



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

**Πειραματικός προσδιορισμός του συντελεστή απόκλισης (z)
μειγμάτων υγρών υδρογονανθράκων με μεθάνιο**

Διπλωματική Εργασία

Σταυρούλα Π. Ζερβοπούλου

Εξεταστική Επιτροπή

Καθ. Ν. Βαρότσης (επιβλέπων)

Επ. Καθ. Ν. Πασαδάκης

Δρ. Β. Γαγάνης

Χανιά

Μάρτιος, 2011

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Πρώτα απ' όλα, θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας μου, Καθηγητή κ. Νικόλαο Βαρότση, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια της δουλειάς μου. Επίσης, είμαι ευγνώμων στα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής της διπλωματικής εργασίας μου, Επ. Καθηγητή κ. Νικόλαο Πασαδάκη για το χρόνο που μου αφιέρωσε. Οφείλω βαθιές ευχαριστίες στο Διδάκτορα του Τμήματός κ. Βασίλειο Γαγάνη τόσο για τη συμμετοχή στην εξεταστική επιτροπή όσο και για την αμέριστη βοήθεια που μου παρείχε κατά την εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας.

Το πιο μεγάλο και βαθύ ευχαριστώ ανήκει στον υποψήφιο Διδάκτορα του Τμήματός κ. Μαρινάκη Δημήτριο για την αμέριστη υποστήριξη και βοήθειά του καθώς και την απεριόριστη υπομονή που επέδειξε κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Σταυρούλα Ζερβοπούλου

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Από τα σημαντικότερα φυσικά μεγέθη στη βιομηχανία πετρελαίου-φυσικού αερίου είναι ο συντελεστής απόκλισης Z . Η τιμή του συντελεστή απόκλισης είναι συνάρτηση της πίεσης, της θερμοκρασίας και της σύστασης του μείγματος. Ο συντελεστής απόκλισης σχετίζεται με τον προσδιορισμό του όγκου του ρευστού και κατά συνέπεια με την πυκνότητα του, ενώ αποτελεί ένα εξαιρετικά κρίσιμο μέγεθος τόσο για τη διαχείριση των κοιτασμάτων και την παραγωγή υδρογονανθράκων, όσο και για τη μεταφορά και την αποθήκευση του φυσικού αερίου.

Ένα εξίσου σημαντικό μέγεθος στη βιομηχανία πετρελαίου-φυσικού αερίου είναι ο συντελεστής ισοθερμοκρασιακής συμπιεστότητας c . Ο συντελεστής ισοθερμοκρασιακής συμπιεστότητας δείχνει πόσο μειώνεται ο όγκος του ρευστού και κατά συνέπεια και η πυκνότητά του καθώς πέφτει η πίεση, υπό σταθερή θερμοκρασία. Ο συντελεστής ισοθερμοκρασιακής συμπιεστότητας στη βιομηχανία πετρελαίου-φυσικού αερίου δίνει το μέτρο της παραγωγής υδρογονανθράκων κατά την πρωτογενή παραγωγή τους.

Το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι ο πειραματικός προσδιορισμός του συντελεστή απόκλισης Z μειγμάτων υγρών υδρογονανθράκων. Σχεδιάστηκε πειραματική διάταξη, πραγματοποιήθηκε ο έλεγχος στεγανότητας και ακολούθησε η βαθμονόμηση του συστήματος που συνίστατο στην ογκομέτρηση της διάταξης με νερό και τον υπολογισμό των απαραίτητων διορθώσεων, ως προς τη συμπιεστότητα της διάταξης και του νερού και την αύξηση της χωρητικότητας λόγω θερμικής διαστολής, των μετρήσεων που καταγράφονταν.

Οι υγροί υδρογονάνθρακες που χρησιμοποιήθηκαν για τις πειραματικές μετρήσεις ήταν το κανονικό πεντάνιο, το τολουένιο και το κυκλοεξάνιο. Τα μείγματα που μελετήθηκαν ήταν συνδυασμός των παραπάνω καθαρών συστατικών με μεθάνιο, έχοντας σύσταση 90% υγρός υδρογονάνθρακας – 10% μεθάνιο κατά mole και 70% υγρός υδρογονάνθρακας – 30% μεθάνιο κατά mole. Τα πειράματα διεξήχθησαν στους 28°C, 50°C και 90°C.

Οι προβλέψεις συγκρίθηκαν με τις τιμές που παρέχονται στη βιβλιογραφία καθώς επίσης και με της κυβικής καταστατικής εξίσωσης των Peng – Robinson. Στους υγρούς υδρογονάνθρακες και στα μείγματα αυτών χρησιμοποιήθηκε η τεχνική προσθετικής διόρθωσης όγκου της καταστατικής εξίσωσης (volume translation).

Το κείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελείται από πέντε επιμέρους ενότητες. Αρχικά γίνεται μια γενική αναφορά στους υδρογονάνθρακες και τα κοιτάσματά τους. Ακολουθούν η περιγραφή της θερμοδυναμικής συμπεριφοράς των πετρελαϊκών ρευστών και ο ορισμός του συντελεστή ισοθερμοκρασιακής συμπιεστότητας. Εν συνεχεία παρουσιάζεται ο τρόπος υπολογισμού του συντελεστή απόκλισης και δίνεται έμφαση στο μαθηματικό μοντέλο της καταστατικής εξίσωσης των Peng – Robinson. Στο πειραματικό μέρος περιγράφονται ο εξοπλισμός που απαιτήθηκε για την εκτέλεση των πειραμάτων, ο σχεδιασμός και η βαθμονόμηση της διάταξης, η ογκομετρική της συμπεριφορά καθώς και οι διορθώσεις που πρέπει να ληφθούν υπόψη λόγω της συμπιεστότητας της διάταξης και του νερού και της αύξησης της χωρητικότητας λόγω θερμικής διαστολής. Τέλος, παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα και γίνεται σύγκριση με αντίστοιχες μετρήσεις που υπάρχουν στη βιβλιογραφία και με τις προβλέψεις της κυβικής καταστατικής εξίσωσης των Peng–Robinson και ακολούθως εξάγονται συμπεράσματα.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Ευχαριστίες	III
Περίληψη	V
Πίνακας περιεχομένων	VII

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ 1

1.1 Σύσταση του πετρελαίου	3
1.1.1 Κατηγορίες υδρογονανθράκων	3
1.1.2 Συστηματική ταξινόμηση των πετρελαίων	3
1.2 Δημιουργία κοιτασμάτων υδρογονανθράκων	4
1.3 Στάδια εκμετάλλευσης πετρελαίου	5
1.3.1 Στάδιο ανίχνευσης κοιτασμάτων πετρελαίου	5
1.3.2 Ερευνητικές γεωτρήσεις – Δειγματοληψία	5
1.3.3 Αξιολόγηση ταμιευτήρα	6
1.3.4 Στάδιο παραγωγής	6
1.3.5 Μεταφορά του πετρελαίου	6
1.3.6 Χρήση του πετρελαίου	6
1.4 Αντικείμενο διπλωματικής εργασίας	8

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΠΕΤΡΕΛΑΪΚΩΝ

ΡΕΥΣΤΩΝ 9

2.1 Εισαγωγή	11
2.2 Θερμοδυναμική συμπεριφορά των πετρελαϊκών ρευστών	11
2.3 Κατηγορίες πετρελαϊκών ρευστών	15
2.3.1 Συστήματα Ξηρού Αερίου (Dry Gas)	15
2.3.2 Συστήματα Αερίων–Συμπυκνωμάτων (Gas-Condensates)	16
2.3.3 Κορεσμένοι ταμιευτήρες	16

2.3.4	Συστήματα Πετρελαίου (Black Oil)	17
-------	--	----

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

	ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ ΦΑΣΕΩΝ	19
3.1	Εισαγωγή	21
3.2	Μαθηματικές-εμπειρικές σχέσεις	21
3.3	Ιστορική εξέλιξη των καταστατικών εξισώσεων	22
3.4	Κυβικές καταστατικές εξισώσεις	24
3.4.1	Καταστατική εξίσωση του Van der Waals	24
3.4.2	Καταστατική εξίσωση των Redlich-Kwong (RK)	25
3.4.3	Καταστατική εξίσωση των Soave-Redlich-Kwong (SRK)	25
3.4.4	Καταστατική εξίσωση των Peng-Robinson (PR)	26
3.5	Εύρεση των Z και c μέσω κυβικής καταστατικής εξίσωσης	28
3.6	Επίλυση της τριτοβάθμιας εξίσωσης	32

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ – ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ

	– ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ	33
4.1	Εισαγωγή	35
4.2	Περιγραφή πειραματικής διάταξης	35
4.3	Αναλυτική περιγραφή απαιτούμενου εξοπλισμού	36
4.3.1	Αντλία Teledyne ISCO	38
4.3.2	Βαλβίδες	39
4.3.3	Δοχείο φόρτωσης υγρών	40
4.3.4	Ηλεκτρονικός Υπολογιστής	40
4.3.5	Θερμόμετρο	41
4.3.6	Κάρτα ψηφιοποίησης σημάτων	41
4.3.7	Εργαστηριακός κλίβανος	43
4.3.8	Μανόμετρα	44

4.3.9	Αυτόκλειστο	46
4.3.10	Σύνδεσμοι υψηλών πιέσεων - Σωλήνες	47
4.3.11	Συσκευή μέτρησης όγκου αερίων, Gasometer	49
4.3.12	Φιάλη φόρτωσης μεθανίου – μανοεκτονωτής	50
4.4	Μέτρα ασφάλειας κατά την εκτέλεση του πειραματικού έργου	51
4.5	Λειτουργία πειραματικής διάταξης	52
4.5.1	Έλεγχος στεγανότητας	53
4.5.2	Βαθμονόμηση της πειραματικής διάταξης	56
4.5.2.1	Βαθμονόμηση οργάνων	56
4.5.2.2	Ογκομέτρηση των βρόχων της πειραματικής διάταξης	65
4.6	Σχεδιασμός πειραμάτων	71
4.6.1	Φόρτωση υγρών υδρογονανθράκων	71
4.6.2	Φόρτωση αερίου για τη δημιουργία μείγματος	73
4.6.3	Έλεγχος αριθμού φάσεων	75
4.6.4	Μέτρηση συντελεστή απόκλισης	75
4.6.5	Υπολογισμός συντελεστή ισοθερμοκρασιακής συμπιεστότητας	76
4.6.6	Προσδιορισμός της σύστασης του μείγματος	77
4.6.7	Ακρίβεια και επαναληψιμότητα των μετρήσεων	78
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ		83
5.1	Γενικές παρατηρήσεις	85
5.2	Μετρήσεις σε μονοσυστατικά υγρά	88
5.2.1	Κανονικό πεντάνιο	88
5.2.2	Τολουένιο	95
5.2.3	Κυκλοεξάνιο	102
5.3	Μετρήσεις σε μείγματα	109
5.3.1	Μείγμα 88% πεντάνιο – 12% μεθάνιο	110

5.3.2	Μείγμα 80% πεντάνιο – 20% μεθάνιο	116
5.3.3	Μείγμα 87% τολουένιο – 13% μεθάνιο.....	122
5.3.4	Μείγμα 70% τολουένιο – 30% μεθάνιο	128
5.3.5	Μείγμα 86% κυκλοεξάνιο – 14% μεθάνιο	134
5.3.6	Μείγμα 68% κυκλοεξάνιο – 32% μεθάνιο	140
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ		147
 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ		153
 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι: ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ, ΠΙΝΑΚΩΝ, ΣΧΗΜΑΤΩΝ		
	ΚΑΙ ΕΙΚΟΝΩΝ	157
 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι: ΠΙΝΑΚΕΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ		175

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΣΥΣΤΑΣΗ ΤΟΥ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ

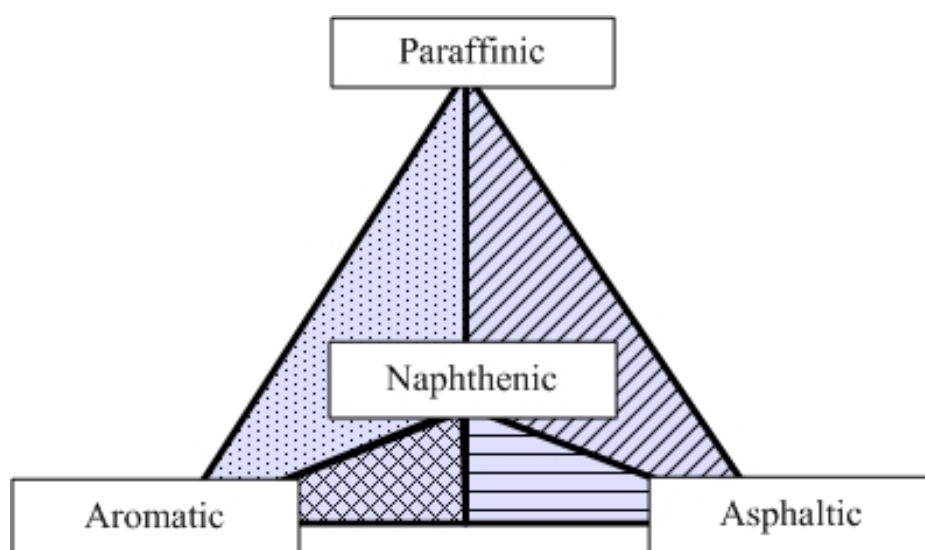
Το πετρέλαιο είναι ένα εξαιρετικά σύνθετο μείγμα κυρίως υδρογονανθράκων και ενώσεων που περιέχουν άζωτο, οξυγόνο, θείο και άτομα μετάλλων. Η σύσταση του πετρελαίου παρουσιάζει έντονες διαφοροποιήσεις ανάλογα με την προέλευση και την ηλικία σχηματισμού του. Η στοιχειακή ανάλυση σε ένα μεγάλο αριθμό δειγμάτων πετρελαίου έδειξε ότι κατά κύριο λόγο αποτελούνται από άνθρακα 83-87% κ.β., από υδρογόνο 10-14% και το υπόλοιπο 3% περίπου αποτελείται από άζωτο, οξυγόνο και θείο.

1.1.1 Κατηγορίες υδρογονανθράκων

Οι υδρογονάνθρακες που απαντώνται στο πετρέλαιο είναι κυρίως αλκάνια, κυκλοαλκάνια και αρωματικές ενώσεις. Οι ολεφίνες (αλκένια) απαντώνται σπάνια ενώ ακόμη σπανιότερα τα αλκίνια.

1.1.2 Συστηματική ταξινόμηση των πετρελαίων

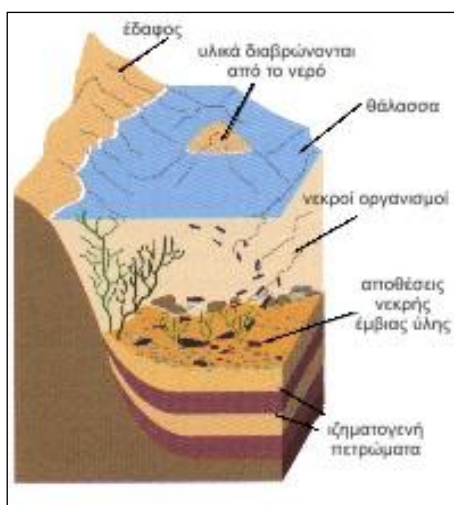
Λόγω της τεράστιας ποικιλίας που παρατηρείται στη σύσταση του πετρελαίου, η συστηματική ταξινόμηση των πετρελαίων έχει σημαντική αξία για τη σωστότερη διαχείρισή τους. Το παλαιότερο και περισσότερο διαδεδομένο σύστημα διακρίνει τα πετρέλαια στην βάση της περιεκτικότητάς τους σε παραφίνες, αρωματικά και ασφαλτικά συστατικά.



Σχήμα 1.1 : Διάγραμμα ταξινόμησης των πετρελαίων²

1.2 ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΚΟΙΤΑΣΜΑΤΩΝ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΩΝ

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



Σχήμα 1.2: Δημιουργία ρευστών υδρογονανθράκων

Η δημιουργία των μορίων των υδρογονανθράκων¹ μέσα στα ιζηματογενή πετρώματα δημιουργεί αύξηση της πίεσης στον σχηματισμό που όταν υπερβεί την αντοχή του πετρώματος σχηματίζονται ρωγμές μέσω των οποίων ποσότητες υδρογονανθράκων αποβάλλονται στον περιβάλλοντα χώρο. Η πρωτογενής μετανάστευση είναι πολύ βραδεία και λαμβάνει χώρα διαμέσου πορώδους μέσου συνήθως ελάχιστα διαπερατού μέχρις ότου οι υδρογονάνθρακες συναντήσουν ευνοϊκότερες συνθήκες ροής οπότε η δευτερογενής μετανάστευση καθίσταται πολύ ταχύτερη.

Η ροή των υδρογονανθράκων μέσα σε 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 το εκτοπίζουν προς τα κάτω ενώ αυτοί κινούνται προς τα πάνω.

Η προς τα πάνω κίνηση των μεταναστευτικών υδρογονανθράκων συνεχίζεται μέχρις ότου η ροή συναντήσει αδιαπέρατο πέτρωμα όπου οι τριχοειδείς πιέσεις εισόδου στους πόρους δεν δύνανται να υπερκινηθούν από τις δυνάμεις άνωσης, οπότε και οι υδρογονάνθρακες παγιδεύονται. Οι παγίδες των ρευστών υδρογονανθράκων είναι είτε δομικές είτε στρωματογραφικές.

1.3 ΣΤΑΔΙΑ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗΣ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ

1.3.1 Στάδιο ανίχνευσης κοιτασμάτων πετρελαίου

Η ανίχνευση των ταμιευτήρων υδρογονανθράκων γίνεται με διάφορες μεθόδους έρευνας που διακρίνονται σε:

- Επιφανειακή έρευνα
- Γεωλογική έρευνα
- 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 σχηματισμούς γειτονικών πετρελαιοπαραγωγών, και επομένως εντατικά μελετημένων, περιοχών. Τέλος το στάδιο της ανίχνευσης ολοκληρώνεται με τη γεωφυσική έρευνα που κυρίως χρησιμοποιείται η μέθοδος σεισμικής ανάκλασης. Συγκεκριμένα με τη μέθοδο σεισμικής ανάκλασης³ δεν είναι δυνατή η μέτρηση κάποιας ιδιότητας του πετρελαίου αλλά εντοπίζονται δομές όπου είναι πιθανή η παγίδευση του πετρελαίου (έμμεση μέθοδος). Επίσης χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό του πάχους των ιζηματογενών λεκανών σαν αναγνωριστικές, η μέθοδος σεισμικής διάθλασης, η βαρυτική μέθοδος και η μαγνητική μέθοδος.

1.3.2 Ερευνητικές γεωτρήσεις - Δειγματοληψία

Αφού τα αποτελέσματα των παραπάνω ερευνητικών προσπαθειών συνεκτιμηθούν και αξιολογηθούν κι εφόσον προκύψουν αποχρώσεις ενδείξεις, επιλέγεται το σημείο στο οποίο θα πραγματοποιηθεί η πρώτη γεώτρηση. Η γεώτρηση δοκιμάζει την εγκυρότητα της γεωλογικής και γεωφυσικής έρευνας για την ύπαρξη νέων κοιτασμάτων πετρελαίου και φυσικού αερίου και αποδεικνύει εάν οι υπεδάφεις αναλύσεις έχουν επακριβώς διαγνώσει την ακριβή μορφολογία της περιοχής. Για την αξιολόγηση των γεωλογικών σχηματισμών με γεωφυσικές μεθόδους χρησιμοποιούνται κατάλληλα όργανα τα οποία τοποθετούνται μέσα στη γεώτρηση και απέναντι από τον υπό μελέτη σχηματισμό. Οι μέσα σε γεωτρήσεις μετρούμενες φυσικές ποσότητες συνήθως παρίστανται σε διαγράμματα συναρτήσεως του βάθους, τα οποία ονομάζονται διαγραφίες⁴.

Τα δείγματα πυρήνων τα οποία λαμβάνονται σε διαφορετικά βάθη προσφέρονται τόσο για γεωχημικές μελέτες όσο και για πλήρη εργαστηριακή ανάλυση των ιδιοτήτων του πετρώματος και του τύπου των ρευστών τα οποία περιέχονται στους πόρους του. Οι διαγραφίες που χρησιμοποιούνται στην έρευνα του πετρελαίου κατατάσσονται σε τρεις κατηγορίες, τις ηλεκτρικές, τις ραδιενεργές και τις ακουστικές διαγραφίες. Τα δεδομένα των διαγραφιών αντιστοιχούν σε φυσικές ιδιότητες των πετρωμάτων (πορώδες, διαπερατότητα και βαθμός κορεσμού σε υδρογονάνθρακες) και των περιεχομένων ρευστών και επιτρέπουν την αναγνώριση όλων των λιθολογικών μονάδων και των ρευστών που συνάντησε το γεωτρήπανο.

1.3.3 Αξιολόγηση ταμιευτήρα

Οι πληροφορίες που συλλέχθηκαν κατά την ερευνητική φάση συνεκτιμώνται για την κατάρτιση ενός όσο το δυνατόν πιο αριστοποιημένου σχεδίου ανάπτυξης του ταμιευτήρα. Ως ταμιευτήρας ορίζεται μια συγκέντρωση υδρογονανθράκων σε πορώδη, περατά, ιζηματογενή πετρώματα. Ο ταμιευτήρας περιβάλλεται από αδιαπέρατο πέτρωμα (cap-rock) και συνήθως από υδροφόρο ορίζοντα.

Αρχικά γίνεται ο υπολογισμός του όγκου των υδρογονανθράκων που περιέχονται μέσα στον ταμιευτήρα καθώς επίσης και το ποσοστό εξ αυτών που ελπίζεται να ανακτηθεί. Έπειτα αποφασίζεται 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. Έπειτα γίνονται οι γεωτρήσεις ανάπτυξης και στη συνέχεια γίνεται ο σχεδιασμός τόσο των εγκαταστάσεων και του αριθμού των πλατφορμών που θα χρειασθούν. Τέλος, φυσικά και μαθηματικά μοντέλα θα εκπονηθούν για την πρόβλεψη της παραγωγής και της κίνησης των ρευστών ανά πάσα χρονική στιγμή μέσα στο πορώδες μέσο.

1.3.4 Στάδιο παραγωγής

Η παραγωγή του κοιτάσματος παρακολουθείται μέρα με τη μέρα και αναλύεται ανά γεώτρηση και ανά παράγουσα ζώνη. Σχεδιάζονται τεστ για την καταγραφή της εξέλιξης της τιμής της μέσης πίεσης στον ταμιευτήρα. Η ανάλυση των στοιχείων παραγωγής επιτρέπει τη διάγνωση του κύριου μηχανισμού με τον οποίο παράγεται το ρευστό. Αυτό θα επιτρέψει την έγκαιρη λήψη μέτρων για τη συνέχιση της παραγωγής και θα βελτιώσει τις προβλέψεις για την τελική απόληψιμότητα. Τα μοντέλα θα τροποποιηθούν ώστε να συμφωνήσουν με τα δεδομένα και να διορθωθούν με τις αρχικές εκτιμήσεις και προβλέψεις τους.

Αν οι δεδομένες συνθήκες το επιβάλλουν, δευτερογενής παραγωγή θα τεθεί σε εφαρμογή με την έγχυση νερού από ειδικά τοποθετημένες γεωτρήσεις εγχύσεως έτσι ώστε το νερό να γεμίσει τους πόρους του πετρώματος και να κρατήσει την πίεση στον ταμιευτήρα υψηλή για μεγάλο χρονικό διάστημα αυξάνοντας έτσι την αποληψιμότητα. Τέλος μέθοδος τριτογενούς παραγωγής μπορεί να προγραμματιστεί και να τεθεί σε εφαρμογή με στόχο την ανάκτηση περαιτέρω ποσοτήτων των αρχικώς περιεχομένων υδρογονανθράκων.

Η κυριότερη προετοιμασία του πετρελαίου πριν τη μεταφορά του από τους χώρους παραγωγής περιλαμβάνει την απομάκρυνση του νερού, το οποίο μπορεί να φθάνει και το 80-90% κ.ό. και δημιουργεί σημαντικά προβλήματα διάβρωσης λόγω και της υψηλής αλατότητάς του.

1.3.5 Μεταφορά του πετρελαίου

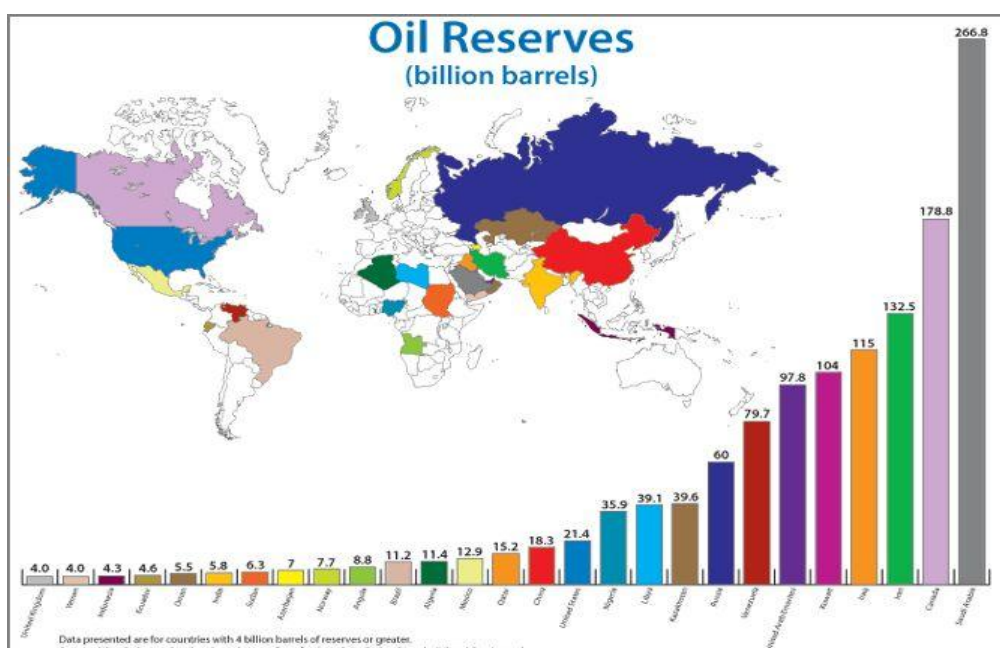
Οι μεγαλύτερες ποσότητες του πετρελαίου μεταφέρονται με αγωγούς από τις γεωτρήσεις παραγωγής στα διυλιστήρια και στη συνέχεια στην κατανάλωση. Σημαντικό μέρος μεταφέρεται επίσης με tankers και επίγεια οχήματα.

1.3.6 Χρήση του πετρελαίου

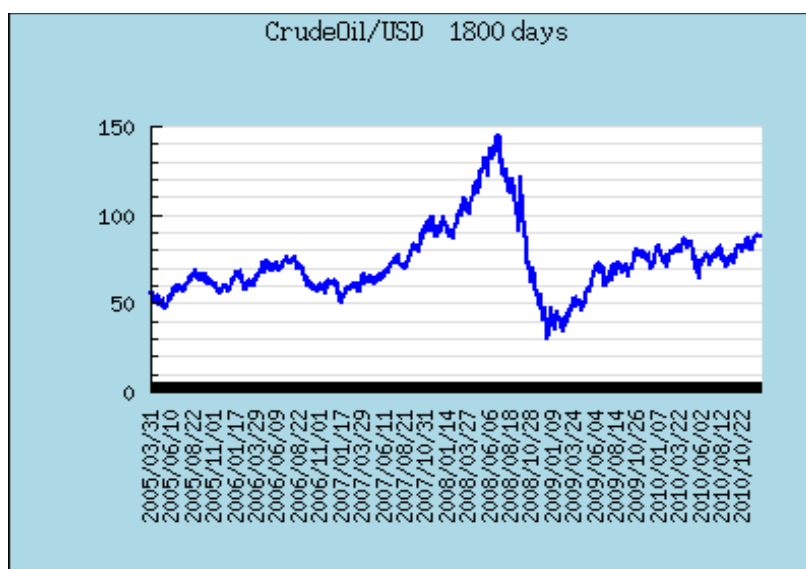
Το 90% του παραγόμενου σήμερα πετρελαίου χρησιμοποιείται ως καύσιμο, ενώ μόνο το 10% σαν πρώτη ύλη για την παραγωγή υλικών από την πετροχημική βιομηχανία, όπως συνθετικές

ίνες, πλαστικά, απορρυπαντικά, χρώματα, λιπαντικά κλπ. Και για την παραγωγή λιπαντικών και δομικών υλικών (άσφαλτος). Τα πετρελαϊκής προέλευσης καύσιμα καλύπτουν περίπου τις μισές ενεργειακές ανάγκες παγκόσμια.

Το πετρέλαιο είναι σήμερα η περισσότερο χρησιμοποιημένη ενεργειακή πρώτη ύλη. Στην ετήσια έκθεση Statistical Review of World Energy 2008, αναφέρθηκε ότι η παραγωγή μειώθηκε το 2007 κατά 130.000 βαρέλια την ημέρα και ανήλθε σε 81,53 εκατομμύρια βαρέλια τη ημέρα, ενώ τα διαπιστωμένα αποθέματα αργού πετρελαίου στον πλανήτη ανήλθαν στα τέλη του 2007 σε 1,2379 τρισεκατομμύρια βαρέλια έναντι των αναθεωρημένων 1,2395 τρισεκατομμυρίων βαρελιών στα τέλη του 2006. Αρκούν, ωστόσο, για να στηρίξουν τους σημερινούς ρυθμούς παραγωγής τουλάχιστον για τα επόμενα 41 χρόνια.



Σχήμα 1.3: Απεικόνιση των χωρών με τα μεγαλύτερα κοιτάσματα πετρελαίου⁵



Διάγραμμα 1.1: Τιμή πετρελαίου για τα τελευταία πέντε χρόνια⁶

1.4 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι ο πειραματικός προσδιορισμός του συντελεστή απόκλισης Z που έγινε μέσω της μέτρησης του όγκου του ρευστού που μελετάται.

Ο συντελεστής απόκλισης αποτελεί συνάρτηση της πίεσης, της θερμοκρασίας και της σύστασης. Ο συντελεστή απόκλισης Z είναι αδιάστατη παράμετρος και εκφράζει το μέτρο της απόκλισης της συμπεριφοράς ενός πραγματικού αερίου από την ιδανική κατάσταση, όπου αυτός ο συντελεστής είναι μονάδα.

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελείται από έξι κεφάλαια εκ των οποίων στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά γενικά στους υδρογονάνθρακες από το στάδιο της δημιουργίας έως και της κατανάλωσης.

Στο δεύτερο κεφάλαιο περιγράφεται η θερμοδυναμική συμπεριφορά των πετρελαϊκών ρευστών, αναφέρονται οι κατηγορίες αυτών καθώς και γίνεται λόγος για το συντελεστή ισοθερμοκρασιακής συμπιεστότητας.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται ιστορική αναδρομή των καταστατικών εξισώσεων και δίνεται βαρύτητα στις κυβικές καταστατικές εξισώσεις και κυρίως σε αυτήν των Peng–Robinson. Επίσης περιγράφεται ο τρόπος εύρεσης των συντελεστών απόκλισης (Z) και ισοθερμοκρασιακής συμπιεστότητας (c) κάνοντας αναφορά και στην τεχνική προσθετικής διόρθωσης όγκου της καταστατικής εξίσωσης (volume translation). Τέλος επεξηγείται ο τρόπος επίλυσης τριτοβάθμιας εξίσωσης και ο τρόπος επιλογής της σωστής ρίζας.

Στο τέταρτο κεφάλαιο περιγράφεται διεξοδικά η συνδεσμολογία και ο τρόπος λειτουργίας της πειραματικής διάταξης και του απαιτούμενου εξοπλισμού. Λεπτομερέστερα γίνεται αναφορά στον έλεγχο στεγανότητας της διάταξης, στη βαθμονόμηση του συστήματος και κατάστροψη μοντέλων καθώς και στην ογκομετρική συμπεριφορά της διάταξης. Στο κεφάλαιο αυτό δίνεται ιδιαίτερη έμφαση και προσοχή στις διορθώσεις που πρέπει να ληφθούν υπόψη, ως προς τη συμπιεστότητα της διάταξης και του νερού και την αύξηση της χωρητικότητας λόγω θερμικής διαστολής, στις μετρήσεις που καταγράφονται. Τέλος γίνεται λόγος στις διαδικασίες φόρτωσης τόσο του υγρού όσο και του αερίου, στον τρόπο μέτρησης των moles, στις διαδικασίες μέτρησης των συντελεστών Z και c καθώς και στην επαναληψιμότητα των μετρήσεων.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα πειραματικά αποτελέσματα και γίνεται σύγκριση με αντίστοιχες μετρήσεις που υπάρχουν στη βιβλιογραφία και με τις προβλέψεις της κυβικής καταστατικής εξίσωσης των Peng–Robinson. Οι παραπάνω μετρήσεις παραθέτονται σε διαγράμματα γραμμομοριακού όγκου – πίεσης ($V_m - P$), ισοθερμοκρασιακής συμπιεστότητας – πίεσης ($c - P$) και σφαλμάτων του γραμμομοριακού όγκου και της ισοθερμοκρασιακής συμπιεστότητας.

Τέλος στο έκτο κεφάλαιο έχουν καταγραφεί τα συμπεράσματα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΠΕΤΡΕΛΑΪΚΩΝ ΡΕΥΣΤΩΝ

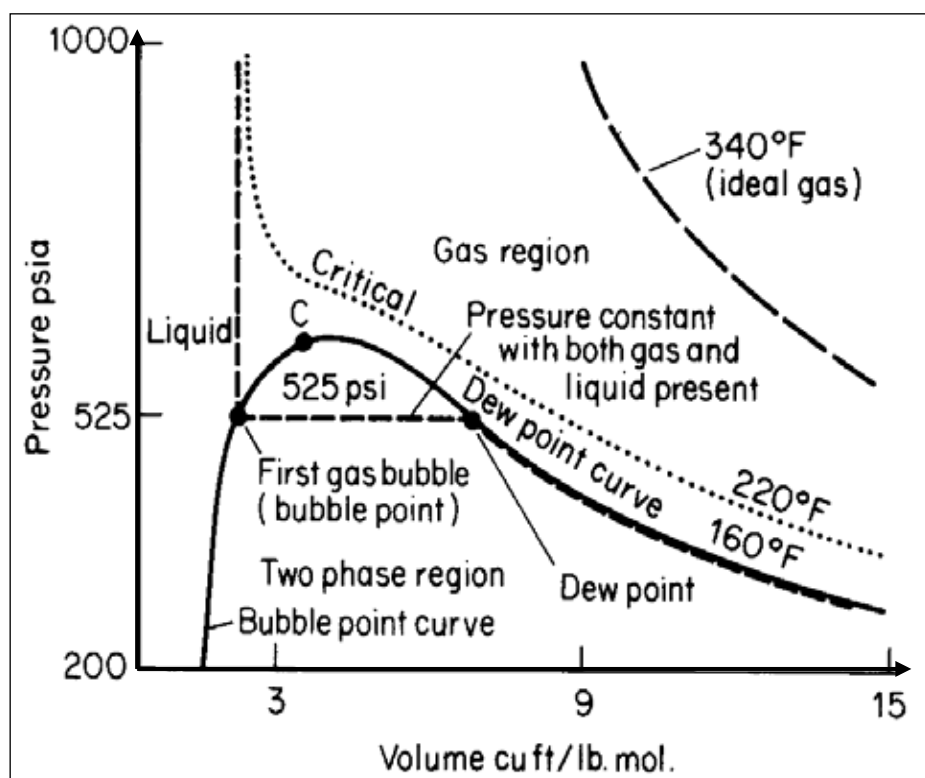
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα μείγματα των υδρογονανθράκων, τόσο μέσα στον ταμιευτήρα κατά την παραγωγή όσο και κατά την άφιξή τους στην επιφάνεια, υφίστανται μεταβολές ως προς την επικρατούσα πίεση και θερμοκρασία καθώς επίσης και ως προς τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των φάσεων. Μέσα στον ταμιευτήρα, κατά την παραγωγή μεταβάλλεται η πίεση, ενώ στην επιφάνεια, όπου οι συνθήκες γίνονται κανονικές (1atm, 60F), μεταβάλλεται τόσο η πίεση όσο και η θερμοκρασία. Οι μεταβολές στην πίεση και τη θερμοκρασία έχουν ως αποτέλεσμα να αλλάζουν οι φάσεις του ρευστού μέσα στον ταμιευτήρα. Επομένως για τη μελέτη της θερμοδυναμικής συμπεριφοράς των πετρελαϊκών ρευστών είναι σημαντικό να προσδιοριστούν οι συνθήκες που καθορίζουν την ισορροπία των φάσεων.

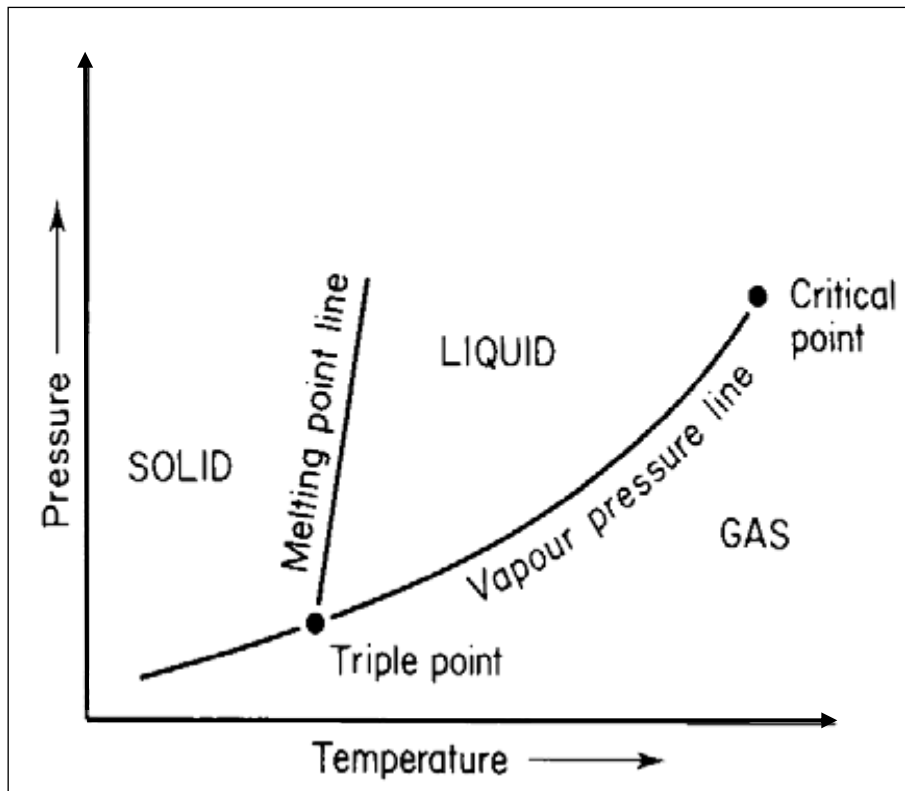
2.2 ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΠΕΤΡΕΛΑΪΚΩΝ ΡΕΥΣΤΩΝ

Στο Σχήμα 2.1 παρουσιάζεται το διάγραμμα πίεσης-γραμμομοριακού όγκου για ένα συστατικό (περίπτωση προπανίου), ενώ στο Σχήμα 2.2 παρουσιάζεται το διάγραμμα πίεσης-θερμοκρασίας για τη γενική περίπτωση μονοσυστατικού ρευστού και στο Σχήμα 2.3 παρουσιάζεται το διάγραμμα πίεσης-γραμμομοριακού όγκου-θερμοκρασίας για την περίπτωση ενός συστατικού.

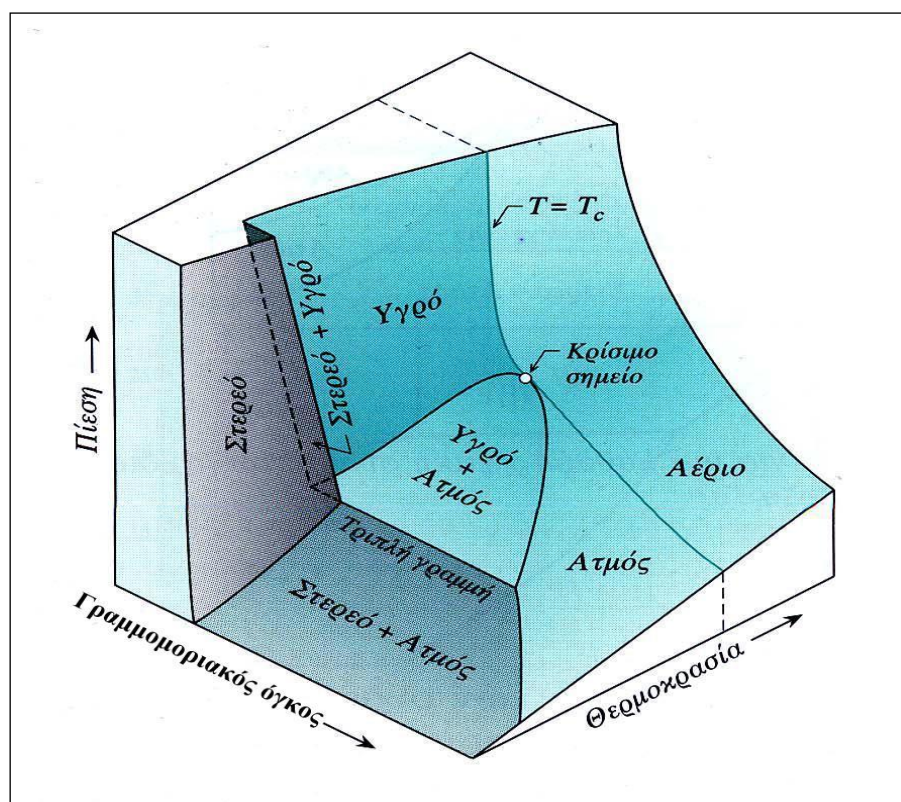
Σε ένα ταμιευτήρα απαντώνται μείγματα υδρογονανθράκων και η σύσταση των οποίων εξαρτάται από την οργανική ύλη.



Σχήμα 2.1: p-V διάγραμμα για ένα συστατικό



Σχήμα 2.2: Διάγραμμα φάσεων για ένα καθαρό συστατικό



Σχήμα 2.3: Διάγραμμα p-V-T (περίπτωση ενός συστατικού)

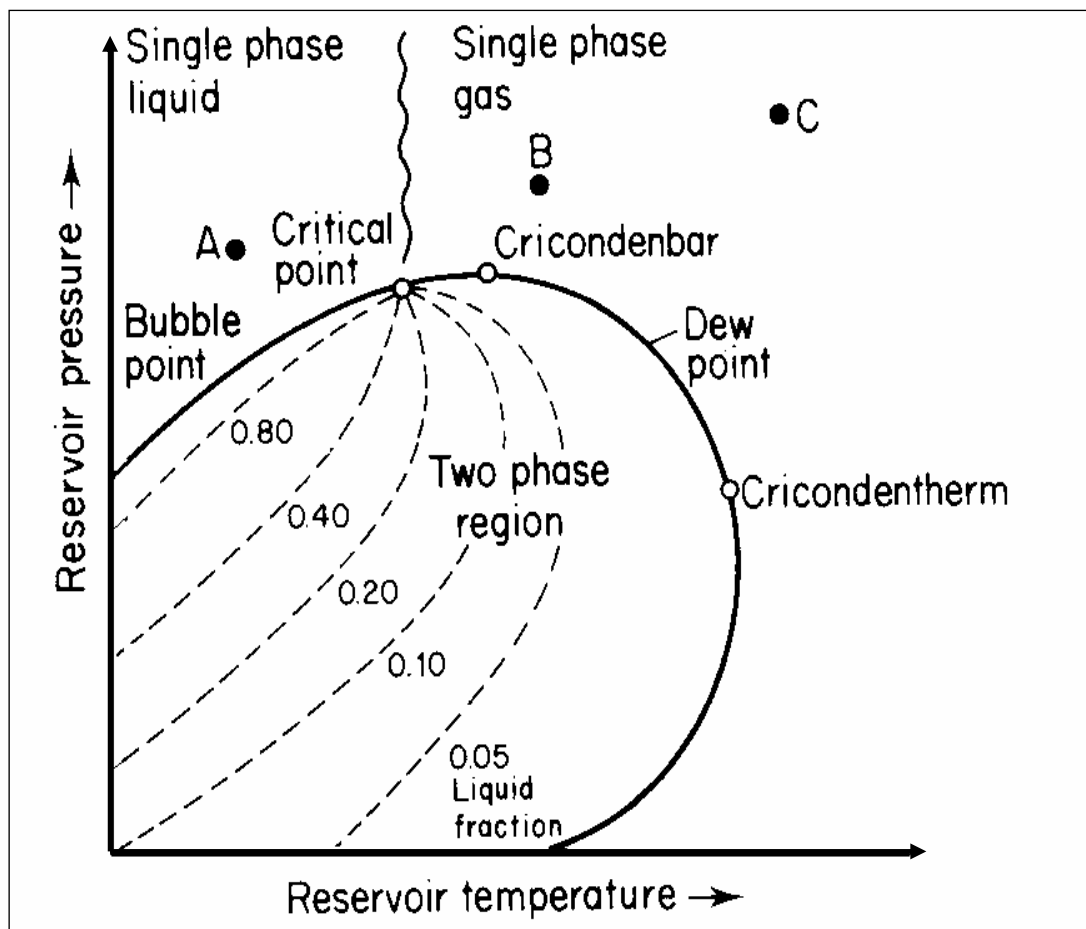
Παρακολουθώντας την ισόθερμη καμπύλη του προπανίου στο Σχήμα 2.1 σε 160F μπορούμε να μελετήσουμε τις φάσεις του καθώς η πίεση μειώνεται. Η εκτόνωση του προπανίου υπό σταθερή θερμοκρασία και για πιέσεις μέχρι τα 525 psi έχει ως συνέπεια μεγάλες μεταβολές της πίεσης για μικρές αντίστοιχες μεταβολές του όγκου, καθώς η συμπιεστικότητα της υγρής φάσης (c) είναι μικρή.

Για τα περισσότερα μονοσυστατικά υγρά, σε εύλογο εύρος πιέσεων, η συμπιεστικότητα είναι μικρή και θεωρείται ανεξάρτητη της πίεσης. Συνεχίζοντας την εκτόνωση, η πίεση μειώνεται μέχρι του σημείου που θα σχηματισθεί μια απειροελάχιστη ποσότητα (φυσαλίδα) αερίου (bubble point). Η πίεση αυτή ονομάζεται πίεση σημείου φυσαλίδας (bubble point) ή πίεση κορεσμού για τη συγκεκριμένη θερμοκρασία. Στην περίπτωση καθαρών συστατικών, περαιτέρω εκτόνωση γίνεται υπό σταθερή πίεση δηλ. την τάση ατμών για τη συγκεκριμένη θερμοκρασία, ενώ η αναλογία υγρού-αερίου μεταβάλλεται συνεχώς έως ότου απομείνει μόνο μια απειροελάχιστη ποσότητα υγρού. Το σημείο αυτό στο διάγραμμα φάσεων ονομάζεται σημείο δρόσου (dew point) για τη συγκεκριμένη θερμοκρασία. Από το σημείο αυτό και έπειτα η εκτόνωση λαμβάνει χώρα στην αέρια φάση και έχει ως αποτέλεσμα τη συνεχή αύξηση του ειδικού όγκου του αερίου και την πτώση της πίεσης του.

Σε κάθε ισόθερμη καμπύλη ενός ρευστού σε θερμοκρασίες χαμηλότερες της κρίσιμης αντιστοιχεί ένα σημείο φυσαλίδας και ένα σημείο δρόσου. Επομένως, μια σειρά ισόθερμων σχηματίζει γεωμετρικούς τόπους σημείων φυσαλίδας και σημείων δρόσου οι οποίες συναντώνται σε ένα σημείο Σχήμα 2.1. Το σημείο αυτό ονομάζεται κρίσιμο σημείο (C) και βασικό χαρακτηριστικό του είναι το ότι οι ιδιότητες των δύο φάσεων υγρού-αερίου ταυτίζονται. Η ισόθερμη που διέρχεται από το κρίσιμο σημείο παρουσιάζει εκεί τις εξής ιδιότητες :

$$\left(\frac{\partial p}{\partial V}\right)_{T_c} = \left(\frac{\partial^2 p}{\partial^2 V}\right)_{T_c} = 0 \quad (2.1)$$

Τα πολυσυστατικά συστήματα (μείγματα) εμφανίζουν διαφορετική συμπεριφορά από τα μονοσυστατικά. Η εκτόνωση της υγρής φάσης ως το σημείο φυσαλίδας σε σταθερή θερμοκρασία παρουσιάζει την ίδια συμπεριφορά με αυτήν ενός καθαρού συστήματος. Η εκτόνωση, όμως, μέσα στην περιοχή των δύο φάσεων δε λαμβάνει χώρα υπό σταθερή πίεση αλλά συνοδεύεται από μικρή ελάττωση της πίεσης (τάσης ατμών) καθώς οι συστάσεις της υγρής και αέριας φάσης μεταβάλλονται. Το διάγραμμα p-T ενός συνήθους πετρελαίου παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.4.



Σχήμα 2.4: Διάγραμμα φάσεων πολυσυστατικού μείγματος

Λόγω του ότι σε κάθε θερμοκρασία οι πιέσεις σημείου φυσαλίδας και δρόσου διαφέρουν, το διάγραμμα πίεσης-θερμοκρασίας δεν είναι πλέον μία απλή καμπύλη γραμμή όπως στα μονοσυστατικά συστήματα, αλλά σχηματίζει μια κλειστή περιοχή που ονομάζεται διάγραμμα φάσεων (phase envelope). Στο διάγραμμα αυτό μπορούμε να εντοπίσουμε μια τιμή πίεσης πάνω από την οποία δεν είναι δυνατόν να συνυπάρχουν δύο φάσεις για οποιαδήποτε θερμοκρασία. Η πίεση αυτή ονομάζεται cricondenbar, ενώ η αντίστοιχη θερμοκρασία πάνω από την οποία δεν μπορούν να συνυπάρχουν δύο φάσεις για οποιαδήποτε πίεση ονομάζεται cricondentherm. Το κρίσιμο σημείο του μείγματος όπου οι ιδιότητες των δύο φάσεων ταυτίζονται δε συμπίπτει υποχρεωτικά με κανένα από τα δύο αυτά σημεία, ούτε είναι απαραίτητα ανάμεσα τους.

2.3 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΠΕΤΡΕΛΑΪΚΩΝ ΡΕΥΣΤΩΝ

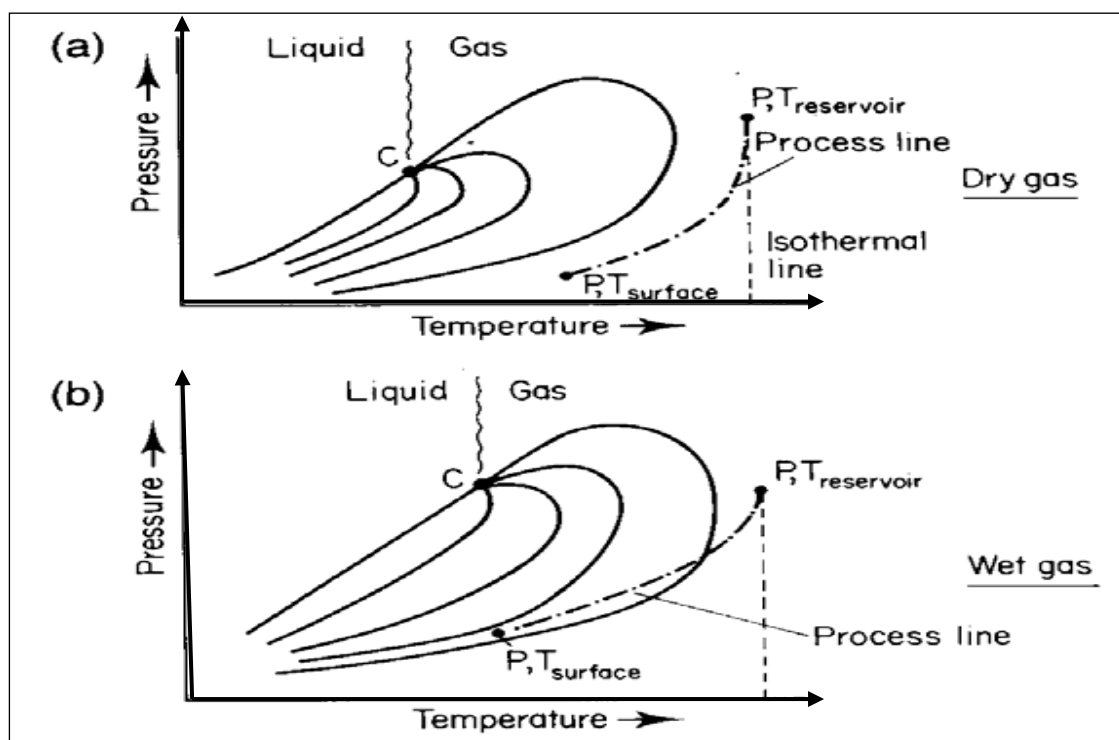
Η παραγωγή πετρελαϊκών ρευστών από ταμιευτήρες γίνεται με εκτόνωση από την αρχική τιμή πίεσης σε κάποια χαμηλότερη τιμή. Ο υπολογισμός της ποσότητας του ρευστού που ανακτάται γίνεται μέσω ισοζυγίου μάζας μεταξύ της αρχικής και της τελικής κατάστασης. Από τα σημαντικότερα στοιχεία για τον υπολογισμό των ποσοτήτων αυτών είναι οι πυκνότητες τόσο στα ακραία όσο και στα ενδιάμεσα σημεία της παραπάνω διαδικασίας, της ισοθερμοκρασιακής συμπίεστότητας (c) και του συντελεστή απόκλισης Z . Οι τιμές και οι μεταβολές αυτών των μεγεθών χαρακτηρίζουν το πετρελαϊκό ρευστό και το τοποθετούν σε μια από τις παρακάτω κατηγορίες.

2.3.1 Συστήματα Ξηρού Αερίου (Dry Gas)

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.5 (a), η θερμοκρασία σε έναν ταμιευτήρα ξηρού αερίου είναι υψηλότερη της θερμοκρασίας cricondentherm (τη μέγιστη δηλαδή θερμοκρασία της περιοχής των δύο φάσεων). Κατά συνέπεια, ελάττωση της πίεσης δεν θα οδηγήσει στο σχηματισμό υγρής φάσης στον ταμιευτήρα.

Το γεγονός αυτό, όμως, δεν αποκλείει την ανάκτηση κάποιας ποσότητας συμπυκνωμάτων φυσικού αερίου ως αποτέλεσμα της πτώσης της θερμοκρασίας σε σωληνώσεις μεταφοράς ή σε άλλα στάδια της επεξεργασίας του. Υπάρχουν πολύ λίγες περιπτώσεις φυσικών αερίων που δεν συμπυκνώνονται σε κανένα στάδιο της διαδικασίας παραγωγής.

Αν όμως οι κανονικές συνθήκες βρίσκονται εντός του φακέλου φάσεων, τότε σχηματίζεται συμπύκνωμα στο tank και τότε το αέριο λέγεται υγρό αέριο (wet gas), όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.5 (b).



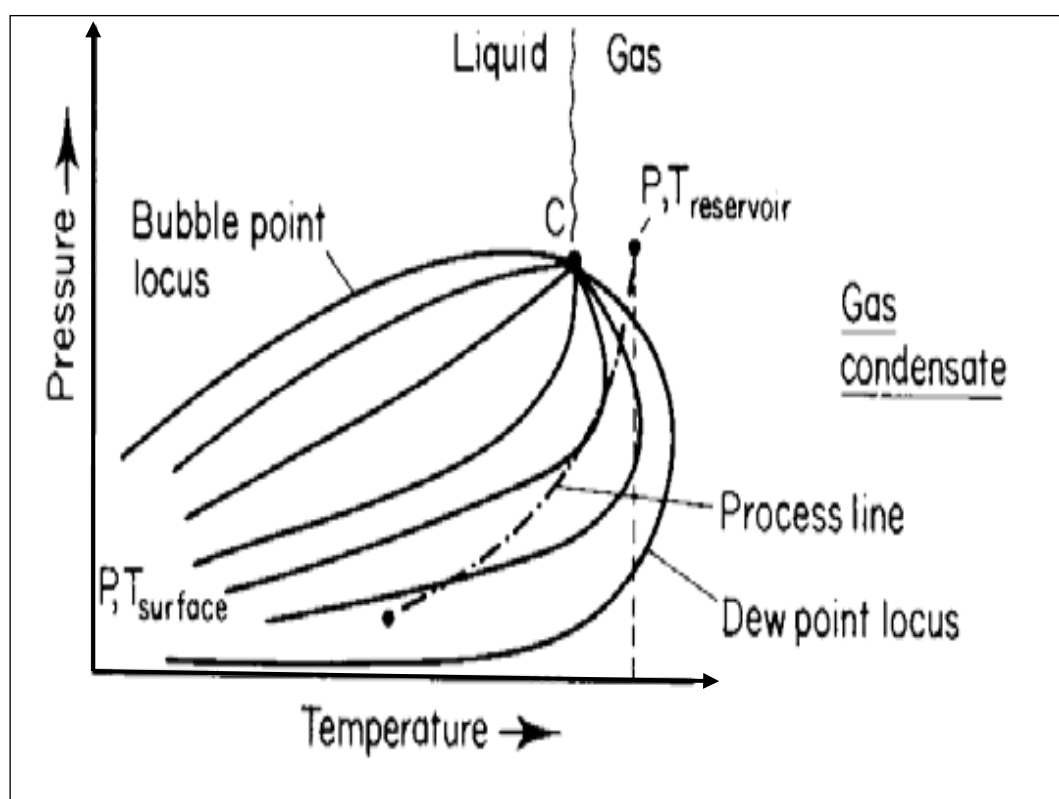
Σχήμα 2.5: Διαγράμματα φάσεων μιγμάτων υδρογονανθράκων: (a) Ξηρό αέριο, (b) Υγρό αέριο

2.3.2 Συστήματα Αερίων-Συμπυκνωμάτων (Gas-Condensates)

Σε συστήματα αυτού του είδους, και λόγω της θέσης του κρίσιμου σημείου, η θερμοκρασία του ταμιευτήρα βρίσκεται μεταξύ της θερμοκρασίας cricondenthem και της κρίσιμης θερμοκρασίας, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.6. Κάτω από αυτές τις συνθήκες το σύστημα εμφανίζει το φαινόμενο της ισόθερμης παλινδρομικής συμπύκνωσης (retrograde condensation).

Σε πιέσεις πάνω από την πίεση cricondenbar, το σύστημα βρίσκεται σε αέρια φάση. Κατά την ισοθερμοκρασιακή εκτόνωση, το διάγραμμα φάσεων συναντάται στην περιοχή των σημείων δρόσου και περαιτέρω ελάττωση της πίεσης έχει ως αποτέλεσμα τον συνεχώς αυξανόμενο σχηματισμό υγρής φάσης λόγω συμπύκνωσης.

Σε τέτοια συστήματα, η υγρή φάση (συμπύκνωμα) που ανακτάται στην επιφάνεια προέρχεται από ρευστό που σε συνθήκες ταμιευτήρα βρίσκεται στην αέρια φάση.



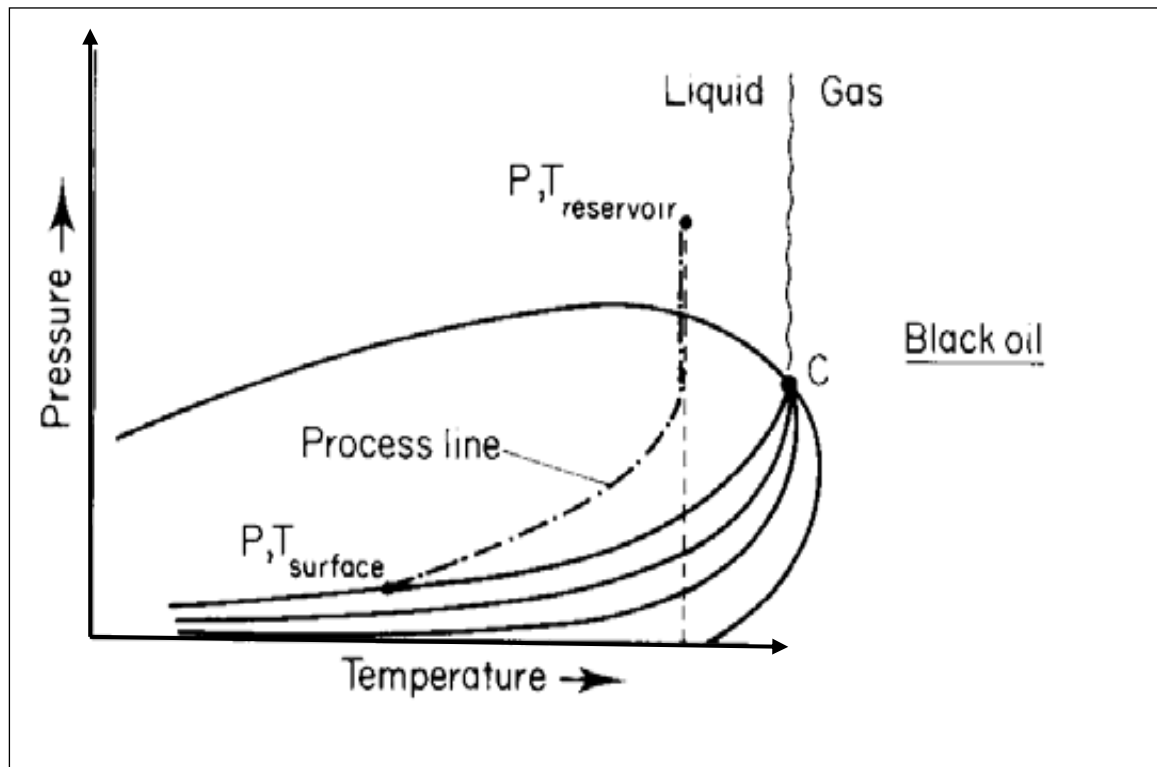
Σχήμα 2.6: Διάγραμμα φάσεων αερίου συμπυκνώματος

2.3.3 Κορεσμένοι Ταμιευτήρες

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

2.3.4 Συστήματα Πετρελαίου (Black Oil)

Στην περίπτωση τέτοιων συστημάτων, η θερμοκρασία ταμιευτήρα είναι πολύ χαμηλότερη από την κρίσιμη θερμοκρασία, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.7. Ισόθερμη εκτόνωση της υγρής φάσης οδηγεί στο σχηματισμό αερίου στο σημείο φυσαλλίδας, ενώ περαιτέρω μείωση της πίεσης οδηγεί στο σχηματισμό συνεχώς αυξανόμενων ποσοτήτων αερίου. Η σύσταση του αερίου μεταβάλλεται σημαντικά μόνο στις standard συνθήκες. Το αέριο είναι φτωχό σε συμπυκνώσιμα συστατικά και συνεισφέρει ελάχιστα στην ποσότητα υγρού που ανακτάται τελικά στην επιφάνεια.



Σχήμα 2.7: Διαγράμματα φάσεων πετρελαίου

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΕΠΛΥΣΗΣ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ ΦΑΣΕΩΝ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι καταστατικές εξισώσεις αποτελούν θερμοδυναμικές σχέσεις οι οποίες περιγράφουν την κατάσταση της ύλης σαν συνάρτηση των θερμοδυναμικών μεταβλητών, επομένως είναι χρήσιμες για την περιγραφή των ιδιοτήτων των πετρελαϊκών ρευστών. Μέσω των καταστατικών εξισώσεων, ως μαθηματικά μοντέλα, υπολογίζεται ο συντελεστής απόκλισης (Z) και επομένως όλα τα παραγωγικά μεγέθη όπως είναι η πυκνότητα (d) και ο συντελεστής ισοθερμοκρασιακής συμπίεστικότητας (c).

Οι καταστατικές εξισώσεις αποτελούν θερμοδυναμικές σχέσεις οι οποίες περιγράφουν την κατάσταση της ύλης σε δεδομένες συνθήκες, επομένως είναι χρήσιμες για την περιγραφή των ιδιοτήτων των πετρελαϊκών ρευστών. Για μια συγκεκριμένη ποσότητα της ουσίας που περιέχεται σε ένα σύστημα, η πίεση, ο όγκος, και η θερμοκρασία συνδέονται με μια σχέση με τη γενική μορφή: $f(p,V,T)=0$

Για την περίπτωση των πετρελαϊκών μιγμάτων η καταστατική εξίσωση αποτελεί τη σχέση που συνδέει τον γραμμομοριακό όγκο ενός ρευστού με τις συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, οι καταστατικές εξισώσεις χρησιμοποιούνται για να συγκριθεί το Z που υπολογίζεται από αυτές και το Z που μετριέται πειραματικά. Για τα καθαρά συστατικά, με τα οποία έγιναν τα πειράματα, το πειραματικό Z συγκρίθηκε με το Z της βιβλιογραφίας και της καταστατικής εξίσωσης. Για τα μείγματα όμως που δεν υπάρχουν βιβλιογραφικές μετρήσεις το πειραματικό Z συγκρίνεται μόνο με το Z που προκύπτει από την καταστατική εξίσωση.

Σημειώνεται ότι ο προσδιορισμός του Z ενός ρευστού μπορεί να γίνει είτε πειραματικά, είτε από τη βιβλιογραφία, είτε μέσω των καταστατικών εξισώσεων, είτε από την αρχή των αντίστοιχων καταστάσεων για υγρούς υδρογονάνθρακες και τέλος από τη μέθοδο των Alani – Kennedy.

3.2 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΕΣ-ΕΜΠΕΙΡΙΚΕΣ ΣΧΕΣΕΙΣ

Κατά την εξέλιξη της έρευνας στο χώρο της θερμοδυναμικής συμπεριφοράς των ρευστών (αερίων και υγρών), ο μεγάλος όγκος των πειραματικών δεδομένων που προέκυψαν επέτρεψε τη δημιουργία μαθηματικών-υπολογιστικών μοντέλων. Ο σκοπός αυτών των μοντέλων είναι ο εύκολος και γρήγορος, με χρήση H/Y , προσδιορισμός των μεγεθών που περιγράφουν τη φυσική ή/και τη χημική συμπεριφορά των ρευστών κι επομένως και των πετρελαϊκών ρευστών. Αν και η ακρίβεια των προτεινόμενων μοντέλων βελτιώνεται συνεχώς δεν μπορεί να φτάσει αυτή ενός σωστά σχεδιασμένου και εκτελεσμένου πειράματος. Ωστόσο, η ευκολία και η ταχύτητα που προσφέρουν οδήγησε σταδιακά στην ανάπτυξη σύνθετων μοντέλων περιγραφής της θερμοδυναμικής συμπεριφοράς και της ροής πραγματικών πολυφασικών μιγμάτων μέσα σε ταμιευτήρες. Έτσι, σήμερα είμαστε σε θέση να προσομοιώσουμε την πολύπλοκη διαδικασία εκμετάλλευσης ενός ταμιευτήρα πετρελαίου ή φυσικού αερίου καθώς και να προβλέψουμε την εξέλιξή του με το χρόνο κάτω από διαφορετικά πιθανά σενάρια εκμετάλλευσης.

Τα μαθηματικά μοντέλα θερμοδυναμικής συμπεριφοράς των ρευστών μπορούν να διακριθούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες: τα καθαρά αριθμητικά μοντέλα και τα μοντέλα με θεωρητικό υπόβαθρο. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν οι προσπάθειες ανάπτυξης σχέσεων οι οποίες βασίζονται μόνο σε πειραματικά δεδομένα και οι οποίες κάνουν χρήση αριθμητικών μεθόδων προσδιορισμού συναρτήσεων από το χώρο της μηχανικής εκμάθησης (machine learning). Αν και προσφέρουν ικανοποιητική ακρίβεια, οι προβλέψεις τους δεν είναι πάντα συμβατές μεταξύ τους εφόσον τα μοντέλα αυτά είναι καθαρά αριθμητικά και δεν εμπεριέχουν άμεσα καμία πληροφορία σχετικά με τη θερμοδυναμική των ρευστών. Στη δεύτερη κατηγορία ανήκουν οι καταστατικές εξισώσεις και η μέθοδος των αντίστοιχων καταστάσεων. Και οι δύο αυτές μέθοδοι έχουν οδηγήσει σε μοντέλα τα οποία βασίζονται στην εμπειρία σχετικά με τη θερμοδυναμική συμπεριφορά των πετρελαϊκών ρευστών.

3.3 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΩΝ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΩΝ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ

Ιστορικά, ο Νόμος του Boyle ήταν η πρώτη έκφραση μιας καταστατικής εξίσωσης. Το 1661, ο διάσημος Ιρλανδός φυσικοχημικός Robert Boyle⁷ μελέτησε τη συνάρτηση πίεσης – όγκου ενός αερίου και πιστοποίησε ότι υπό σταθερή θερμοκρασία *ο όγκος μια καθορισμένης ποσότητας αερίου είναι αντιστρόφως ανάλογος της πίεσης*:

$$\text{Νόμος του Boyle (για σταθερά } n, T) : pV = \text{σταθερό} \quad (3.1)$$

Ο Νόμος του Boyle χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη της τιμής της πίεσης ενός αερίου όταν μεταβάλλεται ο όγκος του (ή αντίστροφα).

Η μοριακή εξήγηση του νόμου βασίζεται στο γεγονός ότι η πίεση που εξασκείται από ένα αέριο προκαλείται από την κρούση των μορίων στα τοιχώματα του δοχείου. Αν ο όγκος υποδιπλασιαστεί, τότε η πυκνότητα των μορίων διπλασιάζεται και έτσι σε ένα ορισμένο χρονικό διάστημα διπλασιάζεται ο αριθμός των μορίων που συγκρούονται με τα τοιχώματα. Έτσι, η μέση δύναμη που εξασκείται από το αέριο, και επομένως και η πίεση του, διπλασιάζεται σύμφωνα με το Νόμος του Boyle.

Το 1787, ο γάλλος φυσικός Jacques Charles εξέτασε τη θερμική διαστολή των αερίων. Ο Charles μέτρησε την εξάρτηση του όγκου μιας συγκεκριμένης ποσότητας αερίου από τη θερμοκρασία. Ο Gay – Lussac το 1802 μελέτησε την εξάρτηση αυτή με μεγαλύτερη λεπτομέρεια. Οι παρατηρήσεις του τον οδήγησαν στο συμπέρασμα ότι υπό σταθερή πίεση, ο όγκος ορισμένης ποσότητας αερίου είναι ανάλογος της θερμοκρασίας του, και υπό σταθερό όγκο, η πίεση μιας ορισμένης ποσότητας αερίου είναι ανάλογη της θερμοκρασίας του:

$$\text{Νόμος του Gay – Lussac: } V \propto T \text{ (για σταθερά } n, T)$$

$$p \propto T \text{ (για σταθερά } n, T)$$

Ο Νόμος του Gay – Lussac χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη του όγκου του ιδανικού αερίου όταν μια σταθερή ποσότητα θερμαίνεται (ή ψύχεται) υπό σταθερή πίεση:

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \quad (3.2)$$

Εναλλακτικά, ο νόμος χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη της πίεσης, όταν μια σταθερή ποσότητα αερίου θερμαίνεται υπό σταθερό όγκο:

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2} \quad (3.3)$$

Τα πειράματα των Boyle, Gay – Lussac και των διαδόχων τους έδειξαν ότι η πίεση p , ο όγκος V , η θερμοκρασία T και η ποσότητα n των αερίων σχετίζονται μέσω της εξίσωσης:

$$p V = n R T \quad (3.4)$$

Η έκφραση αυτή γίνεται όλο και πιο ακριβής όσο ελαττώνεται η πίεση και όπου R είναι η παγκόσμια σταθερά των αερίων. Ένα αέριο που υπακούει ακριβώς στην Εξίσωση (3.4) ονομάζεται *τέλειο* ή *ιδανικό αέριο*.

Η καταστατική εξίσωση του ιδανικού αερίου είναι ακριβής για αέρια σε χαμηλές πιέσεις και μέτριες θερμοκρασίες. Ωστόσο, αυτή η εξίσωση παρουσιάζει αυξανόμενη απόκλιση σε υψηλότερες πιέσεις και χαμηλότερες θερμοκρασίες και δεν έχει τη δυνατότητα να προβλέψει τη συμπίκνωση ενός αερίου σε υγρό. Δεδομένου ότι πολλές διεργασίες λαμβάνουν χώρα σε υψηλές πιέσεις, η εξίσωση του ιδανικού αερίου αποκλίνει σημαντικά. Σε χαμηλές πιέσεις (της τάξεως της ατμοσφαιρικής πίεσης) και θερμοκρασίες όχι μακριά από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, η καταστατική εξίσωση των αερίων ισχύει ακόμα και για μείγματα υδρογονανθράκων τα οποία μολονότι γενικά απέχουν πολύ από το να χαρακτηριστούν ιδανικά αέρια, συμπεριφέρονται σαν αυτά κάτω από τις προαναφερόμενες συνθήκες. Αυτό συμβαίνει διότι λόγω του ότι τα μόρια τους απέχουν πολύ το ένα από το άλλο, οι ελκτικές μεταξύ τους δυνάμεις είναι πολύ ασθενείς.

Η εξίσωση των πραγματικών αερίων αποτελεί επέκταση του νόμου των ιδανικών αερίων έτσι ώστε να ισχύει σε μεγαλύτερες πιέσεις και θερμοκρασίες. Η διαφορά σε σχέση με τον προηγούμενο νόμο είναι ότι σε αυτήν υπεισέρχεται μια επιπλέον παράμετρος η οποία είναι ο συντελεστής απόκλισης και εκφράζει την απόκλιση του αερίου από την ιδανική συμπεριφορά και γράφεται:

$$p V = n Z R T \quad (3.5)$$

όπου Z , ο συντελεστής της απόκλισης. Ο συντελεστής απόκλισης αποτελεί συνάρτηση της σύστασης, της πίεσης και της θερμοκρασίας του ρευστού. Προφανώς, όσο ακριβέστερα εκτιμάται η τιμή του Z τόσο ακριβέστερη γίνεται η καταστατική εξίσωση των πραγματικών αερίων. Επίσης ο συντελεστής απόκλισης σχετίζεται με τον προσδιορισμό του όγκου του ρευστού και κατά συνέπεια με την πυκνότητα του, ενώ αποτελεί ένα εξαιρετικά κρίσιμο μέγεθος τόσο για τη διαχείριση των κοιτασμάτων και την παραγωγή υδρογονανθράκων, όσο και για τη μεταφορά και την αποθήκευση του φυσικού αερίου.

3.4 ΚΥΒΙΚΕΣ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΕΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ

3.4.1 Καταστατική εξίσωση του Van der Waals

Οι κυβικές καταστατικές εξισώσεις αποτελούν μία κατηγορία εξισώσεων οι οποίες προσπαθούν να αντιμετωπίσουν:

- Την έλλειψη ακρίβειας του νόμου των ιδανικών αερίων όταν εφαρμόζεται σε πραγματικά αέρια
- Την αδυναμία της εξίσωσης των αερίων να περιγράψουν τη θερμοδυναμική συμπεριφορά υγρών

Πολλές απόπειρες έγιναν να διατυπωθεί μια γενική εξίσωση για τα πραγματικά αέρια. Η πρώτη προσπάθεια έγινε από τον Van der Waals⁸ το 1873, ο οποίος πρότεινε το εξής μοντέλο:

$$\left(p + \frac{a}{V_m^2}\right)(V_m - b) = RT \quad (3.6)$$

όπου τα a (attraction parameter) και b (repulsion parameter) είναι θετικές σταθερές οι οποίες αν μηδενιστούν η εξίσωση μετατρέπεται στην καταστατική εξίσωση του ιδανικού αερίου. Αν τα a, b είναι γνωστά, η πίεση μπορεί να υπολογιστεί ως συνάρτηση του όγκου για διάφορες τιμές της θερμοκρασίας. Αντίστοιχα, ο όγκος μπορεί να προσδιοριστεί αν είναι γνωστή η πίεση και η θερμοκρασία. Γενικά η καταστατική εξίσωση του van der Waals ήταν η πρώτη εξίσωση που έδωσε καλύτερο αποτέλεσμα σε σχέση με την εξίσωση του ιδανικού αερίου για πραγματικά αέρια.

Οι διαφορές της καταστατικής εξίσωσης του Van der Waals από την καταστατική εξίσωση του ιδανικού αερίου είναι οι εξής:

- Τα μόρια θεωρούνται σωματίδια με όγκο, οπότε ο όγκος του χώρου που διατίθεται για συμπίεση δεν ισούται με το γεωμετρικό όγκο V του χώρου που τα περικλείει, αλλά με $V-b$ όπου b είναι ο όγκος των ίδιων των μορίων.
- Τα μόρια δέχονται ελκτικές δυνάμεις με αποτέλεσμα η πίεση στα τοιχώματα να μην ισούται με τη μετρούμενη πίεση p αλλά με $p+a$.

Οι σταθερές a, b μπορούν να υπολογιστούν από την κρίσιμη θερμοκρασία και πίεση όπως φαίνεται στην Σχήμα 2.1 επειδή στο κρίσιμο σημείο C η ισόθερμη εμφανίζει σημείο καμπής και η εφαπτομένη είναι οριζόντια, οπότε έχουμε:

Παραγωγίζοντας την καταστατική εξίσωση στο κρίσιμο σημείο προκύπτουν δύο εκφράσεις για τις μερικές παραγώγους. Με απαλοιφή του κρίσιμου όγκου οδηγούμαστε σε εκφράσεις που συνδέουν τα a, b με τις κρίσιμες ιδιότητες του συστατικού p_c και T_c , οι οποίες είναι:

$$a = \frac{27 R^2 T_c^2}{64 p_c}, b = \frac{R T_c}{8 p_c} \quad (3.7)$$

Η εξίσωση του Van der Waals μπορεί να γραφτεί εκφρασμένη ως προς το συντελεστή απόκλισης ($Z = pV/RT$), ως εξής:

$$Z^3 - (B + 1)Z^2 + AZ - AB = 0 \quad (3.8)$$

όπου:

$$A = a \frac{p}{(RT^2)} \text{ και } B = b \frac{p}{RT} \quad (3.9)$$

Η εφαρμογή της εξίσωσης του Van der Waals σε μείγματα πολλών συστατικών καθώς και σε πολύ υψηλές πιέσεις παρουσιάζει αποκλίσεις από την πραγματική τιμή του γραμμομοριακού όγκου ή ισοδύναμα του συντελεστή απόκλισης.

3.4.2 Καταστατική εξίσωση των Redlich-Kwong (RK)

Το 1949 οι Redlich-Kwong⁹ ανέπτυξαν μια καινούργια καταστατική εξίσωση, η οποία εμφάνισε σημαντική βελτίωση σε σχέση με τις εξισώσεις που υπήρχαν μέχρι τότε. Η εξίσωση των Redlich-Kwong δίνεται από την:

$$p = \frac{RT}{V-b} - \frac{a}{V(V-b)} \quad (3.10)$$

όπου:

$$a = 0.42748 \frac{R^2 T_c^2}{p_c} a(T_r), b = 0.08664 \frac{RT_c}{p_c}, a(T_r) = T_r^{-0.5} \quad (3.11)$$

Η καταστατική εξίσωση RK εκφράζεται ως προς το Z με την εξής μορφή:

$$Z^3 - Z^2 + (A - B - B^2)Z - AB = 0 \quad (3.12)$$

$$\frac{p}{p_c} < \frac{T}{2T_c} \quad (3.13)$$

Αν και είναι ακριβέστερη από την καταστατική εξίσωση του Van der Waals στον υπολογισμό των ιδιοτήτων υγρών δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί ικανοποιητικά για την περιγραφή της ισορροπίας φασικών μειγμάτων (υγρού-αερίου).

