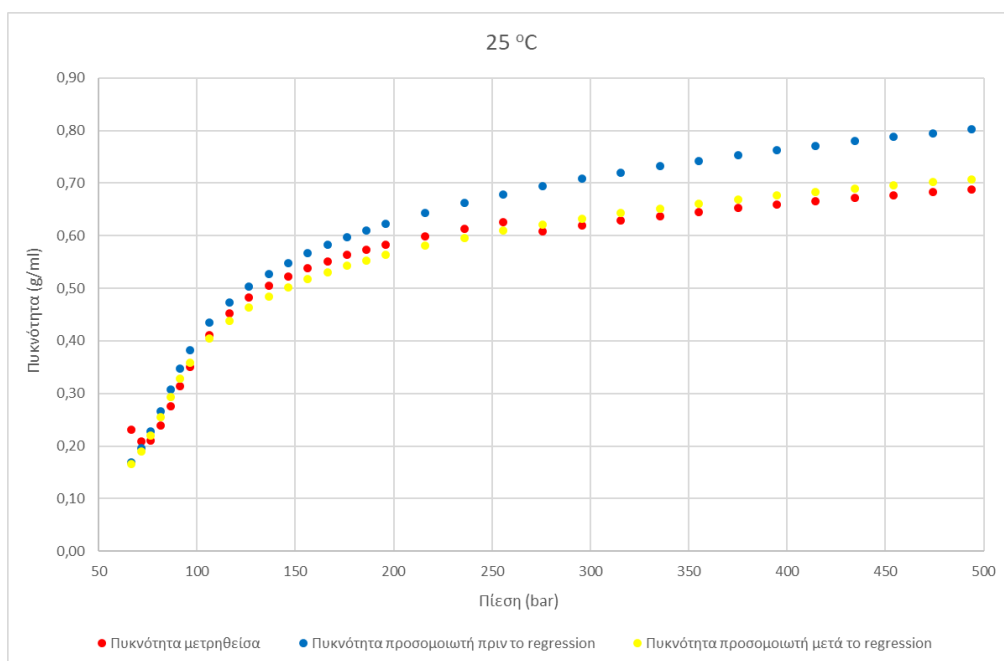
**Σχήμα Θ.13:** Διάγραμμα πυκνοτήτων για το μείγμα Μεθάνιο 28,30% - Αιθάνιο 45,80% - CO<sub>2</sub> 25,90% στους 90°C



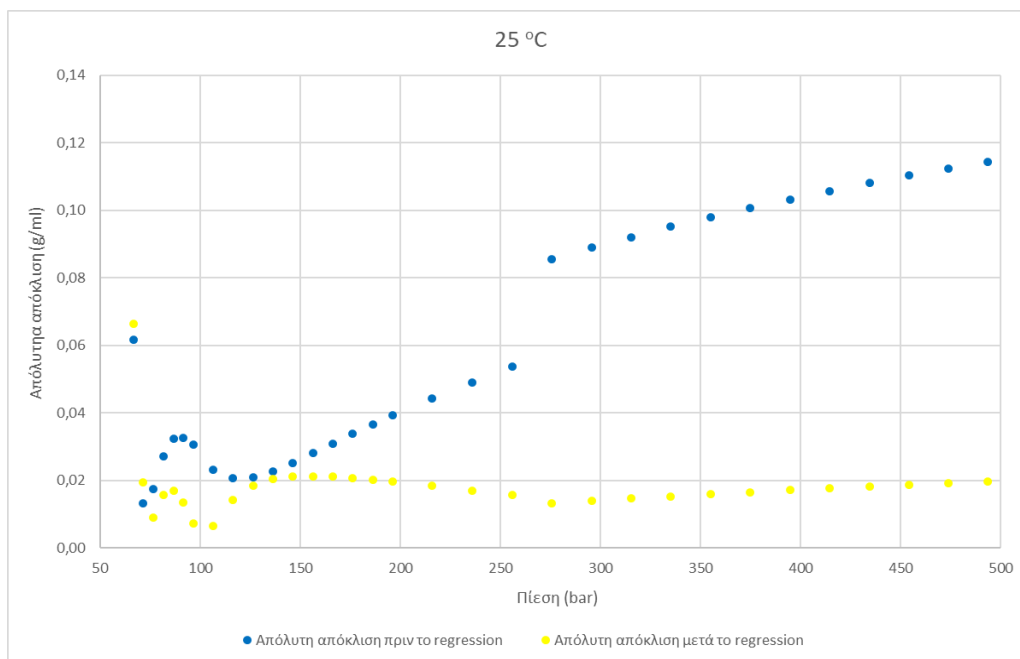
**Σχήμα Θ.14:** Διάγραμμα απόλυτης απόκλισης πυκνοτήτων προσομοιωτή με τις πειραματικές πυκνότητες, για το μείγμα Μεθάνιο 28,30% - Αιθάνιο 45,80% - CO<sub>2</sub> 25,90% στους 90°C



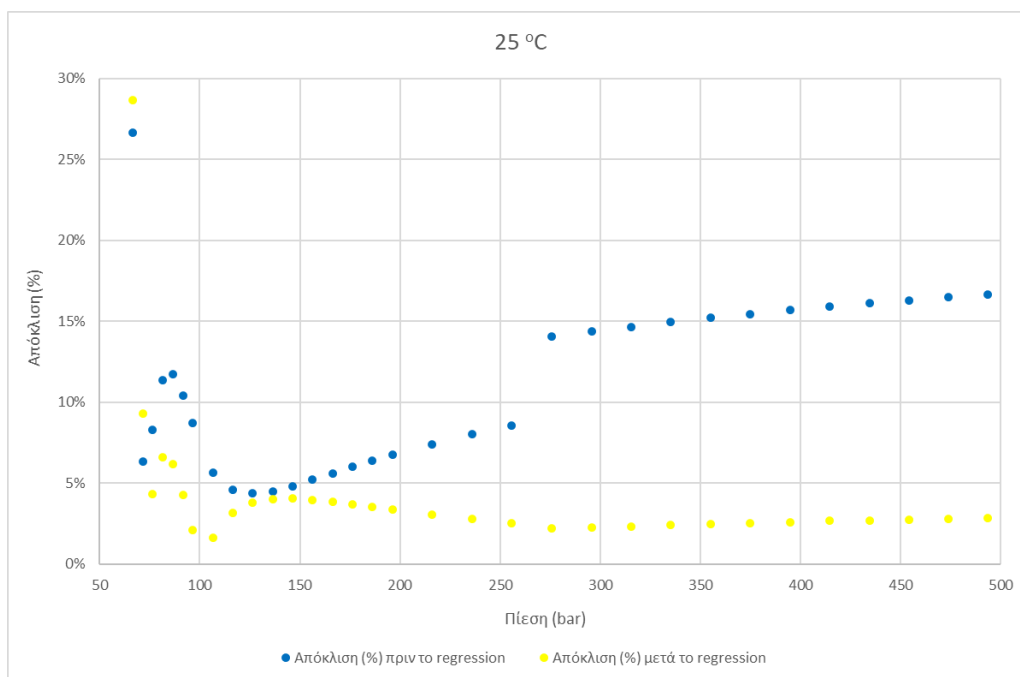
**Σχήμα Θ.15:** Διάγραμμα απόκλισης % πυκνοτήτων προσομοιωτή με τις πειραματικές πυκνότητες, για το μείγμα Μεθάνιο 28,30% - Αιθάνιο 45,80% - CO<sub>2</sub> 25,90% στους 90°C



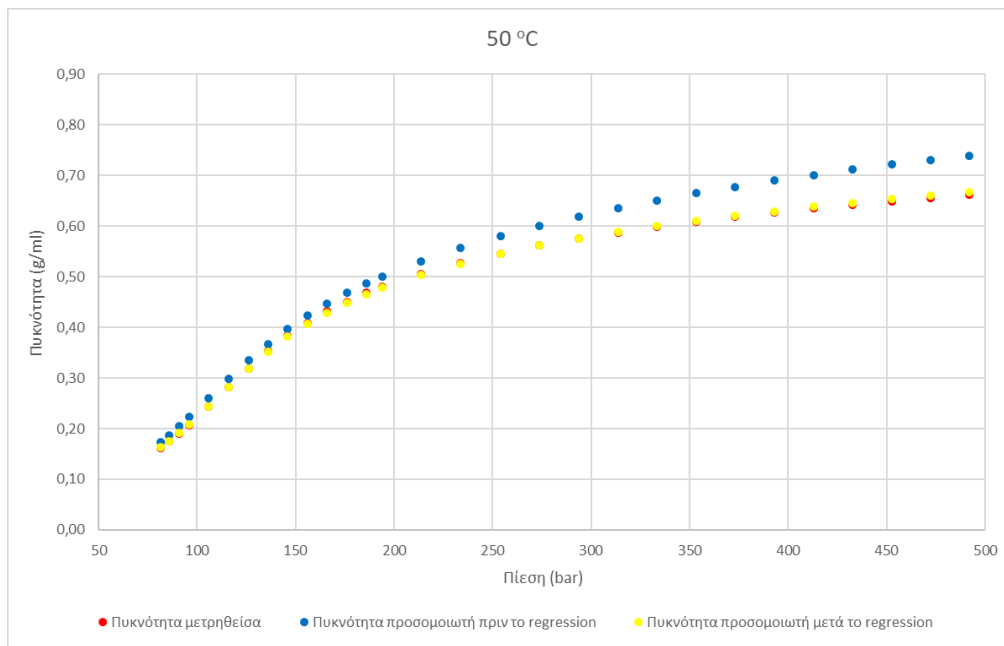
**Σχήμα Θ.16:** Διάγραμμα πυκνοτήτων για το μείγμα Μεθάνιο 13,60% - Αιθάνιο 20% - CO<sub>2</sub> 66,40% στους 25°C



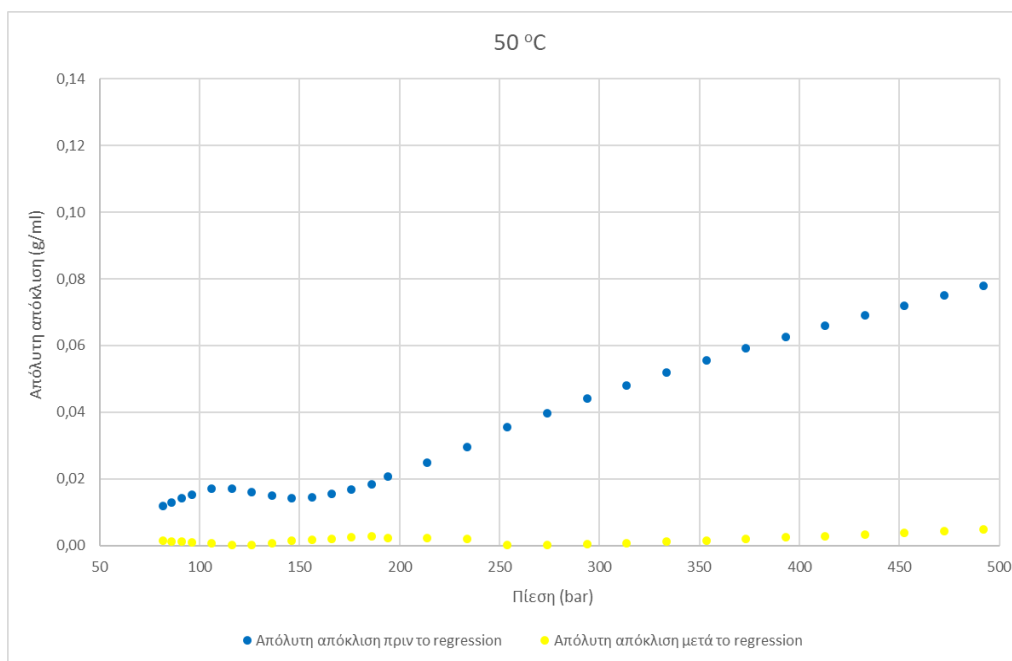
**Σχήμα Θ.17:** Διάγραμμα απόλυτης απόκλισης πυκνοτήτων προσομοιωτή με τις πειραματικές πυκνότητες, για το μείγμα Μεθάνιο 13,60% - Αιθάνιο 20% - CO<sub>2</sub> 66,40% στους 25°C



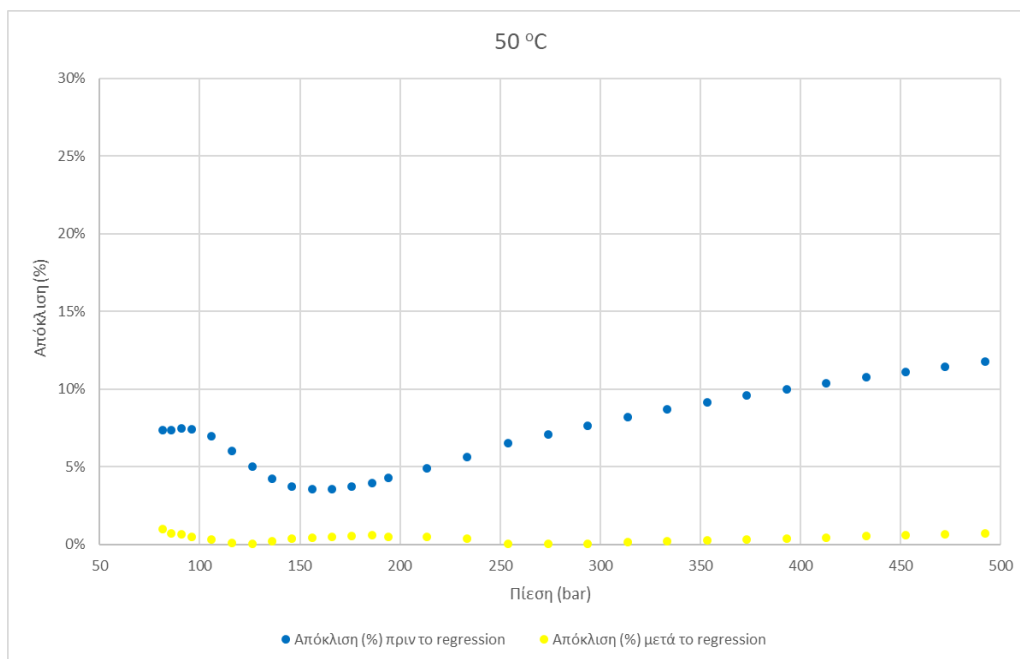
**Σχήμα Θ.18:** Διάγραμμα απόκλισης % πυκνοτήτων προσομοιωτή με τις πειραματικές πυκνότητες, για το μείγμα Μεθάνιο 13,60% - Αιθάνιο 20% - CO<sub>2</sub> 66,40% στους 25°C



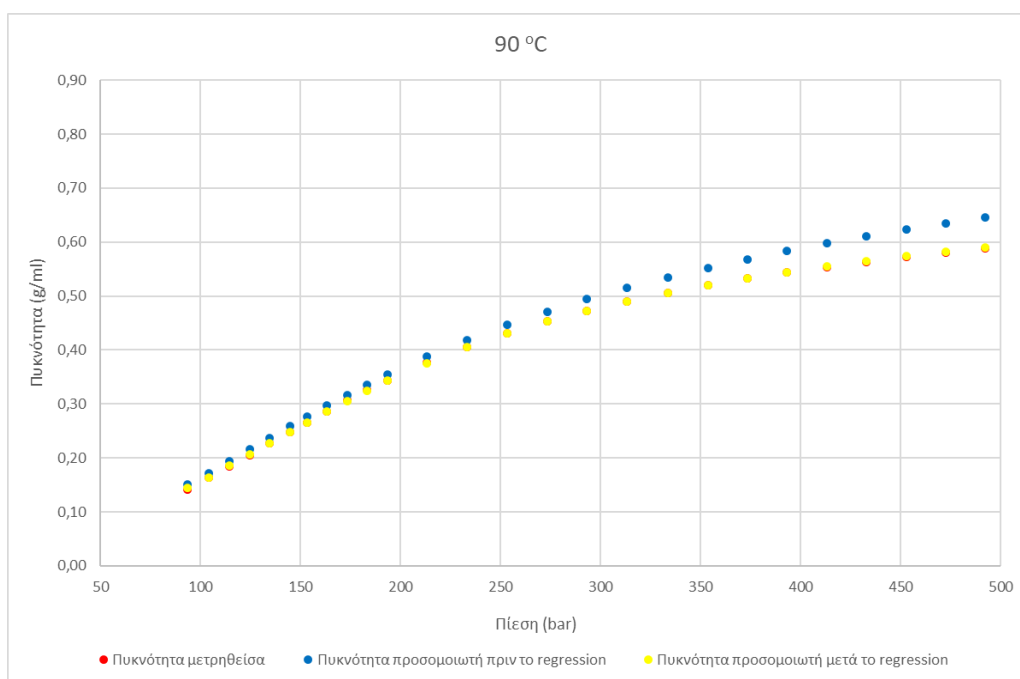
**Σχήμα Θ.19:** Διάγραμμα πυκνοτήτων για το μείγμα Μεθάνιο 13,60% - Αιθάνιο 20% - CO<sub>2</sub> 66,40% στους 50°C



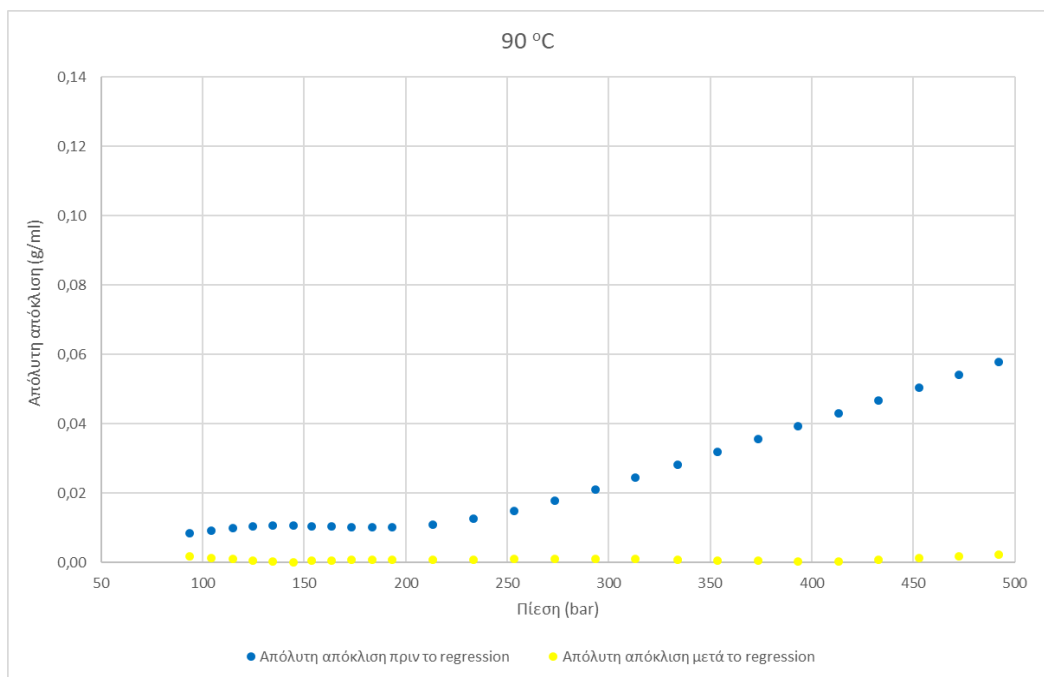
**Σχήμα Θ.20:** Διάγραμμα απόλυτης απόκλισης πυκνοτήτων προσομοιωτή με τις πειραματικές πυκνότητες, για το μείγμα Μεθάνιο 13,60% - Αιθάνιο 20% - CO<sub>2</sub> 66,40% στους 50°C



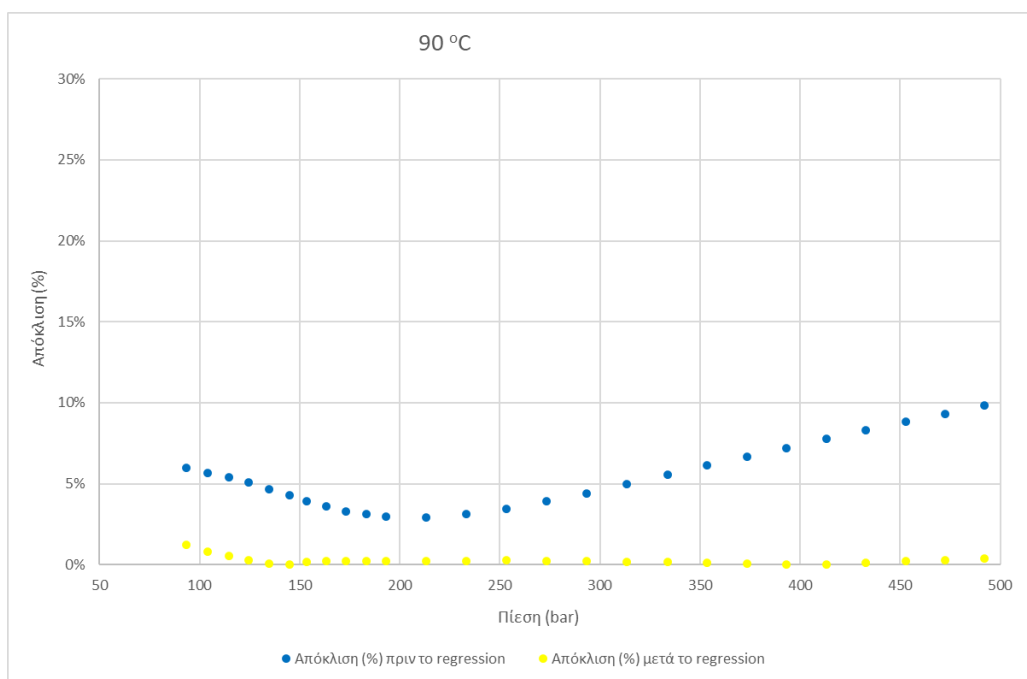
**Σχήμα Θ.21:** Διάγραμμα απόκλισης % πυκνοτήτων προσομοιωτή με τις πειραματικές πυκνότητες, για το μείγμα Μεθάνιο 13,60% - Αιθάνιο 20% - CO<sub>2</sub> 66,40% στους 50°C



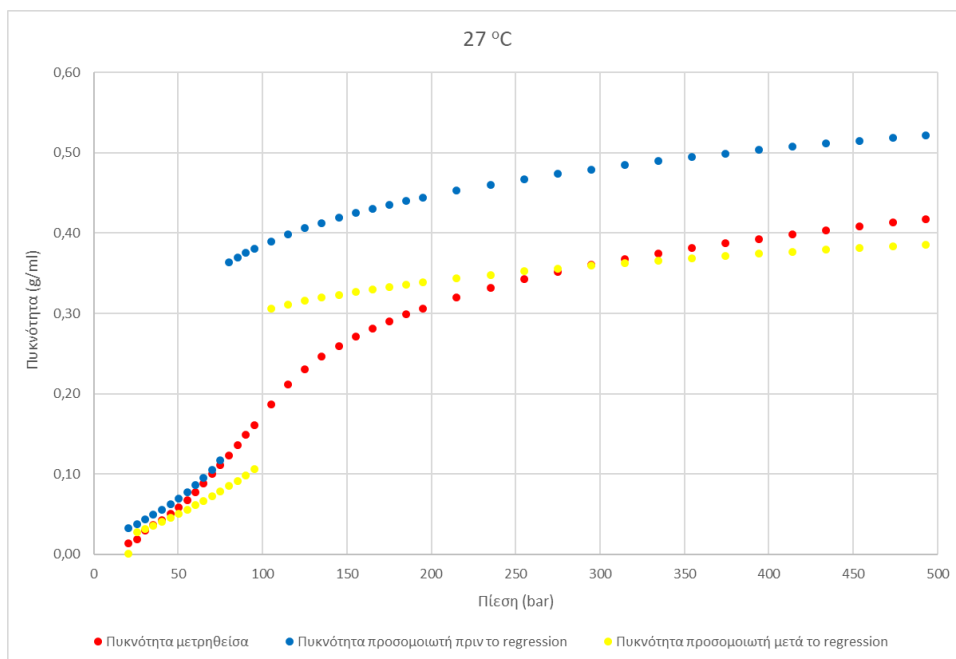
**Σχήμα Θ.22:** Διάγραμμα πυκνοτήτων για το μείγμα Μεθάνιο 13,60% - Αιθάνιο 20% - CO<sub>2</sub> 66,40% στους 90°C



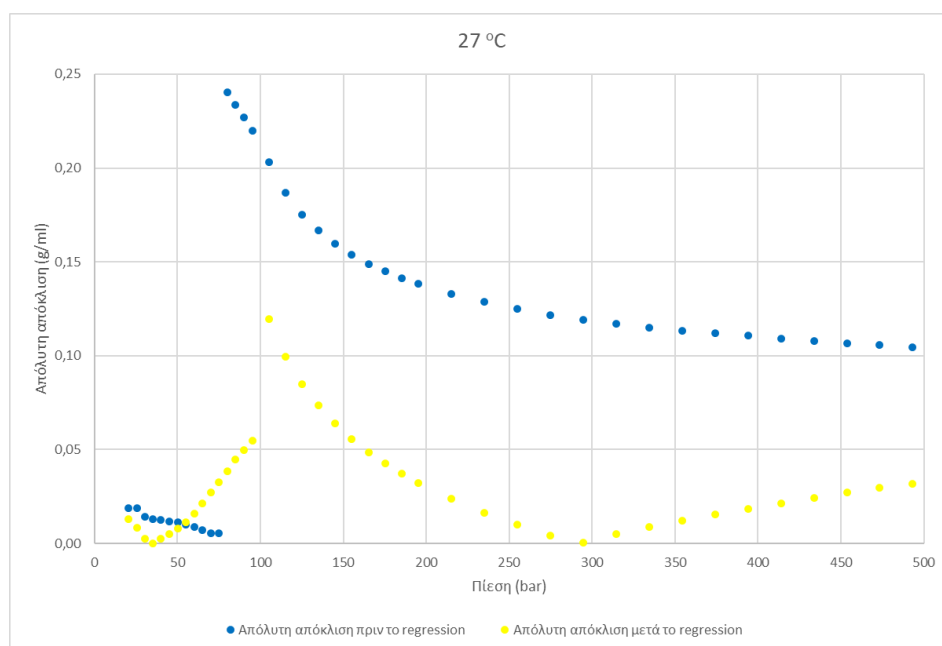
**Σχήμα Θ.23:** Διάγραμμα απόλυτης απόκλισης πυκνοτήτων προσομοιωτή με τις πειραματικές πυκνότητες, για το μείγμα Μεθάνιο 13,60% - Αιθάνιο 20% - CO<sub>2</sub> 66,40% στους 50°C



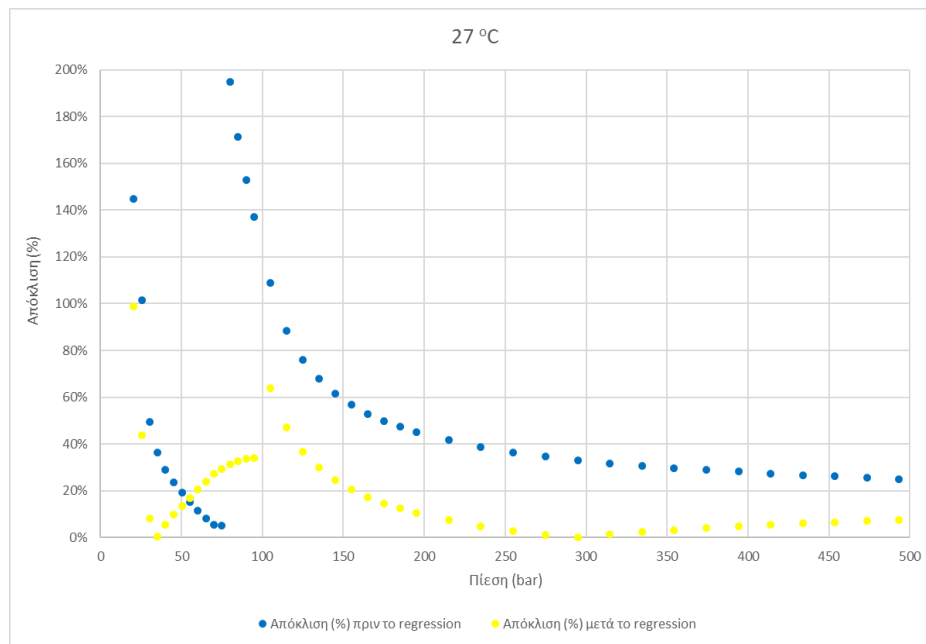
**Σχήμα Θ.24:** Διάγραμμα απόκλισης % πυκνοτήτων προσομοιωτή με τις πειραματικές πυκνότητες, για το μείγμα Μεθάνιο 13,60% - Αιθάνιο 20% - CO<sub>2</sub> 66,40% στους 50°C



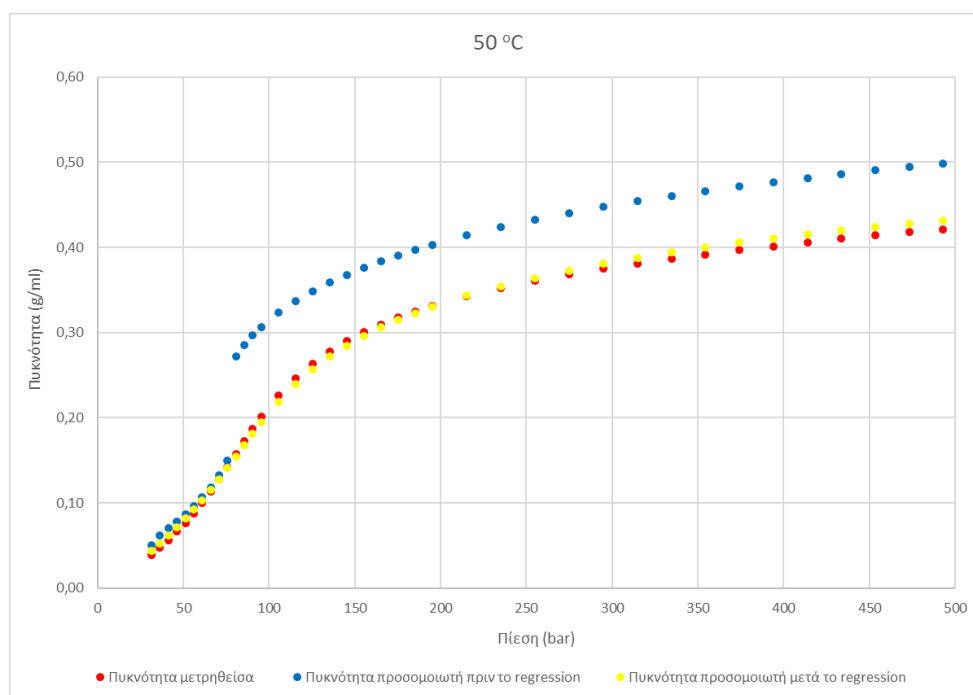
**Σχήμα Θ.25:** Διάγραμμα πυκνοτήτων για το μείγμα Μεθάνιο 41,40% - Προπάνιο 58,60% - CO<sub>2</sub> 0% στους 27°C



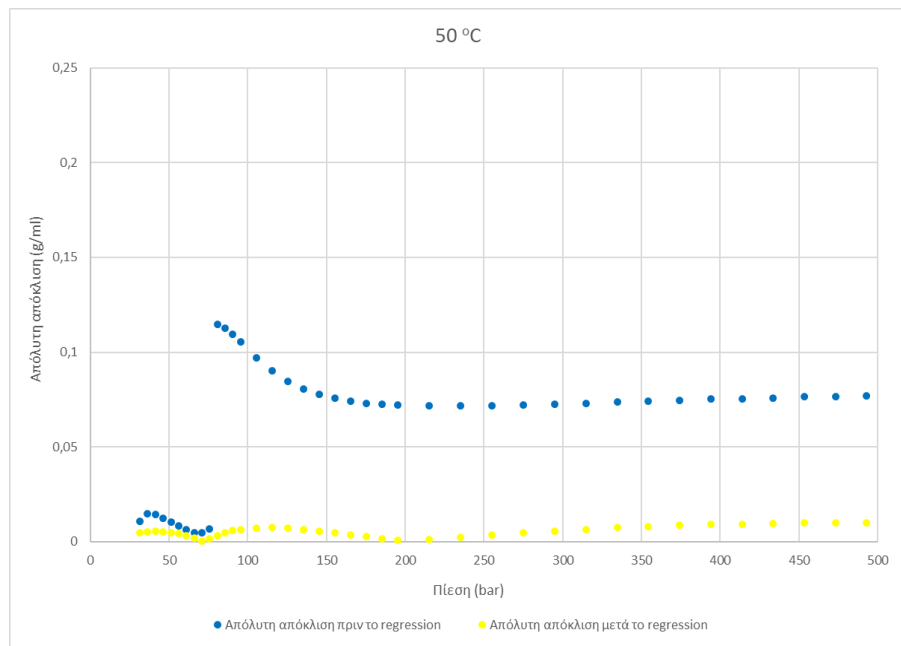
**Σχήμα Θ.26:** Διάγραμμα απόλυτης απόκλισης πυκνοτήτων προσομοιωτή με τις πειραματικές πυκνότητες, για το μείγμα Μεθάνιο 41,40% - Προπάνιο 58,60% - CO<sub>2</sub> 0% στους 27°C



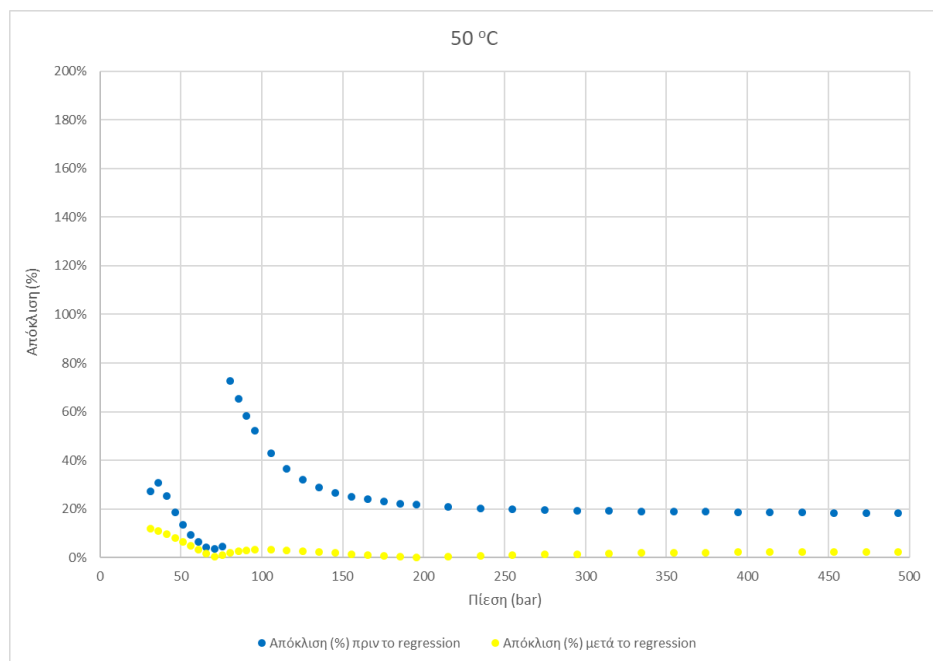
**Σχήμα Θ.27:** Διάγραμμα απόκλισης % πυκνοτήτων προσομοιωτή με τις πειραματικές πυκνότητες, για το μείγμα Μεθάνιο 41,40% - Προπάνιο 58,60% - CO<sub>2</sub> 0% στους 27°C



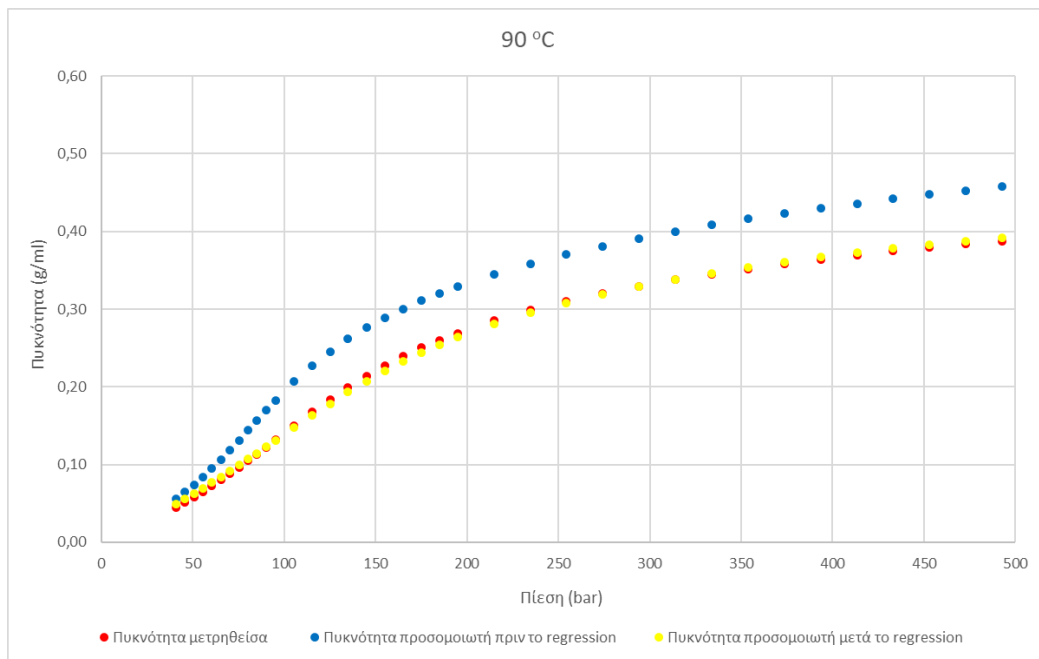
**Σχήμα Θ.28:** Διάγραμμα πυκνοτήτων για το μείγμα Μεθάνιο 41,40% - Προπάνιο 58,60% - CO<sub>2</sub> 0% στους 50°C



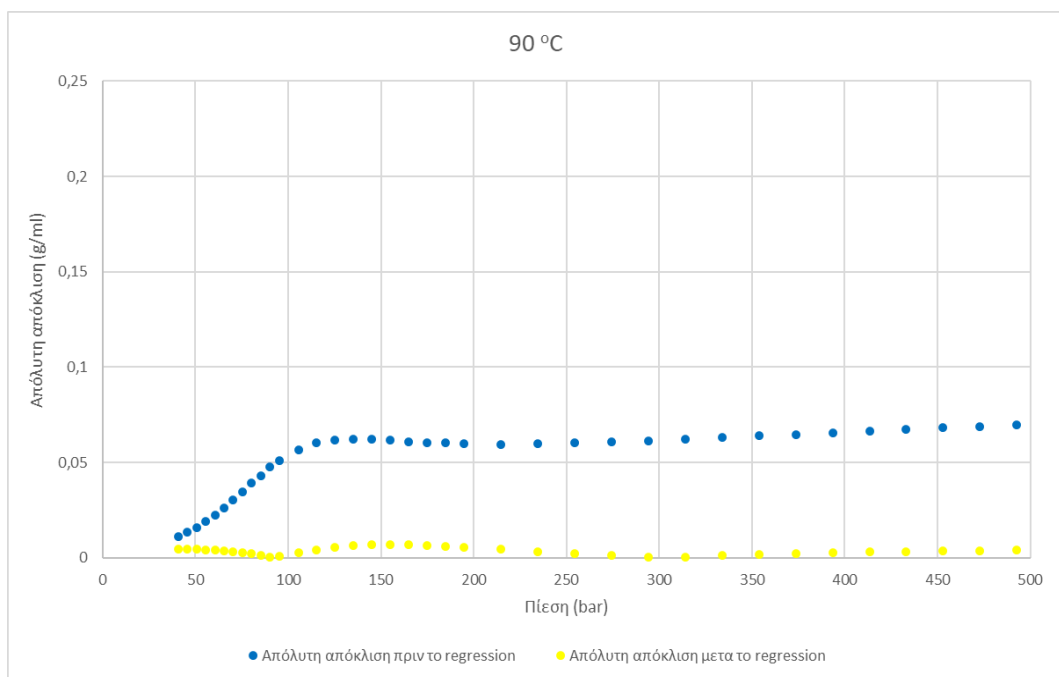
**Σχήμα Θ.29:** Διάγραμμα απόλυτης απόκλισης πυκνοτήτων προσομοιωτή με τις πειραματικές πυκνότητες, για το μείγμα Μεθάνιο 41,40% - Προπάνιο 58,60% - CO<sub>2</sub> 0% στους 50°C