3.4.3 Καταστατική εξίσωση των Soave-Redlich-Kwong (SRK)

Μια πολύ σημαντική βελτίωση της Redlich-Kwong δόθηκε από τον Soave (1972) ο οποίος έδωσε βελτιωμένες σχέσεις για τις σταθερές της εξίσωσης εισάγοντας τον παράγοντα εκκεντρότητας ω . Δεδομένου ότι οι προηγούμενες καταστατικές εξισώσεις θεωρούν ότι τα μόρια έχουν σφαιρική μορφή, ο παράγοντας ω λαμβάνει υπόψη την απόκλιση από την σφαιρικότητα. Η παράμετρος ω είναι χαρακτηριστική μόνο για τα καθαρά συστατικά. Η καταστατική εξίσωση των Soave-Redlich-Kwong εκφράζεται από την:

$$p = \frac{RT}{V-b} - \frac{a \propto}{V^2 + 2bV + b^2} \quad (3.14)$$

όπου:

$$a = \frac{0.45724 R^2 T_c^2}{p_c}, b = \frac{0.07780 RT_c}{p_c}, \alpha = [1 + m (1 - T_r^{0.5})]^2 \quad (3.15)$$

και

$$m = 0.37464 + 1.5226\omega - 0.26992\omega^2 \quad (3.16)$$

Η καταστατική εξίσωση Soave-Redlich-Kwong μπορεί ισοδύναμα να εκφραστεί ως προς το Z με την εξής μορφή:

$$Z^3 - (1 - B)Z^2 + (A - 3B^2 - 2B)Z - (AB - B^2 - B^3) = 0 \quad (3.17)$$

3.4.4 Καταστατική εξίσωση των Peng-Robinson (PR)

Η καταστατική εξίσωση των Peng-Robinson¹⁰ περιγράφεται από την:

$$p = \frac{RT}{V-b} - \frac{a}{V(V+b)+b(V-b)} \quad (3.18)$$

όπου:

$$a = 0.45724 \frac{R^2 T_c^2}{p_c} \alpha, b = 0.07780 \frac{RT_c}{p_c}, \alpha = [1 + m (1 - \sqrt{T_r})]^2 \quad (3.19)$$

$$m = \begin{cases} \omega \leq 0.49 & m=0.37464+1.5226 \omega-0.2699 \omega^2 \\ \omega \geq 0.49 & m=0.3796+1.485 \omega-0.164 \omega^2+0.01667 \omega^3 \end{cases} \quad (3.20)$$

Η καταστατική εξίσωση εκφράζεται ως προς το Z με την εξής μορφή:

$$Z^3 - (1 - B)Z^2 + (A - 3B^2 - 2B)Z - (AB - B^2 - B^3) = 0 \quad (3.21)$$

Αν και η καταστατική εξίσωση των Peng-Robinson έχει σημαντικές ομοιότητες με την εξίσωση Soave-Redlich-Kwong, γενικά είναι καλύτερη στην πρόβλεψη της πυκνότητας υγρών πολλών μειγμάτων, ιδιαίτερα των μη πολικών.

Κρίσιμη θερμοκρασία και πίεση

Οι κρίσιμες συνθήκες (πίεση-θερμοκρασία) ενός ρευστού είναι οι συνθήκες εκείνες όπου οι δυο φάσεις (αέρια-υγρή) έχουν τις ίδιες θερμοδυναμικές ιδιότητες και σύσταση. Στον Πίνακα 3.1 παρατίθενται οι κρίσιμες θερμοκρασίες και πιέσεις ορισμένων ρευστών και με μπλε πλαίσιο επισημαίνονται τα ρευστά που χρησιμοποιήθηκαν στους πειραματικούς υπολογισμούς.

(Courtesy of Fischer & Porter)						
Gas	Mol. Wt.	Formula	T _c (°F)	P _c (psia)	T _c (K)	P _c (kPa)
Acetic Acid	60	CH ₃ COOH	1071	840	595	5792
Acetylene	26	C ₂ H ₂	556	911	309	6280
Air	(29)	—	239	547	133	3770
Ammonia	17	NH ₃	730	1640	405	11310
Argon	40	A	272	705	151	4860
Benzene	78	C ₆ H ₆	1011	702	562	4840
Butane	58	C ₄ H ₁₀	765	551	425	3800
Carbon Dioxide	44	CO ₂	548	1072	304	7390
Carbon Monoxide	28	CO	239	507	133	3500
Carbon Tetrachloride	154	CCl ₄	1001	661	556	4560
Chlorine	71	Cl ₂	751	1118	417	7709
Cyclohexane	84	C ₆ H ₁₂	997	594	554	4100
Decane	142	C ₁₀ H ₂₂	1115	312	619	2150
Ethane	30	C ₂ H ₆	550	708	305	4880
Ethanol	46	C ₂ H ₅ OH	929	927	516	6390
Ethyl Chloride	64.5	C ₂ H ₅ Cl	829	764	460	5270
Ethyl Ether	74	C ₄ H ₁₀ O	839	522	466	3600
Ethylene	28	C ₂ H ₄	509	748	283	5160
Helium*	4	He	(24)	(151)	(13.3)	(1050)
Heptane	100	C ₇ H ₁₆	972	377	540	2600
Hexane	86	C ₆ H ₁₄	914	436	508	3010
Hydrogen*	2	H ₂	(74)	(306)	(41)	(2110)
Hydrogen Chloride	36.5	HCl	584	1200	324	8270
Hydrogen Cyanide	27	HCN	822	735	457	5070
Methane	16	CH ₄	343	673	191	4640
Methanol	32	CH ₃ OH	924	1450	513	10000
Methyl Chloride	50.5	CH ₃ Cl	749	967	416	6670
Neon*	20	Ne	(95)	(498)	(52)	(3430)
Nitric Oxide	30	NO	323	955	179	6590
Nitrogen	28	N ₂	227	492	126	3390
Nonane	128	C ₉ H ₂₀	1072	336	596	2320
Octane	114	C ₈ H ₁₈	1025	362	569	2500
Oxygen	32	O ₂	278	730	154	5030
Pentane	72	C ₅ H ₁₂	847	486	470	3350
Propane	44	C ₃ H ₈	666	617	370	4250
Propanol	76	C ₃ H ₇ OH	914	779	508	5370
Propylene	42	C ₃ H ₆	658	662	365	4562
Sulfur Dioxide	64	SO ₂	775	1142	430	7870
Sulfur Trioxide	80	SO ₃	885	1228	491	8470
Toluene	92	C ₆ H ₅ CH ₃	1069	612	594	4220
Water	18	H ₂ O	1165	3206	647	22100

*Pseudo-critical values shown.

Πίνακας: 3.1: Κρίσιμες ιδιότητες ορισμένων ρευστών

Κανόνες ανάμειξης

Όλες οι καταστατικές εξισώσεις που περιγράφηκαν στις προηγούμενες παραγράφους αφορούν την περιγραφή της θερμοδυναμικής συμπεριφοράς καθαρών συστατικών και όχι μειγμάτων, δεδομένου ότι οι κρίσιμες ιδιότητες ενός τυχαίου μείγματος δεν είναι γνωστές.

Προκειμένου οι καταστατικές εξισώσεις να μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μείγματα γνωστών συστατικών, χρησιμοποιούνται οι λεγόμενοι «κανόνες ανάμειξης»¹¹ οι οποίοι παρέχουν τιμές για τις παραμέτρους A και B του μείγματος σαν συνάρτηση των αντίστοιχων τιμών του κάθε συστατικού. Οι πιο συνηθισμένοι κανόνες ανάμειξης είναι ο τετραγωνικός για την παράμετρο A και ο γραμμικός για την παράμετρο B και δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$A = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N y_i y_j A_{ij}$$

$$B = \sum_{i=1}^N y_i B_i$$

$$A_{ij} = (1 - k_{ij}) \sqrt{A_i A_j} \quad (3.22)$$

όπου:

- y_i είναι η σύσταση
- k_{ij} είναι οι συντελεστές αλληλεπίδρασης.

Συντελεστές k_{ij} ¹² ονομάζονται οι δυαδικοί συντελεστές αλληλεπίδρασης και το δυαδικό διαμορφώνεται από τα συστατικά i και j. Αυτοί οι δυαδικοί συντελεστές αλληλεπίδρασης είναι εμπειρικοί. Ο σκοπός των δυαδικών συντελεστών αλληλεπίδρασης είναι να ενισχυθεί η ικανότητα μιας καταστατικής εξίσωσης να προβλέπει την επιθυμητή συμπεριφορά φάσης.

3.5 ΕΥΡΕΣΗ ΤΩΝ Z ΚΑΙ c ΜΕΣΩ ΚΥΒΙΚΗΣ ΚΑΤΑΣΤΑΤΙΚΗΣ ΕΞΙΣΩΣΗΣ

Με βάση την αναφορά που έγινε στις προηγούμενες ενότητες για τις κυβικές καταστατικές εξισώσεις, σε αυτή την ενότητα γίνεται εφαρμογή της θεωρίας για την εύρεση του συντελεστή απόκλισης και του συντελεστή ισοθερμοκρασιακής συμπίεστότητας.

Για μονοφασικά ρευστά υπολογίζεται από την καταστατική εξίσωση ο συντελεστής συμπίεστότητας (Z) και κατά επέκταση υπολογίζεται η πυκνότητα και ο γραμμομοριακός όγκος με χρήση της καταστατικής εξίσωσης των πραγματικών αερίων:

$$pV = nZRT \rightarrow P \frac{m}{d} = nZRT \rightarrow d = \frac{p m}{n Z R T} \rightarrow d = \frac{p n MW}{n Z R T} \rightarrow$$
$$d = \frac{p MW}{Z R T} \rightarrow d = \frac{p MW}{\frac{p V_m}{R T} R T} \rightarrow V_m = \frac{MW}{d} \quad (3.23)$$

Με τον όρο συμπιεστότητα στη φυσική χαρακτηρίζεται η ιδιότητα των σωμάτων να μειώνουν τον όγκο τους όταν ασκείται σε αυτά πίεση. Διακρίνονται δύο συντελεστές συμπιεστότητας:

- ο ισοθερμοκρασιακός ή ισόθερμος συντελεστής: $C = -\frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial p} \right)_T$ (3.24)

- ο αδιαβατικός συντελεστής: $C = -\frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p$ (3.25)

Ο συντελεστής ισοθερμοκρασιακής συμπιεστότητας (c) δείχνει πόσο μειώνεται ο όγκος του ρευστού και κατά συνέπεια και η πυκνότητά του καθώς πέφτει η πίεση. Στόχος κατά την διάρκεια της εκμετάλλευσης ενός ταμιευτήρα είναι να διατηρείται σταθερή η παροχή. Ο συντελεστής c μπορεί να υπολογιστεί από τη διαφοράριση μιας καταστατικής εξίσωσης ή από διαγράμματα, πίεσης – όγκου ή πίεσης – πυκνότητας, ή πίνακες πειραματικών δεδομένων.

Στην πρώτη περίπτωση τόσο ο όγκος όσο και η παράγωγος του ως προς την πίεση υπολογίζονται από μία καταστατική εξίσωση. Πιο συγκεκριμένα, ο υπολογισμός του $\frac{dV}{dp}$ γίνεται με τη χρήση της καταστατικής εξίσωσης πραγματικού αερίου:

$$p V_m = Z R T \rightarrow dp V + p dV = R T dZ \rightarrow V + p \frac{dV}{dp} = R T \frac{dZ}{dp} \rightarrow$$
 (3.26)

$$\frac{dV}{dp} = \frac{RT}{p} \frac{dZ}{dp} - \frac{V}{p}$$

Για να υπολογιστεί το $\frac{dV}{dp}$ αρκεί να υπολογιστεί το $\frac{dZ}{dp}$. Ο συγκεκριμένος υπολογισμός εξαρτάται από την επιλεγμένη καταστατική εξίσωση. Για παράδειγμα, με χρήση της καταστατικής εξίσωσης Peng-Robinson, η οποία εκφράζεται ως προς το Z με την εξής μορφή:

$$Z^3 - (1 - B)Z^2 + (A - 3B^2 - 2B)Z - (AB - B^2 - B^3) = 0$$
 (3.27)

μετά την διαφοράριση η καταστατική εξίσωση γίνεται ως εξής:

$$3Z^2 - (-dB)Z^2 - (1 - B)2Z dZ + (dA - 6BdB - 2 dB)Z + (A - 3B^2 - 2B)dZ - (BdA + AdB - 2BdB - 3 B^2 - 3B^2dB) = 0$$
 (3.28)

Οπότε προκύπτει η εξής συνάρτηση:

$$\frac{dZ}{dp} = -\frac{Z-B}{3Z^2 - (1-B)2Z + (A - 3B^2 - 2B)} \frac{dA}{dp} - \frac{Z^2 - 6BZ - 2Z + A - 3B^2 - 2B}{3Z^2 - (1-B)2Z + (A - 3B^2 - 2B)} \frac{dB}{dp}$$
 (3.29)

όπου:

$$\frac{dA}{dp} = \frac{A}{p} \text{ και } \frac{dB}{dp} = \frac{B}{p}$$
 (3.30)

Τεχνική προσθετικής διόρθωσης όγκου καταστατικής εξίσωσης (volume translation)

Ένα μειονέκτημα των καταστατικών εξισώσεων είναι ότι δεν προβλέπουν ακριβείς όγκους υγρών και κατά συνέπεια και την πυκνότητα. Έτσι για τη βελτίωση των όγκων που υπολογίζονται από τις καταστατικές εξισώσεις εφαρμόζεται η τεχνική της μετατόπισης όγκου, που είναι προσθετική διόρθωση, επί του όγκου που κανονικά θα προέβλεπε η καταστατική εξίσωση. Η τεχνική αυτή εφαρμόστηκε από τον Peneloux αρχικά και έπειτα το 1979 ο Martin¹³ πρότεινε μια νέα εκδοχή της. Η τεχνική για ένα συστατικό είναι η εξής:

$$V_m = V_m^{EOS} - t_m \quad (3.31)$$

όπου:

V_m : ο διορθωμένος γραμμομοριακός όγκος

V_m^{EOS} : ο γραμμομοριακός όγκος που υπολογίζεται από την αρχική καταστατική εξίσωση

t_m : χαρακτηριστική τιμή διόρθωσης του γραμμομοριακού όγκου για το κάθε καθαρό συστατικό

Επιπρόσθετα η τεχνική για μείγμα είναι η εξής:

$$V_m = V_m^{EOS} - \sum_i^N x_i t_i \quad (3.32)$$

όπου:

$\sum_i^N x_i t_i$: η τιμή διόρθωσης του γραμμομοριακού όγκου για μείγμα

Επίσης οι Tsai και Chen¹⁴ ασχολήθηκαν με την τεχνική που εφάρμοσε πρώτος ο Peneloux και πρότειναν μια νέα εκδοχή της. Βασίστηκαν στην καταστατική εξίσωση των Peng-Robinson που χρησιμοποιεί δυο παραμέτρους, τις a και b και της πρόσθεσαν ακόμα μια παράμετρο, την t_m . Έτσι η καταστατική εξίσωση των Peng-Robinson έγινε ως εξής:

$$p = \frac{RT}{V + t_m - b} - \frac{a}{(V + t_m)(V + t_m + b) + b(V + t_m - b)} \quad (3.33)$$

Η παράμετρος a των Peng-Robinson είναι συνάρτηση του ακεντρικού παράγοντα (ω) και της ανηγμένης θερμοκρασίας (T_r). Ενώ στην καταστατική των Tsai και Chen (VTPR) η παράμετρος a εξαρτάται και από μια ακόμα παράμετρο N όπως φαίνεται και παρακάτω:

$$\alpha(T) = [1 + M(1 - T_r) + N(1 - T_r)(0,7 - T_r)]^2 \quad (3.34)$$

όπου:

$$M = 0,20473 + 0,83548 \omega - 0,18470 \omega^2 + 0,16675 \omega^3 - 0,09881 \omega^4 \quad (3.35)$$

Η παράμετρος N αποτελεί σταθερά για το κάθε καθαρό συστατικό και βρίσκεται από πίνακες.

Η παράμετρος t_m είναι συνάρτηση του ακεντρικού παράγοντα (ω) και της ανηγμένης θερμοκρασίας (T_r) αλλά περιέχει και μια τρίτη σταθερά την k_3 όπως παρουσιάζεται παρακάτω:

$$t_m = \frac{RT_c}{p_c} \left[k_1 + k_2 \left(1 - T_r^{\frac{2}{3}} \right) + k_3 \left(1 - T_r^{\frac{2}{3}} \right)^2 \right] \quad (3.36)$$

όπου:

$$k_1 = 0,00185 + 0,00438 \omega + 0,36322 \omega^2 - 0,90831 \omega^3 + 0,55885 \omega^4 \quad (3.37)$$

$$k_2 = -0,00542 - 0,51112 k_3 + 0,04533 k_3^2 + 0,07447 k_3^3 - 0,03831 k_3^4 \quad (3.38)$$

Η παράμετρος k_3 αποτελεί σταθερά για το κάθε καθαρό συστατικό και βρίσκεται από πίνακες.

Στον Πίνακα 3.2 παρατίθενται οι σταθερές N και k_3 για τους υδρογονάνθρακες (αέριους και υγρούς) που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα.

ΣΥΣΤΑΤΙΚΑ	N	k_3
Μεθάνιο	0.08248	0.20978
Πεντάνιο	0.16851	0.26392
Τολουένιο	0.16898	0.28740
Κυκλοεξάνιο	0.19138	0.26575

Πίνακας 3.2: Σταθερές καθαρών συστατικών

Οι επιπτώσεις που έχει η τεχνική της μετατόπισης όγκου στην ισοθερμοκρασιακή συμπίεστικότητα είναι μικρή και αυτό διότι σύμφωνα με την εξίσωση 3.24 η μεταβολή του όγκου έχει ως αποτέλεσμα μικρή μεταβολή της ισοθερμοκρασιακής συμπίεστικότητας επειδή ο όγκος βρίσκεται στον παρονομαστή. Η τεχνική δεν έχει επίπτωση στο διαφορικό $\frac{dV_m}{dp}$ και κατά επέκταση στη μεταβολή της ισοθερμοκρασιακής συμπίεστικότητας, όσο και να μεταβάλλεται η πίεση ο όγκος δεν αλλάζει, όπως φαίνεται και παρακάτω.

$$\frac{dV_m}{dp} = \frac{d}{dp} (V_m^{EOS} - t_m) = \frac{dV_m^{EOS}}{dp} - \frac{dc}{dp} = \frac{dV_m^{EOS}}{dp} \quad (3.39)$$

3.6 ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΗΣ ΤΡΙΤΟΒΑΘΜΙΑΣ ΕΞΙΣΩΣΗΣ

Δεδομένου ότι οι κυβικές καταστατικές εξισώσεις μπορούν να γραφούν σαν πολυωνμικές εξισώσεις τρίτου βαθμού ως προς Z , παρατίθεται η μέθοδος προσδιορισμού των ριζών ενός πολυώνυμου τρίτου βαθμού¹⁵.

Έστω το πολυώνυμο

$$Z^3 + a_2 Z^2 + a_1 Z + a_0 = 0 \quad (3.40)$$

Οι ρίζες του δίνονται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$Z_1 = -\frac{1}{3} \alpha_2 + (S + T) \quad (3.41)$$

$$Z_2 = -\frac{1}{3} \alpha_2 - \frac{1}{2} (S + T) + \frac{1}{2} i \sqrt{3} (S - T) \quad (3.42)$$

$$Z_3 = -\frac{1}{3} \alpha_2 - \frac{1}{2} (S + T) - \frac{1}{2} i \sqrt{3} (S - T) \quad (3.43)$$

όπου:

$$Q = \frac{3 \alpha_1 - \alpha_2^2}{9} \quad (3.44)$$

$$R = \frac{9 \alpha_2 \alpha_1 - 27 \alpha_0 - \alpha_2^3}{54} \quad (3.45)$$

$$D = Q^3 + R^2 \quad (3.46)$$

$$S = \sqrt[3]{R + \sqrt{D}} \text{ και } T = \sqrt[3]{R - \sqrt{D}} \quad (3.47)$$

Αν η παράμετρος (διακρίνουσα) $D > 0$ τότε υπάρχει μια πραγματική ρίζα (3.41) και δυο μιγαδικές (3.42) και (3.43) και εάν $D = 0$ τότε όλες οι ρίζες είναι πραγματικές και οι δυο τελευταίες είναι ίσες. Αν $D < 0$ τότε οι ρίζες είναι όλες πραγματικές και θέτοντας:

$$\theta = \cos^{-1} \left(\frac{R}{\sqrt{-Q^3}} \right) \quad (3.48)$$

Οι ρίζες δίνονται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$Z_1 = 2\sqrt{-Q} \cos \left(\frac{\theta}{3} \right) - \frac{1}{3} \alpha_2 \quad (3.49)$$

$$Z_2 = 2\sqrt{-Q} \cos \left(\frac{\theta + 2\pi}{3} \right) - \frac{1}{3} \alpha_2 \quad (3.50)$$

$$Z_3 = 2\sqrt{-Q} \cos \left(\frac{\theta + 4\pi}{3} \right) - \frac{1}{3} \alpha_2 \quad (3.51)$$

Από τις τρεις λύσεις που προκύπτουν και αφού αγνοηθούν οι μιγαδικές και οι αρνητικές, εάν υπάρξουν πάνω από μια θετικές και πραγματικές ρίζες τότε η επιλογή της ρίζας βασίζεται στην ελαχιστοποίηση της ενέργειας Gibbs. Έτσι για τα υγρά επιλέγεται η μικρότερη ρίζα ενώ για τα αέρια η μεγαλύτερη.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ – ΒΑΘΜΟΝΟΜΗΣΗ – ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

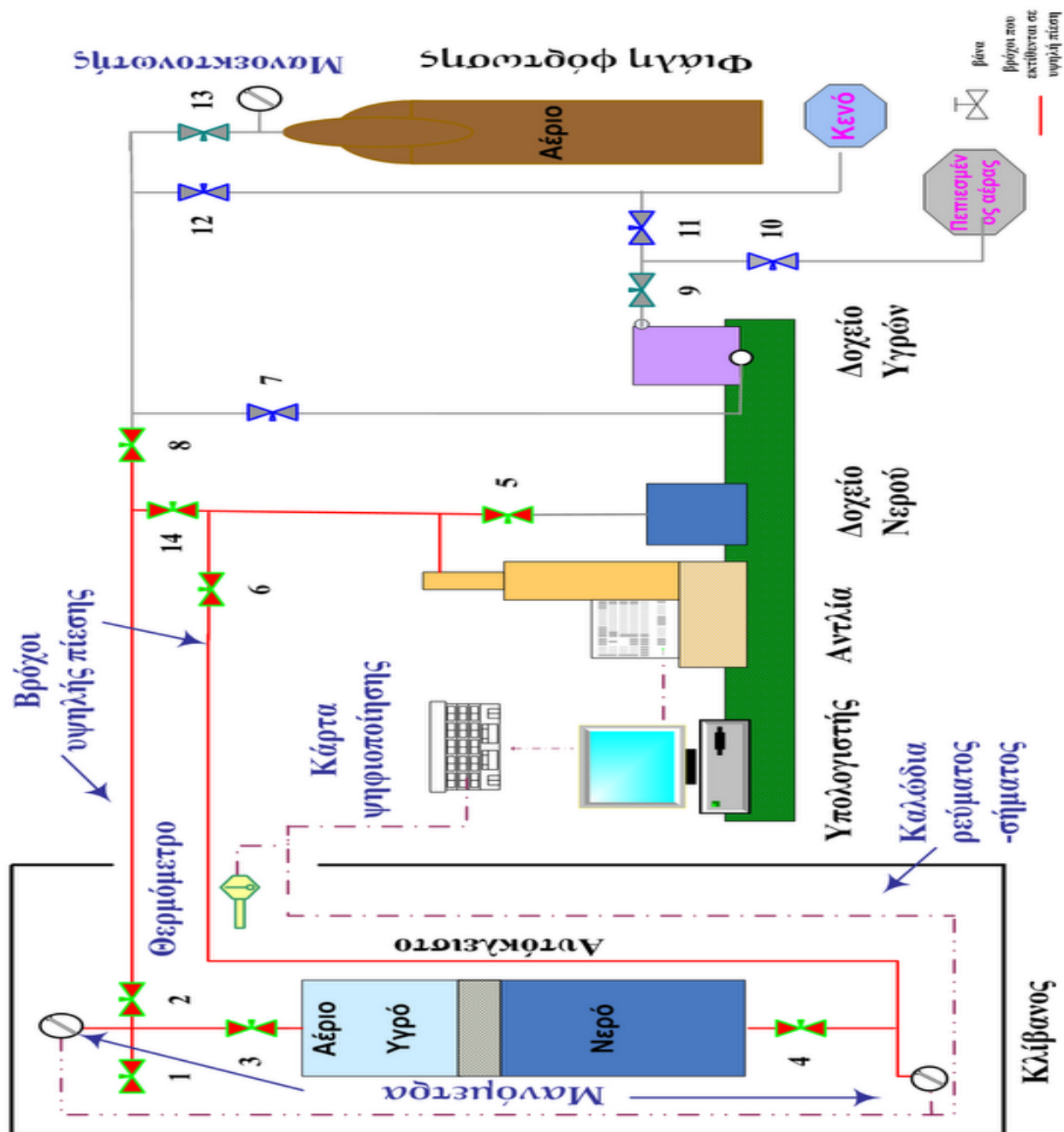
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο σκοπός του πειράματος είναι ο υπολογισμός των συντελεστών απόκλισης (Z) και ισοθερμοκρασιακής συμπίεστότητας (c) μέσω των μετρήσεων του όγκου του ρευστού που μελετάται. Η πειραματική διάταξη που σχεδιάστηκε, αποτελείται από αυτόκλειστο που είχε τοποθετηθεί μέσα στον κλίβανο και από μια αντλία. Στον άνω θάλαμο του αυτοκλείστου φορτώθηκε το ρευστό ενώ στον κάτω θάλαμο υπήρχε νερό. Η αύξηση της πίεσης μέσα στο αυτόκλειστο επιτεύχθηκε μέσω της εισπίεσης νερού από την αντλία στον κάτω θάλαμο του αυτοκλείστου. Το ρευστό μελετήθηκε σε εύρος πιέσεων από 30 bar μέχρι τα 500 bar και για θερμοκρασίες από 28 °C έως τους 90°C. Ρυθμιζόταν η τιμή της πίεσης μέσω της αντλίας και καταγράφονταν οι ενδείξεις του όγκου του νερού που παρέμενε στο θάλαμο της αντλίας, της πίεσης της αντλίας και των μανομέτρων και της θερμοκρασίας του θερμομέτρου που είχε τοποθετηθεί μέσα στον κλίβανο.

Ιδιαίτερη βαρύτητα δόθηκε στη βαθμονόμηση της διάταξης αλλά και στον σχεδιασμό των πειραμάτων.

4.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ

Για την υλοποίηση των πειραμάτων σχεδιάστηκε πειραματική διάταξη. Ο σκοπός της ήταν να μετρηθεί ο όγκος του εκάστοτε υπό μελέτη ρευστού σε ορισμένες τιμές πίεσης και θερμοκρασίας. Για αυτό το σκοπό συνδέθηκε το αυτόκλειστο που βρίσκεται εντός του κλιβάνου με την αντλία μέσω των σωλήνων όπως φαίνεται στην πειραματική διάταξη του Σχήματος 4.1.



Σχήμα 4.1: Πειραματική διάταξη για την εκτέλεση των μετρήσεων

4.3 ΑΝΑΛΥΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΟΥ ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΥ

Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκε για τη διεξαγωγή του πειραματικού μέρους της διπλωματικής εργασίας είναι ο εξής:

- Αντλία
- Βαλβίδες
- Δοχείο φόρτωσης υγρών
- Ηλεκτρονικός υπολογιστής
- Θερμόμετρο
- Κάρτα ψηφιοποίησης σημάτων
- Κλίβανος
- Μανοεκτονωτής
- Μανόμετρα
- Αυτόκλειστο
- Σύνδεσμοι υψηλών πιέσεων
- Συσκευή μέτρησης όγκου αερίων, Gasometer
- Σωλήνες
- Φιάλη φόρτωσης μεθανίου

4.3.1 Αντλία Teledyne ISCO

Η αντλία Teledyne ISCO (Εικόνα 4.1) που χρησιμοποιήθηκε είναι εμβολοφόρος ογκομετρική αντλία υψηλής ακριβείας με δυνατότητα να εισπνέζει νερό στη διάταξη. Χρησιμοποιεί ως μέσο εφαρμογής πίεσης το νερό διότι έχει μικρή και γνωστή συμπίεσιμότητα, χαμηλό κόστος και σε περίπτωση διαρροής οι επιπτώσεις στην ασφάλεια των απασχολημένων είναι αμελητέες σε σχέση με τον υδράργυρο που χρησιμοποιούνταν παλαιότερα. Ορίζοντας συγκεκριμένη τιμή της πίεσης η αντλία εισπνέζει νερό στον κάτω θάλαμο του αυτοκλείστου. Καταγράφονται οι ενδείξεις της πίεσης και του εναπομένοντα όγκο νερού στην αντλία. Συνδέεται με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή.



Χωρητικότητα	266 ml
Παροχή (ml/min)	0.001 - 107
Ακρίβεια μέτρησης	14.7 nlt
Ακρίβεια παροχής	0.5% of setpoint
Εύρος πίεσης (psi)	0- 7,500
Υλικά κατασκευής	Nitronic 50, PTFE, Hastelloy C-276
Θερμοκρασία λειτουργίας	5 - 40° C
Απαιτούμενη ενέργεια	100 Vac, 117 Vac, 234 Vac, 50/60 Hz
Διαστάσεις (HxWxD, cm)	103 x 27 x 45
Βάρος	Αντλία: 33 kg - Χειριστήριο: 3 kg

Εικόνα 4.1 : Αντλία Teledyne ISCO

Πίνακας 4.1: Προδιαγραφές της αντλίας

Teledyne ISCO 260D

4.3.2 Βαλβίδες

Οι βαλβίδες που χρησιμοποιήθηκαν στην πειραματική διάταξη είναι δυο ειδών, Autoclave Engineers (Εικόνα 4.2) και Nova Swiss (Εικόνα 4.3) με υψηλές προδιαγραφές αντοχής στην πίεση και τη θερμοκρασία.

	Autoclave Engineers				Nova Swiss	
Μοντέλο	10V2075		BTV 2F2P4		SN 989	SN 4793
Μέγιστη πίεση (psi)	15.000	14.385	10.000	9.600	1000	1000
Μέγιστη θερμοκρασία (°C)	65	149	65	149	-	-
Εξωτερική διάμετρος σωλήνα (inch)	1/8				1/8	

Πίνακας 4.2: Προδιαγραφές των βαλβίδων



Εικόνα 4.2: Βαλβίδα Autoclave Engineers



Εικόνα 4.3: Βαλβίδα Nova Swiss

4.3.3 Δοχείο φόρτωσης υγρών

Το δοχείο φόρτωσης υγρού χρησιμοποιήθηκε για τη φόρτωση των υγρών φάσεων στο αυτόκλειστο (Εικόνα 4.4).



Εικόνα 4.4: Δοχείο φόρτωσης υγρών

4.3.4 Ηλεκτρονικός υπολογιστής

Στον ηλεκτρονικό υπολογιστή (Εικόνα 4.5) συνδέθηκε η κάρτα ψηφιοποίησης και η αντλία για τη συλλογή των πειραματικών δεδομένων. Όλες οι μετρήσεις συλλέγονται στον υπολογιστή με τη βοήθεια του προγράμματος Lab View.

- Lab VIEW – Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench: είναι μια γραφική γλώσσα προγραμματισμού που επιτρέπει τον έλεγχο των οργάνων, τη λήψη δεδομένων, και την επεξεργασία τους κατά τη διάρκεια και μετά τη λήψη.
- Η κάρτα που υπάρχει στο εργαστήριο είναι NI PCI-6035E με 16-bit ADC.



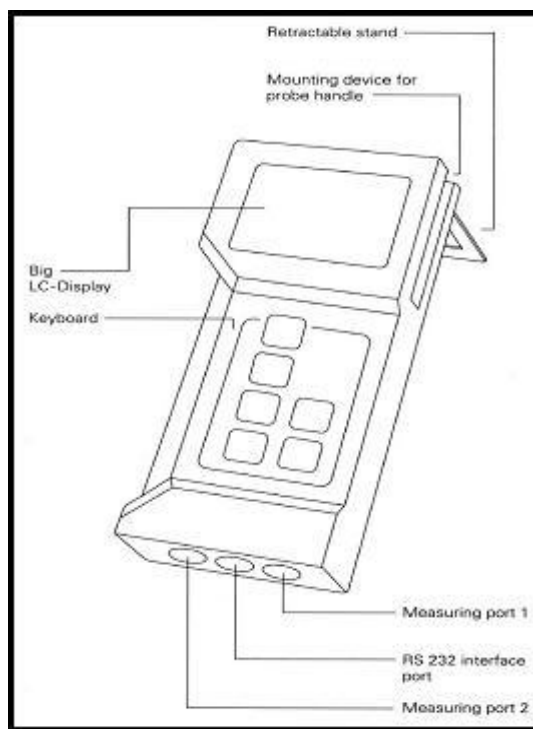
Εικόνα 4.5: Ηλεκτρονικός υπολογιστής κατά τη διάρκεια επεξεργασίας μετρήσεων με το πρόγραμμα Lab VIEW

4.3.5 Θερμόμετρο

Το θερμόμετρο που χρησιμοποιήθηκε ανήκει στη σειρά P600 της εταιρείας Dostamann electronic (Εικόνα 4.6) με ακρίβεια $\pm 0,03\text{ }^{\circ}\text{C}$. Το θερμοκρασιακό εύρος στο οποίο μετράει είναι από -200°C έως $+850^{\circ}\text{C}$. Συνδέεται μέσω καλωδίου με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή.



Εικόνα 4.6: Θερμόμετρο P600



Εικόνα 4.7: Θερμόμετρο P600

4.3.6 Κάρτα ψηφιοποίησης σημάτων

Η κάρτα ψηφιοποίησης σημάτων ανήκει στη σειρά BNC-2110 (Εικόνα 4.8). Συνδέεται με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή μέσω καλωδίου και μετατρέπει το αναλογικό σήμα των μανομέτρων, που βρίσκονται εντός του κλιβάνου, σε ψηφιακό. Η κάρτα ψηφιοποίησης σημάτων εμπεριέχει φίλτρο μειώνοντας το θόρυβο των σημάτων.

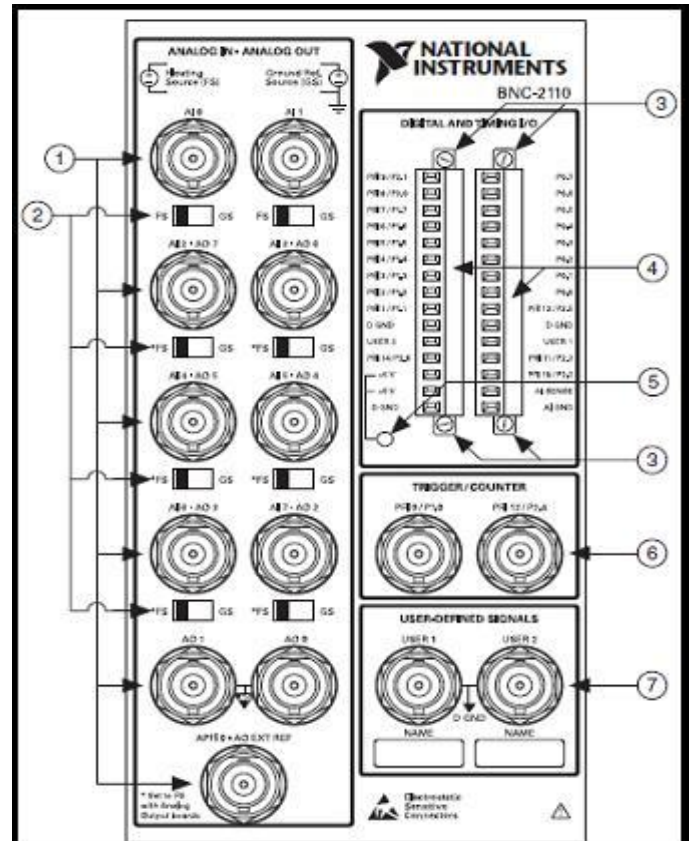
Ο θόρυβος των σημάτων αυξάνει με το μήκος του καλωδίου από τα όργανα (π.χ. μανόμετρα) έως την κάρτα ψηφιοποίησης αλλά και από παρεμβολές και οφείλεται στους εξής παράγοντες:

- Στη θερμοκρασία, καθώς αυξάνει η θερμοκρασία αυξάνει και η αντίσταση.

Από τον νόμο του Ohm: $V=I \cdot R$ που συνδέει την τάση, το ρεύμα και την αντίσταση αν κρατήσουμε σταθερό το ρεύμα (I) τότε αλλάζει η τάση (V).

- Στα επαγωγικά ρεύματα, τα οποία προκαλούνται από την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία του περιβάλλοντος επηρεάζουν το ρεύμα (I) καθώς η αντίσταση παραμένει η ίδια.

Από τον νόμο του Ohm: $V=I \cdot R$ που συνδέει την τάση, το ρεύμα και την αντίσταση αν κρατήσουμε σταθερό την αντίσταση (R) τότε αλλάζει η τάση (V).



1 Analog Input/Analog Output BNC Connectors	5 Power Indicator Light
2 FS/GS Switches	6 Trigger/Counter BNC Connectors
3 Terminal Block Retaining Screws	7 User-Defined Signals BNC Connectors
4 Digital and Timing I/O Spring Terminal Blocks	

1. Εισαγωγή αναλογικών σημάτων
2. Πλήκρο ενεργοποίησης
3. Βίδες συναρμολόγησης
4. Έξοδος ψηφιακών σημάτων
5. Ενδεικτικό φως
6. Μετρητής σημάτων
7. Σήματα καθορισμένα από τον χρήστη

Εικόνα 4.8: Κάρτα ψηφιοποίησης σημάτων BNC-2110

4.3.7 Εργαστηριακός κλίβανος

Ο κλίβανος που χρησιμοποιείται στο εργαστήριο είναι μοντέλο LAC 2-18-4 της εταιρίας TEMCO Inc (Εικόνα 4.9) με θερμοστάτη για τον έλεγχο της θερμοκρασίας και τη διατήρησή της σε σταθερή τιμή με ακρίβεια $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$. Η μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας του είναι 260°C και η ακρίβεια του θερμοστάτη είναι $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$. Επειδή η ακρίβεια μέτρησης του θερμοστάτη δεν είναι ιδιαίτερα υψηλή για να εξασφαλιστεί υψηλή ακρίβεια μετρήσεων, τοποθετήθηκε ένα επιπρόσθετο θερμόμετρο μέσα στον κλίβανο.

Μέγιστη θερμοκρασία	260 °C
Ισχύς	240V – IPH -60Hz
Ακρίβεια θερμοστάτη	$\pm 0.5^{\circ}\text{C}$

Πίνακας 4.3: Προδιαγραφές κλιβάνου



Εικόνα 4.9: Εργαστηριακός κλίβανος

4.3.8 Μανόμετρα

- Τα μανόμετρα που τοποθετήθηκαν εντός του κλιβάνου και χρησιμοποιούνται για την πίεση στον άνω και κάτω θάλαμο του αυτοκλείστου είναι της εταιρείας OMEGA Engineering INC και είναι μοντέλα PX 4200B (Εικόνα 4.10). Τα μανόμετρα στέλνουν αναλογικά σήματα στη κάρτα ψηφιοποίησης, η οποία τα μετατρέπει σε ψηφιακά και αποθηκεύονται στον ηλεκτρονικό υπολογιστή.

Εύρος πιέσεων	0 – 10.000 psi
Εύρος θερμοκρασίας	0 °C - 150 °C
Εύρος τάσης	0 – 100 mV
Ακρίβεια	0,25 Full Scale εμπεριέχοντας τη γραμμικότητα και την υστέρηση

Πίνακας 4.4: Προδιαγραφές μανομέτρων



Εικόνα 4.10: Μανόμετρα OMEGA PX 4200B

- Για τη βαθμονόμηση του μανομέτρου της αντλίας χρησιμοποιήθηκαν δύο μανόμετρα αυξημένης ακριβείας. Είναι της σειράς PX01 Series με εύρος λειτουργίας από ατμοσφαιρική πίεση έως 5000 psi και από 15 έως 71 °C (60 έως 160 °F) και συνοδεύονται με πιστοποιητικό βαθμονόμησης (Εικόνα 4.11). Η βαθμονόμηση είχε ήδη γίνει λίγο προτού ξεκινήσουν τα πειράματα της παρούσας εργασίας και για αυτό δεν επαναλήφθηκε.

PX01Series Excitation	24 to 32 Vdc
Output	0 to 5 Vdc ± 0.03 Vdc
Linearity	0.05% FSO
Hysteresis	0.05% FSO
Repeatability	$\pm 0.05\%$ FSO
Zero Balance	0 V ± 0.01 Vdc
Agency Approvals	Standard FM Intrinsically Safe
Sensing Element	4-active-arm bridge, using thick-film
Shunt Calibration Value	80% FS
Operating Temp Range	-46 to 121°C (-50 to 250°F)
Compensated Temp Range	16 to 71°C (60 to 160°F)
Proof Pressure	150% of rated pressure
Burst Pressure	300% of rated pressure

Πίνακας 4.5: Χαρακτηριστικά του μανομέτρου



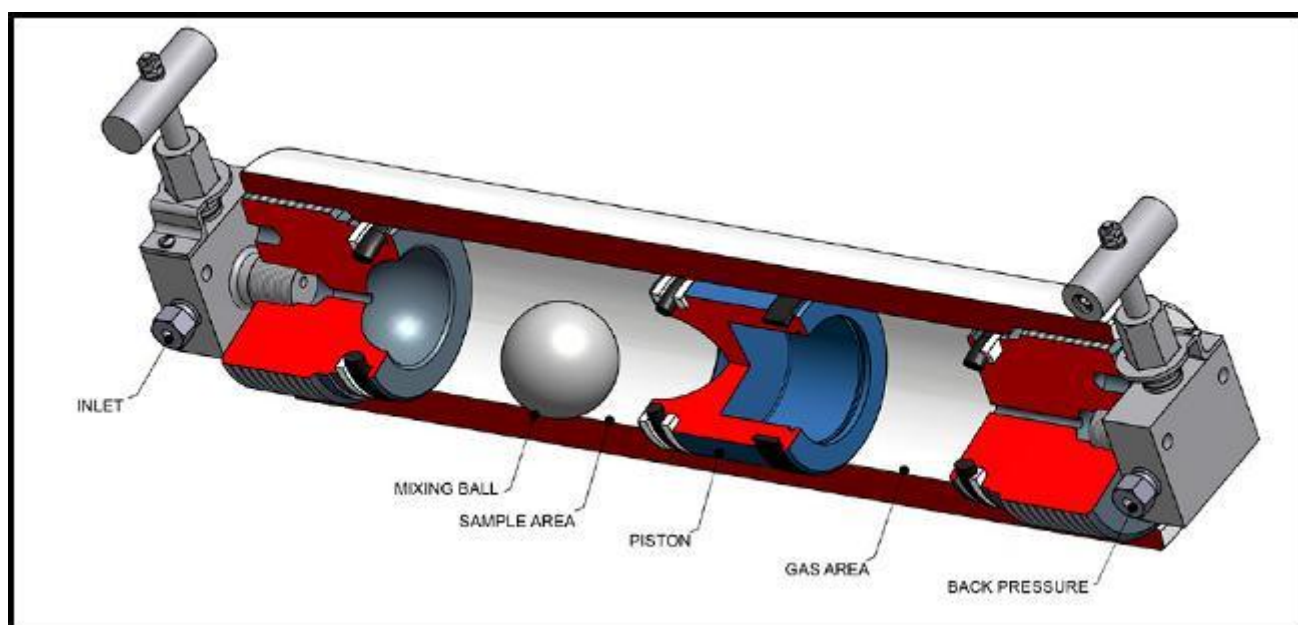
Εικόνα 4.11: Μανόμετρο PX01 Series

4.3.9 Αυτόκλειστο

Το αυτόκλειστο που χρησιμοποιήθηκε κατά τη διάρκεια των πειραμάτων είναι της εταιρείας Proserv και το μοντέλο είναι PROLIGHT TS-75704 (Εικόνα 4.13). Το αυτόκλειστο είναι κατασκευασμένο από τιτάνιο που είναι ιδιαίτερα ανθεκτικό υλικό και το οποίο αντέχει σε υψηλές πιέσεις και θερμοκρασίες ενώ έχει σημαντικά χαμηλότερη πυκνότητα από το χάλυβα με αποτέλεσμα πολύ μικρότερο βάρος.

Μέγιστη πίεση	500 bar
Μέγιστη θερμοκρασία	149 °C
Χωρητικότητα	632 cc

Πίνακας 4.6 Προδιαγραφές αυτοκλείστου



Εικόνα 4.12: Εσωτερικό μέρος του αυτοκλείστου



Εικόνα 4.13: Αυτόκλειστο PROLIGHT TS-75704

4.3.10 Σύνδεσμοι υψηλών πιέσεων – Σωλήνες

Οι σύνδεσμοι υψηλών πιέσεων που χρησιμοποιήθηκαν στην πειραματική διάταξη είναι των εταιρειών Autoclave, Nova και Swagelok (Εικόνα 4.15).

Οι σωλήνες είναι διαμέτρου 1/8 inch έχουν υψηλές προδιαγραφές για αντοχή σε πίεση και θερμοκρασία και είναι φτιαγμένες από ανοξείδωτο χάλυβα SS 316.

	NOVA SWISS	SWAGelok	AUTOCLAVE
Μέγιστη πίεση	1000 bar	720 bar	1035 bar
Μέγιστη θερμοκρασία	200 ° C	204 ° C	-

Πίνακας 4.7: Προδιαγραφές συνδέσμων υψηλών πιέσεων



Εικόνα 4.14: Σύνδεσμοι υψηλών πιέσεων Autoclave, Nova και Swagelok



Εικόνα 4.15: Μέρος της διάταξης που βρίσκεται εντός του κλιβάνου

4.3.11 Συσκευή μέτρησης όγκου αερίων, Gasometer

Η συσκευή μέτρησης όγκου αερίων που χρησιμοποιείται στο εργαστήριο είναι μοντέλο Νο 2331-801 της εταιρείας RUSKA (Εικόνα 4.17) . Αποτελείται από δυο γυάλινους κυλίνδρους (pyrex chambers) χωρητικότητας 1000 cm³ και 2000 cm³, στο εσωτερικό των οποίων κινούνται δυο έμβολα από teflon. Το αέριο εισερχόμενο στον κύλινδρο μετατοπίζει το έμβολο, από τη θέση του οποίου πάνω σε μια βαθμολογημένη κλίμακα προσδιορίζεται ο όγκος σε συνθήκες (P,T) περιβάλλοντος. Η ακρίβεια της μέτρησης είναι 0.2% του ολικού όγκου του κυλίνδρου και η μέγιστη πίεση λειτουργίας είναι $1 \pm 0,147$ atm.



Εικόνα 4.16: Συσκευή Gasometer

4.3.12 Φιάλη φόρτωσης μεθανίου – μανοεκτονωτής

Κατά την διεξαγωγή των πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε αέριο μεθάνιο. Η φιάλη του μεθανίου που χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα της παρούσας εργασίας είχε 99.7% κατά mole καθαρότητα αερίου. Το μεθάνιο βρίσκεται στη φιάλη σε μεγάλη πίεση. Ο μανοεκτονωτής συνδέεται στη βαλβίδα της φιάλης για τον έλεγχο της πίεσης (Εικόνα 4.18).



Εικόνα 4.17: Φιάλη φόρτωσης μεθανίου

4.4 ΜΕΤΡΑ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟΥ ΕΡΓΟΥ

Ο σχεδιασμός και η συναρμολόγηση της πειραματικής διάταξης πρέπει να γίνεται ακολουθώντας αυστηρούς κανόνες ασφαλείας.

Οι κυριότεροι παράγοντες που θέτουν προβλήματα ασφαλείας είναι οι εξής:

- το ηλεκτρικό ρεύμα
- η υψηλή πίεση των ρευστών
- η υψηλή θερμοκρασία

Τα μέτρα ασφαλείας που ελήφθησαν όσο αναφορά το ηλεκτρικό ρεύμα είναι:

- Τα δοχεία του νερού και των υγρών υδρογονανθράκων τοποθετήθηκαν μακριά από καλώδια, πρίζες, τον ηλεκτρονικό υπολογιστή και την κονσόλα της αντλίας.
- Όλα τα καλώδια στο πίσω μέρος του πάγκου εργασίας τοποθετήθηκαν μακριά από πηγές νερού και από τον κλίβανο.

Τα μέτρα ασφαλείας για την υψηλή πίεση είναι:

- Ο σχεδιασμός της διάταξης έγινε με τέτοιο τρόπο ώστε στη φάση των μετρήσεων να υπάρχει μόνο ένας κλάδος υψηλής πίεσης, ο οποίος συνδέεται με την αντλία ώστε με αυτό τον τρόπο να ελαχιστοποιείται η πιθανότητα τυχόν διαρροής αλλά και ελέγχεται καλύτερα η διάταξη.
- Οι βάνες υψηλής πίεσης και οι συνδετήρες τοποθετήθηκαν μακριά από καλώδια και πρίζες.
- Λόγω του ότι η φόρτωση του μεθανίου έγινε σε υψηλή πίεση, η φιάλη του αερίου τοποθετήθηκε σε απόσταση από την υπόλοιπη διάταξη.
- Η φιάλη φόρτωσης αερίου τοποθετήθηκε μακριά από τον κλίβανο.

Δεν υπήρξε πρόβλημα λόγω υψηλής θερμοκρασίας διότι ελέγχονταν μέσω του κλιβάνου και περιορίστηκε μέσα στον αεροθάλαμό του.

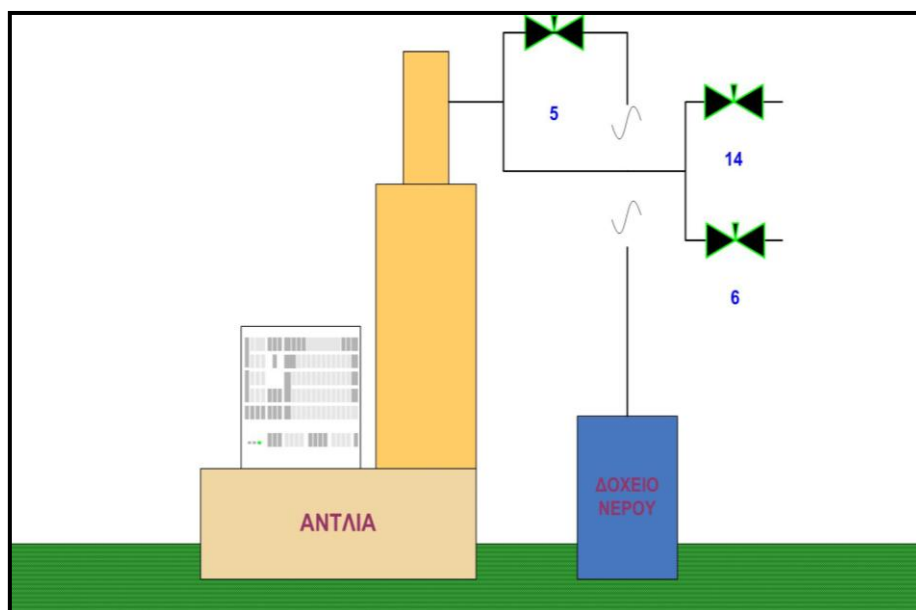
Επίσης πραγματοποιήθηκε ενδελεχής έλεγχος στις προδιαγραφές των σωλήνων, των οργάνων, των βαλβίδων, του θερμομέτρου, των καλωδίων ρεύματος και των μανομέτρων.

4.5 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ

Πριν από τον έλεγχο λειτουργίας της πειραματικής διάταξης πραγματοποιείται ο καθαρισμός της με απιονισμένο νερό και η πλήρωση της αντλίας με νερό.

Πλήρωση της αντλίας με νερό

Η χωρητικότητα της αντλίας είναι 266 cm^3 . Ιδιαίτερη προσοχή δίνεται στο να απομακρυνθεί ο αέρας από το θάλαμο της αντλίας και αυτό γιατί αν παραμείνει αέρας στη διάταξη οι μετρήσεις της πίεσης θα είναι λανθασμένες.



Σχήμα 4.2: Διαδικασία πλήρωσης της αντλίας με νερό

Ακολουθήθηκαν τα παρακάτω βήματα:

- Μέσω της βάνας 5 συνδέεται το δοχείο του νερού με την αντλία.
- Αρχικά μετακινείται το έμβολο της αντλίας έως το ανώτερο σημείο.
- Κλείνονται οι βάνες 14 και 6 .
- Γεμίζεται η αντλία με νερό έτσι ώστε το έμβολο της αντλίας να μετακινηθεί από το ανώτερο σημείο στο κατώτερο και να δημιουργηθεί υποπίεση για να γεμίσει ο θάλαμος της αντλίας με νερό.
- Τίθεται η αντλία σε λειτουργία ώστε να αρχίσει να ανεβαίνει το έμβολο και να αφαιρεθεί ο αέρας που ενδεχομένως υπήρχε στο κύκλωμα .
- Κλείνεται η βάνα 5 όταν παρατηρηθεί από το σωλήνα που συνδέει την αντλία με το δοχείο του υγρού, να βγαίνει νερό προς το δοχείο του υγρού.
- Σταματάει η λειτουργία της αντλίας τη στιγμή που θα φθάσει στα 10 bar.

Οι διαδικασίες για τον έλεγχο της λειτουργίας της πειραματικής διάταξης είναι οι εξής:

- Έλεγχος στεγανότητας
- Βαθμονόμηση

4.5.1 Έλεγχος στεγανότητας

Ο έλεγχος της στεγανότητας πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας νερό στη διάταξη. Αρχικά πραγματοποιήθηκε για τιμές της πίεσης 50 bar και 100 bar σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, με σκοπό να εντοπισθούν τυχόν οφθαλμοφανείς διαρροές υγρού ή αερίου στη διάταξη. Έπειτα αυξήθηκε η τιμή της πίεσης σταδιακά στα 500 bar σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, με σκοπό να διαπιστωθεί και η αντοχή της διάταξης σε υψηλές πιέσεις, καθώς και ενδεχόμενες μικρές διαρροές.

Πριν από τον έλεγχο στεγανότητας μέσω του βρόχου που περιλαμβάνει τις βάνες 6 και 4, το κάτω μέρος του αυτοκλείστου έχει γεμίσει με νερό μέσω της αντλίας με εφαρμογή κενού για να αφαιρεθεί ο τυχόν αέρας από τις σωληνώσεις.

Η διαδικασία ελέγχου στεγανότητας έως τα 100 bar είναι η εξής:

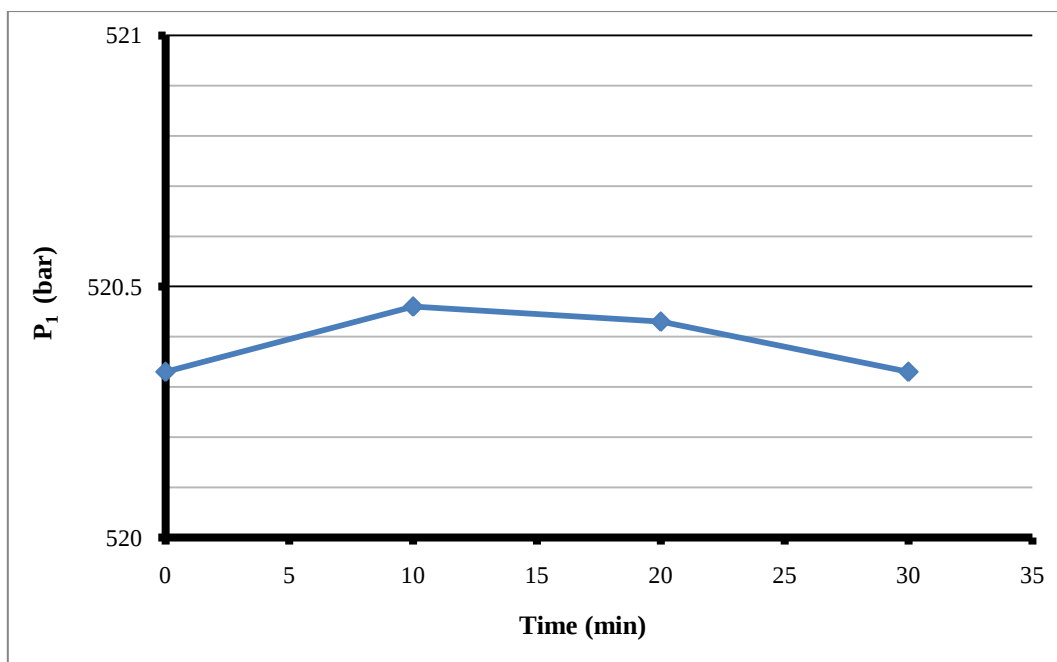
- Για το βρόγχο που περιλαμβάνει τις βάνες 14,8,1,2 και 3 όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.1.
 - Όλες οι βάνες είναι κλειστές αρχικά.
 - Ανοίγονται οι βάνες 12, 8, 14, 2 και 6.
 - Εφαρμόζεται κενό για να φύγει ο αέρας που υπάρχει στον κλάδο.
 - Κλείνονται τις βάνες 12, 8 και 6.
 - Γεμίζεται ο κλάδος με νερό εισπιέζοντας νερό από την αντλία.
 - Εφαρμόζεται πίεση 50 bar και έπειτα 100 bar.
 - Παρατηρούνται οι σύνδεσμοι για τυχόν διαρροή για περίπου 10 min.
 - Μειώνεται η πίεση του βρόχου θέτοντας την αντλία στα 10 bar για λόγους ασφαλείας.
 - Κλείνεται η βάνα 14.
- Για το βρόγχο που περιλαμβάνει τις βάνες 6 και 4 όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.1.
 - Εφαρμόζεται κενό στη γραμμή από την προηγούμενη διαδικασία εφόσον έχει απομακρυνθεί το νερό που προϋπήρχε.
 - Όλες οι βάνες είναι κλειστές.
 - Ανοίγεται η βάνα 6.
 - Εφαρμόζεται πίεση με την βοήθεια της αντλίας, αρχικά 50 bar και έπειτα 100 bar για να γεμίσει με νερό ο βρόχος.
 - Παρατηρούνται οι σύνδεσμοι για τυχόν διαρροή για περίπου 10 λεπτά.
 - Μειώνεται η πίεση του βρόχου με τη βοήθεια της αντλίας θέτοντάς την στα 10 bar για λόγους ασφαλείας με αποτέλεσμα να γυρίζει στην αντλία νερό.

- ο Κλείνεται η βάνα 6.

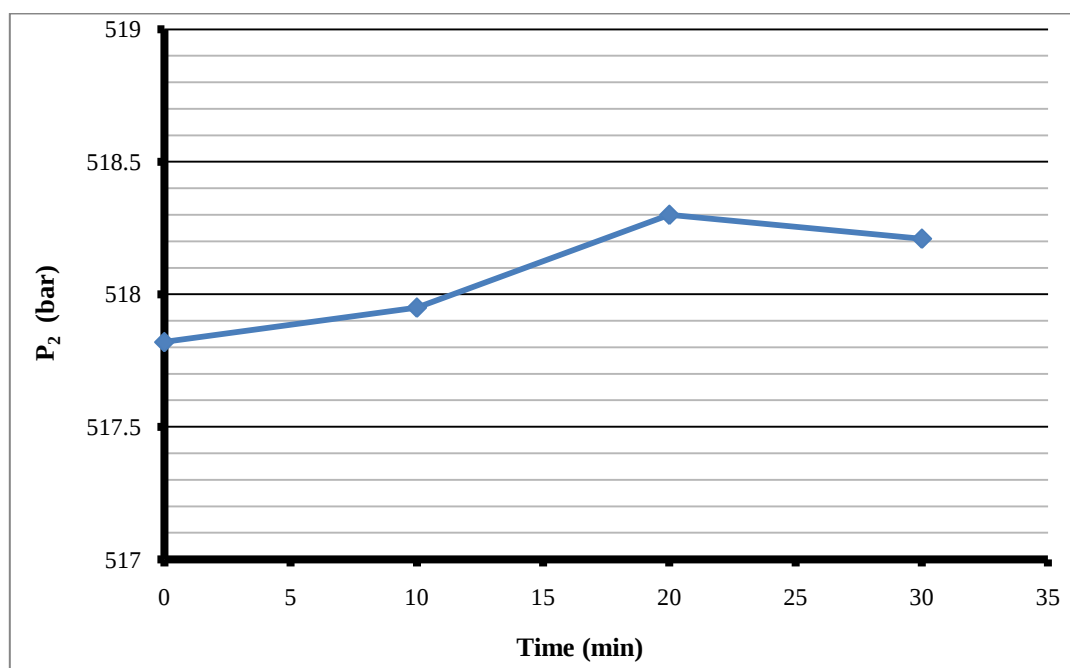
Η διαδικασία ελέγχου στεγανότητας και αντοχής έως τα 500 bar, αρχικά πραγματοποιήθηκε με νερό και έπειτα με αέρα είναι η εξής:

- ο Ανοίγονται οι βάνες 6 και 14 όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.1.
- ο Εφαρμόζεται πίεση με τη βοήθεια της αντλίας στα 60 bar, στα 180 bar, στα 250 bar, στα 350 bar, στα 420 bar και τέλος στα 500 bar.
- ο Παρατηρείται η ένδειξη του όγκου του νερού που παραμένει στο θάλαμο της αντλίας μέχρις ότου σταματήσει να μεταβάλλεται για περίπου 10 λεπτά και έπειτα λαμβάνεται η μέτρηση. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται άλλες δυο φορές.
- ο Κλείνεται η βάνα 14.
- ο Μειώνεται η πίεση του βρόχου που βρίσκονται οι βάνες 14, 1 και 3 με τη βοήθεια της αντλίας θέτοντάς την στα 10 bar για λόγους ασφαλείας.
- ο Κλείνεται η βάνα 2.
- ο Θέτεται σε λειτουργία η αντλία ώστε να γεμίσει με νερό το κάτω μέρος του αυτοκλείστου μέχρι τα 250 ml.
- ο Ξαναγεμίζεται με νερό την αντλία μέσω της βάνας 5.
- ο Ανοίγονται οι βάνες 1 και 3.
- ο Εισπιέζεται αέρα από τη βάνα 1 με τη βοήθεια του πεπιεσμένου αέρα.
- ο Κλείνεται η βάνα 1 και ανοίγονται οι βάνες 6 και 4.
- ο Εφαρμόζεται πίεση στο κάτω μέρος του αυτοκλείστου με την βοήθεια της αντλίας σταδιακά μέχρι τα 500 bar.
- ο Ανοίγεται η βάνα 3.
- ο Για την παρατήρηση σχηματισμού τυχών φυσαλίδων χρησιμοποιείται μείγμα νερού με σαπούνι στους συνδέσμους (snoopy) για περίπου πέντε λεπτά. Για επαλήθευση επαναλαμβάνεται το τελευταίο βήμα ακόμα μια φορά.

Τα παρακάτω διαγράμματα αναφέρονται στον έλεγχο στεγανότητας. Σταματάει η λειτουργία της αντλίας, στα 500 bar αφού ισορροπήσει ως προς την πίεση η πειραματική διάταξη, από το να εισπιέζει επιπλέον νερό στη διάταξη και καταγράφεται η πρώτη ένδειξη της τιμής των μανομέτρων. Έπειτα από δέκα λεπτά καταγράφηκε η δεύτερη ένδειξη της τιμής των μανομέτρων. Η ίδια διαδικασία επαναλήφθηκε άλλες δυο φορές.



Διάγραμμα 4.1: Μεταβολή της πίεσης με την πάροδο του χρόνου για το βρόγχο που συνδέει την αντλία με τον επάνω θάλαμο του αυτοκλείστου



Διάγραμμα 4.2: Μεταβολή της πίεσης με την πάροδο του χρόνου για το βρόγχο που συνδέει την αντλία με τον κάτω θάλαμο του αυτοκλείστου

Από τα παραπάνω διαγράμματα μπορούμε να συμπεράνουμε ότι δεν παρατηρείται διαρροή σε κανέναν από τους δυο βρόγχους διότι το εύρος των αυξομειώσεων της πίεσης είναι πολύ μικρό και ενδεχομένως αποδίδονται σε μικρές μεταβολές της θερμοκρασίας του εργαστηρίου κατά τη διάρκεια ελέγχου στεγανότητας.

4.5.2 Βαθμονόμηση της πειραματικής διάταξης

Ο σκοπός της βαθμονόμησης είναι:

- να γίνει ογκομέτρηση του κάθε κλάδου της διάταξης καθώς και του αυτοκλείστου χρησιμοποιώντας νερό. Επιλέγεται το νερό διότι είναι γνωστή η συμπιεστότητά του.
- να μελετηθεί η ογκομετρική συμπεριφορά της πειραματικής διάταξης κατά τη μεταβολή της πίεσης και της θερμοκρασίας λόγω της θερμικής διαστολής και της συμπιεστότητάς της.
- να καταγραφεί η μετρητική συμπεριφορά των μανομέτρων κατά τη μεταβολή της πίεσης και της θερμοκρασίας, ώστε να υπολογιστούν οι αποκλίσεις που θα έχουν σε σχέση με τα μανόμετρα ακριβείας.
- να καταγραφεί η συμπεριφορά του εμβόλου του αυτοκλείστου και συγκεκριμένα να βρεθεί το ελάχιστο ΔP που χρειάζεται για να κινηθεί το έμβολο σε κάθε πίεση και θερμοκρασία.

Τα πειράματα της βαθμονόμησης της πειραματικής διάταξης έγιναν για τρεις διαφορετικές τιμές της θερμοκρασίας στους 28°C, 50 °C και 90 °C.

Η διαδικασία της βαθμονόμησης της πειραματικής διάταξης έγινε πριν τις πειραματικές μετρήσεις και μετά από τον έλεγχο στεγανότητας και πραγματοποιήθηκε με γεμάτο το αυτόκλειστο με νερό και αφού έχει αφαιρεθεί ο αέρας.

Σημαντικό μέρος στη βαθμονόμηση της πειραματικής διάταξης έχει η βαθμονόμηση των οργάνων και κυρίως των μανομέτρων ώστε να υπολογιστεί η διόρθωση της πίεσης που δίνουν.

Στο εργαστήριο οι ογκομετρήσεις της πειραματικής διάταξης γίνονταν με τη βοήθεια της αντλίας, μέσω του νερού που εισάγεται ή εξάγεται από το θάλαμο της αντλίας, σε διαφορετικές τιμές πίεσης και θερμοκρασίας. Κατά τη διάρκεια της μελέτης, η χωρητικότητα της διάταξης μεταβάλλεται, ανάλογα με τις εφαρμοζόμενες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας, όπως επίσης λόγω της πυκνότητας του νερού.

Το αποτέλεσμα είναι η τιμή της μεταβολής του όγκου που δείχνει η αντλία να μην οφείλεται στην πραγματική μεταβολή του όγκου του ρευστού αλλά στη συνολική της πειραματικής διάταξης. Επομένως απαιτείται ο προσδιορισμός των μεταβολών του όγκου για κάθε κλάδο της διάταξης PVT, συναρτήσει της πυκνότητας του νερού, ακόμα και της τριβής του αυτοκλείστου σε σχέση με την πίεση και τη θερμοκρασία.

4.5.2.1 Βαθμονόμηση των οργάνων

- Βαθμονόμηση θερμομέτρου

Το θερμόμετρο, που χρησιμοποιήθηκε θεωρείται αρκετά αξιόπιστο και επομένως δε βαθμονομήθηκε. Παρόλο που ο κλίβανος είχε θερμόμετρο, χρησιμοποιήθηκε το θερμόμετρο P600 για μεγαλύτερη ακρίβεια. Η χρήση του συγκεκριμένου θερμομέτρου έδινε τη δυνατότητα να μετρηθεί η θερμοκρασία του περιβάλλοντος και του κλιβάνου ταυτόχρονα, με την χρήση δύο διαφορετικών αισθητήρων.

Η διαδικασία που ακολουθήθηκε για τη βαθμονόμηση των μανομέτρων είναι η εξής:

- Η βαθμονόμηση του μανομέτρου της αντλίας με τα μανόμετρα αυξημένης ακρίβειας είχε γίνει μικρό χρονικό διάστημα προτού ξεκινήσουν τα πειράματα και για αυτό δεν επαναλήφθηκε. Το μανόμετρο της αντλίας δίνει γενικά πιο αξιόπιστες τιμές σε σχέση με τα αλλά δυο της OMEGA εφόσον είχε βαθμονομηθεί με τα μανόμετρα αυξημένης ακρίβειας. Αυτό οφείλεται κατά μεγάλο μέρος στο ότι το μανόμετρο της αντλίας είναι πάντα σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, ενώ τα αλλά δυο μανόμετρα είναι μέσα στον κλίβανο. Η απόκλιση του μανομέτρου της αντλίας σε σχέση με τα μανόμετρα ακρίβειας είναι περίπου 2 bar σε χαμηλές πιέσεις, ενώ όσο η πίεση αυξάνεται η απόκλιση αυτή μειώνεται σταδιακά και τείνει στο μηδέν.
- Βαθμονόμηση μανομέτρων που βρίσκονται εντός του κλιβάνου σε σχέση με το μανόμετρο της αντλίας:
 - Ρυθμίζεται ο κλίβανος στους 50°C.
 - Χρειάζεται τρεις ώρες ώστε όλο το σύστημα (εντός του κλιβάνου) να αποκτήσει την επιθυμητή θερμοκρασία.
 - Κλείνονται οι βάνες 3 και 4 όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.1.
 - Εφαρμόζεται πίεση με τη βοήθεια της αντλίας στους βρόχους που είχαμε στον έλεγχο στεγανότητας ανά 50 bar μέχρι τα 500 bar και από τα 500 bar προς τα κάτω μέχρι τα 50 bar (μελέτη βρόχου υστέρησης).
 - Καταγράφονται οι ενδείξεις της πίεσης των δυο μανομέτρων που βρίσκονται εντός του κλιβάνου και του μανομέτρου της αντλίας.

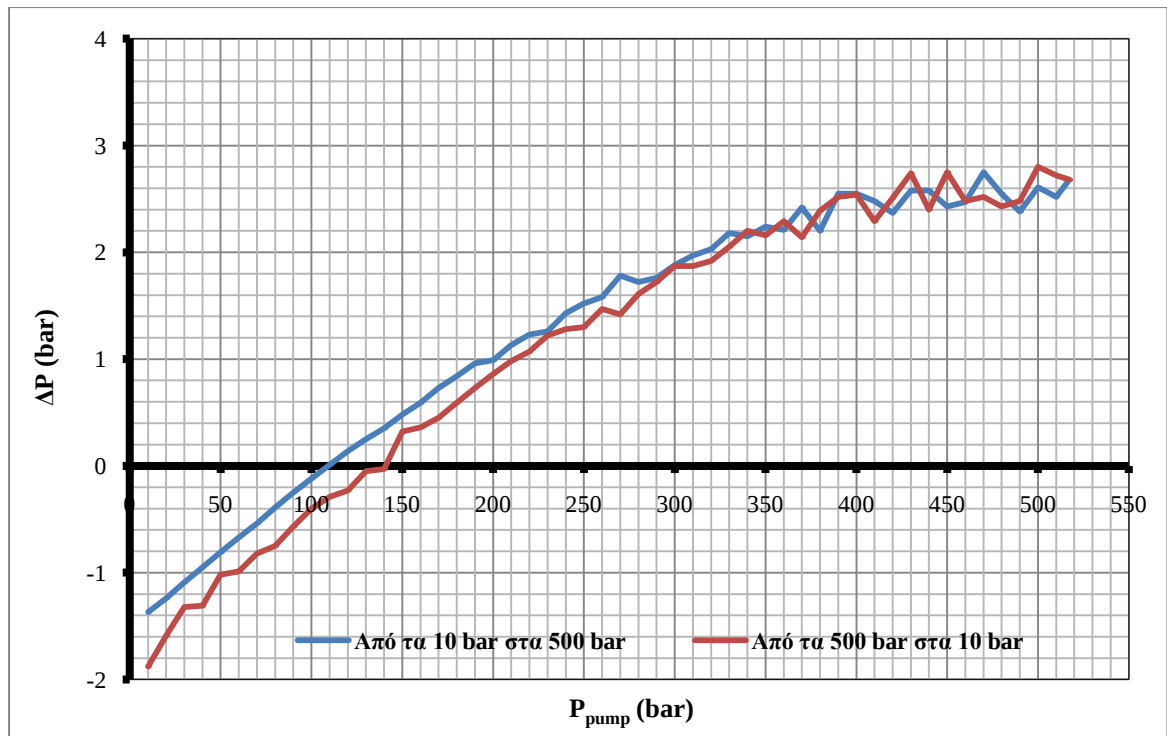
Αρχικά με βάση τις πειραματικές μετρήσεις των δυο μανομέτρων και την πίεση της αντλίας υπολογίζεται το $P_1 - P_{\text{pump}}$ ή το $P_2 - P_{\text{pump}}$. Για να εξετάσουμε αν υπάρχει βρόχος υστέρησης των μανομέτρων πραγματοποιήθηκαν δυο σειρές μετρήσεων, μια από τα 50 bar στα 500 bar και μια από τα 500 bar στα 50 bar.

Ορίζοντας:

$$\Delta P_1 = P_1 \uparrow - P_{\text{pump}} \text{ και } \Delta P'_1 = P_1 \downarrow - P_{\text{pump}} \quad (4.1)$$

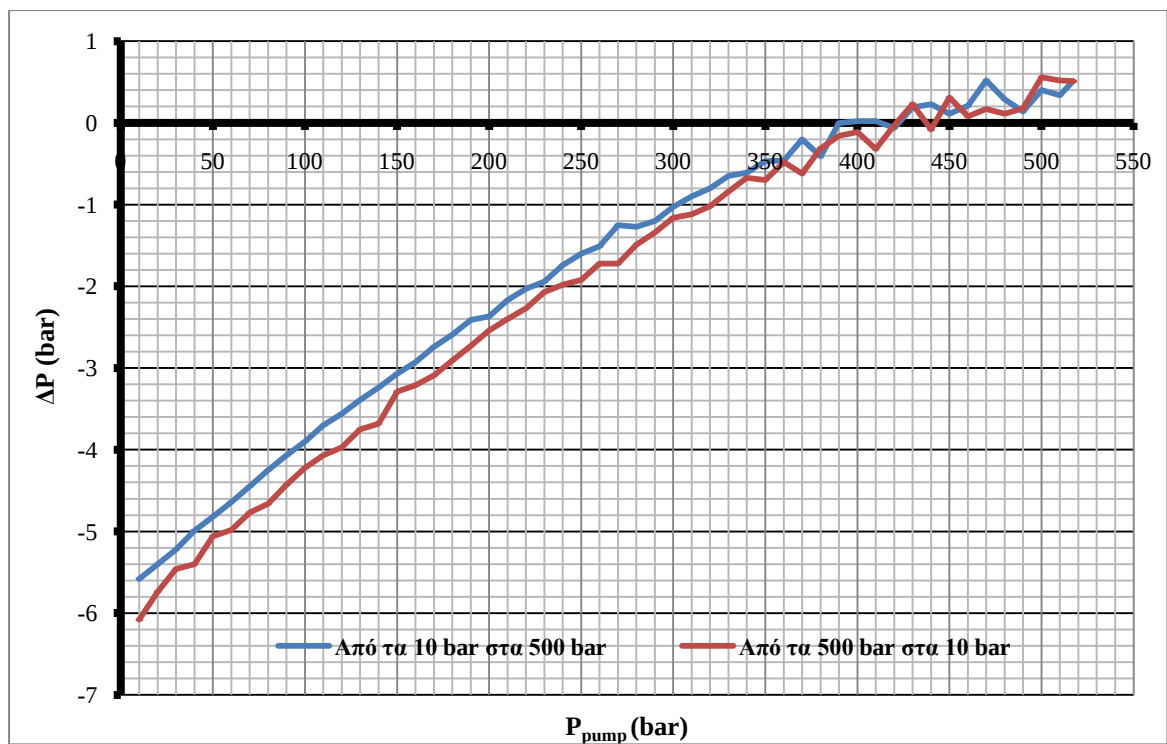
$$\Delta P_2 = P_2 \uparrow - P_{\text{pump}} \text{ και } \Delta P'_2 = P_2 \downarrow - P_{\text{pump}} \quad (4.2)$$

[Το βέλος προς τα πάνω ($\uparrow$) δηλώνει την καταγραφή των ενδείξεων της πίεσης των μανομέτρων από τη χαμηλή τιμή της πίεσης προς την υψηλή (50 bar $\rightarrow$ 500 bar), ενώ το βέλος προς τα κάτω ($\downarrow$) το αντίθετο (500 bar $\rightarrow$ 50 bar).]



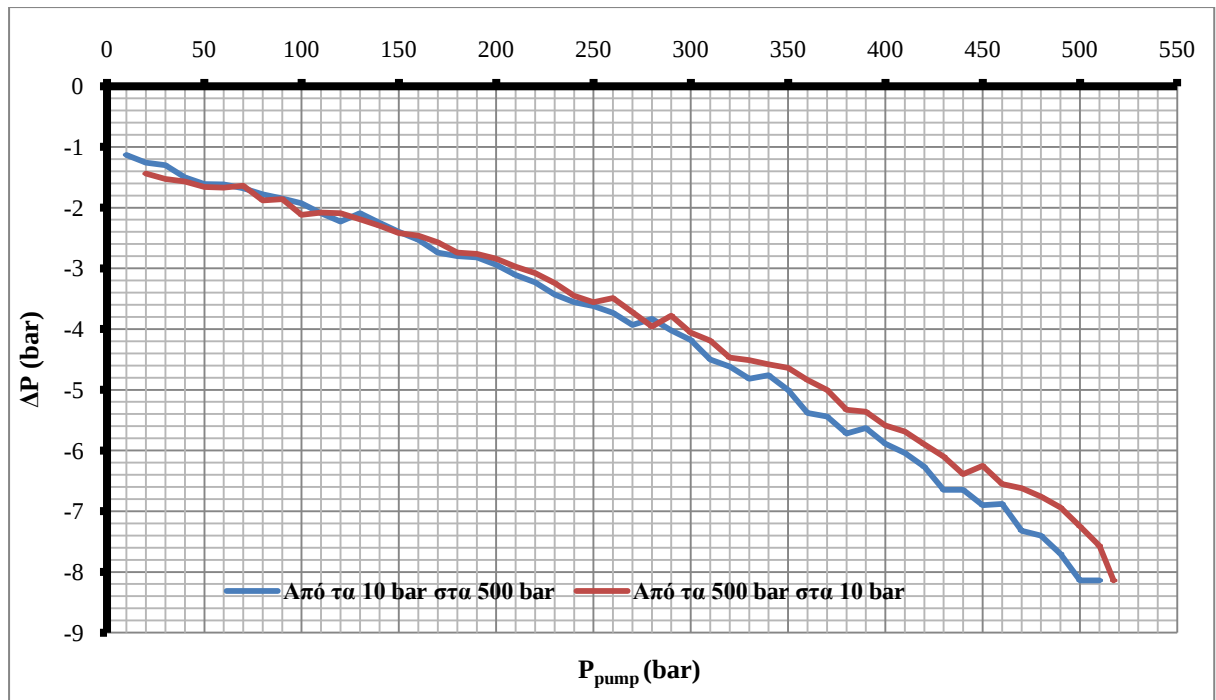
Διάγραμμα 4.3: Βρόχος υστέρησης για το μανόμετρο P_1 στους 28°C

Παρατηρείται ότι από τα 0-300 bar υπάρχει βρόχος υστέρησης περίπου 0,2 bar.