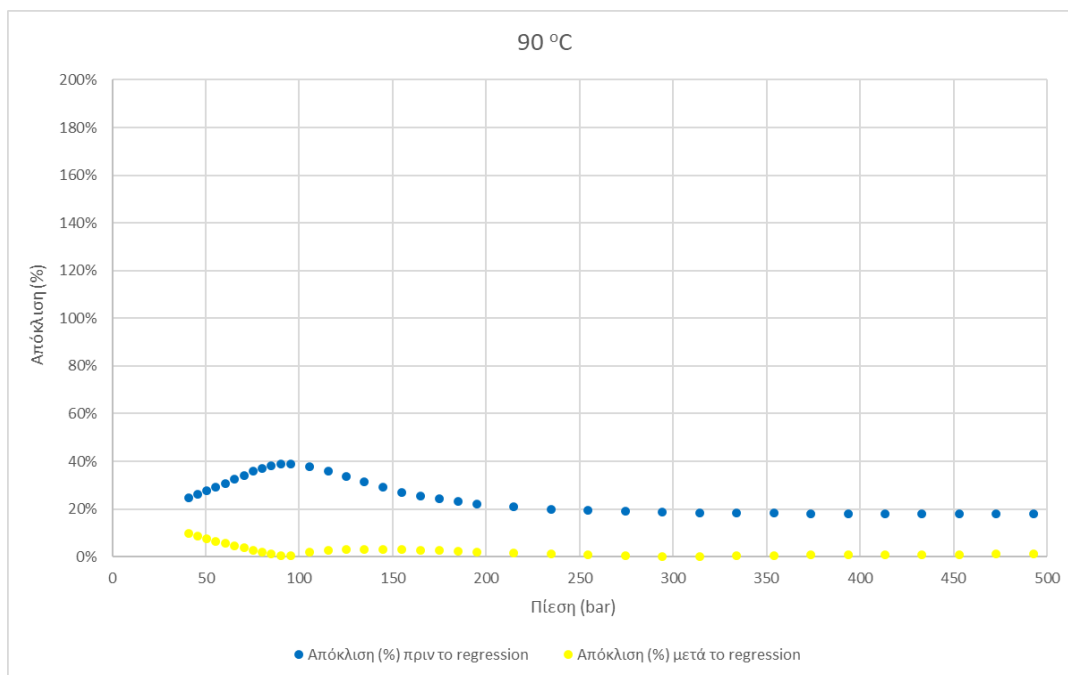
**Σχήμα Θ.30:** Διάγραμμα απόκλισης % πυκνοτήτων προσομοιωτή με τις πειραματικές πυκνότητες, για το μείγμα Μεθάνιο 41,40% - Προπάνιο 58,60% - CO<sub>2</sub> 0% στους 50°C



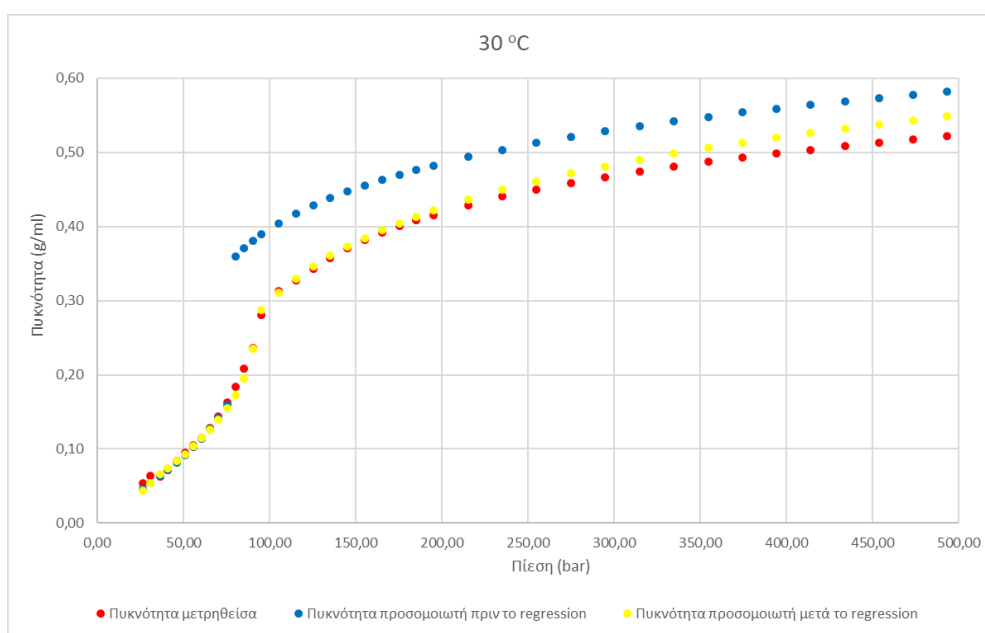
**Σχήμα Θ.31:** Διάγραμμα πυκνοτήτων για το μείγμα Μεθάνιο 41,40% - Προπάνιο 58,60% - CO<sub>2</sub> 0% στους 90°C



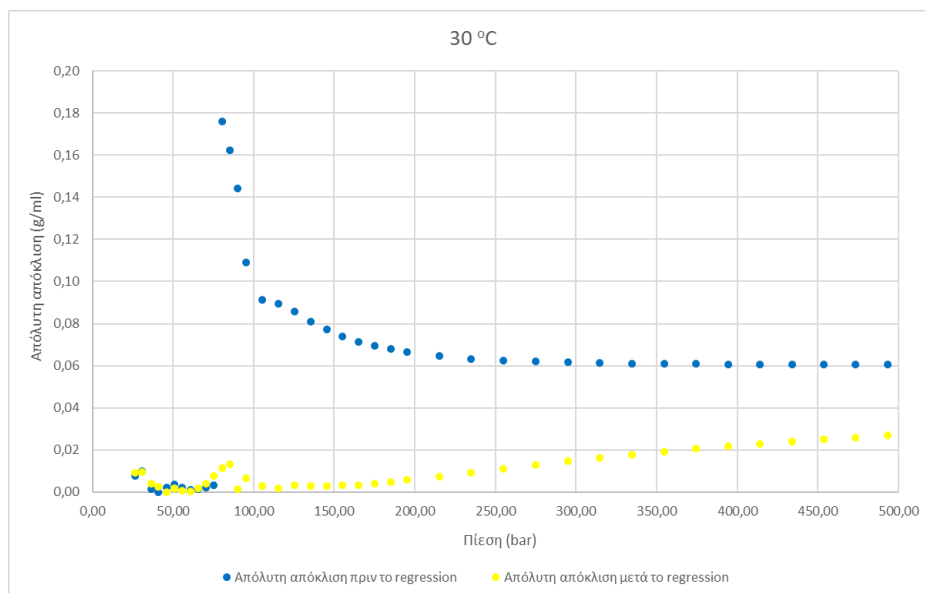
**Σχήμα Θ.32:** Διάγραμμα απόλυτης απόκλισης πυκνοτήτων προσομοιωτή με τις πειραματικές πυκνότητες, για το μείγμα Μεθάνιο 41,40% - Προπάνιο 58,60% - CO<sub>2</sub> 0% στους 90°C



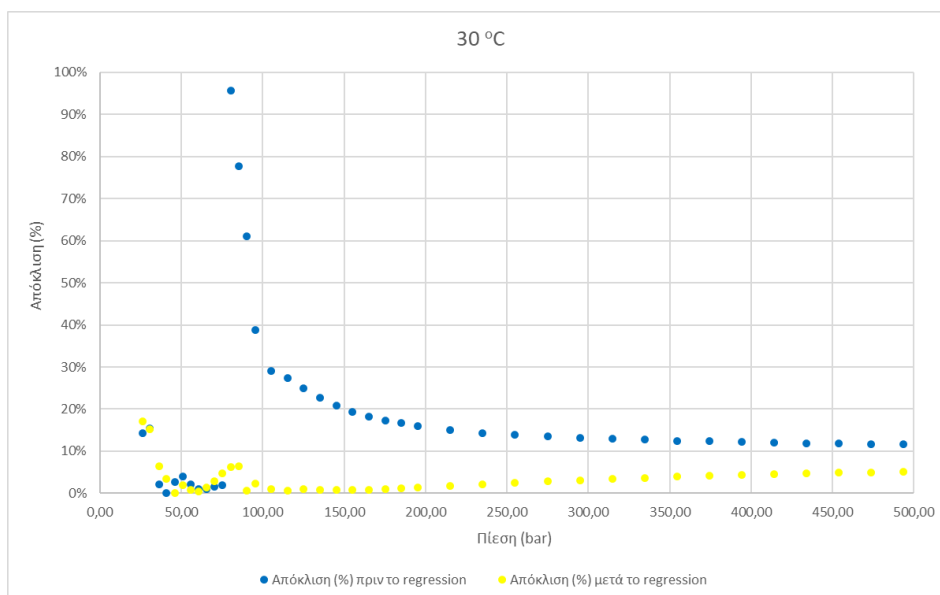
**Σχήμα Θ.33:** Διάγραμμα απόκλισης % πυκνοτήτων προσομοιωτή με τις πειραματικές πυκνότητες, για το μείγμα Μεθάνιο 41,40% - Προπάνιο 58,60% - CO<sub>2</sub> 0% στους 90°C



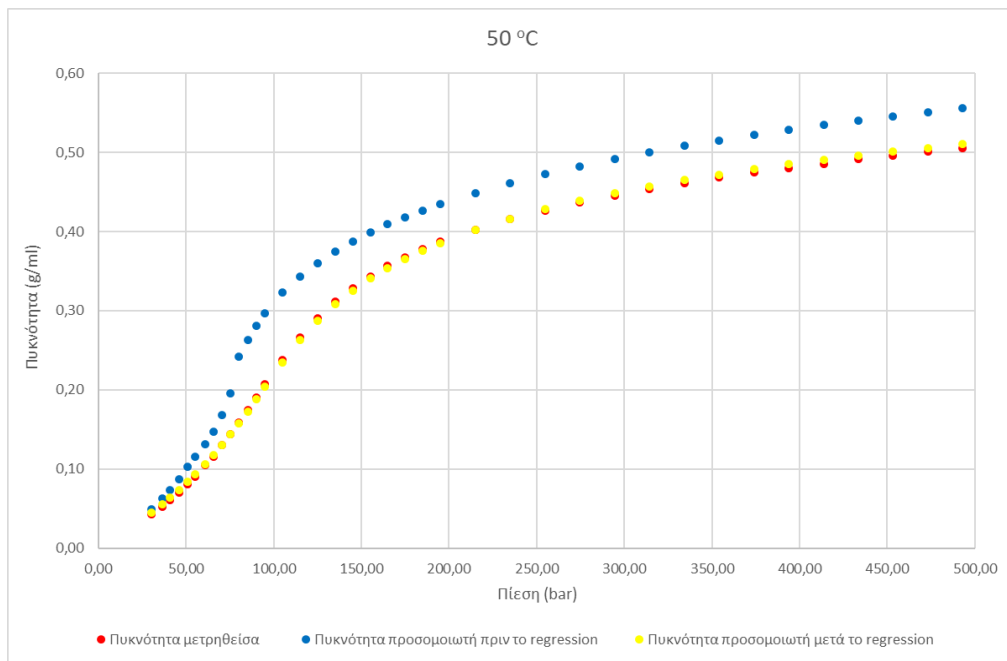
**Σχήμα Θ.34:** Διάγραμμα πυκνοτήτων για το μείγμα Μεθάνιο 34,40% - Προπάνιο 47,10% - CO<sub>2</sub> 18,60% στους 30°C



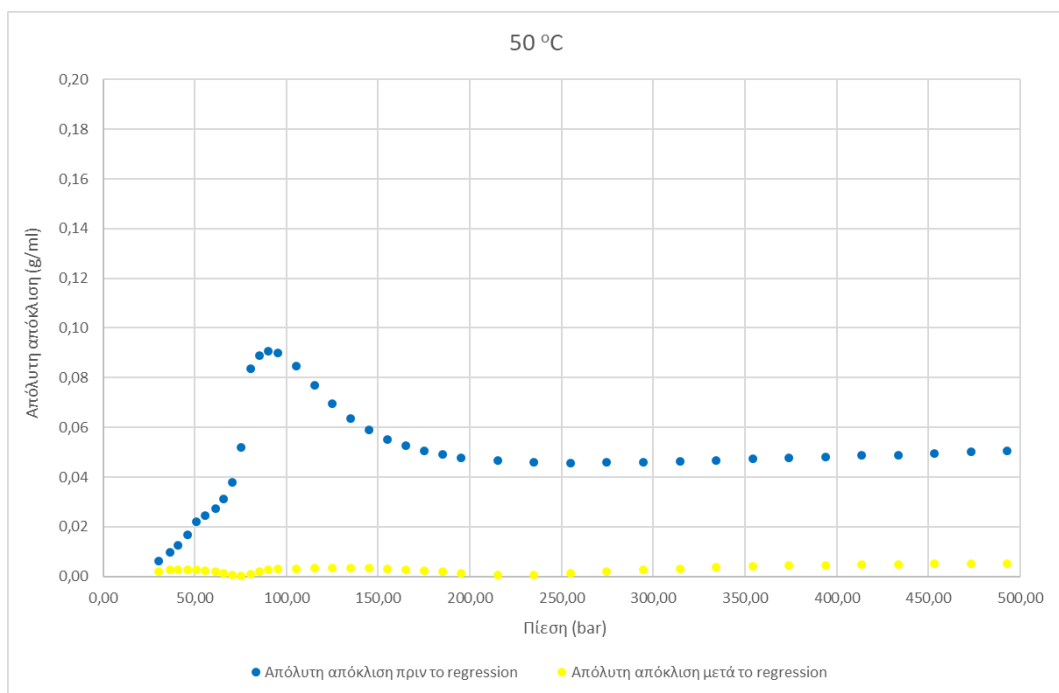
**Σχήμα Θ.35:** Διάγραμμα απόλυτης απόκλισης πυκνοτήτων προσομοιωτή με τις πειραματικές πυκνότητες, για το μείγμα Μεθάνιο 34,40% - Προπάνιο 47,10% - CO<sub>2</sub> 18,60% στους 30°C



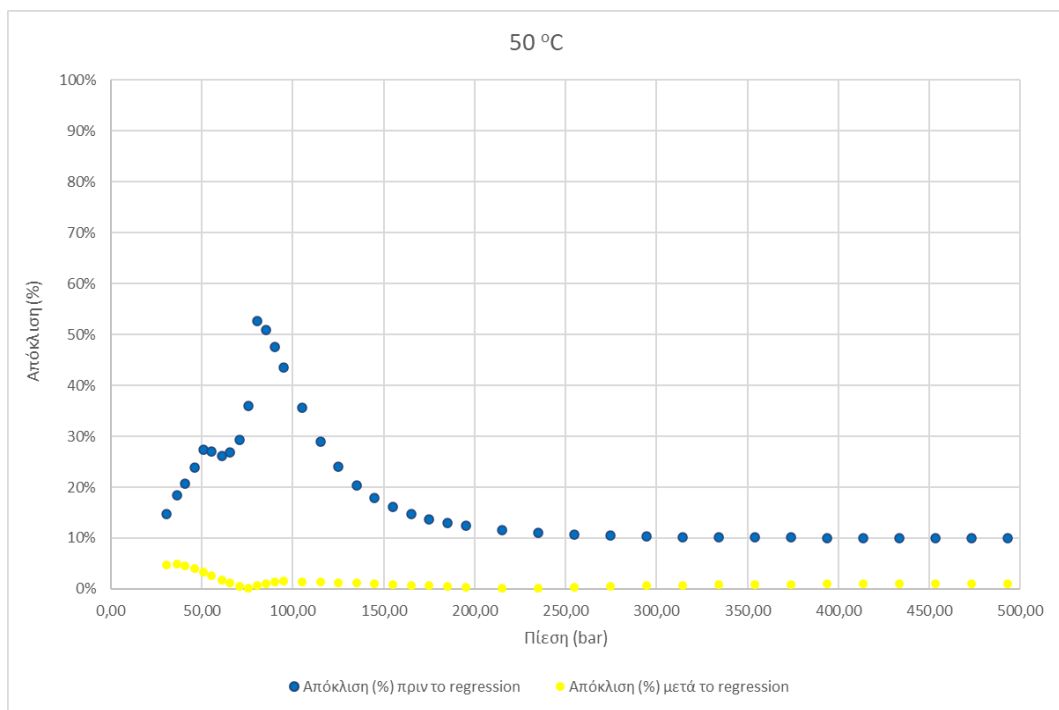
**Σχήμα Θ.36:** Διάγραμμα απόκλισης % πυκνοτήτων προσομοιωτή με τις πειραματικές πυκνότητες, για το μείγμα Μεθάνιο 34,40% - Προπάνιο 47,10% - CO<sub>2</sub> 18,60% στους 30°C



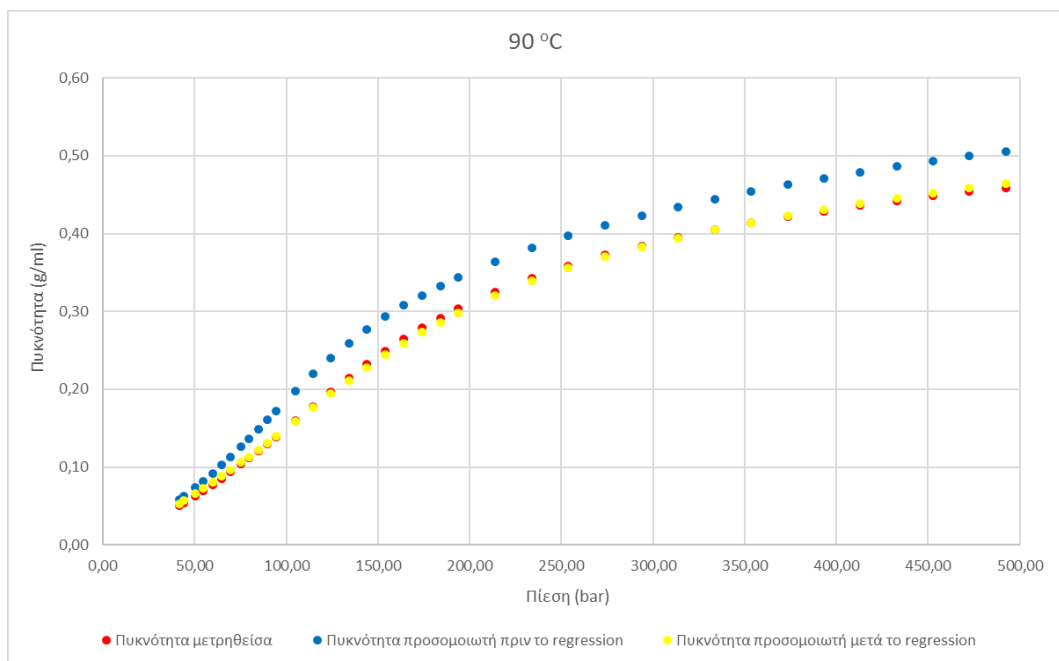
**Σχήμα Θ.37:** Διάγραμμα πυκνοτήτων για το μείγμα Μεθάνιο 34,40% - Προπάνιο 47,10% - CO<sub>2</sub> 18,60% στους 50°C



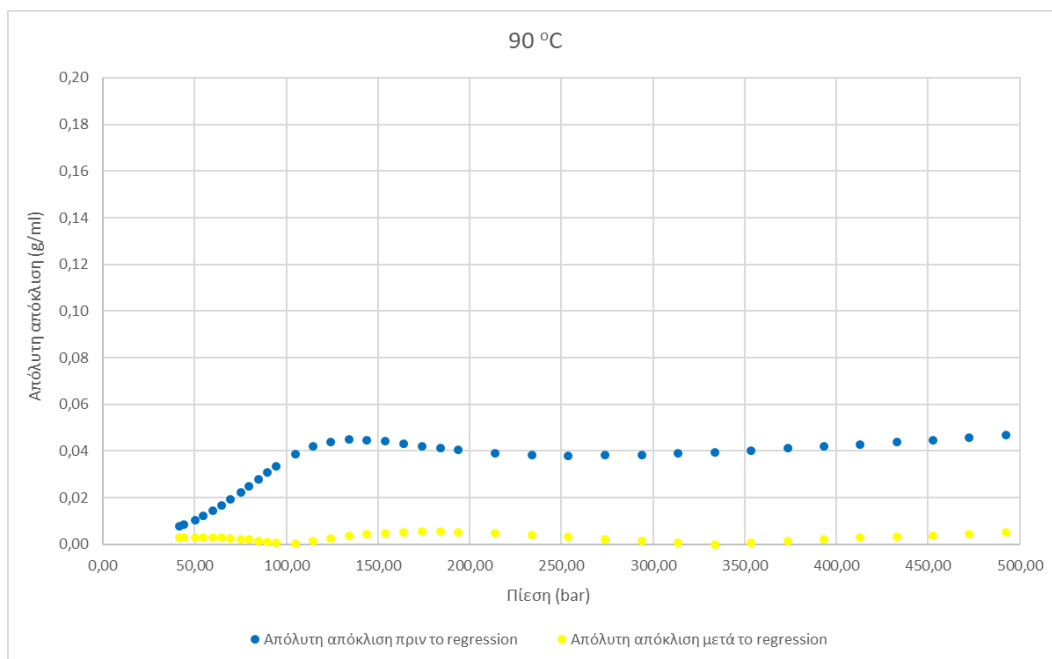
**Σχήμα Θ.38:** Διάγραμμα απόλυτης απόκλισης πυκνοτήτων προσομοιωτή με τις πειραματικές πυκνότητες, για το μείγμα Μεθάνιο 34,40% - Προπάνιο 47,10% - CO<sub>2</sub> 18,60% στους 50°C



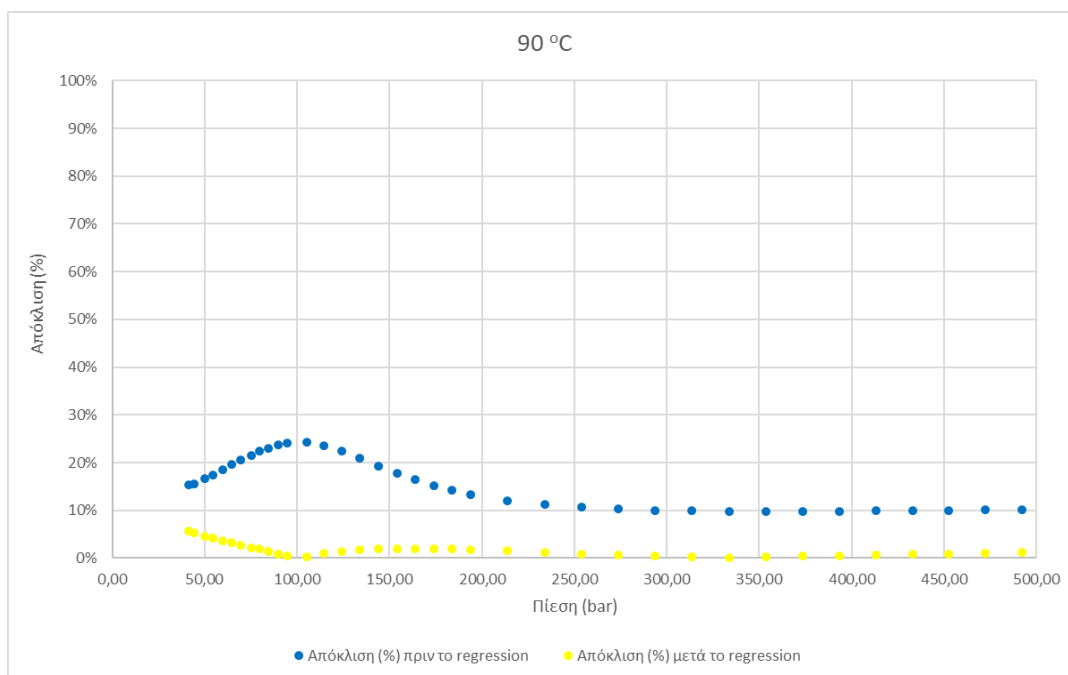
**Σχήμα Θ.39:** Διάγραμμα απόκλισης % πυκνοτήτων προσομοιωτή με τις πειραματικές πυκνότητες, για το μείγμα Μεθάνιο 34,40% - Προπάνιο 47,10% - CO<sub>2</sub> 18,60% στους 50°C



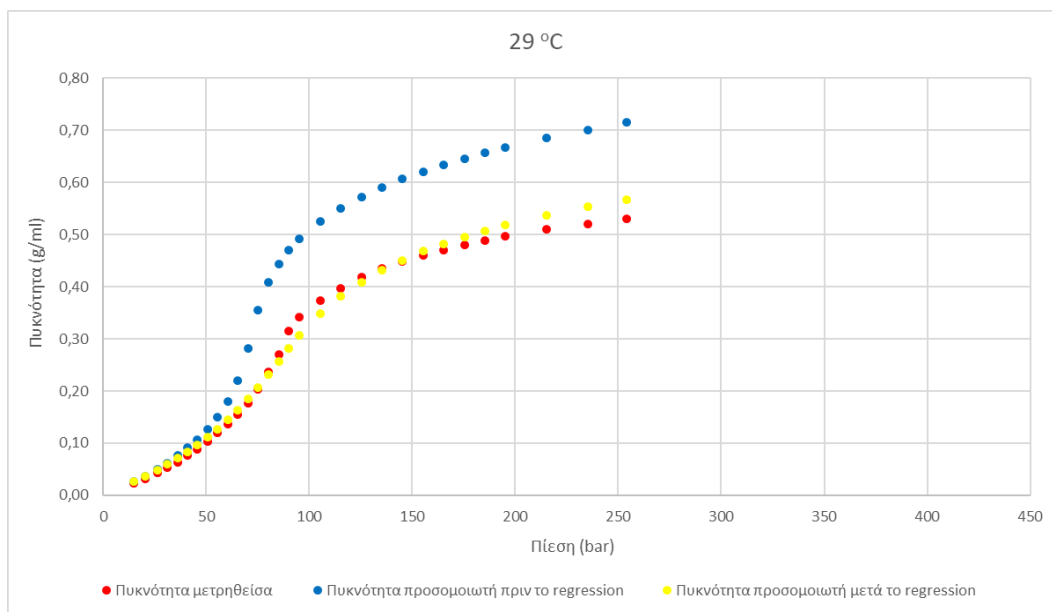
**Σχήμα Θ.40:** Διάγραμμα πυκνοτήτων για το μείγμα Μεθάνιο 34,40% - Προπάνιο 47,10% - CO<sub>2</sub> 18,60% στους 90°C



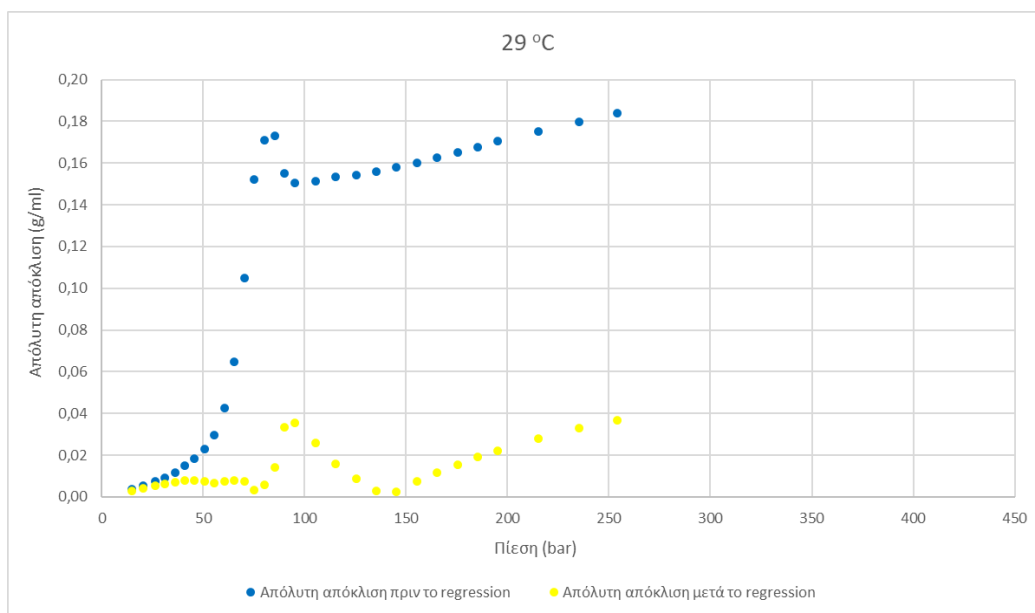
**Σχήμα Θ.41:** Διάγραμμα απόλυτης απόκλισης πυκνοτήτων προσομοιωτή με τις πειραματικές πυκνότητες, για το μείγμα Μεθάνιο 34,40% - Προπάνιο 47,10% - CO<sub>2</sub> 18,60% στους 90°C



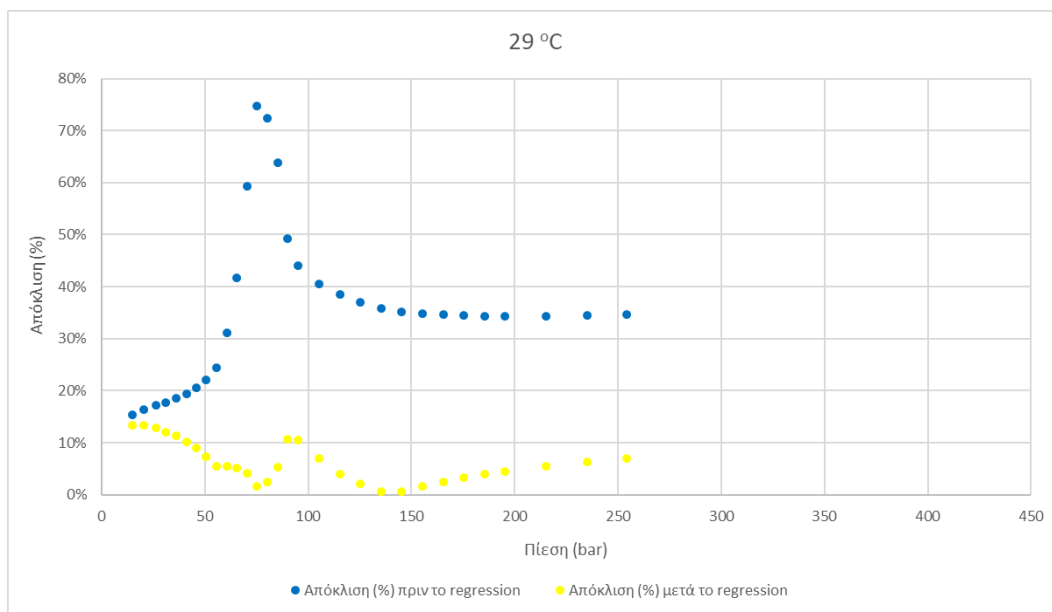
**Σχήμα Θ.42:** Διάγραμμα απόκλισης % πυκνοτήτων προσομοιωτή με τις πειραματικές πυκνότητες, για το μείγμα Μεθάνιο 34,40% - Προπάνιο 47,10% - CO<sub>2</sub> 18,60% στους 90°C



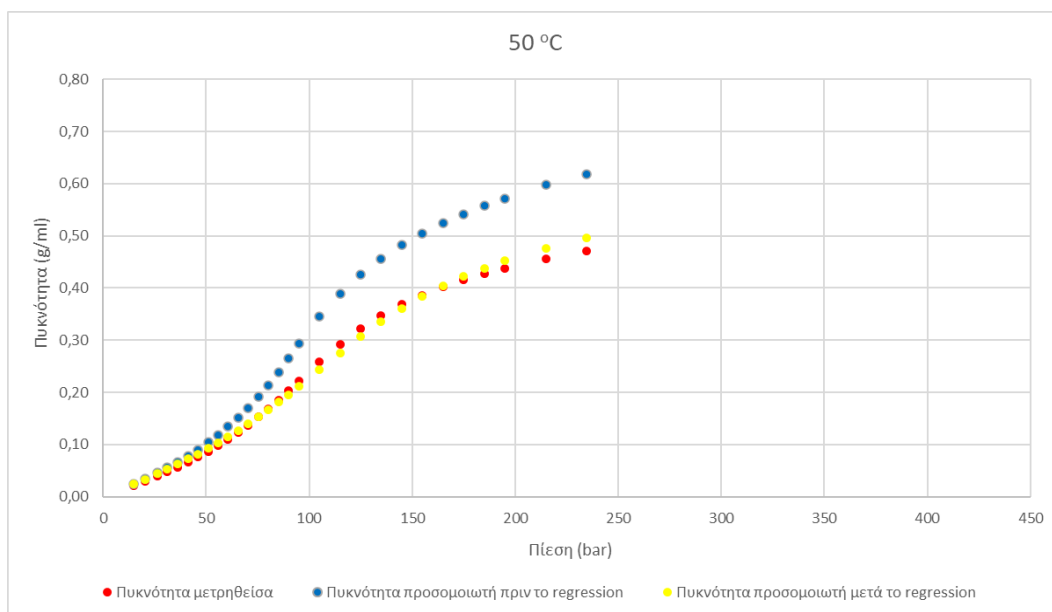
**Σχήμα Θ.43:** Διάγραμμα πυκνοτήτων για το μείγμα Μεθάνιο 12,50% - Προπάνιο 18,30% - CO<sub>2</sub> 69,20% στους 29°C



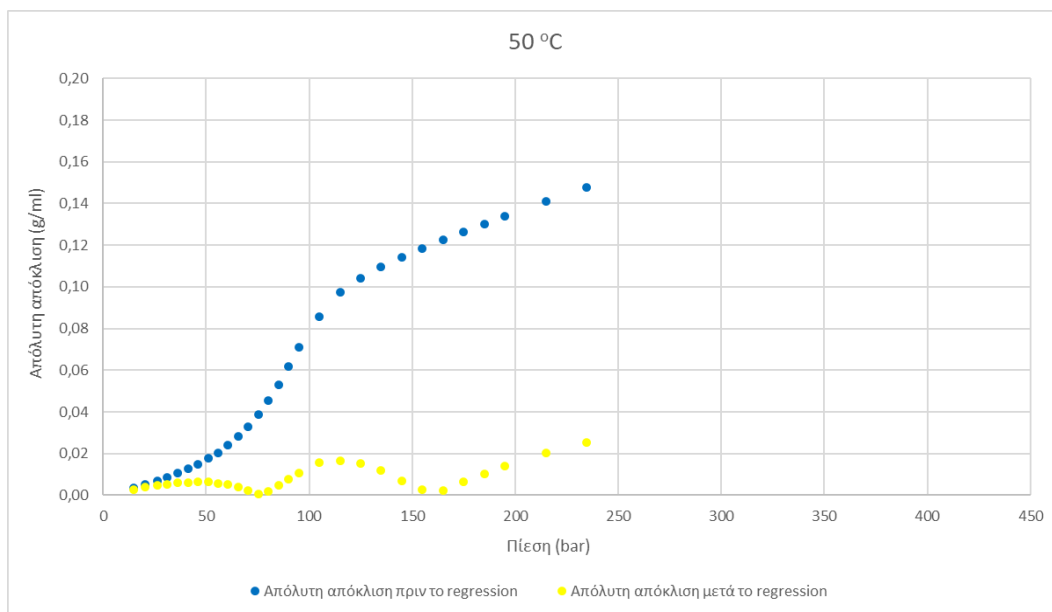
**Σχήμα Θ.44:** Διάγραμμα απόλυτης απόκλισης πυκνοτήτων προσομοιωτή με τις πειραματικές πυκνότητες, για το μείγμα Μεθάνιο 12,50% - Προπάνιο 18,30% - CO<sub>2</sub> 69,20% στους 29°C



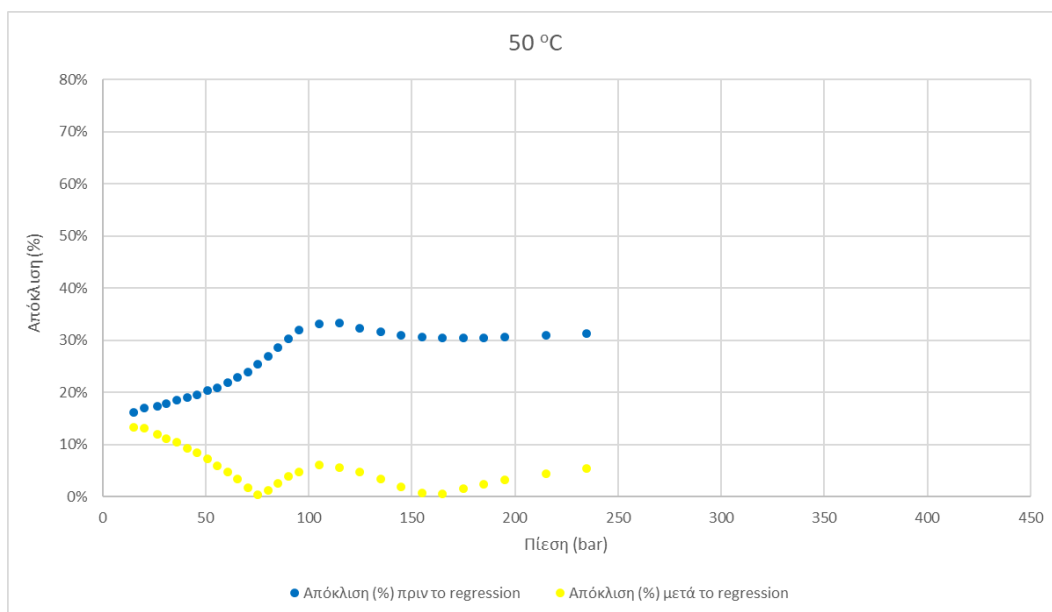
**Σχήμα 0.45:** Διάγραμμα απόκλισης % πυκνοτήτων προσομοιωτή με τις πειραματικές πυκνότητες, για το μείγμα Μεθάνιο 12,50% - Προπάνιο 18,30% - CO<sub>2</sub> 69,20% στους 29°C



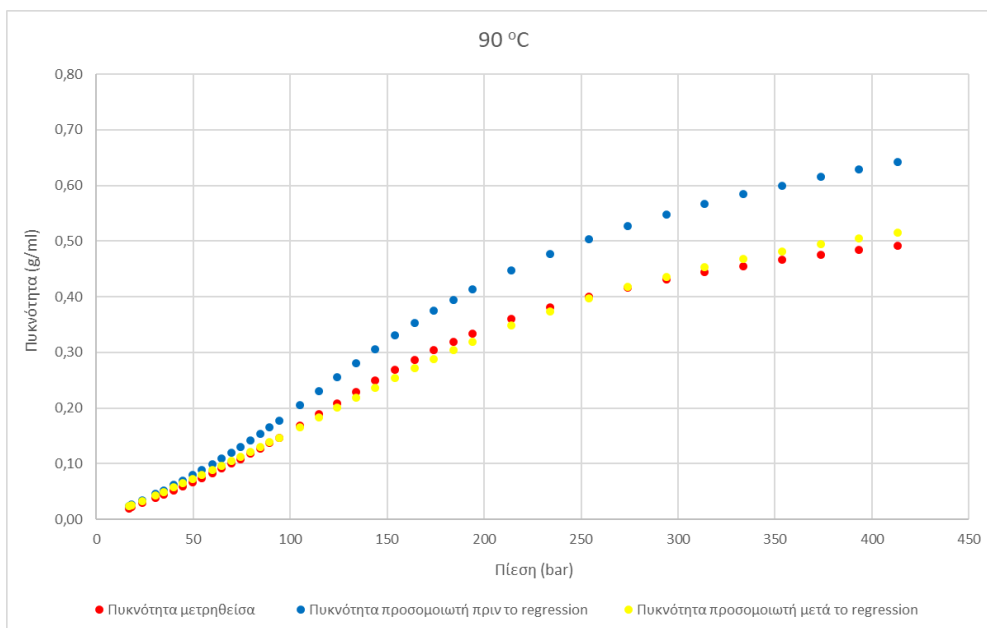
**Σχήμα 0.46:** Διάγραμμα πυκνοτήτων για το μείγμα Μεθάνιο 12,50% - Προπάνιο 18,30% - CO<sub>2</sub> 69,20% στους 50°C



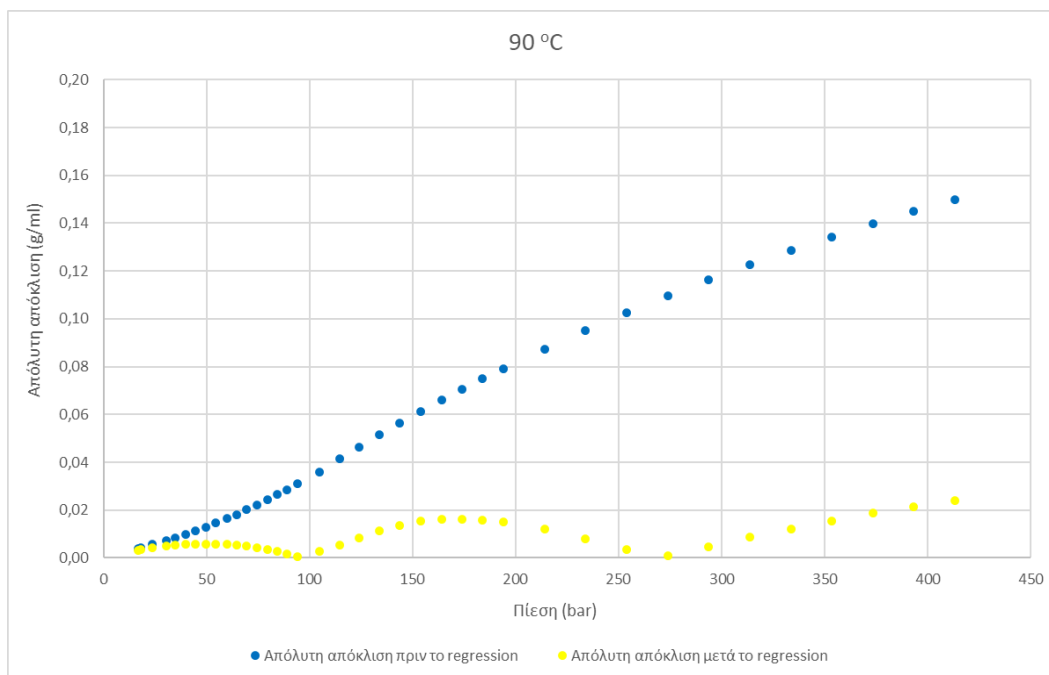
**Σχήμα Θ.47:** Διάγραμμα απόλυτης απόκλισης πυκνοτήτων προσομοιωτή με τις πειραματικές πυκνότητες, για το μείγμα Μεθάνιο 12,50% - Προπάνιο 18,30% - CO<sub>2</sub> 69,20% στους 50°C