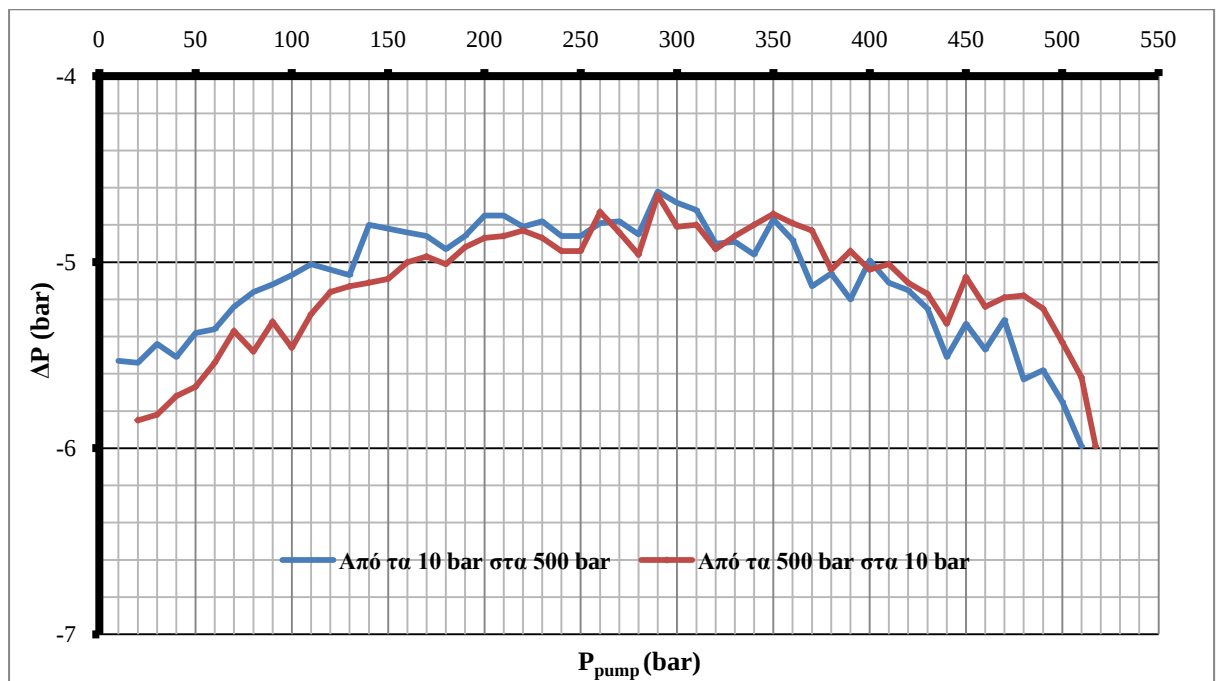
Διάγραμμα 4.4: Βρόχος υστέρησης για το μανόμετρο P_2 στους 28°C

Παρατηρείται ότι από τα 0-350 bar υπάρχει βρόχος υστέρησης περίπου 0,2 bar.



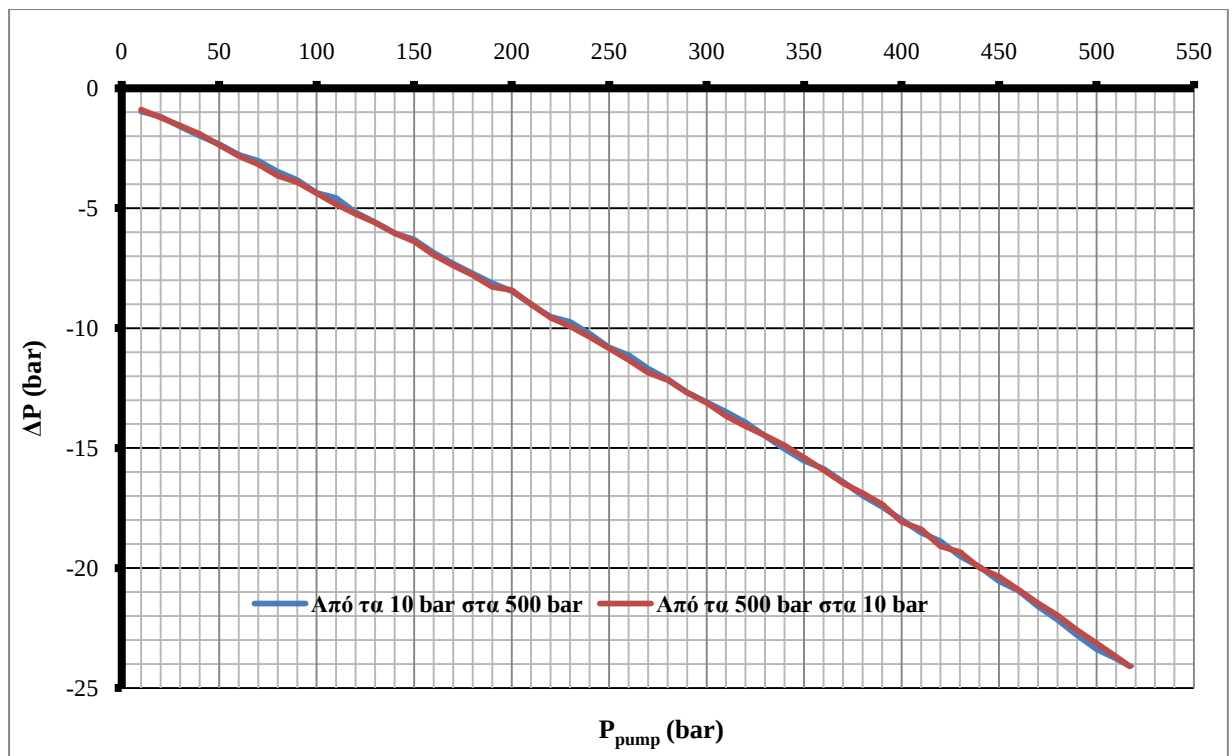
Διάγραμμα 4.5: Βρόχος υστέρησης για το μανόμετρο P₁ στους 50°C

Παρατηρείται ότι από τα 350–450 bar υπάρχει βρόχος υστέρησης περίπου 0,2 bar. Ενώ από τα 450–500 ο βρόχος υστέρησης αυξάνεται στα 0,4 bar. Παρατηρείται ότι η πίεση έχει μεγάλο εύρος από -1 έως -8, αυτό συμβαίνει λόγω της αύξησης της πίεσης και της θερμοκρασίας.



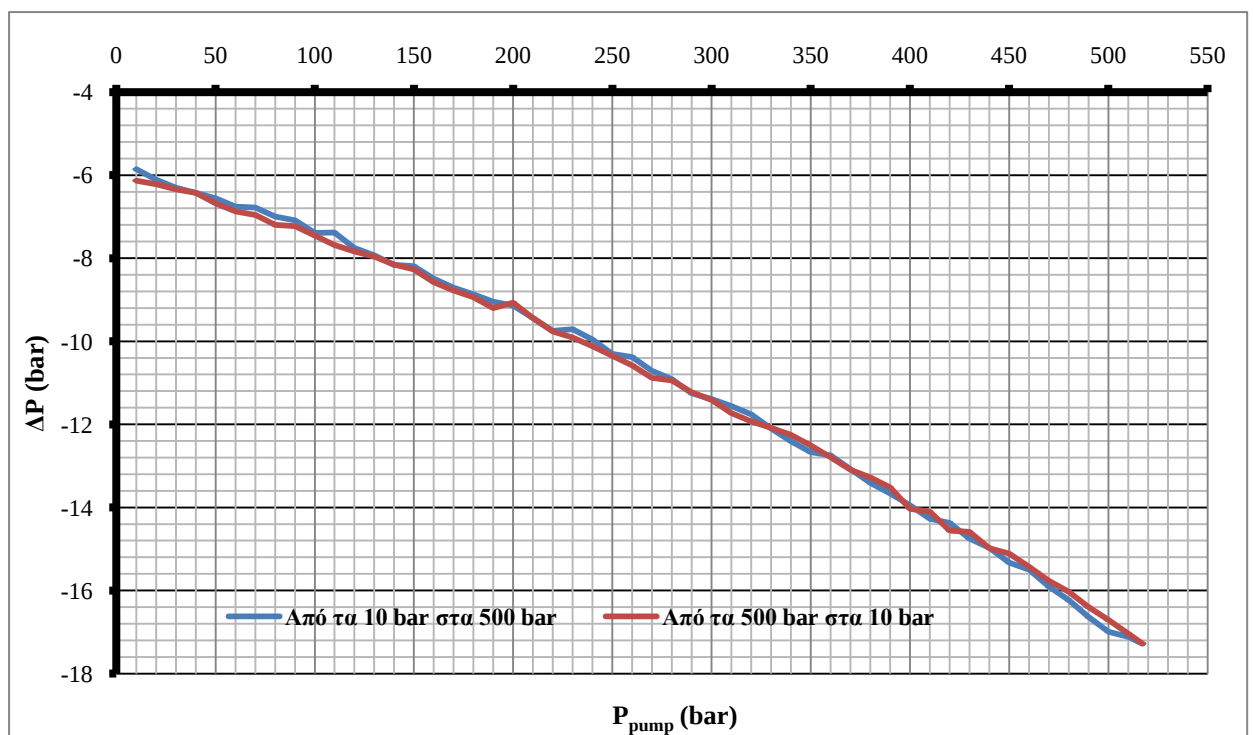
Διάγραμμα 4.6: Βρόχος υστέρησης για το μανόμετρο P₂ στους 50°C

Παρατηρείται από τα 0–180 bar και από τα 440–510 bar υπάρχει βρόχος υστέρησης περίπου 0,2 bar.



Διάγραμμα 4.7: Βρόχος υστέρησης για το μανόμετρο P_1 στους 90°C

Δεν παρατηρείται βρόχος υστέρησης.



Διάγραμμα 4.8: Βρόχος υστέρησης για το μανόμετρο P_2 στους 90°C

Δεν παρατηρείται βρόχος υστέρησης.

Βαθμονόμηση μανομέτρων

Ο σκοπός της βαθμονόμησης είναι να υπολογιστεί η διόρθωση της πίεσης που δίνουν τα δυο μανόμετρα. Αναπτύχθηκε ένα μοντέλο κυβικής εξίσωσης, διαφορετικό για την κάθε θερμοκρασία και το κάθε μανόμετρο, το οποίο παρέχει τις απαραίτητες διορθώσεις στην ένδειξη της πίεσης των μανομέτρων.

Αφού έχουν καταγραφεί οι ενδείξεις της πίεσης των δυο μανομέτρων και της αντλίας από τα 10 bar στα 500 bar και από τα 500 bar στα 10 bar υπολογίζεται το ΔP .

Ορίζοντας:

$$P_{1avg} = \frac{P_{1\uparrow} + P_{1\downarrow}}{2} \text{ και } P_{2avg} = \frac{P_{2\uparrow} + P_{2\downarrow}}{2} \quad (4.3)$$

[Το βέλος προς τα πάνω ($\uparrow$) δηλώνει την καταγραφή των ενδείξεων της πίεσης των μανομέτρων από τη χαμηλή τιμή της πίεσης προς την υψηλή (10 bar $\rightarrow$ 500 bar), ενώ το βέλος προς τα κάτω ($\downarrow$) το αντίθετο (500 bar $\rightarrow$ 10 bar).]

Οι απαιτούμενες διορθώσεις της μέτρησης της πίεσης δίνονται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$\Delta P_1 = P_{1avg} - P_{\text{pump}} \text{ και } \Delta P_2 = P_{2avg} - P_{\text{pump}} \quad (4.4)$$

όπου :

ΔP_1 : η διαφορά πίεσης μεταξύ της πίεσης του μανομέτρου P_1 και της ένδειξης της πίεσης της αντλίας

ΔP_2 : η διαφορά πίεσης μεταξύ της πίεσης του μανομέτρου P_2 και της ένδειξης της πίεσης της αντλίας

Επιλέχθηκε κυβική πολυωνυμική εξίσωση με βάση τη μορφή της καμπύλης που σχηματίζουν τα σημεία ($P, \Delta P$) και έγινε προσαρμογή της κυβικής εξίσωσης στα πειραματικά σημεία. Οι κυβικές εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν για τα δυο μανόμετρα στις θερμοκρασίες 28°C, 50°C και 90°C παρατίθενται στα παρακάτω διαγράμματα.

Εισάγοντας στην κυβική εξίσωση τις ενδείξεις της πίεσης του μανομέτρου υπολογίζεται το ΔP και από εκεί αφαιρώντας το ΔP από την αρχική τιμή της πίεσης του μανομέτρου προκύπτει η διορθωμένη πίεση.

$$\text{Δηλαδή: } P_{\text{μανομέτρου διορθωμένη}} = P_{\text{μανομέτρου αρχική}} - \Delta P + 1 \text{ (atm)} \quad (4.5)$$

όπου τη θέση του ΔP παίρνουν τα ΔP_1 και ΔP_2

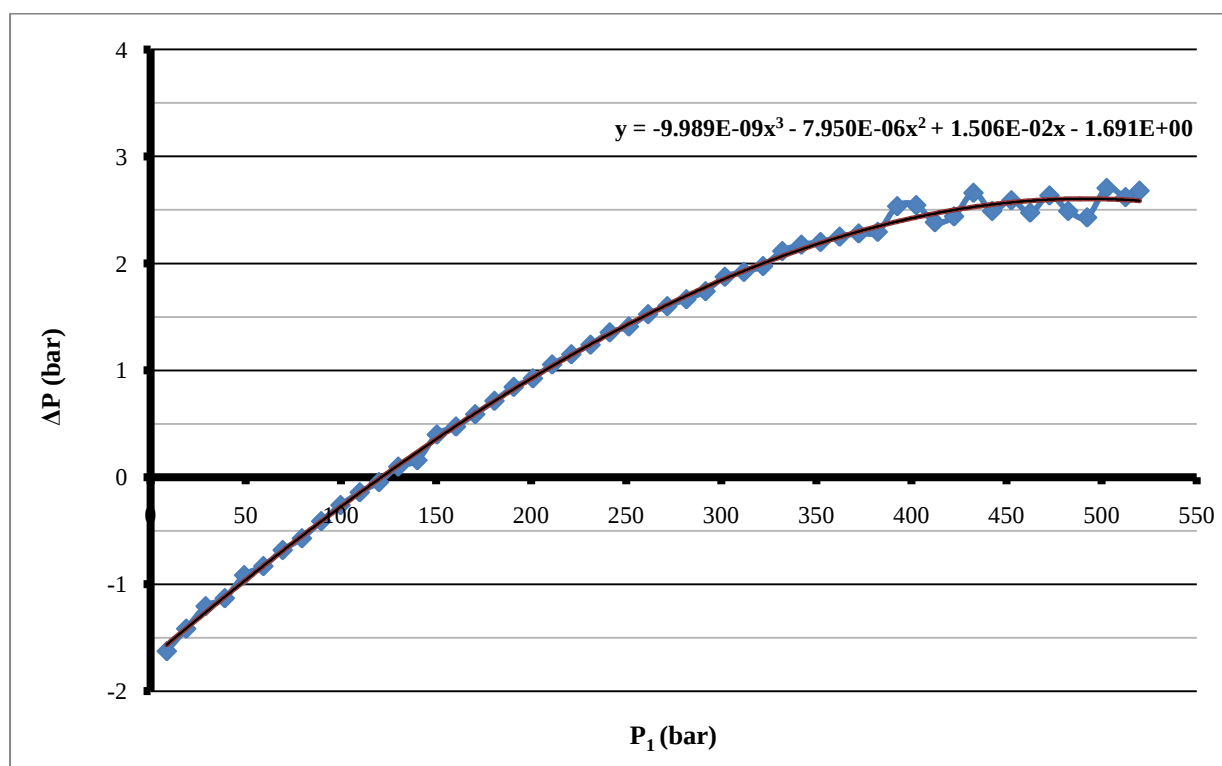
Λόγω του ότι τα μανόμετρα μετράνε σχετική πίεση και όχι απόλυτη, στην Εξίσωση 4.5 προστίθεται μια ατμόσφαιρα.

Στις χαμηλές πιέσεις η απόκλιση της ένδειξης της πίεσης της αντλίας από τα μανόμετρα ακριβείας βαίνει μειούμενη. Συγκεκριμένα, σε εύρος πιέσεων από 10 bar έως 250 bar η απόκλιση στις χαμηλές πιέσεις είναι 2 bar ενώ στις υψηλές τείνει στο μηδέν.

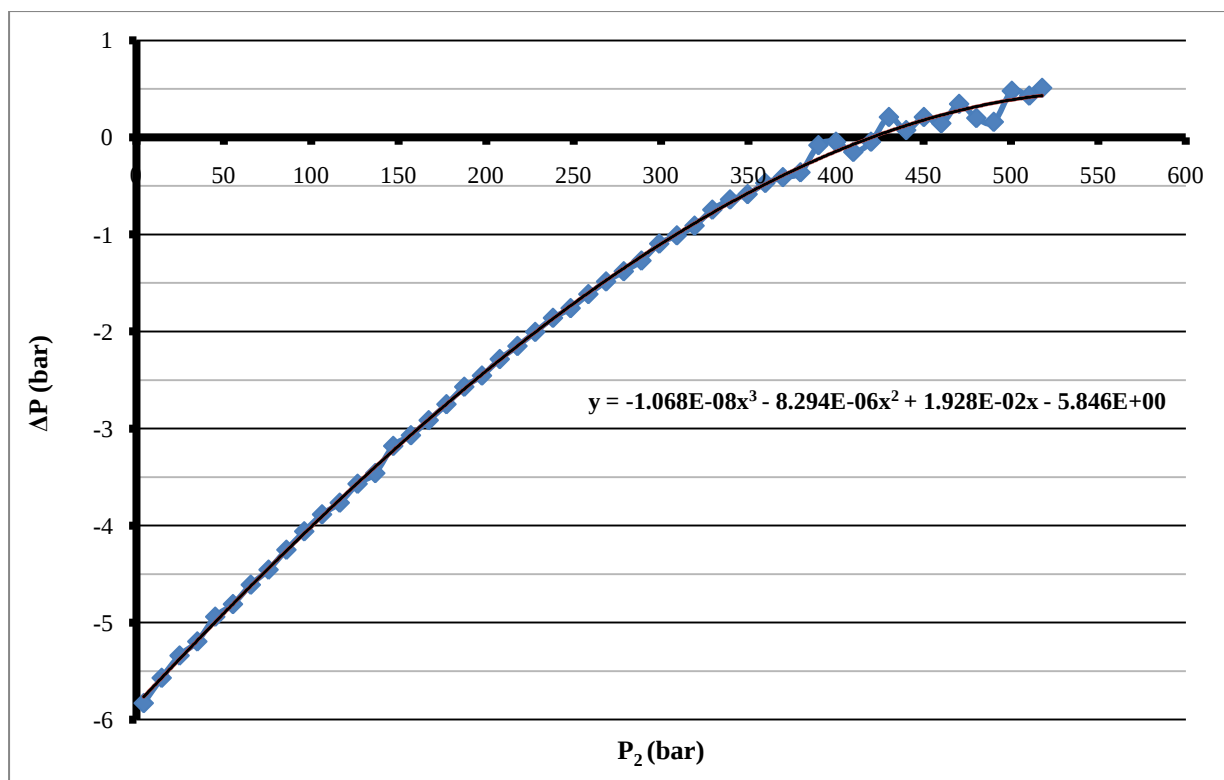
Ο λόγος που χρησιμοποιήθηκαν τα μανόμετρα P_1 και P_2 για τη μέτρηση της πίεσης στον άνω και κάτω θάλαμο του αυτοκλείστου είναι διότι κατά τη διαδικασία διεξαγωγής των πειραμάτων η αντλία ήταν σε άμεση υδραυλική επαφή μόνο με τον κάτω θάλαμο του αυτοκλείστου. Ο επάνω θάλαμος του αυτοκλείστου δεν είχε άμεση υδραυλική επαφή με την αντλία αλλά υπησέρχετο και η τριβή του εμβόλου. Αν η τριβή του εμβόλου ήταν μεγάλη θα παρατηρούνταν μεγάλη διαφορά πίεσης στους δυο θαλάμους του αυτοκλείστου.

Συγκεκριμένα, διαπιστώθηκε ότι η τριβή του εμβόλου ήταν πιο αισθητή στις χαμηλές πιέσεις στα 10 bar από ότι στις υψηλές πιέσεις στα 500 bar. Η τριβή του εμβόλου ήταν της τάξεως του 0,1 bar και διαπιστώθηκε λαμβάνοντας διάφορες τιμές της πίεσης στον άνω και κάτω θάλαμο του αυτοκλείστου.

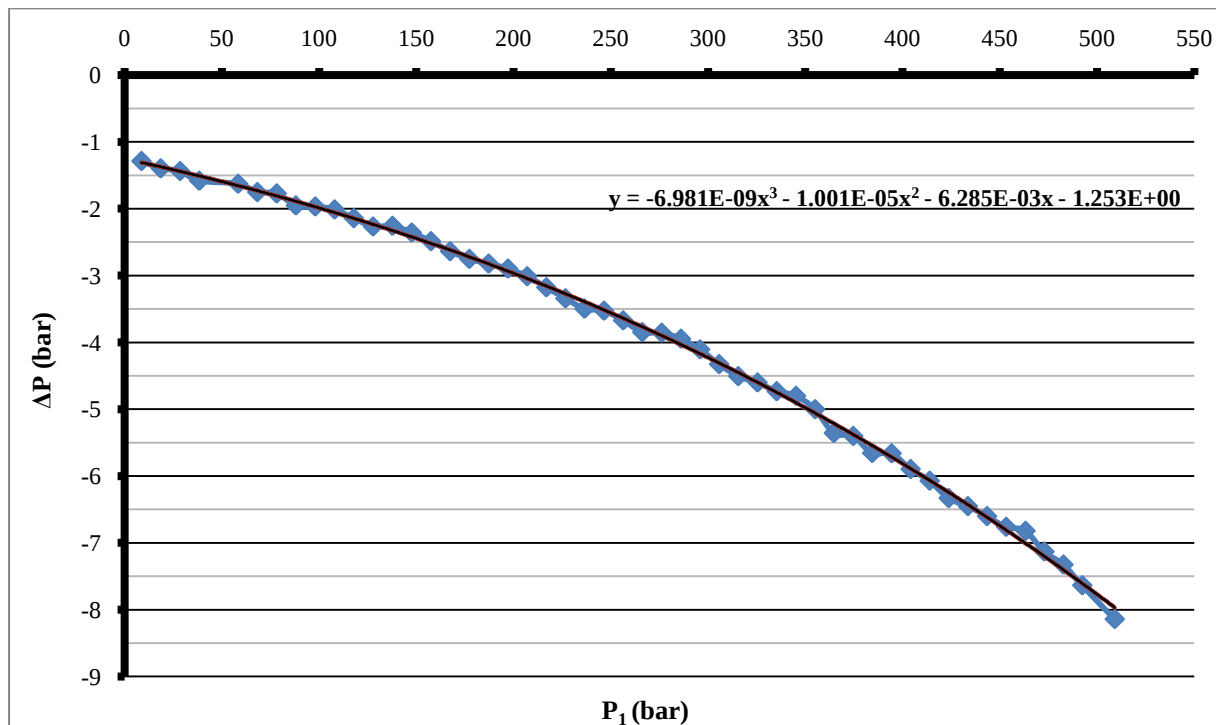
Το σφάλμα στις χαμηλές πιέσεις είναι μεγαλύτερο από ότι στις υψηλές σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Συγκεκριμένα στα 10 bar και σε θερμοκρασία περιβάλλοντος η τριβή του εμβόλου είναι 0,1 bar συνεπώς το σφάλμα στη μέτρηση της πίεσης είναι 1%. Στα 500 bar και σε θερμοκρασία περιβάλλοντος η τριβή του εμβόλου είναι 0,1 bar συνεπώς το σφάλμα στη μέτρηση της πίεσης είναι 0,02%. Συμπεραίνεται με βάση τα παραπάνω ότι η τριβή του εμβόλου είναι αμελητέα για το εύρος των πιέσεων που ασχοληθήκαμε και έτσι δε λαμβάνεται υπόψη στους υπολογισμούς.



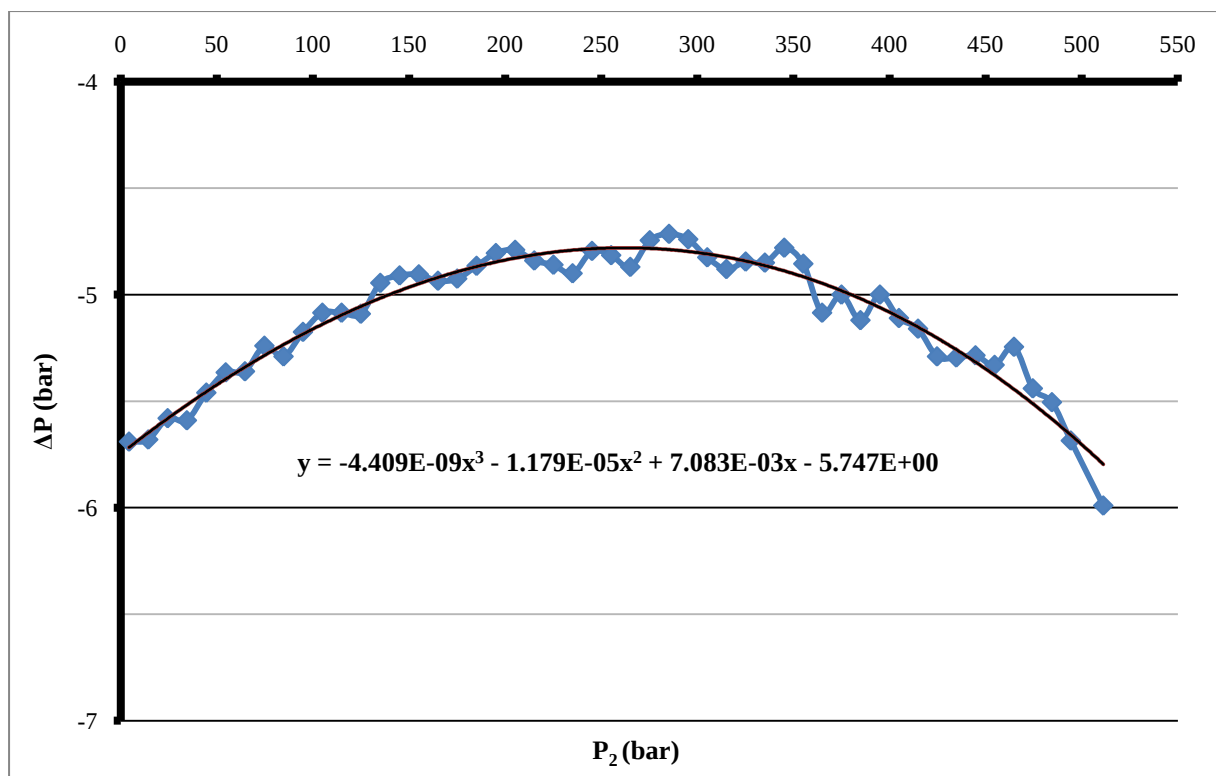
Διάγραμμα 4.9: Μοντελοποίηση της απόκλισης της πίεσης του μανομέτρου P_1 στους 28°C



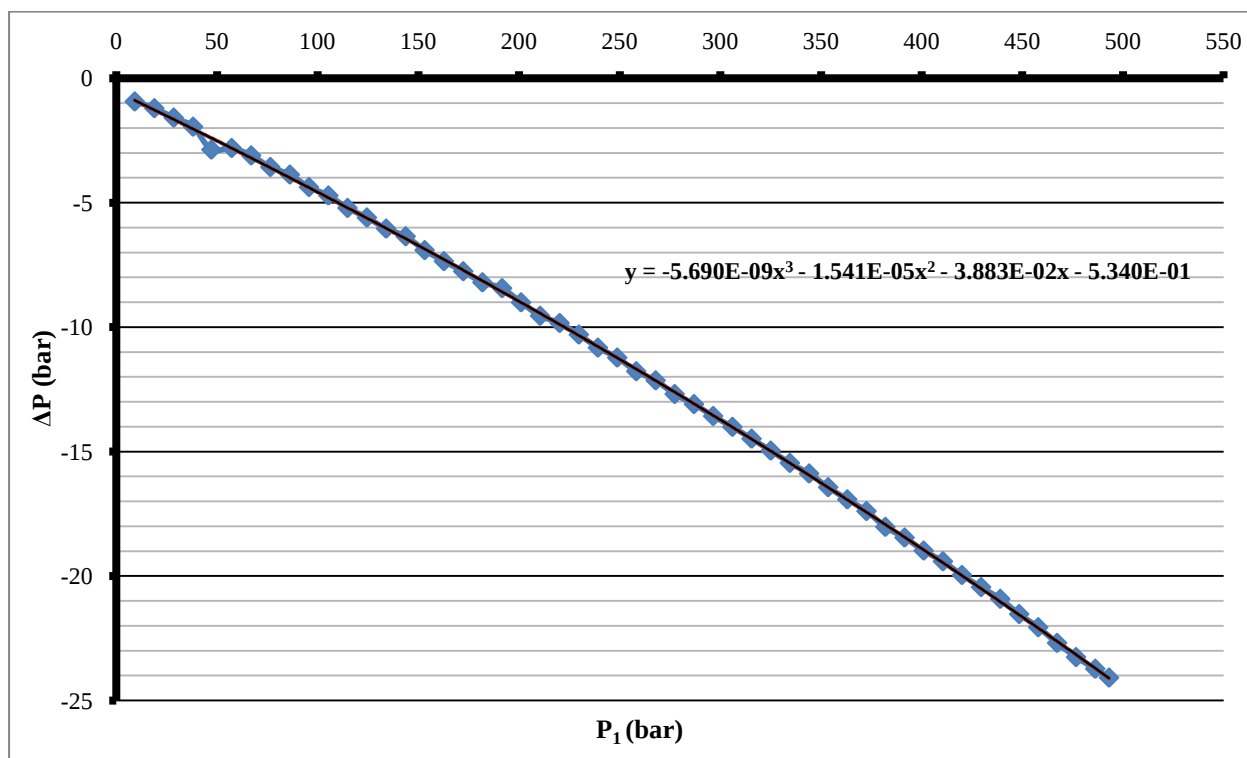
Διάγραμμα 4.10: Μοντελοποίηση της απόκλισης της πίεσης του μανομέτρου P_2 στους 28°C



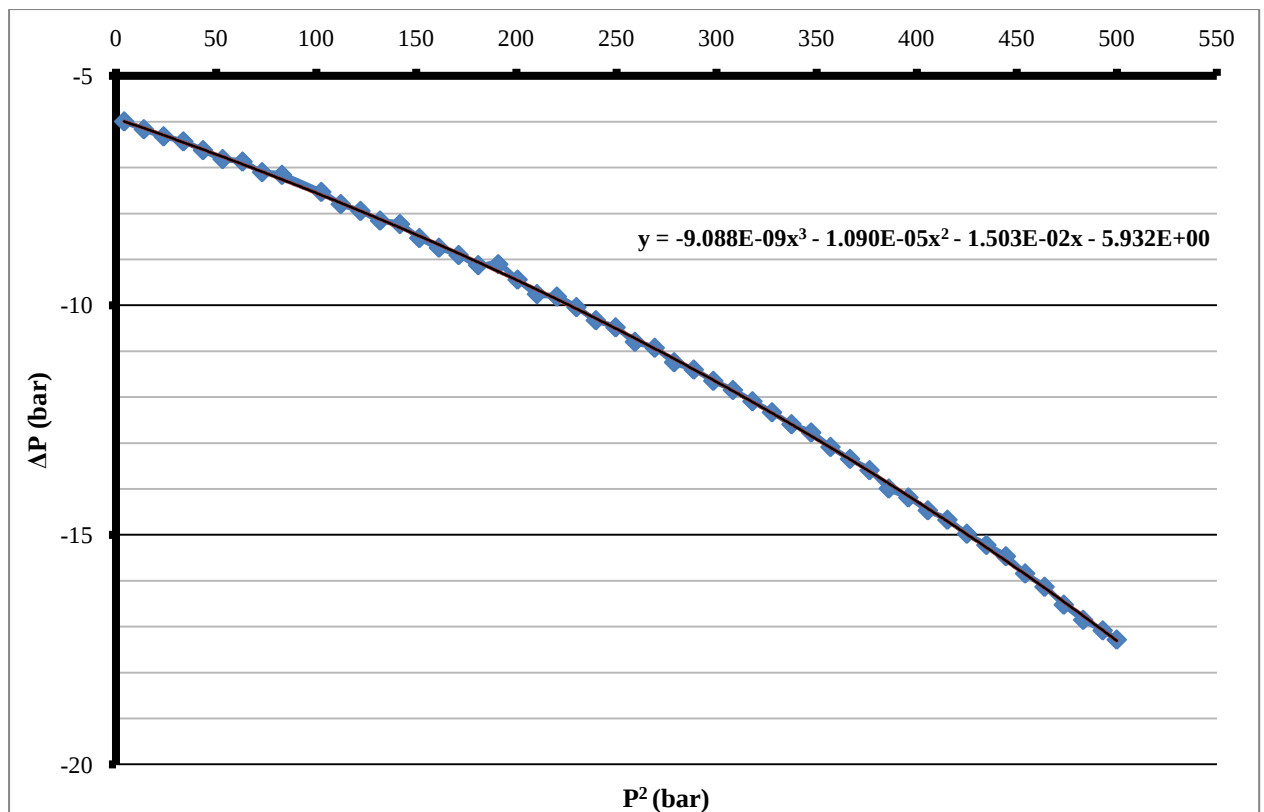
Διάγραμμα 4.11: Μοντελοποίηση της απόκλισης της πίεσης του μανομέτρου P_1 στους 50°C



Διάγραμμα 4.12: Μοντελοποίηση της απόκλισης της πίεσης του μανομέτρου P_2 στους 50°C



Διάγραμμα 4.13: Μοντελοποίηση της απόκλισης της πίεσης του μανομέτρου P_1 στους 90°C



Διάγραμμα 4.14: Μοντελοποίηση της απόκλισης της πίεσης του μανομέτρου P_2 στους 90°C

4.5.2.2 Ογκομέτρηση των βρόχων της πειραματικής διάταξης

Ο σκοπός της ογκομέτρησης του κάθε βρόχου της διάταξης έγινε για να προσδιορισθεί ο όγκος νερού που περιέχει ο καθένας σε διαφορετικές τιμές πίεσης και θερμοκρασίας. Η ογκομέτρηση της διάταξης έγινε με νερό διότι είναι γνωστή η συμπιεστότητά του.

Αρχικά πραγματοποιήθηκε η ογκομέτρηση του βρόχου 6-4 (Σχήμα 4.1) με τον εξής τρόπο:

- Αρχικά οι βάνες 1, 3, 4 και 5 είναι κλειστές.
- Έπειτα ανοίγονται οι βάνες 2, 14, 6 και 12.
- Εφαρμόζεται κενό στη διάταξη μέσω της βάνας του κενού για τριάντα λεπτά.
- Κλείνεται η βάνα του κενού καθώς και τις βάνες 14 και 6.
- Πληρώνεται η αντλία με νερό μέσω της βάνας 5 που συνδέει την αντλία με το δοχείο του νερού.
- Για να αποφευχθεί να εισέλθει αέρας στη διάταξη, εφαρμόζεται πίεση 10 bar ώστε να απομακρυνθεί ο αέρας και να κατευθυνθεί προς το δοχείο του νερού. Όταν

παρατηρηθεί να βγαίνει νερό από την αντλία προς το δοχείο του νερού κλείνεται η βάνα 5 και σταματάται η λειτουργία της αντλίας.

- Καταγράφεται η ένδειξη του όγκου του νερού που υπάρχει στο θάλαμο της αντλίας.
- Ανοίγεται η βάνα 6 ώστε να γεμίσει ο βρόχος με νερό, εφόσον εφαρμόζεται πίεση 10 bar με τη βοήθεια της αντλίας.
- Μόλις σταματήσει η αντλία να εισπνέζει νερό στο βρόγχο καταγράφεται η ένδειξη του όγκου του νερού που παραμένει στο θάλαμο της αντλίας.
- Αυξάνοντας την πίεση ανά 30 bar μέχρι τα 500 bar καταγράφονται οι ενδείξεις του όγκου του νερού που παραμένει στο θάλαμο της αντλίας.
- Η ίδια διαδικασία ακολουθείται και για τις θερμοκρασίες 50 °C, 70 °C και 90 °C.

Έπειτα πραγματοποιήθηκε η ογκομέτρηση του βρόχου 14 -1-2-P₁, με τον ίδιο τον ίδιο τρόπο όπως έγινε η ογκομέτρηση του βρόχου 6-4 μόνο που σε αυτή την περίπτωση η βάνα 6 είναι κλειστή και στη θέση της ανοίγονται οι βάνες 14 και 2.

Οι τιμές της ογκομέτρησης των βρόχων της πειραματικής διάταξης παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα.

ΒΡΟΧΟΙ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗΣ ΔΙΑΤΑΞΗΣ	V (cc)
Βρόχος 6-4	6.356
Βρόχος 14-2	17.447
Βρόχος 1-2-3	1.357
Χωρητικότητα αυτοκλείστου όταν το έμβολο βρίσκεται στη μέγιστη θέση	3.826
Χωρητικότητα αυτοκλείστου	632.150
Συνολική χωρητικότητα της πειραματικής διάταξης	661.136

Πίνακας 4.8: Ογκομέτρηση των βρόχων της διάταξης στα 10 bar και στους 28 °C

Εφόσον έχει μετρηθεί ο όγκος του νερού που καταλαμβάνει ο κάθε βρόχος διορθώνεται η μεταβολή της ένδειξης του όγκου νερού που παραμένει στο θάλαμο της αντλίας ως προς τη μεταβολή του όγκου του εξοπλισμού λόγω της θερμικής διαστολής, καθώς και λόγω της συμπιεστότητας του νερού και της διάταξης.

Με βάση την παρακάτω εξίσωση γίνεται η διόρθωση των μετρήσεων του όγκου νερού που παραμένει στο θάλαμο της αντλίας:

$$V_{\text{pump}_{\text{διορθωμένη}}} = V_{\text{pump}_{\text{αρχική}}} + \Delta V_{\theta,\delta} + \Delta V_{\sigma,\delta} + \Delta V_{\sigma,\nu} \quad (4.6)$$

όπου:

$\Delta V_{\theta,\delta}$: η μεταβολή της χωρητικότητας της διάταξης ως προς τη θερμοκρασία

$\Delta V_{\sigma,\delta}$: η μεταβολή της χωρητικότητας της διάταξης λόγω συμπιεστότητας του εξοπλισμού
και του νερού

$\Delta V_{\sigma,\nu}$: η μεταβολή της χωρητικότητας της διάταξης λόγω μεταβολής της συμπιεστότητας
του νερού οφειλόμενη στη μεταβολή της θερμοκρασίας

A. Θερμική διαστολή της διάταξης

Η ογκομέτρηση των βρόχων έγινε σε θερμοκρασίες δωματίου, 50 °C, 70 °C και 90°C. Με την αύξηση της θερμοκρασίας διαστέλλεται η διάταξη και μέσω της ένδειξης του όγκου νερού που παραμένει στο θάλαμο της αντλίας, μετράται η μεταβολή της χωρητικότητας λόγω θερμικής διαστολής της διάταξης.

Όλη η διάταξη είναι γεμάτη με νερό σε πίεση 10 bar και θερμοκρασία περιβάλλοντος. Καταγράφεται η ένδειξη του όγκου του νερού που παραμένει στο θάλαμο της αντλίας. Έπειτα, επαναλαμβάνεται η ίδια διαδικασία και για τις υπόλοιπες θερμοκρασίες που προαναφέρθηκαν.

Στο Διάγραμμα 4.15 παρουσιάζεται η αύξηση της χωρητικότητας λόγω θερμικής διαστολής της διάταξης για τις τέσσερις θερμοκρασίες. Χρησιμοποιήθηκε γραμμικό μοντέλο αφού τα πειραματικά δεδομένα του όγκου ως προς τη θερμοκρασία εμφανίζουν γραμμική εξάρτηση.

$$\Delta V_{\theta,\delta} = a \cdot x - b \quad (4.7)$$

όπου:

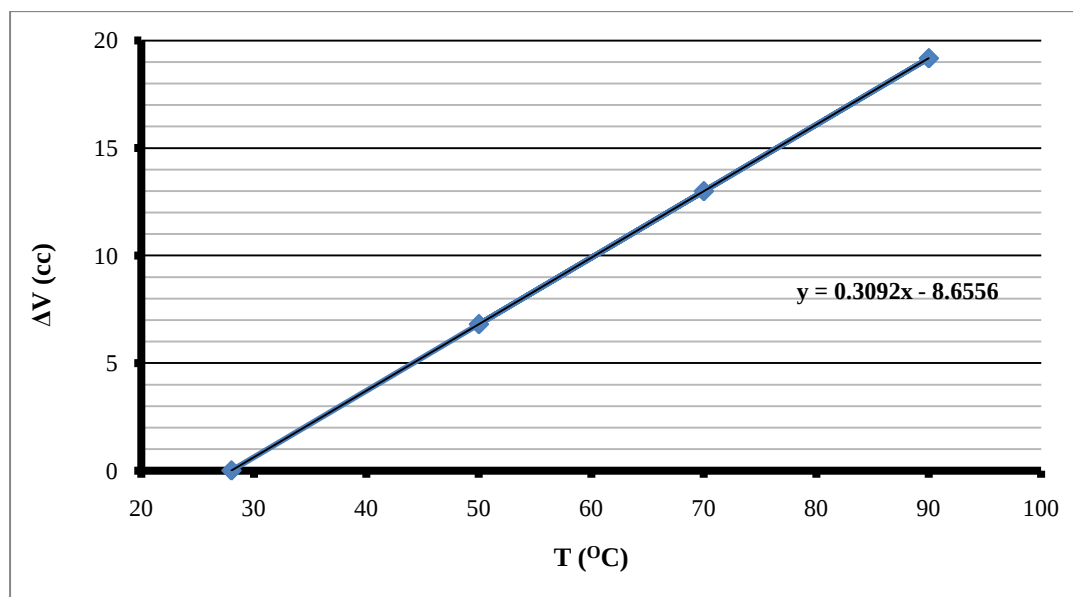
$\Delta V_{\theta,\delta}$: η μεταβολή της χωρητικότητας ως προς τη θερμοκρασία

a : σταθερά μοντέλου

b : σταθερά μοντέλου

x : η μετρούμενη τιμή της θερμοκρασίας

Η θερμική διαστολή αφαιρείται από την ένδειξη του όγκου του νερού που παραμένει στο θάλαμο της αντλίας για να βρεθεί ο όγκος του ρευστού στις θερμοκρασίες 50 °C, 70 °C και 90°C , υπό σταθερή πίεση, ίση με του περιβάλλοντος.



Διάγραμμα 4.15: Μεταβολή του όγκου του εξοπλισμού σε σχέση με τη θερμοκρασία

B. Μεταβολή χωρητικότητας της διάταξης λόγω συμπιεστότητας του εξοπλισμού

Άλλη μια παράμετρος που πρέπει να ληφθεί υπόψη για τη διόρθωση της ένδειξης όγκου νερού που παραμένει στο θάλαμο της αντλίας, είναι η μεταβολή της χωρητικότητας της διάταξης λόγω συμπιεστότητας του εξοπλισμού. Δηλαδή καθώς αυξάνεται η πίεση υπό σταθερή θερμοκρασία παρατηρείται μεταβολή της χωρητικότητας του εξοπλισμού που περιλαμβάνεται στη συγκεκριμένη βαθμονόμηση. Η ισοθερμοκρασιακή συμπιεστότητα αναφέρεται στο σύστημα αυτόκλειστο-αντλία-γραμμές-νερό, αλλά όχι στο ρευστό.

Η διάταξη είναι γεμάτη με νερό σε πίεση 10 bar και θερμοκρασία περιβάλλοντος και καταγράφεται η ένδειξη του όγκου του νερού που παραμένει στο θάλαμο της αντλίας. Στη συνέχεια αυξάνεται η πίεση και καταγράφονται οι ενδείξεις του όγκου νερού που παραμένει στο θάλαμο της αντλίας μέχρι τα 500 bar. Επαναλαμβάνεται η ίδια διαδικασία και για τις υπόλοιπες θερμοκρασίες που προαναφέρθηκαν. Από την κάθε μέτρηση του όγκου νερού που παραμένει στο θάλαμο της αντλίας αφαιρέθηκε η αρχική μέτρηση στα 10 bar.

Χρησιμοποιήθηκε γραμμικό μοντέλο αφού τα πειραματικά δεδομένα του όγκου ως προς τη πίεση εμφανίζουν γραμμική εξάρτηση.

$$\Delta V_{\sigma,\delta} = -a * x - b \quad (4.8)$$

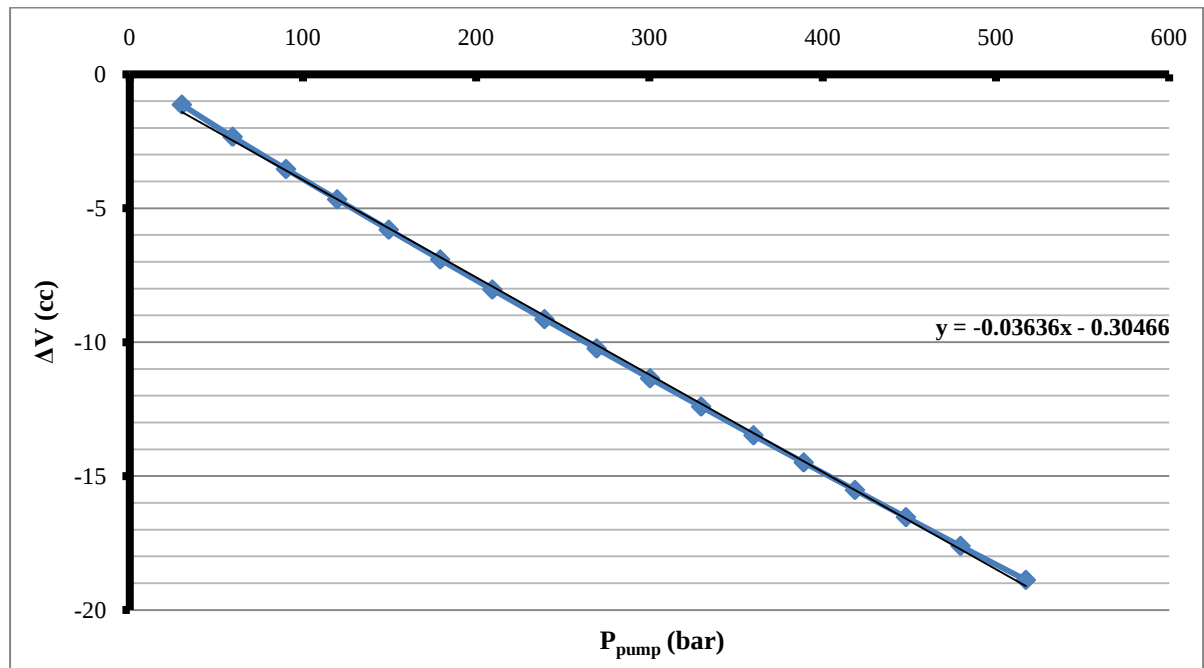
όπου:

$\Delta V_{\sigma,\delta}$: η μεταβολή της χωρητικότητας της διάταξης λόγω συμπιεστότητας του εξοπλισμού και του νερού

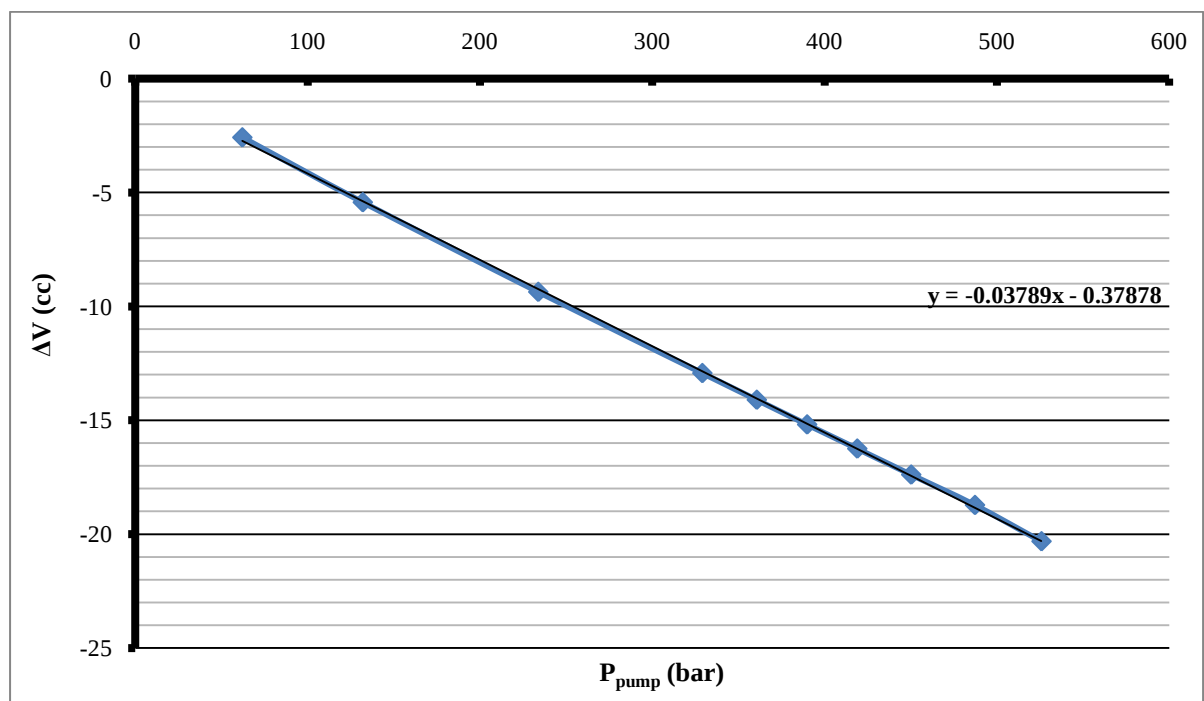
a : σταθερά

b : σταθερά

x : η μετρούμενη τιμή της πίεσης της αντλίας για δεδομένη θερμοκρασία



Διάγραμμα 4.16: Μοντελοποίηση των πειραματικών δεδομένων της ισοθερμοκρασιακής συμπίεστότητας της διάταξης του εξοπλισμού στους 28 °C



Διάγραμμα 4.17 Μοντελοποίηση των πειραματικών δεδομένων της ισοθερμοκρασιακής συμπίεστότητας της διάταξης του εξοπλισμού στους 90 °C

Γ. Μεταβολή της συμπιεστότητας του νερού λόγω μεταβολής της θερμοκρασίας

Η μεταβολή της συμπιεστότητας του νερού για τις θερμοκρασίες των 50 °C και 90 °C σε σχέση με τους 28 °C δεν ελήφθη υπόψη και για αυτό το λόγο υπολογίστηκε η μεταβολή της συμπιεστότητας του νερού στους 50 °C και στους 90 °C.

Με βάση το Σχήμα 4.3 η συμπιεστότητα του νερού για τη καμπύλη της πίεσης 1000 psi είναι:

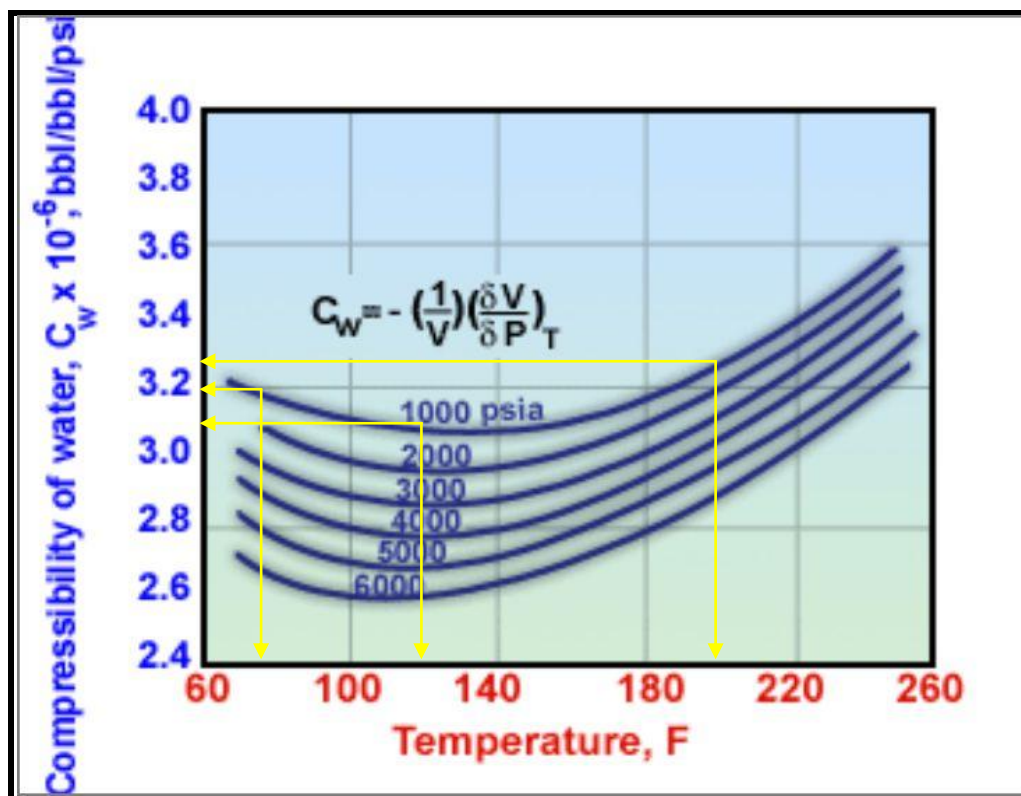
T (°C)	P (psi)	$c_w (10^{-6} \text{ psi}^{-1})$
28	1000	3.2
50	1000	3.1
90	1000	3.3

Πίνακας 4.9: Συμπιεστότητα νερού για τις θερμοκρασίες των πειραμάτων

Από τον Πίνακα 4.9 διαπιστώνεται ότι η μεταβολή της συμπιεστότητας για τα θερμοκρασιακά εύρη 28 °C – 50 °C και 28 °C - 90 °C είναι της τάξης του $0,1 \cdot 10^{-6} \text{ psi}^{-1}$ και προστίθεται αλγεβρικά στην Εξίσωση 4.6.

Η μικρότερη τιμή της ισοθερμοκρασιακής συμπιεστότητας που μετρήθηκε στους υγρούς υδρογονάνθρακες παρατηρήθηκε στο τολουένιο. Υπολογίστηκε $2,736 \cdot 10^{-6} \text{ psi}^{-1}$ στους 50 °C και $2,908 \cdot 10^{-6} \text{ psi}^{-1}$ στους 90 °C χωρίς να ληφθεί υπόψη η διαφορά της συμπιεστότητας του νερού λόγω θερμοκρασίας. Έτσι το σφάλμα της μέτρησης στους 50 °C είναι 3,65%, ενώ στους 90 °C είναι 3,43%.

Συνεπώς το σφάλμα στις μετρήσεις της ισοθερμοκρασιακής συμπιεστότητας του ρευστού θεωρείται ότι είναι μικρότερο από 4%, χωρίς να ληφθεί υπόψη η διαφορά της συμπιεστότητας του νερού λόγω θερμοκρασίας.



Σχήμα 4.3: Συμπιεστότητα του νερού σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία¹⁶

Τυφλός όγκος

Είναι ο κενός όγκος του αυτοκλείστου όταν το έμβολο βρίσκεται στην ανώτερη θέση συν τον όγκο του βρόχου 1-2-3 (Σχήμα 4.1). Ο τυφλός όγκος προστίθεται στη διορθωμένη ένδειξη όγκου νερού που παραμένει στο θάλαμο της αντλίας ώστε να προκύψει η πραγματική τιμή του όγκου του ρευστού.

4.6 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

4.6.1 Φόρτωση υγρών υδρογονανθράκων

Οι υγροί υδρογονάνθρακες που χρησιμοποιήθηκαν για τις πειραματικές μετρήσεις ήταν το κανονικό πεντάνιο, το τολουένιο και το κυκλοεξάνιο. Τα μείγματα που μελετήθηκαν ήταν συνδυασμός των παραπάνω καθαρών συστατικών με μεθάνιο, σύστασης 90% υγρός υδρογονάνθρακας – 10% μεθάνιο κατά mole και 70% υγρός υδρογονάνθρακας – 30% μεθάνιο κατά mole. Τα πειράματα διεξήχθησαν στους 28°C, 50°C και 90°C.

Η ποσότητα του εκάστοτε υγρού που θα φορτωθεί στο αυτόκλειστο υπολογίζεται με βάση τη χωρητικότητα του αυτοκλείστου, τη μέγιστη ποσότητα αερίου που θα απαιτηθεί αργότερα για τη δημιουργία του μείγματος (70% υγρός υδρογονάνθρακας – 30% μεθάνιο κατά mole) και

τη πίεση φόρτωσης του αερίου (80bar). Έτσι ο όγκος του ρευστού που θα φορτωθεί στο αυτόκλειστο υπολογίζεται με βάση την αναλογία υγρού-αερίου που θα έχουν τα μείγματα.

Με βάση τα παραπάνω αρχικά υπολογίζονται τα moles του υγρού που θα μεταφερθούν στο πιστόνι με βάση τη σύσταση 70% υγρός υδρογονάνθρακας – 30% μεθάνιο κατά mole και έπειτα υπολογίζεται η μάζα που καταλαμβάνουν τα moles του υγρού με τον παρακάτω τύπο:

$$m = n * MW \quad (4.9)$$

όπου:

m: η μάζα του υγρού

n: τα moles του υγρού

MW: το μοριακό βάρος του υγρού

Ο όγκος που καταλαμβάνει η μάζα του υγρού που μεταφέρθηκε στο αυτόκλειστο υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$V = \frac{m}{d} \quad (4.10)$$

όπου:

V: ο όγκος του υγρού

m: η μάζα του υγρού

d: η πυκνότητα του υγρού

Πραγματοποιήθηκε διόρθωση ως προς τη πυκνότητα των υγρών υδρογονανθράκων ως προς την θερμοκρασία φόρτωσης. Αυτό συνέβη διότι η εύρεση της μάζας των καθαρών συστατικών και κατά επέκταση και του αριθμού των moles έγινε με βάση την ονομαστική πυκνότητα των καθαρών συστατικών στους 20°C ενώ τα πειράματα αρχικά πραγματοποιήθηκαν σε θερμοκρασία περιβάλλοντος 30°C. Χρησιμοποιήθηκαν πραγματικές πειραματικές μετρήσεις πυκνότητας από πίνακα¹⁷ για τους υγρούς υδρογονάνθρακες στους 30°C.

Το υγρό τοποθετείται στο δοχείο του υγρού, στη συνέχεια μεταφέρεται στον άνω θάλαμο του αυτοκλείστου με τη βοήθεια πεπιεσμένου αέρα. Η αντλία τίθεται σε λειτουργία να εισπύσει νερό στη διάταξη μέχρι να φανεί η πρώτη σταγόνα υγρού στη γραμμή του κενού, οπότε και σταματάται τη λειτουργία της. Κλείνεται η βάνα που βρίσκεται στον άνω θάλαμο του αυτοκλείστου και καταγράφεται η ένδειξη της πίεσης της αντλίας και των μανομέτρων καθώς και η ένδειξη του όγκου νερού που υπάρχει στο θάλαμο της αντλίας. Η φόρτωση των υγρών έγινε σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Η διαδικασία φόρτωσης του καθαρού συστατικού γίνεται ως εξής:

- Το δοχείο του υγρού έχει καθαριστεί και έχει τοποθετηθεί μέσα το υγρό, Σχήμα 4.1.
- Στον άνω θάλαμο του αυτοκλείστου υπάρχει αέρας.

- Η αντλία τίθεται σε πίεση 4bar.
- Το έμβολο βρίσκεται στη μέγιστη θέση όπου και καταγράφεται η ένδειξη του όγκου της αντλίας.
- Από τη βάνα 1 εισπνέζεται πεπιεσμένος αέρας με αποτέλεσμα το έμβολο να κατεβαίνει μέχρι την επιθυμητή θέση, όπου και σταματάται την αντλία.
- Καταγράφεται η ένδειξη του όγκου της αντλίας.
- Ανοίγονται οι βάνες 7,8,2 και 3, Σχήμα 4.1.
- Με τη βοήθεια του πεπιεσμένου αέρα εισπνέζεται αέρας από τη βάνα 9 έτσι ώστε να διοχετευθεί το υγρό στο επάνω μέρος του αυτοκλείστου. Το υγρό περνά μέσω της γραμμής στο αυτόκλειστο διότι στο κάτω μέρος του δοχείου υπάρχει οπή.
- Κλείνονται οι βάνες 7,8,2 και 3.
- Καταγράφεται η ένδειξη του όγκου του νερού που έχει παραμείνει στο θάλαμο της αντλίας.
- Ανοίγονται οι βάνες 2,3 και 12 και εφαρμόζεται κενό ενώ ταυτόχρονα εφαρμόζεται πίεση με τη βοήθεια της αντλίας, για να ανέβει το έμβολο.
- Με τη πρώτη σταγόνα που θα περάσει στο κύκλωμα του κενού κλείνονται όλες οι βάνες.
- Καταγράφεται η ένδειξη του όγκου της αντλίας.

Στο τέλος υπολογίζονται τα moles του υγρού που μεταφέρθηκαν στο αυτόκλειστο αφού γίνουν οι απαραίτητες διορθώσεις στις ενδείξεις του όγκου νερού που παραμένει στο θάλαμο της αντλίας (Εξίσωση 4.6). Αρχικά υπολογίζεται η μάζα του υγρού λύνοντας την Εξίσωση 4.10 ως προς m και έπειτα υπολογίζονται τα moles του λύνοντας την Εξίσωση 4.9 ως προς n .

4.6.2 Φόρτωση αερίου για τη δημιουργία μείγματος

Αφού έχει προηγηθεί η παραπάνω διαδικασία της μεταφοράς του υγρού ακολουθεί η μεταφορά του αερίου. Γίνονται οι ακόλουθοι υπολογισμοί για την ποσότητα του αερίου που θα μεταφερθεί.

Για παράδειγμα, για τη δημιουργία του μείγματος με αναλογία 90% υγρό – 10% αέριο, κατά mole ακολουθείται η διαδικασία:

- Έχει προηγηθεί η διαδικασία μεταφοράς του υγρού και ο υπολογισμός του όγκου που έχει μεταφερθεί.

- Υπολογίζονται τα moles του υγρού με βάση την πυκνότητα του υγρού, το μοριακό του βάρος και τον όγκο που καταλαμβάνει το υγρό στο αυτόκλειστο.
- Για τη συγκεκριμένη αναλογία πρέπει τα moles του αερίου να είναι το 1/9 αυτών του υγρού.
- Εφόσον έχουν υπολογιστεί πόσα moles αερίου θα μεταφερθούν και γνωρίζοντας την πίεση που θα γίνει η μεταφορά του αερίου, υπολογίζεται ο όγκος που θα καταλάβουν τα moles του αερίου στο αυτόκλειστο.

- Ο υπολογισμός του όγκου γίνεται με την χρήση της καταστατικής εξίσωσης των πραγματικών αερίων. Δηλαδή :

$$V = \frac{n Z R T}{p} \quad (4.11)$$

όπου:

n: τα moles του αερίου που θα μεταφερθούν

Z: ο συντελεστής απόκλισης του καθαρού αερίου σε θερμοκρασία περιβάλλοντος και στην πίεση που θα γίνει η μεταφορά

R: η τιμή της σταθεράς των αερίων

T: η θερμοκρασία περιβάλλοντος

p: η πίεση στην οποία θα γίνει η μεταφορά του αερίου

Η σειρά φόρτωσης των ρευστών στο αυτόκλειστο καθορίζεται από την πίεση φόρτωσης του κάθε συστατικού. Πρώτα φορτώθηκε το υγρό στα 10 bar και έπειτα το αέριο στα 80 bar και αυτό διότι το υγρό δε γίνεται να φορτωθεί σε πίεση μεγαλύτερη από αυτήν του αερίου.

Η διαδικασία φόρτωσης του αερίου είναι:

- Συνδέεται η φιάλη που περιέχει το αέριο, μεθάνιο με την πειραματική διάταξη, Σχήμα 4.1.
- Υπό σταθερή πίεση αντλίας 1 bar ανοίγονται οι βάνες 8, 2 και 3 καθώς και η βάνα του αερίου. Έτσι εισέρχεται στο αυτόκλειστο η ποσότητα αερίου που έχει προϋπολογιστεί και ο όγκος του άνω θαλάμου αυξάνει.
- Υπό σταθερή θερμοκρασία η πίεση αυξάνεται σταδιακά και σημειώνεται η αντίστοιχη τιμή του όγκου. (Αύξηση της πίεσης $\Rightarrow$ μείωση όγκου του αερίου $\Rightarrow$ αύξηση όγκου του νερού στο αυτόκλειστο).
- Όταν φτάσει η πίεση του αερίου μέσα στο αυτόκλειστο στην επιθυμητή τιμή, κλείνεται η βαλβίδα φόρτωσης.

- Τέλος όλες οι βάνες είναι κλειστές και απομακρύνεται η φιάλη μεταφοράς αερίου.

Η μεταφορά του αερίου γίνεται σε θερμοκρασία περιβάλλοντος. Μετά τη μεταφορά του αερίου στο αυτόκλειστο παρατηρούμε ότι η ένδειξη της πίεσης σιγά – σιγά πέφτει διότι αρχίζει το αέριο να διαλύεται στο υγρό.

4.6.3 Έλεγχος αριθμού φάσεων

Πειραματικά μελετήθηκαν υγροί υδρογονάνθρακες αλλά και μείγματα αυτών με αέριο στη μονοφασική περιοχή. Η καταγραφή των μετρήσεων πραγματοποιήθηκε από τη μέγιστη πίεση που ήταν τα 500 bar προς τη χαμηλότερη που ήταν τα 30 bar στους 28 °C, 50 °C και 90 °C. Τα υγρά βρίσκονταν στη μονοφασική περιοχή κατά τη διάρκεια των μετρήσεων και αυτό γιατί η τάση ατμών των υγρών είναι υποατμοσφαιρική. Στα μείγματα μετά την εισαγωγή αερίου στο υγρό, ελαφραίνει η σύσταση, έτσι ο φάκελος φάσεων περιστρέφεται αντίθετα από τη φορά των δεικτών του ρολογιού, με αποτέλεσμα να υπάρχει κίνδυνος να φθάσουμε στην τάση ατμών και να είναι μέσα στο εύρος των πιέσεων που θα γίνουν τα πειράματα. Για να παρακαμφθεί η ύπαρξη διφασικού μείγματος συμπιέστηκε το μείγμα ως τη μέγιστη πίεση τα 500 bar και κάνοντας συνεχή ανάδευση. Κατά το στάδιο της καταγραφής των μετρήσεων από τα 500 bar στα 30 bar η πίεση μειωνόταν με αποτέλεσμα να φθάσει στην πίεση κορεσμού, κάτι που διαπιστώθηκε από την απότομη αύξηση του όγκου. Οι μετρήσεις στα μείγματα από την πίεση κορεσμού και κάτω απερρίφθησαν.

Πριν την καταγραφή κάθε μέτρησης γινόταν ανάδευση με σκοπό να βοηθηθεί η ισορροπία του ρευστού. Η καταγραφή των μετρήσεων έφθανε μέχρι και τη διφασική περιοχή έτσι ώστε να γίνει γνωστό μέχρι ποια ένδειξη της πίεσης το μείγμα βρίσκεται στη μονοφασική περιοχή. Η αλλαγή από τη μονοφασική περιοχή στη διφασική γινόταν εμφανής όταν με τη μείωση της πίεσης ο όγκος αυξανόταν κατακόρυφα.

4.6.4 Μέτρηση συντελεστή απόκλισης

Τα πειράματα προσδιορισμού του συντελεστή απόκλισης Z γίνονται υπό σταθερή μάζα ($\Delta m = 0$). Το καθαρό συστατικό ή το μείγμα τοποθετείται στο αυτόκλειστο στον άνω θάλαμο, με τη διαδικασία που προαναφέρθηκε και στη συνέχεια αυξάνεται η πίεση σταδιακά εισάγοντας νερό στο αυτόκλειστο από τον κάτω θάλαμο μέσω της αντλίας ISCO. Με βάση τις ενδείξεις της αντλίας ISCO υπολογίζεται ο όγκος του ρευστού στις συνθήκες (p, T).

Η διαδικασία έχει ως εξής:

- Φορτώνεται το καθαρό συστατικό ή το μείγμα στον άνω θάλαμο του αυτοκλείστου, στον οποίο είχε εφαρμοστεί πρωτύτερα κενό.
- Καταγράφονται οι μετρήσεις όγκου, πίεσης και θερμοκρασίας.
- Η τιμή των moles (n) μετριέται στο τέλος κάθε πειράματος.
- Στη συνέχεια υπολογίζεται ο συντελεστής απόκλισης Z με χρήση της Εξίσωσης 4.11, λύνοντας ως προς Z , και κατασκευάζεται το διάγραμμα πίεσης - όγκου και πίεσης - συντελεστή απόκλισης.

4.6.5 Υπολογισμός συντελεστή ισοθερμοκρασιακής συμπιεστότητας

Εκτός από τον συντελεστή απόκλισης υπολογίζεται και ο συντελεστής ισοθερμοκρασιακής συμπιεστότητας (c). Ο συντελεστής c υπολογίζεται με δυο τρόπους :

- Με την αριθμητική μέθοδο, c_m

$$C_m \approx - \frac{1}{\frac{V_1 + V_2}{2}} \frac{V_2 - V_1}{P_2 - P_1} \quad (4.12)$$

όπου:

V_1, V_2 : δυο διαδοχικές μετρήσεις όγκου ρευστού

P_1, P_2 : δυο διαδοχικές μετρήσεις πίεσης

Για να χρησιμοποιηθεί ο παραπάνω τύπος χρειάζεται για κάθε τιμή όγκου ρευστού και η αντίστοιχη τιμή της πίεσης. Ο συντελεστής c_m υπολογίζει τη χορδή μεταξύ δυο διαδοχικών σημείων πίεσης σε ένα διάγραμμα όγκου ρευστού-πίεσης.

Όσο πιο κοντά στο P_1 είναι το P_2 , τόσο πιο κοντά είναι το c_m στην ακριβή τιμή της ισοθερμοκρασιακής συμπιεστότητας (c), εάν δεν υπάρχουν σφάλματα μέτρησης.

- Με την αναλυτική μέθοδο, c

$$c = - \frac{1}{V} \left. \frac{dV}{dP} \right|_T \quad (4.13)$$

όπου:

V : όγκος του ρευστού

$\frac{dV}{dP}$: παράγωγος του όγκου ως προς την πίεση

Συλλογή μετρήσεων

Οι μετρήσεις λαμβάνονται από τον ηλεκτρονικό υπολογιστή μέσω του προγράμματος LabView όπου καταγράφονται οι τιμές των πιέσεων από τα δυο μανόμετρα που βρίσκονται εντός του κλιβάνου και από το μανόμετρο της αντλίας, η αντίστοιχη τιμή του όγκου της αντλίας και η θερμοκρασία του κλιβάνου. Οι μετρήσεις λαμβάνονται όταν το σύστημα ισορροπεί δηλαδή όταν δεν υπάρχει πλέον παροχή από την αντλία ISCO.

Οι μετρήσεις ξεκινούν από τιμή πίεσης 30 bar και αυξάνονται μέχρι τα 500 bar, ανά 30 bar. Στην συνέχεια οι τιμές του όγκου και της πίεσης διορθώνονται και απεικονίζονται σε διάγραμμα πίεσης - συντελεστή απόκλισης.

4.6.6 Προσδιορισμός της σύστασης του μείγματος

Ο προσδιορισμός της σύστασης του μείγματος γίνεται με την διαδικασία της εκτόνωσης σε συνθήκες περιβάλλοντος (flash). Η διαδικασία εκτόνωσης που πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο έγινε με εκτόνωση ενός μέρους του μονοφασικού ρευστού από τη πίεση που βρισκόταν και θερμοκρασία περιβάλλοντος σε συνθήκες περιβάλλοντος.

Η διαδικασία εκτόνωσης που πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο έχει ως εξής:

- Αρχικά ζυγίζεται το απόβαρο της γυάλινης φιάλης.
- Καταγράφονται οι ενδείξεις των εμβόλων της συσκευής μέτρησης όγκου αερίων (gasometer) πριν μπει το αέριο.
- Όλες οι βάνες είναι κλειστές.
- Ανοίγονται οι βάνες 6 και 4, (Σχήμα 4.1).
- Εφαρμόζεται μέγιστη πίεση (500 bar) με τη βοήθεια της αντλίας στο αυτόκλειστο έτσι ώστε το μείγμα που βρίσκεται στο αυτόκλειστο να είναι μονοφασικό.
- Συνδέεται στη βάνα 2 η γυάλινη φιάλη για τη συλλογή της υγρής φάσης και η συσκευή gasometer για τη συλλογή της αέριας φάσης.
- Σιγά – σιγά και με μεγάλη προσοχή ανοίγεται η βάνα 2 για να προλάβει να έρθει σε θερμική ισορροπία το ρευστό που βγαίνει και να προλάβει να γίνει ο διαχωρισμός των δυο φάσεων.
- Ζυγίζεται η γυάλινη φιάλη με το δείγμα.
- Καταγράφονται οι ενδείξεις των εμβόλων της συσκευής gasometer με το αέριο.

Έπειτα προσδιορίζεται ο όγκος των δυο φάσεων, αέριας και υγρής που παράγονται, σε κανονικές συνθήκες. Η μάζα του υγρού που εκτονώθηκε προσδιορίζεται με την αφαίρεση των δυο μετρήσεων από τη ζύγιση της γυάλινης φιάλης, πριν και μετά την εκτόνωση. Ο όγκος του υγρού υπολογίζεται με βάση την Εξίσωση 4.10.

Η αέρια φάση μετά την εκτόνωση συλλέγεται στο gasometer, όπου υπάρχει το αέριο που εκτονώθηκε αλλά και ποσότητα υγρού σε αέρια φάση. Η εύρεση των moles που βρίσκονται στο gasometer γίνεται με τη χρήση της Εξίσωσης 4.11, λύνοντας ως προς n . Η εύρεση των moles του υγρού που βρίσκονται σε αέρια φάση στο gasometer υπολογίζονται από την Εξίσωση 4.11, λύνοντας ως προς n , όπου η πίεση θα είναι ίση με την τάση ατμών του υγρού και ο συντελεστής απόκλισης ίσος με τη μονάδα. Τα moles του αερίου (μεθάνιο) που βρίσκονται στο gasometer είναι τα συνολικά moles μείον τα moles του υγρού που βρίσκονται σε αέρια φάση στο gasometer.

Έπειτα, καθαρίζεται η συσκευή του gasometer και στη συνέχεια, η πειραματική διάταξη συνδέεται με το σύστημα κενού του εργαστηρίου για να γίνει η προετοιμασία για το επόμενο πείραμα.

Ο προσδιορισμός της σύστασης του μείγματος με τη παραπάνω διαδικασία γίνεται για να εκτιμηθεί με ακρίβεια η σύσταση που έχει το μείγμα. Αποτελεί και επιβεβαίωση πόσο κοντά στους αρχικούς υπολογισμούς είναι η σύσταση. Η μεγαλύτερη απόκλιση στη σύσταση μεταξύ των αρχικών υπολογισμών και αυτής που προκύπτει μετά την εκτόνωση ήταν στο μείγμα κανονικό πεντάνιο με μεθάνιο. Οι αρχικοί υπολογισμοί ήταν 74,372% κανονικό πεντάνιο και 25,628% μεθάνιο και μετά την εκτόνωση η σύσταση υπολογίστηκε 79,951% κανονικό πεντάνιο και 20,049% μεθάνιο.

4.6.7 Ακρίβεια και επαναληψιμότητα των μετρήσεων

Δυο όροι που χρησιμοποιούνται ευρύτατα σε σχέση με την εν γένει ποιότητα των πειραματικών δεδομένων είναι η ακρίβεια και η επαναληψιμότητα της κάθε μετρητικής διαδικασίας.

Η ακρίβεια περιγράφει την ορθότητα ενός πειραματικού αποτελέσματος και εκφράζεται ως μέσο σφάλμα ως μέσο απόλυτο σφάλμα και ως μέσο απόλυτο σχετικό σφάλμα.

Το μέσο σφάλμα E_μ ορίζεται ως εξής:

$$E_\mu = \sum_{i=1}^N \frac{x_i - x_i^f}{N} \quad (4.14)$$

όπου:

N: ο αριθμός των μετρήσεων

x_i : η πειραματική τιμή

x_i^f : η πραγματική τιμή

Το μέσο σφάλμα δείχνει πόσο συμμετρικά κατανεμημένες είναι οι μετρήσεις ως προς το μηδέν.

Το απόλυτο σφάλμα $E_{\mu.a.}$ της μέσης τιμής $\bar{x}$ ενός αριθμού επαναλαμβανόμενων μετρήσεων δίνεται από τη σχέση:

$$E_{\mu.a.} = \sum_{i=1}^N \frac{|x_i - x_i^f|}{N} \quad (4.15)$$

Το απόλυτο σφάλμα δείχνει πόσο απέχουν οι μετρήσεις από το μηδέν.

Συχνά είναι περισσότερο χρήσιμο η ακρίβεια να εκφράζεται με το αντίστοιχο απόλυτο σχετικό σφάλμα δηλαδή τη ποσότητα:

$$E_{\mu.a.s.} = \sum \left| \frac{x_i - x_i^r}{x_i^r} \right| * 100\% \quad (4.16)$$

Το απόλυτο σχετικό σφάλμα δείχνει πόσο μεγάλο είναι το λάθος σε σχέση με τη σωστή τιμή και χρησιμοποιείται για μετρήσεις που δεν είναι κοντά στο μηδέν και αυτό διότι γιγαντώνεται το σφάλμα σε κλίμακες μετρήσεων κοντά στο μηδέν, όπως συμβαίνει με τις μετρήσεις της ισοθερμοκρασιακής συμπίεστότητας.

Είναι προφανές ότι το μέσο σφάλμα διαθέτει πρόσημο που υποδηλώνει ότι το μετρούμενο μέγεθος είναι μεγαλύτερο από το πραγματικό. Το απόλυτο σφάλμα και το απόλυτο σχετικό σφάλμα βγαίνει πάντα θετικό.