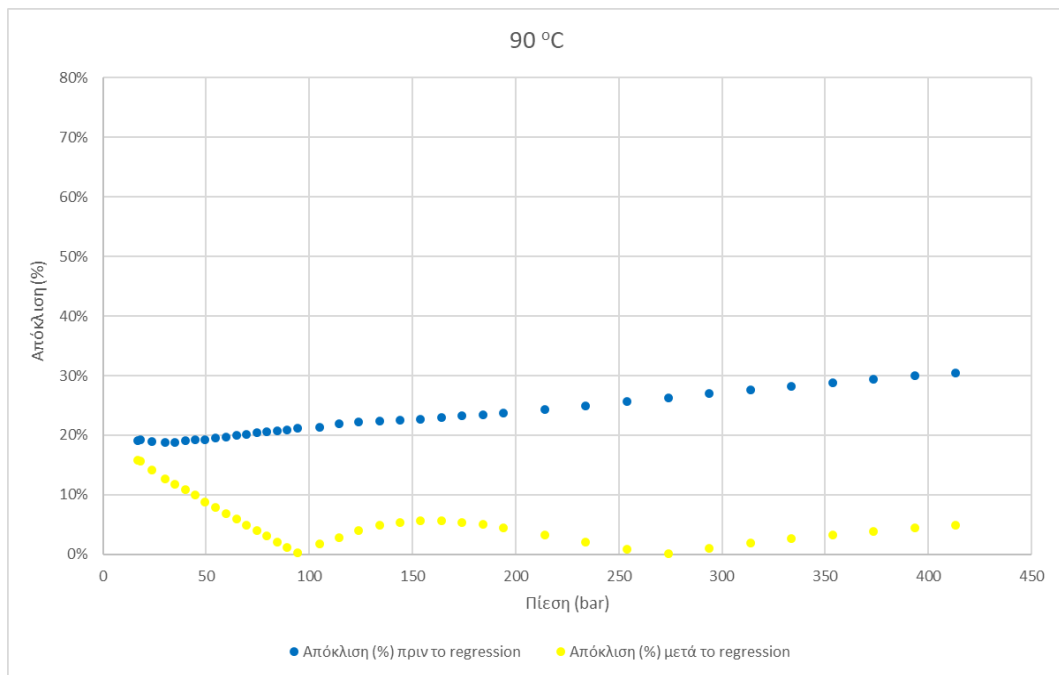
**Σχήμα Θ.48:** Διάγραμμα απόκλισης % πυκνοτήτων προσομοιωτή με τις πειραματικές πυκνότητες, για το μείγμα Μεθάνιο 12,50% - Προπάνιο 18,30% - CO<sub>2</sub> 69,20% στους 50°C



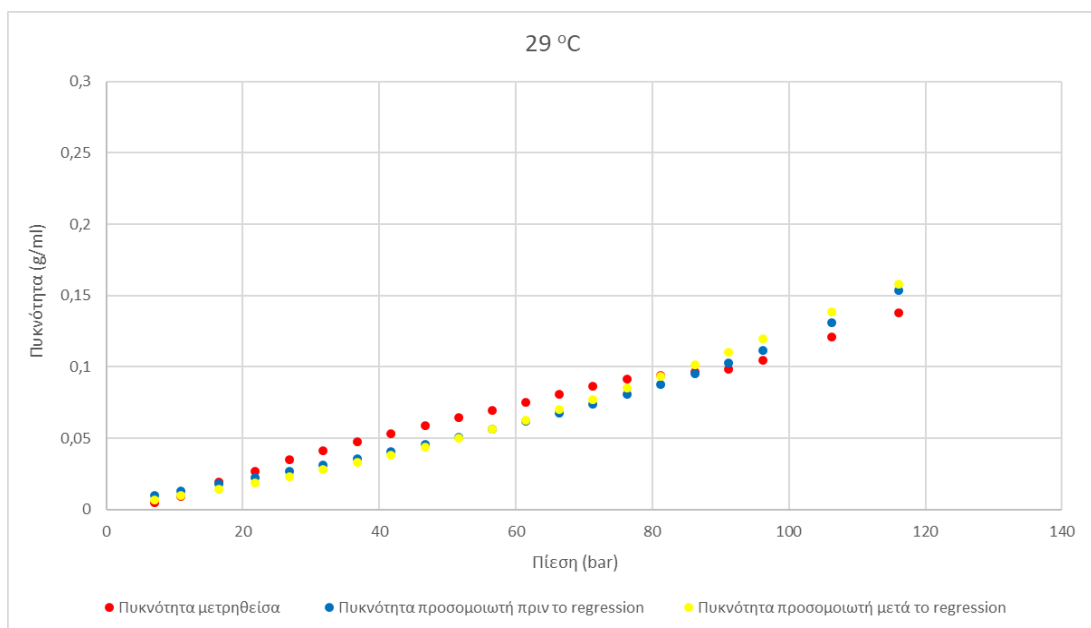
**Σχήμα Θ.49:** Διάγραμμα πυκνοτήτων για το μείγμα Μεθάνιο 12,50% - Προπάνιο 18,30% - CO<sub>2</sub> 69,20% στους 90°C



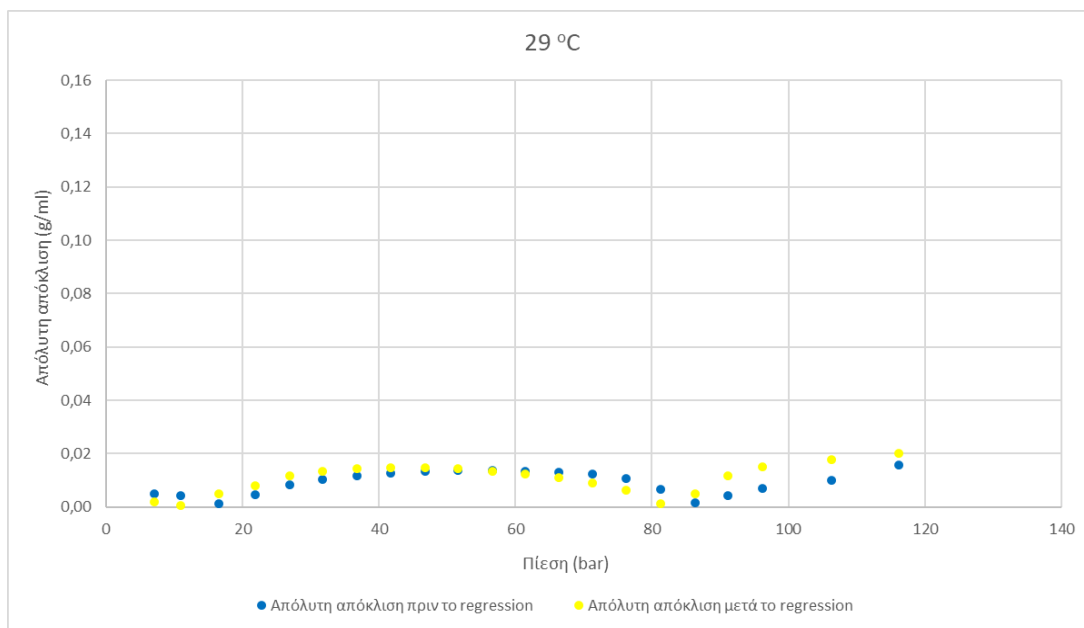
**Σχήμα Θ.50:** Διάγραμμα απόλυτης απόκλισης πυκνοτήτων προσομοιωτή με τις πειραματικές πυκνότητες, για το μείγμα Μεθάνιο 12,50% - Προπάνιο 18,30% - CO<sub>2</sub> 69,20% στους 90°C



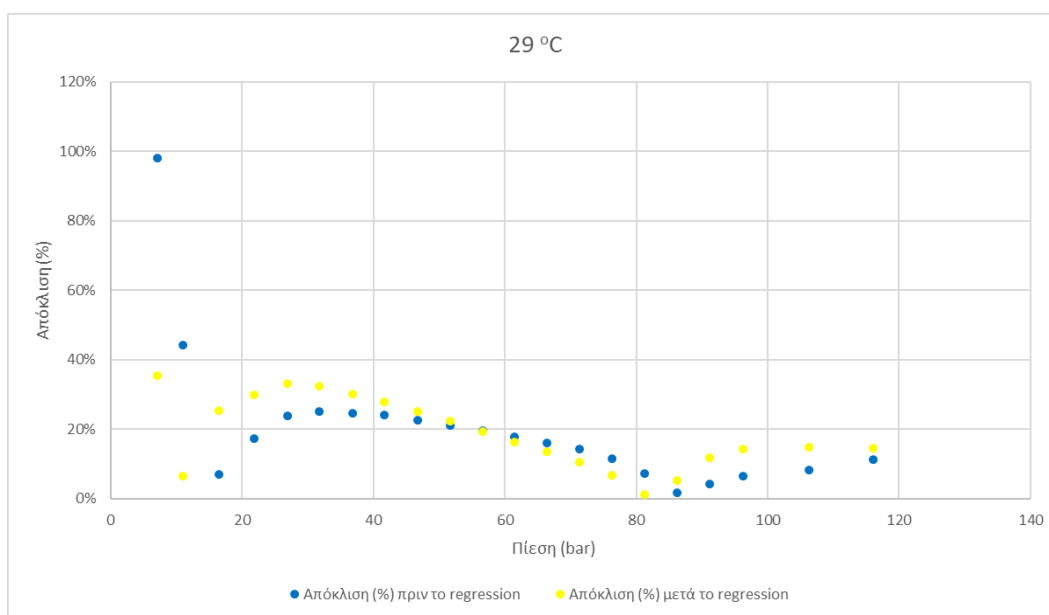
**Σχήμα Θ.51:** Διάγραμμα απόκλισης % πυκνοτήτων προσομοιωτή με τις πειραματικές πυκνότητες, για το μείγμα Μεθάνιο 12,50% - Προπάνιο 18,30% - CO<sub>2</sub> 69,20% στους 90°C



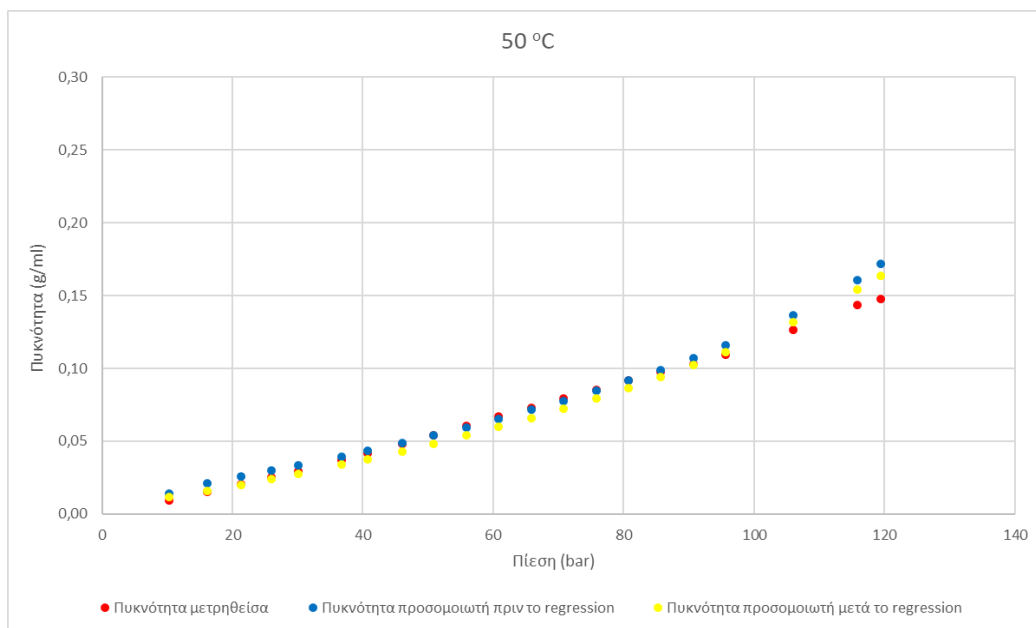
**Σχήμα Θ.52:** Διάγραμμα πυκνοτήτων για το μείγμα Μεθάνιο 58,17% - Βουτάνιο 41,83% - CO<sub>2</sub> 0% στους 29°C



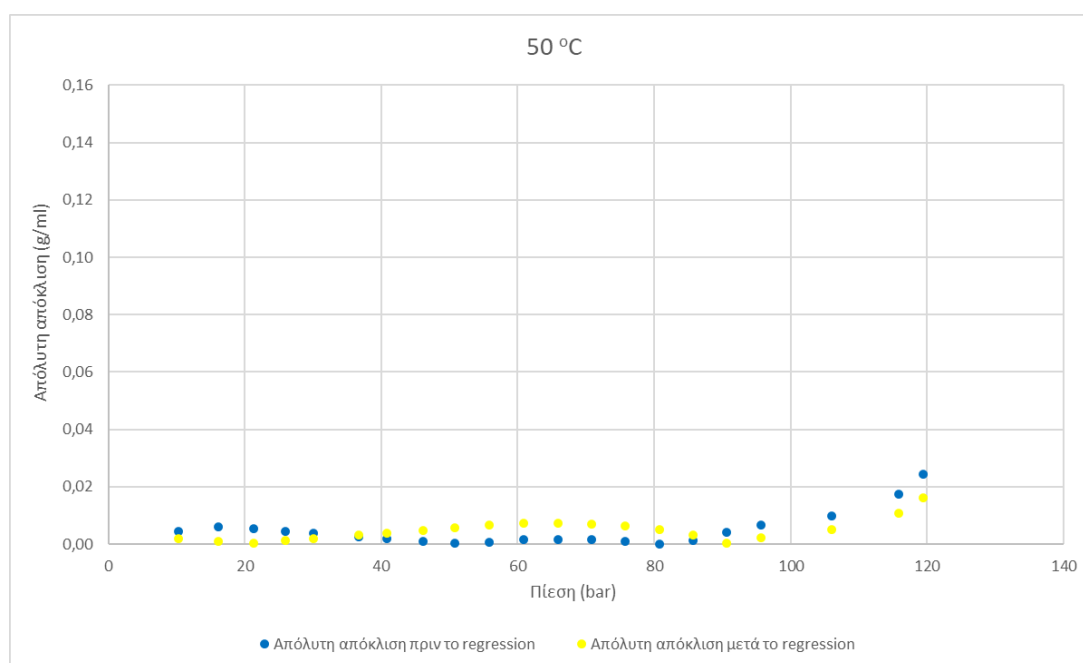
**Σχήμα Θ.53:** Διάγραμμα απόλυτης απόκλισης πυκνοτήτων προσομοιωτή με τις πειραματικές πυκνότητες, για το μείγμα Μεθάνιο 58,17% - Βουτάνιο 41,83% - CO<sub>2</sub> 0% στους 29°C



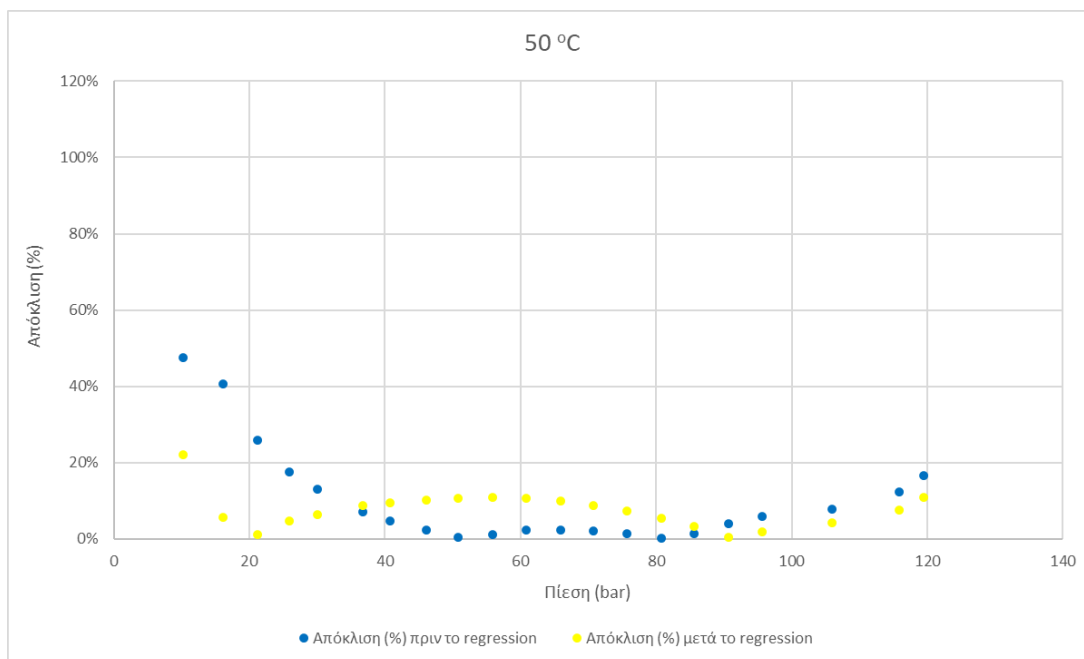
**Σχήμα Θ.54:** Διάγραμμα απόκλισης % πυκνοτήτων προσομοιωτή με τις πειραματικές πυκνότητες, για το μείγμα Μεθάνιο 58,17% - Βουτάνιο 41,83% - CO<sub>2</sub> 0% στους 29°C



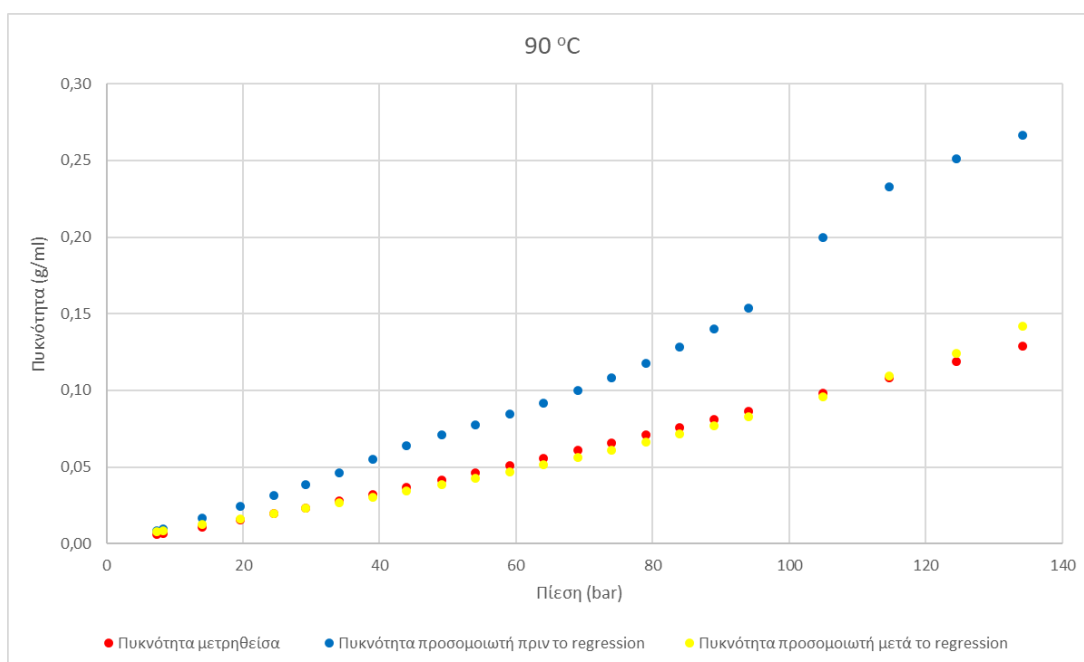
**Σχήμα Θ.55:** Διάγραμμα πυκνοτήτων για το μείγμα Μεθάνιο 58,17% - Βουτάνιο 41,83% - CO<sub>2</sub> 0% στους 50°C