Η μέση τιμή ορίζεται από τον παρακάτω τύπο:

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^N \frac{x_i}{N} \quad (4.17)$$

Η τυπική απόκλιση (s) δείγματος δίνεται από τη σχέση:

$$s = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^{N-1} (x_i - \bar{x})^2}{N-1} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (4.18)$$

Η επαναληψιμότητα (ή πιστότητα ή αξιοπιστία) είναι μια έννοια που περιγράφει το βαθμό συγκέντρωσης των διαδοχικών μετρήσεων σε ίδιες συνθήκες γύρω από μια κεντρική τιμή, ή με άλλα λόγια το βαθμό συμφωνίας μεταξύ των αριθμητικών τιμών για δυο ή και περισσότερες επαναλαμβανόμενες μετρήσεις που έχουν όμως ληφθεί υπό τις ίδιες ακριβώς πειραματικές συνθήκες. Καλή επαναληψιμότητα έχουμε όταν η διασπορά των μετρήσεων είναι μικρή, δηλαδή τα πειραματικά αποτελέσματα βρίσκονται κοντά το ένα στο άλλο.

Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές επαναληψιμότητας των μετρήσεων του όγκου του νερού που παραμένει στο θάλαμο της αντλίας με καθαρό κανονικό πεντάνιο για τις θερμοκρασίες των πειραμάτων. Πραγματοποιήθηκαν τρεις σειρές μετρήσεων. Η πρώτη σειρά μετρήσεων πραγματοποιήθηκε από τα 10 bar έως και τα 500 bar, η δεύτερη πραγματοποιήθηκε από τα 500 bar έως και τα 10 bar και η τρίτη πραγματοποιήθηκε από τα 10 bar έως και τα 500 bar. Καταγράφονταν η ένδειξη του όγκου του νερού που παραμένει στο θάλαμο της αντλίας.

Το σχετικό σφάλμα ορίζεται ως εξής:

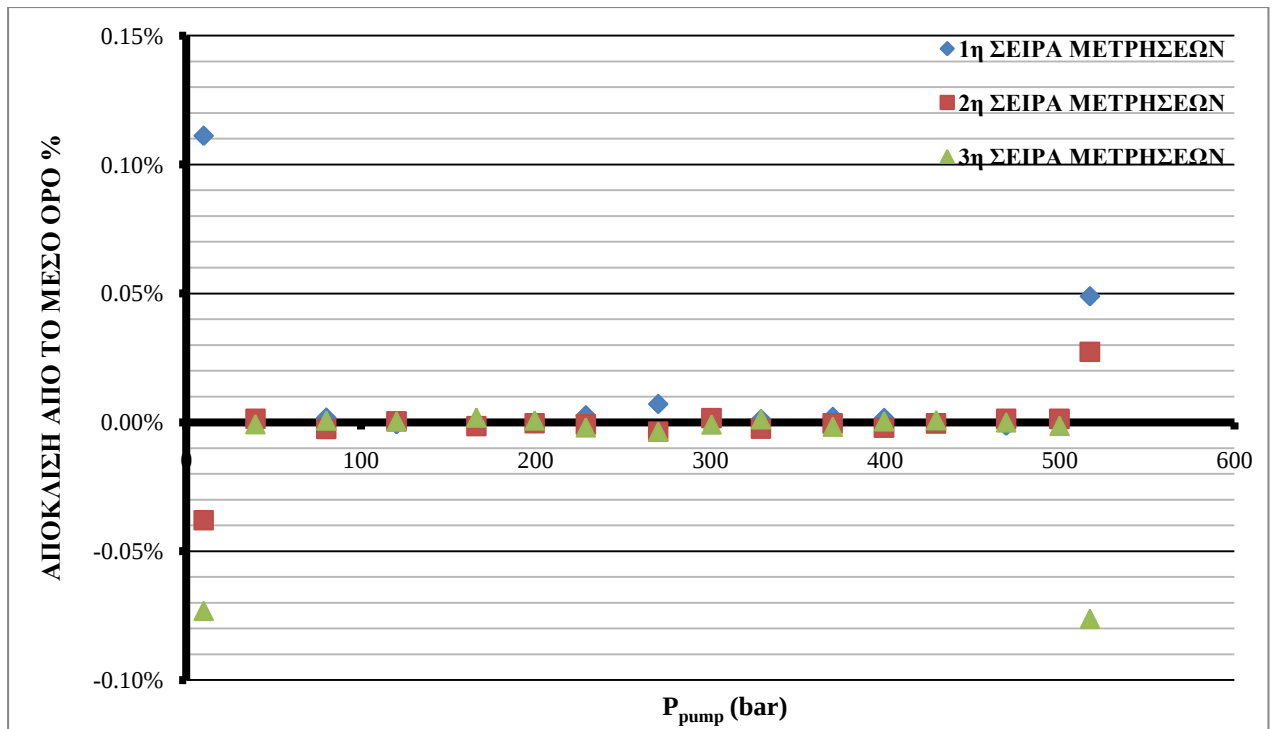
$$\frac{V_{\text{pump}} - V_{\text{pump average}}}{V_{\text{pump average}}} * 100\% \quad (4.19)$$

Στα Διαγράμματα 4.18 και 4.19 για το κανονικό πεντάνιο παρουσιάζεται στον κάθετο άξονα το σχετικό σφάλμα % και στον οριζόντιο άξονα η πίεση της αντλίας σε (bar), για τις θερμοκρασίες 28°C και 90°C αντίστοιχα. Σε αυτά τα διαγράμματα παρουσιάζεται το σχετικό σφάλμα τριών σειρών μετρήσεων.

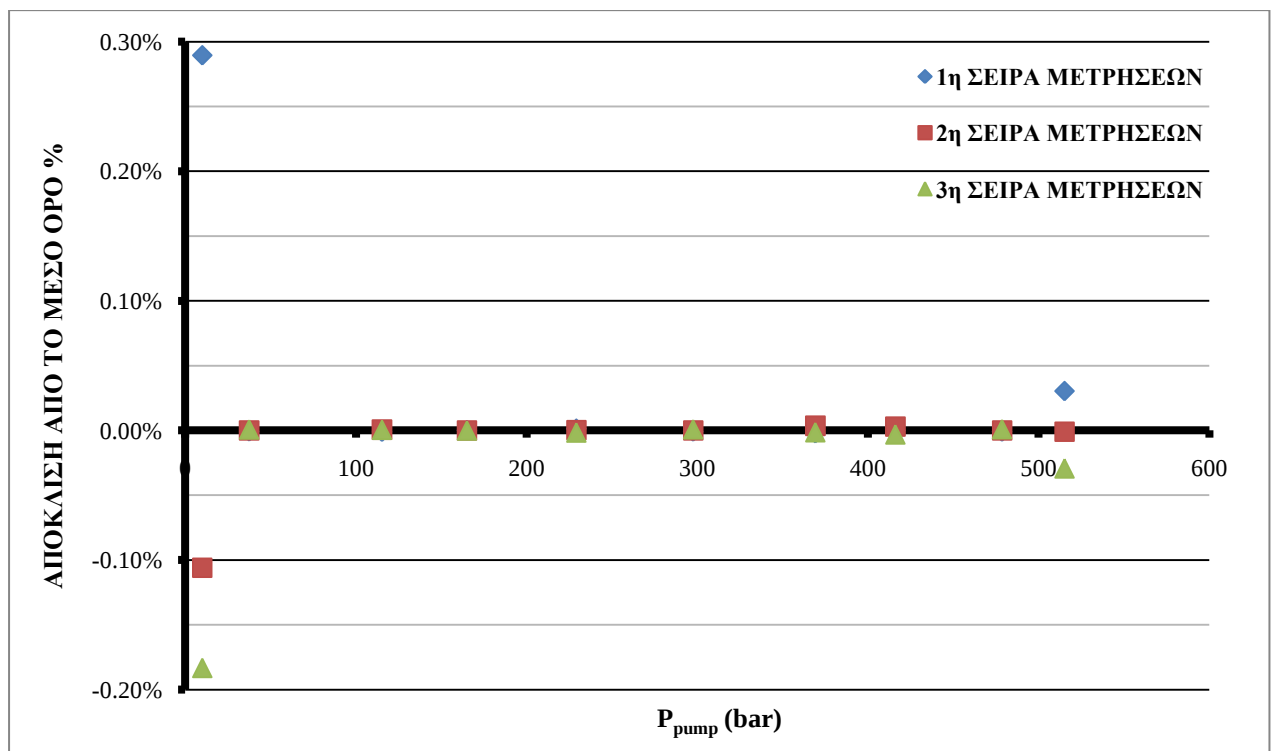
Στο Διάγραμμα 4.18 παρατηρούμε ότι το σχετικό σφάλμα για τις τρεις σειρές μετρήσεων δεν υπερβαίνει το 0,15% ενώ για το Διάγραμμα 4.19 το σχετικό σφάλμα για τις τρεις σειρές μετρήσεων δεν υπερβαίνει το 0.3%

Παρατηρούμε ότι στις χαμηλές πιέσεις το κανονικό πεντάνιο έχει μεγάλη απόκλιση και αυτό κυρίως οφείλεται στην τριβή του εμβόλου στα μανόμετρα και στην μεταβολή της θερμοκρασίας. Το έμβολο για να κινηθεί θέλει μια διαφορά πίεσης π.χ. 0,1 bar. Στις χαμηλές πιέσεις η τριβή του εμβόλου είναι πολύ πιο αισθητή από ότι στις υψηλές πιέσεις όπως έχει προαναφερθεί σε προηγούμενη παράγραφο. Από τα Διαγράμματα 4.18 και 4.19 επιβεβαιώνεται ότι οι μετρήσεις της πειραματικής διάταξης είναι επαναλήψιμες. Το ίδιο συμβαίνει στο τολουένιο, στο κυκλοεξάνιο αλλά και στα μείγματα

Στα παρακάτω διαγράμματα παρατηρείται ότι οι μεγαλύτερες αποκλίσεις να είναι στην ελάχιστη και στη μέγιστη πίεση. Η απόκλιση στη χαμηλότερη πίεση, στα 10 bar οφείλεται στη τριβή του εμβόλου, ενώ η απόκλιση στη μέγιστη πίεση, στα 517 bar οφείλεται στο ότι ο ρυθμιστής της αντλίας δε ρυθμίζει αποτελεσματικά στη μέγιστη πίεση. Η επεξεργασία των μετρήσεων έγινε από τα 30 bar μέχρι τα 500 bar. Καταγράφηκαν μετρήσεις και στα 10 bar αλλά δεν λήφθηκαν υπόψη στην επεξεργασία των μετρήσεων.



Διάγραμμα 4.18: Επαναληψιμότητα των μετρήσεων του κανονικού πεντανίου στους 28°C



Διάγραμμα 4.19: Επαναληψιμότητα των μετρήσεων του κανονικού πεντανίου στους 90°C

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

5.1 ΓΕΝΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

Οι υγροί υδρογονάνθρακες που χρησιμοποιήθηκαν για τις πειραματικές μετρήσεις όπως αναφέρθηκε προηγουμένως ήταν το κανονικό πεντάνιο, το τολουένιο και το κυκλοεξάνιο. Τα μείγματα που μελετήθηκαν ήταν συνδυασμός των παραπάνω καθαρών συστατικών με μεθάνιο, σύστασης 90% υγρός υδρογονάνθρακας – 10% μεθάνιο κατά mole και 70% υγρός υδρογονάνθρακας – 30% μεθάνιο κατά mole. Τα πειράματα διεξήχθησαν στους 28°C, 50°C και 90°C.

Επιλέχθηκε το μεθάνιο σαν ένα από τα συστατικά των μειγμάτων διότι υπάρχει πληθώρα πειραματικών δεδομένων στη βιβλιογραφία για σύγκριση με τα αποτελέσματα των πειραμάτων και γιατί είναι ο υδρογονάνθρακας που απαντάται συχνότερα στη φύση.

Μεταφέρθηκαν στο αυτόκλειστο 51,329 ml κανονικού πεντανίου, 76,584 ml τολουενίου και 30,339 ml κυκλοεξανίου σε πίεση 10 bar και στους 28°C.

Στις πειραματικές μετρήσεις του όγκου του ρευστού σαν συνάρτηση της πίεσης έγινε προσαρμογή με ομογραφική καμπύλη. Ο όγκος του ρευστού μετατράπηκε σε γραμμομοριακό όγκο ώστε να γίνει εντατικό μέγεθος, να μην εξαρτάται από τη μάζα.

Η ομογραφική καμπύλη που χρησιμοποιήθηκε για προσαρμογή στα σημεία του όγκου του ρευστού είναι η εξής:

$$V = \frac{ax_i^2 + bx_i + c}{dx_i + 1}, \quad (5.1)$$

όπου:

a,b,c,d: μεταβλητές της εξίσωσης

x: $\frac{P}{P_{\max}}$, όπου $P_{\max}$ είναι η μεγαλύτερη πίεση στην οποία διεξήχθησαν τα πειράματα

Η Εξίσωση 5.1 είναι η μορφή καμπύλης²³ που χρησιμοποιείται ευρύτατα στη βιομηχανία πετρελαίου για την προσαρμογή πειραματικών μετρήσεων ιδιοτήτων PVT. Χρησιμοποιήθηκε στις πειραματικές και στις βιβλιογραφικές τιμές όγκου.

Ο υπολογισμός του συντελεστή ισοθερμοκρασιακής συμπιεστότητας (Εξίσωση 4.13) έγινε ως εξής:

- Από τις μετρήσεις που καταγράφονται και έπειτα από τις κατάλληλες διορθώσεις που προαναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο υπολογίζεται ο όγκος του ρευστού.
- Ο όγκος του ρευστού μετατρέπεται σε γραμμομοριακό όγκο διαιρώντας τον με τα moles του ρευστού.
- Έπειτα γίνεται προσαρμογή στα σημεία του όγκου του ρευστού με την Εξίσωση 5.1
- Τέλος υπολογίζεται το $\frac{dV}{dP}$ ως εξής:

$$\frac{dV}{dP} = \frac{dV}{dx} \frac{dx}{dP} = \frac{[(2ax)+b](dx+1) - (ax^2+bx+c)*d}{(dx+1)^2} * \frac{1}{P_{\max}} \quad (5.2)$$

Ο σκοπός της χρήσης της παραπάνω καμπύλης ήταν για να περιοριστεί η επίδραση των σφαλμάτων μέτρησης.

Οι πειραματικές μετρήσεις σχεδιάστηκαν σε διαγράμματα γραμμομοριακού όγκου – πίεσης ($V_m - P$), διαγράμματα ισοθερμοκρασιακής συμπίεστότητας – πίεσης ($c - P$) και διαγράμματα σφαλμάτων.

Κάθε διάγραμμα $V_m - P$ αποτελείται από πέντε σειρές μετρήσεων. Στην πρώτη σειρά μετρήσεων (Lab V_m) παρουσιάζονται τα πειραματικά σημεία του γραμμομοριακού όγκου. Στη δεύτερη σειρά μετρήσεων (Fit Lab V_m) παρουσιάζεται η καμπύλη προσαρμογής των πειραματικών σημείων όπως αυτή προκύπτει από την Εξίσωση 5.1. Στην τρίτη σειρά μετρήσεων (Literature V_m) παρουσιάζονται οι βιβλιογραφικές τιμές του γραμμομοριακού όγκου όπως προκύπτουν από την Εξίσωση 5.3. Στην τέταρτη σειρά μετρήσεων (Fit Literature V_m) παρουσιάζεται η καμπύλη προσαρμογής των βιβλιογραφικών τιμών όπως αυτή προκύπτει από την Εξίσωση 5.1. Στην πέμπτη σειρά μετρήσεων (EOS V_m) παρουσιάζεται η καμπύλη του γραμμομοριακού όγκου όπως αυτή προκύπτει από την κυβική καταστατική εξίσωση των PR, (Εξίσωση 3.33), όπου γίνεται χρήση της τεχνικής προσθετικής διόρθωσης όγκου καταστατικής εξίσωσης.

Η μετατροπή των βιβλιογραφικών τιμών της πυκνότητας σε γραμμομοριακό όγκο (V_m) έγινε ως εξής:

$$p V = n Z R T \rightarrow p \frac{m}{d} = n Z R T \rightarrow d = \frac{p m}{n Z R T} \rightarrow d = \frac{p n MW}{n Z R T} \rightarrow$$

$$d = \frac{p MW}{Z R T} \rightarrow d = \frac{p MW}{p V_m R T} \rightarrow V_m = \frac{MW}{d} \quad (5.3)$$

Ομοίως κάθε διάγραμμα $c - P$ αποτελείται από πέντε σειρές μετρήσεων. Στην πρώτη σειρά μετρήσεων (Lab c_m) παρουσιάζονται τα πειραματικά σημεία της ισοθερμοκρασιακής συμπίεστότητας όπως προκύπτουν από την Εξίσωση 4.12, όπου ο όγκος που χρησιμοποιείται είναι ο εξομαλυσμένος γραμμομοριακός όγκος όπως αυτός προκύπτει από την ομογραφική καμπύλη (Εξίσωση 5.1). Στη δεύτερη σειρά μετρήσεων (Lab c) παρουσιάζεται η καμπύλη της ισοθερμοκρασιακής συμπίεστότητας όπως αυτή προκύπτει από την Εξίσωση 4.13, όπου ο όγκος που χρησιμοποιείται είναι ο εξομαλυσμένος γραμμομοριακός όγκος όπως αυτός προκύπτει από την ομογραφική καμπύλη (Εξίσωση 5.1). Στην τρίτη σειρά μετρήσεων (Literature c_m) παρουσιάζονται οι βιβλιογραφικές μετρήσεις της ισοθερμοκρασιακής συμπίεστότητας όπως προκύπτουν από την Εξίσωση 4.12, όπου ο όγκος που χρησιμοποιείται είναι ο εξομαλυσμένος γραμμομοριακός όγκος όπως αυτός προκύπτει από την ομογραφική καμπύλη (Εξίσωση 5.1). Στην τέταρτη σειρά (Literature c) παρουσιάζεται η καμπύλη της ισοθερμοκρασιακής συμπίεστότητας όπως αυτή προκύπτει από την Εξίσωση 4.13, όπου ο όγκος που χρησιμοποιείται είναι ο εξομαλυσμένος γραμμομοριακός όγκος όπως αυτός προκύπτει από την ομογραφική καμπύλη (Εξίσωση 5.1). Στην πέμπτη σειρά (EOS c) παρουσιάζεται η καμπύλη της ισοθερμοκρασιακής συμπίεστότητας όπως αυτή προκύπτει από την κυβική καταστατική εξίσωση των PR, (Εξίσωση 3.24).

Οι πειραματικές μετρήσεις στα μείγματα δεν συγκρίνονται με βιβλιογραφικές τιμές αλλά μονάχα με τις προβλέψεις της κυβικής καταστατικής εξίσωσης των PR λόγω του ότι δεν είναι διαθέσιμες.

Επίσης σχεδιάστηκαν διαγράμματα $V_m - P$ των πειραματικών τιμών των υγρών υδρογονανθράκων και των μειγμάτων αυτών με την ίδια λογική για τις θερμοκρασίες των πειραμάτων.

Οι μετρήσεις που χρησιμοποιήθηκαν για το σχεδιασμό των παραπάνω διαγραμμάτων ήταν για πιέσεις μεγαλύτερες της πίεσης κορεσμού, δηλαδή στη μονοφασική περιοχή.

Στα διαγράμματα των σφαλμάτων γίνεται σύγκριση των πειραματικών τιμών με τις βιβλιογραφικές τιμές, όπου είναι διαθέσιμες, και με τις προβλέψεις της καταστατικής εξίσωσης των PR. Χρησιμοποιήθηκαν οι γραμμές σφάλματος (error bars) οι οποίες έχουν εύρος $\pm 2\sigma$, όπου σ είναι η τυπική απόκλιση.

Προτιμήθηκε να αναλυθούν οι μετρήσεις σε διάγραμμα $V_m - P$ αντί σε $Z - P$ διότι ο συντελεστής απόκλισης (Z) δεν αναδεικνύει καθαρά τα σφάλματα των μετρήσεων του όγκου. Συγκεκριμένα, το συνολικό εύρος της κλίμακας του Z δεν επιτρέπει την ανάδειξη των απλών σφαλμάτων στις χαμηλές πιέσεις όπως φαίνεται και παρακάτω:

$$Z = \frac{p}{RT} V_m \quad (5.4)$$

όπου Z είναι η θεωρητική τιμή του συντελεστή απόκλισης χωρίς να εμπεριέχει σφάλμα στη μέτρηση του γραμμομοριακού όγκου.

$$Z' = \frac{p}{RT} (V_m + \Delta V_m) \quad (5.5)$$

όπου Z' είναι η πειραματική τιμή του συντελεστή απόκλισης που εμπεριέχει σφάλμα στη μέτρηση του γραμμομοριακού όγκου (ΔV_m).

Έτσι προκύπτει:

$$Z' = \frac{pV_m}{RT} + \frac{p\Delta V_m}{RT} \quad (5.6)$$

$$Z' = Z + \frac{\Delta V_m}{RT} p \quad (5.7)$$

Με βάση τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι το σφάλμα της μέτρησης του γραμμομοριακού όγκου αναδεικνύεται μόνο όταν η πίεση είναι μεγάλη διαφορετικά όχι.

Στη θέση του Z χρησιμοποιήθηκε το V_m το οποίο βοηθά στην ανάδειξη των τυχόν σφαλμάτων στις τιμές του γραμμομοριακού όγκου.

Στα διαγράμματα $V_m - P$ και $c - P$ χρησιμοποιήθηκε κοινή κλίμακα για τις τρεις θερμοκρασίες των πειραμάτων και την ανάδειξη της μεταβολής τόσο του V_m όσο και του c κατά την αύξηση της θερμοκρασίας.

5.2 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΕ ΜΟΝΟΣΥΣΤΑΤΙΚΑ ΥΓΡΑ

5.2.1 Κανονικό πεντάνιο

Το κανονικό πεντάνιο ανήκει στην ομόλογη σειρά των αλκανίων, είναι δηλαδή άκυκλος κορεσμένος υδρογονάνθρακας ευθείας αλυσίδας, με χημικό τύπο C_5H_{12} .

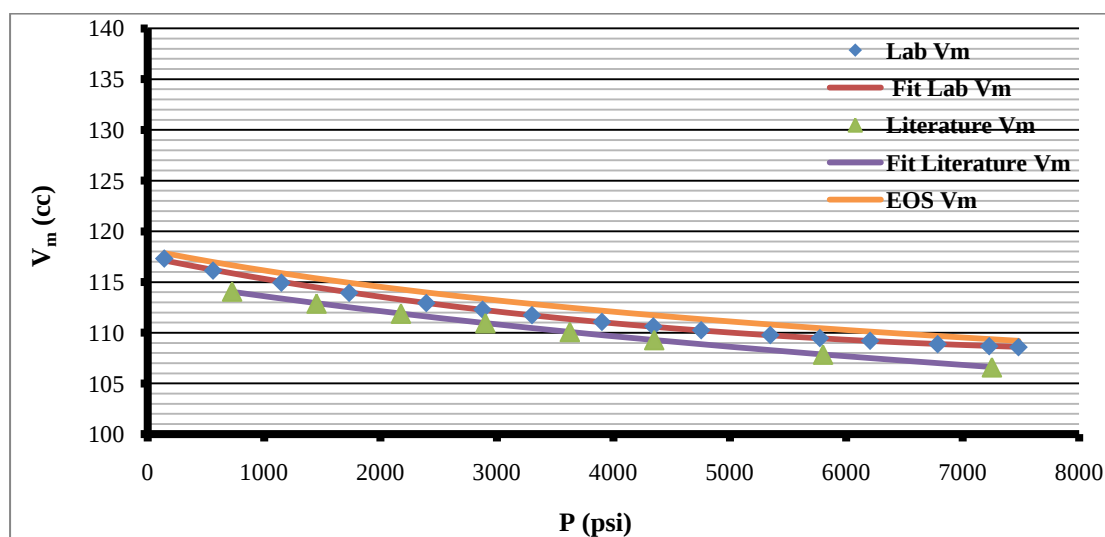
κανονικό πεντάνιο	
Χημικά αναγνωριστικά	
Χημικός τύπος	C_5H_{12}
Μοριακή μάζα	72,15 amu
Σύντομος συντακτικός τύπος	$CH_3(CH_2)_3CH_3$
Φυσικές ιδιότητες	
Σημείο τήξης	-129,7°C
Σημείο βρασμού	36,1°C
Πυκνότητα	626 kg/m ³ (20°C, 1 atm)
Διαλυτότητα στο νερό	40 g/m ³ (20°C)
Ιξώδες	0,240 cP (20°C)
Κρίσιμη πίεση	33,25 atm
Κρίσιμη θερμοκρασία	196,50 °C
Εμφάνιση	Άχρωμο υγρό
Χημικές ιδιότητες	
Ελάχιστη θερμοκρασία ανάφλεξης	-49°C
Σημείο αυτανάφλεξης	296°C
Επικινδυνότητα	
Σταθερότητα	Σταθερό. Ιδιαίτερα εύφλεκτο. Εύκολα διαμορφώνει τα εκρηκτικά μίγματα με τον αέρα.
Προσωπική προστασία	Γυαλιά ασφάλειας. Αποτελεσματικός εξερισμός.
	
Εξαιρετικά εύφλεκτο (F+), Επιβλαβές (Xn), Τοξικό για τους υδρόβιους οργανισμούς (N)	

Πίνακας 5.1: Γενικά χαρακτηριστικά και ιδιότητες του κανονικού πεντανίου

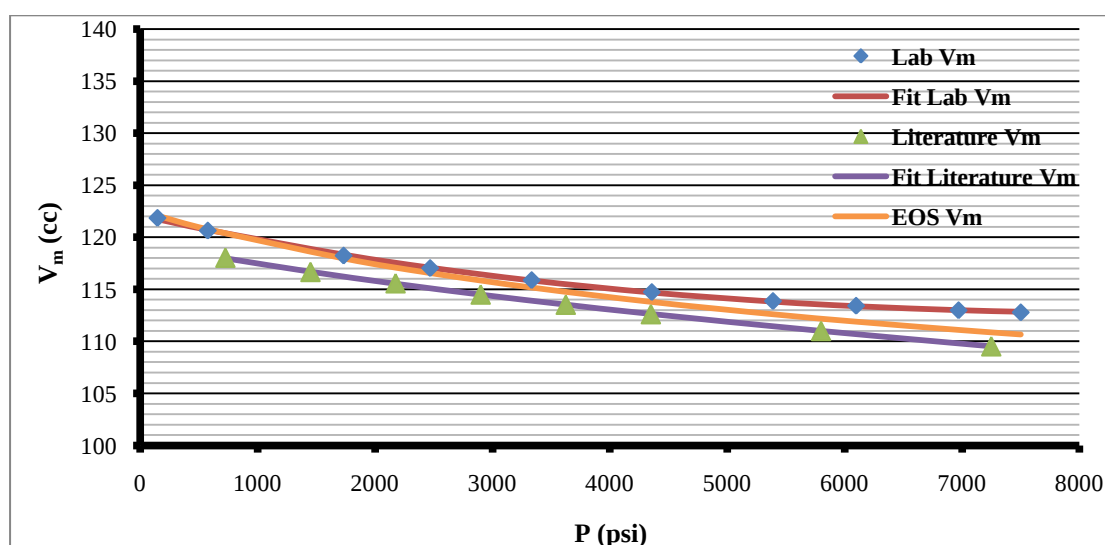
Στα Διαγράμματα 5.1 – 5.3 παρουσιάζονται οι τιμές του γραμμομοριακού όγκου για τις θερμοκρασίες 28°C, 50°C και 90°C. Σε κάθε διάγραμμα παρουσιάζονται οι πειραματικές τιμές, οι βιβλιογραφικές τιμές¹⁸ και οι τιμές που υπολογίζονται με χρήση της κυβικής καταστατικής των Peng-Robinson (PR).

Στο κανονικό πεντάνιο και τα μείγματά του εφαρμόστηκε η τεχνική της προσθετικής διόρθωσης όγκου καταστατικής εξίσωσης (volume translation).

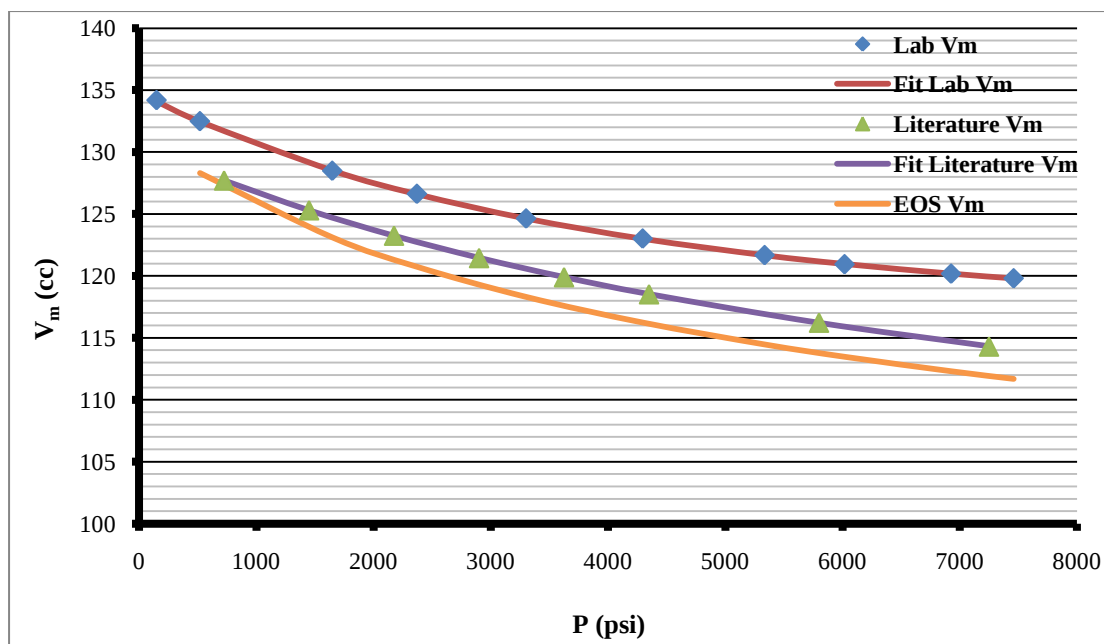
Η διόρθωση που γίνεται στον όγκο της καταστατικής εξίσωσης είναι ανεξάρτητη της πίεσης, εξαρτάται από τη θερμοκρασία και τη σύσταση. Για το κανονικό πεντάνιο υπολογίστηκε ότι η διόρθωση που πρέπει να γίνει στον όγκο για τους 28°C είναι της τάξης των 4,4 cc που αντιστοιχεί σε 3,7% της αρχικής πρόβλεψης της καταστατικής εξίσωσης, για τους 50°C είναι της τάξης των 4,1 cc που αντιστοιχεί σε 3,3% της αρχικής πρόβλεψης της καταστατικής εξίσωσης και για τους 90°C είναι της τάξης των 1,4 cc που αντιστοιχεί σε 1,1% της αρχικής πρόβλεψης της καταστατικής εξίσωσης.



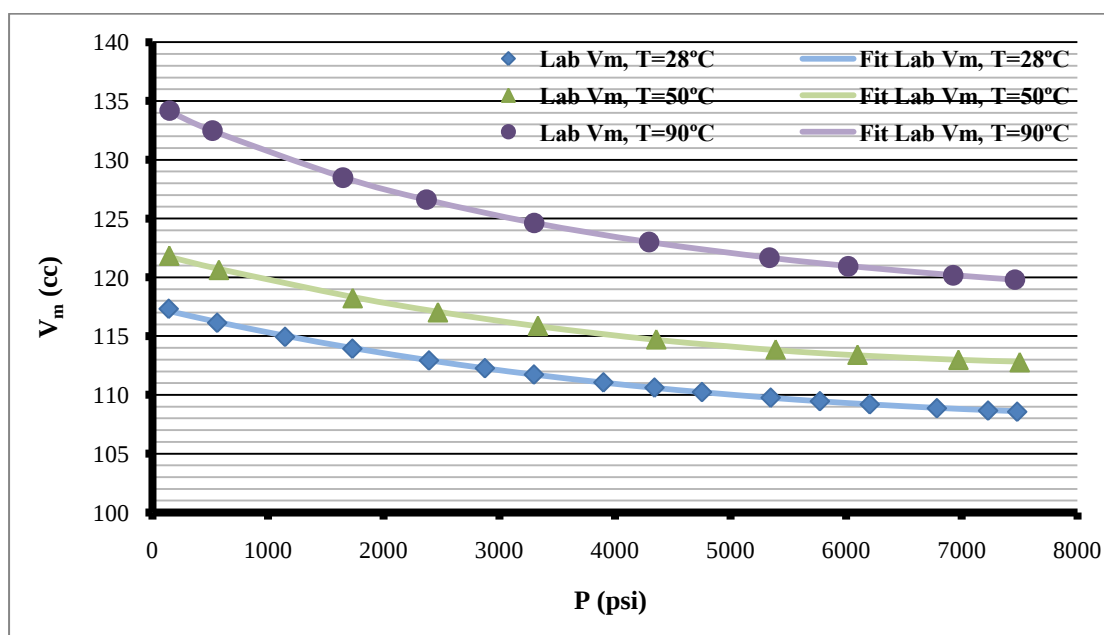
Διάγραμμα 5.1: Γραμμομοριακός όγκος του κανονικού πεντανίου στους 28°C



Διάγραμμα 5.2: Γραμμομοριακός όγκος του κανονικού πεντανίου στους 50°C



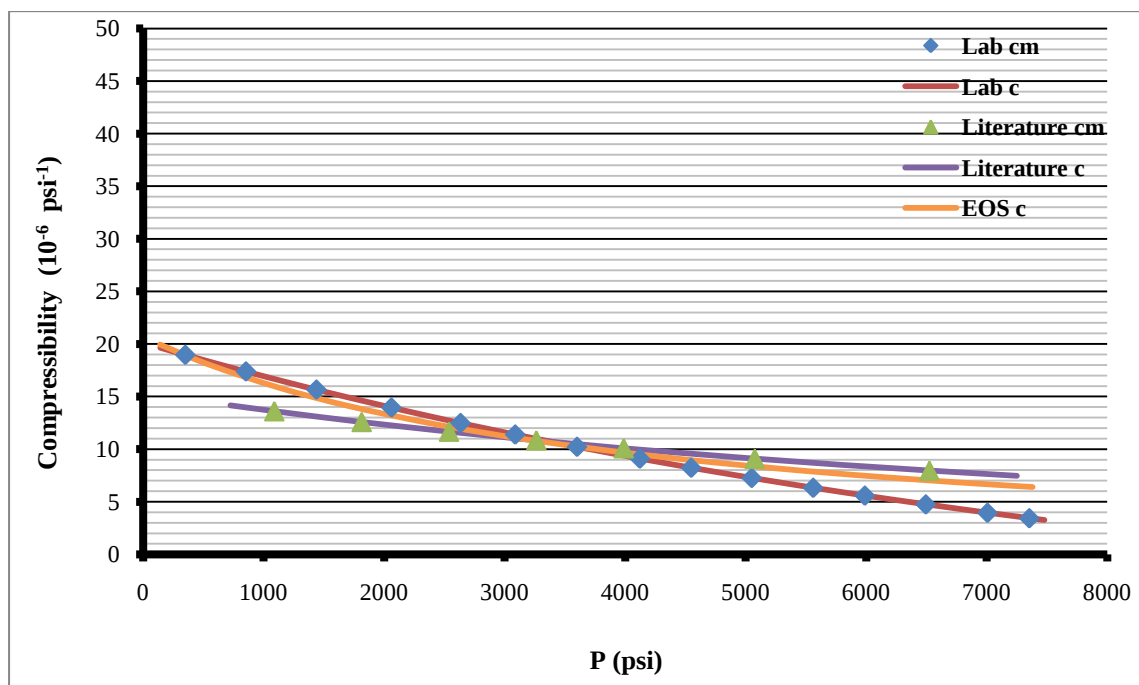
Διάγραμμα 5.3: Γραμμομοριακός όγκος του κανονικού πεντανίου στους 90°C



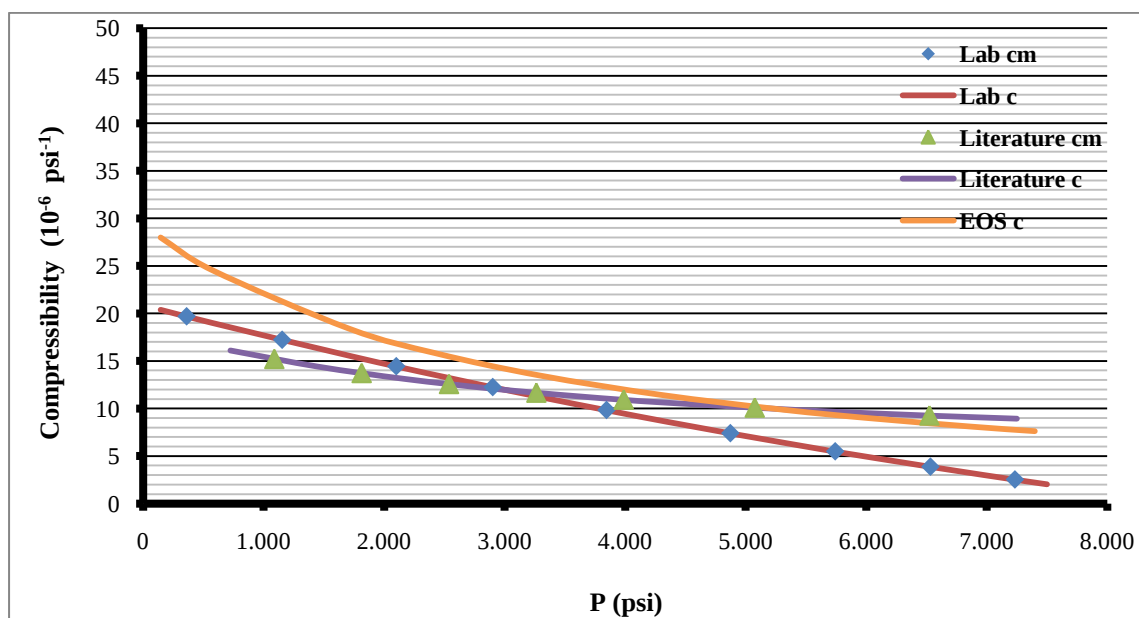
Διάγραμμα 5.4: Γραμμομοριακός όγκος του κανονικού πεντανίου σε διαφορετικές θερμοκρασίες

Στα Διαγράμματα 5.1-5.3 παρατηρείται να αυξάνει η απόκλιση μεταξύ των πειραματικών τιμών και αυτών της βιβλιογραφίας καθώς αυξάνει η πίεση και η θερμοκρασία. Τη μεγαλύτερη απόκλιση παρουσιάζουν οι πειραματικές μετρήσεις και οι προβλέψεις της καταστατικής εξίσωσης των PR στους 90°C.

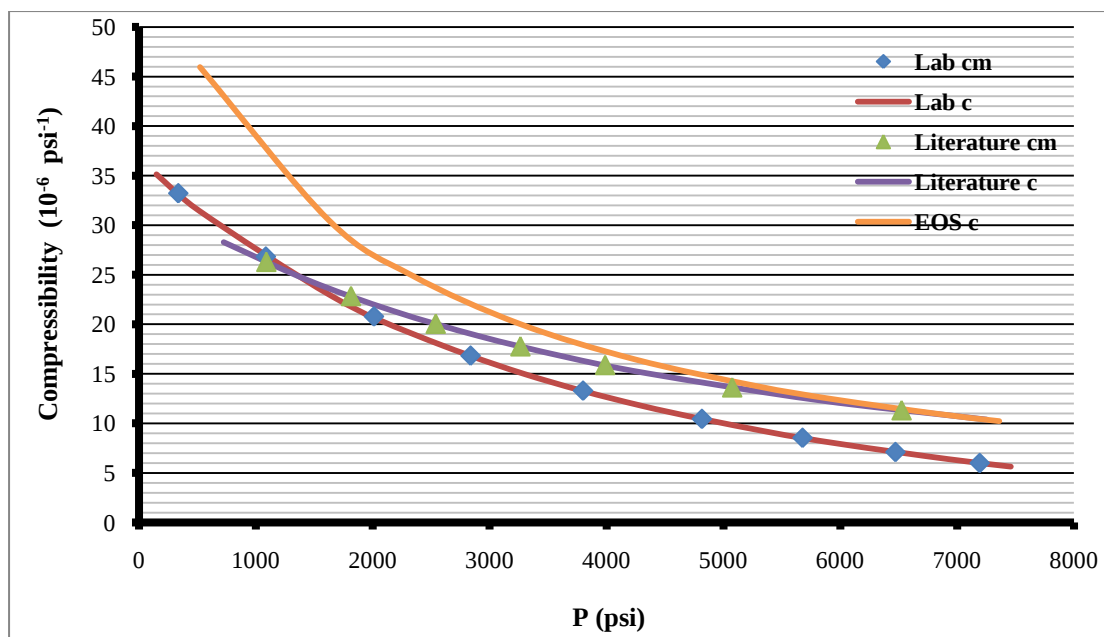
Στα Διαγράμματα 5.5 – 5.7 παρουσιάζονται οι τιμές της ισοθερμοκρασιακής συμπιεστότητας για τις θερμοκρασίες 28°C, 50°C και 90°C. Σε κάθε διάγραμμα παρουσιάζονται οι πειραματικές τιμές, οι βιβλιογραφικές τιμές και οι τιμές που υπολογίζονται με χρήση της κυβικής καταστατικής των Peng-Robinson (PR).



Διάγραμμα 5.5: Ισοθερμοκρασιακή συμπιεστότητα του κανονικού πεντανίου στους 28°C



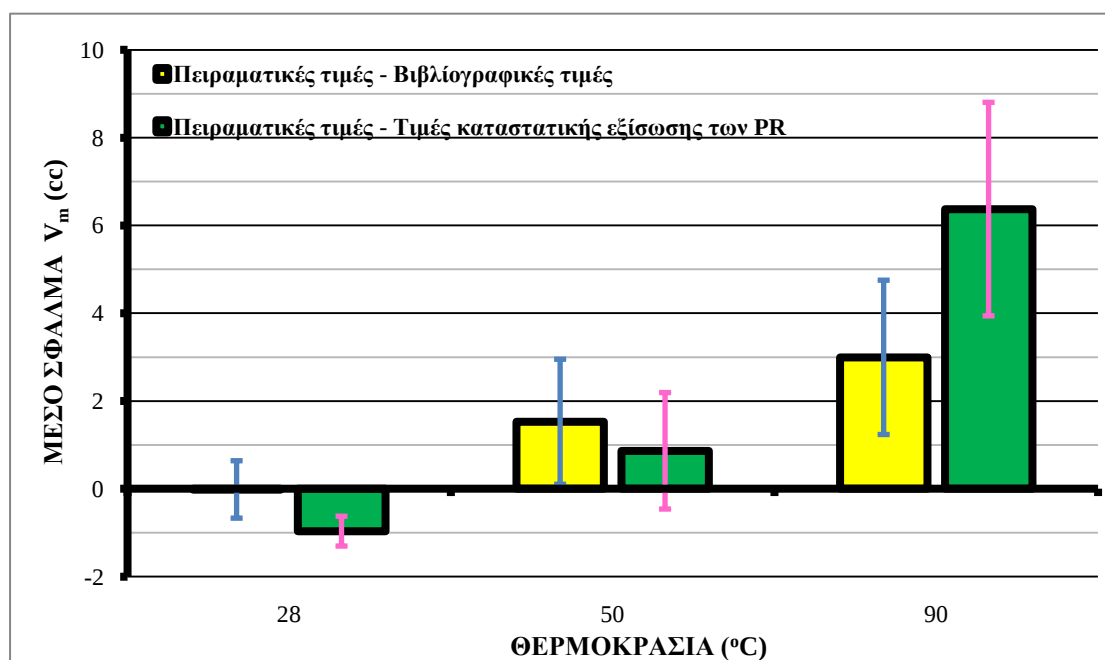
Διάγραμμα 5.6: Ισοθερμοκρασιακή συμπιεστότητα του κανονικού πεντανίου στους 50°C



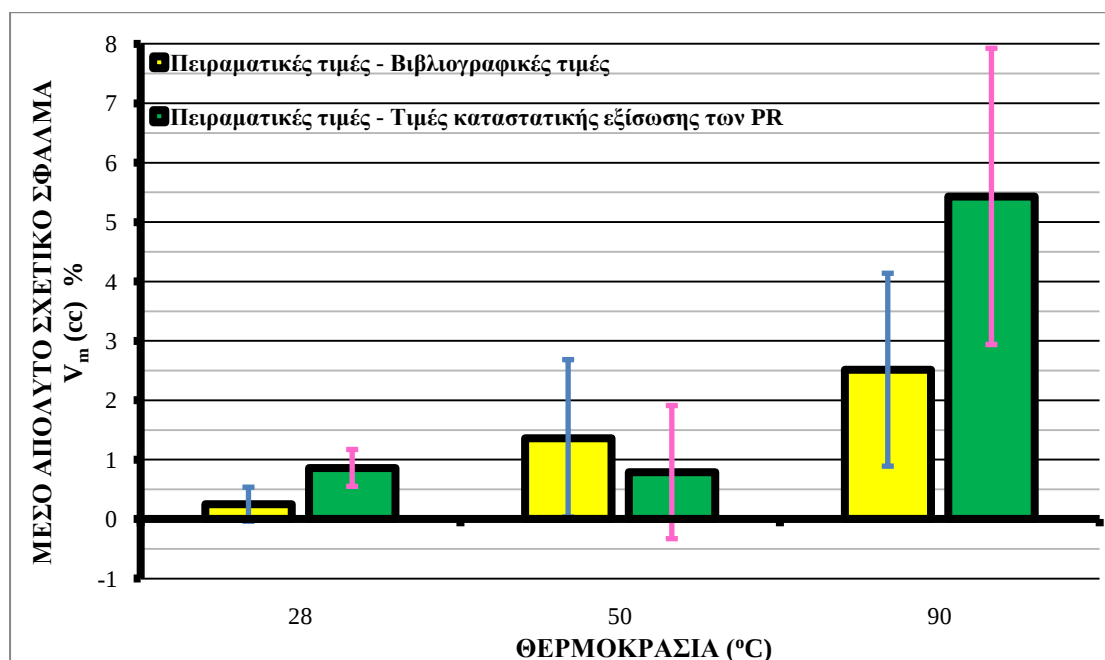
Διάγραμμα 5.7: Ισοθερμοκρασιακή συμπιεστότητα του κανονικού πεντανίου στους 90°C

Στα Διαγράμματα 5.5-5.7 παρατηρείται να αποκλίνουν αισθητά οι πειραματικές τιμές από τις προβλέψεις της καταστατικής εξίσωσης των PR και τις βιβλιογραφικές τιμές καθώς αυξάνει η πίεση και η θερμοκρασία.

Στα Διαγράμματα 5.8 – 5.9 παρουσιάζεται το μέσο σφάλμα και το μέσο απόλυτο σχετικό σφάλμα του γραμμομοριακού όγκου μεταξύ των πειραματικών και βιβλιογραφικών τιμών καθώς και των πειραματικών τιμών και των τιμών που υπολογίζονται από την καταστατική εξίσωση των Peng-Robinson αντίστοιχα.

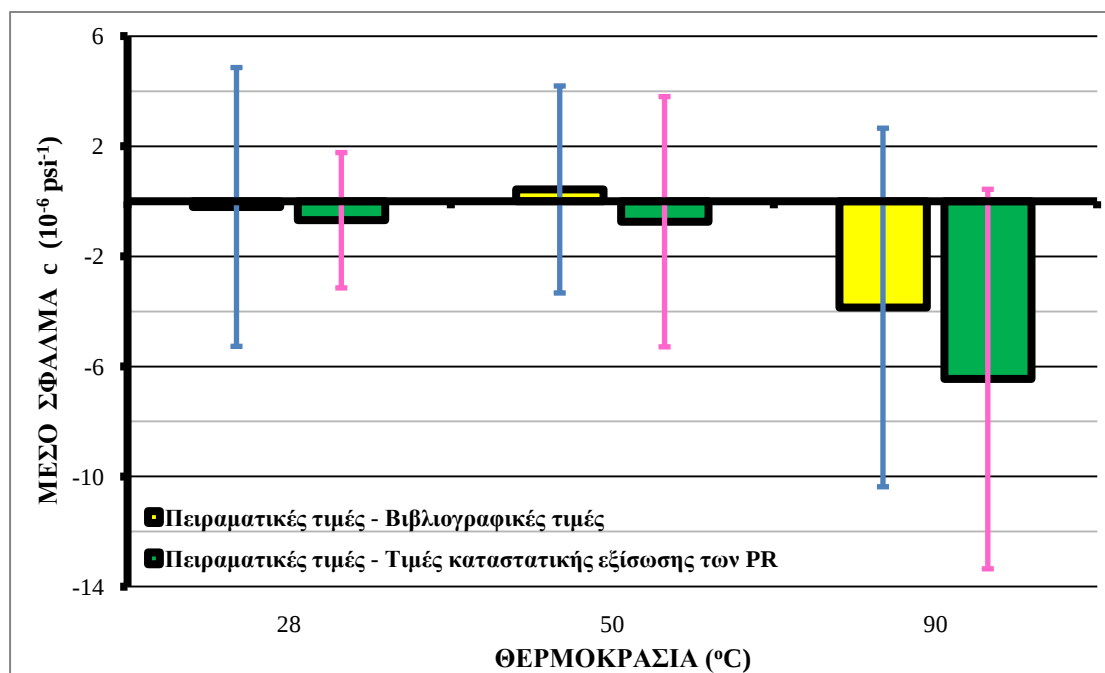


Διάγραμμα 5.8: Μέσο σφάλμα μέτρησης των πειραματικών τιμών του γραμμομοριακού όγκου του κανονικού πεντανίου ως προς αυτόν της βιβλιογραφίας και της καταστατικής εξίσωσης των PR για τις θερμοκρασίες των πειραμάτων

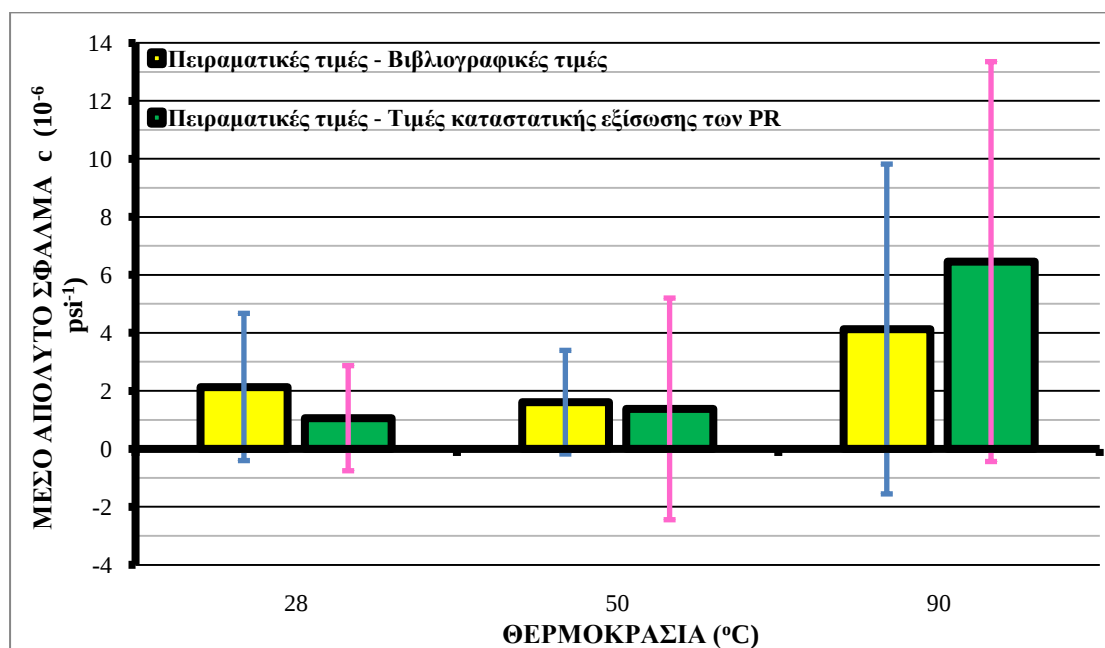


Διάγραμμα 5.9: Μέσο απόλυτο σχετικό σφάλμα μέτρησης των πειραματικών τιμών του γραμμομοριακού όγκου του κανονικού πεντανίου ως προς αυτόν της βιβλιογραφίας και της καταστατικής εξίσωσης των PR για τις θερμοκρασίες των πειραμάτων

Στα Διαγράμματα 5.10 – 5.11 παρουσιάζεται το μέσο σφάλμα και το μέσο απόλυτο σφάλμα της ισοθερμοκρασιακής συμπεστότητας των πειραματικών και βιβλιογραφικών τιμών καθώς και των πειραματικών τιμών και των τιμών που υπολογίζονται από την καταστατική εξίσωση των Peng-Robinson αντίστοιχα.



Διάγραμμα 5.10: Μέσο σφάλμα μέτρησης των πειραματικών τιμών της ισοθερμοκρασιακής συμπεστότητας του κανονικού πεντανίου ως προς αυτόν της βιβλιογραφίας και της καταστατικής εξίσωσης των PR για τις θερμοκρασίες των πειραμάτων



Διάγραμμα 5.11: Μέσο απόλυτο σφάλμα μέτρησης των πειραματικών τιμών της ισοθερμοκρασιακής συμπεστότητας του κανονικού πεντανίου ως προς αυτόν της βιβλιογραφίας και της καταστατικής εξίσωσης των PR για τις θερμοκρασίες των πειραμάτων

5.2.2 Τολουένιο

Το υγρό ανήκει στους αρωματικούς υδρογονάνθρακες, έχει χημικό τύπο C_7H_8 και είναι δυσδιάλυτο στο νερό, με έντονη οσμή. Χρησιμοποιείται ευρύτατα από τη βιομηχανία ως διαλύτης και ως πρώτη ύλη για παράγωγα. Αποφεύγεται η χρήση του ως προσθετικό ενισχυτικό βενζίνης γιατί είναι γνωστό καρκινογόνο και ιδιαίτερα τοξικό, ιδιαίτερα στο νευρικό σύστημα.

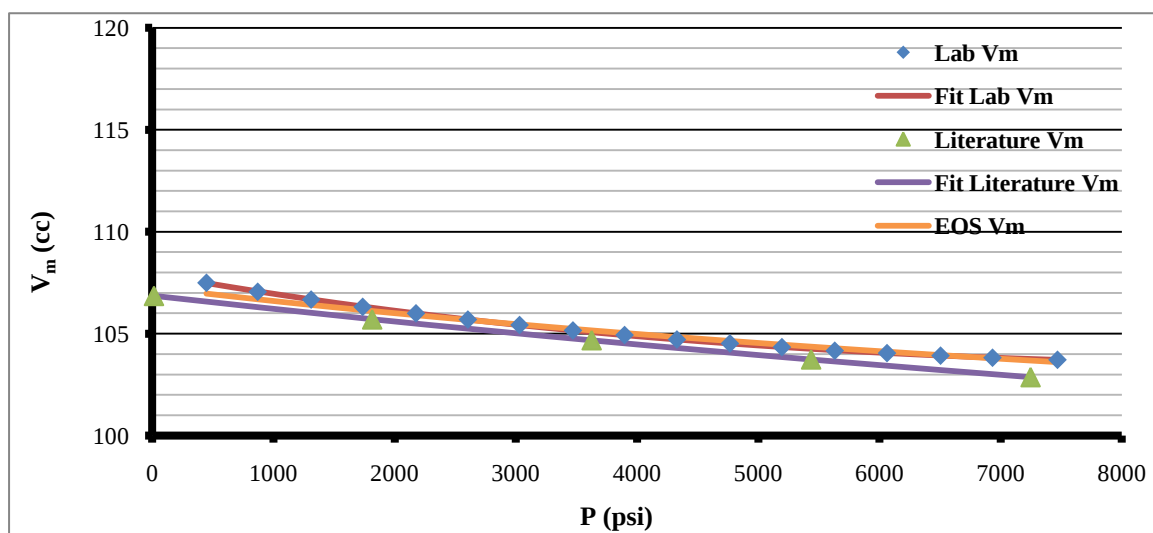
τολουένιο	
Χημικά αναγνωριστικά	
Χημικός τύπος	C_7H_8
Μοριακή μάζα	92,14 amu
Φυσικές ιδιότητες	
Σημείο τήξης	-93°C
Σημείο βρασμού	110,6°C
Πυκνότητα	866,9 kg/m ³
Διαλυτότητα στο νερό	0,47 kg/m ³ (20-25°C)
Ιξώδες	0,590 cP (20°C)
Διπολική ροπή	0,36 D
Κρίσιμη πίεση	4,109 MPa
Κρίσιμη θερμοκρασία	318,64 °C
Εμφάνιση	Άχρωμο υγρό
Χημικές ιδιότητες	
Σημείο ανάφλεξης	4°C
Σημείο αυτανάφλεξης	536 °C
Επικινδυνότητα	
Σταθερότητα	Σταθερό. Ιδιαίτερα εύφλεκτο. Υγροσκοπικό.
Προσωπική προστασία	Γυαλιά ασφάλειας. Αποτελεσματικός εξαερισμός.
 	Πολύ Εύφλεκτο (F),
	Τοξικό (T)

Πίνακας 5.2: Γενικά χαρακτηριστικά και ιδιότητες του τολουενίου

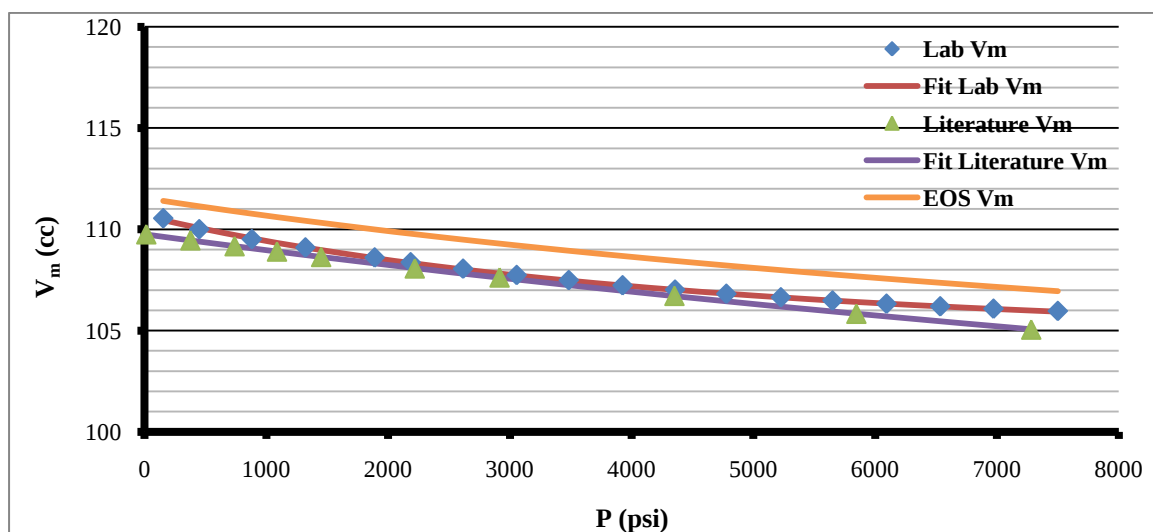
Στα Διαγράμματα 5.12 – 5.14 παρουσιάζονται οι τιμές του γραμμομοριακού όγκου για τις θερμοκρασίες 28°C, 50°C και 90°C. Σε κάθε διάγραμμα παρουσιάζονται οι πειραματικές τιμές, οι βιβλιογραφικές τιμές^{19,20} και οι τιμές που υπολογίζονται με χρήση της κυβικής καταστατικής των Peng-Robinson (PR).

Στο τολουένιο και τα μείγματά του εφαρμόστηκε η τεχνική της προσθετικής διόρθωσης όγκου καταστατικής εξίσωσης (volume translation).

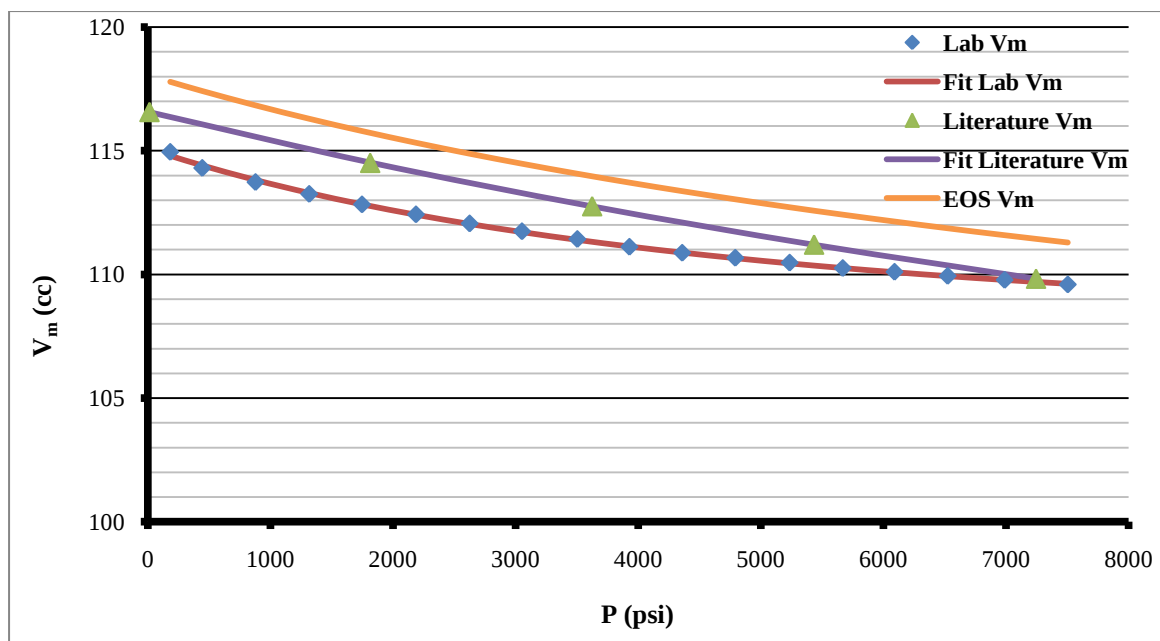
Η διόρθωση που γίνεται στον όγκο της καταστατικής εξίσωσης είναι ανεξάρτητη της πίεσης, εξαρτάται από τη θερμοκρασία και τη σύσταση. Για το τολουένιο υπολογίστηκε ότι η διόρθωση που πρέπει να γίνει στον όγκο για τους 28°C είναι της τάξης των 1,4 cc που αντιστοιχεί σε 1,3% της αρχικής πρόβλεψης της καταστατικής εξίσωσης, για τους 50°C είναι της τάξης των 3,5 cc που αντιστοιχεί σε 3,1% της αρχικής πρόβλεψης της καταστατικής εξίσωσης και για τους 90°C είναι της τάξης των 5,3 cc που αντιστοιχεί σε 4,5% της αρχικής πρόβλεψης της καταστατικής εξίσωσης.



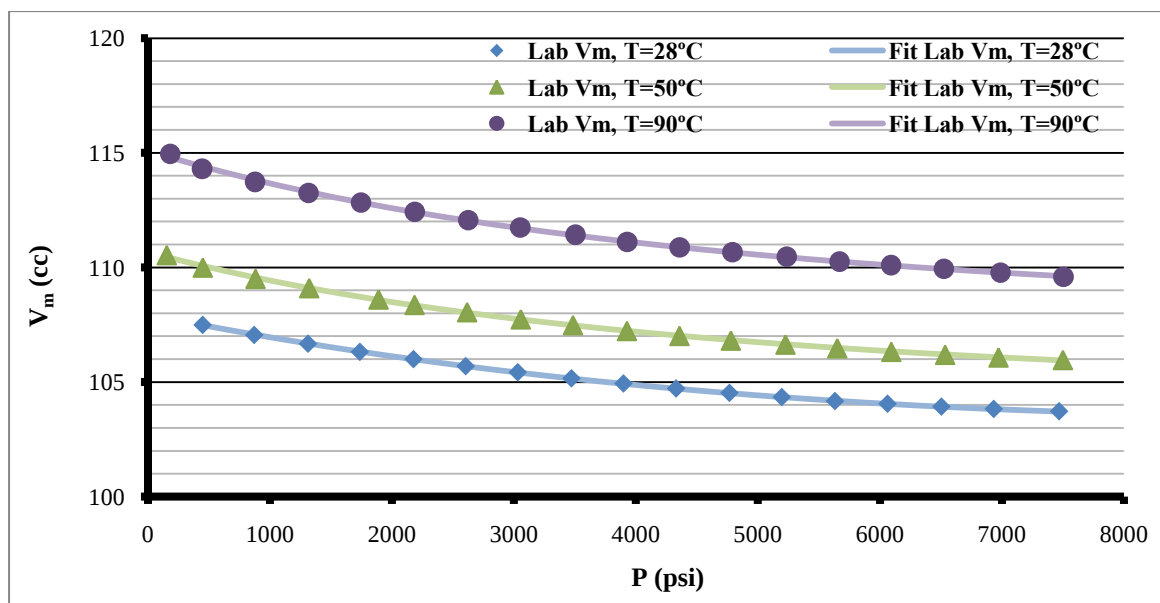
Διάγραμμα 5.12: Γραμμομοριακός όγκος του τολουενίου στους 28°C



Διάγραμμα 5.13: Γραμμομοριακός όγκος του τολουενίου στους 50°C



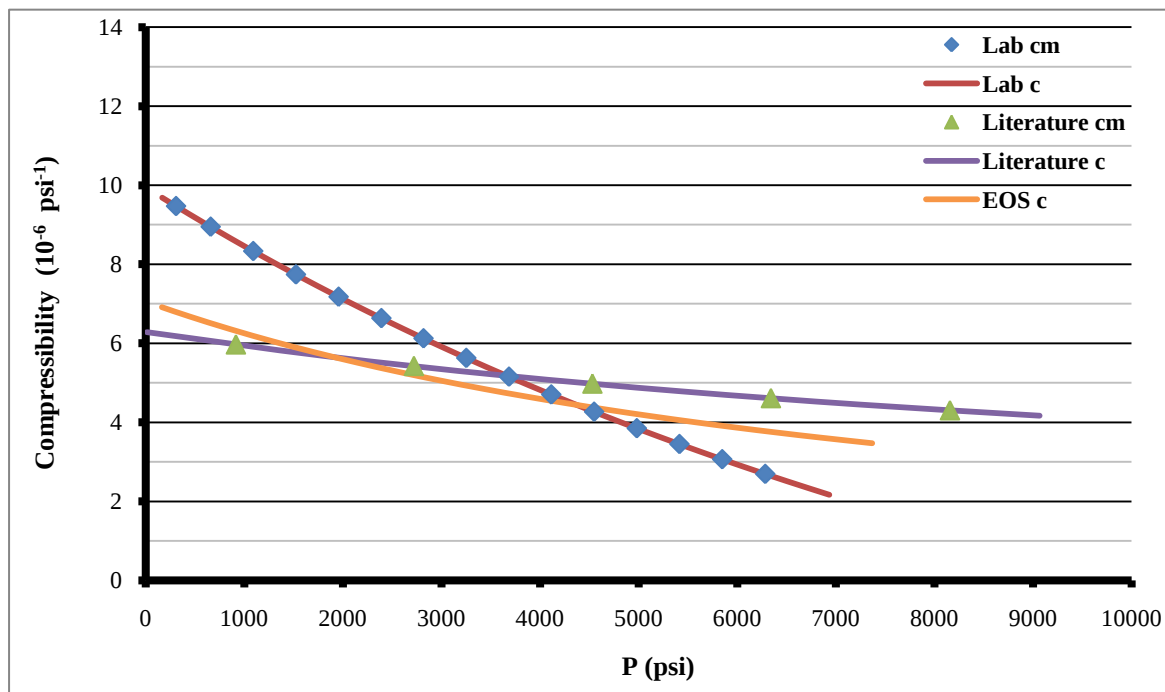
Διάγραμμα 5.14: Γραμμομοριακός όγκος του τολουενίου στους 90°C



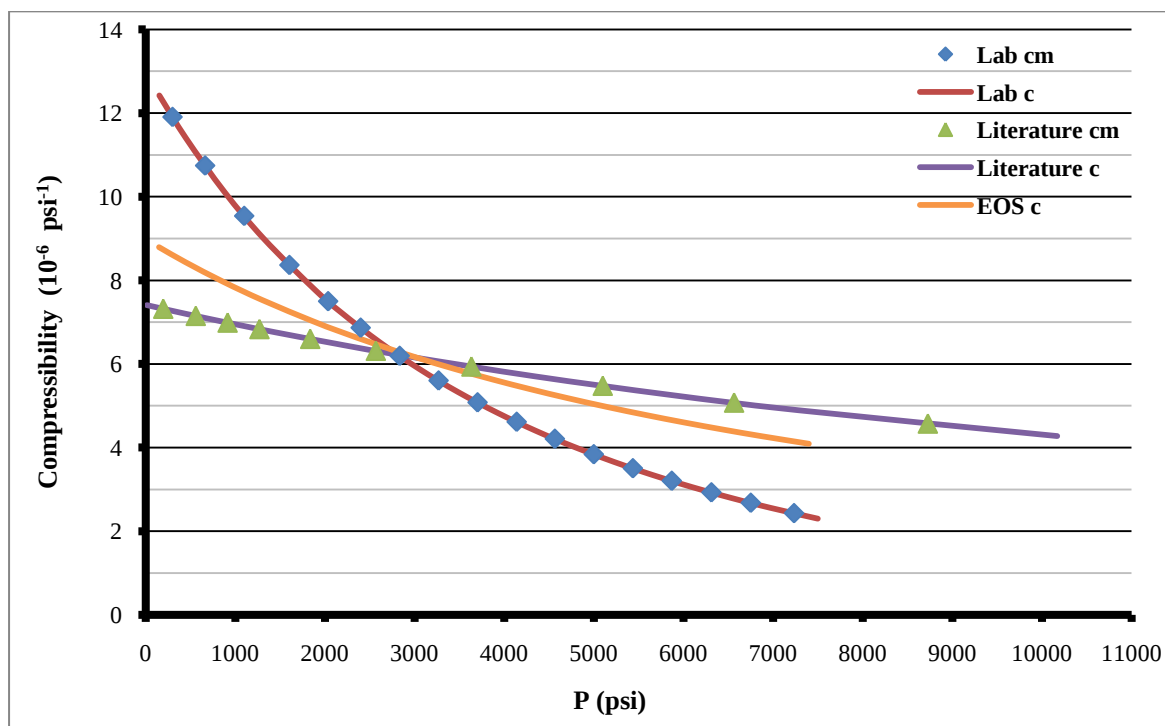
Διάγραμμα 5.15: Γραμμομοριακός όγκος του τολουενίου για διαφορετικές θερμοκρασίες

Στα Διαγράμματα 5.12-5.14 παρατηρείται ότι η μέγιστη απόκλιση μεταξύ των καμπυλών παρατηρείται στη μέγιστη θερμοκρασία. Παρατηρείται ότι οι προβλέψεις της καταστατικής εξίσωσης των PR με την αύξηση της θερμοκρασία μετατοπίζονται προς τα πάνω έχοντας μεγάλη απόκλιση από τις πειραματικές τιμές.

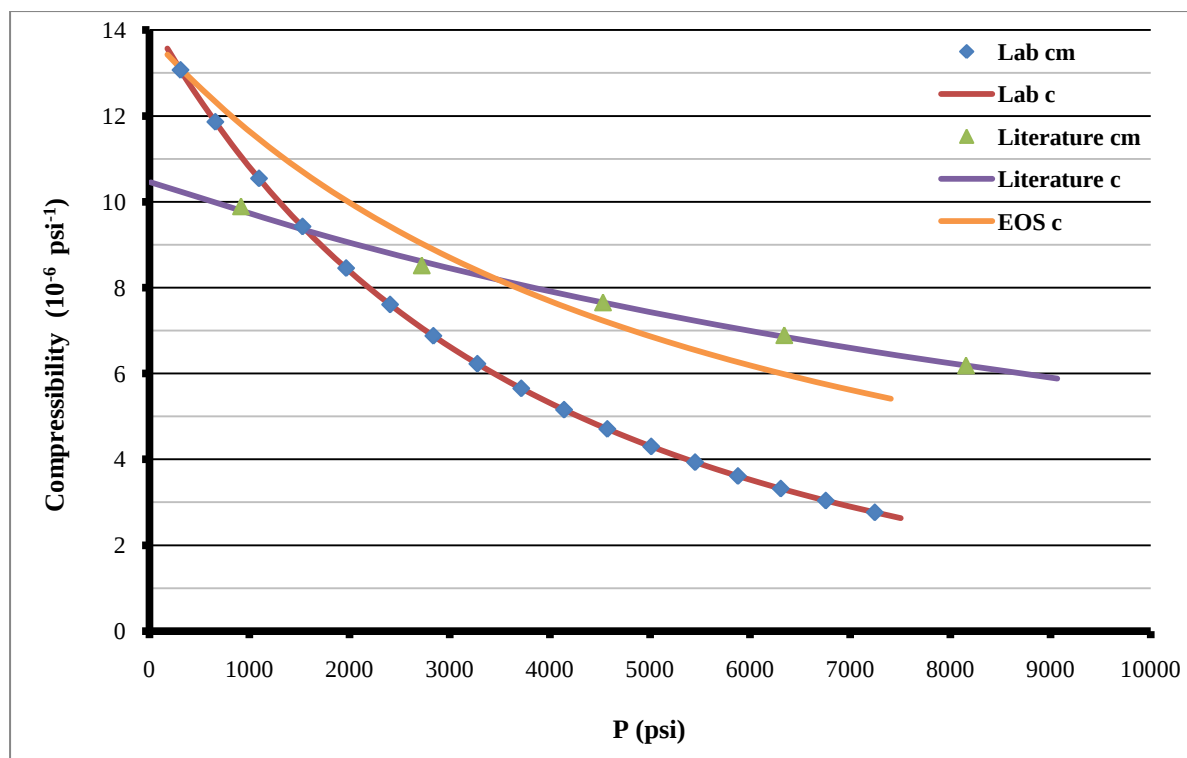
Στα Διαγράμματα 5.16 – 5.18 παρουσιάζονται οι τιμές της ισοθερμοκρασιακής συμπιεστότητας για τις θερμοκρασίες 28°C, 50°C και 90°C. Σε κάθε διάγραμμα παρουσιάζονται οι πειραματικές τιμές, οι βιβλιογραφικές τιμές και οι τιμές που υπολογίζονται με χρήση της κυβικής καταστατικής των Peng-Robinson (PR).



Διάγραμμα 5.16: Ισοθερμοκρασιακή συμπιεστότητα του τολουενίου στους 28°C



Διάγραμμα 5.17: Ισοθερμοκρασιακή συμπιεστότητα του τολουενίου στους 50°C

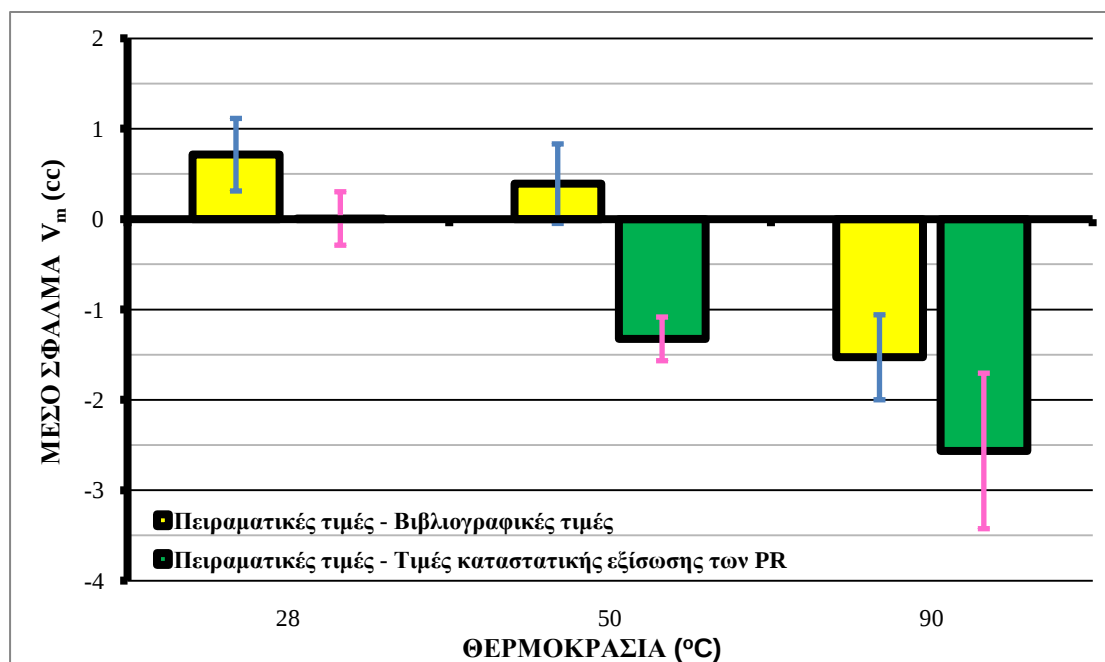


Διάγραμμα 5.18: Ισοθερμοκρασιακή συμπιεστότητα του τολουενίου στους 90°C

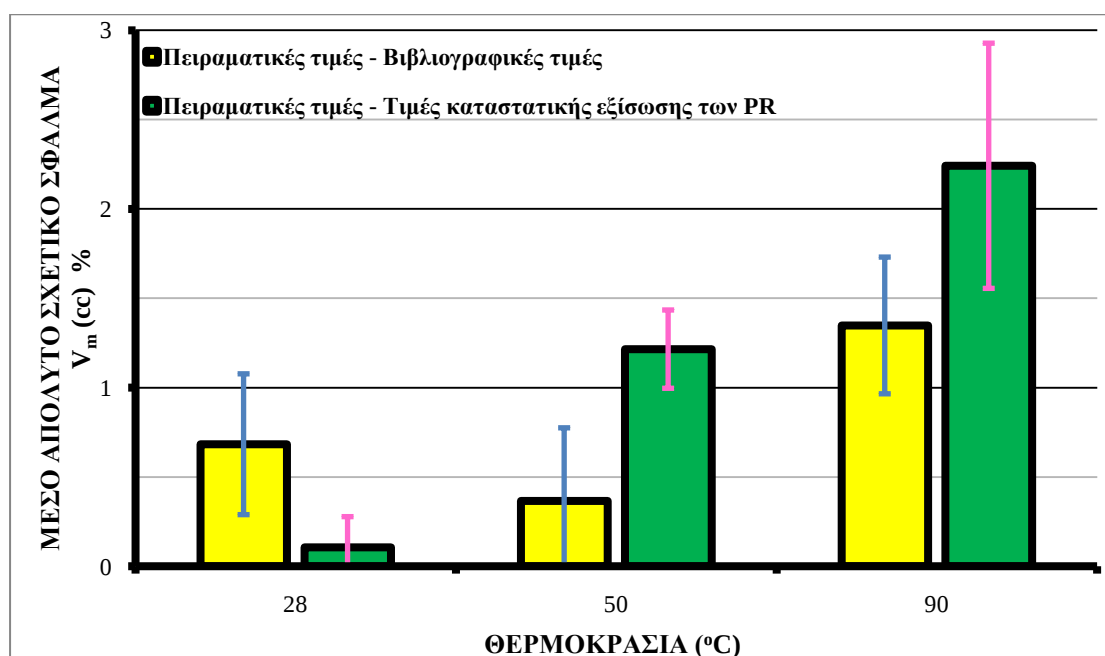
Στα Διαγράμματα 5.16-5.18 παρατηρείται η καμπύλη των πειραματικών τιμών να παρουσιάζει αυξημένη κλίση σε σύγκριση με τις άλλες δυο καμπύλες κάτι που γίνεται εντονότερο με την αύξηση της πίεσης και της θερμοκρασίας. Είναι αναμενόμενο να περιμένουμε τις μικρότερες τιμές του συντελεστή ισοθερμοκρασιακής συμπιεστότητας στο τολουένιο διότι είναι το πιο βαρύ (μεγαλύτερη πυκνότητα) από τους τρεις υγρούς υδρογονάνθρακες που χρησιμοποιήθηκαν για τις πειραματικές μετρήσεις.

Το τολουένιο έχοντας μεγάλη πυκνότητα, στις υψηλές πιέσεις συμπιέζεται ελάχιστα, έτσι το νερό που εισπνέει η αντλία στις συνθήκες του πειράματος είναι λιγότερο από 0,5 cc με αποτέλεσμα να αυξάνονται τα σφάλματα στην εύρεση του όγκου του ρευστού και κατά συνέπεια και στο συντελεστή ισοθερμοκρασιακής συμπιεστότητας.

Στα Διαγράμματα 5.19 – 5.20 παρουσιάζεται το μέσο σφάλμα και το μέσο απόλυτο σχετικό σφάλμα του γραμμομοριακού όγκου μεταξύ των πειραματικών και βιβλιογραφικών τιμών καθώς και των πειραματικών τιμών και των τιμών που υπολογίζονται από την καταστατική εξίσωση των Peng-Robinson αντίστοιχα.

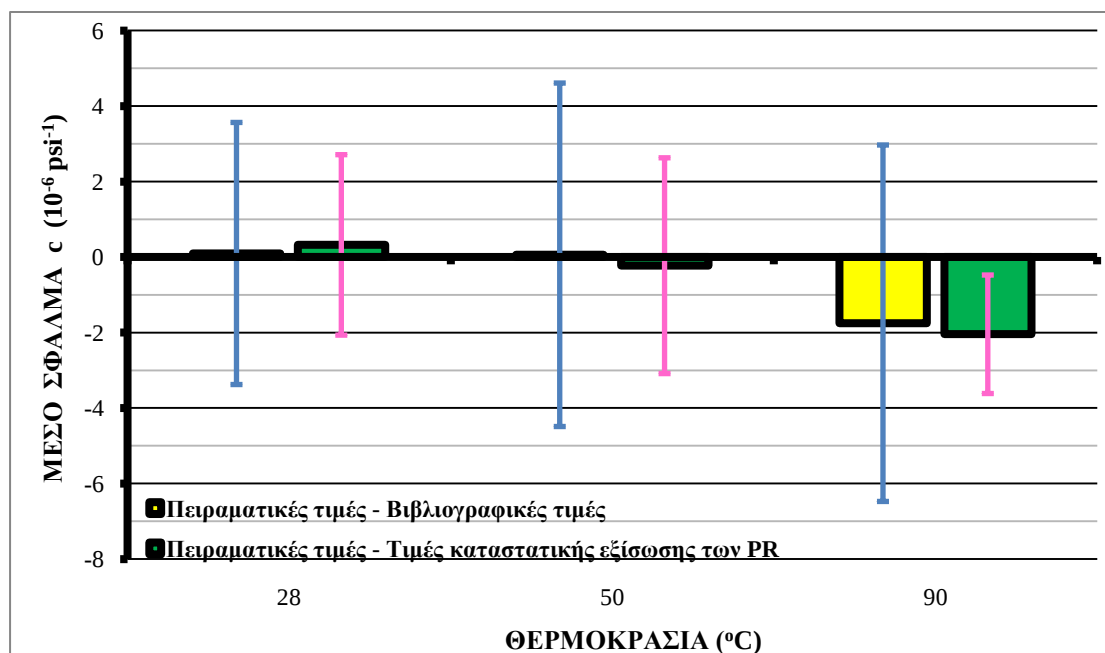


Διάγραμμα 5.19: Μέσο σφάλμα μέτρησης των πειραματικών τιμών του γραμμομοριακού όγκου του τολουενίου ως προς αυτόν της βιβλιογραφίας και της καταστατικής εξίσωσης των PR για τις θερμοκρασίες των πειραμάτων

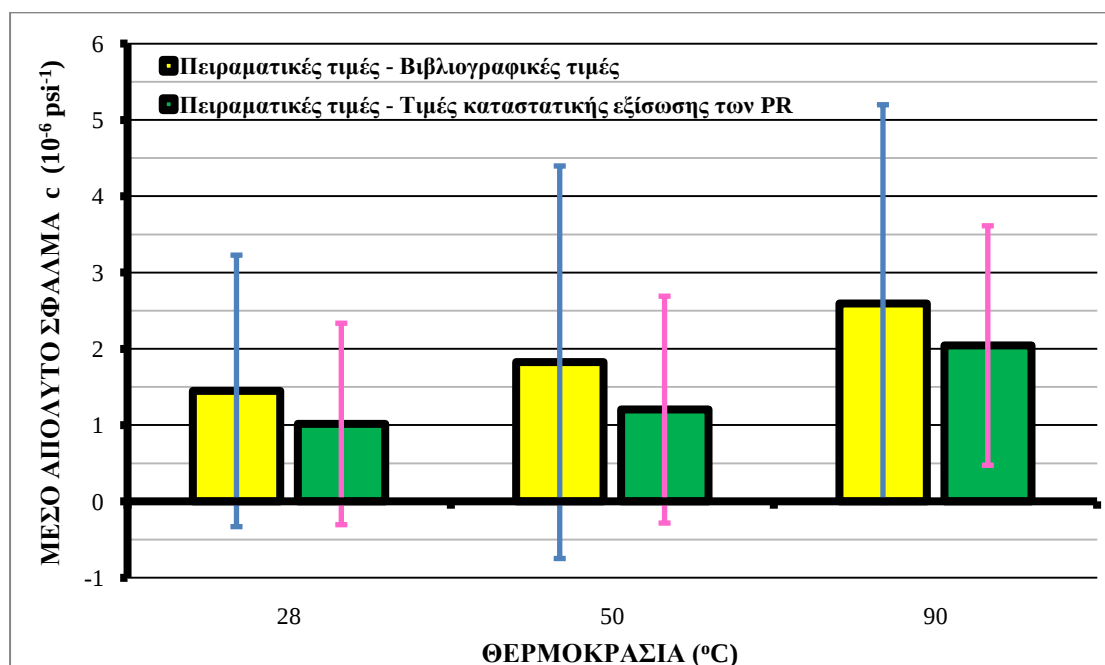


Διάγραμμα 5.20: Μέσο απόλυτο σχετικό σφάλμα μέτρησης των πειραματικών τιμών του γραμμομοριακού όγκου του τολουενίου ως προς αυτόν της βιβλιογραφίας και της καταστατικής εξίσωσης των PR για τις θερμοκρασίες των πειραμάτων

Στα Διαγράμματα 5.21 – 5.22 παρουσιάζεται το μέσο σφάλμα και το μέσο απόλυτο σφάλμα της ισοθερμοκρασιακής συμπιεστότητας των πειραματικών και βιβλιογραφικών τιμών καθώς και των πειραματικών τιμών και των τιμών που υπολογίζονται από την καταστατική εξίσωση των Peng-Robinson αντίστοιχα.



Διάγραμμα 5.21: Μέσο σφάλμα μέτρησης των πειραματικών τιμών της ισοθερμοκρασιακής συμπιεστότητας του τολουενίου ως προς αυτόν της βιβλιογραφίας και της καταστατικής εξίσωσης των PR για τις θερμοκρασίες των πειραμάτων



Διάγραμμα 5.22: Μέσο απόλυτο σφάλμα μέτρησης των πειραματικών τιμών της ισοθερμοκρασιακής συμπιεστότητας του τολουενίου ως προς αυτόν της βιβλιογραφίας και της καταστατικής εξίσωσης των PR για τις θερμοκρασίες των πειραμάτων

5.2.3 Κυκλοεξάνιο

Το κυκλοεξάνιο είναι κυκλοαλκάνιο με χημικό τύπο C_6H_{12} ανήκει στους ναφθενικούς υδρογονάνθρακες. Σε βιομηχανική κλίμακα το κυκλοεξάνιο παράγεται με την αντίδραση βενζόλιο με υδρογόνο.

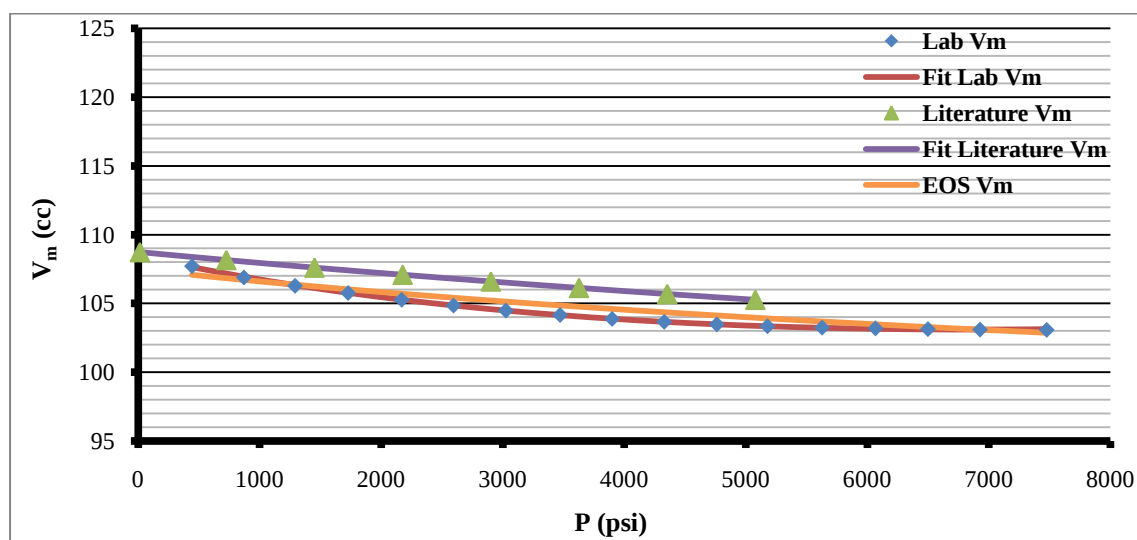
κυκλοεξάνιο	
Χημικά αναγνωριστικά	
Χημικός τύπος	C_6H_{12}
Μοριακή μάζα	84,16 amu
Φυσικές ιδιότητες	
Σημείο τήξης	6,5 °C
Σημείο βρασμού	80,74 °C
Πυκνότητα	0,779 g/ml
Διαλυτότητα στο νερό	ανεπίδεκτο σύμμιξης
Ιξώδες	1,02 cP (17 °C)
Κρίσιμη πίεση	4070 hPa
Κρίσιμη θερμοκρασία	281 °C
Εμφάνιση	Άχρωμο υγρό
Χημικές ιδιότητες	
Σημείο ανάφλεξης	-20 °C
Σημείο αυτανάφλεξης	260 °C
Επικινδυνότητα	
Σταθερότητα	Σταθερό. Ιδιαίτερα εύφλεκτο. Εύκολα διαμορφώνει τα εκρηκτικά μίγματα με τον αέρα.
Προσωπική προστασία	Γυαλιά ασφάλειας. Αποτελεσματικός εξαερισμός.
	Εύφλεκτος (F),Επιβλαβής (Xn), Επικίνδυνος για το περιβάλλον (N) Το αυστηρό ερεθιστικό ματιών, μπορεί να προκαλέσει την κερατοειδούς κάλυψη

Πίνακας 5.3: Γενικά χαρακτηριστικά και ιδιότητες του κυκλοεξανίου

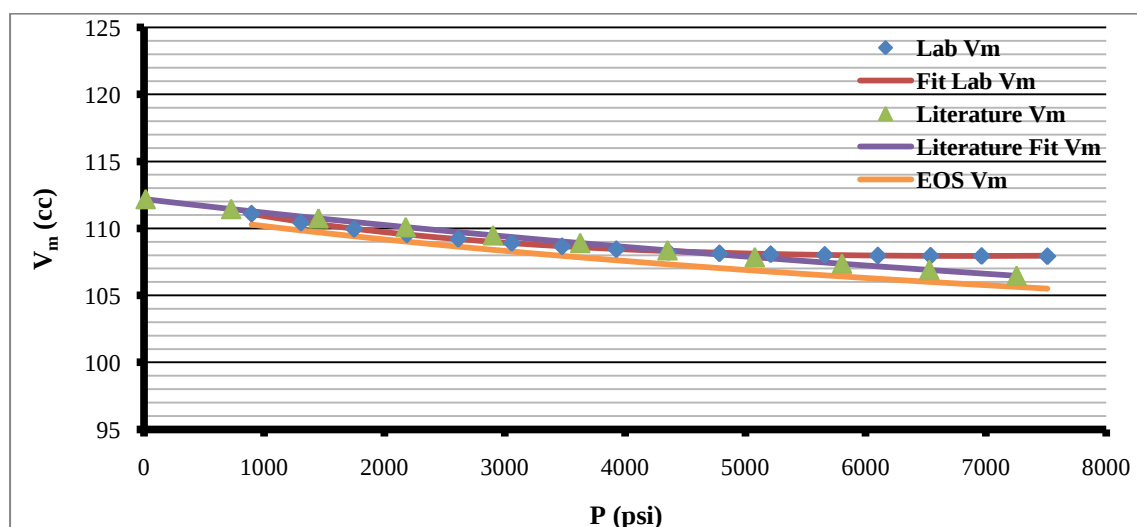
Στα Διαγράμματα 5.23 – 5.25 παρουσιάζονται οι τιμές του γραμμομοριακού όγκου για τις θερμοκρασίες 28°C, 50°C και 90°C. Σε κάθε διάγραμμα παρουσιάζονται οι πειραματικές τιμές, οι βιβλιογραφικές τιμές^{21,22} και οι τιμές που υπολογίζονται με χρήση της κυβικής καταστατικής των Peng-Robinson (PR).

Στο κυκλοεξάνιο και τα μείγματά του εφαρμόστηκε η τεχνική της προσθετικής διόρθωσης όγκου καταστατικής εξίσωσης (volume translation).

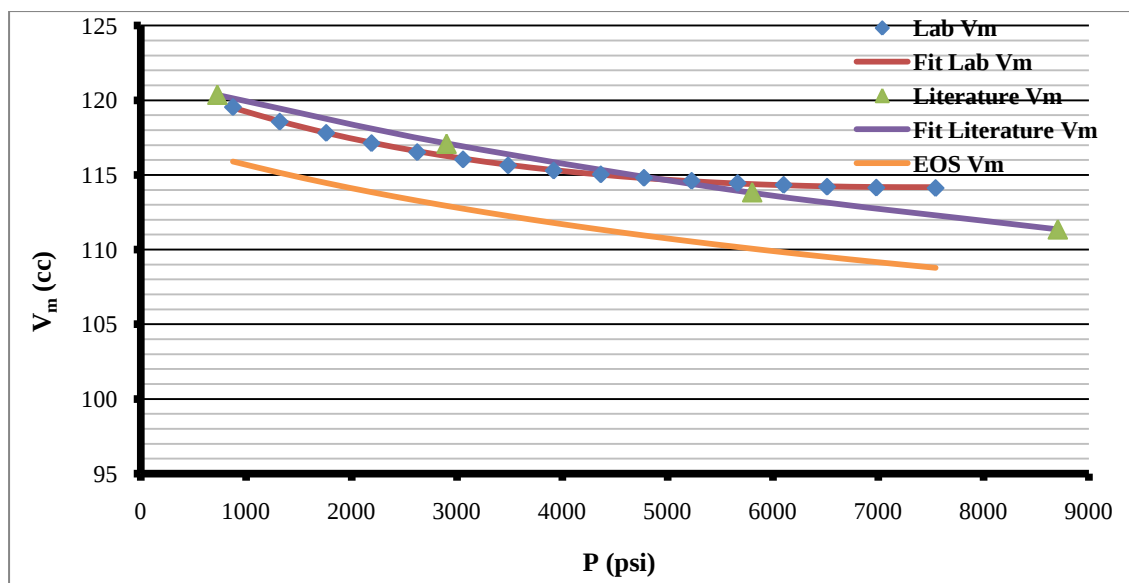
Η διόρθωση που γίνεται στον όγκο της καταστατικής εξίσωσης είναι ανεξάρτητη της πίεσης, εξαρτάται από τη θερμοκρασία και την σύσταση. Για το κυκλοεξάνιο υπολογίστηκε ότι η διόρθωση που πρέπει να γίνει στον όγκο για τους 28°C είναι της τάξης των 4,9 cc που αντιστοιχεί σε 4,5% της αρχικής πρόβλεψης της καταστατικής εξίσωσης, για τους 50°C είναι της τάξης των 6,0 cc που αντιστοιχεί σε 5,6% της αρχικής πρόβλεψης της καταστατικής εξίσωσης και για τους 90°C είναι της τάξης των 6,7 cc που αντιστοιχεί σε 5,7% της αρχικής πρόβλεψης της καταστατικής εξίσωσης.



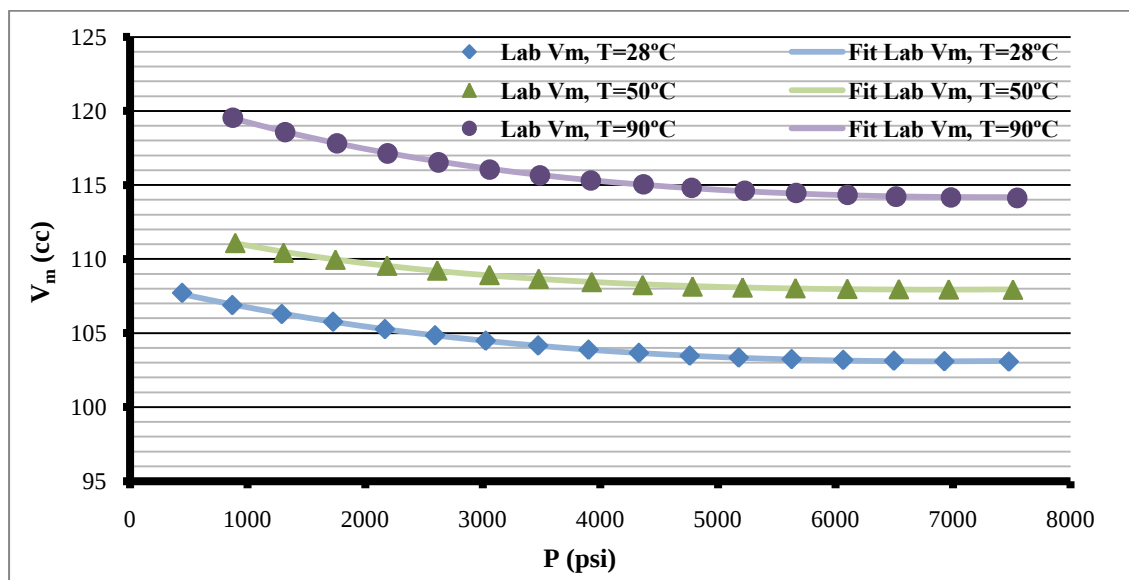
Διάγραμμα 5.23: Γραμμομοριακός όγκος του κυκλοεξανίου στους 28°C



Διάγραμμα 5.24: Γραμμομοριακός όγκος του κυκλοεξανίου στους 50°C



Διάγραμμα 5.25: Γραμμομοριακός όγκος του κυκλοεξανίου στους 90°C

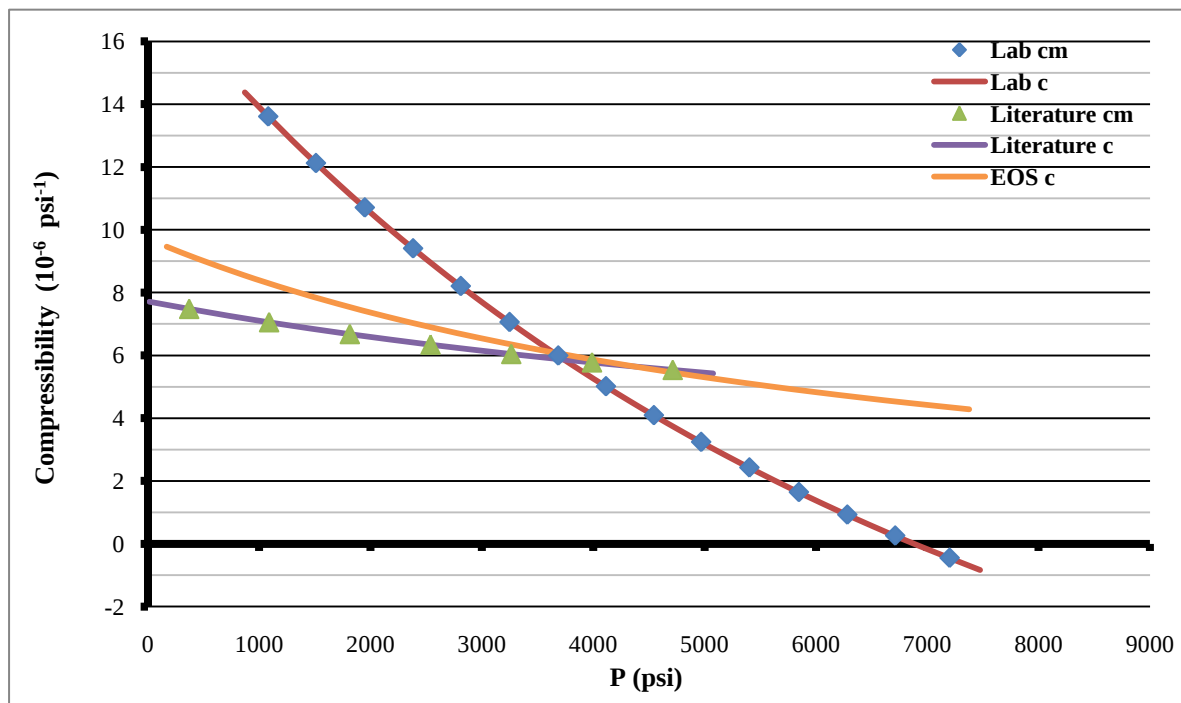


Διάγραμμα 5.26: Γραμμομοριακός όγκος του κυκλοεξανίου σε διαφορετικές θερμοκρασίες

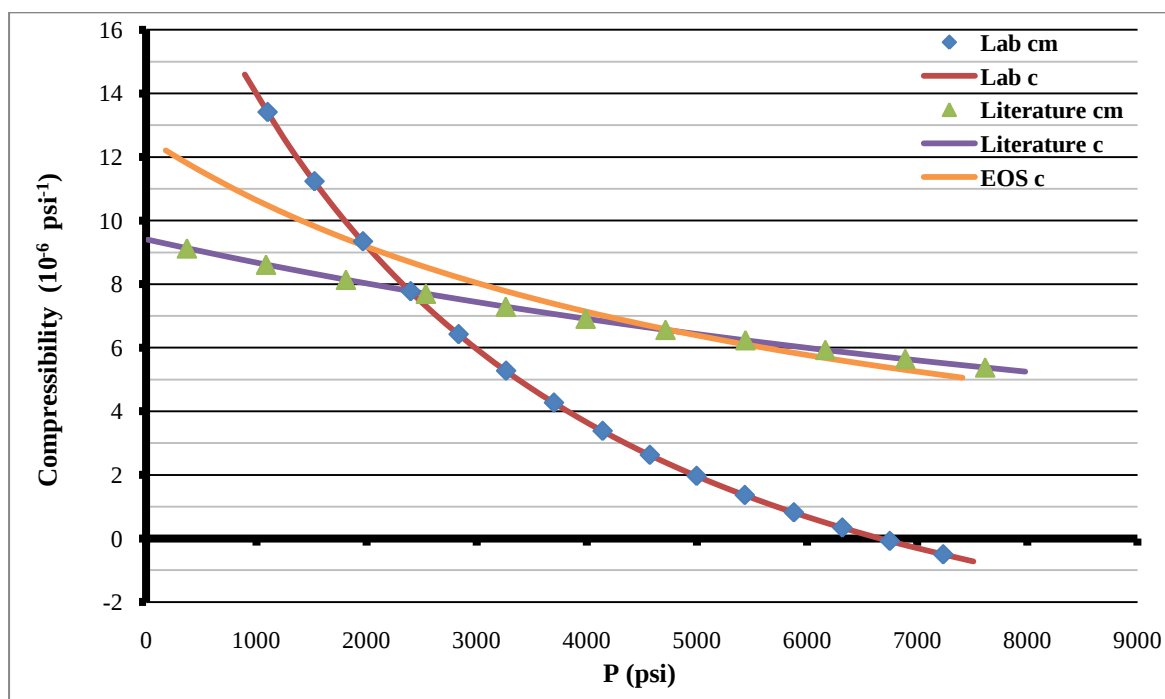
Στα Διαγράμματα 5.23-5.25 παρατηρείται η μεγαλύτερη απόκλιση μεταξύ των προβλέψεων της καταστατικής εξίσωσης των PR και των πειραματικών και βιβλιογραφικών τιμών.

Στο Διάγραμμα 5.26 παρατηρείται ότι οι πειραματικές τιμές του γραμμομοριακού όγκου από τα 5000 psi και μέχρι τη μεγαλύτερη πίεση, είναι σχεδόν ίσες. Σημαίνει ότι το τολουένιο έχει συμπιεστεί τόσο πολύ που ο όγκος που εισπνέζει η αντλία κάθε φορά είναι ολοένα και μικρότερος με αποτέλεσμα να αυξάνει το σφάλμα στην εύρεση του όγκου του ρευστού στις μεγαλύτερες πιέσεις. Αυτό μπορεί να δικαιολογήσει τα σφάλματα στον γραμμομοριακό όγκο καθώς και στην ισοθερμοκρασιακή συμπιεστότητα μετέπειτα

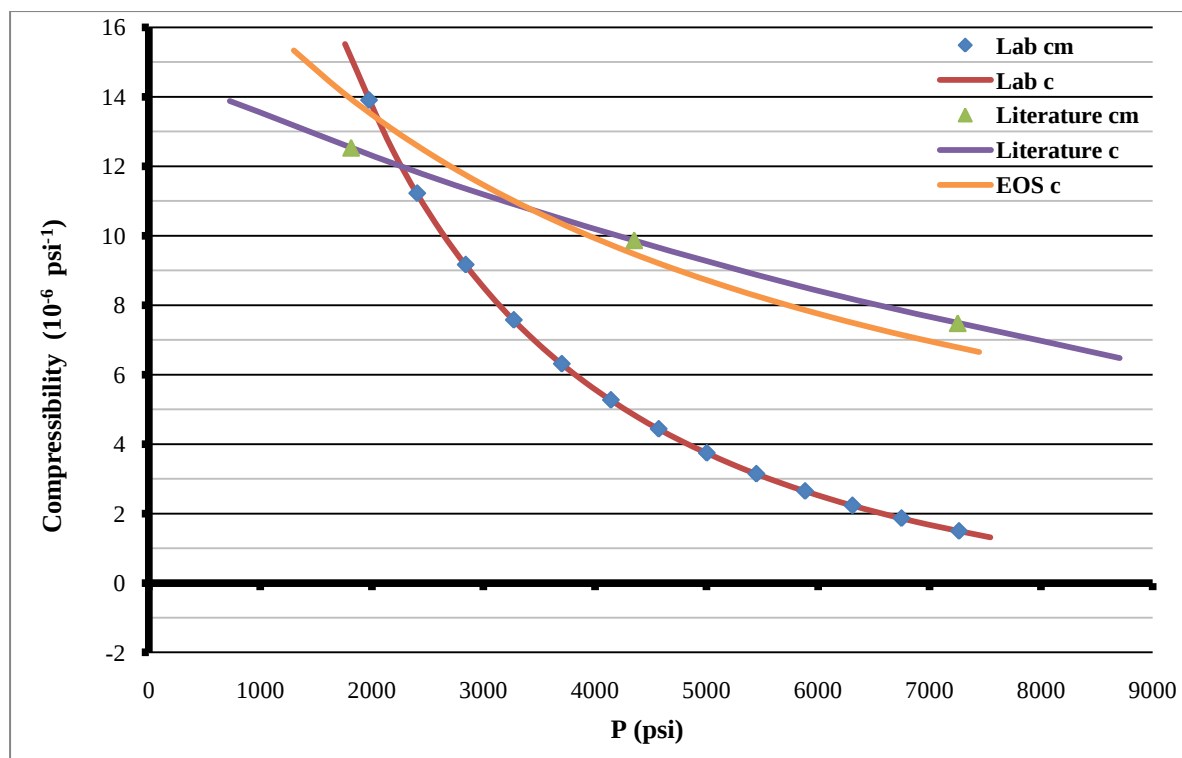
Στα Διαγράμματα 5.27 – 5.29 παρουσιάζονται οι τιμές της ισοθερμοκρασιακής συμπιεστότητας για τις θερμοκρασίες 28°C, 50°C και 90°C. Σε κάθε διάγραμμα παρουσιάζονται οι πειραματικές τιμές, οι βιβλιογραφικές τιμές και οι τιμές που υπολογίζονται με χρήση της κυβικής καταστατικής των Peng-Robinson (PR).



Διάγραμμα 5.27: Ισοθερμοκρασιακή συμπιεστότητα του κυκλοεξανίου στους 28°C



Διάγραμμα 5.28: Ισοθερμοκρασιακή συμπιεστότητα του κυκλοεξανίου στους 50°C

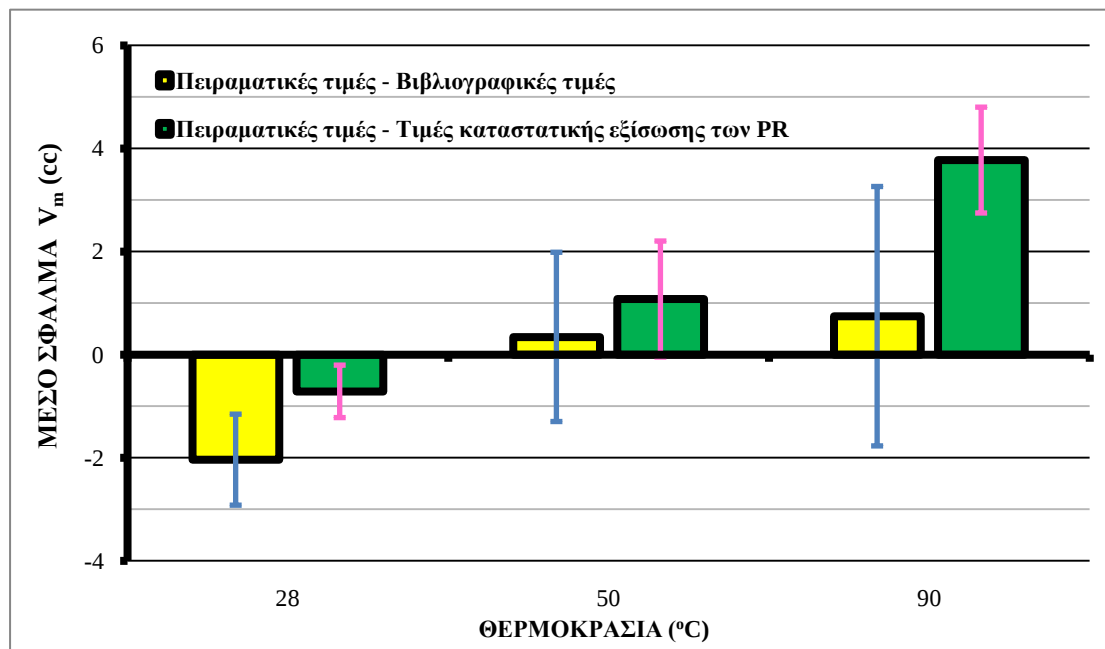


Διάγραμμα 5.29: Ισοθερμοκρασιακή συμπιεστότητα του κυκλοεξανίου στους 90°C

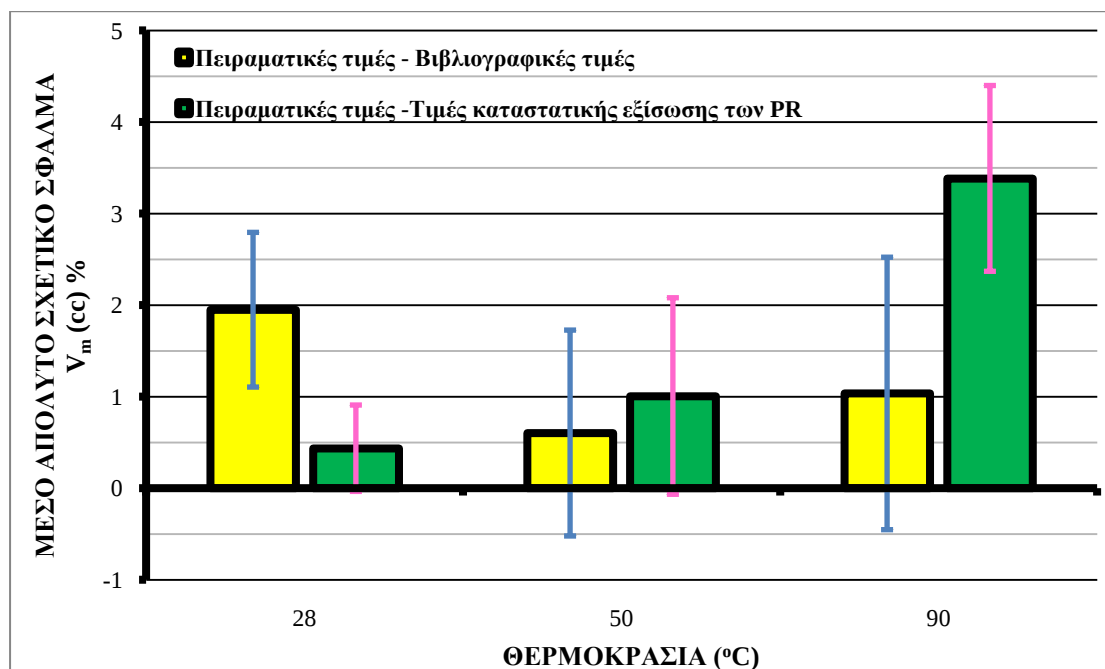
Στα Διαγράμματα 5.27-5.29 παρατηρείται ότι οι πειραματικές τιμές αποκλίνουν αισθητά από τις βιβλιογραφικές τιμές και από τις προβλέψεις της καταστατική εξίσωση των PR καθώς αυξάνει η πίεση και η θερμοκρασία.

Επίσης παρατηρείται ότι η ισοθερμοκρασιακή συμπιεστότητα παίρνει και αρνητικές τιμές στις μεγαλύτερες πιέσεις κάτι που δεν θα έπρεπε να συμβαίνει. Ο λόγος που γίνεται κάτι τέτοιο είναι διότι ο γραμμομοριακός όγκος στις υψηλές πιέσεις έχει σφάλμα όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως, με αποτέλεσμα να μετατίθεται το σφάλμα και στην ισοθερμοκρασιακή συμπιεστότητα. Έστω και ένα πολύ μικρό σφάλμα στον υπολογισμό του γραμμομοριακού όγκου συνεπάγεται μεγάλο σφάλμα στην ισοθερμοκρασιακή συμπιεστότητα.

Στα Διαγράμματα 5.30 – 5.31 παρουσιάζεται το μέσο σφάλμα και το μέσο απόλυτο σχετικό σφάλμα του γραμμομοριακού όγκου μεταξύ των πειραματικών και βιβλιογραφικών τιμών καθώς και των πειραματικών τιμών και των τιμών που υπολογίζονται από την καταστατική εξίσωση των Peng-Robinson αντίστοιχα.

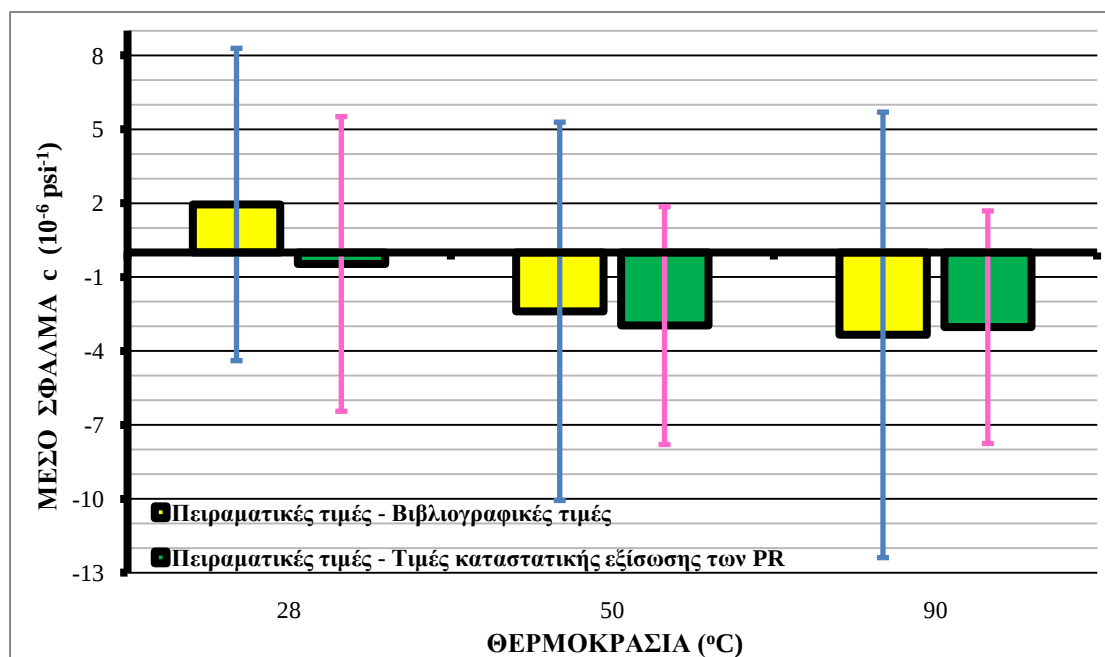


Διάγραμμα 5.30: Μέσο σφάλμα μέτρησης των πειραματικών τιμών του γραμμομοριακού όγκου του κυκλοεξανίου ως προς αυτόν της βιβλιογραφίας και της καταστατικής εξίσωσης των PR για τις θερμοκρασίες των πειραμάτων

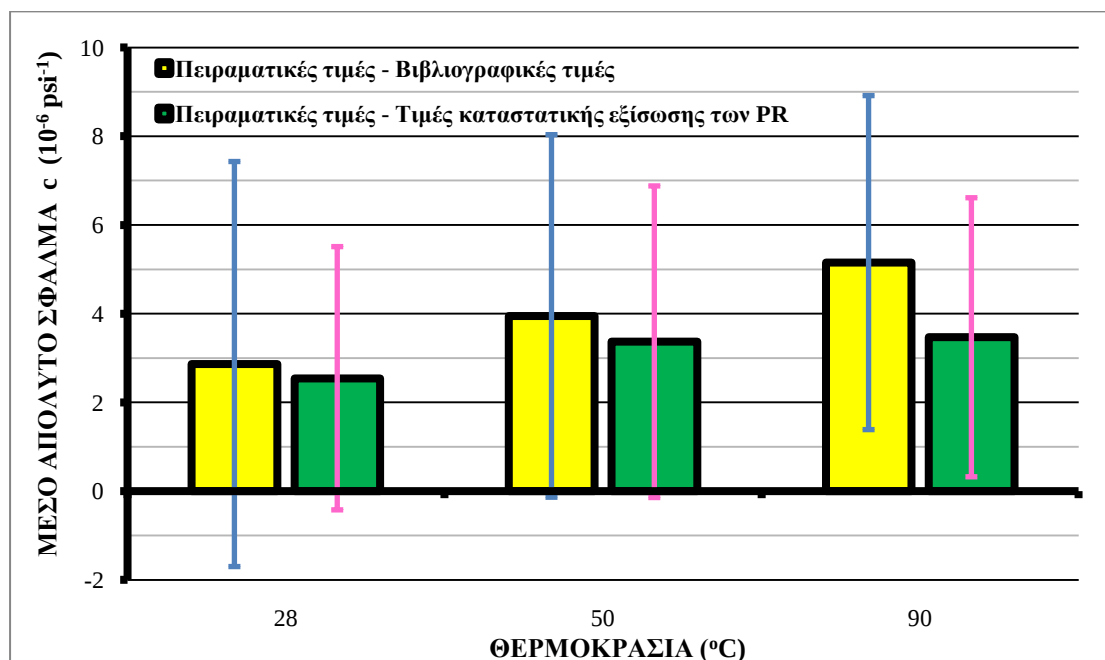


Διάγραμμα 5.31: Μέσο απόλυτο σχετικό σφάλμα μέτρησης των πειραματικών τιμών του γραμμομοριακού όγκου του κυκλοεξανίου ως προς αυτόν της βιβλιογραφίας και της καταστατικής εξίσωσης των PR για τις θερμοκρασίες των πειραμάτων

Στα Διαγράμματα 5.32 – 5.33 παρουσιάζεται το μέσο σφάλμα και το μέσο απόλυτο σφάλμα της ισοθερμοκρασιακής συμπιεστότητας των πειραματικών και βιβλιογραφικών τιμών καθώς και των πειραματικών τιμών και των τιμών που υπολογίζονται από την καταστατική εξίσωση των Peng-Robinson αντίστοιχα.



Διάγραμμα 5.32: Μέσο σφάλμα μέτρησης των πειραματικών τιμών της ισοθερμοκρασιακής συμπιεστότητας του κυκλοεξανίου ως προς αυτόν της βιβλιογραφίας και της καταστατικής εξίσωσης των PR για τις θερμοκρασίες των πειραμάτων



Διάγραμμα 5.33: Μέσο απόλυτο σφάλμα μέτρησης των πειραματικών τιμών της ισοθερμοκρασιακής συμπιεστότητας του κυκλοεξανίου ως προς αυτόν της βιβλιογραφίας και της καταστατικής εξίσωσης των PR για τις θερμοκρασίες των πειραμάτων

5.3 ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΣΕ ΜΕΙΓΜΑΤΑ

Τα μείγματα που μελετήθηκαν ήταν συνδυασμός των καθαρών υγρών υδρογονανθράκων με μεθάνιο, έχοντας σύσταση 90% καθαρό συστατικό – 10% μεθάνιο κατά mole και 70% καθαρό συστατικό – 30% μεθάνιο κατά mole κατά προσέγγιση, για τις τρεις θερμοκρασίες των πειραμάτων.

Για τα μείγματα δεν βρέθηκαν βιβλιογραφικές τιμές, συνεπώς οι πειραματικές μετρήσεις συγκρίνονται μόνο με τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την κυβική καταστατική των Peng-Robinson.

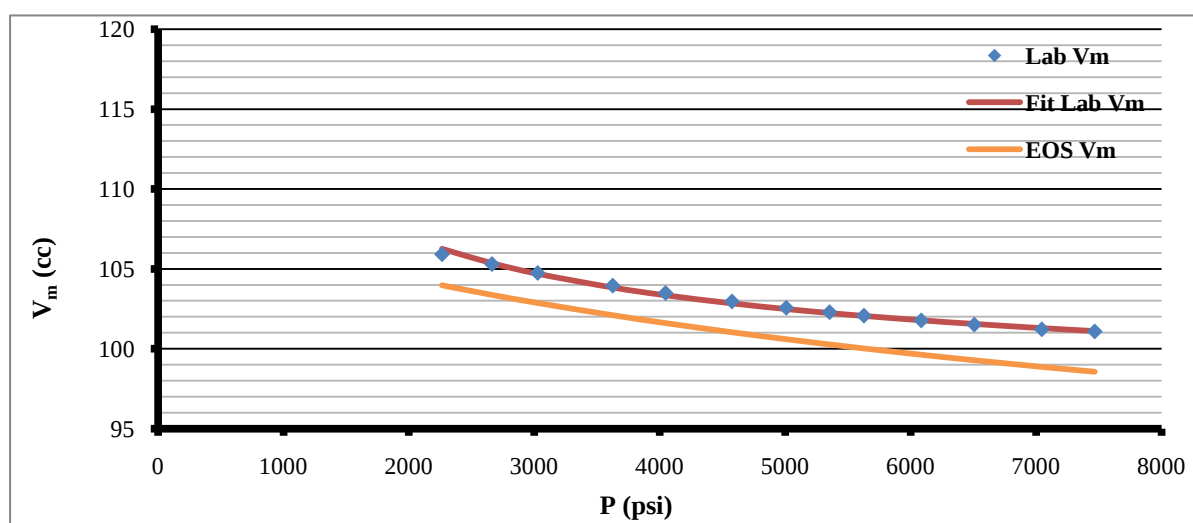
μεθάνιο	
Χημικά αναγνωριστικά	
Χημικός τύπος	CH ₄
Μοριακή μάζα	16,043 amu
Φυσικές ιδιότητες	
Σημείο τήξης	-182,5 °C
Σημείο βρασμού	-161,6 °C
Πυκνότητα	0,717 kg/m ³
Διαλυτότητα στο νερό	35 g/m ³ (17 °C)
Κρίσιμη πίεση	45,3984703 atm
Κρίσιμη θερμοκρασία	-82,6 °C
Χημικές ιδιότητες	
Σημείο αυτανάφλεξης	595 °C
Επικινδυνότητα	
Προσωπική προστασία	Γυαλιά ασφάλειας. Αποτελεσματικός εξερισμός.
 	Εύφλεκτος (F), Επιβλαβής (Xn),

Πίνακας 5.4: Γενικά χαρακτηριστικά και ιδιότητες του μεθανίου

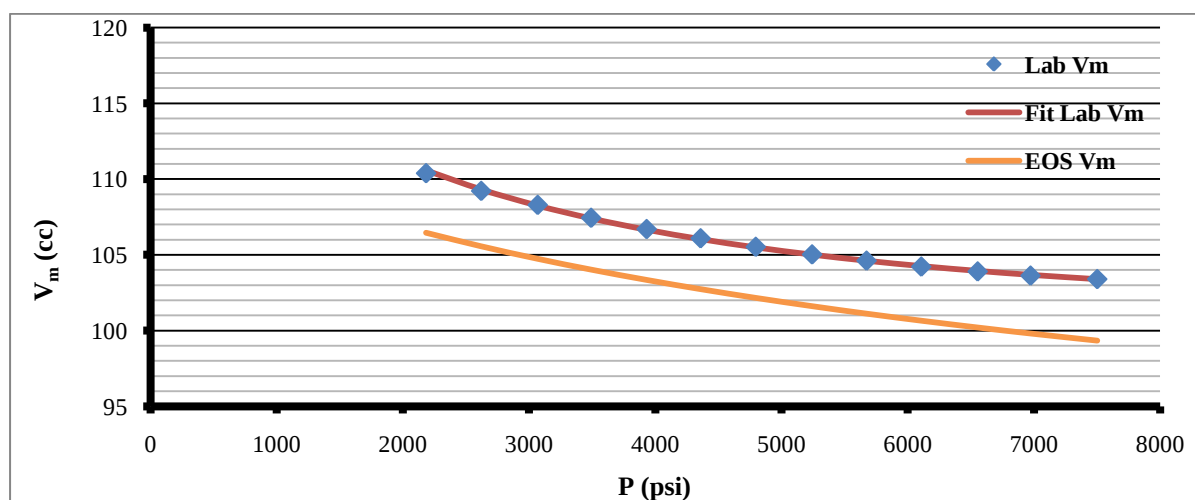
5.3.1 Μείγμα 88% κανονικό πεντάνιο – 12% μεθάνιο

Στα Διαγράμματα 5.34 – 5.36 παρουσιάζονται οι τιμές του γραμμομοριακού όγκου για τις θερμοκρασίες 28°C, 50°C και 90°C. Σε κάθε διάγραμμα παρουσιάζονται οι πειραματικές τιμές και οι τιμές που υπολογίζονται με χρήση της κυβικής καταστατικής των Peng-Robinson (PR).

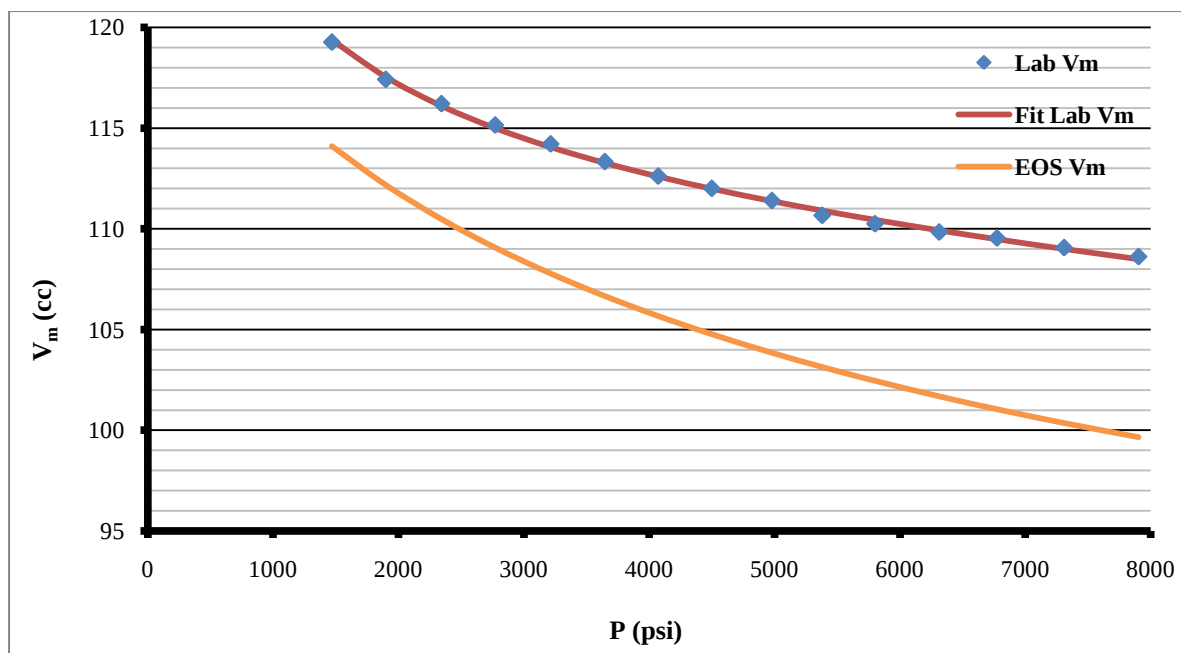
Για το μείγμα 88% κανονικό πεντάνιο – 12% μεθάνιο υπολογίστηκε ότι η διόρθωση που πρέπει να γίνει στον όγκο, που δίνει η καταστατική εξίσωση, με βάση την τεχνική προσθετικής διόρθωσης όγκου καταστατικής εξίσωσης (volume translation), για τους 28°C είναι της τάξης των 1,1 cc που αντιστοιχεί σε 1,05% της αρχικής πρόβλεψης της καταστατικής εξίσωσης, για τους 50°C είναι της τάξης των 0,03 cc που αντιστοιχεί σε 1,05% της αρχικής πρόβλεψης της καταστατικής εξίσωσης και για τους 90°C είναι της τάξης των 3,0 cc που αντιστοιχεί σε 2,63% της αρχικής πρόβλεψης της καταστατικής εξίσωσης.



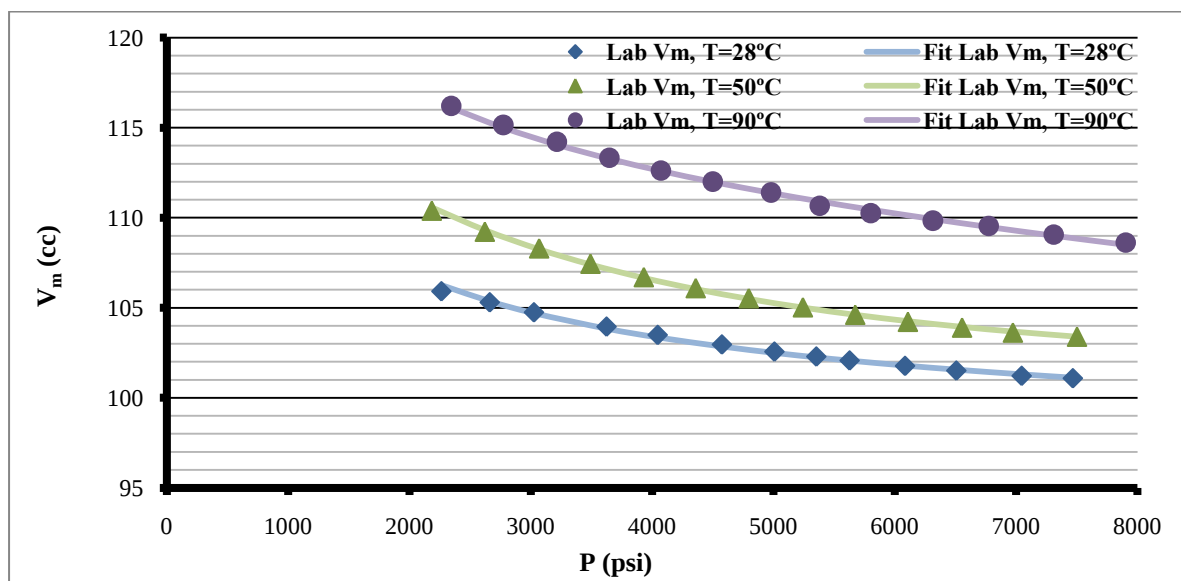
Διάγραμμα 5.34: Γραμμομοριακός όγκος του μείγματος 88% κανονικό πεντάνιο – 12% μεθάνιο στους 28°C



Διάγραμμα 5.35: Γραμμομοριακός όγκος του μείγματος 88% κανονικό πεντάνιο – 12% μεθάνιο στους 50°C



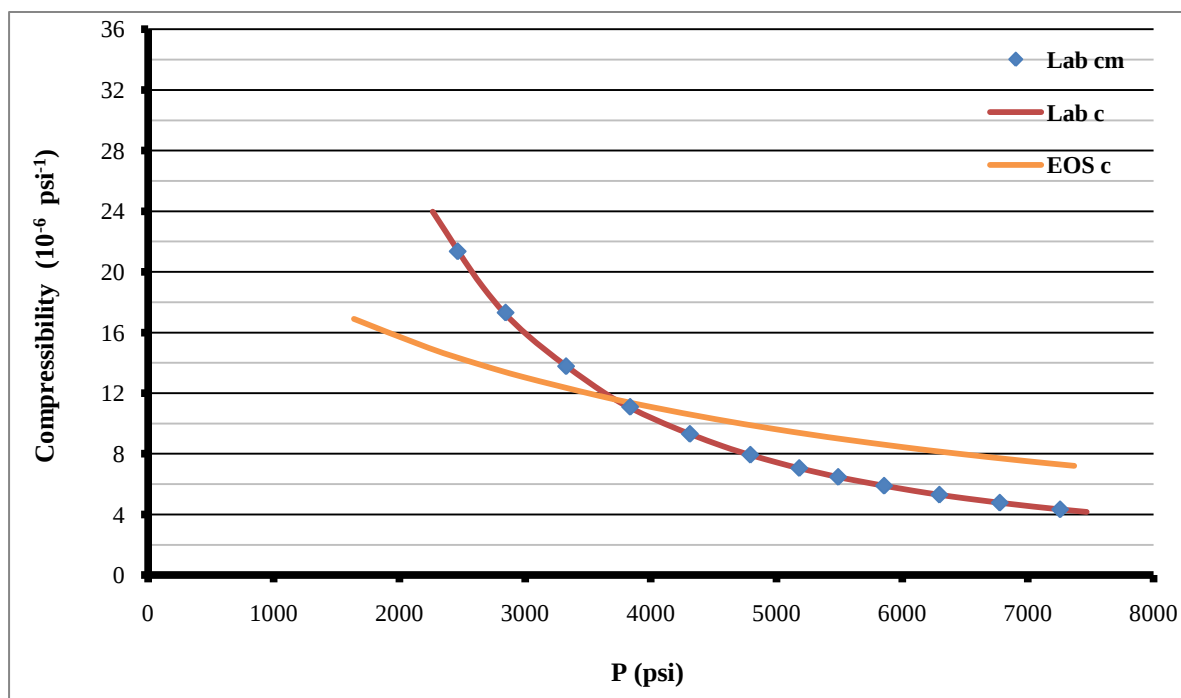
Διάγραμμα 5.36: Γραμμομοριακός όγκος του μείγματος 88% κανονικό πεντάνιο – 12% μεθάνιο στους 90°C



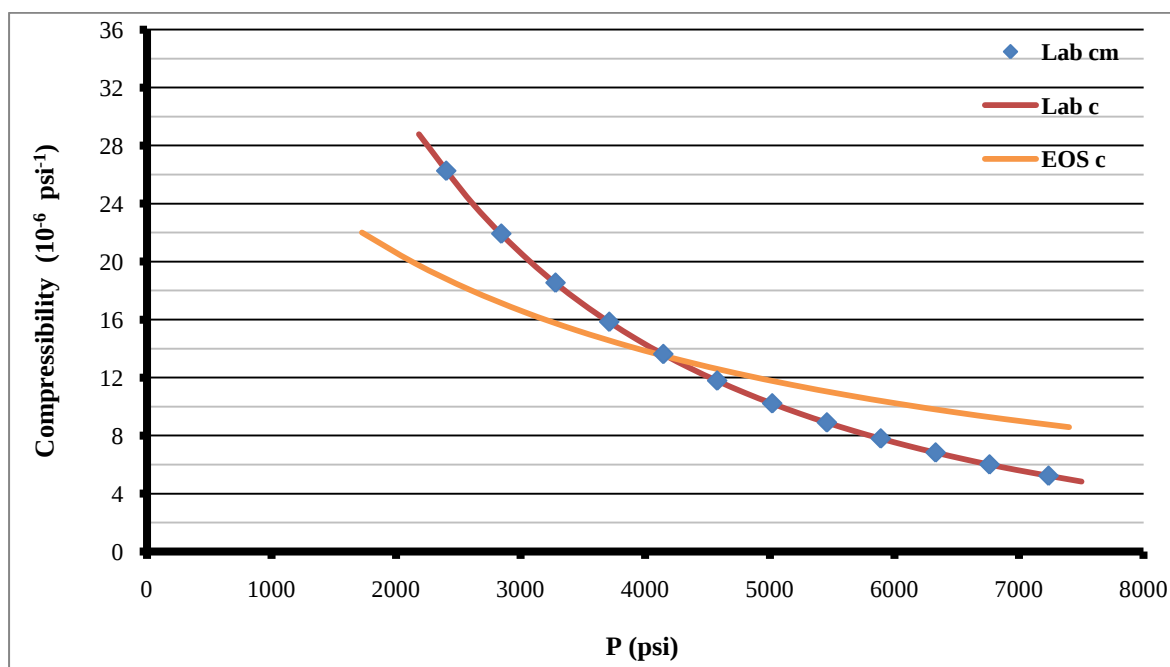
Διάγραμμα 5.37: Γραμμομοριακός όγκος του μείγματος 88% κανονικό πεντάνιο – 12% μεθάνιο σε διαφορετικές θερμοκρασίες

Στα Διαγράμματα 5.34-5.36 παρατηρούνται αποκλίσεις, μεταξύ των πειραματικών τιμών και των προβλέψεων της καταστατικής εξίσωσης των PR ,με την αύξηση της πίεσης και της θερμοκρασίας.

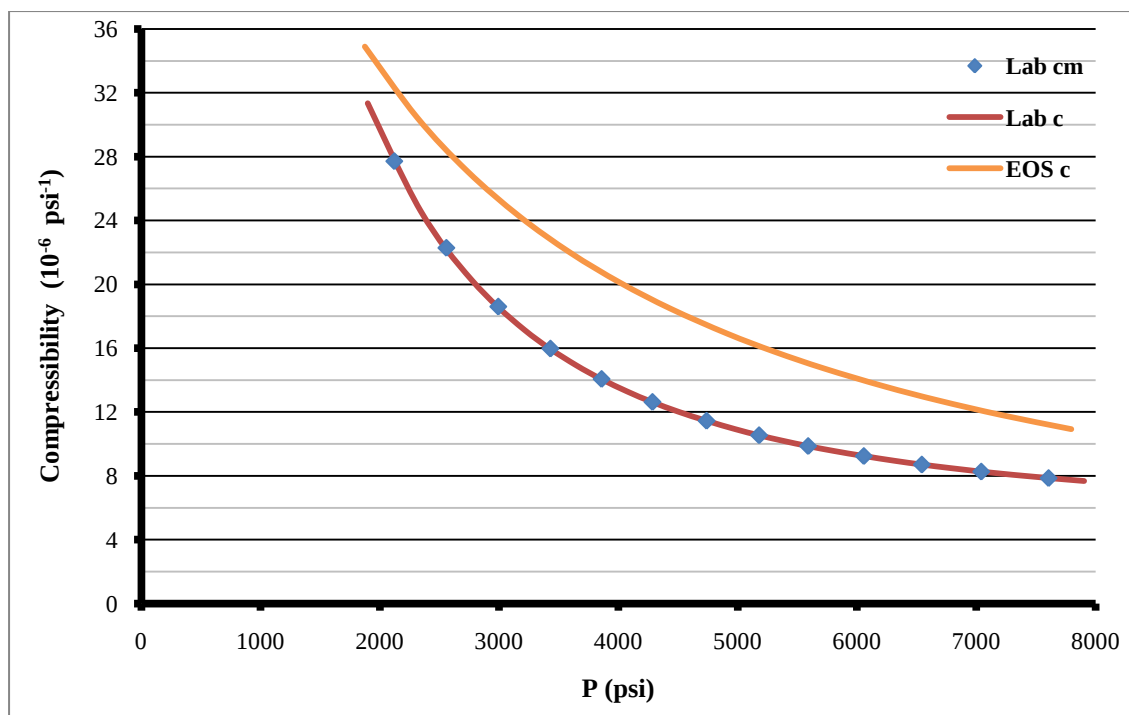
Στα Διαγράμματα 5.38 – 5.40 παρουσιάζονται οι τιμές της ισοθερμοκρασιακής συμπιεστότητας για τις θερμοκρασίες 28°C, 50°C και 90°C. Σε κάθε διάγραμμα παρουσιάζονται οι πειραματικές τιμές και οι τιμές που υπολογίζονται με χρήση της κυβικής καταστατικής των Peng-Robinson (PR).



Διάγραμμα 5.38: Ισοθερμοκρασιακή συμπιεστότητα του μείγματος 88% κανονικό πεντάνιο – 12% μεθάνιο στους 28°C



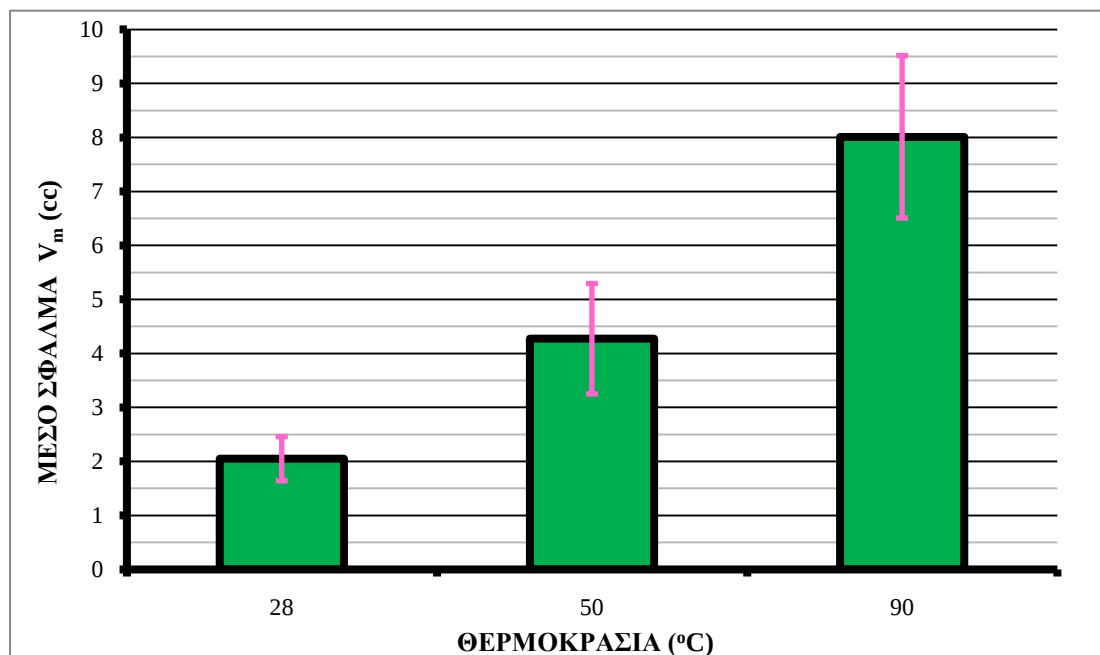
Διάγραμμα 5.39: Ισοθερμοκρασιακή συμπιεστότητα του μείγματος 88% κανονικό πεντάνιο – 12% μεθάνιο στους 50°C



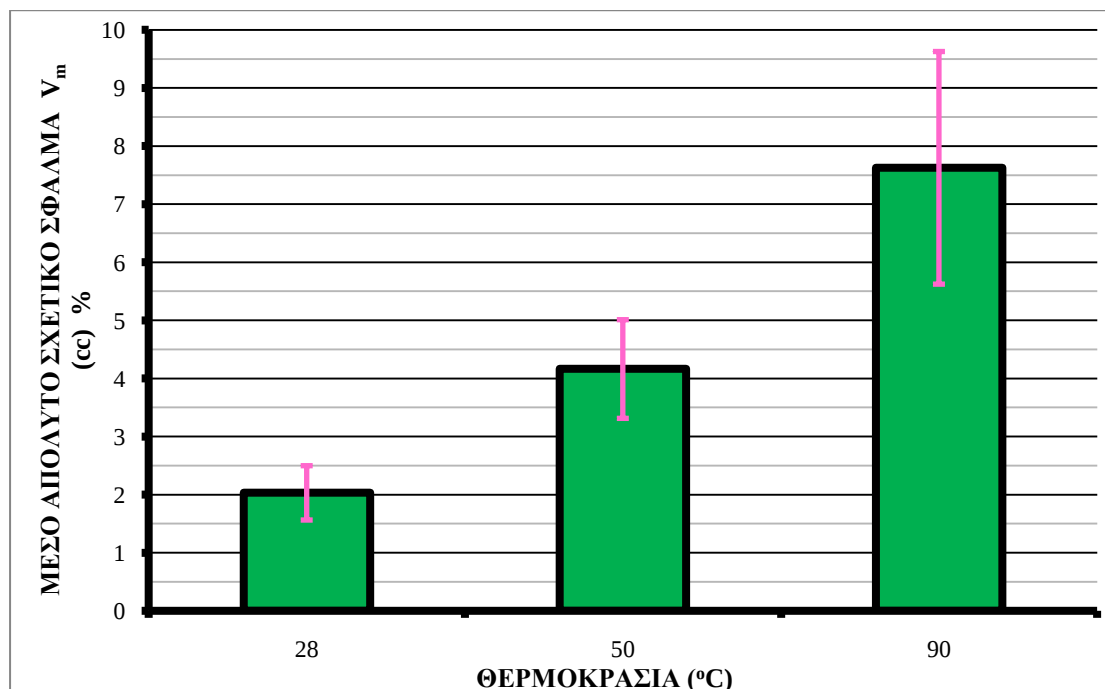
Διάγραμμα 5.40: Ισοθερμοκρασιακή συμπιεστότητα του μείγματος 88% κανονικό πεντάνιο – 12% μεθάνιο στους 90°C

Στα Διαγράμματα 5.38-5.40 παρατηρείται ότι η καμπύλη των πειραματικών τιμών και των προβλέψεων της καταστατικής εξίσωσης των PR να παρουσιάζει απότομη κλίση, πιο φανερό γίνεται στη μέγιστη θερμοκρασία. Οι αποκλίσεις μεταξύ των καμπυλών αυξάνεται με την αύξηση της πίεσης και της θερμοκρασίας.

Στα Διαγράμματα 5.41 – 5.42 παρουσιάζεται το μέσο σφάλμα και το μέσο απόλυτο σχετικό σφάλμα του γραμμομοριακού όγκου μεταξύ των πειραματικών και των τιμών που υπολογίζονται από την καταστατική εξίσωση των Peng-Robinson αντίστοιχα.

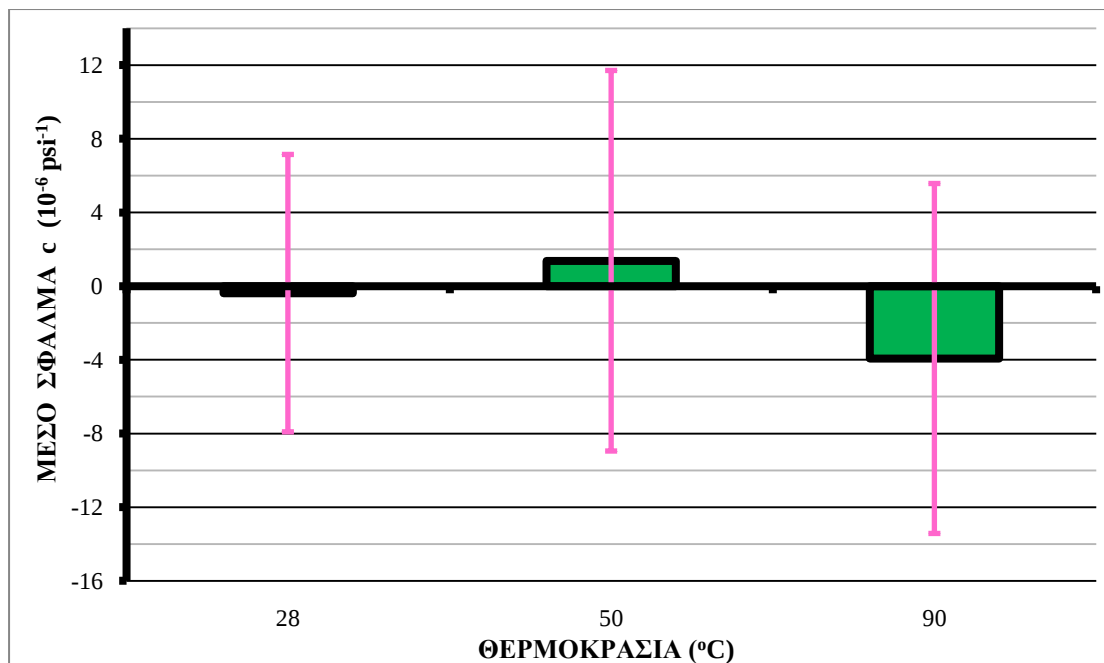


Διάγραμμα 5.41: Μέσο σφάλμα μέτρησης του γραμμομοριακού όγκου του μείγματος 88% κανονικό πεντάνιο – 12% μεθάνιο ως προς των πειραματικών τιμών και των τιμών της καταστατικής εξίσωσης των PR για τις θερμοκρασίες των πειραμάτων

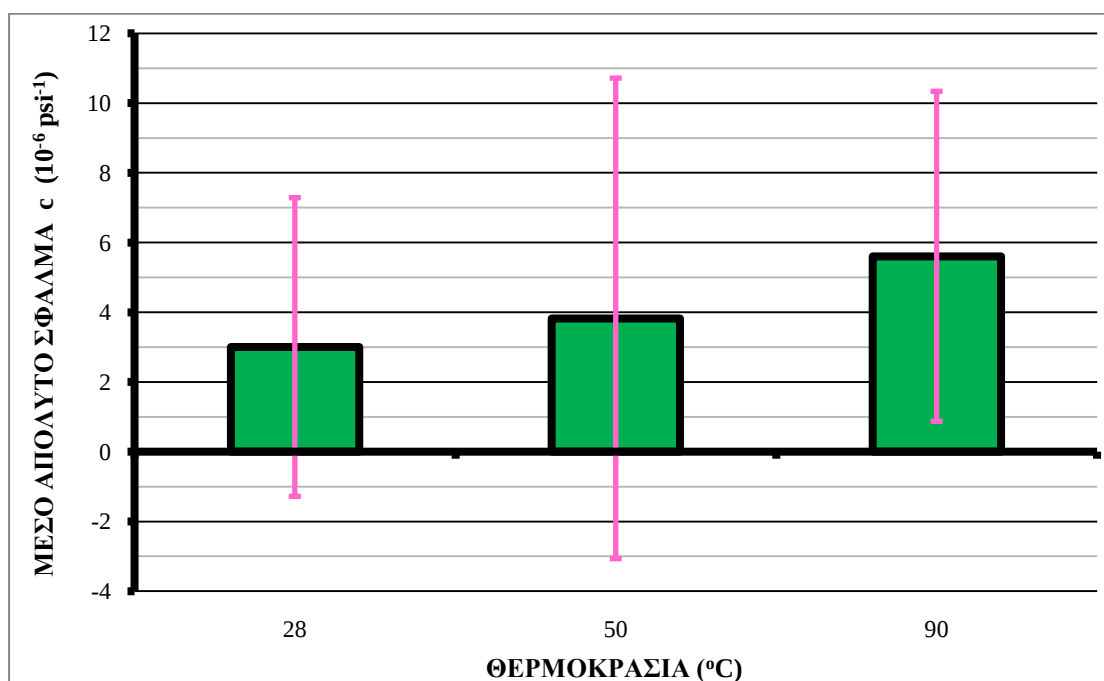


Διάγραμμα 5.42: Μέσο απόλυτο σχετικό σφάλμα μέτρησης του γραμμομοριακού όγκου του μείγματος 88% κανονικό πεντάνιο – 12% μεθάνιο ως προς των πειραματικών τιμών και των τιμών της καταστατικής εξίσωσης των PR για τις θερμοκρασίες των πειραμάτων

Στα Διαγράμματα 5.43 – 5.44 παρουσιάζεται το μέσο σφάλμα και το μέσο απόλυτο σφάλμα της ισοθερμοκρασιακής συμπιεστότητας μεταξύ των πειραματικών και των τιμών που υπολογίζονται από την καταστατική εξίσωση των Peng-Robinson αντίστοιχα.



Διάγραμμα 5.43: Μέσο σφάλμα μέτρησης της ισοθερμοκρασιακής συμπιεστότητας του μείγματος 88% κανονικό πεντάνιο – 12% μεθάνιο ως προς των πειραματικών τιμών και των τιμών της καταστατικής εξίσωσης των PR για τις θερμοκρασίες των πειραμάτων

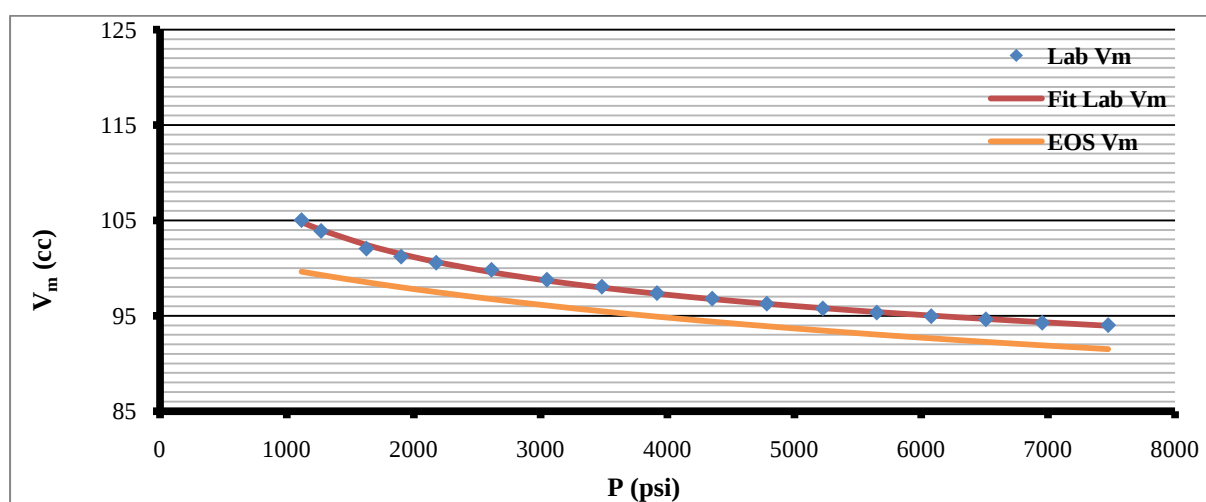


Διάγραμμα 5.44: Μέσο απόλυτο σφάλμα μέτρησης της ισοθερμοκρασιακής συμπιεστότητας του μείγματος 88% κανονικό πεντάνιο – 12% μεθάνιο ως προς των πειραματικών τιμών και των τιμών της καταστατικής εξίσωσης των PR για τις θερμοκρασίες των πειραμάτων

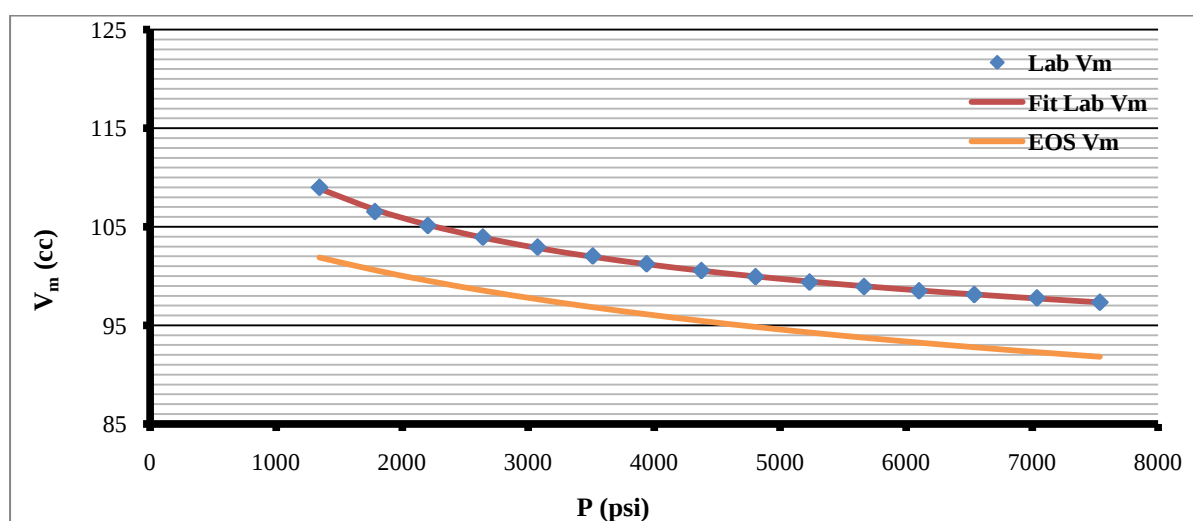
5.3.2 Μείγμα 80% κανονικό πεντάνιο – 20% μεθάνιο

Στα Διαγράμματα 5.45 – 5.47 παρουσιάζονται οι τιμές του γραμμομοριακού όγκου για τις θερμοκρασίες 28°C, 50°C και 90°C. Σε κάθε διάγραμμα παρουσιάζονται οι πειραματικές τιμές και οι τιμές που υπολογίζονται με χρήση της κυβικής καταστατικής των Peng-Robinson (PR).