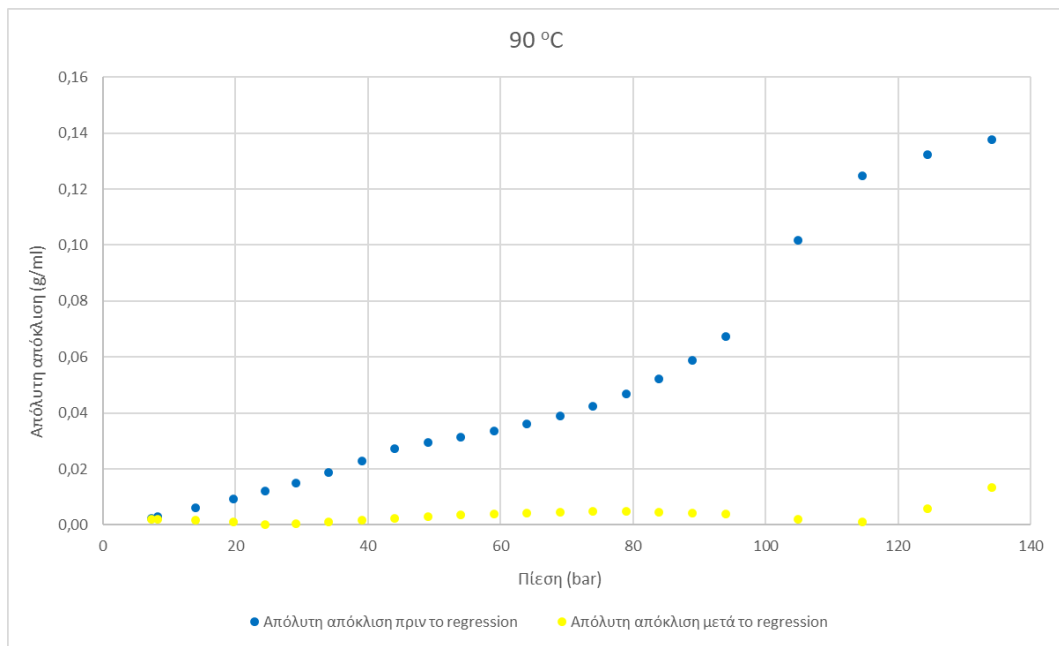
**Σχήμα Θ.56:** Διάγραμμα απόλυτης απόκλισης πυκνοτήτων προσομοιωτή με τις πειραματικές πυκνότητες, για το μείγμα Μεθάνιο 58,17% - Βουτάνιο 41,83% - CO<sub>2</sub> 0% στους 50°C



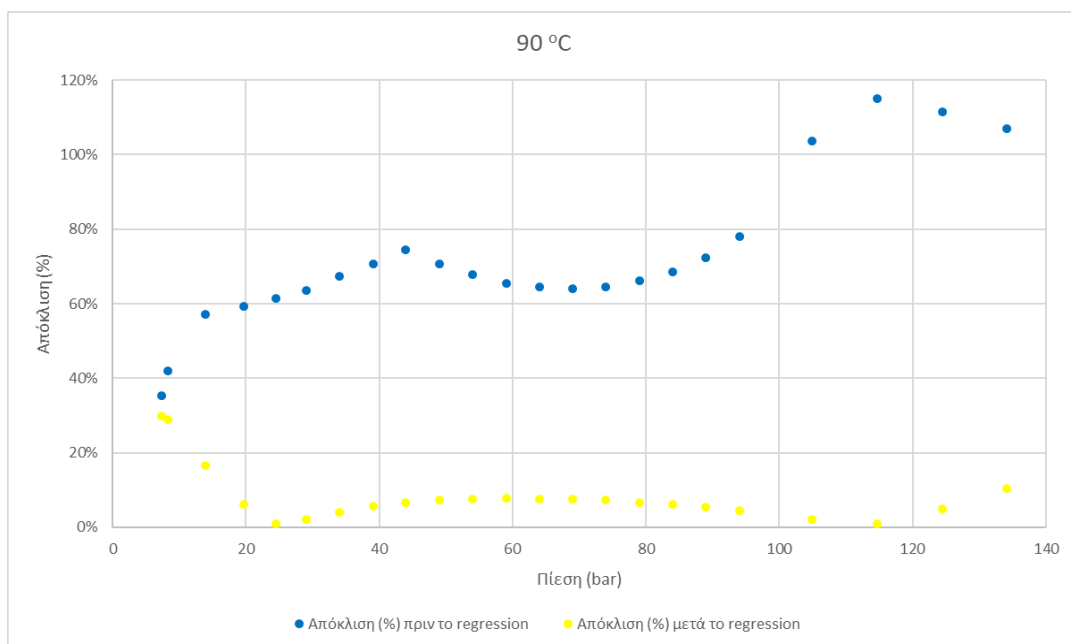
**Σχήμα 0.57:** Διάγραμμα απόκλισης % πυκνοτήτων προσομοιωτή με τις πειραματικές πυκνότητες, για το μείγμα Μεθάνιο 58,17% - Βουτάνιο 41,83% - CO<sub>2</sub> 0% στους 50°C



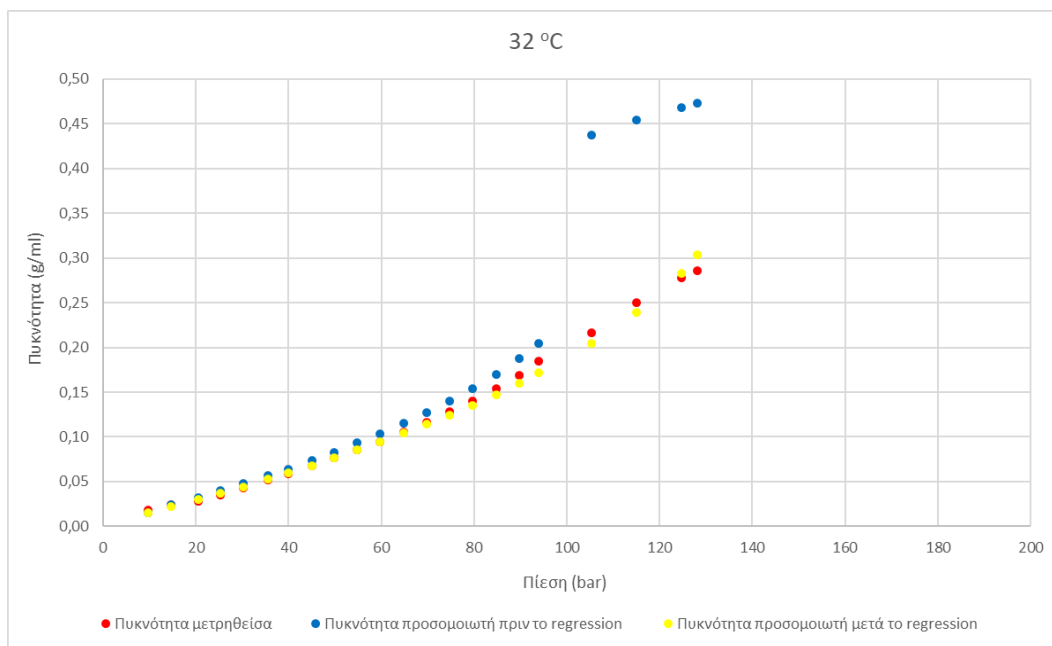
**Σχήμα 0.58:** Διάγραμμα πυκνοτήτων για το μείγμα Μεθάνιο 58,17% - Βουτάνιο 41,83% - CO<sub>2</sub> 0% στους 90°C



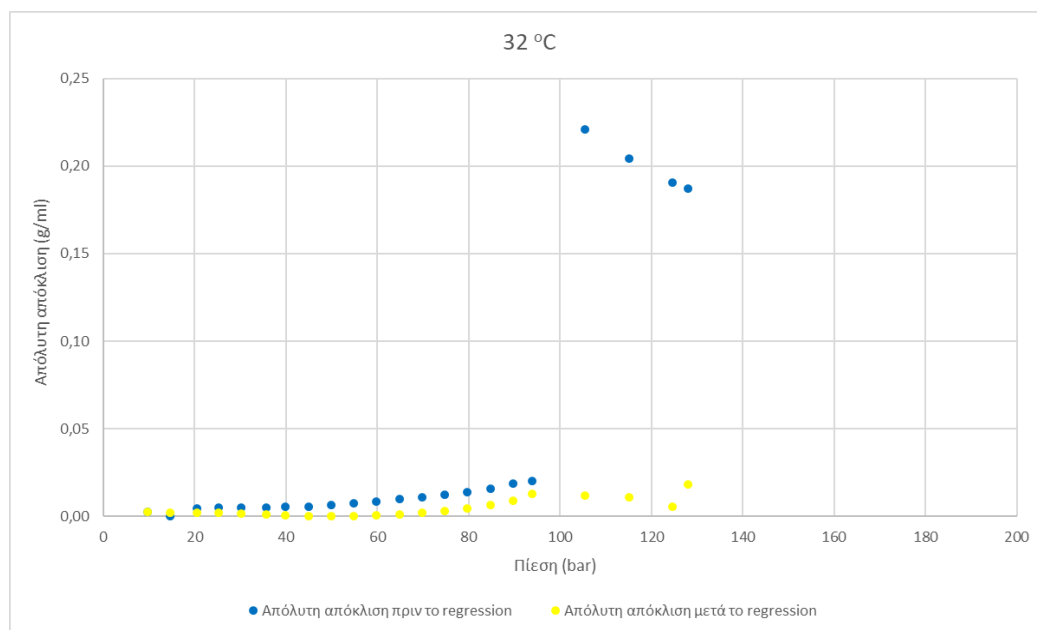
**Σχήμα 0.59:** Διάγραμμα απόλυτης απόκλισης πυκνοτήτων προσομοιωτή με τις πειραματικές πυκνότητες, για το μείγμα Μεθάνιο 58,17% - Βουτάνιο 41,83% - CO<sub>2</sub> 0% στους 90°C



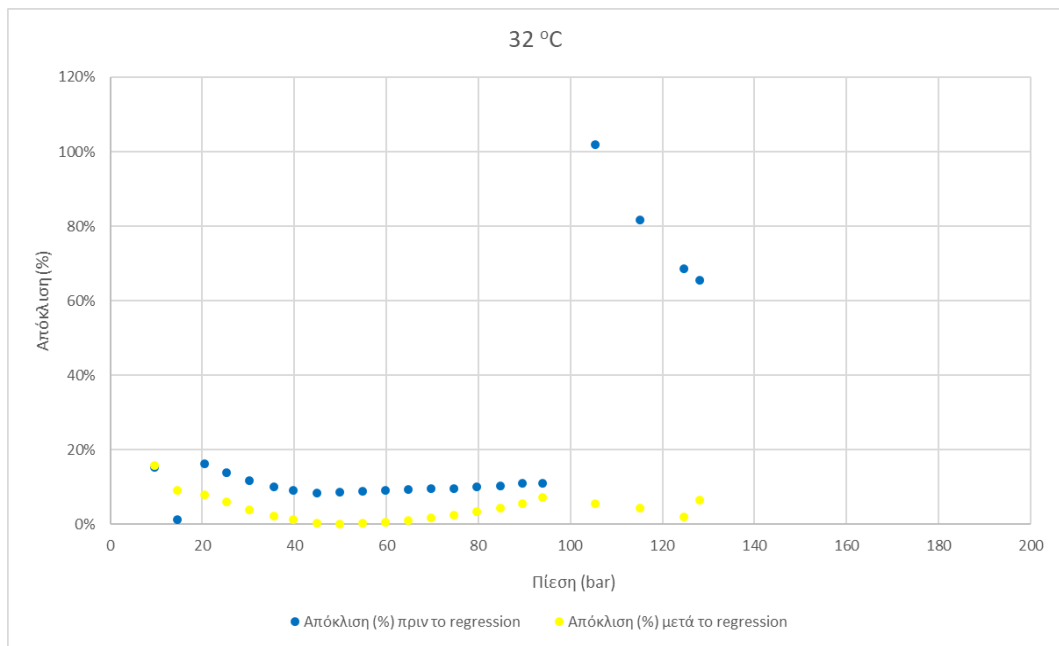
**Σχήμα 0.60:** Διάγραμμα απόκλισης % πυκνοτήτων προσομοιωτή με τις πειραματικές πυκνότητες, για το μείγμα Μεθάνιο 58,17% - Βουτάνιο 41,83% - CO<sub>2</sub> 0% στους 90°C



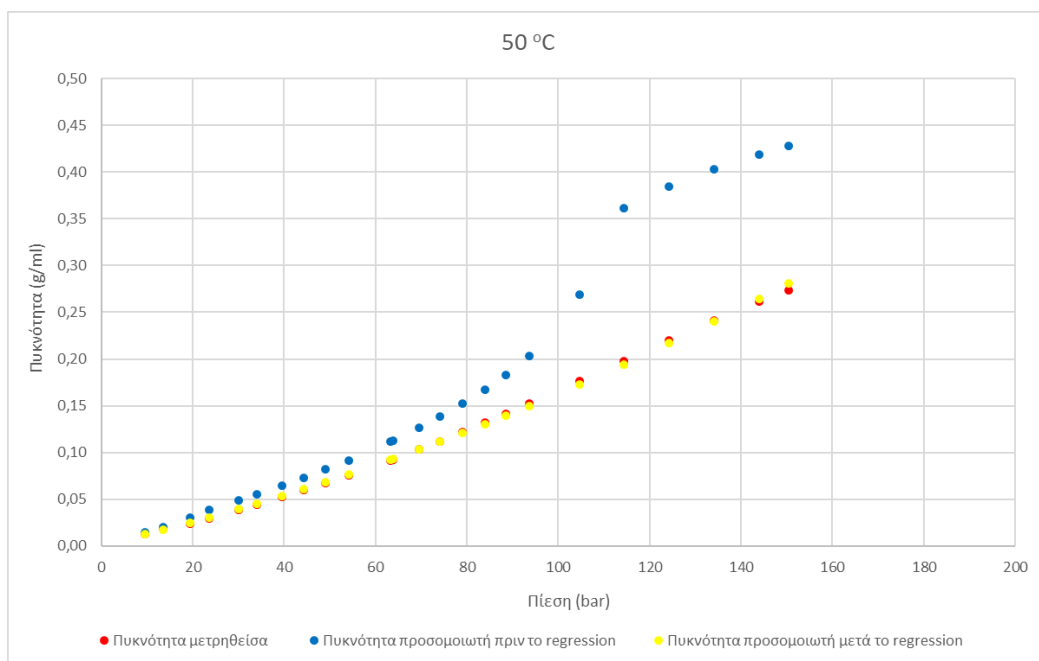
**Σχήμα 0.61:** Διάγραμμα πυκνοτήτων για το μείγμα Μεθάνιο 36,30% - Βουτάνιο 26,10% - CO<sub>2</sub> 37,60% στους 32°C



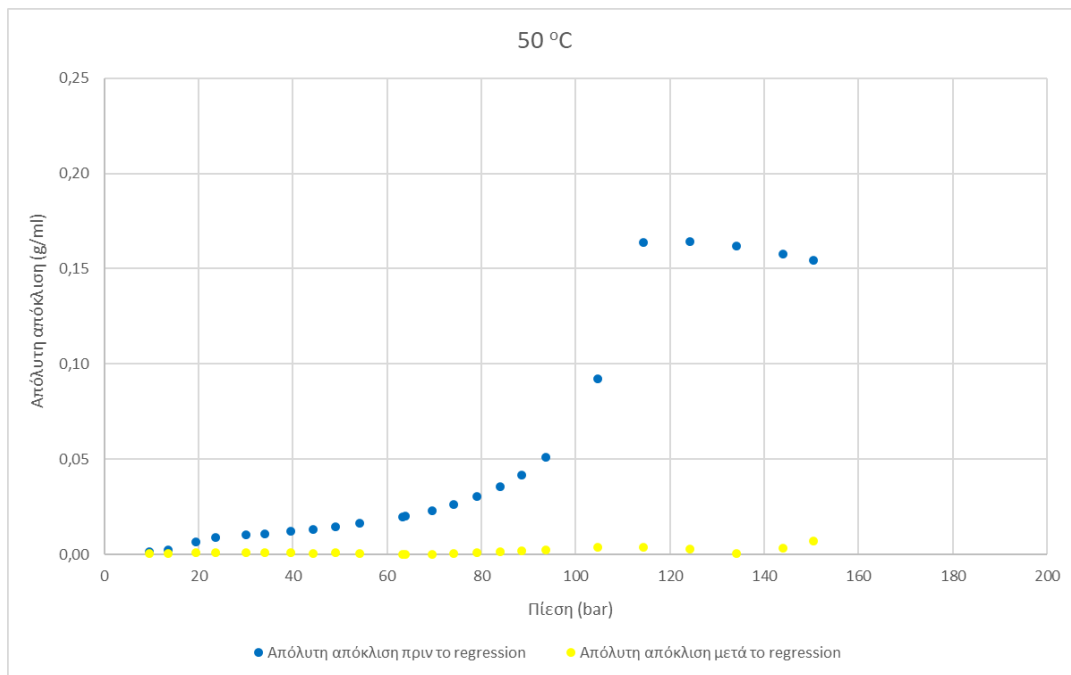
**Σχήμα 0.62:** Διάγραμμα απόλυτης απόκλισης πυκνοτήτων προσομοιωτή με τις πειραματικές πυκνότητες, για το μείγμα Μεθάνιο 36,30% - Βουτάνιο 26,10% - CO<sub>2</sub> 37,60% στους 32°C



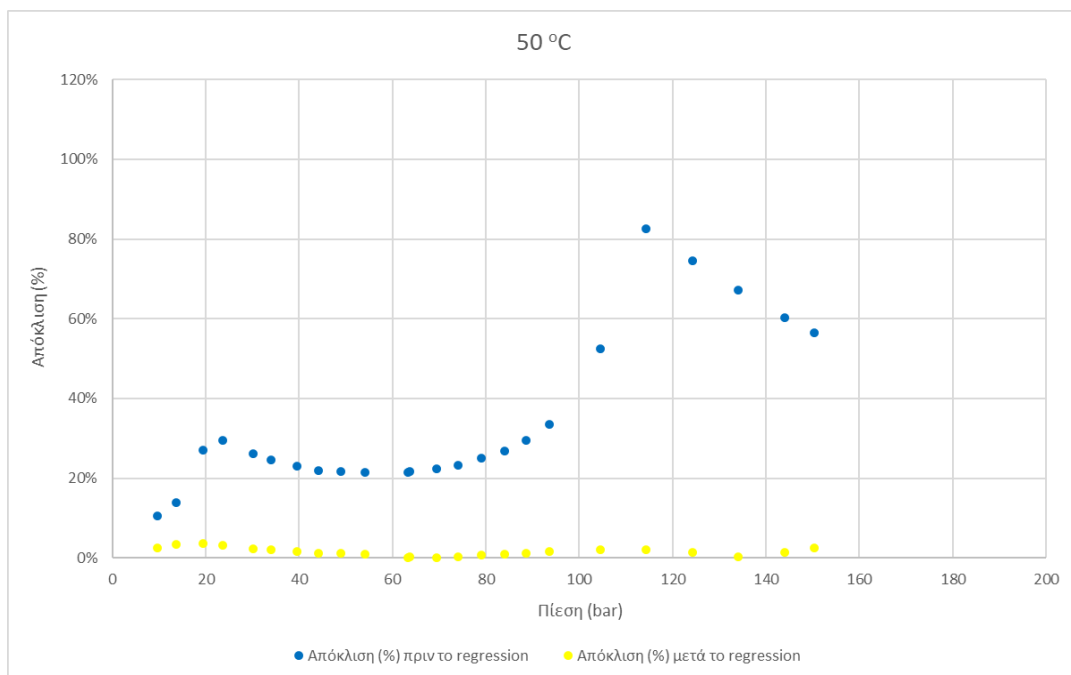
**Σχήμα 0.63:** Διάγραμμα απόκλισης % πυκνοτήτων προσομοιωτή με τις πειραματικές πυκνότητες, για το μείγμα Μεθάνιο 36,30% - Βουτάνιο 26,10% - CO<sub>2</sub> 37,60% στους 32°C