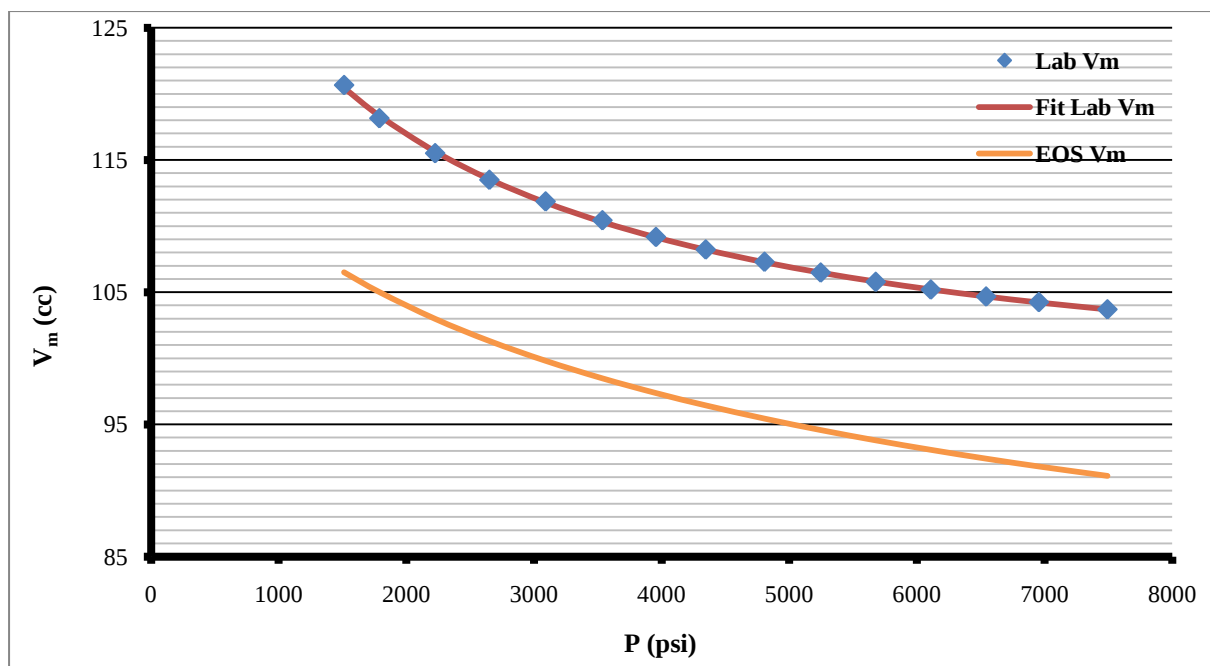
Για το μείγμα 80% κανονικό πεντάνιο – 20% μεθάνιο υπολογίστηκε ότι η διόρθωση που πρέπει να γίνει στον όγκο, που δίνει η καταστατική εξίσωση, με βάση την τεχνική προσθετικής διόρθωσης όγκου καταστατικής εξίσωσης (volume translation), για τους 28°C είναι της τάξης των 1,1 cc που αντιστοιχεί σε 1,1% της αρχικής πρόβλεψης της καταστατικής εξίσωσης, για τους 50°C είναι της τάξης των 2,7 cc που αντιστοιχεί σε 2,6% της αρχικής πρόβλεψης της καταστατικής εξίσωσης και για τους 90°C είναι της τάξης των 7,3 cc που αντιστοιχεί σε 6,8% της αρχικής πρόβλεψης της καταστατικής εξίσωσης.



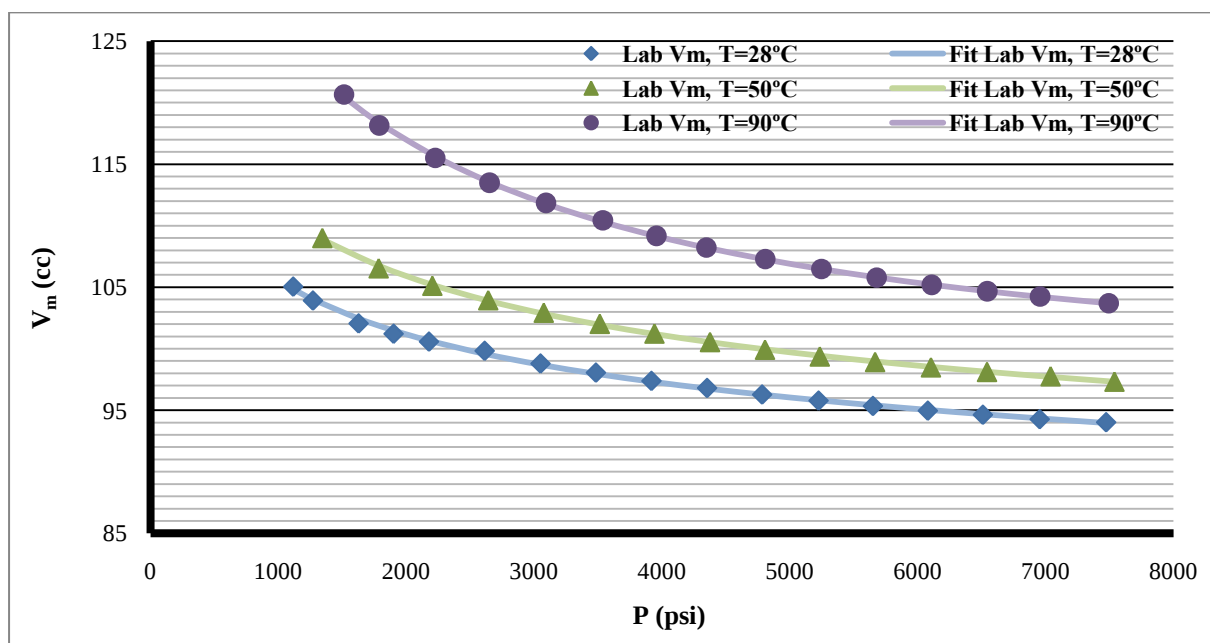
Διάγραμμα 5.45: Γραμμομοριακός όγκος του μείγματος 80% κανονικό πεντάνιο – 20% μεθάνιο στους 28°C



Διάγραμμα 5.46: Γραμμομοριακός όγκος του μείγματος 80% κανονικό πεντάνιο – 20% μεθάνιο στους 50°C



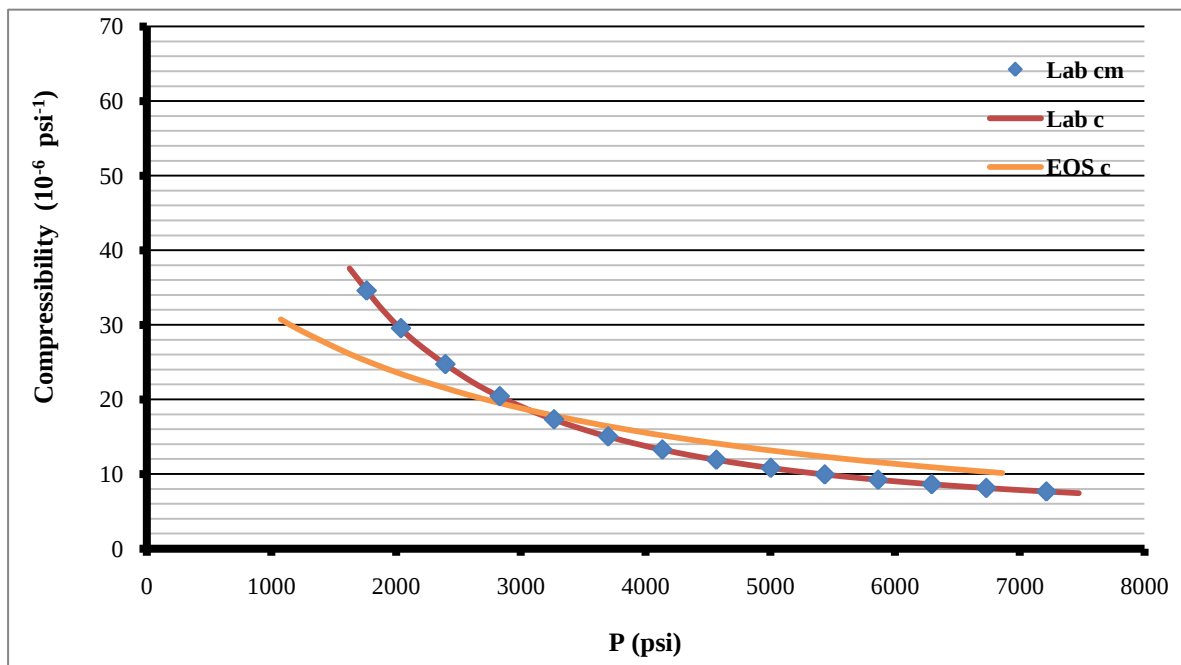
Διάγραμμα 5.47: Γραμμομοριακός όγκος του μείγματος 80% κανονικό πεντάνιο – 20% μεθάνιο στους 90°C



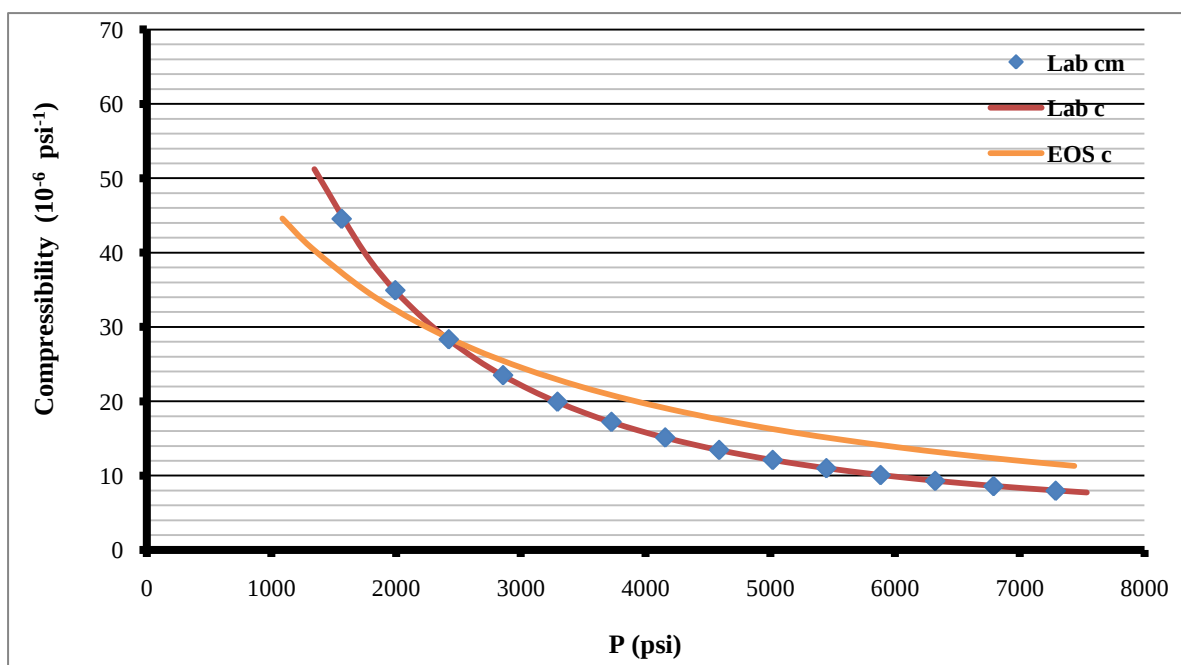
Διάγραμμα 5.48: Γραμμομοριακός όγκος του μείγματος 80% κανονικό πεντάνιο – 20% μεθάνιο σε διαφορετικές θερμοκρασίες

Στα Διαγράμματα 5.45-5.47 παρατηρείται απόκλιση μεταξύ των δυο καμπυλών με την αύξηση της πίεσης και της θερμοκρασίας.

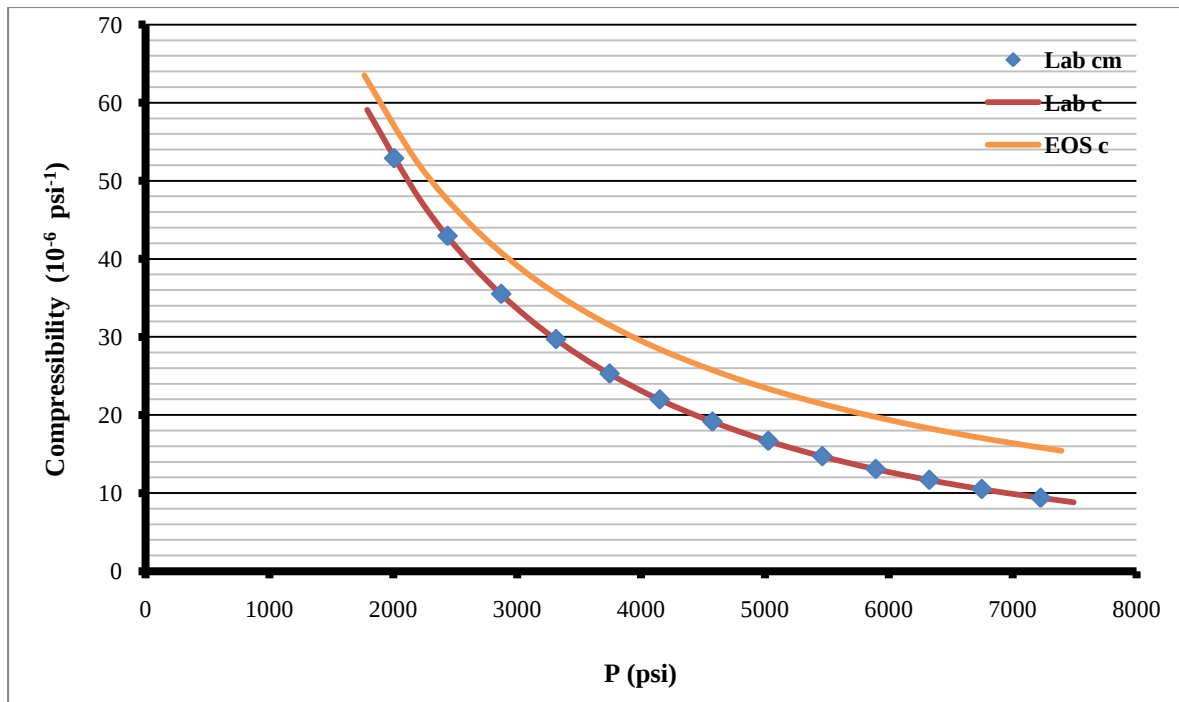
Στα Διαγράμματα 5.49 – 5.51 παρουσιάζονται οι τιμές της ισοθερμοκρασιακής συμπιεστότητας για τις θερμοκρασίες 28°C, 50°C και 90°C. Σε κάθε διάγραμμα παρουσιάζονται οι πειραματικές τιμές και οι τιμές που υπολογίζονται με χρήση της κυβικής καταστατικής των Peng-Robinson (PR).



Διάγραμμα 5.49: Ισοθερμοκρασιακή συμπιεστότητα του μείγματος 80% κανονικό πεντάνιο – 20% μεθάνιο στους 28°C



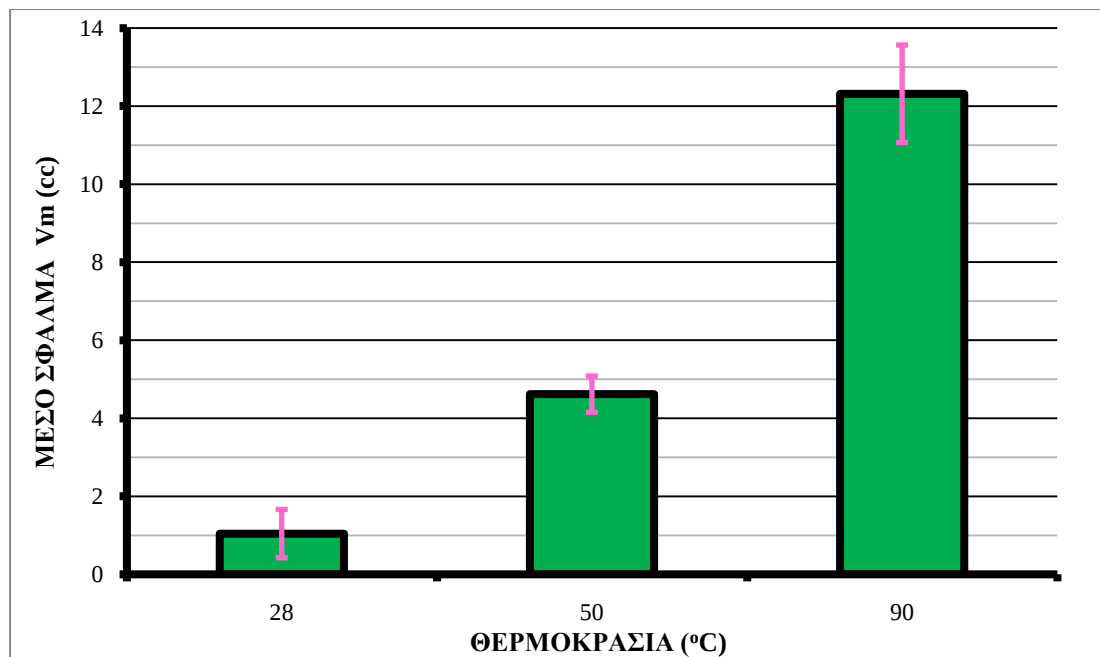
Διάγραμμα 5.50: Ισοθερμοκρασιακή συμπιεστότητα του μείγματος 80% κανονικό πεντάνιο – 20% μεθάνιο στους 50°C



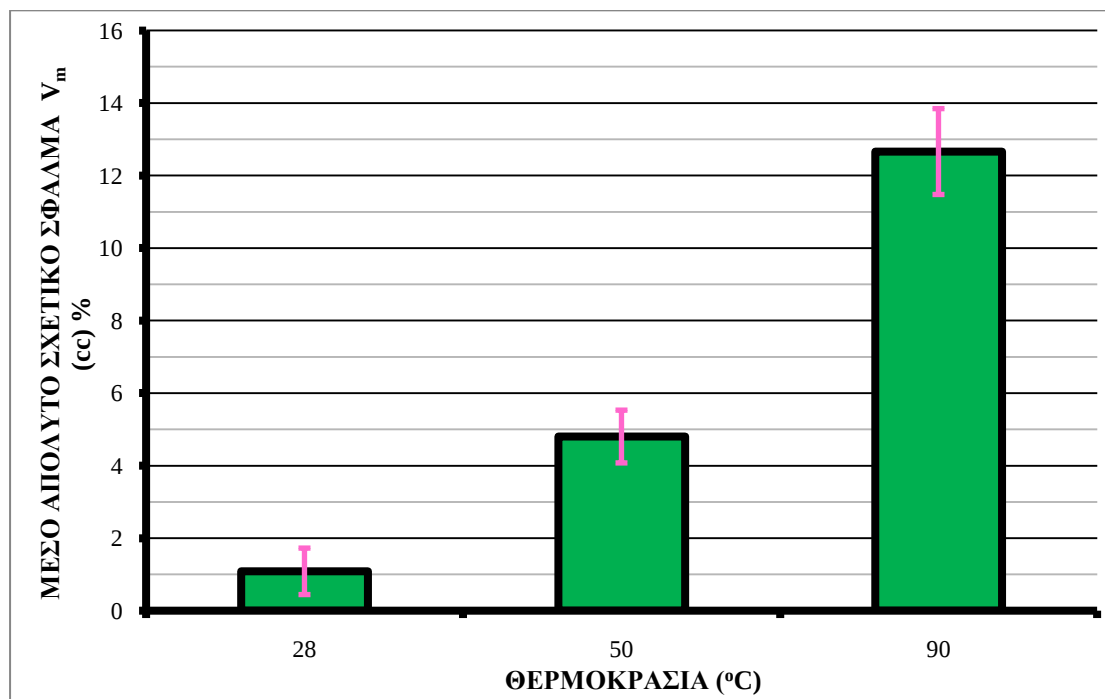
Διάγραμμα 5.51: Ισοθερμοκρασιακή συμπιεστότητα του μείγματος 80% κανονικό πεντάνιο – 20% μεθάνιο στους 90°C

Στα Διαγράμματα 5.49-5.51 παρατηρείται απόκλιση μεταξύ των δυο καμπυλών με την αύξηση της πίεσης και της θερμοκρασίας, η μεγαλύτερη απόκλιση παρατηρείται στη μέγιστη θερμοκρασία.

Στα Διαγράμματα 5.52 – 5.53 παρουσιάζεται το μέσο σφάλμα και το μέσο απόλυτο σχετικό σφάλμα του γραμμομοριακού όγκου μεταξύ των πειραματικών και των τιμών που υπολογίζονται από την καταστατική εξίσωση των Peng-Robinson αντίστοιχα.

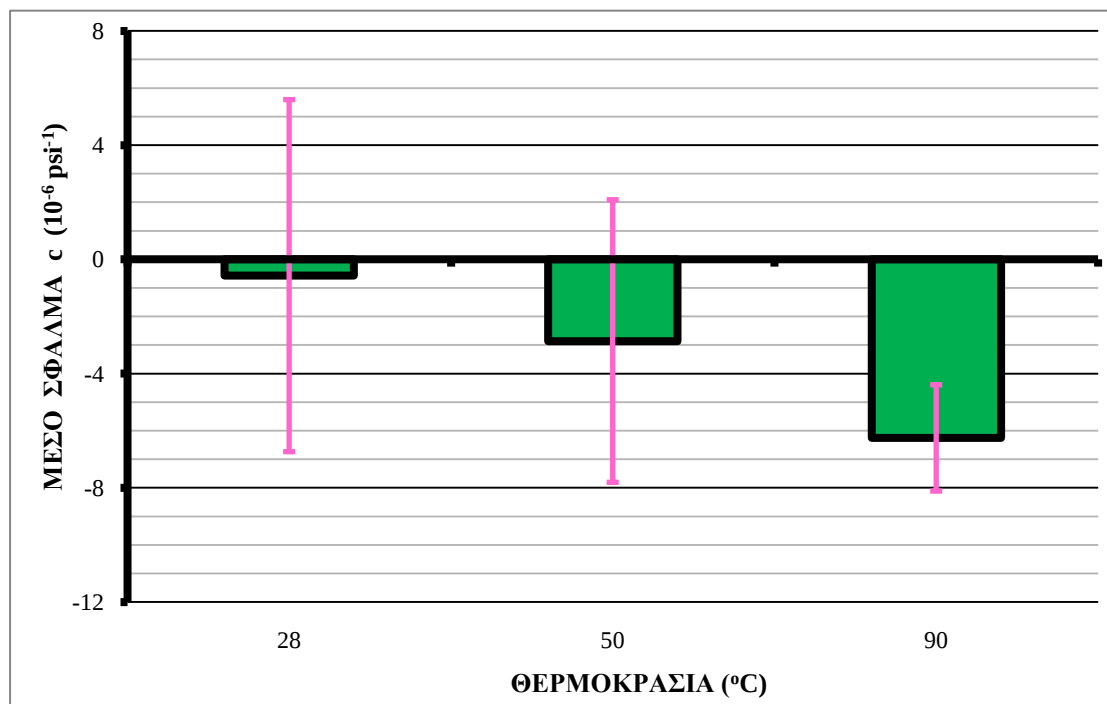


Διάγραμμα 5.52: Μέσο σφάλμα μέτρησης του γραμμομοριακού όγκου του μείγματος 80% κανονικό πεντάνιο – 20% μεθάνιο ως προς των πειραματικών τιμών και των τιμών της καταστατικής εξίσωσης των PR για τις θερμοκρασίες των πειραμάτων

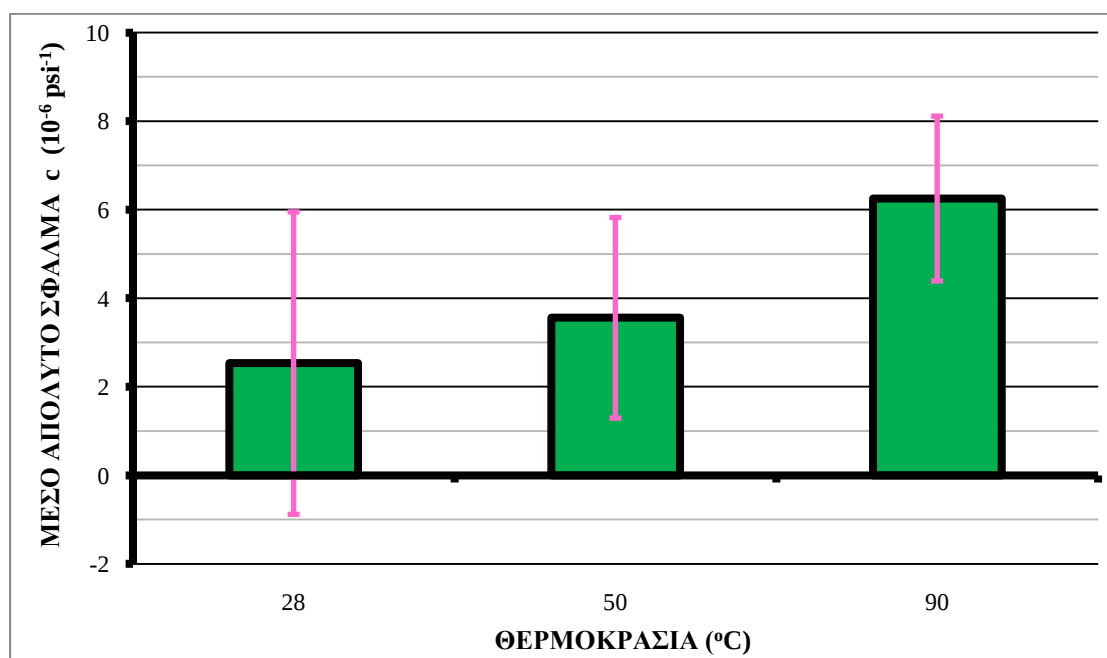


Διάγραμμα 5.53: Μέσο απόλυτο σχετικό σφάλμα μέτρησης του γραμμομοριακού όγκου του μείγματος 80% κανονικό πεντάνιο – 20% μεθάνιο ως προς των πειραματικών τιμών και των τιμών της καταστατικής εξίσωσης των PR για τις θερμοκρασίες των πειραμάτων

Στα Διαγράμματα 5.54 – 5.55 παρουσιάζεται το μέσο σφάλμα και το μέσο απόλυτο σφάλμα της ισοθερμοκρασιακής συμπιεστότητας μεταξύ των πειραματικών και των τιμών που υπολογίζονται από την καταστατική εξίσωση των Peng-Robinson αντίστοιχα.



Διάγραμμα 5.54: Μέσο σφάλμα μέτρησης της ισοθερμοκρασιακής συμπιεστότητας του μείγματος 80% κανονικό πεντάνιο – 20% μεθάνιο ως προς των πειραματικών τιμών και των τιμών της καταστατικής εξίσωσης των PR για τις θερμοκρασίες των πειραμάτων

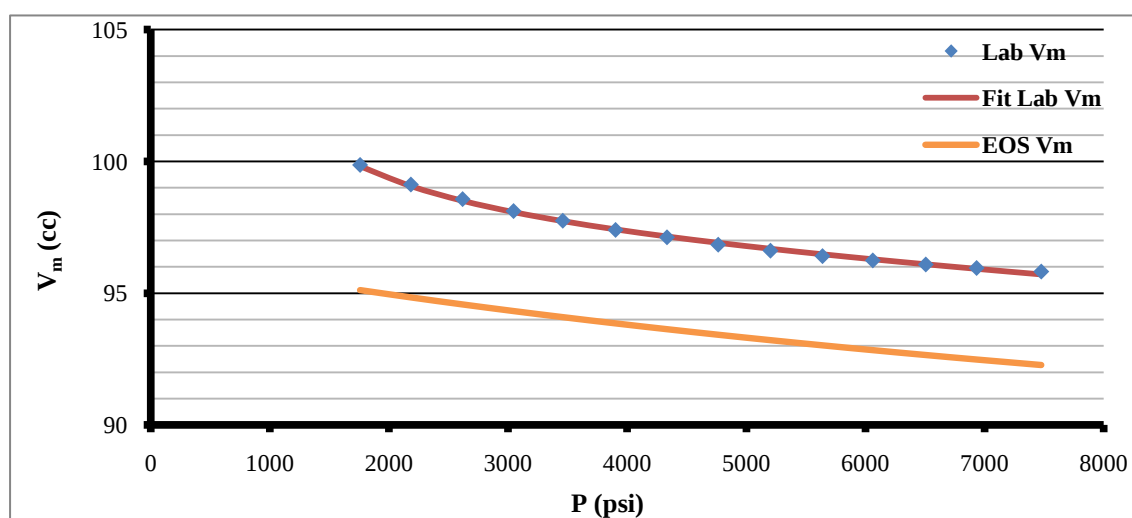


Διάγραμμα 5.55: Μέσο απόλυτο σφάλμα μέτρησης της ισοθερμοκρασιακής συμπιεστότητας του μείγματος 80% κανονικό πεντάνιο – 20% μεθάνιο ως προς των πειραματικών τιμών και των τιμών της καταστατικής εξίσωσης των PR για τις θερμοκρασίες των πειραμάτων

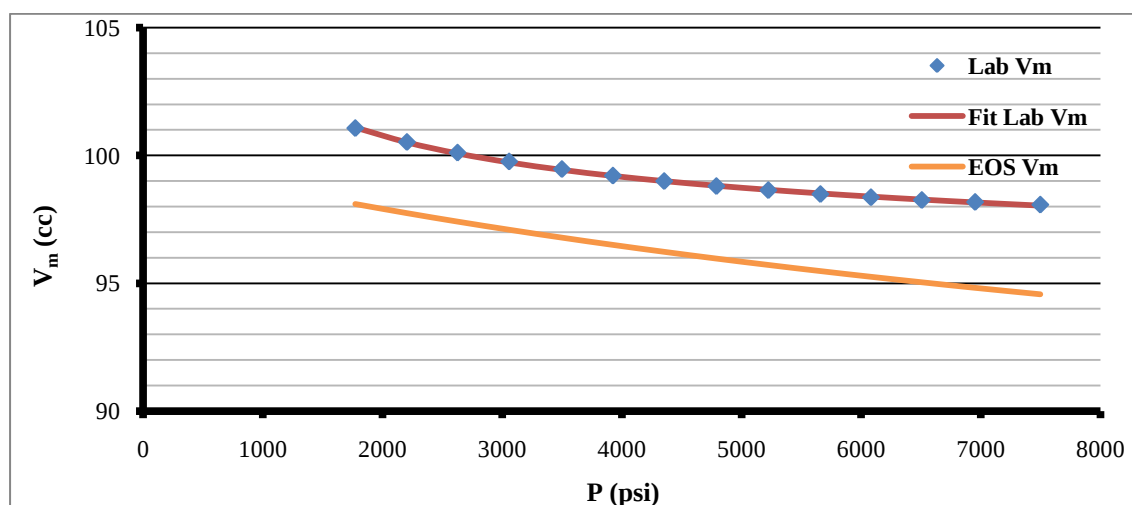
5.3.3 Μείγμα 87% τολουένιο – 13% μεθάνιο

Στα Διαγράμματα 5.56 – 5.58 παρουσιάζονται οι τιμές του γραμμομοριακού όγκου για τις θερμοκρασίες 28°C, 50°C και 90°C. Σε κάθε διάγραμμα παρουσιάζονται οι πειραματικές τιμές και οι τιμές που υπολογίζονται με χρήση της κυβικής καταστατικής των Peng-Robinson (PR).

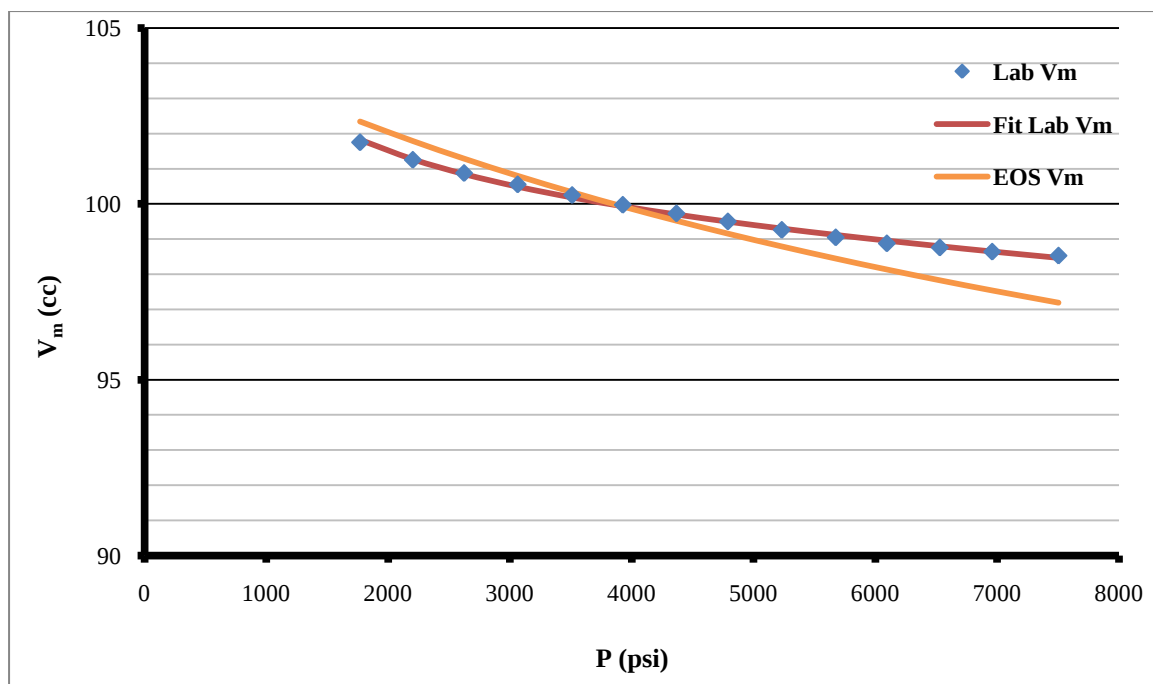
Για το μείγμα 87% τολουένιο – 13% μεθάνιο υπολογίστηκε ότι η διόρθωση που πρέπει να γίνει στον όγκο, που δίνει η καταστατική εξίσωση, με βάση την τεχνική προσθετικής διόρθωσης όγκου καταστατικής εξίσωσης (volume translation), για τους 28°C είναι της τάξης των 1,8 cc που αντιστοιχεί σε 1,9% της αρχικής πρόβλεψης της καταστατικής εξίσωσης, για τους 50°C είναι της τάξης των 0,8 cc που αντιστοιχεί σε 0,8% της αρχικής πρόβλεψης της καταστατικής εξίσωσης και για τους 90°C είναι της τάξης των 0,9cc που αντιστοιχεί σε 0,9% της αρχικής πρόβλεψης της καταστατικής εξίσωσης.



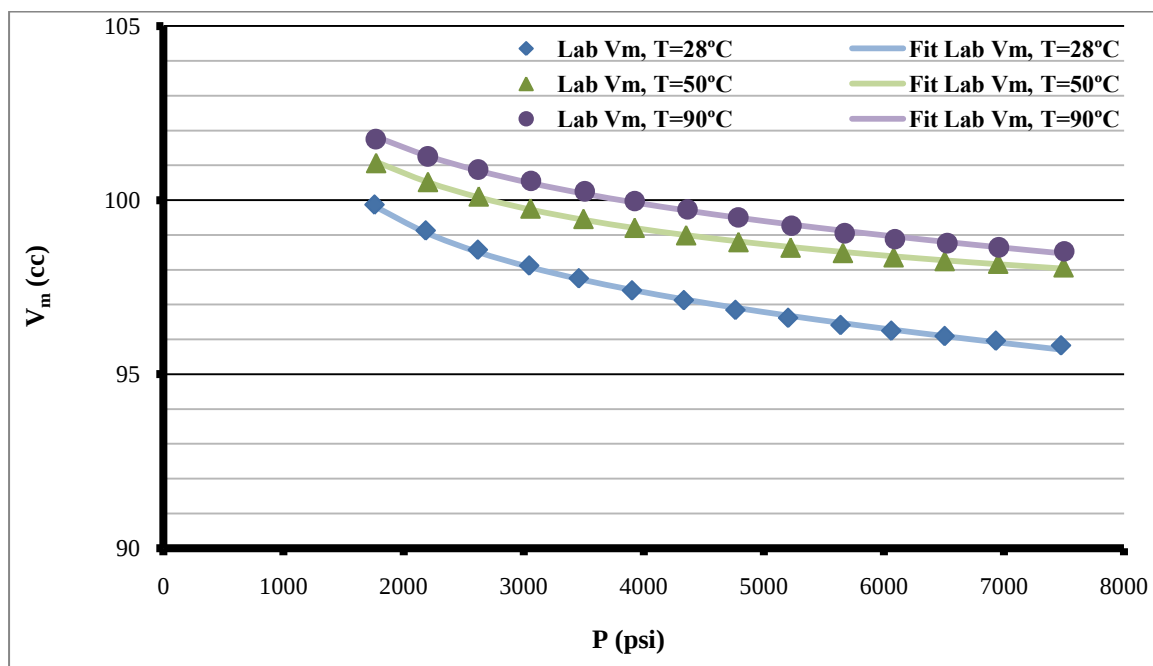
Διάγραμμα 5.56: Γραμμομοριακός όγκος του μείγματος 87% τολουένιο – 13% μεθάνιο στους 28°C



Διάγραμμα 5.57: Γραμμομοριακός όγκος του μείγματος 87% τολουένιο – 13% μεθάνιο στους 50°C



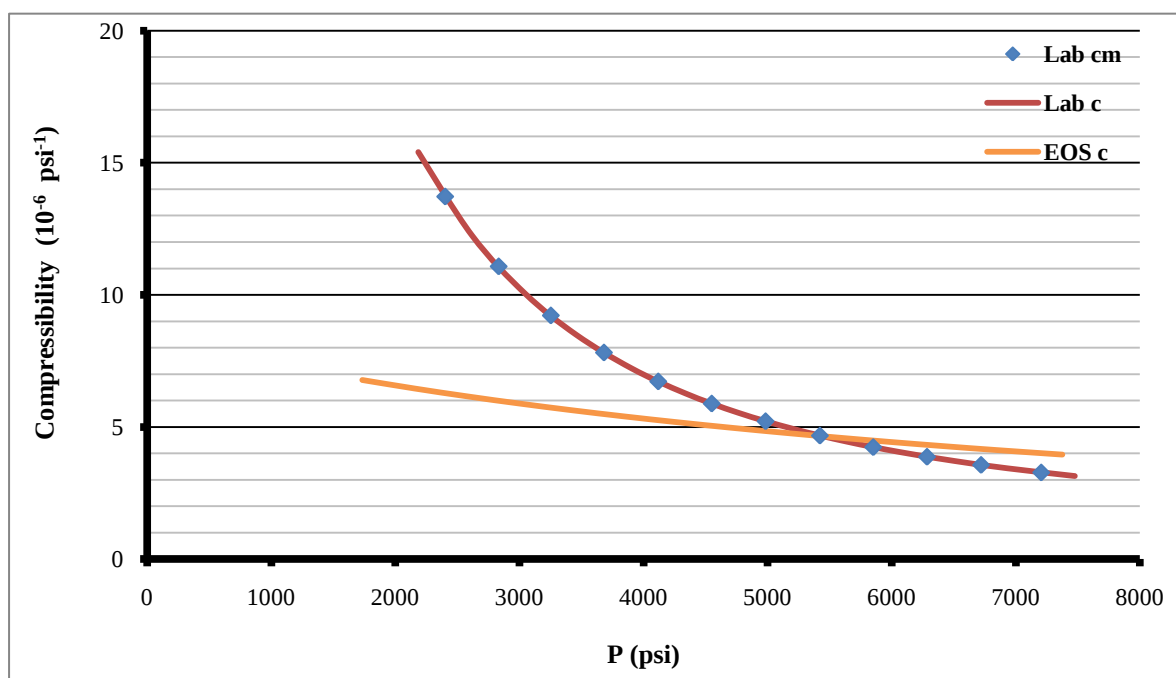
Διάγραμμα 5.58: Γραμμομοριακός όγκος του μείγματος 87% τολουένιο – 13% μεθάνιο στους 90°C



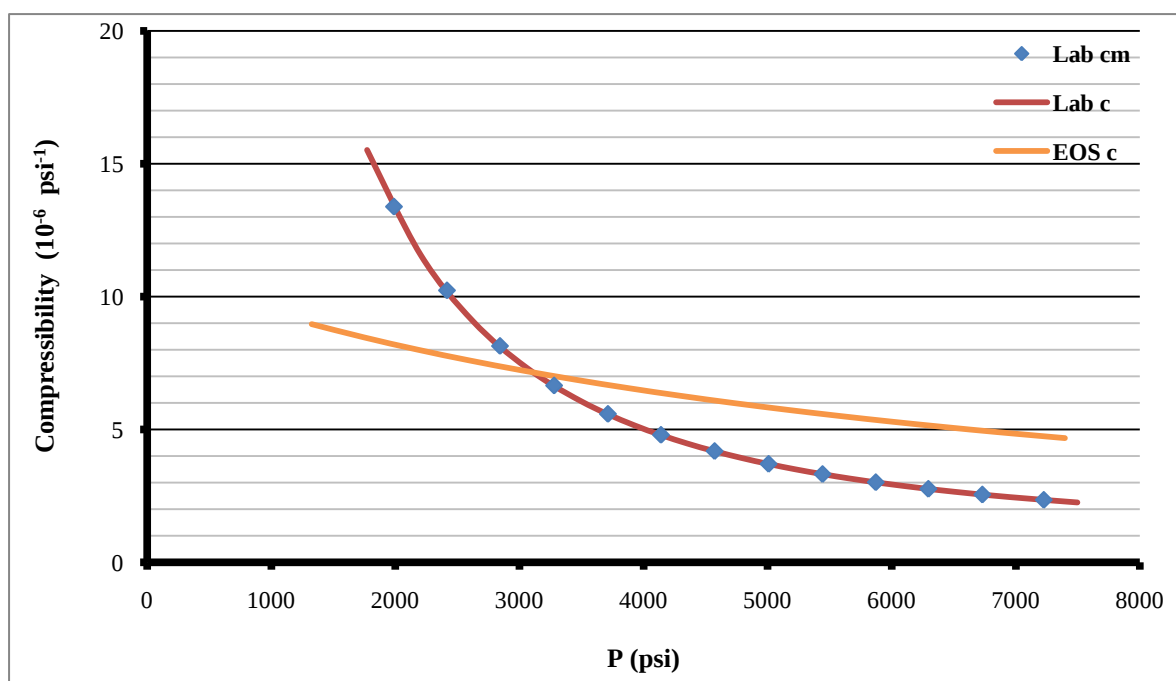
Διάγραμμα 5.59: Γραμμομοριακός όγκος του μείγματος 87% τολουένιο – 13% μεθάνιο σε διαφορετικές θερμοκρασίες

Στα Διαγράμματα 5.56-5.58 παρατηρείται η μέγιστη απόκλιση μεταξύ των δυο καμπυλών να είναι στη θερμοκρασία περιβάλλοντος.

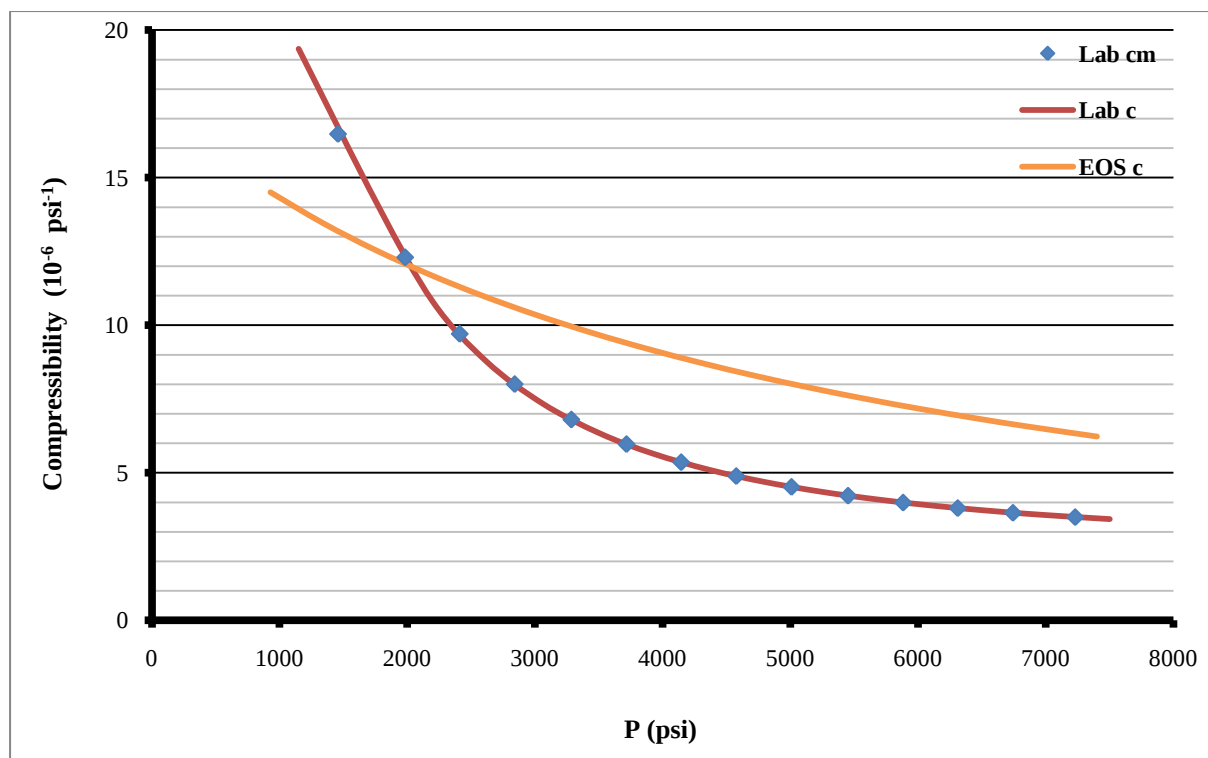
Στα Διαγράμματα 5.60 – 5.62 παρουσιάζονται οι τιμές της ισοθερμοκρασιακής συμπιεστότητας για τις θερμοκρασίες 28°C, 50°C και 90°C. Σε κάθε διάγραμμα παρουσιάζονται οι πειραματικές τιμές και οι τιμές που υπολογίζονται με χρήση της κυβικής καταστατικής των Peng-Robinson (PR).



Διάγραμμα 5.60: Ισοθερμοκρασιακή συμπιεστότητα του μείγματος 87% τολουένιο – 13% μεθάνιο στους 28°C



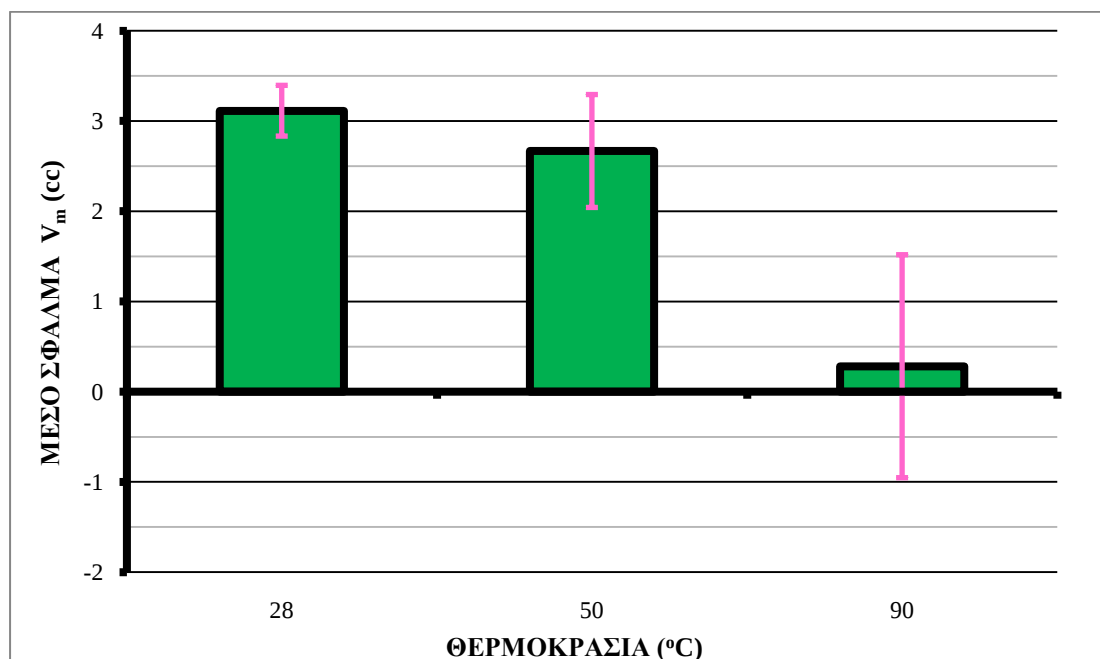
Διάγραμμα 5.61: Ισοθερμοκρασιακή συμπιεστότητα του μείγματος 87% τολουένιο – 13% μεθάνιο στους 50°C



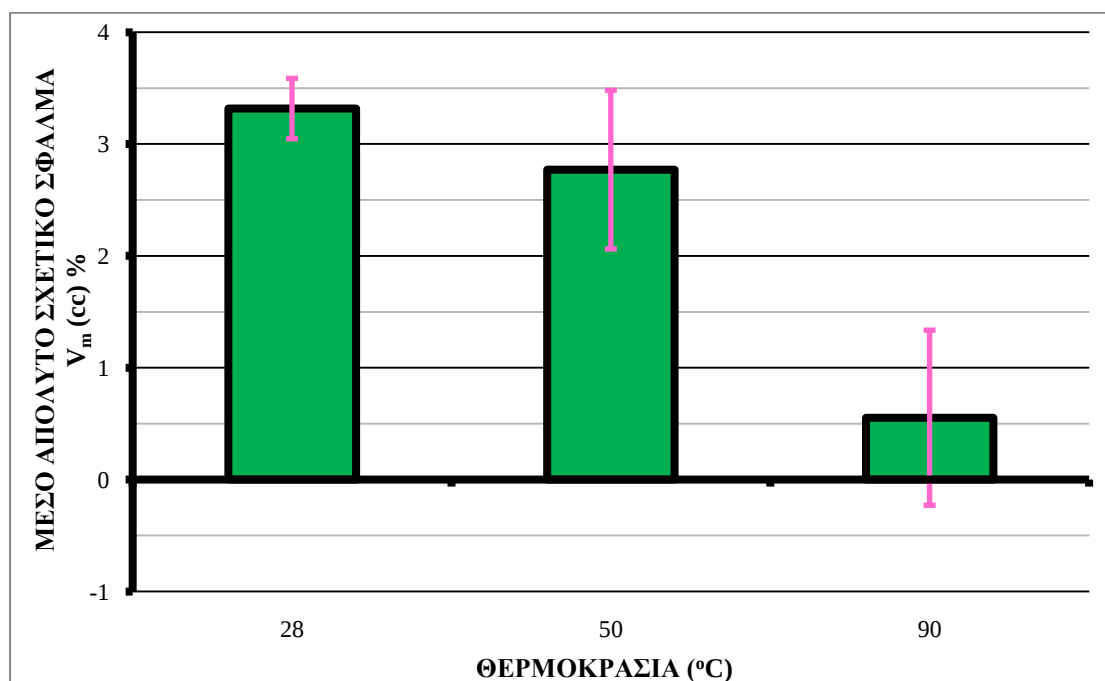
Διάγραμμα 5.62: Ισοθερμοκρασιακή συμπιεστότητα του μείγματος 87% τολουένιο – 13% μεθάνιο στους 90°C

Στα Διαγράμματα 5.60 – 5.62 παρατηρείται απόκλιση μεταξύ των δυο καμπυλών με την αύξηση της πίεσης και της θερμοκρασίας. Επίσης παρατηρείται να αυξάνει η κλίση της καμπύλης των πειραματικών τιμών με την αύξηση της θερμοκρασίας. Επίσης παρατηρείται ότι η καμπύλη της καταστατικής εξίσωσης των PR παρουσιάζει πολύ μικρή καμπυλότητα, είναι σχεδόν ευθεία, η καμπυλότητά της αυξάνει με την αύξηση της θερμοκρασίας. Ένας λόγος μπορεί να είναι επειδή το τολουένιο έχει μεγάλη πυκνότητα.

Στα Διαγράμματα 5.63 – 5.64 παρουσιάζεται το μέσο σφάλμα και το μέσο απόλυτο σχετικό σφάλμα του γραμμομοριακού όγκου μεταξύ των πειραματικών και των τιμών που υπολογίζονται από την καταστατική εξίσωση των Peng-Robinson αντίστοιχα.

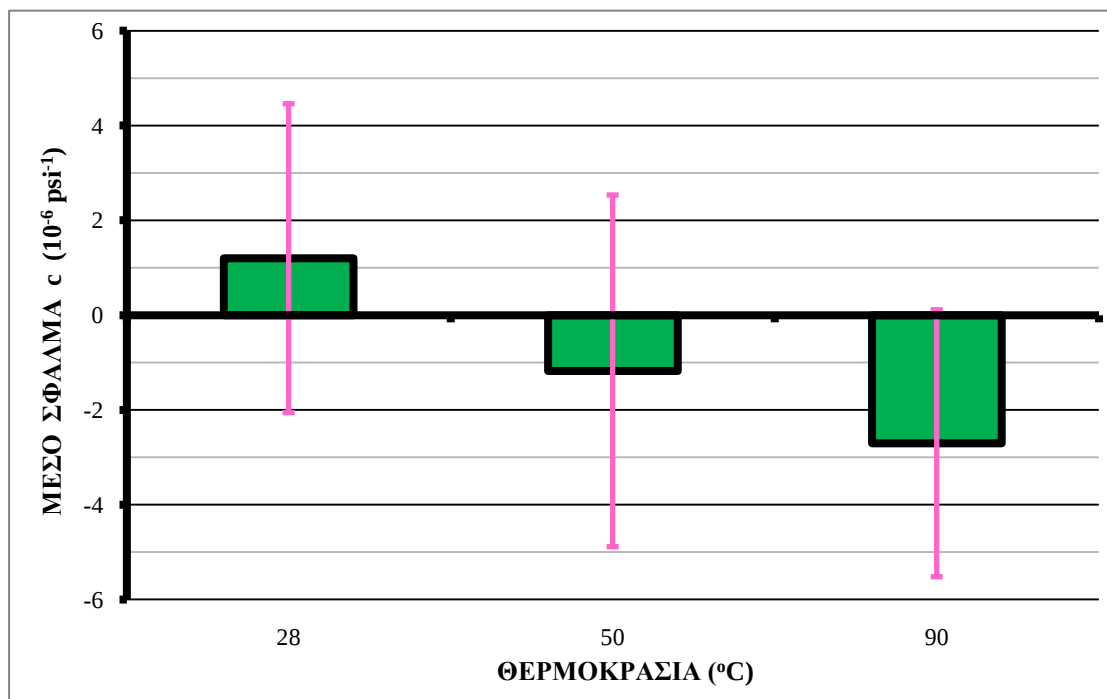


Διάγραμμα 5.63: Μέσο σφάλμα μέτρησης του γραμμομοριακού όγκου του μείγματος 87% τολουένιο – 13% μεθάνιο ως προς των πειραματικών τιμών και των τιμών της καταστατικής εξίσωσης των PR για τις θερμοκρασίες των πειραμάτων

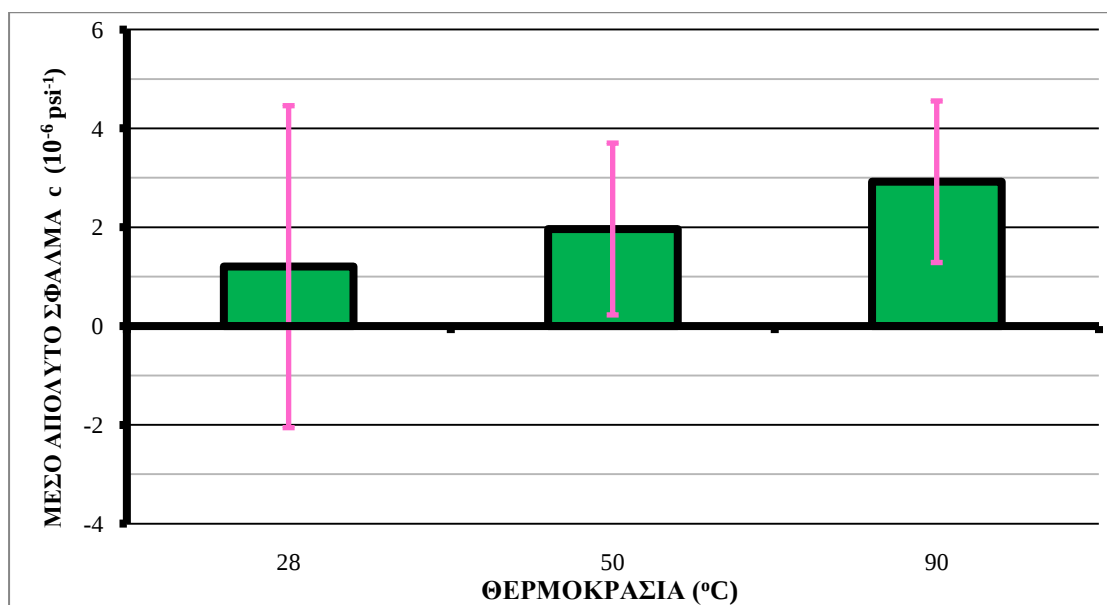


Διάγραμμα 5.64: Μέσο απόλυτο σχετικό σφάλμα μέτρησης του γραμμομοριακού όγκου του μείγματος 87% τολουένιο – 13% μεθάνιο ως προς των πειραματικών τιμών και των τιμών της καταστατικής εξίσωσης των PR για τις θερμοκρασίες των πειραμάτων

Στα Διαγράμματα 5.65 – 5.66 παρουσιάζεται το μέσο σφάλμα και το μέσο απόλυτο σφάλμα της ισοθερμοκρασιακής συμπιεστότητας μεταξύ των πειραματικών και των τιμών που υπολογίζονται από την καταστατική εξίσωση των Peng-Robinson αντίστοιχα.



Διάγραμμα 5.65: Μέσο σφάλμα μέτρησης της ισοθερμοκρασιακής συμπιεστότητας του μείγματος 87% τολουένιο – 13% μεθάνιο ως προς των πειραματικών τιμών και των τιμών της καταστατικής εξίσωσης των PR για τις θερμοκρασίες των πειραμάτων

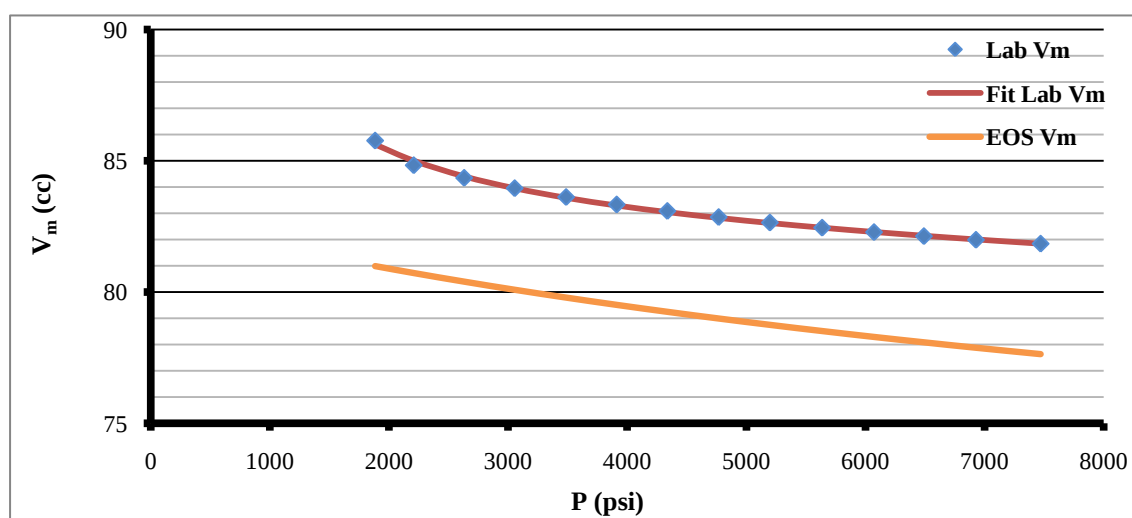


Διάγραμμα 5.66: Μέσο απόλυτο σφάλμα μέτρησης της ισοθερμοκρασιακής συμπιεστότητας του μείγματος 87% τολουένιο – 13% μεθάνιο ως προς των πειραματικών τιμών και των τιμών της καταστατικής εξίσωσης των PR για τις θερμοκρασίες των πειραμάτων

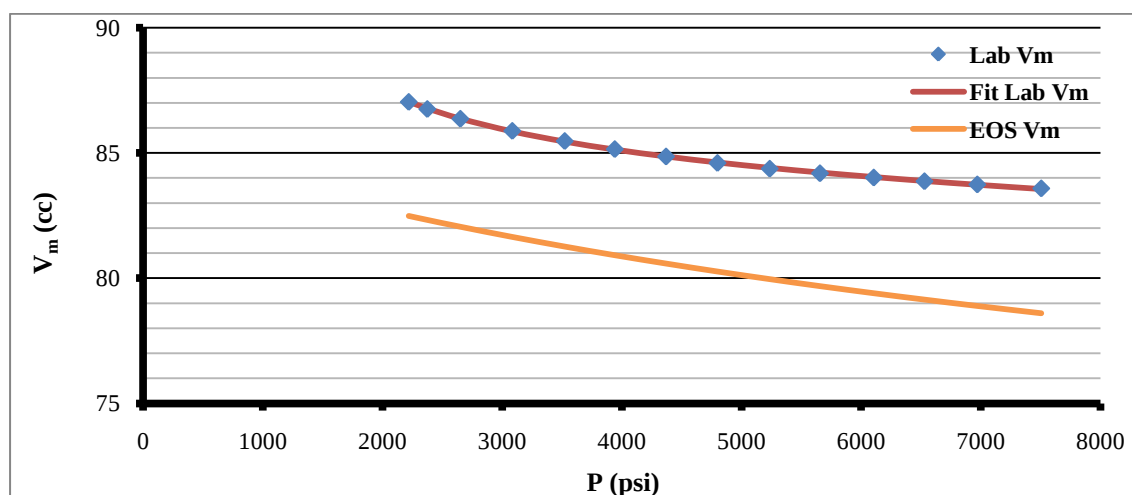
5.3.4 Μείγμα 70% τολουένιο – 30% μεθάνιο

Στα Διαγράμματα 5.67 – 5.69 παρουσιάζονται οι τιμές του γραμμομοριακού όγκου για τις θερμοκρασίες 28°C, 50°C και 90°C. Σε κάθε διάγραμμα παρουσιάζονται οι πειραματικές τιμές και οι τιμές που υπολογίζονται με χρήση της κυβικής καταστατικής των Peng-Robinson (PR).

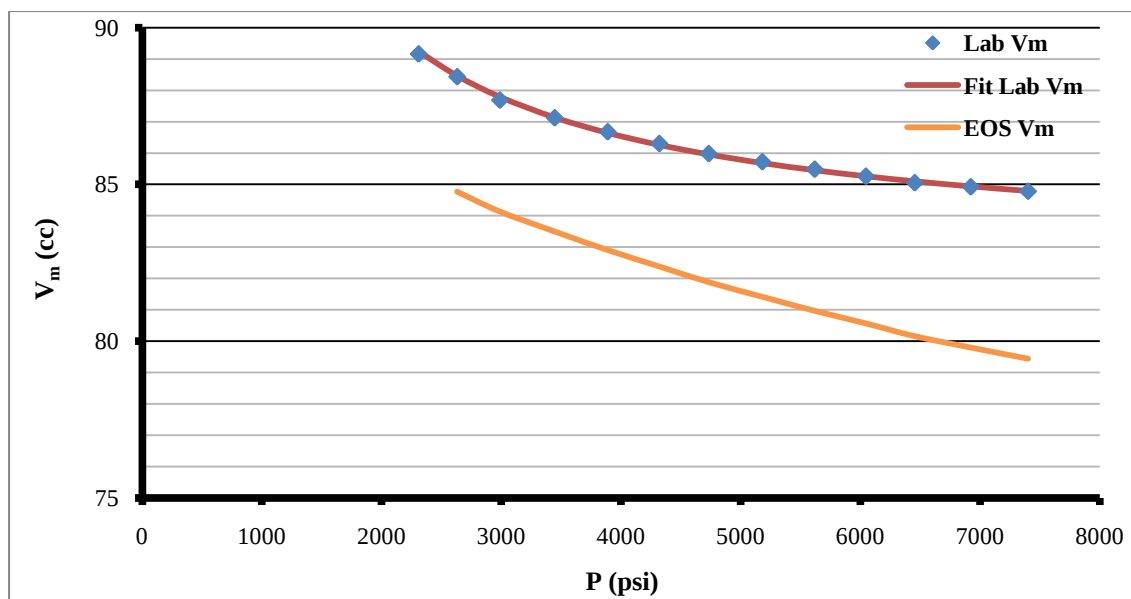
Για το μείγμα 70% τολουένιο – 30% μεθάνιο υπολογίστηκε ότι η διόρθωση που πρέπει να γίνει στον όγκο, που δίνει η καταστατική εξίσωση, με βάση την τεχνική προσθετικής διόρθωσης όγκου καταστατικής εξίσωσης (volume translation), για τους 28°C είναι της τάξης των 6,0 cc που αντιστοιχεί σε 7,4% της αρχικής πρόβλεψης της καταστατικής εξίσωσης, για τους 50°C είναι της τάξης των 6,5 cc που αντιστοιχεί σε 7,8% της αρχικής πρόβλεψης της καταστατικής εξίσωσης και για τους 90°C είναι της τάξης των 9,0cc που αντιστοιχεί σε 10,5% της αρχικής πρόβλεψης της καταστατικής εξίσωσης.



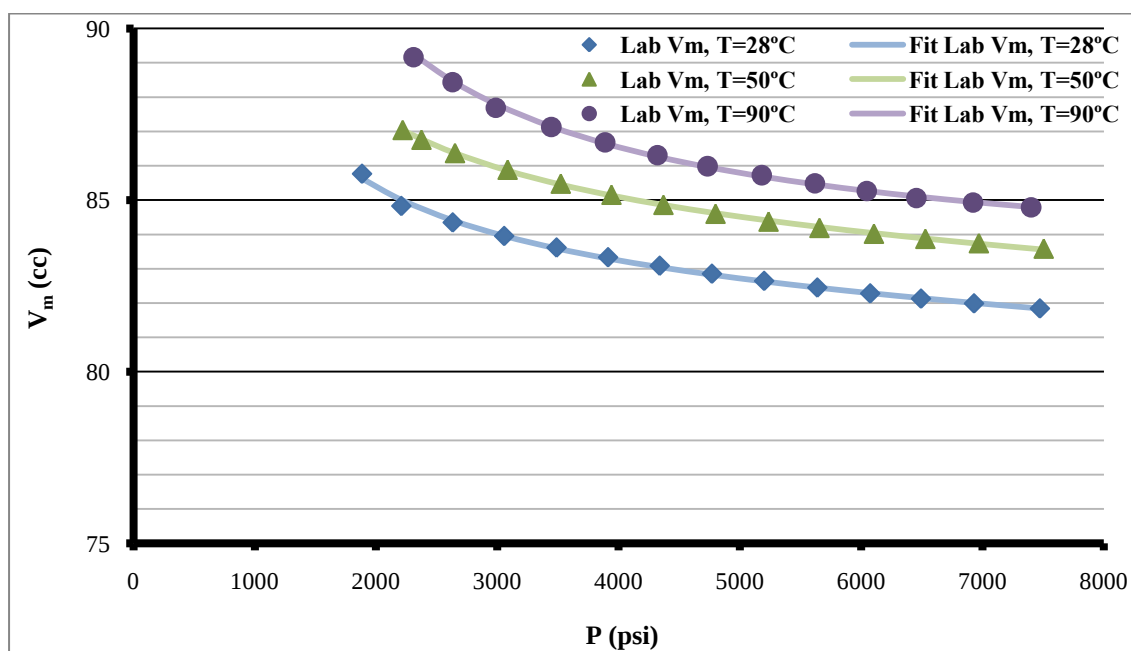
Διάγραμμα 5.67: Γραμμομοριακός όγκος του μείγματος 70% τολουένιο – 30% μεθάνιο στους 28°C



Διάγραμμα 5.68: Γραμμομοριακός όγκος του μείγματος 70% τολουένιο – 30% μεθάνιο στους 50°C



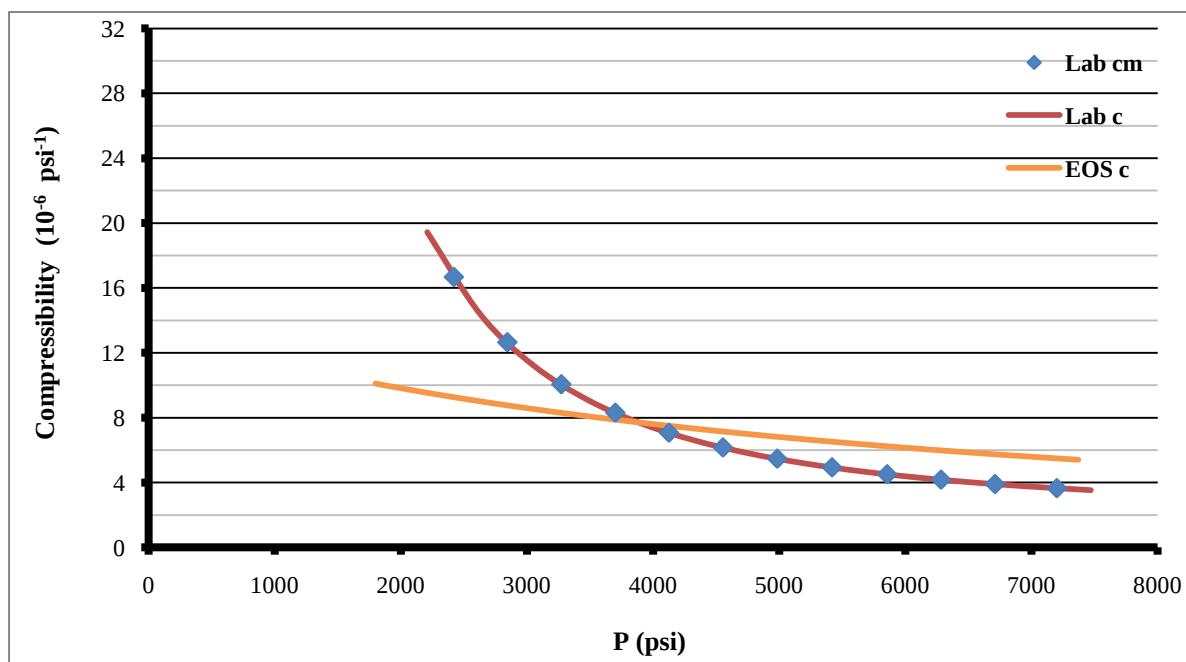
Διάγραμμα 5.69: Γραμμομοριακός όγκος του μείγματος 70% τολουένιο – 30% μεθάνιο στους 90°C



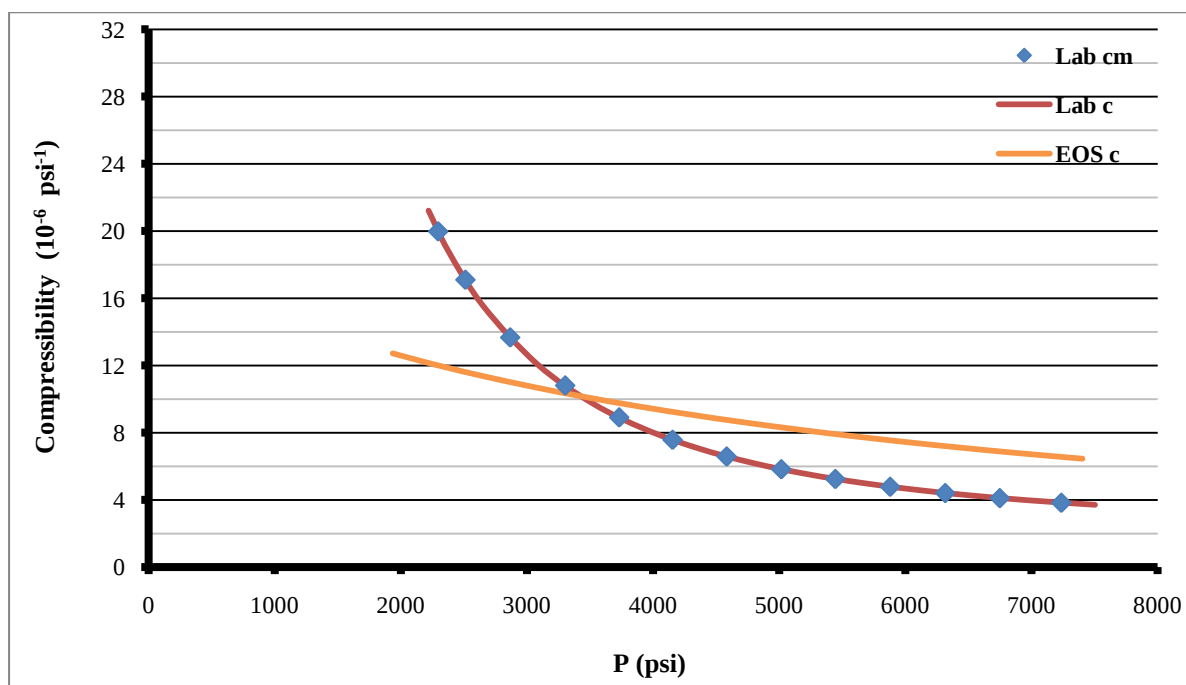
Διάγραμμα 5.70: Γραμμομοριακός όγκος του μείγματος 70% τολουένιο – 30% μεθάνιο σε διαφορετικές θερμοκρασίες

Στα Διαγράμματα 5.67-5.69 παρατηρείται απόκλιση μεταξύ των δυο καμπυλών με την αύξηση της πίεσης και της θερμοκρασίας. Επίσης παρατηρείται ότι η καμπύλη της καταστατικής εξίσωσης των PR παρουσιάζει πολύ μικρή καμπυλότητα, είναι σχεδόν ευθεία, η καμπυλότητά της αυξάνει με την αύξηση της θερμοκρασίας. Ένας λόγος μπορεί να είναι επειδή το τολουένιο έχει μεγάλη πυκνότητα.

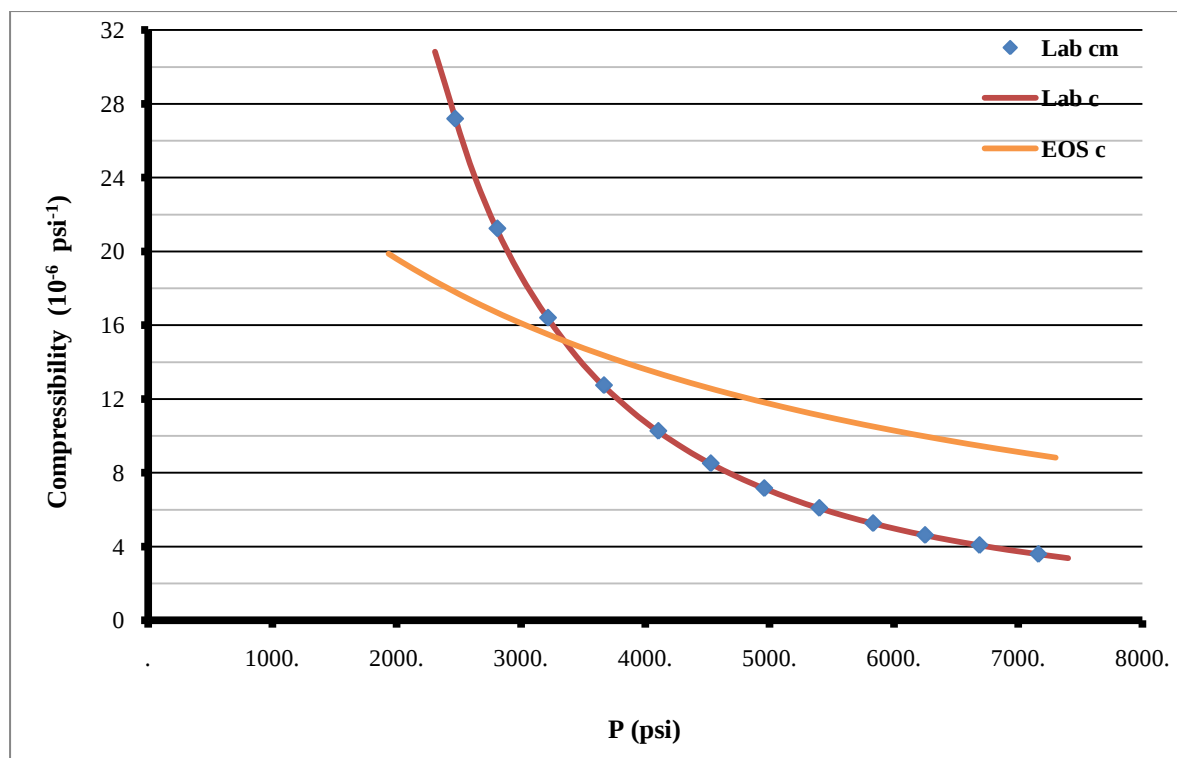
Στα Διαγράμματα 5.71 – 5.73 παρουσιάζονται οι τιμές της ισοθερμοκρασιακής συμπιεστότητας για τις θερμοκρασίες 28°C, 50°C και 90°C. Σε κάθε διάγραμμα παρουσιάζονται οι πειραματικές τιμές και οι τιμές που υπολογίζονται με χρήση της κυβικής καταστατικής των Peng-Robinson (PR).



Διάγραμμα 5.71: Ισοθερμοκρασιακή συμπιεστότητα του μείγματος 70% τολουένιο – 30% μεθάνιο στους 28°C



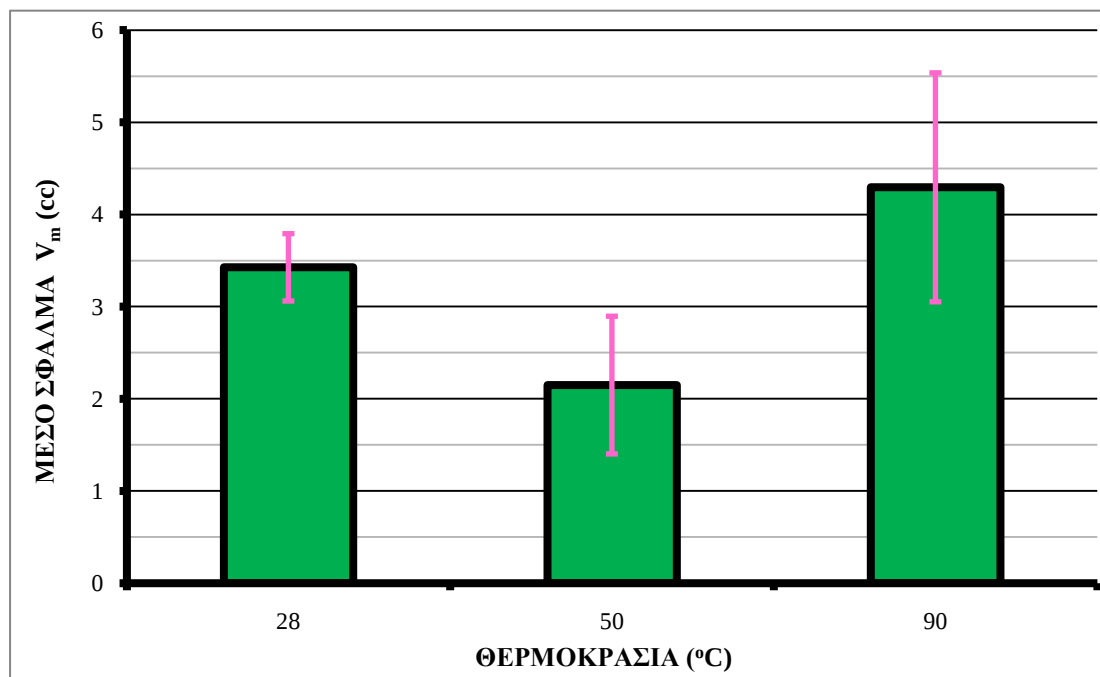
Διάγραμμα 5.72: Ισοθερμοκρασιακή συμπιεστότητα του μείγματος 70% τολουένιο – 30% μεθάνιο στους 50°C



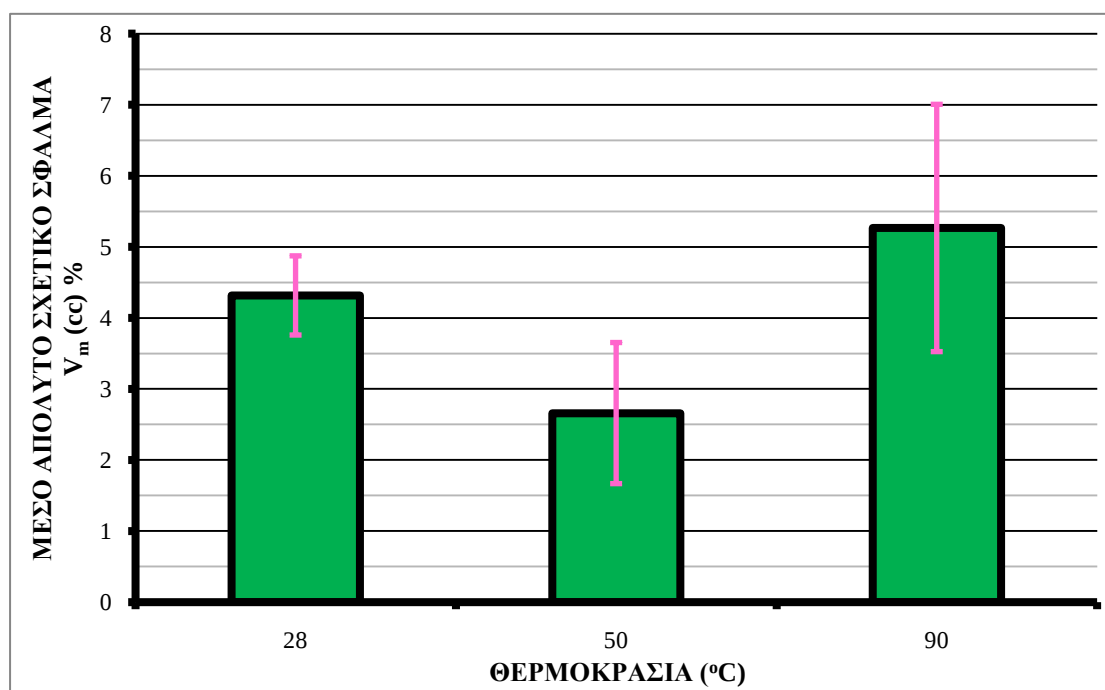
Διάγραμμα 5.73: Ισοθερμοκρασιακή συμπιεστότητα του μείγματος 70% τολουένιο – 30% μεθάνιο στους 90°C

Στα Διαγράμματα 5.71-5.73 παρατηρείται απόκλιση μεταξύ των δυο καμπυλών με την αύξηση της πίεσης και της θερμοκρασίας. Επίσης παρατηρείται ότι η καμπύλη της καταστατικής εξίσωσης των PR παρουσιάζει πολύ μικρή καμπυλότητα, είναι σχεδόν ευθεία, η καμπυλότητά της αυξάνει με την αύξηση της θερμοκρασίας. Ένας λόγος μπορεί να είναι επειδή το τολουένιο έχει μεγάλη πυκνότητα.

Στα Διαγράμματα 5.74 – 5.75 παρουσιάζεται το μέσο σφάλμα και το μέσο απόλυτο σχετικό σφάλμα του γραμμομοριακού όγκου μεταξύ των πειραματικών και των τιμών που υπολογίζονται από την καταστατική εξίσωση των Peng-Robinson αντίστοιχα.

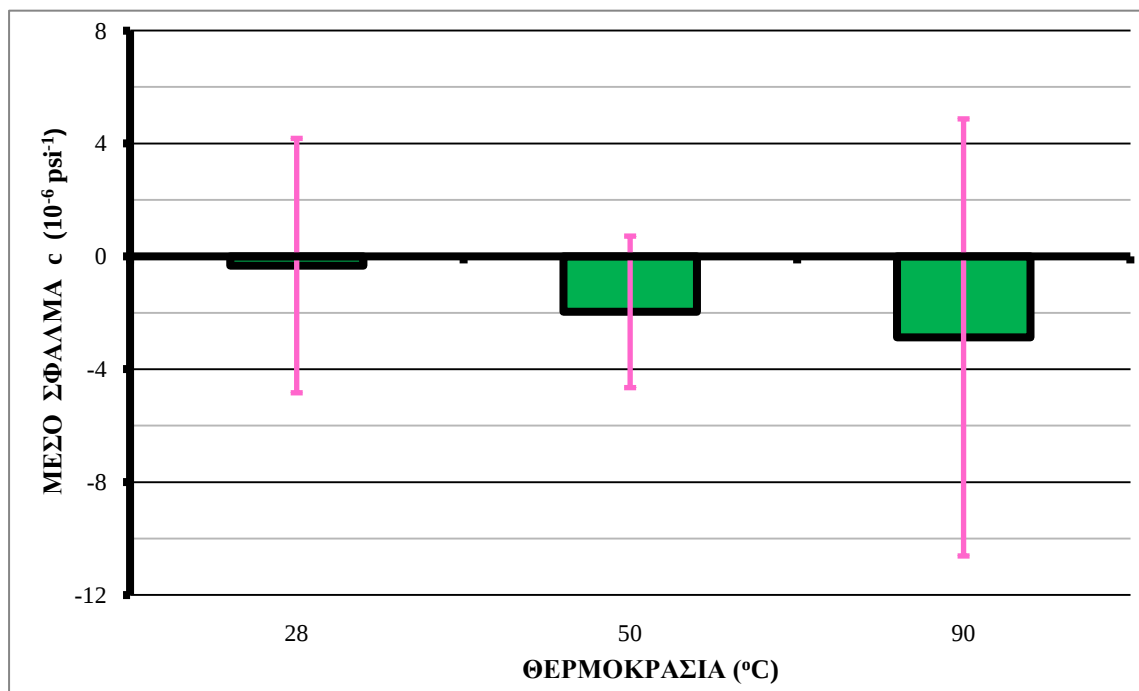


Διάγραμμα 5.74: Μέσο σφάλμα μέτρησης του γραμμομοριακού όγκου του μείγματος 70% τολουένιο – 30% μεθάνιο ως προς των πειραματικών τιμών και των τιμών της καταστατικής εξίσωσης των PR για τις θερμοκρασίες των πειραμάτων

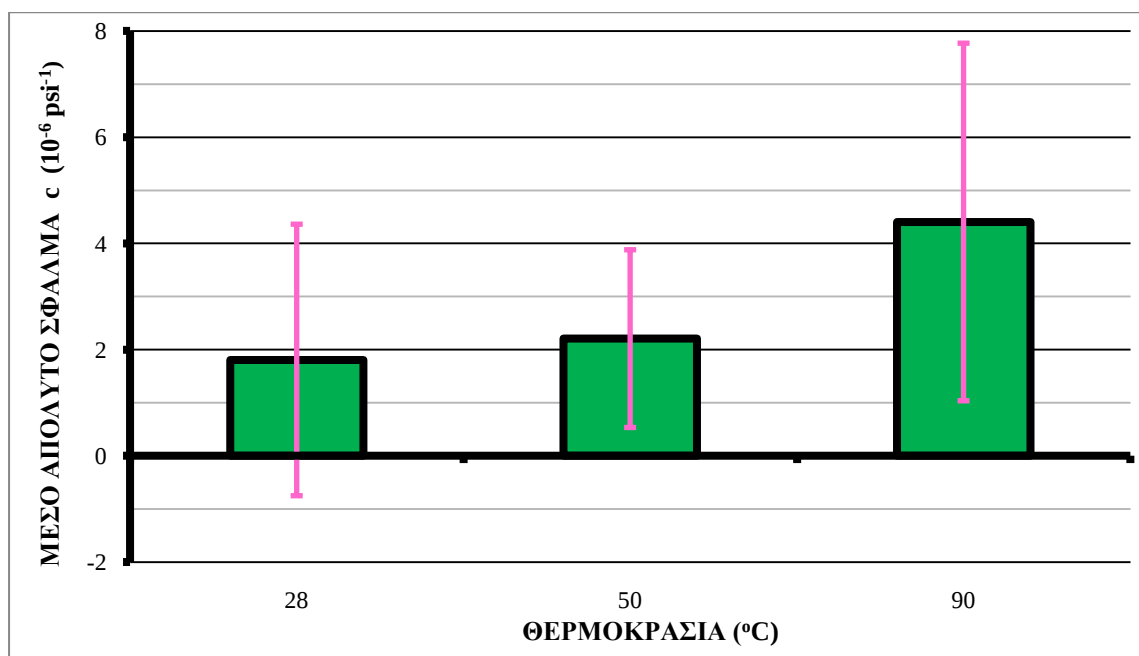


Διάγραμμα 5.75: Μέσο απόλυτο σχετικό σφάλμα μέτρησης του γραμμομοριακού όγκου του μείγματος 70% τολουένιο – 30% μεθάνιο ως προς των πειραματικών τιμών και των τιμών της καταστατικής εξίσωσης των PR για τις θερμοκρασίες των πειραμάτων

Στα Διαγράμματα 5.76– 5.77 παρουσιάζεται το μέσο σφάλμα και το μέσο απόλυτο σφάλμα της ισοθερμοκρασιακής συμπιεστότητας μεταξύ των πειραματικών και των τιμών που υπολογίζονται από την καταστατική εξίσωση των Peng-Robinson αντίστοιχα.



Διάγραμμα 5.76: Μέσο σφάλμα μέτρησης της ισοθερμοκρασιακής συμπιεστότητας του μείγματος 70% τολουένιο – 30% μεθάνιο ως προς των πειραματικών τιμών και των τιμών της καταστατικής εξίσωσης των PR για τις θερμοκρασίες των πειραμάτων

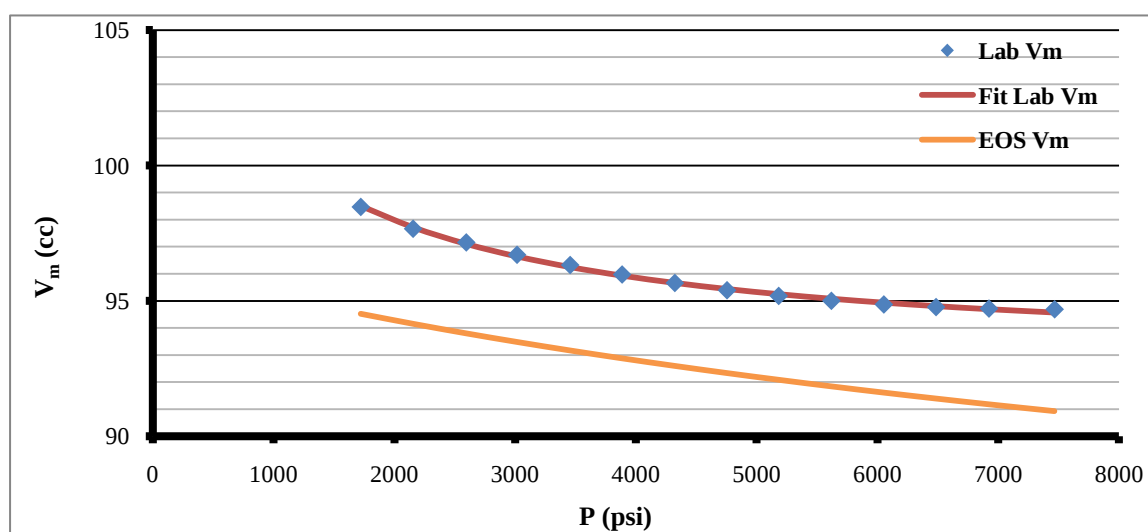


Διάγραμμα 5.77: Μέσο απόλυτο σφάλμα μέτρησης της ισοθερμοκρασιακής συμπιεστότητας του μείγματος 70% τολουένιο – 30% μεθάνιο ως προς των πειραματικών τιμών και των τιμών της καταστατικής εξίσωσης των PR για τις θερμοκρασίες των πειραμάτων

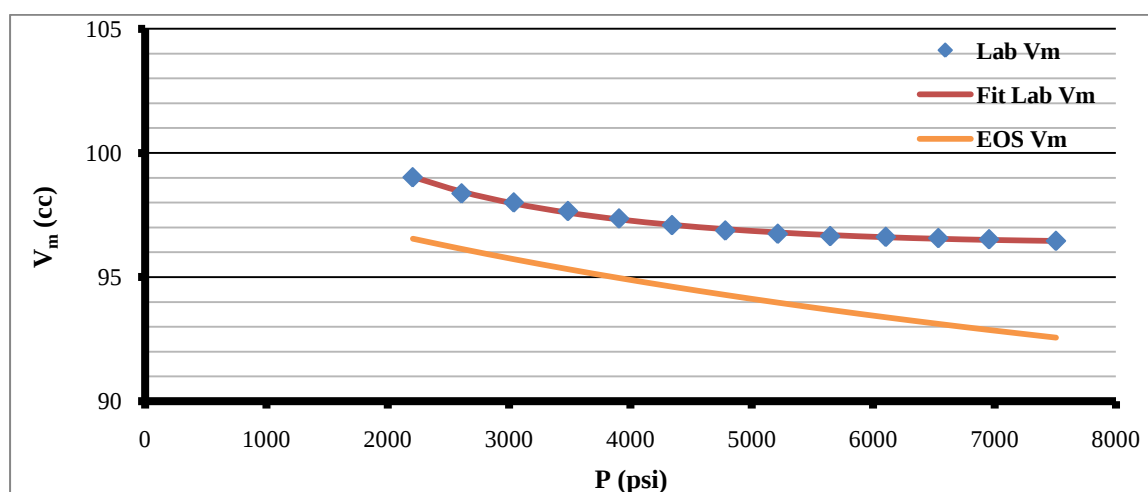
5.3.5 Μείγμα 86% κυκλοεξάνιο – 14% μεθάνιο

Στα Διαγράμματα 5.78 – 5.80 παρουσιάζονται οι τιμές του γραμμομοριακού όγκου για τις θερμοκρασίες 28°C, 50°C και 90°C. Σε κάθε διάγραμμα παρουσιάζονται οι πειραματικές τιμές και οι τιμές που υπολογίζονται με χρήση της κυβικής καταστατικής των Peng-Robinson (PR).

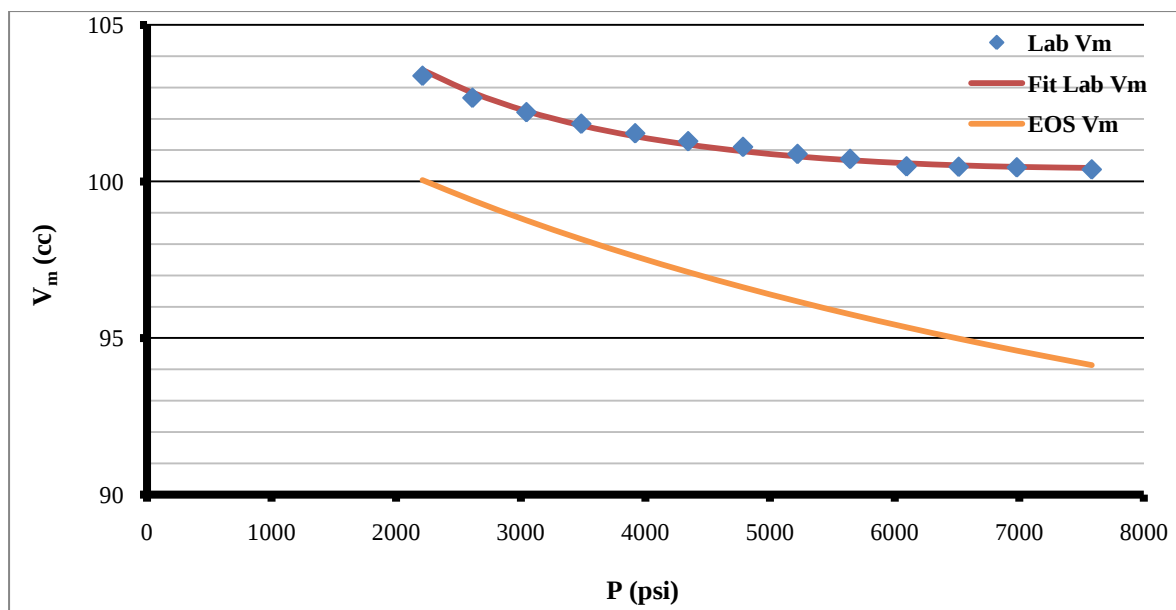
Για το μείγμα 86% κυκλοεξάνιο – 14% μεθάνιο υπολογίστηκε ότι η διόρθωση που πρέπει να γίνει στον όγκο, που δίνει η καταστατική εξίσωση, με βάση την τεχνική προσθετικής διόρθωσης όγκου καταστατικής εξίσωσης (volume translation), για τους 28°C είναι της τάξης των 0,9 cc που αντιστοιχεί σε 0,9% της αρχικής πρόβλεψης της καταστατικής εξίσωσης, για τους 50°C είναι της τάξης των 1,1 cc που αντιστοιχεί σε 1,1% της αρχικής πρόβλεψης της καταστατικής εξίσωσης και για τους 90°C είναι της τάξης των 0,1 cc που αντιστοιχεί σε 0,1% της αρχικής πρόβλεψης της καταστατικής εξίσωσης.



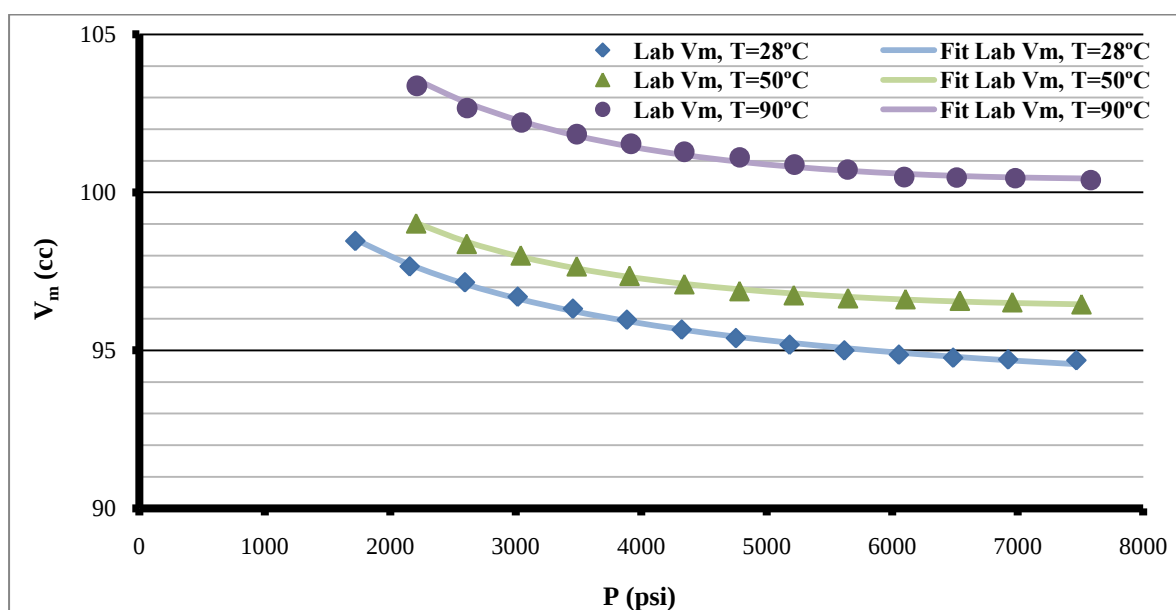
Διάγραμμα 5.78 Γραμμομοριακός όγκος του μείγματος 86% κυκλοεξάνιο – 14% μεθάνιο στους 28°C



Διάγραμμα 5.79: Γραμμομοριακός όγκος του μείγματος 86% κυκλοεξάνιο – 14% μεθάνιο στους 50°C



Διάγραμμα 5.80: Γραμμομοριακός όγκος του μείγματος 86% κυκλοεξάνιο – 14% μεθάνιο στους 90°C

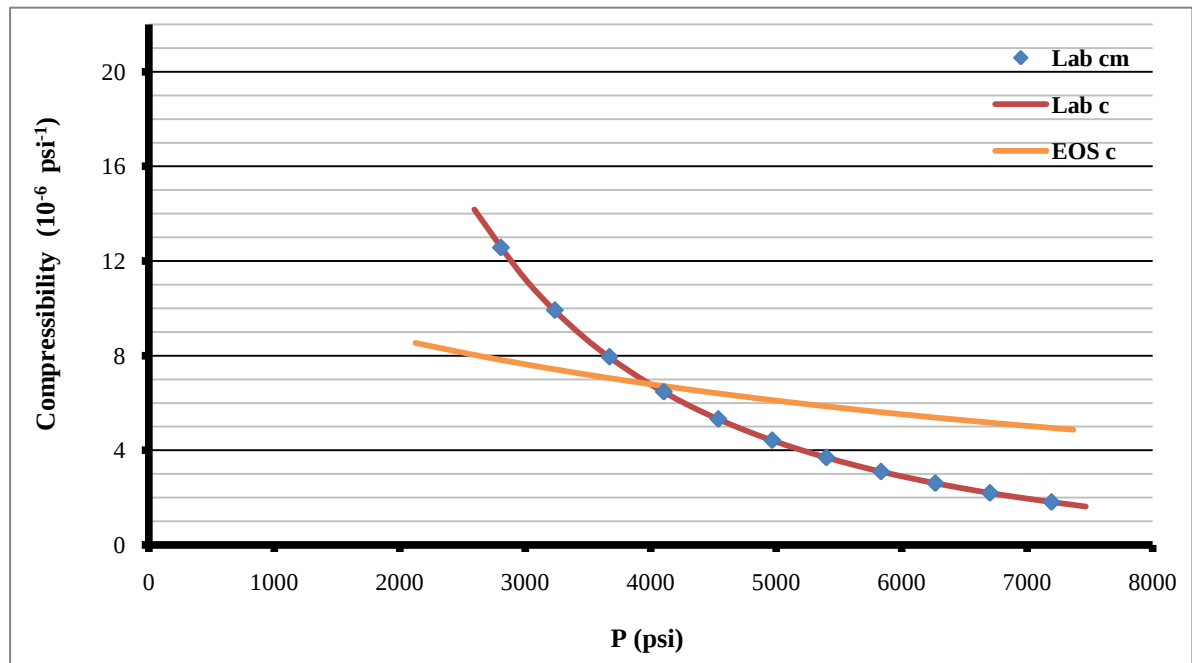


Διάγραμμα 5.81: Γραμμομοριακός όγκος του μείγματος 86% κυκλοεξάνιο – 14% μεθάνιο σε διαφορετικές θερμοκρασίες

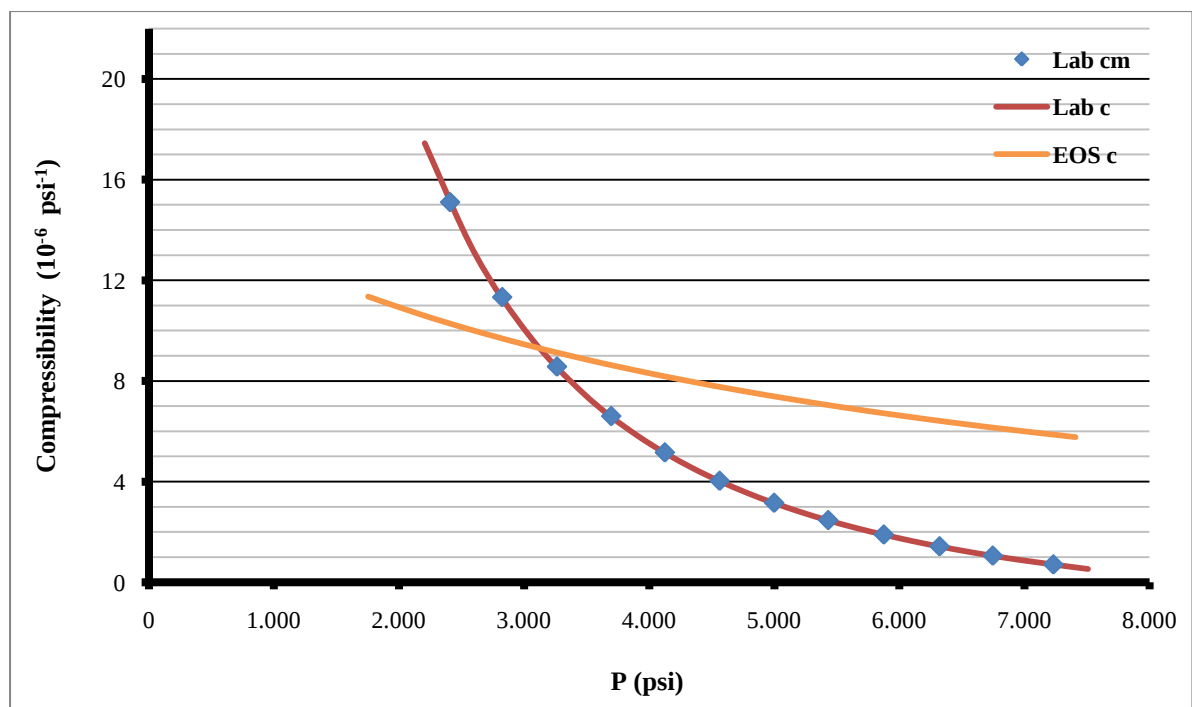
Στα Διαγράμματα 5.78-5.80 παρατηρείται απόκλιση μεταξύ των δυο καμπυλών με την αύξηση της πίεσης και της θερμοκρασίας.

Στο Διάγραμμα 5.81 παρατηρείται ότι οι πειραματικές τιμές του γραμμομοριακού όγκου στις μέγιστες πιέσεις, από τα 5000 psi και μέχρι τη μέγιστη πίεση, είναι σχεδόν ίσες. Σημαίνει ότι το τολουένιο έχει συμπιεστεί τόσο πολύ που ο όγκος που εισπνέζει η αντλία κάθε φορά είναι ολόένα και μικρότερος με αποτέλεσμα να αυξάνει το σφάλμα στην εύρεση του όγκου του ρευστού στις μέγιστες πιέσεις.

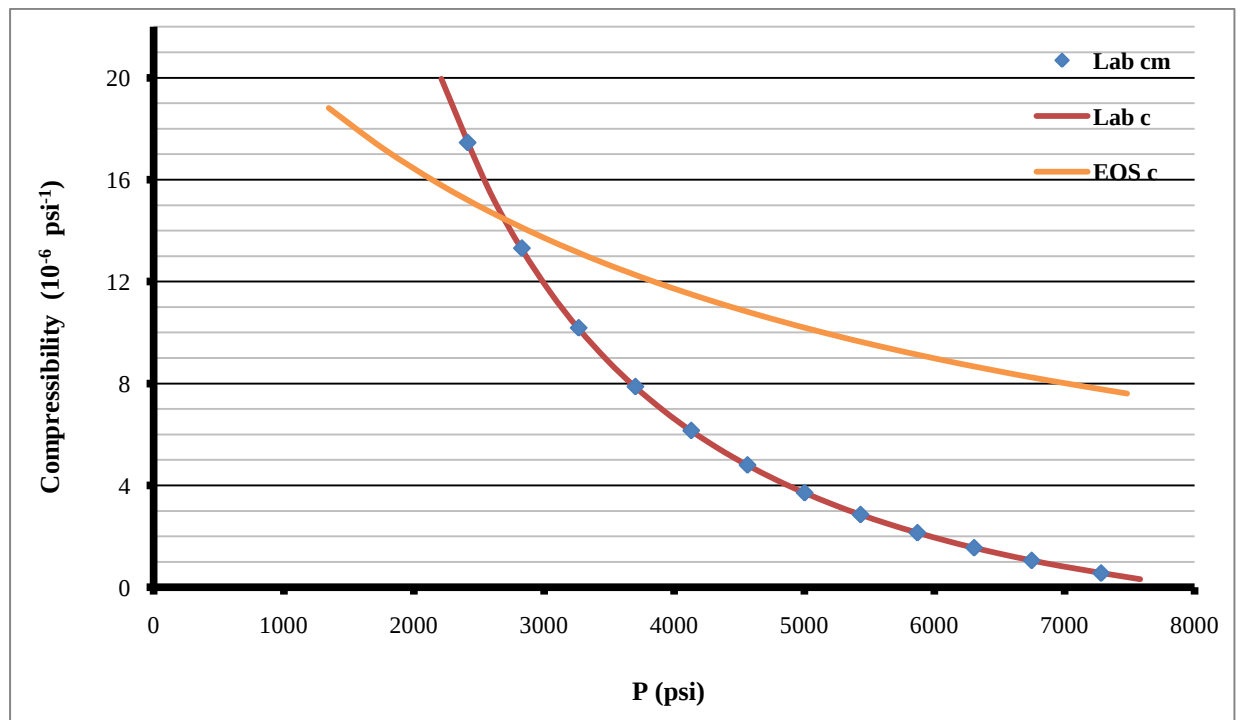
Στα Διαγράμματα 5.82 – 5.84 παρουσιάζονται οι τιμές της ισοθερμοκρασιακής συμπιεστότητας για τις θερμοκρασίες 28°C, 50°C και 90°C. Σε κάθε διάγραμμα παρουσιάζονται οι πειραματικές τιμές και οι τιμές που υπολογίζονται με χρήση της κυβικής καταστατικής των Peng-Robinson (PR).



Διάγραμμα 5.82: Ισοθερμοκρασιακή συμπιεστότητα του μείγματος 86% κυκλοεξάνιο – 14% μεθάνιο στους 28°C



Διάγραμμα 5.83: Ισοθερμοκρασιακή συμπιεστότητα του μείγματος 86% κυκλοεξάνιο – 14% μεθάνιο στους 50°C

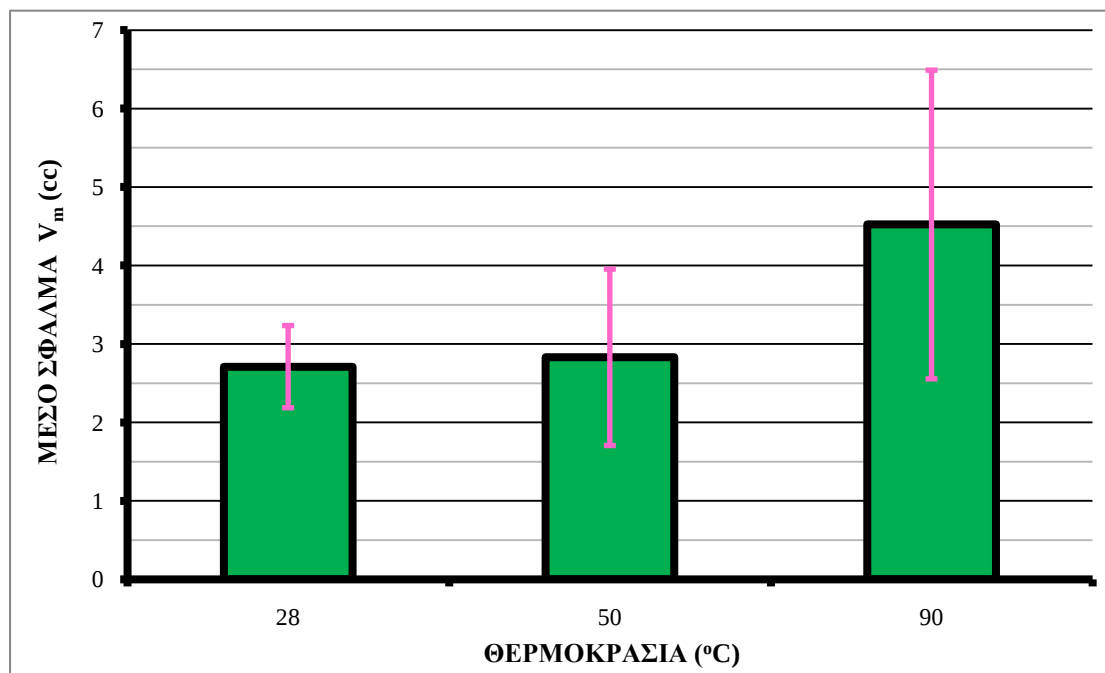


Διάγραμμα 5.84: Ισοθερμοκρασιακή συμπιεστότητα του μείγματος 86% κυκλοεξάνιο – 14% μεθάνιο στους 90°C

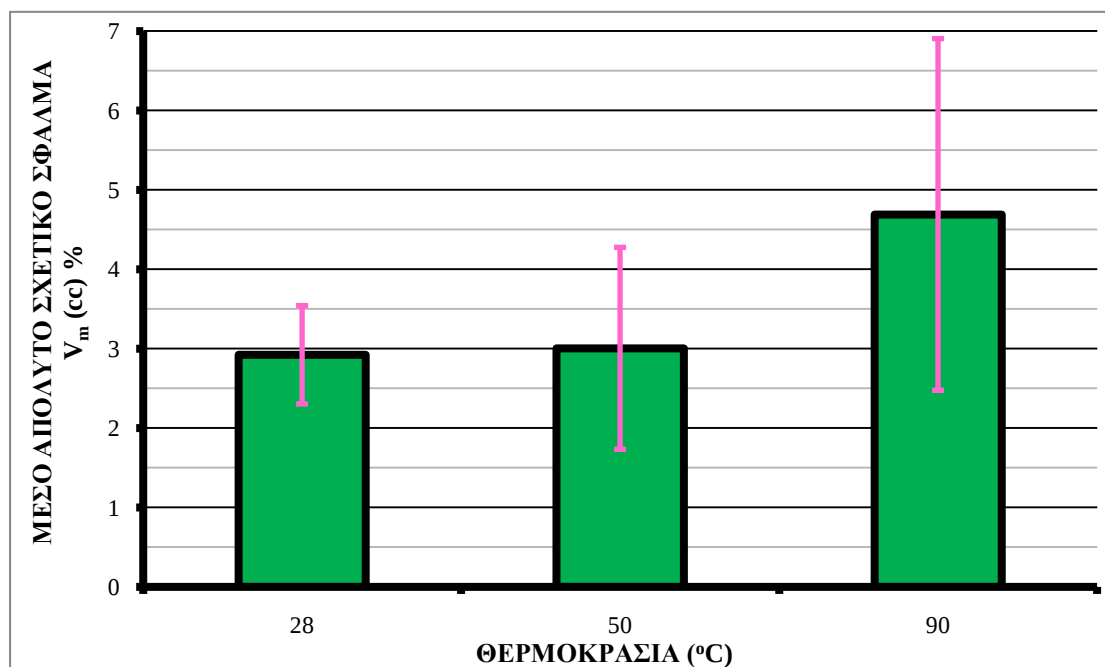
Στα Διαγράμματα 5.82-5.84 παρατηρείται απόκλιση μεταξύ των δυο καμπυλών με την αύξηση της πίεσης και της θερμοκρασίας.

Επίσης παρατηρείται ότι η ισοθερμοκρασιακή συμπιεστότητα παίρνει και αρνητικές τιμές στις μέγιστες πιέσεις κάτι που δεν θα έπρεπε να συμβαίνει. Ο λόγος που γίνεται κάτι τέτοιο είναι διότι ο γραμμομοριακός όγκος στις υψηλές πιέσεις έχει σφάλμα όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως, με αποτέλεσμα να μετατίθεται το σφάλμα και στην ισοθερμοκρασιακή συμπιεστότητα. Έστω και ένα πολύ μικρό σφάλμα στον υπολογισμό του γραμμομοριακού όγκου συνεπάγεται μεγάλο σφάλμα στην ισοθερμοκρασιακή συμπιεστότητα.

Στα Διαγράμματα 5.85 – 5.86 παρουσιάζεται το μέσο σφάλμα και το μέσο απόλυτο σχετικό σφάλμα του γραμμομοριακού όγκου μεταξύ των πειραματικών και των τιμών που υπολογίζονται από την καταστατική εξίσωση των Peng-Robinson αντίστοιχα.

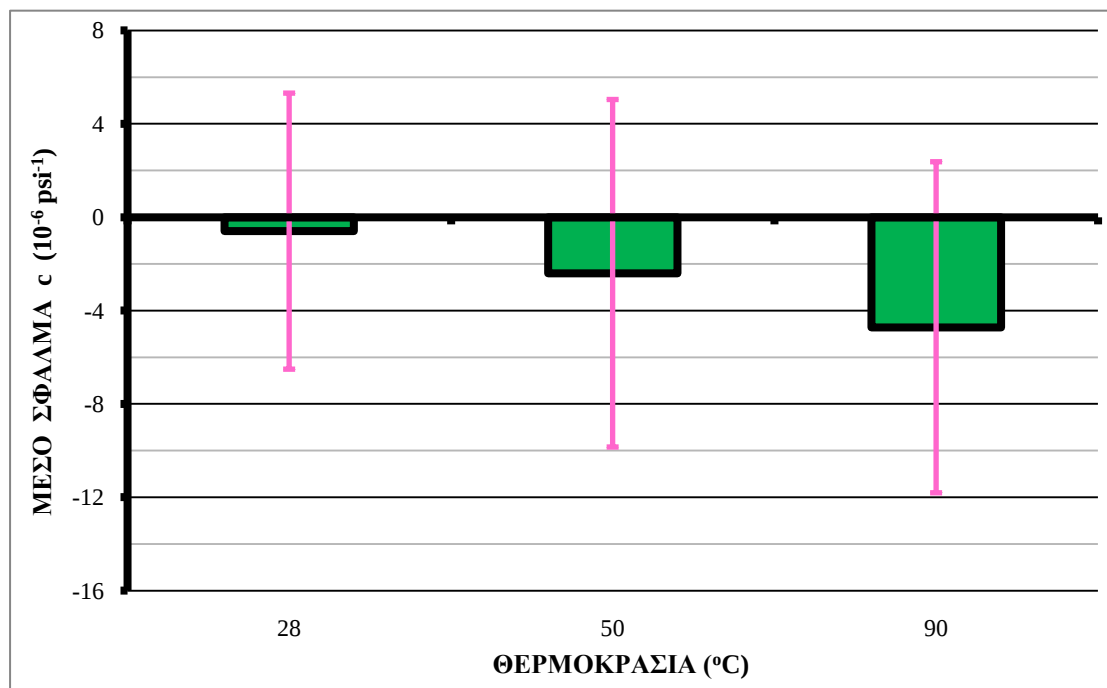


Διάγραμμα 5.85: Μέσο σφάλμα μέτρησης του γραμμομοριακού όγκου του μείγματος 86% κυκλοεξάνιο – 14% μεθάνιο ως προς των πειραματικών τιμών και των τιμών της καταστατικής εξίσωσης των PR για τις θερμοκρασίες των πειραμάτων

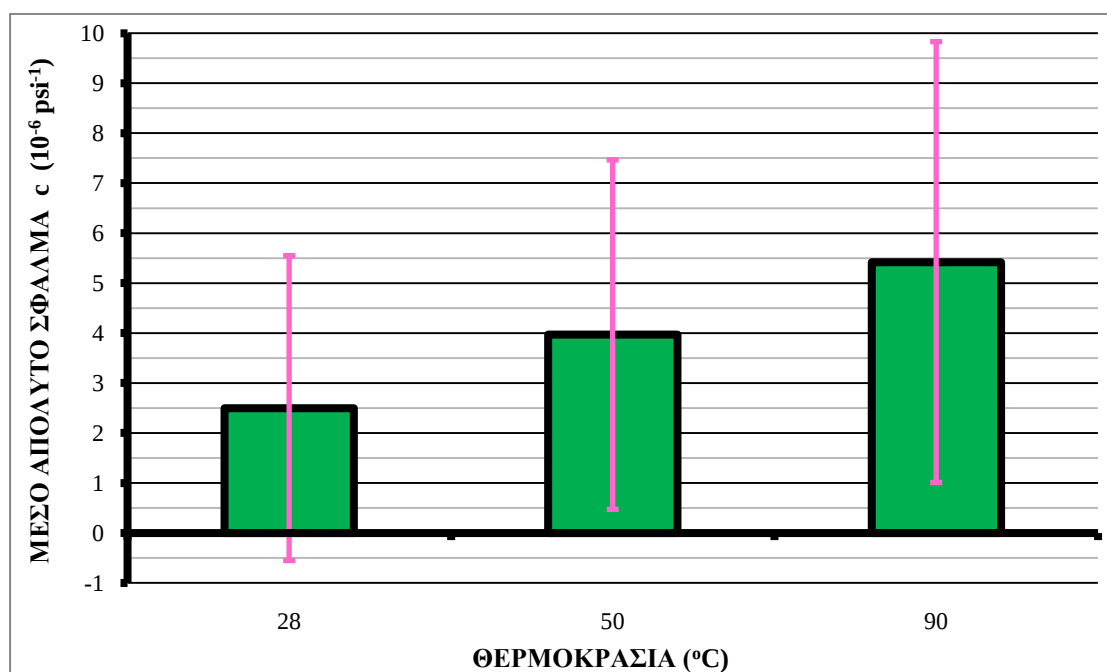


Διάγραμμα 5.86: Μέσο απόλυτο σχετικό σφάλμα μέτρησης του γραμμομοριακού όγκου του μείγματος 86% κυκλοεξάνιο – 14% μεθάνιο ως προς των πειραματικών τιμών και των τιμών της καταστατικής εξίσωσης των PR για τις θερμοκρασίες των πειραμάτων

Στα Διαγράμματα 5.87 – 5.88 παρουσιάζεται το μέσο σφάλμα και το μέσο απόλυτο σφάλμα της ισοθερμοκρασιακής συμπεστότητας μεταξύ των πειραματικών και των τιμών που υπολογίζονται από την καταστατική εξίσωση των Peng-Robinson αντίστοιχα.



Διάγραμμα 5.87: Μέσο σφάλμα μέτρησης της ισοθερμοκρασιακής συμπεστότητας του 86% κυκλοεξάνιο – 14% μεθάνιο ως προς των πειραματικών τιμών και των τιμών της καταστατικής εξίσωσης των PR για τις θερμοκρασίες των πειραμάτων

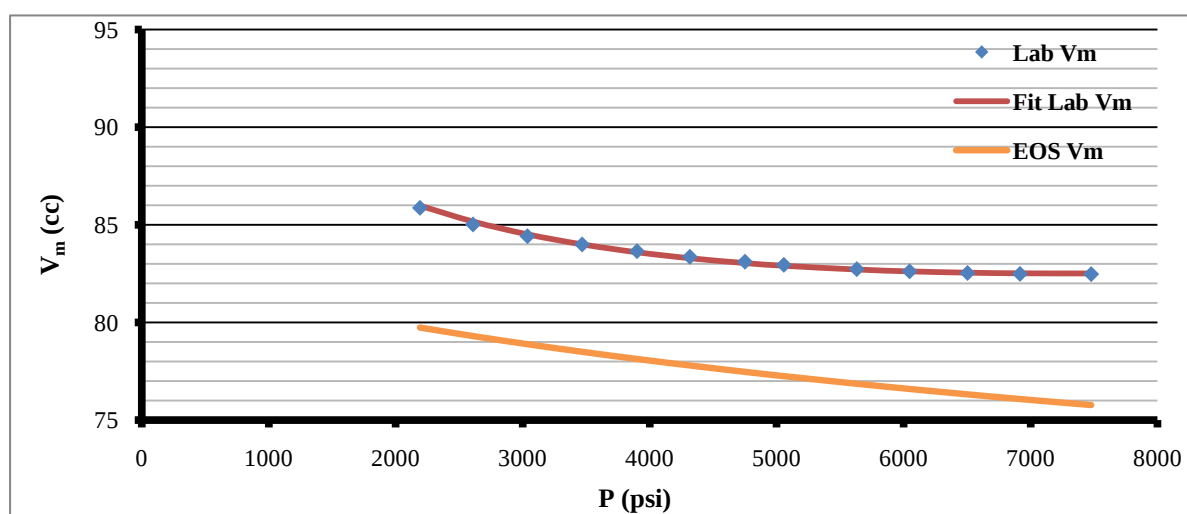


Διάγραμμα 5.88: Μέσο απόλυτο σφάλμα μέτρησης της ισοθερμοκρασιακής συμπεστότητας του μείγματος 86% κυκλοεξάνιο – 14% μεθάνιο ως προς των πειραματικών τιμών και των τιμών της καταστατικής εξίσωσης των PR για τις θερμοκρασίες των πειραμάτων

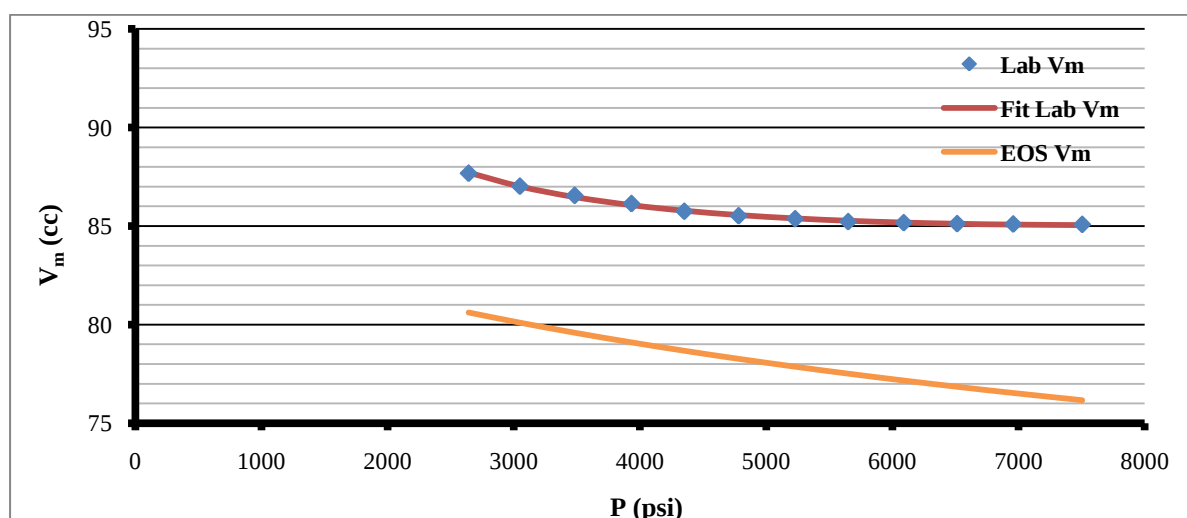
5.3.6 Μείγμα 68% κυκλοεξάνιο – 32% μεθάνιο

Στα Διαγράμματα 5.89 – 5.91 παρουσιάζονται οι τιμές του γραμμομοριακού όγκου για τις θερμοκρασίες 28°C, 50°C και 90°C. Σε κάθε διάγραμμα παρουσιάζονται οι πειραματικές τιμές και οι τιμές που υπολογίζονται με χρήση της κυβικής καταστατικής των Peng-Robinson (PR).

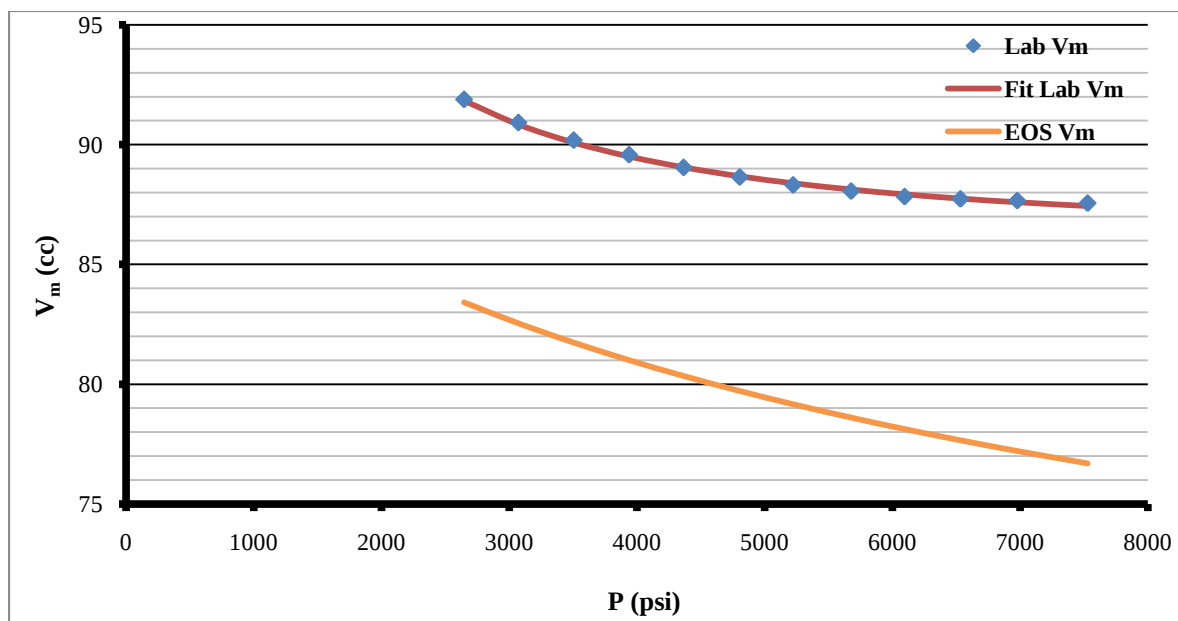
Για το μείγμα 68% κυκλοεξάνιο – 32% μεθάνιο υπολογίστηκε ότι η διόρθωση που πρέπει να γίνει στον όγκο, που δίνει η καταστατική εξίσωση, με βάση την τεχνική προσθετικής διόρθωσης όγκου καταστατικής εξίσωσης (volume translation), για τους 28°C είναι της τάξης των 4,1cc που αντιστοιχεί σε 5,1%, της αρχικής πρόβλεψης της καταστατικής εξίσωσης για τους 50°C είναι της τάξης των 5,3 cc που αντιστοιχεί σε 6,5% της αρχικής πρόβλεψης της καταστατικής εξίσωσης και για τους 90°C είναι της τάξης των 8,0 cc που αντιστοιχεί σε 9,5% της αρχικής πρόβλεψης της καταστατικής εξίσωσης.



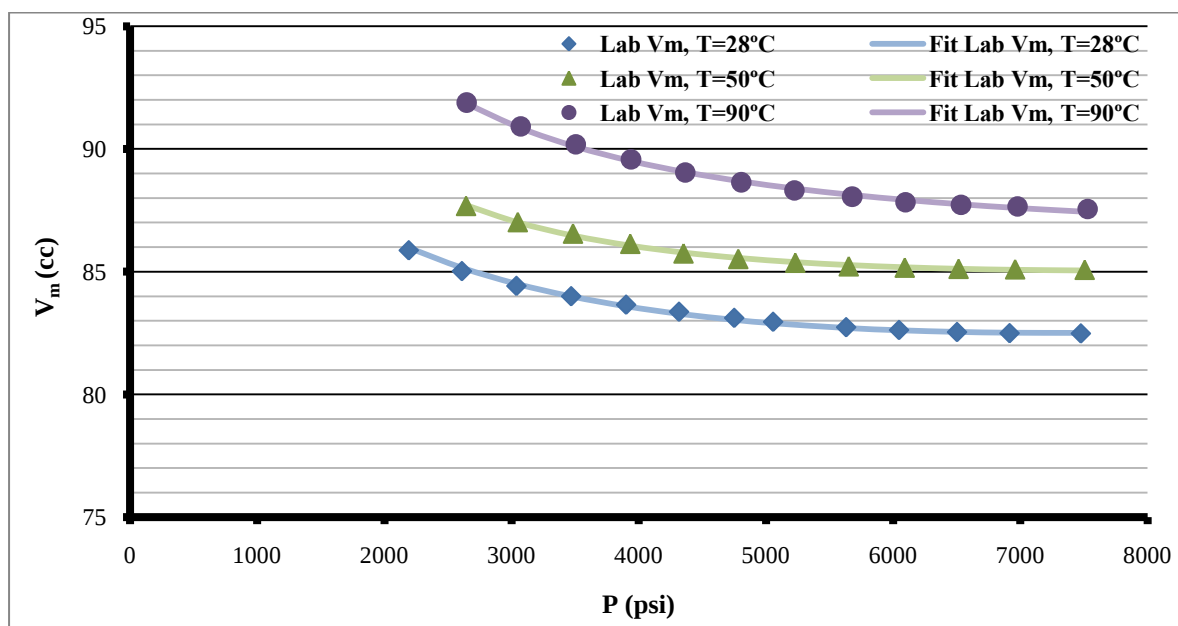
Διάγραμμα 5.89: Γραμμομοριακός όγκος του μείγματος 68% κυκλοεξάνιο – 32% μεθάνιο στους 28°C



Διάγραμμα 5.90: Γραμμομοριακός όγκος του μείγματος 68% κυκλοεξάνιο – 32% μεθάνιο στους 50°C



Διάγραμμα 5.91: Γραμμομοριακός όγκος του μείγματος 68% κυκλοεξάνιο – 32% μεθάνιο στους 90°C

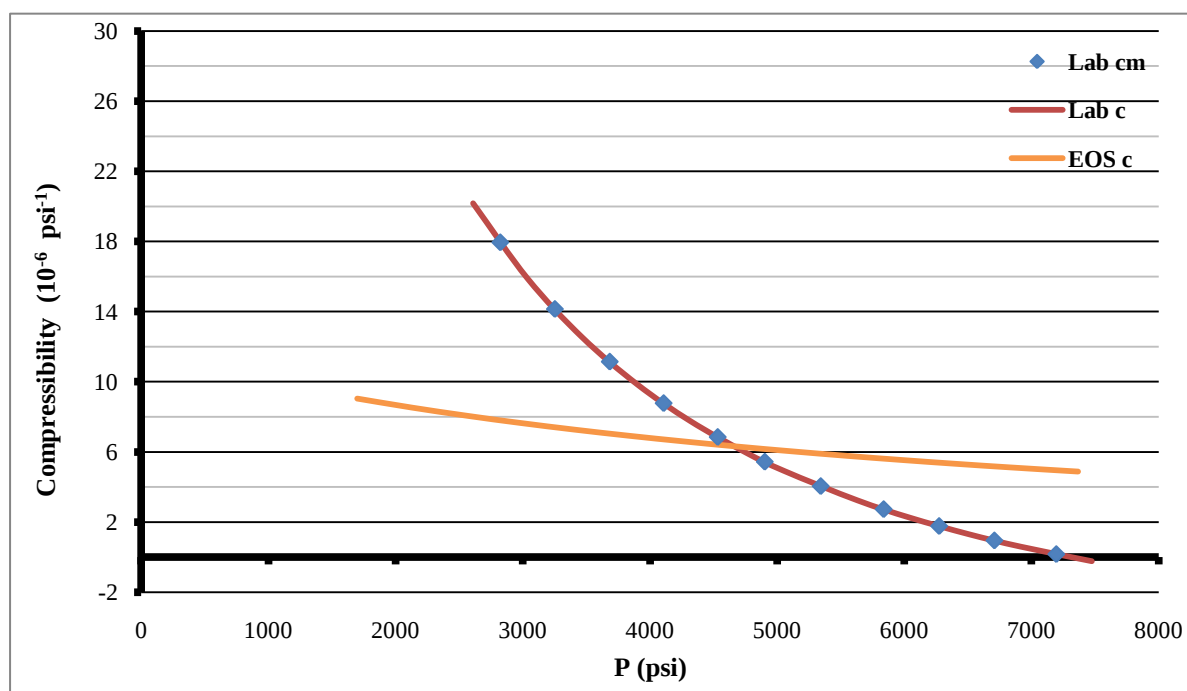


Διάγραμμα 5.92: Γραμμομοριακός όγκος του μείγματος 68% κυκλοεξάνιο – 32% μεθάνιο σε διαφορετικές θερμοκρασίες

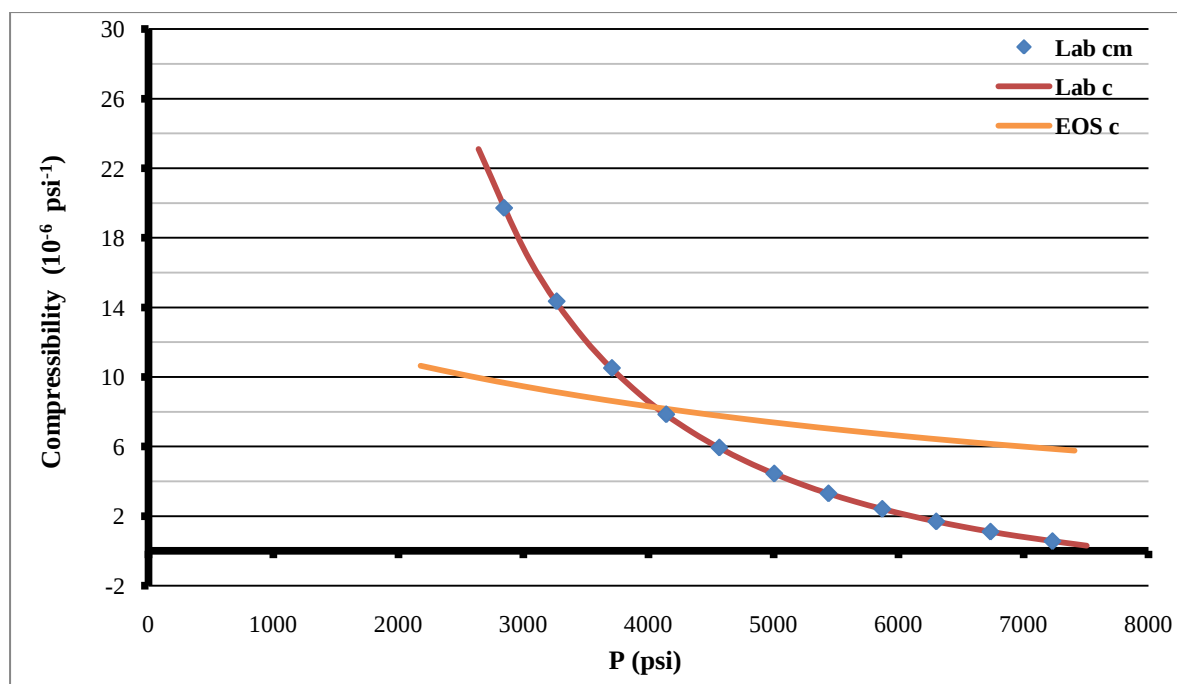
Στα Διαγράμματα 5.89-5.91 παρατηρείται απόκλιση μεταξύ των δυο καμπυλών με την αύξηση της πίεσης και της θερμοκρασίας.

Στο Διάγραμμα 5.92 παρατηρείται ότι οι πειραματικές τιμές του γραμμομοριακού όγκου στις μέγιστες πιέσεις, από τα 5000 psi και μέχρι τη μέγιστη πίεση, είναι σχεδόν ίσες. Σημαίνει ότι το τολουένιο έχει συμπιεστεί τόσο πολύ που ο όγκος που εισπνέζει η αντλία κάθε φορά είναι ολόένα και μικρότερος με αποτέλεσμα να αυξάνει το σφάλμα στην εύρεση του όγκου του ρευστού στις μέγιστες πιέσεις.

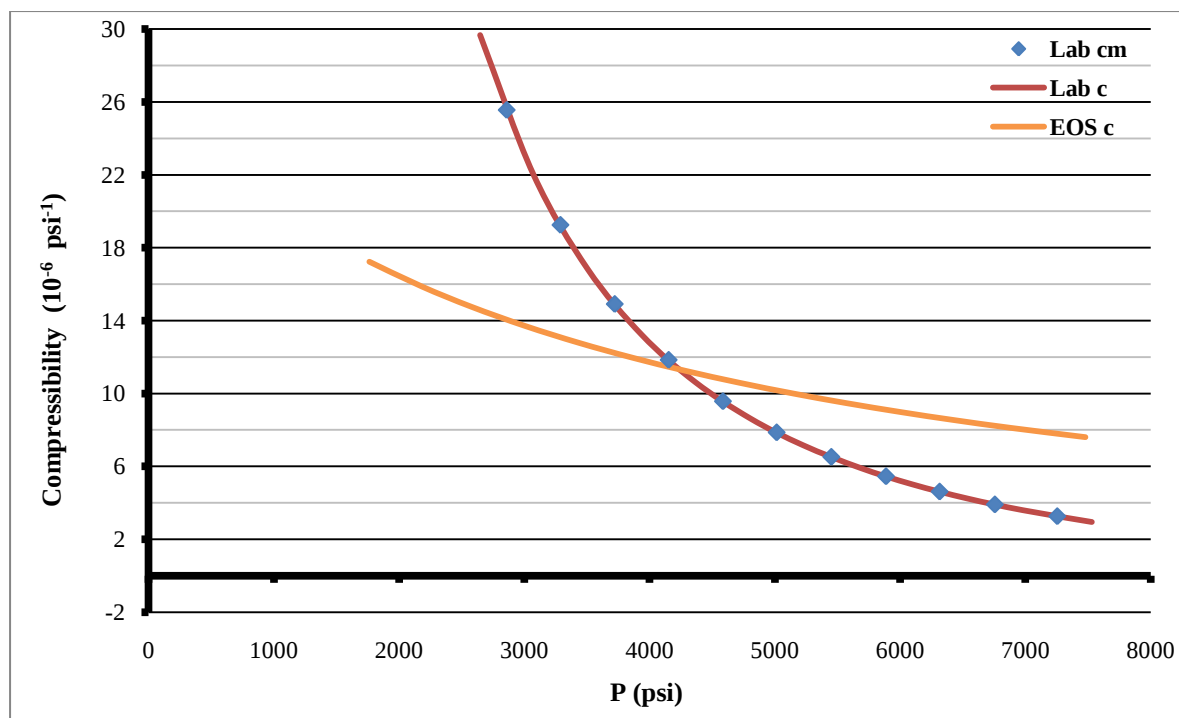
Στα Διαγράμματα 5.93 – 5.95 παρουσιάζονται οι τιμές της ισοθερμοκρασιακής συμπιεστότητας για τις θερμοκρασίες 28°C, 50°C και 90°C. Σε κάθε διάγραμμα παρουσιάζονται οι πειραματικές τιμές και οι τιμές που υπολογίζονται με χρήση της κυβικής καταστατικής των Peng-Robinson (PR).



Διάγραμμα 5.93: Ισοθερμοκρασιακή συμπιεστότητα του μείγματος 68% κυκλοεξάνιο – 32% μεθάνιο στους 28°C



Διάγραμμα 5.94: Ισοθερμοκρασιακή συμπιεστότητα του μείγματος 68% κυκλοεξάνιο – 32% μεθάνιο στους 50°C

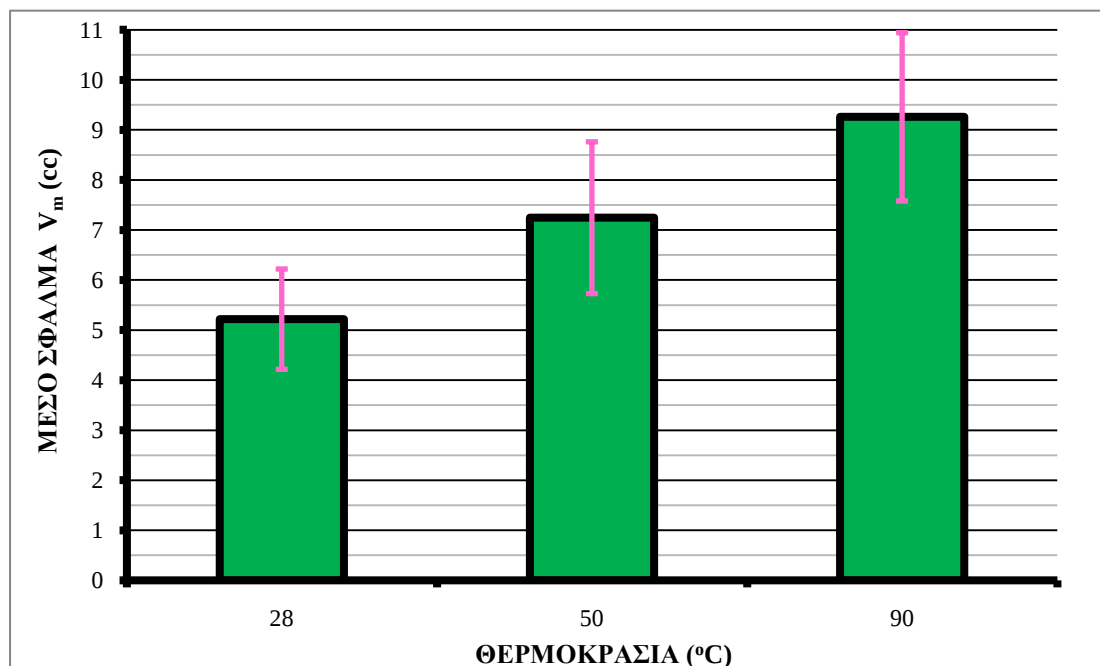


Διάγραμμα 5.95: Ισοθερμοκρασιακή συμπιεστότητα του μείγματος 68% κυκλοεξάνιο – 32% μεθάνιο στους 90°C

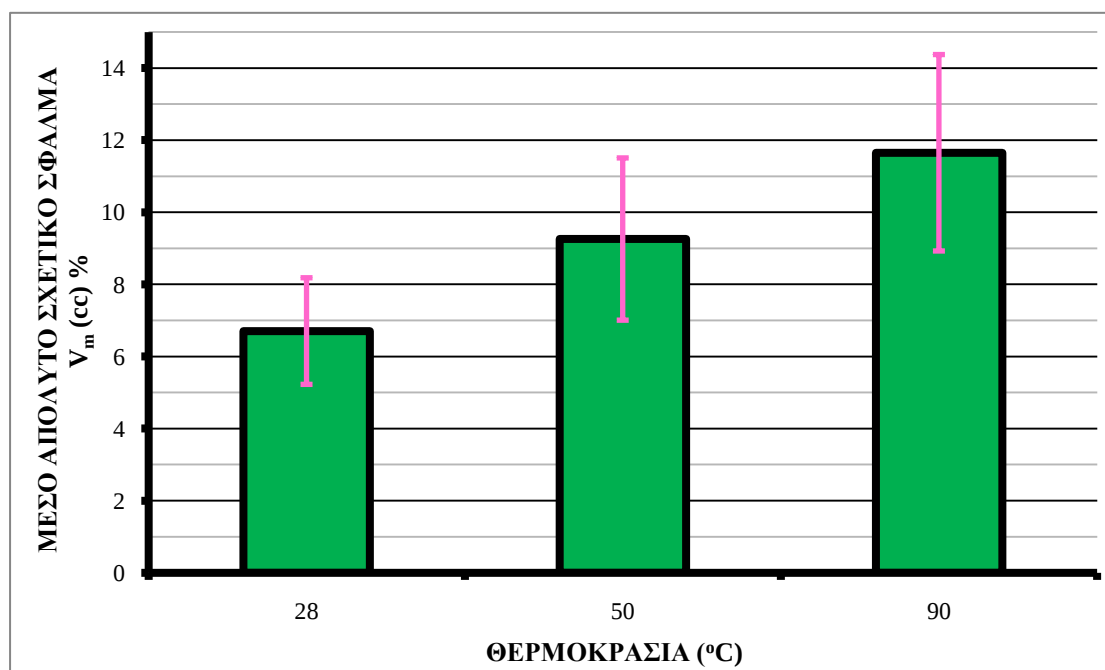
Στα Διαγράμματα 5.93-5.95 παρατηρείται απόκλιση μεταξύ των δυο καμπυλών με την αύξηση της πίεσης και της θερμοκρασίας.

Επίσης παρατηρείται ότι η ισοθερμοκρασιακή συμπιεστότητα παίρνει και αρνητικές τιμές στις μέγιστες πιέσεις κάτι που δεν θα έπρεπε να συμβαίνει. Ο λόγος που γίνεται κάτι τέτοιο είναι διότι ο γραμμομοριακός όγκος στις υψηλές πιέσεις έχει σφάλμα όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως, με αποτέλεσμα να μετατίθεται το σφάλμα και στην ισοθερμοκρασιακή συμπιεστότητα. Έστω και ένα πολύ μικρό σφάλμα στον υπολογισμό του γραμμομοριακού όγκου συνεπάγεται μεγάλο σφάλμα στην ισοθερμοκρασιακή συμπιεστότητα.

Στα Διαγράμματα 5.96 – 5.97 παρουσιάζεται το μέσο σφάλμα και το μέσο απόλυτο σχετικό σφάλμα του γραμμομοριακού όγκου μεταξύ των πειραματικών και των τιμών που υπολογίζονται από την καταστατική εξίσωση των Peng-Robinson αντίστοιχα.

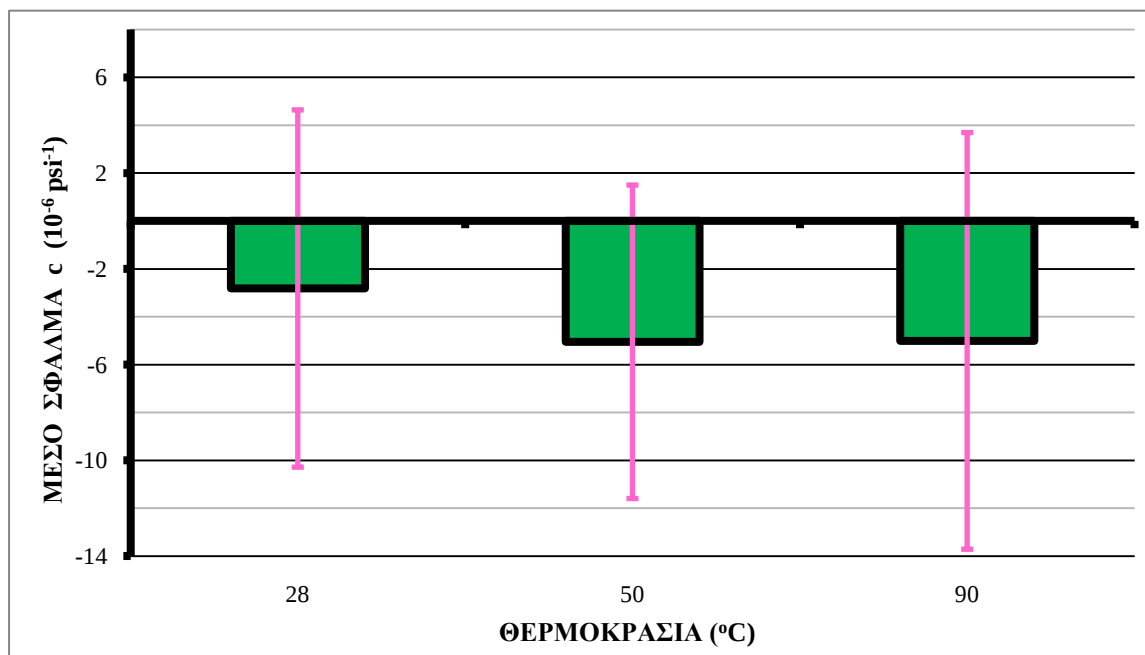


Διάγραμμα 5.96: Μέσο σφάλμα μέτρησης του γραμμομοριακού όγκου του μείγματος 68% κυκλοεξάνιο – 32% μεθάνιο ως προς των πειραματικών τιμών και των τιμών της καταστατικής εξίσωσης των PR για τις θερμοκρασίες των πειραμάτων

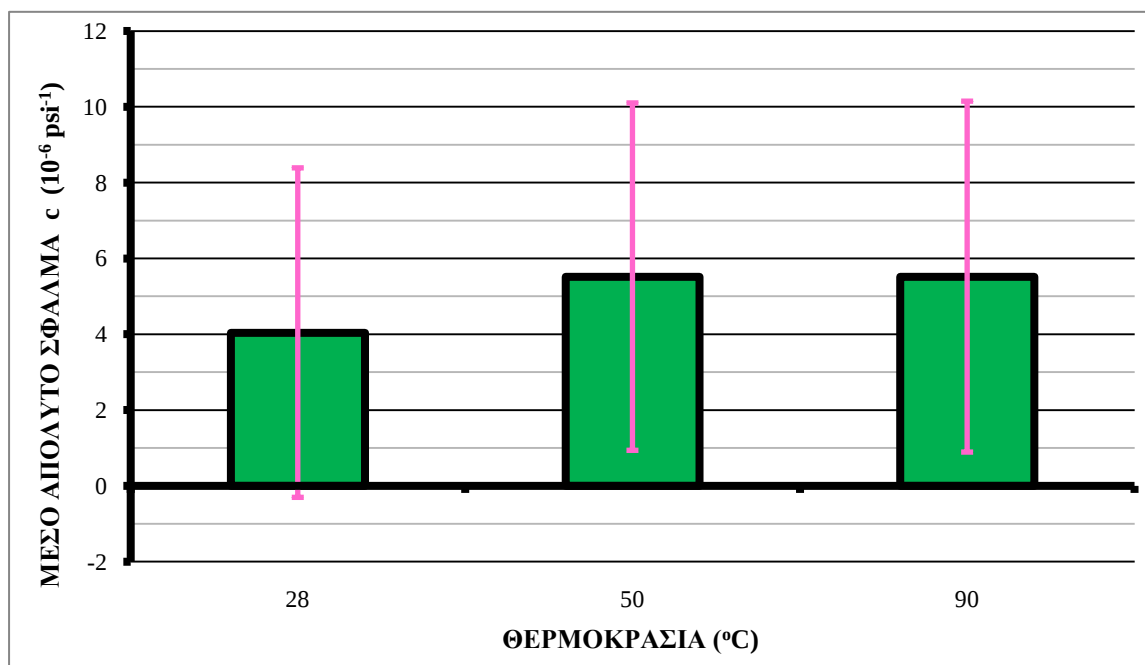


Διάγραμμα 5.97: Μέσο απόλυτο σχετικό σφάλμα μέτρησης του γραμμομοριακού όγκου του μείγματος 68% κυκλοεξάνιο – 32% μεθάνιο ως προς των πειραματικών τιμών και των τιμών της καταστατικής εξίσωσης των PR για τις θερμοκρασίες των πειραμάτων

Στα Διαγράμματα 5.98 – 5.99 παρουσιάζεται το μέσο σφάλμα και το μέσο απόλυτο σφάλμα της ισοθερμοκρασιακής συμπιεστότητας μεταξύ των πειραματικών και των τιμών που υπολογίζονται από την καταστατική εξίσωση των Peng-Robinson αντιστοίχτα.



Διάγραμμα 5.98: Μέσο σφάλμα μέτρησης της ισοθερμοκρασιακής συμπιεστότητας του μείγματος 68% κυκλοεξάνιο – 32% μεθάνιο ως προς των πειραματικών τιμών και των τιμών της καταστατικής εξίσωσης των PR για τις θερμοκρασίες των πειραμάτων



Διάγραμμα 5.99: Μέσο απόλυτο σφάλμα μέτρησης της ισοθερμοκρασιακής συμπιεστότητας του μείγματος 68% κυκλοεξάνιο – 32% μεθάνιο ως προς των πειραματικών τιμών και των τιμών της καταστατικής εξίσωσης των PR για τις θερμοκρασίες των πειραμάτων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η εργαστηριακή μελέτη των μειγμάτων υγρών υδρογονανθράκων με μεθάνιο και η ανάλυση των μετρήσεων οδήγησε στα παρακάτω συμπεράσματα.

Βασική προϋπόθεση για την εκτέλεση της πειραματικής εργασίας ήταν ο σχεδιασμός της διάταξης. Έπρεπε να καλύψει όλες τις απαιτήσεις των πειραματικών μετρήσεων (υψηλές πιέσεις και θερμοκρασίες) λαμβάνοντας υπόψη τόσο την απαιτούμενη ακρίβεια, τους περιορισμούς του εξοπλισμού όσο και την ασφάλεια των χειριστών.

Μείζονος σημασία ήταν το τεστ στεγανότητας ώστε να εντοπισθούν τυχόν διαρροές στην πειραματική διάταξη.

Κατά τη διεξαγωγή των πειραμάτων έπρεπε να αποφευχθεί η παραμονή φυσαλίδων στη διάταξη. Για αυτό το λόγο ήταν πολύ σημαντικό να δοθεί μεγάλη προσοχή στη διαδικασία πλήρωσης της αντλίας από το δοχείο του νερού.

Απαιτήθηκε υψηλή ακρίβεια στις μετρήσεις και για αυτό το λόγο ήταν απαραίτητο να πραγματοποιηθούν εκτεταμένες βαθμονομήσεις των μανομέτρων και ογκομετρήσεις της διάταξης για όλο το εύρος των συνθηκών των πειραματικών μετρήσεων.

Έπρεπε να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στον τρόπο καταγραφής των μετρήσεων στα μείγματα διότι υπήρχε το ενδεχόμενο η πίεση κορεσμού να είναι μέσα στο εύρος των πιέσεων που θα επιλεγούν τα πειράματα. Η καταγραφή των μετρήσεων έγινε από τη μεγαλύτερη πίεση που ήταν τα 500 bar προς τη χαμηλότερη που ήταν τα 30 bar για την αποφυγή του διφασικού μείγματος αλλά και την αποφυγή ύπαρξης φυσαλίδας χωρίς να έχει διαλυθεί. Με τον τρόπο αυτό έγινε καταγραφή των μετρήσεων από τη μονοφασική προς τη διφασική περιοχή των ρευστών. Βέβαια στο τέλος οι μετρήσεις που βρίσκονταν στη διφασική περιοχή δεν ελήφθησαν υπόψη.

Ιδιαίτερη βαρύτητα έπρεπε να δοθεί στην τιμή της πυκνότητας που είχε το κάθε υγρό για τη θερμοκρασία στην οποία μεταφέρθηκε στο αυτόκλειστο και να μην χρησιμοποιείται η τιμή της ονομαστικής πυκνότητας των υγρών που αναφέρεται σε συγκεκριμένη θερμοκρασία.

Για να πιστοποιηθεί η καλή λειτουργία της πειραματικής διάταξης, έγιναν μετρήσεις σε καθαρά συστατικά και συγκεκριμένα στο κανονικό πεντάνιο, στο τολουένιο και στο κυκλοεξάνιο, για τα οποία υπάρχει πληθώρα πειραματικών δεδομένων στη βιβλιογραφία. Η συμπεριφορά και των τριών υγρών ήταν κοινή δηλαδή αυξανόταν η απόκλιση των πειραματικών με τις βιβλιογραφικές τιμές με την αύξηση της πίεσης και της θερμοκρασίας.

Σημαντικό ήταν να επαληθευτεί η επαναληψιμότητα των μετρήσεων για να διαπιστωθεί ο βαθμός συμφωνίας μεταξύ των αριθμητικών τιμών για δυο ή και περισσότερες επαναλαμβανόμενες μετρήσεις που έχουν ληφθεί υπό τις ίδιες ακριβώς πειραματικές συνθήκες. Στην παρούσα διπλωματική διαπιστώθηκε ικανοποιητική επαναληψιμότητα των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκε για το κανονικό πεντάνιο στις θερμοκρασίες των πειραμάτων.

Στις πειραματικές μετρήσεις του όγκου του ρευστού σαν συνάρτηση της πίεσης έγινε προσαρμογή με ομογραφική καμπύλη. Ο όγκος του ρευστού μετατράπηκε σε γραμμομοριακό όγκο ώστε να γίνει εντατικό μέγεθος, να μην εξαρτάται από τη μάζα.