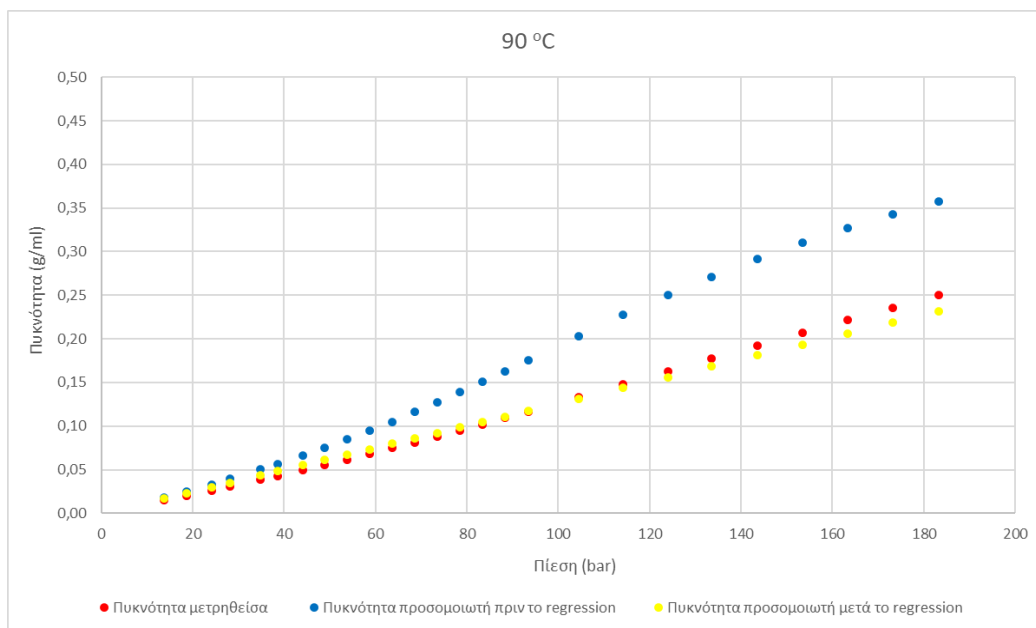
**Σχήμα 0.64:** Διάγραμμα πυκνοτήτων για το μείγμα Μεθάνιο 36,30% - Βουτάνιο 26,10% - CO<sub>2</sub> 37,60% στους 50°C



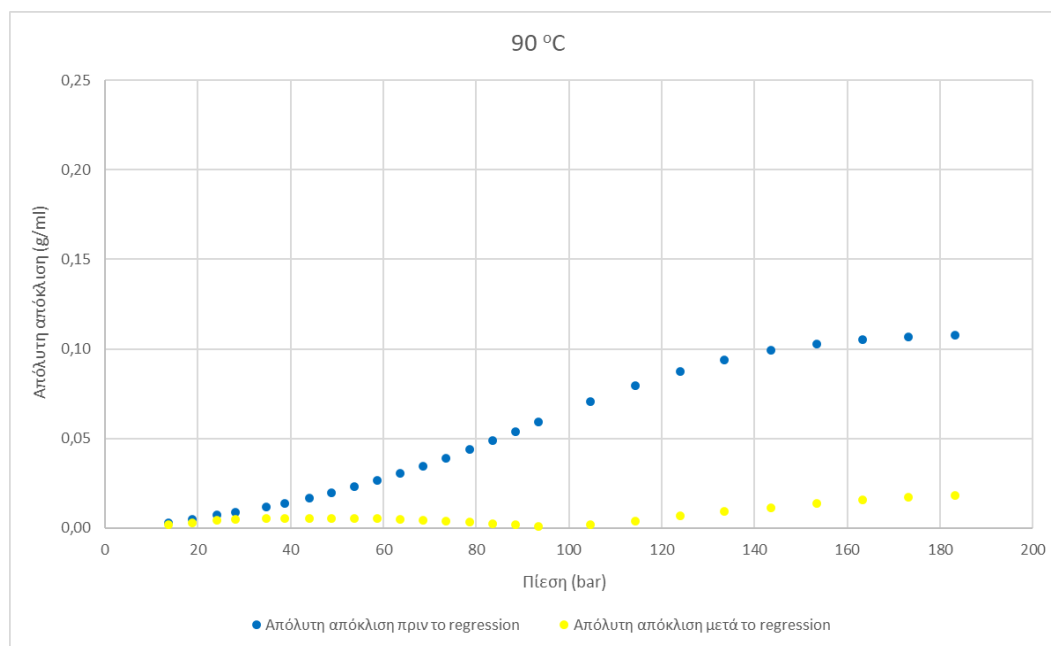
**Σχήμα Θ.65:** Διάγραμμα απόλυτης απόκλισης πυκνοτήτων προσομοιωτή με τις πειραματικές πυκνότητες, για το μείγμα Μεθάνιο 36,30% - Βουτάνιο 26,10% - CO<sub>2</sub> 37,60% στους 50°C



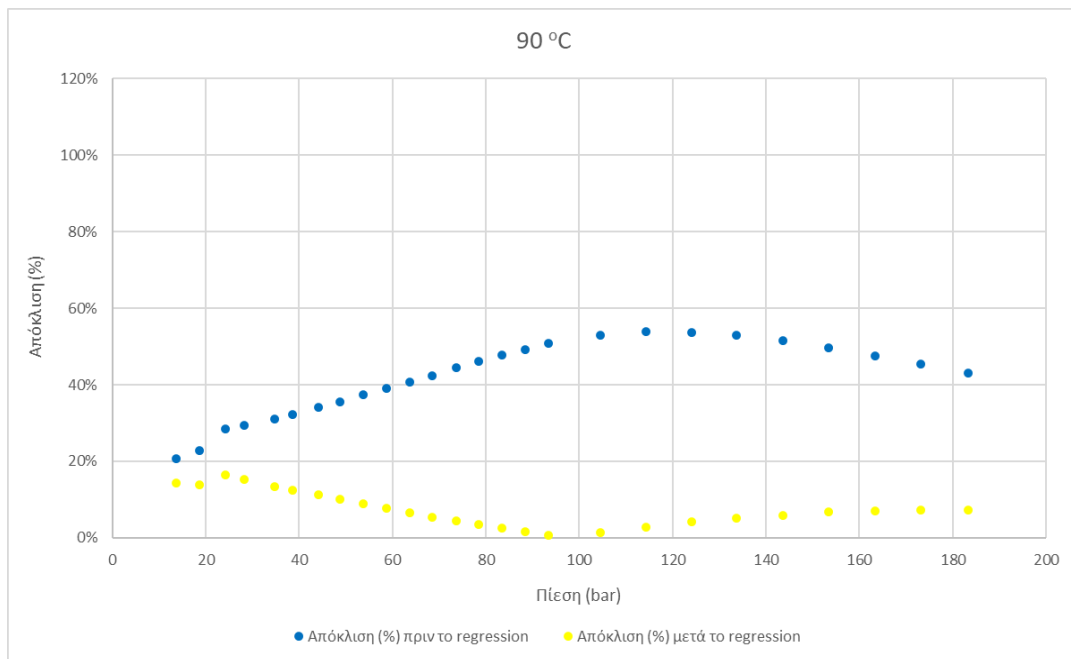
**Σχήμα Θ.66:** Διάγραμμα απόκλισης % πυκνοτήτων προσομοιωτή με τις πειραματικές πυκνότητες, για το μείγμα Μεθάνιο 36,30% - Βουτάνιο 26,10% - CO<sub>2</sub> 37,60% στους 50°C



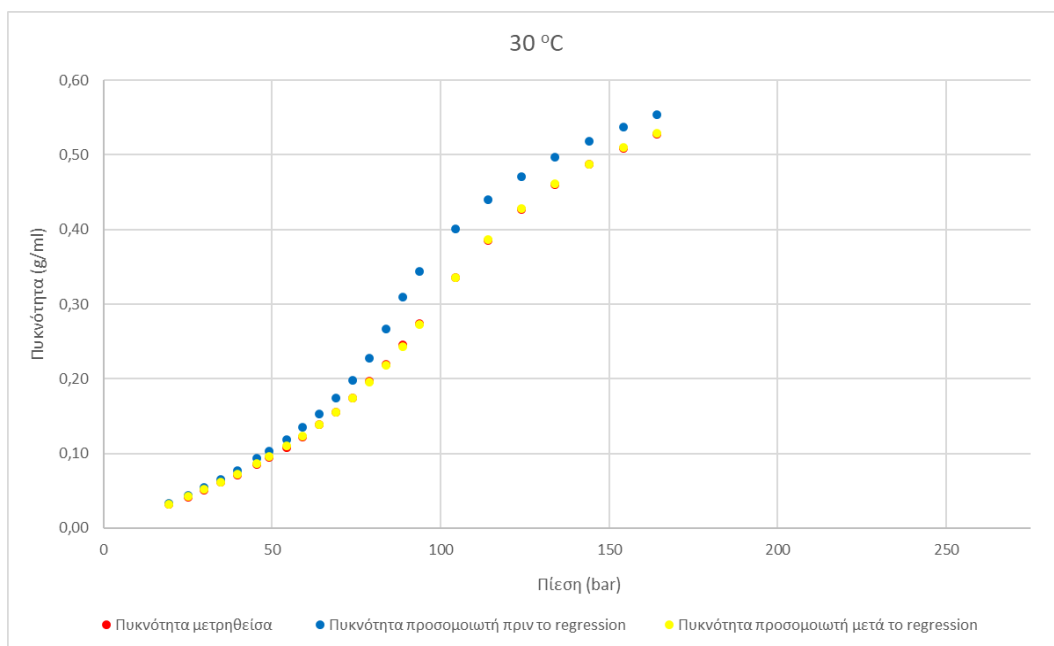
**Σχήμα Θ.67:** Διάγραμμα πυκνοτήτων για το μείγμα Μεθάνιο 36,30% - Βουτάνιο 26,10% - CO<sub>2</sub> 37,60% στους 90°C



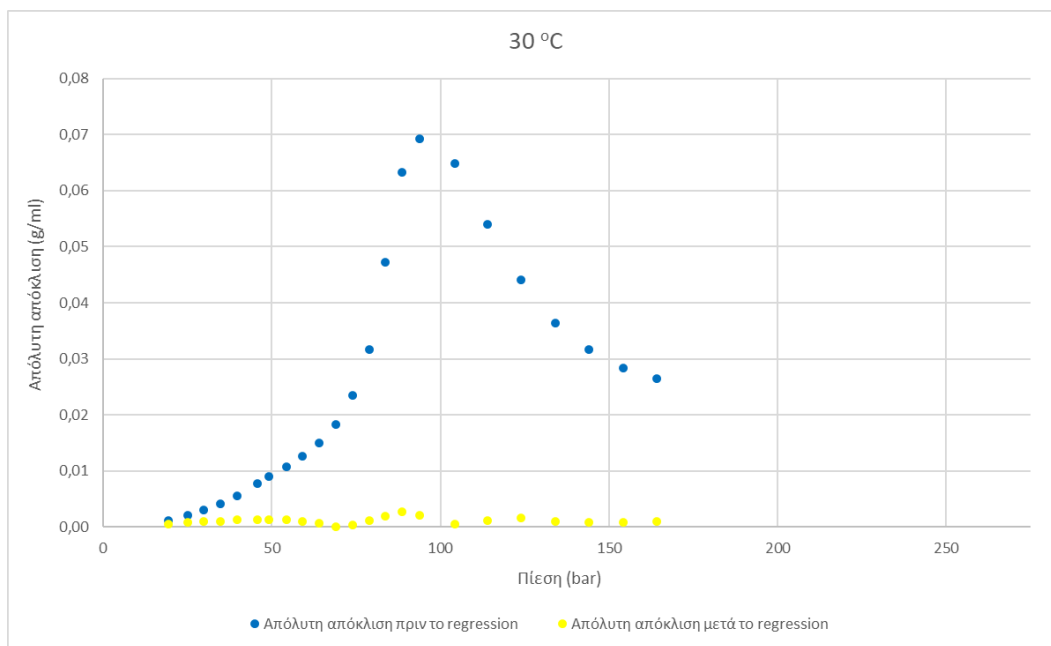
**Σχήμα Θ.68:** Διάγραμμα απόλυτης απόκλισης πυκνοτήτων προσομοιωτή με τις πειραματικές πυκνότητες, για το μείγμα Μεθάνιο 36,30% - Βουτάνιο 26,10% - CO<sub>2</sub> 37,60% στους 90°C



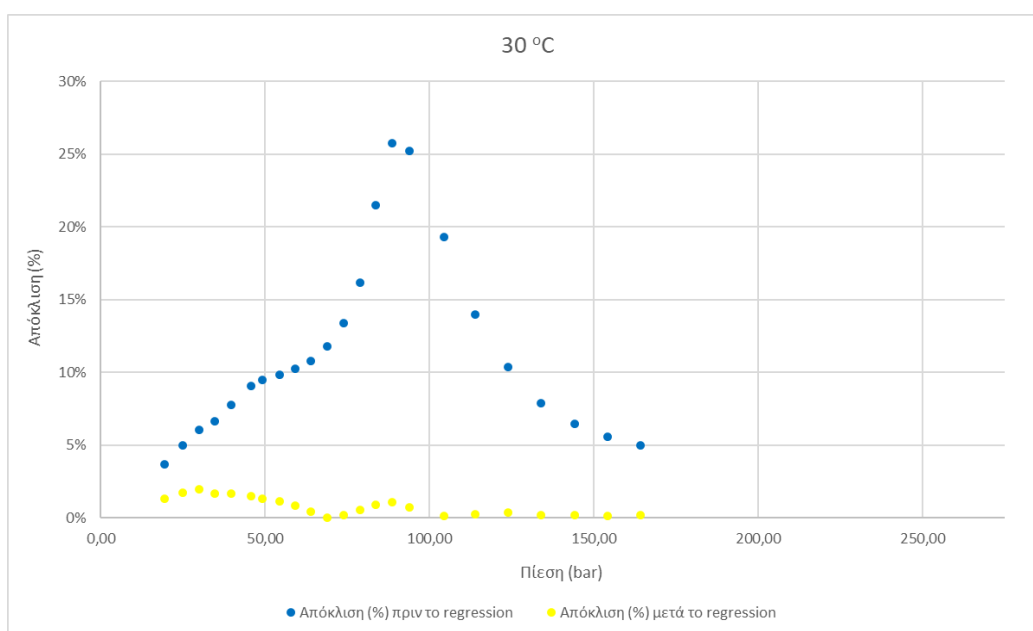
**Σχήμα Θ.69:** Διάγραμμα απόκλισης % πυκνοτήτων προσομοιωτή με τις πειραματικές πυκνότητες, για το μείγμα Μεθάνιο 36,30% - Βουτάνιο 26,10% - CO<sub>2</sub> 37,60% στους 90°C



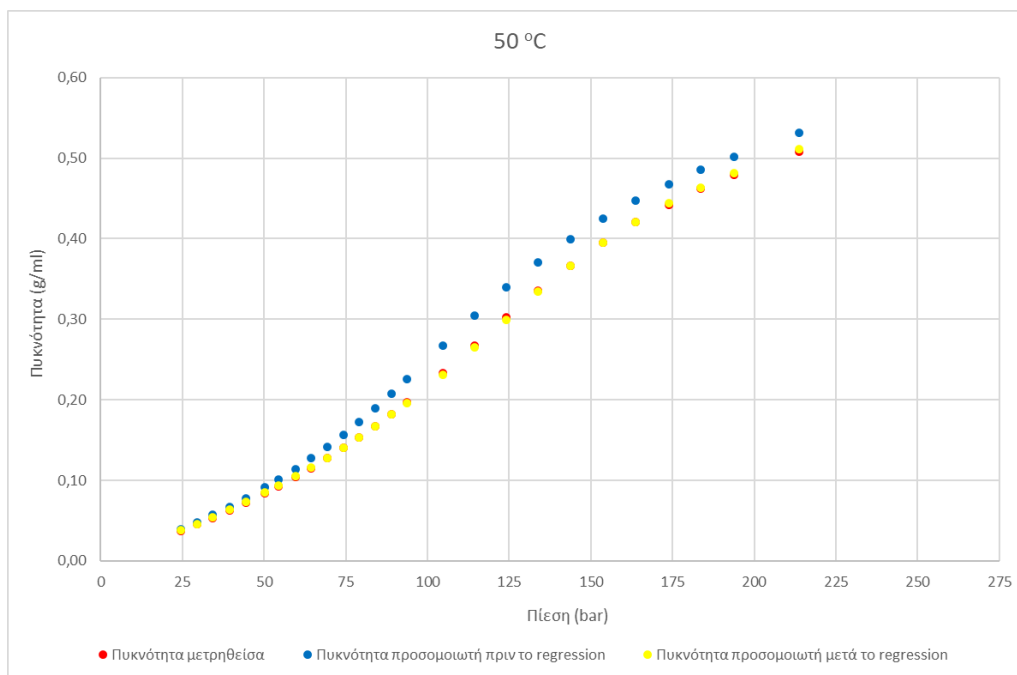
**Σχήμα Θ.70:** Διάγραμμα πυκνοτήτων για το μείγμα Μεθάνιο 25,60% - Βουτάνιο 9,30% - CO<sub>2</sub> 65% στους 30°C



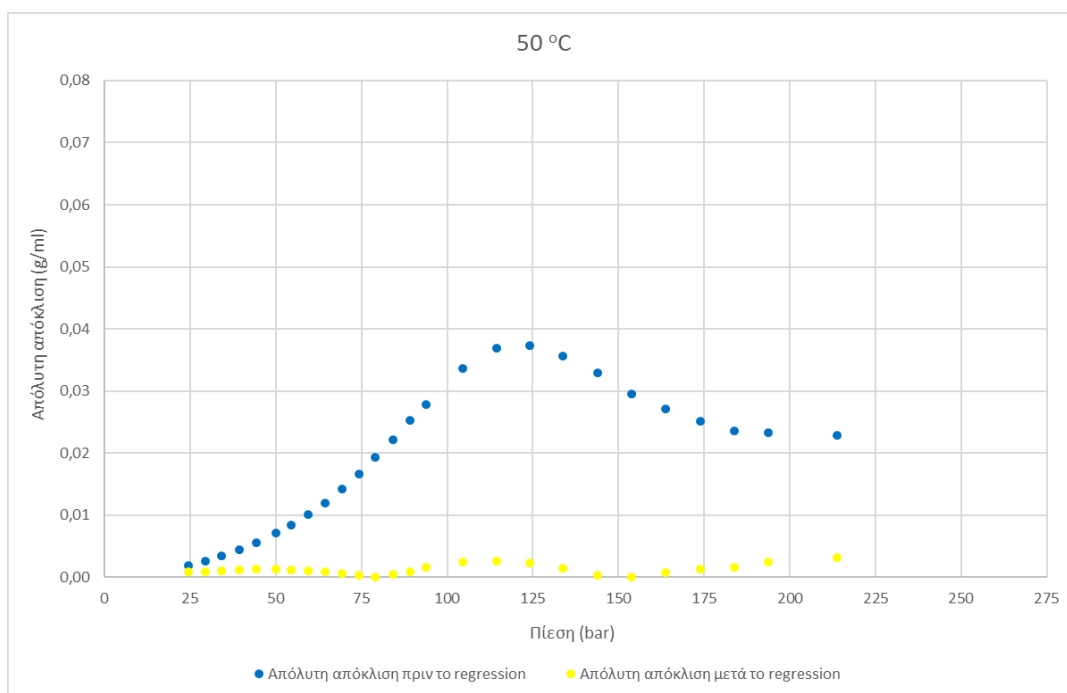
**Σχήμα Θ.71:** Διάγραμμα απόλυτης απόκλισης πυκνοτήτων προσομοιωτή με τις πειραματικές πυκνότητες, για το μείγμα Μεθάνιο 25,60% - Βουτάνιο 9,30% - CO<sub>2</sub> 65% στους 30°C



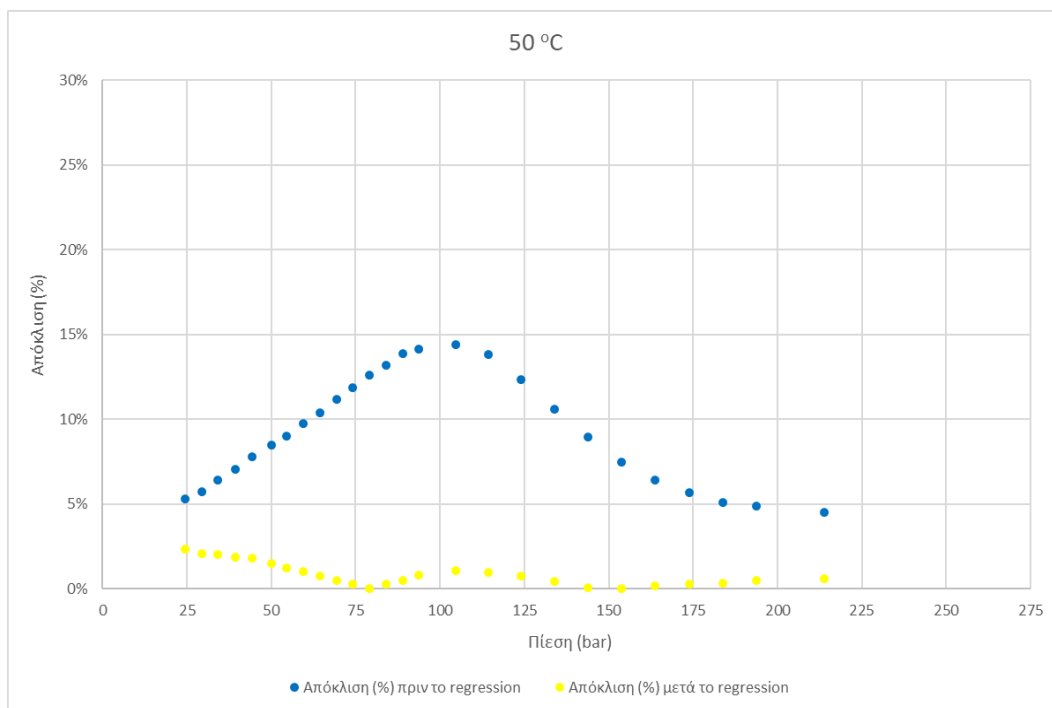
**Σχήμα Θ.72:** Διάγραμμα απόκλισης % πυκνοτήτων προσομοιωτή με τις πειραματικές πυκνότητες, για το μείγμα Μεθάνιο 25,60% - Βουτάνιο 9,30% - CO<sub>2</sub> 65% στους 30°C



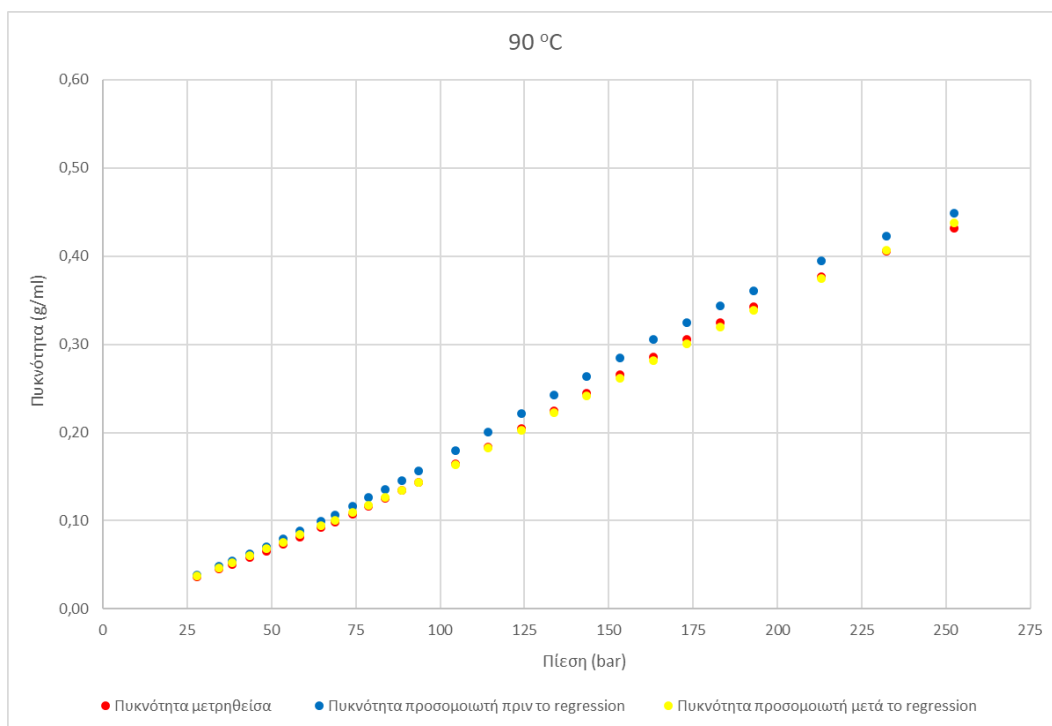
**Σχήμα Θ.73:** Διάγραμμα πυκνοτήτων για το μείγμα Μεθάνιο 25,60% - Βουτάνιο 9,30% - CO<sub>2</sub> 65% στους 50°C



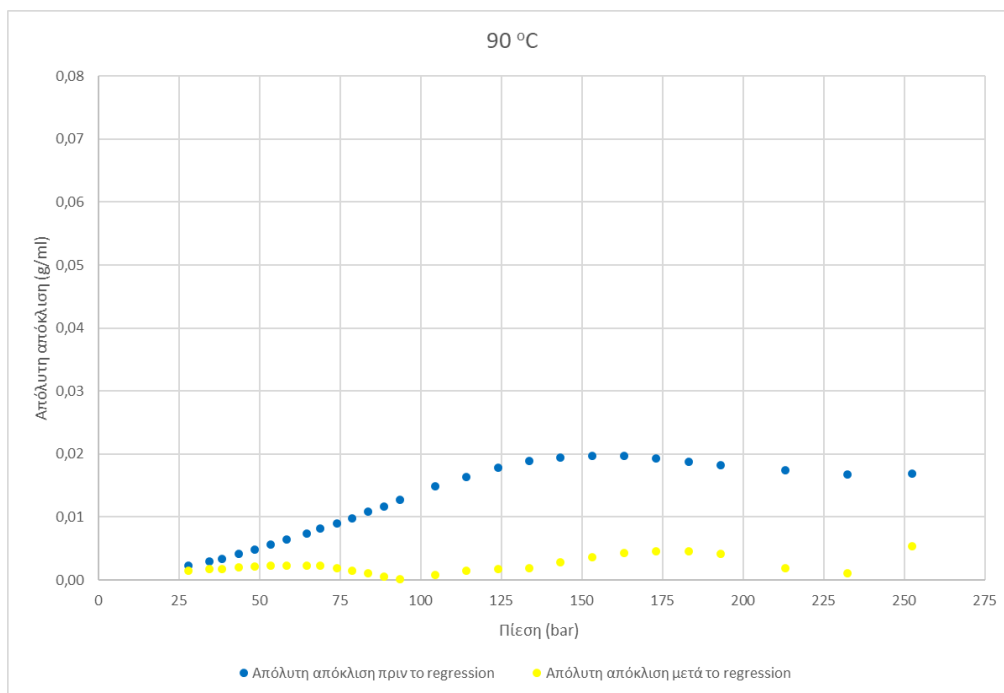
**Σχήμα Θ.74:** Διάγραμμα απόλυτης απόκλισης πυκνοτήτων προσομοιωτή με τις πειραματικές πυκνότητες, για το μείγμα Μεθάνιο 25,60% - Βουτάνιο 9,30% - CO<sub>2</sub> 65% στους 50°C



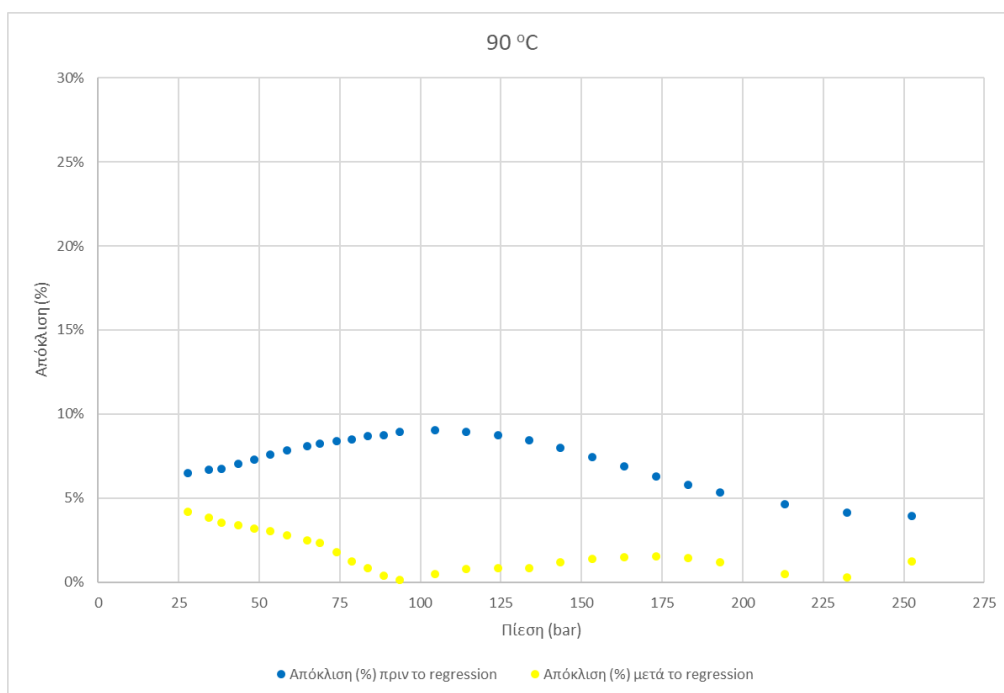
**Σχήμα 0.75:** Διάγραμμα απόκλισης % πυκνοτήτων προσομοιωτή με τις πειραματικές πυκνότητες, για το μείγμα Μεθάνιο 25,60% - Βουτάνιο 9,30% - CO<sub>2</sub> 65% στους 50°C



**Σχήμα 0.76:** Διάγραμμα πυκνοτήτων για το μείγμα Μεθάνιο 25,60% - Βουτάνιο 9,30% - CO<sub>2</sub> 65% στους 90°C





**Σχήμα Θ.77:** Διάγραμμα απόλυτης απόκλισης πυκνοτήτων προσομοιωτή με τις πειραματικές πυκνότητες, για το μείγμα Μεθάνιο 25,60% - Βουτάνιο 9,30% - CO<sub>2</sub> 65% στους 90°C





**Σχήμα Θ.78:** Διάγραμμα απόκλισης % πυκνοτήτων προσομοιωτή με τις πειραματικές πυκνότητες, για το μείγμα Μεθάνιο 25,60% - Βουτάνιο 9,30% - CO<sub>2</sub> 65% στους 90°C



# Παράρτημα I

Γενικά		Χημικές ιδιότητες	
Όνομα IUPAC	Μεθάνιο	Θερμότητα πλήρους καύσης	891 kJ/mole
Χημικά αναγνωριστικά		Βαθμός οκτανίου	120
Χημικός τύπος	CH <sub>4</sub>	Βαθμός κετανίου	0
Μοριακή μάζα	16,0425 amu	Ελάχιστη θερμοκρασία ανάφλεξης	-188°C
Συντομογραφίες	MeH		
Αριθμός CAS	74-82-8		
SMILES	C		
PubChem CID	297		
ChemSpider ID	291		
Δομή		Επικινδυνότητα	
Διπολική ροπή	0 D	<div></div>	
Μήκος δεσμού	108,7 pm	Εξαιρετικά εύφλεκτο (F+)	
Είδος δεσμού	ελαφρά πολωμένος ομοιοπολικός δεσμός σ (1s-2sp <sup>3</sup> )	Φράσεις κινδύνου	R12
		Φράσεις ασφαλείας	S2, S9, S16, S33
Πόλωση δεσμού	3%	Κίνδυνοι κατά NFPA 704	<div></div>
Γωνία δεσμού	109°28'		
Μοριακή γεωμετρία	τετραεδρική		
Φυσικές ιδιότητες		Εκτός αν σημειώνεται διαφορετικά, τα δεδομένα αφορούν υλικά υπό κανονικές συνθήκες περιβάλλοντος (25°C, 100 kPa).	
Σημείο τήξης	-182,5°C (90,65 K)		
Σημείο βρασμού	-161,6°C (111,55 K)		
Κρίσιμη θερμοκρασία	-82,6°C (190,55 K)		
Κρίσιμη πίεση	45,3984703 atm		
Πυκνότητα	0,717 kg/m <sup>3</sup>		
Διαλυτότητα στο νερό	35 g/m <sup>3</sup> (17°C)		
Τάση ατμών	40 atm (-86,3°C)		
Εμφάνιση	Άχρωμο και άοσμο αέριο [1]		

Πίνακας I.1: Χαρακτηρίστηκα και ιδιότητες Μεθανίου



Γενικά		Φυσικές ιδιότητες	
Όνομα IUPAC	Αιθάνιο	Σημείο τήξης	-181,76 °C
Άλλες ονομασίες	Διμεθύλιο	Σημείο βρασμού	-88,6 °C
Χημικά αναγνωριστικά		Κρίσιμη θερμοκρασία	32,2 °C
Χημικός τύπος	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	Κρίσιμη πίεση	48,3592401 atm
Μοριακή μάζα	30,07 amu	Πυκνότητα	1,283 kg/m <sup>3</sup>
Σύντομος συντακτικός τύπος	CH <sub>3</sub> CH <sub>3</sub>	Διαλυτότητα στο νερό	47 g/m <sup>3</sup> (17°C)
Συντομογραφίες	EtH, Me <sub>2</sub>	Τάση ατμών	40 atm (23,6 °C)
Αριθμός CAS	74-84-0	Εμφάνιση	Άχρωμο και άοσμο αέριο
SMILES	CC	Χημικές ιδιότητες	
InChI	1/C2H6/c1-2/h1-2H3	pK <sub>a</sub>	50
Αριθμός EINECS	200-814-8	Θερμότητα πλήρους καύσης	1.561 kJ/mole
Αριθμός RTECS	KH3800000	Βαθμός οκτανίου	108
Αριθμός UN	1035	Ελάχιστη θερμοκρασία ανάφλεξης	-135 °C
PubChem CID	6324	Σημείο αυτανάφλεξης	472 °C
ChemSpider ID	6084	Επικινδυνότητα	
Δομή			
Διπολική ροπή	0 D	Εξαιρετικά εύφλεκτο (F+)	
Μήκος δεσμού	C-H: 108,7 pm C-C: 153,51 pm	Φράσεις κινδύνου	R12
Είδος δεσμού	C-H: ελαφρά πολωμένος ομοιοπολικός δεσμός σ (1s-2sp <sup>3</sup> ) C-C: ομοιοπολικός δεσμός σ (2sp <sup>3</sup> -2sp <sup>3</sup> )	Φράσεις ασφαλείας	S2, S9, S16, S33
Πόλωση δεσμού	C-H: 3%	Κίνδυνοι κατά NFPA 704	
Γωνία δεσμού	HCC: 111,17°		
Μοριακή γεωμετρία	διτετραεδρική		
		Εκτός αν σημειώνεται διαφορετικά, τα δεδομένα αφορούν υλικά υπό κανονικές συνθήκες περιβάλλοντος (25°C, 100 kPa).	

**Πίνακας I.2:** Χαρακτηρίστηκα και ιδιότητες Αιθανίου

Γενικά		Φυσικές ιδιότητες	
Όνομα IUPAC	Προπάνιο	Σημείο τήξης	-187,6 °C
Άλλες ονομασίες	Μεθυλαιθάνιο Διμεθυλομεθάνιο	Σημείο βρασμού	-42,09 °C
Χημικά αναγνωριστικά		Κρίσιμη θερμοκρασία	96,672 °C
Χημικός τύπος	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	Κρίσιμη πίεση	41,9367382 atm
Μοριακή μάζα	44,1 amu	Πυκνότητα	2,0098 kg/m <sup>3</sup> (αέριο στους 0 °C, 1013 mbar πίεση)
Σύντομος συντακτικός τύπος	CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> CH <sub>3</sub>		581,2 kg/m <sup>3</sup> (υγρό στο σημείο βρασμού).
Συντομογραφίες	PrH, EtMe	Διαλυτότητα στο νερό	70 g/m <sup>3</sup> (20 °C)
Αριθμός CAS	74-98-6	Τάση ατμών	10 atm (25,6 °C)
SMILES	CCC	Εμφάνιση	Άχρωμο και άοσμο αέριο
InChI	1/C3H8/c1-3-2/h3H2,1-2H3	Χημικές ιδιότητες	
Αριθμός RTECS	TX2275000	Θερμότητα πλήρους καύσης	2.200 kJ/mole
Αριθμός UN	1978	Βαθμός οκτανίου	97,1
PubChem CID	6334	Βαθμός κετανίου	-20
ChemSpider ID	6094	Ελάχιστη θερμοκρασία ανάφλεξης	-135 °C
Δομή		Σημείο αυτανάφλεξης	472 °C
Μήκος δεσμού	C-H: 108,7 pm C-C: 153,51 pm	Επικινδυνότητα	
Είδος δεσμού	C-H: ελαφρά πολωμένος ομοιοπολικός δεσμός σ (1s-2sp <sup>3</sup> ) C-C: ομοιοπολικός δεσμός σ (2sp <sup>3</sup> -2sp <sup>3</sup> )	 Εξαιρετικά εύφλεκτο (F+)	
Πόλωση δεσμού	C-H: 3%		
Γωνία δεσμού	HCC: 111,17°	Φράσεις κινδύνου	R12
Μοριακή γεωμετρία	τριτετραεδρική	Φράσεις ασφαλείας	S2, S9, S16, S33
		Κίνδυνοι κατά NFPA 704	
		Εκτός αν σημειώνεται διαφορετικά, τα δεδομένα αφορούν υλικά υπό κανονικές συνθήκες περιβάλλοντος (25°C, 100 kPa).	

Πίνακας I.3: Χαρακτηριστικά και ιδιότητες Προπανίου

Γενικά	
Όνομα IUPAC	Βουτάνιο
Άλλες ονομασίες	Διαιθύλιο
Χημικά αναγνωριστικά	
Χημικός τύπος	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>
Μοριακή μάζα	58,12 g/mol
Σύντομος συντακτικός τύπος	CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> CH <sub>3</sub>
Συντομογραφίες	BuH, Et <sub>2</sub>
Αριθμός CAS	106-97-8
SMILES	CCCC
InChI	1/C4H10/c1-3-4-2/h3-4H2,1-2H3
Αριθμός UN	1011
PubChem CID	7843
ChemSpider ID	7555
Ισομέρεια	
Ισομερή θέσης	1 Μεθυλοπροπάνιο
Φυσικές ιδιότητες	
Σημείο τήξης	-138,2 °C (134,95 K)
Σημείο βρασμού	-0,5 °C (272,65 K)
Πυκνότητα	2,48 kg/m <sup>3</sup> (15 °C)
Διαλυτότητα στο νερό	61 g/m <sup>3</sup>
Εμφάνιση	Αχρωμο αέριο

Χημικές ιδιότητες	
Βαθμός οκτανίου	114 <sup>[1]</sup> 89,6 <sup>[2]</sup>
Βαθμός κετανίου	22
Ελάχιστη θερμοκρασία ανάφλεξης	-60 °C (213,15 K)
Σημείο αυτανάφλεξης	405 °C (678,15 K)
Επικινδυνότητα	
	
Εύφλεκτο	
Φράσεις κινδύνου	R12
Φράσεις ασφαλείας	S2, S9, S16
MSDS	Σύνδεσμος MSDS <a href="#">ε</a>
Κίνδυνοι κατά NFPA 704	
Εκτός αν σημειώνεται διαφορετικά, τα δεδομένα αφορούν υλικά υπό κανονικές συνθήκες περιβάλλοντος (25°C, 100 kPa).	

Πίνακας I.4: Χαρακτηρίστηκα και ιδιότητες Βουτανίου

Γενικά	
Όνομα IUPAC	Διοξείδιο του άνθρακα
Άλλες ονομασίες	ανθρακικός ανυδρίτης, ξηρός πάγος (ως στερεό)
Χημικά αναγνωριστικά	
Μοριακή μάζα	44.010 g/mol, αέριο
Αριθμός CAS	124-38-9
SMILES	C(=O)=O
InChI	1/CO2/c2-1-3
Αριθμός EINECS	204-696-9
Αριθμός RTECS	FF6400000
PubChem CID	280
Φυσικές ιδιότητες	
Σημείο τήξης	-78 °C (195K) (-109 °F ) εξαχνώνεται
Σημείο βρασμού	-57 °C (216K) (-70 °F) υπό πίεση
Πυκνότητα	1,562 g/mL (στερεό 1 Atm, -78,5 °C) 0,770 g/mL (υγρό 56 Atm, 20 °C) 1.977 g/L (αέριο 1 Atm, 0 °C) 849,6 g/L (υπερκρίσιμο υγρό 150 Atm, 30 °C)
Διαλυτότητα στο νερό	1,45 g/L
Ιξώδες	0.07 cP στους -78 °C
Δείκτης διάθλασης , n <sub>D</sub>	1,1120
Χημικές ιδιότητες	
pK <sub>a</sub>	6,35, 10,33
Ελάχιστη θερμοκρασία ανάφλεξης	Μη αναφλέξιμο
Επικινδυνότητα	
Φράσεις ασφαλείας	<a href="#">S9</a> , <a href="#">S23</a> , <a href="#">S26</a> , <a href="#">S36</a>
Εκτός αν σημειώνεται διαφορετικά, τα δεδομένα αφορούν υλικά υπό κανονικές συνθήκες περιβάλλοντος (25°C, 100 kPa).	

**Πίνακας I.5:** Χαρακτηρίστηκα και ιδιότητες Διοξειδίου του Άνθρακα