Οι πειραματικές μετρήσεις συγκρίθηκαν και με τις τιμές που υπολογίζονται με χρήση της καταστατικής εξίσωσης των Peng-Robinson. Στους υγρούς υδρογονάνθρακες και τα μείγματά τους εφαρμόστηκε η τεχνική προσθετικής διόρθωση όγκου καταστατικής εξίσωσης (volume translation) όπου παρατηρήθηκε μια μείωση στην απόκλιση μεταξύ της καμπύλης των πειραματικών τιμών του γραμμομοριακού όγκου και αυτής του γραμμομοριακού όγκου όπως προκύπτει από την καταστατική εξίσωση των Peng-Robinson. Στους υγρούς υδρογονάνθρακες παρατηρήθηκε η μεγαλύτερη απόκλιση μεταξύ των βιβλιογραφικών τιμών του γραμμομοριακού όγκου και αυτών του γραμμομοριακού όγκου όπως προκύπτουν από την καταστατική εξίσωση των Peng-Robinson, με χρήση της τεχνικής προσθετικής διόρθωση όγκου καταστατικής εξίσωσης, στην υψηλότερη θερμοκρασία. Με βάση τη διόρθωση που έγινε στο γραμμομοριακό όγκο της καταστατικής εξίσωσης, στους υγρούς υδρογονάνθρακες η απόκλιση των δυο καμπυλών μειώθηκε κατά μέσο όρο πάνω από 4cc στα 100cc ρευστού που αντιστοιχεί σε 3,65% της αρχική πρόβλεψης της καταστατικής εξίσωσης, ενώ στα μείγματα μειώθηκε κατά μέσο όρο πάνω από 3cc στα 100cc ρευστού που αντιστοιχεί σε 2,75% της αρχική πρόβλεψης της καταστατικής εξίσωσης.

Οι τιμές της ισοθερμοκρασιακής συμπιεστότητας στα καθαρά συστατικά μειώνονταν όσο πιο μεγαλύτερη πυκνότητα είχε το καθαρό συστατικό το οποίο μελετήθηκε. Ιδιαίτερη σημασία δόθηκε στο μοντέλο διόρθωσης του όγκου διότι παρατηρήθηκε στα καθαρά συστατικά με μεγάλη πυκνότητα να παρουσιάζει σφάλμα στις υψηλές πιέσεις με αποτέλεσμα να μην υπολογίζεται σωστά ο όγκος του ρευστού. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα μικροσφάλματα στον υπολογισμό του όγκου να αυξάνουν στον υπολογισμό της ισοθερμοκρασιακής συμπιεστότητας. Δηλαδή η ισοθερμοκρασιακή συμπιεστότητα για τα υγρά παρουσίαζε ευαισθησία στην αλλαγή του όγκου. Έτσι σφάλματα στον όγκο είχαν ως αποτέλεσμα η ισοθερμοκρασιακή συμπιεστότητα να παρουσιάζει και αρνητικές τιμές όπως συνέβη με το κυκλοεξάνιο και τα μείγματά του.

Το μέσο σφάλμα στις μετρήσεις του γραμμομοριακού όγκου, για τους υγρούς υδρογονάνθρακες, μεταξύ των πειραματικών και των βιβλιογραφικών τιμών έφθασε έως το 3%, ενώ μεταξύ των πειραματικών τιμών και των τιμών που υπολογίστηκαν από την καταστατική εξίσωση των Peng-Robinson έφθασε έως το 6,5%. Το μέσο απόλυτο σχετικό σφάλμα του γραμμομοριακού όγκου, για τους υγρούς υδρογονάνθρακες, μεταξύ των πειραματικών και των βιβλιογραφικών τιμών έφθασε έως το 2,5%, ενώ μεταξύ των πειραματικών τιμών και των τιμών που υπολογίζονται από την καταστατική εξίσωση των Peng-Robinson έφθασε έως το 5%.

Στα μείγματα τόσο το μέσο σφάλμα αλλά όσο και το μέσο απόλυτο σχετικό σφάλμα στις μετρήσεις του γραμμομοριακού όγκου μεταξύ των πειραματικών τιμών και των τιμών που υπολογίστηκαν από την καταστατική εξίσωση των Peng-Robinson έφθασε έως το 10%

Το μέσο σφάλμα και το μέσο απόλυτο σφάλμα στις μετρήσεις της ισοθερμοκρασιακής συμπιεστότητας, για τους υγρούς υδρογονάνθρακες, μεταξύ των πειραματικών και των βιβλιογραφικών τιμών έφθασε έως 4% ενώ μεταξύ των πειραματικών τιμών και των τιμών που υπολογίστηκαν από την καταστατική εξίσωση των Peng-Robinson έφθασε έως το 6%.

Στα μείγματα τόσο το μέσο σφάλμα αλλά όσο και το μέσο απόλυτο σχετικό σφάλμα στις μετρήσεις της ισοθερμοκρασιακής συμπιεστότητας μεταξύ των πειραματικών τιμών και των

τιμών που υπολογίζονται από την καταστατική εξίσωση των Peng-Robinson έφθασε έως το 6%.

Ορισμένες προτάσεις που θα διευκόλυναν έναν επόμενο ερευνητή που θα επιχειρούσε να πραγματοποιήσει μια παρόμοια σειρά πειραμάτων στο μέλλον είναι οι εξής:

- Χρήση μεγαλύτερου αυτοκλείστου προκειμένου να υπάρχει η δυνατότητα φόρτωσης μεγαλύτερης ποσότητας μάζας άρα περισσότερα moles.
- Χρήση εμβολοφόρου αντλίας που να συνδέεται με το αυτόκλειστό με μηχανικό τρόπο.
- Ύπαρξη θερμοστατούμενου χώρου στο εργαστήριο ώστε να διατηρείται σταθερή η θερμοκρασία.
- Χρήση υγρού με μικρότερη συμπιεστότητα από το νερό, για να εισπιέζεται στη διάταξη από την αντλία με απώτερο σκοπό να αυξάνει η πίεση.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] N. Βαρότσης, Μηχανική Ταμειωτήρων, Χανιά, 2007
- [2] N. Πασαδάκης, Ορυκτά Καύσιμα, Χανιά, 2009
- [3] A. Βαφείδης, Εφαρμοσμένη Γεωφυσική Ι Σεισμικές Μέθοδοι, Χανιά, (1993)
- [4] A. Βαφείδης, Αξιολόγηση Σχηματισμών Με Γεωφυσικές Μεθόδους, Χανιά, (1994)
- [5] <http://lugar.senate.gov/energy/graphs/worldoil.html>
- [6] <http://gr.oilprice.com>
- [7] P.W. Atkins, Φυσικοχημεία, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης, (2005)
- [8] Van der Waals, J.D.: *Continuity of the Gaseous and Liquid State of Matter*, (1873)
- [9] Redlich, O. and Kwong, J.N.S.: "On the Thermodynamics of Solutions.V. An Equation of State. Fugacities of Gaseous Solutions," *Chem. Rev.*, (1949)
- [10] Peng, D.Y. and Robinson, D.B.: "A New-Constant Equation of State," *Ind. & Eng. Chem.* (1976)
- [11] Curtis H. Whitson and Michael R. Brulé, *Phase Behavior*, (2000)
- [12] Prausnitz J. M. Reid R. C. Poling B. E. *The Properties of Gases and Liquids. McGraw Hill Book Company*, Fourth Edition, Newyork, 1986
- [13] Martin, J.J.: "Cubic Equations of State—Which," *Ind. & Eng. Chem.* (1979)
- [14] Jung-Chin Tsai, Yah-Ping Chen, Application of a volume-translated Peng-Robinson equation of state on vapor-liquid equilibrium calculations
Department of Chemical Engineering, National Taiwan University, Taipei, Taiwan
Fluid Phase Equilibria 145 (1998) 193-215
- [15] <http://mathworld.wolfram.com>
- [16] <http://ipims.com>
- [17] <http://www.engineersedge.com>
- [18] M. GEHRIG and H. LENTZ, Values of p(V,T) for n-pentane in the range 5 to 250 MPa and 313 to 643 K, Institut für Physikalische Chemie und Elektrochemie der Universität Karlsruhe, Karlsruhe, Federal Republic of Germany
J. Chem. Thermodynamic 9 79, 11, 291-300
- [19] H. Kashiwagi, T. Hashimoto, Y. Tanaka, H. Kubota, and T. Makita Thermal Conductivity and Density of Toluene in the Temperature Range 273-373 K at Pressures up to 250 MPa, *International Journal of Thermophysics*, Vol. 3, No. 3, 1982
- [20] H. M. T. Avelino, J. M. N. A. Fareleira, and W. A. Wakeham, Simultaneous Measurement of the Density and Viscosity of Compressed Liquid Toluene, *International Journal of Thermophysics*, Vol. 24, No. 2, March 2003
- [21] T. F. SUN, P. J. KORTBEEK, N. J. TRAPPENIERS and S. N. BISWAS, Acoustic and

Thermodynamic Properties of Benzene and Cyclohexane as a Function of Pressure and Temperature, *Phys. Chem. Liq.*, 1987, Vol. 16, pp. 163-178

[22] J. Jonas, D. Hasha, and S. G. Huang, Density Effects on Transport Properties in Liquid Cyclohexane, *J. Phys. Chem.* 1980, 84, 109-112

[23] N. Pasadakis and N. Varotsis, A Novel Approach for the Quantitation of the Hydrocarbon Groups in Heavy Petroleum Fractions by HPLC-RI Analysis *Energy & Fuels* 2000, 14, 1184-1187

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

1.1	Τιμή πετρελαίου για τα τελευταία πέντε χρόνια	7
4.1	Μεταβολή της πίεσης με την πάροδο του χρόνου για το βρόχο που συνδέει την αντλία με τον άνω θάλαμο του αυτοκλείστου	55
4.2	Μεταβολή της πίεσης με την πάροδο του χρόνου για το βρόχο που συνδέει την αντλία με τον κάτω θάλαμο του αυτοκλείστου	55
4.3	Βρόχος υστέρησης για το μανόμετρο P_1 στους 28°C	58
4.4	Βρόχος υστέρησης για το μανόμετρο P_2 στους 28°C	58
4.5	Βρόχος υστέρησης για το μανόμετρο P_1 στους 50°C	59
4.6	Βρόχος υστέρησης για το μανόμετρο P_2 στους 50°C	59
4.7	Βρόχος υστέρησης για το μανόμετρο P_1 στους 90°C	60
4.8	Βρόχος υστέρησης για το μανόμετρο P_2 στους 90°C	60
4.9	Μοντελοποίηση του μανομέτρου P_1 στους 28°C	62
4.10	Μοντελοποίηση της απόκλισης της πίεσης του μανομέτρου P_2 στους 28°C	63
4.11	Μοντελοποίηση της απόκλισης της πίεσης του μανομέτρου P_1 στους 50°C	63
4.12	Μοντελοποίηση της απόκλισης της πίεσης του μανομέτρου P_2 στους 50°C	64
4.13	Μοντελοποίηση της απόκλισης της πίεσης του μανομέτρου P_1 στους 90°C	64
4.14	Μοντελοποίηση της απόκλισης της πίεσης του μανομέτρου P_2 στους 90°C	65
4.15	Μεταβολή του όγκου της αντλίας σε σχέση με τη θερμοκρασία	68
4.16	Μοντελοποίηση των πειραματικών δεδομένων της ισοθερμοκρασιακής συμπιεστότητας της διάταξης του εξοπλισμού στους 28°C	69
4.17	Μοντελοποίηση των πειραματικών δεδομένων της ισοθερμοκρασιακής συμπιεστότητας της διάταξης του εξοπλισμού στους 90°C	69
4.18	Επαναληψιμότητα των μετρήσεων του κανονικού πεντανίου στους 28°C	81
4.19	Επαναληψιμότητα των μετρήσεων του κανονικού πεντανίου στους 90°C	81

5.1	Γραμμομοριακός όγκος του κανονικού πεντανίου στους 28°C	89
5.2	Γραμμομοριακός όγκος του κανονικού πεντανίου στους 50°C	89
5.3	Γραμμομοριακός όγκος του κανονικού πεντανίου στους 90°C	90
5.4	Γραμμομοριακός όγκος του κανονικού πεντανίου σε διαφορετικές θερμοκρασίες	90
5.5	Ισοθερμοκρασιακή συμπίεστικότητα του κανονικού πεντανίου στους 28°C	91
5.6	Ισοθερμοκρασιακή συμπίεστικότητα του κανονικού πεντανίου στους 50°C	91
5.7	Ισοθερμοκρασιακή συμπίεστικότητα του κανονικού πεντανίου στους 90°C	92
5.8	Μέσο σφάλμα μέτρησης των πειραματικών τιμών του γραμμομοριακού όγκου του κανονικού πεντανίου ως προς αυτόν της βιβλιογραφίας και της καταστατικής εξίσωσης των PR για τις θερμοκρασίες των πειραμάτων.....	93
5.9	Μέσο απόλυτο σχετικό σφάλμα μέτρησης των πειραματικών τιμών του γραμμομοριακού όγκου του κανονικού πεντανίου ως προς αυτόν της βιβλιογραφίας και της καταστατικής εξίσωσης των PR για τις θερμοκρασίες των πειραμάτων	93
5.10	Μέσο σφάλμα μέτρησης των πειραματικών τιμών της ισοθερμοκρασιακής συμπίεστικότητας του κανονικού πεντανίου ως προς αυτόν της βιβλιογραφίας και της καταστατικής εξίσωσης των PR για τις θερμοκρασίες των πειραμάτων	94
5.11	Μέσο απόλυτο σφάλμα μέτρησης των πειραματικών τιμών της ισοθερμοκρασιακής συμπίεστικότητας του κανονικού πεντανίου ως προς αυτόν της βιβλιογραφίας και της καταστατικής εξίσωσης των PR για τις θερμοκρασίες των πειραμάτων	94
5.12	Γραμμομοριακός όγκος του τολουενίου στους 28°C	96
5.13	Γραμμομοριακός όγκος του τολουενίου στους 50°C	96
5.14	Γραμμομοριακός όγκος του τολουενίου στους 90°C	97
5.15	Γραμμομοριακό όγκος του τολουενίου σε διαφορετικές θερμοκρασίες	97
5.16	Ισοθερμοκρασιακή συμπίεστικότητα του τολουενίου στους 28°C	98
5.17	Ισοθερμοκρασιακή συμπίεστικότητα του τολουενίου στους 50°C	98
5.18	Ισοθερμοκρασιακή συμπίεστικότητα του τολουενίου στους 90°C	99
5.19	Μέσο σφάλμα μέτρησης των πειραματικών τιμών του γραμμομοριακού όγκου του τολουενίου ως προς αυτόν της βιβλιογραφίας και της καταστατικής εξίσωσης των PR	

	για τις θερμοκρασίες των πειραμάτων	100
5.20	Μέσο απόλυτο σχετικό σφάλμα μέτρησης των πειραματικών τιμών του γραμμομοριακού όγκου του τολουενίου ως προς αυτόν της βιβλιογραφίας και της καταστατικής εξίσωσης των PR για τις θερμοκρασίες των πειραμάτων	100
5.21	Μέσο σφάλμα μέτρησης των πειραματικών τιμών της ισοθερμοκρασιακής συμπεστότητας του τολουενίου ως προς αυτόν της βιβλιογραφίας και της καταστατικής εξίσωσης των PR για τις θερμοκρασίες των πειραμάτων	101
5.22	Μέσο απόλυτο σφάλμα μέτρησης των πειραματικών τιμών της ισοθερμοκρασιακής συμπεστότητας του τολουενίου ως προς αυτόν της βιβλιογραφίας και της καταστατικής εξίσωσης των PR για τις θερμοκρασίες των πειραμάτων	101
5.23	Γραμμομοριακός όγκος του κυκλοεξανίου στους 28°C	103
5.24	Γραμμομοριακός όγκος του κυκλοεξανίου στους 50°C	103
5.25	Γραμμομοριακός όγκος του κυκλοεξανίου στους 90°C	104
5.26	Γραμμομοριακός όγκος του κυκλοεξανίου σε διαφορετικές θερμοκρασίες	104
5.27	Ισοθερμοκρασιακή συμπεστότητα του κυκλοεξανίου στους 28°C	105
5.28	Ισοθερμοκρασιακή συμπεστότητα του κυκλοεξανίου στους 50°C	105
5.29	Ισοθερμοκρασιακή συμπεστότητα του κυκλοεξανίου στους 90°C	106
5.30	Μέσο σφάλμα μέτρησης των πειραματικών τιμών του γραμμομοριακού όγκου του κυκλοεξανίου ως προς αυτόν της βιβλιογραφίας και της καταστατικής εξίσωσης των PR για τις θερμοκρασίες των πειραμάτων	107
5.31	Μέσο απόλυτο σχετικό σφάλμα μέτρησης των πειραματικών τιμών του γραμμομοριακού όγκου του κυκλοεξανίου ως προς αυτόν της βιβλιογραφίας και της καταστατικής εξίσωσης των PR για τις θερμοκρασίες των πειραμάτων	107
5.32	Μέσο σφάλμα μέτρησης των πειραματικών τιμών της ισοθερμοκρασιακής συμπεστότητας του κυκλοεξανίου ως προς αυτόν της βιβλιογραφίας και της καταστατικής εξίσωσης των PR για τις θερμοκρασίες των πειραμάτων	108
5.33	Μέσο απόλυτο σφάλμα μέτρησης των πειραματικών τιμών της ισοθερμοκρασιακής συμπεστότητας του κυκλοεξανίου ως προς αυτόν της βιβλιογραφίας και της	

καταστατικής εξίσωσης των PR για τις θερμοκρασίες των πειραμάτων	108
5.34 Γραμμομοριακός όγκος του μείγματος 88% κανονικό πεντάνιο – 12% μεθάνιο στους 28°C	110
5.35 Γραμμομοριακός όγκος του μείγματος 88% κανονικό πεντάνιο – 12% μεθάνιο στους 50°C	110
5.36 Γραμμομοριακός όγκος του μείγματος 88% κανονικό πεντάνιο – 12% μεθάνιο στους 90°C	111
5.37 Γραμμομοριακός όγκος του μείγματος 88% κανονικό πεντάνιο – 12% μεθάνιο σε διαφορετικές θερμοκρασίες	111
5.38 Ισοθερμοκρασιακή συμπιεστότητα του μείγματος 88% κανονικό πεντάνιο – 12% μεθάνιο στους 28°C	112
5.39 Ισοθερμοκρασιακή συμπιεστότητα του μείγματος 88% κανονικό πεντάνιο – 12% μεθάνιο στους 50°C	112
5.40 Ισοθερμοκρασιακή συμπιεστότητα του μείγματος 88% κανονικό πεντάνιο – 12% μεθάνιο στους 90°C	113
5.41 Μέσο σφάλμα μέτρησης του γραμμομοριακού όγκου του μείγματος 88% κανονικό πεντάνιο – 12% μεθάνιο ως προς των πειραματικών τιμών και των τιμών της καταστατικής εξίσωσης των PR για τις θερμοκρασίες των πειραμάτων	114
5.42 Μέσο απόλυτο σχετικό σφάλμα του γραμμομοριακού όγκου του μείγματος 88% κανονικό πεντάνιο – 12% μεθάνιο ως προς των πειραματικών τιμών και των τιμών της καταστατικής εξίσωσης των PR για τις θερμοκρασίες των πειραμάτων	114
5.43 Μέσο σφάλμα της συμπιεστότητας του μείγματος 88% κανονικό πεντάνιο – 12% μεθάνιο ως προς των πειραματικών τιμών και των τιμών της καταστατικής εξίσωσης των PR για τις θερμοκρασίες των πειραμάτων	115
5.44 Μέσο απόλυτο σφάλμα της συμπιεστότητας του μείγματος 88% κανονικό πεντάνιο – 12% μεθάνιο ως προς των πειραματικών τιμών και των τιμών της καταστατικής εξίσωσης των PR για τις θερμοκρασίες των πειραμάτων	115
5.45 Γραμμομοριακός όγκος του μείγματος 80% κανονικό πεντάνιο – 20% μεθάνιο στους	

28°C	116
5.46 Γραμμομοριακός όγκος του μείγματος 80% κανονικό πεντάνιο – 20% μεθάνιο στους 50°C	116
5.47 Γραμμομοριακός όγκος του μείγματος 80% κανονικό πεντάνιο – 20% μεθάνιο στους 90°C	117
5.48 Γραμμομοριακός όγκος του μείγματος 80% κανονικό πεντάνιο – 20% μεθάνιο σε διαφορετικές θερμοκρασίες	117
5.49 Ισοθερμοκρασιακή συμπίεστικότητα του μείγματος 80% κανονικό πεντάνιο – 20% μεθάνιο στους 28°C	118
5.50 Ισοθερμοκρασιακή συμπίεστικότητα του μείγματος 80% κανονικό πεντάνιο – 20% μεθάνιο στους 50°C	118
5.51 Ισοθερμοκρασιακή συμπίεστικότητα του μείγματος 80% κανονικό πεντάνιο – 20% μεθάνιο στους 90°C	119
5.52 Μέσο σφάλμα μέτρησης του γραμμομοριακού όγκου του μείγματος 80% κανονικό πεντάνιο – 20% μεθάνιο ως προς των πειραματικών τιμών και των τιμών της καταστατικής εξίσωσης των PR για τις θερμοκρασίες των πειραμάτων	120
5.53 Μέσο απόλυτο σχετικό σφάλμα του γραμμομοριακού όγκου του μείγματος 80% κανονικό πεντάνιο – 20% μεθάνιο ως προς των πειραματικών τιμών και των τιμών της καταστατικής εξίσωσης των PR για τις θερμοκρασίες των πειραμάτων	120
5.54 Μέσο σφάλμα της συμπίεστικότητας του μείγματος 80% κανονικό πεντάνιο – 20% μεθάνιο ως προς των πειραματικών τιμών και των τιμών της καταστατικής εξίσωσης των PR για τις θερμοκρασίες των πειραμάτων	121
5.55 Μέσο απόλυτο σφάλμα της συμπίεστικότητας του μείγματος 80% κανονικό πεντάνιο – 20% μεθάνιο ως προς των πειραματικών τιμών και των τιμών της καταστατικής εξίσωσης των PR για τις θερμοκρασίες των πειραμάτων	121
5.56 Γραμμομοριακός όγκος του μείγματος 87% τολουένιο – 13% μεθάνιο στους 28°C	122
5.57 Γραμμομοριακός όγκος του μείγματος 87% τολουένιο – 13% μεθάνιο στους 50°C	122

5.58	Γραμμομοριακός όγκος του μείγματος 87% τολουένιο – 13% μεθάνιο στους 90°C	123
5.59	Γραμμομοριακός όγκος του μείγματος 87% τολουένιο – 13% μεθάνιο σε διαφορετικές θερμοκρασίες	123
5.60	Ισοθερμοκρασιακή συμπιεστότητα του μείγματος 87% τολουένιο – 13% μεθάνιο στους 28°C	124
5.61	Ισοθερμοκρασιακή συμπιεστότητα του μείγματος 87% τολουένιο – 13% μεθάνιο στους 50°C	124
5.62	Ισοθερμοκρασιακή συμπιεστότητα του μείγματος 87% τολουένιο – 13% μεθάνιο στους 90°C	125
5.63	Μέσο σφάλμα μέτρησης του γραμμομοριακού όγκου του μείγματος 87% τολουένιο – 13% μεθάνιο ως προς των πειραματικών τιμών και των τιμών της καταστατικής εξίσωσης των PR για τις θερμοκρασίες των πειραμάτων	126
5.64	Μέσο απόλυτο σχετικό σφάλμα του γραμμομοριακού όγκου του μείγματος 87% τολουένιο – 13% μεθάνιο ως προς των πειραματικών τιμών και των τιμών της καταστατικής εξίσωσης των PR για τις θερμοκρασίες των πειραμάτων	126
5.65	Το μέσο σφάλμα της συμπιεστότητας του μείγματος 87% τολουένιο – 13% μεθάνιο ως προς των πειραματικών τιμών και των τιμών της καταστατικής εξίσωσης των PR για τις θερμοκρασίες των πειραμάτων	127
5.66	Το μέσο απόλυτο σφάλμα της συμπιεστότητας του μείγματος 87% τολουένιο – 13% μεθάνιο ως προς των πειραματικών τιμών και των τιμών της καταστατικής εξίσωσης των PR για τις θερμοκρασίες των πειραμάτων	127
5.67	Γραμμομοριακός όγκος του μείγματος 70% τολουένιο – 30% μεθάνιο στους 28°C	128
5.68	Γραμμομοριακός όγκος του μείγματος 70% τολουένιο – 30% μεθάνιο στους 50°C	128
5.69	Γραμμομοριακός όγκος του μείγματος 70% τολουένιο – 30% μεθάνιο στους 90°C	129

5.70	Γραμμομοριακός όγκος του μείγματος 70% τολουένιο – 30% μεθάνιο σε διαφορετικές θερμοκρασίες	129
5.71	Ισοθερμοκρασιακή συμπιεστότητα του μείγματος 70% τολουένιο – 30% μεθάνιο στους 28°C	130
5.72	Ισοθερμοκρασιακή συμπιεστότητα του μείγματος 70% τολουένιο – 30% μεθάνιο στους 50°C	130
5.73	Ισοθερμοκρασιακή συμπιεστότητα του μείγματος 70% τολουένιο – 30% μεθάνιο στους 90°C	131
5.74	Μέσο σφάλμα μέτρησης του γραμμομοριακού όγκου του μείγματος 70% τολουένιο – 30% μεθάνιο ως προς των πειραματικών τιμών και των τιμών της καταστατικής εξίσωσης των PR για τις θερμοκρασίες των πειραμάτων	132
5.75	Μέσο απόλυτο σχετικό σφάλμα του γραμμομοριακού όγκου του μείγματος 70% τολουένιο – 30% μεθάνιο ως προς των πειραματικών τιμών και των τιμών της καταστατικής εξίσωσης των PR για τις θερμοκρασίες των πειραμάτων	132
5.76	Μέσο σφάλμα της συμπιεστότητας του μείγματος 70% τολουένιο – 30% μεθάνιο ως προς των πειραματικών τιμών και των τιμών της καταστατικής εξίσωσης των PR για τις θερμοκρασίες των πειραμάτων	133
5.77	Μέσο απόλυτο σφάλμα της συμπιεστότητας του μείγματος 70% τολουένιο – 30% μεθάνιο ως προς των πειραματικών τιμών και των τιμών της καταστατικής εξίσωσης των PR για τις θερμοκρασίες των πειραμάτων	133
5.78	Γραμμομοριακός όγκος του μείγματος 86% κυκλοεξάνιο – 14% μεθάνιο στους 28°C	134
5.79	Γραμμομοριακός όγκος του μείγματος 86% κυκλοεξάνιο – 14% μεθάνιο στους 50°C	134
5.80	Γραμμομοριακός όγκος του μείγματος 86% κυκλοεξάνιο – 14% μεθάνιο στους 90°C	135
5.81	Γραμμομοριακός όγκος του μείγματος 86% κυκλοεξάνιο – 14% μεθάνιο σε διαφορετικές θερμοκρασίες	135

5.82	Ισοθερμοκρασιακή συμπιεστότητα του μείγματος 86% κυκλοεξάνιο – 14% μεθάνιο τους 28°C	136
5.83	Ισοθερμοκρασιακή συμπιεστότητα του μείγματος 86% κυκλοεξάνιο – 14% μεθάνιο στους 50°C	136
5.84	Ισοθερμοκρασιακή συμπιεστότητα του μείγματος 86% κυκλοεξάνιο – 14% μεθάνιο στους 90°C	137
5.85	Μέσο σφάλμα μέτρησης του γραμμομοριακού όγκου του μείγματος 86% κυκλοεξάνιο - 14% μεθάνιο ως προς των πειραματικών τιμών και των τιμών της καταστατικής εξίσωσης των PR για τις θερμοκρασίες των πειραμάτων	138
5.86	Μέσο απόλυτο σχετικό σφάλμα του γραμμομοριακού όγκου του μείγματος 86% κυκλοεξάνιο – 14% μεθάνιο ως προς των πειραματικών τιμών και των τιμών της καταστατικής εξίσωσης των PR για τις θερμοκρασίες των πειραμάτων	138
5.87	Μέσο σφάλμα της συμπιεστότητας του μείγματος 86% κυκλοεξάνιο – 14% μεθάνιο ως προς των πειραματικών τιμών και των τιμών της καταστατικής εξίσωσης των PR για τις θερμοκρασίες των πειραμάτων	139
5.88	Μέσο απόλυτο σφάλμα της συμπιεστότητας του μείγματος 86% κυκλοεξάνιο – 14% μεθάνιο ως προς των πειραματικών τιμών και των τιμών της καταστατικής εξίσωσης των PR για τις θερμοκρασίες των πειραμάτων	139
5.89	Γραμμομοριακός όγκος του μείγματος 68% κυκλοεξάνιο – 32% μεθάνιο στους 28°C	140
5.90	Γραμμομοριακός όγκος του μείγματος 68% κυκλοεξάνιο – 32% μεθάνιο στους 50°C	140
5.91	Γραμμομοριακός όγκος του μείγματος 68% κυκλοεξάνιο – 32% μεθάνιο στους 90°C	141
5.92	Γραμμομοριακός όγκος του μείγματος 68% κυκλοεξάνιο – 32% μεθάνιο σε διαφορετικές θερμοκρασίες	141
5.93	Ισοθερμοκρασιακή συμπιεστότητα του μείγματος 68% κυκλοεξάνιο – 32% μεθάνιο στους 28°C	142

5.94	Ισοθερμοκρασιακή συμπιεστότητα του μείγματος 68% κυκλοεξάνιο – 32% μεθάνιο στους 50°C	142
5.95	Ισοθερμοκρασιακή συμπιεστότητα του μείγματος 68% κυκλοεξάνιο – 32% μεθάνιο στους 90°C	143
5.96	Μέσο σφάλμα μέτρησης του γραμμομοριακού όγκου του μείγματος 68% κυκλοεξάνιο - 32% μεθάνιο ως προς των πειραματικών τιμών και των τιμών της καταστατικής εξίσωσης των PR για τις θερμοκρασίες των πειραμάτων	144
5.97	Μέσο απόλυτο σχετικό σφάλμα του γραμμομοριακού όγκου του μείγματος 68% κυκλοεξάνιο – 32% μεθάνιο ως προς των πειραματικών τιμών και των τιμών της καταστατικής εξίσωσης των PR για τις θερμοκρασίες των πειραμάτων	144
5.98	Μέσο σφάλμα της συμπιεστότητας του μείγματος 68% κυκλοεξάνιο – 32% μεθάνιο ως προς των πειραματικών τιμών και των τιμών της καταστατικής εξίσωσης των PR για τις θερμοκρασίες των πειραμάτων	145
5.99	Μέσο απόλυτο σφάλμα της συμπιεστότητας του μείγματος 68% κυκλοεξάνιο – 32% μεθάνιο ως προς των πειραματικών τιμών και των τιμών της καταστατικής εξίσωσης των PR για τις θερμοκρασίες των πειραμάτων	145

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

3.1	Κρίσιμες ιδιότητες ορισμένων ρευστών.....	27
3.2	Σταθερές καθαρών συστατικών	31
4.1	Προδιαγραφές της αντλίας Teledyne ISCO 260D	38
4.2	Προδιαγραφές των βαλβίδων	39
4.3	Προδιαγραφές κλιβάνου	43
4.4	Προδιαγραφές μανομέτρων	44
4.5	Χαρακτηριστικά του μανομέτρου	45
4.6	Προδιαγραφές αυτοκλείστου	46
4.7	Προδιαγραφές συνδέσμων υψηλών πιέσεων	47
4.8	Ογκομέτρηση των βρόχων της πειραματικής διάταξης στα 10 bar και στους 28°C	66
4.9	Συμπιεστότητα νερού για τις θερμοκρασίες των πειραμάτων	70
5.1	Γενικά χαρακτηριστικά και ιδιότητες του κανονικού πεντανίου	88
5.2	Γενικά χαρακτηριστικά και ιδιότητες του τολουενίου	95
5.3	Γενικά χαρακτηριστικά και ιδιότητες του κυκλοεξανίου	102
5.4	Γενικά χαρακτηριστικά και ιδιότητες του μεθανίου	109

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

1.1	Διάγραμμα ταξινόμησης των πετρελαίων	3
1.2	Δημιουργία ρευστών υδρογονανθράκων	4
1.3	Απεικόνιση των χωρών με τα μεγαλύτερα κοιτάσματα πετρελαίου	7
2.1	p-V διάγραμμα για ένα συστατικό	11
2.2	Διάγραμμα φάσεων για ένα καθαρό συστατικό	12
2.3	Διάγραμμα p-V-T (περίπτωση ενός συστατικού)	12
2.4	Διάγραμμα φάσεων πολυσυστατικού μείγματος	14
2.5	Διαγράμματα φάσεων μιγμάτων υδρογονανθράκων: (a) Ξηρό αέριο,(b)Υγρό αέριο ...	15
2.6	Διάγραμμα φάσεων αερίου συμπυκνώματος	16
2.7	Διαγράμματα φάσεων πετρελαίου	17
4.1	Πειραματική διάταξη για την εκτέλεση των μετρήσεων	36
4.2	Διαδικασία πλήρωσης της αντλίας με νερό	52
4.3	Συμπιεστότητα του νερού σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία	71

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

4.1	Αντλία Teledyne ISCO	38
4.2	Βαλβίδα Autoclave Engineers	39
4.3	Βαλβίδα Nova Swiss	39
4.4	Δοχείο φόρτωσης υγρών	40
4.5	Ηλεκτρονικός υπολογιστής κατά τη διάρκεια επεξεργασίας μετρήσεων με το πρόγραμμα Lab VIEW	40
4.6	Θερμόμετρο P600	41
4.7	Θερμόμετρο P600	41
4.8	Κάρτα ψηφιοποίησης σημάτων BNC-2110	42
4.9	Εργαστηριακός κλίβανος	43
4.10	Μανόμετρα OMEGA PX 4200B	44
4.11	Μανόμετρο PX01 Series	45
4.12	Εσωτερικό μέρος του αυτοκλείστου	46
4.13	Αυτόκλειστο PROLIGHT TS-75704	46
4.14	Σύνδεσμοι υψηλών πιέσεων Autoclave, Nova και Swagelok	47
4.15	Μέρος της διάταξης που βρίσκεται εντός του κλιβάνου	48
4.16	Συσκευή Gasometer	49
4.17	Φιάλη φόρτωσης μεθανίου	50

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ II

ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΟΥ ΚΑΝΟΝΙΚΟΥ ΠΕΝΤΑΝΙΟΥ ΣΤΟΥΣ 28⁰C

Πίεση αντλίας αρχική (bar)	Πίεση αντλίας διορθωμέ- ν η (bar)	Όγκος αντλίας (cc)	Όγκος ρευστού (cc)	Πειραμα- τικός συντελεστ ής απόκλιση ς	Γραμμομοριακός όγκος από PR με την τεχνική προσθετικής διόρθωσης όγκου καταστατικής εξίσωσης (cc)	Πειραματικός συντελεστής ισοθερμοκρασια- κής συμπιεστότητας (exact) (10^{-6} psi ⁻¹)	Πειραματικός συντελεστής ισοθερμοκρασιακ ής συμπιεστότητας (approximated) (10^{-6} psi ⁻¹)	Συντελεστής ισοθερμοκρασια- κής συμπιεστότητας από PR (exact) (10^{-6} psi ⁻¹)	Συντελεστής ισοθερμοκρασια- κής συμπιεστότητας από PR(approximate d) (10^{-6} psi ⁻¹)
10.000	9.727	96.599	51.329	0.046	117.8541	19.641		19.9302	
39.567	38.619	95.004	50.809	0.180	116.9719	18.283	24.291	17.9962	18.9323
80.167	79.096	93.004	50.286	0.364	115.8807	16.492	17.624	15.8119	16.8603
120.367	119.235	91.103	49.846	0.545	114.9319	14.835	15.092	14.0835	14.9171
166.067	164.907	89.002	49.407	0.747	113.9802	13.084	13.341	12.4959	13.2610
199.433	198.250	87.502	49.120	0.892	113.3559	11.888	12.035	11.5282	12.0004
228.700	227.495	86.202	48.884	1.019	112.8497	10.893	11.377	10.7843	11.1489
270.133	268.925	84.404	48.593	1.197	112.19	9.563	9.939	9.8662	10.3132
300.633	299.373	83.101	48.398	1.328	111.7425	8.642	9.073	9.2756	9.5656
329.000	327.677	81.904	48.233	1.448	111.3516	7.825	8.330	8.7799	9.0238
370.033	368.623	80.203	48.024	1.622	110.8241	6.709	7.300	8.1400	8.4529
399.433	397.974	79.004	47.894	1.747	110.4708	5.953	6.399	7.7293	7.9316
429.233	427.718	77.803	47.777	1.872	110.1317	5.222	5.659	7.3484	7.5361
469.267	467.726	76.203	47.632	2.041	109.7028	4.292	5.227	6.8845	7.1121
499.833	498.243	75.003	47.544	2.171	109.3946	3.621	4.205	6.5633	6.7217
517.200	515.597	74.330	47.502	2.244	109.2262	3.254	3.501	6.3918	6.4769

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΟΥ ΚΑΝΟΝΙΚΟΥ ΠΕΝΤΑΝΙΟΥ ΣΤΟΥΣ 28°C

Πίεση (Pa)	Όγκος (m ³)	Βιβλιογραφικός συντελεστής απόκλισης	Βιβλιογραφικός συντελεστής ισοθερμοκρασιακής συμπιεστότητας (exact) (10 ⁻⁶ psi ⁻¹)	Βιβλιογραφικός συντελεστής ισοθερμοκρασιακής συμπιεστότητας (approximated) (10 ⁻⁶ psi ⁻¹)
1.100E+05	5.123E-05	0.00516373	15.365	
5.080E+06	5.067E-05	0.23586746	14.155	15.222
1.002E+07	5.017E-05	0.46066481	13.083	13.774
1.500E+07	4.972E-05	0.68340481	12.117	12.527
2.008E+07	4.931E-05	0.90719224	11.233	11.408
2.991E+07	4.858E-05	1.33148163	9.765	10.361
4.003E+07	4.793E-05	1.75822826	8.521	9.142
6.008E+07	4.688E-05	2.58106969	6.634	7.615

ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΟΥ ΚΑΝΟΝΙΚΟΥ ΠΕΝΤΑΝΙΟΥ ΣΤΟΥΣ 50°C

Πίεση αντλίας αρχική (bar)	Πίεση αντλίας διορθωμένη (bar)	Όγκος αντλίας (cc)	Όγκος ρευστού (cc)	Πειραματικός συντελεστής ή απόκλιση	Γραμμομοριακός όγκος από PR με την τεχνική προσθετικής διόρθωσης όγκου καταστατικής εξίσωσης (cc)	Πειραματικός συντελεστής ισοθερμοκρασιακής συμπιεστότητας (exact) (10^{-6} psi ⁻¹)	Πειραματικός συντελεστής ισοθερμοκρασιακής συμπιεστότητας (approximated) (10^{-6} psi ⁻¹)	Συντελεστής ισοθερμοκρασιακής συμπιεστότητας από PR (exact) (10^{-6} psi ⁻¹)	Συντελεστής ισοθερμοκρασιακής συμπιεστότητας από PR(approximated) (10^{-6} psi ⁻¹)
10.000	10.079	104.052	53.314	0.046	122.056336	20.385		27.9818	
40.333	39.623	102.401	52.783	0.178	120.754919	19.006	23.370	24.5772	26.2090
120.200	119.376	98.402	51.730	0.526	117.962682	15.494	17.404	18.3887	21.2028
170.967	170.176	96.002	51.203	0.742	116.560945	13.412	13.895	15.7761	17.0211
230.433	229.782	93.302	50.698	0.991	115.170834	11.114	11.477	13.4667	14.5663
300.833	300.329	90.201	50.195	1.283	113.788386	8.589	9.734	11.4207	12.3936
371.867	371.491	87.202	49.817	1.575	112.609127	6.245	7.320	9.8551	10.6040
420.767	420.298	85.201	49.620	1.775	111.897741	4.749	5.594	8.9848	9.4083
480.633	480.452	82.803	49.431	2.021	111.109341	3.025	4.379	8.0816	8.5194
517.033	516.974	81.371	49.342	2.171	110.671356	2.039	3.395	7.6065	7.8399

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΟΥ ΚΑΝΟΝΙΚΟΥ ΠΕΝΤΑΝΙΟΥ ΣΤΟΥΣ 50°C

Πίεση (Pa)	Όγκος (m ³)	Βιβλιογραφικός συντελεστής απόκλισης	Βιβλιογραφικός συντελεστής ισοθερμοκρασιακής συμπιεστότητας (exact) (10 ⁻⁶ psi ⁻¹)	Βιβλιογραφικός συντελεστής ισοθερμοκρασιακής συμπιεστότητας (approximated) (10 ⁻⁶ psi ⁻¹)
7.070E+06	5.201E-05	0.3129161	27.634	
1.051E+07	5.15E-05	0.4606164	17.516	19.709
1.396E+07	5.116E-05	0.6078514	13.883	12.995
1.741E+07	5.083E-05	0.7531896	12.199	12.911
2.086E+07	5.051E-05	0.8966675	11.294	12.828
2.775E+07	4.995E-05	1.1796225	10.431	11.143
3.465E+07	4.94E-05	1.4567987	10.074	11.004
5.188E+07	4.827E-05	2.1311763	9.855	9.282

ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΟΥ ΚΑΝΟΝΙΚΟΥ ΠΕΝΤΑΝΙΟΥ ΣΤΟΥΣ ΣΤΟΥΣ 90°C

Πίεση αντλίας αρχική (bar)	Πίεση αντλίας διορθωμέ νη (bar)	Όγκος αντλίας (cc)	Όγκος ρευστού (cc)	Πειραμα τικός συντελεσ τής απόκλιση ς	Γραμμομοριακός όγκος από PR με την τεχνική προσθετικής διόρθωσης όγκου καταστατικής εξίσωσης (cc)	Πειραματικός συντελεστής ισοθερμοκρασιακ ής συμπιεστότητας (exact) (10^{-6} psi ⁻¹)	Πειραματικός συντελεστής ισοθερμοκρασια κής συμπιεστότητας (approximated) (10^{-6} psi ⁻¹)	Συντελεστής ισοθερμοκρασιακ ής συμπιεστότητας από PR (exact) (10^{-6} psi ⁻¹)	Συντελεστής ισοθερμοκρασια κής συμπιεστότητας από PR(approximate d) (10^{-6} psi ⁻¹)
10.000	10.274	121.626	59.146	0.046		35.123			
37.467	35.777	119.403	57.963	0.157	128.3168	31.410	54.575	45.9717	
115.300	113.584	114.703	56.213	0.484	123.1245	22.846	27.166	30.4884	37.2097
165.067	163.357	112.003	55.398	0.685	120.75	18.897	20.217	24.9125	27.5241
229.167	227.569	108.704	54.528	0.940	118.3177	14.965	17.004	20.0384	22.3123
297.600	296.098	105.401	53.818	1.207	116.2475	11.785	13.178	16.4710	18.1490
369.200	367.813	102.104	53.234	1.483	114.4798	9.240	10.482	13.7993	15.0647
416.100	414.819	100.005	52.912	1.662	113.485	7.890	8.905	12.4344	13.0959
478.600	477.455	97.303	52.578	1.901	112.3158	6.389	6.966	10.9492	11.6642
515.233	514.241	95.751	52.414	2.041	111.6985	5.636	5.853	10.2142	10.5743

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΟΥ ΚΑΝΟΝΙΚΟΥ ΠΕΝΤΑΝΙΟΥ ΣΤΟΥΣ 90°C

Πίεση (Pa)	Όγκος (m ³)	Βιβλιογραφικός συντελεστής απόκλισης	Βιβλιογραφικός συντελεστής ισοθερμοκρασιακής συμπιεστότητας (exact) (10 ⁻⁶ psi ⁻¹)	Βιβλιογραφικός συντελεστής ισοθερμοκρασιακής συμπιεστότητας (approximated) (10 ⁻⁶ psi ⁻¹)
7.070E+06	5.657E-05	0.2947651	51.583	
1.051E+07	5.558E-05	0.4304723	29.690	35.591
1.396E+07	5.49E-05	0.5648179	21.742	24.472
1.741E+07	5.433E-05	0.6971295	18.024	20.740
2.086E+07	5.387E-05	0.8281472	16.008	17.121
2.775E+07	5.297E-05	1.0831973	14.048	16.928
3.465E+07	5.226E-05	1.3346185	13.200	13.320
5.188E+07	5.075E-05	1.9404409	12.564	11.747

ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΟΥ ΤΟΛΟΥΕΝΙΟΥ ΣΤΟΥΣ 28°C

Πίεση αντλίας αρχική (bar)	Πίεση αντλίας διορθωμέ- νη (bar)	Όγκος αντλίας (cc)	Όγκος ρευστού (cc)	Πειραματικό ς συντελεστής απόκλισης	Γραμμομοριακός όγκος από PR με την τεχνική προσθετικής διόρθωσης όγκου καταστατικής εξίσωσης (cc)	Πειραματικός συντελεστής ισοθερμοκρασι- κής συμπιεστότητα- ς (exact) (10^{-6} psi ⁻¹)	Πειραματικός συντελεστής ισοθερμοκρασια- κής συμπιεστότητας (approximated) (10^{-6} psi ⁻¹)	Συντελεστής ισοθερμοκρασι- κής συμπιεστότητα- ς από PR (exact) (10^{-6} psi ⁻¹)	Συντελεστής ισοθερμοκρασια- κής συμπιεστότητας από PR(approximat- ed) (10^{-6} psi ⁻¹)
11.8	11.549	121.788	76.584	0.0500		9.68148054		6.9158	
31	30.821	120.805	76.299	0.1328	106.9719	9.25774946	13.33	6.6841	6.7988
60.2	59.968	119.432	75.988	0.2574	106.6925	8.64032391	9.6684	6.3589	6.5191
90.6	90.355	118.056	75.717	0.3864	106.4158	8.02522209	8.0942	6.0486	6.2015
120	119.676	116.734	75.464	0.5101	106.1619	7.45788848	7.8688	5.7736	5.9092
150.5	149.986	115.4	75.239	0.6374	105.9117	6.89702335	6.7914	5.5116	5.6408
180.2	179.498	114.103	75.022	0.7606	105.6791	6.37460683	6.7494	5.2758	5.3922
209.9	208.906	112.834	74.833	0.8830	105.4575	5.87610201	5.9159	5.0578	5.1655
240.5	239.260	111.533	74.644	1.0087	105.2384	5.38346984	5.724	4.8487	4.9520
270.1	268.641	110.297	74.485	1.1301	105.0352	4.92676278	5.0262	4.6601	4.7533
299.9	298.397	109.059	74.330	1.2527	104.8376	4.48340178	4.8091	4.4816	4.5698
330.2	328.542	107.82	74.193	1.3767	104.6452	4.0529756	4.2275	4.3124	4.3960
359.8	358.112	106.615	74.064	1.4980	104.4637	3.64815604	4.0485	4.1568	4.2338
390	388.174	105.393	73.940	1.6211	104.2861	3.25343789	3.8399	4.0082	4.0817
419.8	417.893	104.226	73.857	1.7432	104.1168	2.87910588	2.6199	3.8699	3.9383
450.3	448.337	103.029	73.769	1.8680	103.9496	2.51123663	2.7	3.7364	3.8025
480	477.902	101.877	73.696	1.9892	103.7928	2.16839894	2.2802	3.6141	3.6747
517	514.853	100.445	73.624	2.1409	103.6042	1.7588695	1.8269	3.4705	3.5415

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΟΥ ΤΟΛΟΥΕΝΙΟΥ ΣΤΟΥΣ 28°C

Πίεση (Pa)	Όγκος (m ³)	Βιβλιογραφικός συντελεστής απόκλισης	Βιβλιογραφικός συντελεστής ισοθερμοκρασιακής συμπιεστότητας (exact) (10 ⁻⁶ psi ⁻¹)	Βιβλιογραφικός συντελεστής ισοθερμοκρασιακής συμπιεστότητας (approximated) (10 ⁻⁶ psi ⁻¹)
1.000E+05	7.585E-05	0.004284	6.286	
1.251E+07	7.503E-05	0.530128	5.681	6.022
2.499E+07	7.43E-05	1.048758	5.188	5.360
3.747E+07	7.363E-05	1.558344	4.784	4.997
4.995E+07	7.302E-05	2.059981	4.449	4.644
6.250E+07	7.245E-05	2.557566	4.166	4.276

ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΟΥ ΤΟΛΟΥΕΝΙΟΥ ΣΤΟΥΣ 50°C

Πίεση αντλίας αρχική (bar)	Πίεση αντλίας διορθω- μένη (bar)	Όγκος αντλίας (cc)	Όγκος ρευστού (cc)	Πειραμα- τικός συντελεσ- τής απόκλιση ς	Γραμμομοριακός όγκος από PR με την τεχνική προσθετικής διόρθωσης όγκου καταστατικής εξίσωσης (cc)	Πειραματικός συντελεστής ισοθερμοκρασιακ- ής συμπιεστότητας (exact) (10^{-6} psi ⁻¹)	Πειραματικός συντελεστής ισοθερμοκρασιακής συμπιεστότητας (approximated) (10^{-6} psi ⁻¹)	Συντελεστής ισοθερμοκρασια- κής συμπιεστότητας από PR (exact) (10^{-6} psi ⁻¹)	Συντελεστής ισοθερμοκρασιακής συμπιεστότητας από PR (approximated) (10^{-6} psi ⁻¹)
10.7	10.538	129.176	78.464	0.0434	111.3962	12.424		8.7940	
31	30.913	128.042	78.079	0.1266	111.132	11.406	16.638	8.4395	8.6145
60.7	60.686	126.599	77.732	0.2475	110.7654	10.113	10.314	7.9658	8.1985
90.9	91.032	125.194	77.441	0.3698	110.4132	8.991	8.5082	7.5299	7.7441
130	130.220	123.4	77.090	0.5266	109.9871	7.775	7.9955	7.0266	7.2731
150.3	150.580	122.483	76.922	0.6076	109.7774	7.227	7.3831	6.7881	6.9062
180	180.276	121.162	76.697	0.7253	109.4844	6.516	6.8016	6.4650	6.6243
210.3	210.603	119.823	76.476	0.8449	109.1999	5.879	6.5568	6.1620	6.3114
240	240.095	118.547	76.296	0.9609	108.9363	5.333	5.5098	5.8904	6.0244
270.6	270.575	117.237	76.115	1.0804	108.6763	4.833	5.3673	5.6309	5.7589
300.5	300.272	115.981	75.962	1.1965	108.4343	4.400	4.661	5.3966	5.5123
329.6	329.317	114.763	75.818	1.3098	108.2075	4.021	4.5098	5.1834	5.2888
360.5	360.177	113.499	75.694	1.4302	107.9767	3.659	3.6499	4.9723	5.0766
389.7	389.432	112.307	75.580	1.5440	107.7667	3.350	3.5674	4.7854	4.8778
420.2	419.979	111.072	75.470	1.6627	107.5561	3.059	3.2731	4.6028	4.6931
450.6	450.397	109.858	75.378	1.7810	107.3545	2.796	2.7713	4.4325	4.5168
480.8	480.554	108.661	75.295	1.8981	107.1623	2.559	2.5067	4.2740	4.3525
517.4	516.957	107.231	75.216	2.0398	106.9395	2.301	1.9993	4.0952	4.1835

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΟΥ ΤΟΛΟΥΕΝΙΟΥ ΣΤΟΥΣ 50°C

Πίεση (Pa)	Όγκος (m ³)	Βιβλιογραφικός συντελεστής απόκλισης	Βιβλιογραφικός συντελεστής ισοθερμοκρασιακής συμπιεστότητας (exact) (10 ⁻⁶ psi ⁻¹)	Βιβλιογραφικός συντελεστής ισοθερμοκρασιακής συμπιεστότητας (approximated) (10 ⁻⁶ psi ⁻¹)
1.000E+05	7.791E-05	0.004087	7.407	
2.600E+06	7.7697E-05	0.1059727	7.233	7.544
5.100E+06	7.7493E-05	0.2073228	7.065	7.262
7.500E+06	7.7305E-05	0.3041477	6.911	6.968
1.000E+07	7.7116E-05	0.4045357	6.756	6.770
1.530E+07	7.6713E-05	0.615709	6.446	6.806
2.010E+07	7.6397E-05	0.8055373	6.185	5.934
3.000E+07	7.5752E-05	1.1921428	5.701	5.904
4.030E+07	7.5124E-05	1.5881825	5.263	5.565
5.020E+07	7.457E-05	1.9637375	4.894	5.155
7.010E+07	7.3602E-05	2.7065792	4.277	4.528

ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΟΥ ΤΟΛΟΥΕΝΙΟΥ ΣΤΟΥΣ 90°C

Πίεση αντλίας αρχική (bar)	Πίεση αντλίας διορθωμ ένη (bar)	Όγκος αντλίας (cc)	Όγκος ρευστού (cc)	Πειραματικ ός συντελεστή ς απόκλισης	Γραμμομοριακός όγκος από PR με την τεχνική προσθετικής διόρθωσης όγκου καταστατικής εξίσωσης (cc)	Πειραματικός συντελεστής ισοθερμοκρασιακής συμπιεστότητας (exact) (10^{-6} psi ⁻¹)	Πειραματικός συντελεστής ισοθερμοκρασιακής συμπιεστότητας (approximated) (10^{-6} psi ⁻¹)	Συντελεστής ισοθερμοκρασια κής συμπιεστότητας από PR (exact) (10^{-6} psi ⁻¹)	Συντελεστής ισοθερμοκρασιακής συμπιεστότητας από PR(approximated) (10^{-6} psi ⁻¹)
12.3	12.540	143.987	81.594	0.0478	117.7940557	13.570		13.4269	
30.1	30.542	142.852	81.133	0.1157	117.4220085	12.594	21.6732	12.8124	13.1151
59.9	60.499	141.317	80.727	0.2280	116.8411664	11.173	11.5399	11.8980	12.3447
90	90.691	139.837	80.388	0.3403	116.2985961	9.954	9.62196	11.0910	11.4858
119.7	120.391	138.411	80.087	0.4501	115.8016685	8.923	8.69707	10.3896	10.7334
149.9	150.734	136.981	79.802	0.5615	115.3272432	8.012	8.11905	9.7520	10.0647
180.1	180.920	135.576	79.541	0.6717	114.8849665	7.223	7.47293	9.1845	9.4631
209.5	210.341	134.237	79.316	0.7787	114.4793879	6.549	6.63776	8.6859	8.9310
240.6	241.488	132.836	79.093	0.8915	114.0746952	5.920	6.22031	8.2085	8.4432
269.7	270.772	131.51	78.870	0.9968	113.7151446	5.397	6.65785	7.8004	8.0014
299.4	300.455	130.213	78.698	1.1037	113.3695239	4.925	5.06009	7.4221	7.6085
329.4	330.296	128.933	78.555	1.2111	113.039503	4.500	4.20991	7.0731	7.2451
360.3	360.886	127.623	78.416	1.3209	112.7178291	4.109	3.99654	6.7442	6.9063
390.3	390.754	126.33	78.259	1.4274	112.418666	3.765	4.60465	6.4479	6.5941
419.5	419.867	125.116	78.152	1.5317	112.140151	3.462	3.25803	6.1803	6.3125
449.4	449.752	123.866	78.035	1.6382	111.8666764	3.179	3.45828	5.9250	6.0511
481.6	481.797	122.581	77.920	1.7524	111.5863955	2.904	3.17074	5.6708	5.7963
517.2	517.303	121.052	77.790	1.8783	111.2903204	2.630	3.2446	5.4104	5.5388

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΟΥ ΤΟΛΟΥΕΝΙΟΥ ΣΤΟΥΣ 90°C

Πίεση (Pa)	Όγκος (m ³)	Βιβλιογραφικός συντελεστής απόκλισης	Βιβλιογραφικός συντελεστής ισοθερμοκρασιακής συμπιεστότητας (exact) (10 ⁻⁶ psi ⁻¹)	Βιβλιογραφικός συντελεστής ισοθερμοκρασιακής συμπιεστότητας (approximated) (10 ⁻⁶ psi ⁻¹)
1.000E+05	8.278E-05	0.003759	10.453	
1.251E+07	8.132E-05	0.461921	9.166	9.894
2.499E+07	8.007E-05	0.908612	8.109	8.518
3.747E+07	7.897E-05	1.34362	7.234	7.655
4.995E+07	7.799E-05	1.768922	6.501	6.893
6.250E+07	7.712E-05	2.188573	5.879	6.187

ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΟΥ ΚΥΚΛΟΘΕΑΝΙΟΥ ΣΤΟΥΣ 28⁰C

Πίεση αντλίας αρχική (bar)	Πίεση αντλίας διορθωμέν η (bar)	Όγκος αντλίας (cc)	Όγκος ρευστού (cc)	Πειραματικός συντελεστής απόκλισης	Γραμμομοριακός όγκος από PR με την τεχνική προσθετικής διόρθωσης όγκου καταστατικής εξίσωσης (cc)	Πειραματικός συντελεστής ισοθερμοκρασι ακής συμπιεστότητα ς (exact) (10^{-6} psi ⁻¹)	Πειραματικός συντελεστής ισοθερμοκρασιακ ής συμπιεστότητας (approximated) (10^{-6} psi ⁻¹)	Συντελεστής ισοθερμοκρασι ακής συμπιεστότητα ς από PR (exact) (10^{-6} psi ⁻¹)	Συντελεστής ισοθερμοκρασι ακής συμπιεστότητα ς από PR(approximat ed) (10^{-6} psi ⁻¹)
30.6	30.584	74.417	29.896	0.1321	107.0794	16.0176		9.0918	
60.1	60.007	73.116	29.668	0.2571	106.7092	14.3708	17.96519	8.5595	8.8208
89.2	89.003	71.89	29.500	0.3792	106.366	12.8606	13.49367	8.0875	8.3195
119.5	119.103	70.643	29.355	0.5050	106.03	11.4012	11.30661	7.6446	7.8623
150	149.472	69.397	29.218	0.6308	105.7101	10.0312	10.6196	7.2397	7.4389
179.6	178.875	68.204	29.101	0.7518	105.4167	8.79474	9.385829	6.8825	7.0584
209.4	208.550	67.02	29.000	0.8735	105.1357	7.62943	8.033787	6.5523	6.7150
240.3	239.289	65.806	28.910	0.9992	104.8591	6.50282	7.00676	6.2386	6.3932
269.9	268.819	64.651	28.831	1.1194	104.6061	5.49175	6.366697	5.9611	6.0980
299.6	298.348	63.512	28.772	1.2398	104.3646	4.54517	4.790716	5.7044	5.8311
329.5	328.174	62.373	28.720	1.3613	104.1315	3.64962	4.16734	5.4640	5.5827
358.3	356.899	61.289	28.683	1.4786	103.9165	2.84055	3.079402	5.2485	5.3550
389.4	387.905	60.13	28.655	1.6054	103.6942	2.02178	2.187026	5.0319	5.1389
419.8	418.152	59.012	28.641	1.7297	103.4864	1.27375	1.165878	4.8349	4.9323
449.6	447.888	57.923	28.625	1.8517	103.2903	0.5837	1.252606	4.6538	4.7433
479.3	477.462	56.852	28.615	1.9733	103.1026	-0.06109	0.823184	4.4848	4.5684
517.3	515.253	55.483	28.609	2.1290	102.8738	-0.8292	0.402897	4.2836	4.3829

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΟΥ ΚΥΚΛΟΕΞΑΝΙΟΥ ΣΤΟΥΣ 28°C

Πίεση (Pa)	Όγκος (m ³)	Βιβλιογραφικός συντελεστής απόκλισης	Βιβλιογραφικός συντελεστής ισοθερμοκρασιακής συμπιεστότητας (exact) (10 ⁻⁶ psi ⁻¹)	Βιβλιογραφικός συντελεστής ισοθερμοκρασιακής συμπιεστότητας (approximated) (10 ⁻⁶ psi ⁻¹)
1.000E+05	3.018E-05	0.0043592	7.708	
5.000E+06	3.002E-05	0.2168032	7.263	7.486
1.000E+07	2.987E-05	0.4313943	6.862	7.051
1.500E+07	2.972E-05	0.6439627	6.507	6.682
2.000E+07	2.959E-05	0.8546694	6.192	6.353
2.500E+07	2.946E-05	1.0636621	5.910	6.046
3.000E+07	2.933E-05	1.2710572	5.657	5.777
3.500E+07	2.922E-05	1.4769466	5.430	5.546

ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΟΥ ΚΥΚΛΟΕΞΑΝΙΟΥ ΣΤΟΥΣ 50°C

Πίεση αντλίας αρχική (bar)	Πίεση αντλίας διορθωμέν η (bar)	Όγκος αντλίας (cc)	Όγκος ρευστού (cc)	Πειραματικός συντελεστής απόκλισης	Γραμμομοριακός όγκος από PR με την τεχνική προσθετικής διόρθωσης όγκου καταστατικής εξίσωσης (cc)	Πειραματικός συντελεστής ισοθερμοκρασιακ ής συμπιεστότητας (exact) (10^{-6} psi ⁻¹)	Πειραματικός συντελεστής ισοθερμοκρασια κής συμπιεστότητας (approximated) (10^{-6} psi ⁻¹)	Συντελεστής ισοθερμοκρασι ακής συμπιεστότητα ς από PR (exact) (10^{-6} psi ⁻¹)	Συντελεστής ισοθερμοκρασια κής συμπιεστότητας από PR(approximate d) (10^{-6} psi ⁻¹)
31.3	31.759	80.455	31.103	0.1325		17.531		11.6374	
61.2	61.723	79.087	30.838	0.2553	110.2947	14.599	19.6604	10.8436	11.2319
89.4	90.044	77.861	30.653	0.3703	109.8608	12.302	14.6784	10.1797	10.5052
119.8	120.452	76.61	30.524	0.4932	109.4251	10.236	9.57787	9.5447	9.8560
150.1	150.711	75.379	30.411	0.6148	109.0191	8.508	8.44378	8.9803	9.2573
179.6	180.124	74.199	30.319	0.7326	108.6481	7.080	7.05794	8.4866	8.7293
210.2	210.754	72.986	30.235	0.8548	108.2838	5.805	6.23309	8.0217	8.2503
239.1	239.589	71.848	30.164	0.9695	107.9597	4.768	5.667	7.6237	7.8197
270.2	270.676	70.647	30.103	1.0930	107.6288	3.797	4.47314	7.2322	7.4249
300	300.525	69.483	30.046	1.2113	107.3274	2.984	4.3768	6.8883	7.0578
329.2	329.753	68.378	30.018	1.3279	107.0466	2.283	2.16112	6.5784	6.7313
359.6	359.090	67.249	30.000	1.4451	106.7779	1.660	1.42813	6.2910	6.4328
389.5	390.093	66.136	29.987	1.5692	106.507	1.077	1.0148	6.0102	6.1487
420	420.499	65.031	29.974	1.6908	106.2535	0.568	0.949	5.7552	5.8811
450.1	450.724	63.922	29.969	1.8120	106.0124	0.117	0.40405	5.5196	5.6360
479.4	479.952	62.875	29.964	1.9292	105.7889	-0.274	0.38012	5.3072	5.4122
517.1	517.611	61.541	29.959	2.0802	105.514	-0.724	0.29751	5.0533	5.1785

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΟΥ ΚΥΚΛΟΕΞΑΝΙΟΥ ΣΤΟΥΣ 50°C

Πίεση (Pa)	Όγκος (m ³)	Βιβλιογραφικός συντελεστής απόκλισης	Βιβλιογραφικός συντελεστής ισοθερμοκρασιακής συμπιεστότητας (exact) (10 ⁻⁶ psi ⁻¹)	Βιβλιογραφικός συντελεστής ισοθερμοκρασιακής συμπιεστότητας (approximated) (10 ⁻⁶ psi ⁻¹)
1.000E+05	3.11394E-05	0.0041772	9.394	
5.000E+06	3.09341E-05	0.2074847	8.867	9.307
1.000E+07	3.07399E-05	0.4123647	8.372	8.680
1.500E+07	3.0559E-05	0.614906	7.914	8.139
2.000E+07	3.039E-05	0.8153417	7.491	7.643
2.500E+07	3.02308E-05	1.0138356	7.099	7.244
3.000E+07	3.00805E-05	1.2105558	6.735	6.869
3.500E+07	2.99382E-05	1.4056364	6.396	6.535
4.000E+07	2.98034E-05	1.5992069	6.080	6.223
4.500E+07	2.96747E-05	1.7913375	5.785	5.967
5.000E+07	2.95523E-05	1.9821667	5.510	5.697
5.500E+07	2.94347E-05	2.1717019	5.252	5.500

ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΟΥ ΚΥΚΛΟΘΕΞΑΝΙΟΥ ΣΤΟΥΣ 90°C

Πίεση αντλίας αρχική (bar)	Πίεση αντλίας διορθωμέν η (bar)	Όγκος αντλίας (cc)	Όγκος ρευστού (cc)	Πειραματικ ός συντελεστής απόκλισης	Γραμμομοριακός όγκος από PR με την τεχνική προσθετικής διόρθωσης όγκου καταστατικής εξίσωσης (cc)	Πειραματικός συντελεστής ισοθερμοκρασιακ ής συμπιεστότητας (exact) (10^{-6} psi ⁻¹)	Πειραματικός συντελεστής ισοθερμοκρασια κής συμπιεστότητας (approximated) (10^{-6} psi ⁻¹)	Συντελεστής ισοθερμοκρασιακ ής συμπιεστότητας από PR (exact) (10^{-6} psi ⁻¹)	Συντελεστής ισοθερμοκρασια κής συμπιεστότητας από PR(approximate d) (10^{-6} psi ⁻¹)
29.7	30.823	94.918	33.184	0.1221		35.026		18.3593	
59.1	60.270	93.533	32.913	0.2368	115.897	26.079	41.23619	16.7489	17.5308
89.6	90.879	92.168	32.704	0.3548	115.144	19.847	18.46876	15.3346	16.0223
120	121.287	90.826	32.514	0.4707	114.4605	15.523	14.46489	14.1344	14.7194
149.6	150.964	89.537	32.346	0.5829	113.8467	12.445	13.54418	13.1199	13.6156
179.5	180.846	88.262	32.212	0.6953	113.2745	10.11	11.91097	12.2253	12.6630
209.6	210.853	87.019	32.102	0.8079	112.7405	8.3022	9.572603	11.4327	11.8209
239.1	240.336	85.797	32.005	0.9181	112.2507	6.9015	8.00409	10.7398	11.0797
269.1	270.165	84.604	31.933	1.0298	111.7865	5.7637	6.969338	10.1120	10.4203
300	301.022	83.361	31.869	1.1451	111.3359	4.8088	4.993059	9.5284	9.8151
328.3	329.267	82.222	31.813	1.2504	110.9472	4.0866	4.943451	9.0447	9.2828
359.6	360.455	81.021	31.772	1.3670	110.5418	3.4205	3.841701	8.5589	8.7978
389.7	390.522	79.832	31.739	1.4795	110.1723	2.8816	2.997277	8.1324	8.3424
419.8	420.668	78.656	31.703	1.5919	109.8211	2.4225	2.401821	7.7408	7.9338
448.2	449.076	77.564	31.687	1.6985	109.5063	2.0503	2.716293	7.4010	7.5687
480.6	481.311	76.351	31.679	1.8200	109.1665	1.6861	1.074363	7.0457	7.2208
519.6	520.117	74.863	31.673	1.9664	108.7797	1.3141	0.457087	6.6555	6.8474

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΑ ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΟΥ ΚΥΚΛΟΕΞΑΝΙΟΥ ΣΤΟΥΣ 90°C

Πίεση (Pa)	Όγκος (m ³)	Βιβλιογραφικός συντελεστής απόκλισης	Βιβλιογραφικός συντελεστής ισοθερμοκρασιακής συμπιεστότητας (exact) (10 ⁻⁶ psi ⁻¹)	Βιβλιογραφικός συντελεστής ισοθερμοκρασιακής συμπιεστότητας (approximated) (10 ⁻⁶ psi ⁻¹)
5.000E+06	3.341E-05	0.18899	13.879	
2.000E+07	3.25E-05	0.735347	11.290	12.704
4.000E+07	3.16E-05	1.429913	8.577	9.691
6.000E+07	3.091E-05	2.098044	6.478	7.607

ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΟΥ ΜΕΙΓΜΑΤΟΣ 88% ΚΑΝΟΝΙΚΟ ΠΕΝΤΑΝΙΟ - 12% ΜΕΘΑΝΙΟ ΣΤΟΥΣ 28⁰C

Πίεση αντλίας αρχική (bar)	Πίεση αντλίας διορθωμέν η (bar)	Όγκος αντλίας (cc)	Όγκος ρευστού (cc)	Πειραματικός συντελεστής απόκλισης	Γραμμομοριακός όγκος από PR με την τεχνική προσθετικής διόρθωσης όγκου καταστατικής εξίσωσης (cc)	Πειραματικός συντελεστής ισοθερμοκρασια κής συμπιεστότητας (exact) (10^{-6} psi ⁻¹)	Πειραματικός συντελεστής ισοθερμοκρασια κής συμπιεστότητας (approximated) (10^{-6} psi ⁻¹)	Συντελεστής ισοθερμοκρασι ακής συμπιεστότητα ς από PR (exact) (10^{-6} psi ⁻¹)	Συντελεστής ισοθερμοκρασιακ ής συμπιεστότητας από PR(approximated) (10^{-6} psi ⁻¹)
86.4	86.004	98.206	55.714	0.3805		52.136		18.5060	
114.9	114.454	96.003	54.547	0.4957		36.526	51.276	16.9107	19.1116
156.7	156.023	93.406	53.470	0.6625	103.970451	23.983	33.072	14.9902	17.6861
184.2	183.483	92.097	53.161	0.7745	103.371408	19.022	14.553	13.9273	15.915
209.2	208.589	90.907	52.880	0.8759	102.86324	15.769	14.551	13.0690	14.4469
250.6	249.830	89.001	52.479	1.0411	102.098962	12.057	12.713	11.8494	13.4899
279.8	278.864	87.707	52.247	1.1569	101.606409	10.224	10.532	11.1068	12.4413
316.6	315.362	86.101	51.979	1.3017	101.033095	8.500	9.711	10.2835	11.471
346.7	345.197	84.806	51.779	1.4193	100.597906	7.426	8.932	9.6869	10.6858
370.5	368.995	83.803	51.641	1.5131	100.270035	6.726	7.709	9.2531	9.97998
389.5	387.905	83.002	51.531	1.5873	100.020669	6.248	7.784	8.9320	9.46712
421.1	419.389	81.701	51.379	1.7110	99.6256736	5.575	6.469	8.4386	9.09092
450.3	448.527	80.508	51.248	1.8252	99.2806533	5.061	6.053	8.0224	8.68121
487.6	485.639	79.004	51.100	1.9706	98.8670255	4.523	5.363	7.5414	8.22746
517	514.722	77.868	51.033	2.0858	98.5612237	4.172	3.110	7.1980	7.77767

ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΟΥ ΜΕΙΓΜΑΤΟΣ 88% ΚΑΝΟΝΙΚΟ ΠΕΝΤΑΝΙΟ - 12% ΜΕΘΑΝΙΟ ΣΤΟΥΣ 50°C

Πίεση αντλίας αρχική (bar)	Πίεση αντλίας διορθωμέ- νι (bar)	Όγκος αντλίας (cc)	Όγκος ρευστού (cc)	Πειραματι- κός συντελεστ- ής απόκλισης	Γραμμομοριακός όγκος από PR με την τεχνική προσθετικής διόρθωσης όγκου καταστατικής εξίσωσης (cc)	Πειραματικός συντελεστής ισοθερμοκρασι- ακής συμπίεστότη- τας (exact) (10^{-6} psi ⁻¹)	Πειραματικός συντελεστής ισοθερμοκρασιακ- ής συμπίεστότητας (approximated) (10^{-6} psi ⁻¹)	Συντελεστής ισοθερμοκρασια- κής συμπίεστότητας από PR (exact) (10^{-6} psi ⁻¹)	Συντελεστής ισοθερμοκρασια- κής συμπίεστότητας από PR(approximate d) (10^{-6} psi ⁻¹)
57.5	57.190	108.003	59.018	0.249		56.590		28.3008	
89.1	89.087	105.406	57.587	0.378		43.944	53.040	24.7586	26.4546
120.2	120.533	103.305	56.633	0.503		35.077	36.594	22.0040	23.3304
150.1	150.529	101.302	55.734	0.618	106.4513	28.793	36.798	19.8641	20.9
180.1	180.650	99.605	55.144	0.734	105.5579	23.946	24.355	18.0724	18.9422
210.8	211.493	98.005	54.676	0.852	104.7315	20.065	19.014	16.5224	17.2762
239.9	240.672	96.501	54.246	0.962	104.0191	17.129	18.661	15.2645	15.8783
270.2	270.980	95.007	53.870	1.076	103.3401	14.648	15.816	14.1298	14.684
299.8	300.464	93.607	53.563	1.186	102.731	12.661	13.394	13.1631	13.6362
330.2	330.595	92.201	53.278	1.298	102.1543	10.967	12.172	12.2906	12.718
361.1	361.355	90.807	53.025	1.412	101.6074	9.515	10.700	11.5003	11.8877
390.8	391.100	89.503	52.816	1.523	101.1141	8.324	9.112	10.8174	11.1527
420.7	421.008	88.201	52.618	1.633	100.6495	7.296	8.687	10.1993	10.503
451.4	451.794	86.907	52.457	1.747	100.2006	6.385	6.869	9.6246	9.9071
480.3	480.666	85.701	52.317	1.854	99.80407	5.642	6.362	9.1349	9.37609
517.2	517.090	84.224	52.202	1.990	99.33414	4.830	4.179	8.5758	8.85027

ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΟΥ ΜΕΙΓΜΑΤΟΣ 88% ΚΑΝΟΝΙΚΟ ΠΕΝΤΑΝΙΟ - 12% ΜΕΘΑΝΙΟ ΣΤΟΥΣ 90°C

Πίεση αντλίας αρχική (bar)	Πίεση αντλίας διορθωμένη (bar)	Όγκος αντλίας (cc)	Όγκος ρευστού (cc)	Πειραματικός συντελεστής απόκλισης	Γραμμομοριακός όγκος από PR με την τεχνική προσθετικής διόρθωσης όγκου καταστατικής εξίσωσης (cc)	Πειραματικός συντελεστής ισοθερμοκρασιακής συμπίεστότητας (exact) (10^{-6} psi ⁻¹)	Πειραματικός συντελεστής ισοθερμοκρασιακής συμπίεστότητας (approximated) (10^{-6} psi ⁻¹)	Συντελεστής ισοθερμοκρασιακής συμπίεστότητας από PR (exact) (10^{-6} psi ⁻¹)	Συντελεστής ισοθερμοκρασιακής συμπίεστότητας από PR(approximated) (10^{-6} psi ⁻¹)
70.4	71.407	121.789	61.597	0.289		60.323		48.2925	
100.2	101.286	119.278	60.215	0.400	114.09851	41.839	52.342	40.5242	44.1875
129.6	130.912	117.23	59.281	0.509	112.171364	31.339	36.373	34.8886	37.5715
160.3	161.537	115.458	58.673	0.622	110.477157	24.580	23.233	30.4461	32.5718
189.8	191.086	113.805	58.137	0.729	109.060492	20.250	21.379	27.0673	28.6946
220.3	221.542	112.176	57.664	0.838	107.77562	17.131	18.503	24.2475	25.6094
250.1	251.361	110.602	57.219	0.943	106.656402	14.919	17.903	21.9687	23.0736
279.8	280.677	109.114	56.856	1.047	105.665964	13.286	14.950	20.0821	20.9997
309.8	310.150	107.671	56.550	1.151	104.762125	12.020	12.634	18.4617	19.2513
343.2	343.186	106.099	56.244	1.266	103.841451	10.920	11.339	16.9058	17.6632
370.6	370.877	104.69	55.873	1.359	103.134148	10.186	16.466	15.7727	16.3275
399.7	399.914	103.377	55.662	1.460	102.447073	9.557	8.956	14.7218	15.2365
435.3	435.205	101.82	55.454	1.583	101.67756	8.938	7.316	13.6012	14.1484
467.5	466.957	100.451	55.305	1.694	101.038885	8.485	5.839	12.7148	13.1493
494.2	503.868	99.01	55.065	1.820	100.352043	8.054	8.118	11.8043	12.2497
517.4	544.788	97.449	54.840	1.960	99.6515592	7.669	6.916	10.9200	11.3522

ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΟΥ ΜΕΙΓΜΑΤΟΣ 80% ΚΑΝΟΝΙΚΟ ΠΕΝΤΑΝΙΟ - 20% ΜΕΘΑΝΙΟ ΣΤΟΥΣ 28⁰C

Πίεση αντλίας αρχική (bar)	Πίεση αντλίας διορθωμέν η (bar)	Όγκος αντλίας (cc)	Όγκος ρευστού (cc)	Πειραματι κός συντελεστ ής απόκλισης	Γραμμομοριακός όγκος από PR με την τεχνική προσθετικής διόρθωσης όγκου καταστατικής εξίσωσης (cc)	Πειραματικός συντελεστής ισοθερμοκρασι ακής συμπιεστότητ ας (exact) (10^{-6} psi ⁻¹)	Πειραματικός συντελεστής ισοθερμοκρασιακ ής συμπιεστότητας (approximated) (10^{-6} psi ⁻¹)	Συντελεστής ισοθερμοκρασ ιακής συμπιεστότητ ας από PR (exact) (10^{-6} psi ⁻¹)	Συντελεστής ισοθερμοκρασιακής συμπιεστότητας από PR(approximated) (10^{-6} psi ⁻¹)
77.3	76.880	95.03	52.207	0.3244	99.62219	54.26692		30.4953	
88	87.513	93.981	51.547	0.3646	99.27198	48.12156	82.464	29.0885	29.781
112.6	112.134	92.165	50.626	0.4588	98.51545	37.57739	50.50355	26.2625	27.63
131.5	131.001	91.062	50.210	0.5316	97.98102	31.85287	30.1301	24.4263	25.323
151	150.065	90.036	49.893	0.6051	97.47587	27.43063	22.89933	22.8013	23.596
180.6	180.082	88.589	49.522	0.7207	96.74234	22.32753	17.12765	20.6161	21.675
210.8	210.192	86.979	49.010	0.8325	96.07198	18.7085	23.78755	18.7833	19.673
240.7	240.052	85.526	48.645	0.9437	95.46243	16.07677	17.29609	17.2405	17.992
270.8	269.989	84.098	48.311	1.0541	94.89891	14.08335	15.84315	15.9103	16.559
300.9	299.995	82.718	48.025	1.1643	94.37576	12.53846	13.61909	14.7521	15.318
330.8	329.654	81.367	47.762	1.2724	93.89467	11.33262	12.80285	13.7480	14.239
361.5	360.082	80.005	47.516	1.3827	93.43403	10.34037	11.68634	12.8379	13.284
390.9	389.389	78.721	47.301	1.4885	93.01842	9.561694	10.6672	12.0577	12.441
420.6	418.980	77.451	47.111	1.5952	92.62384	8.911113	9.381265	11.3510	11.698
450.4	448.657	76.203	46.946	1.7022	92.2509	8.365916	8.123148	10.7123	11.026
481.1	479.281	74.909	46.768	1.8115	91.88771	7.892554	8.538296	10.1163	10.409
517.2	515.103	73.473	46.645	1.9418	91.48807	7.429893	5.084101	9.4890	9.7968

ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΟΥ ΜΕΙΓΜΑΤΟΣ 80% ΚΑΝΟΝΙΚΟ ΠΕΝΤΑΝΙΟ - 20% ΜΕΘΑΝΙΟ ΣΤΟΥΣ 50°C

Πίεση αντλίας αρχική (bar)	Πίεση αντλίας διορθωμέ νη (bar)	Όγκος αντλίας (cc)	Όγκος ρευστού (cc)	Πειραματι κός συντελεστ ής απόκλισης	Γραμμομοριακός όγκος από PR με την τεχνική προσθετικής διόρθωσης όγκου καταστατικής εξίσωσης (cc)	Πειραματικός συντελεστής ισοθερμοκρασιακ ής συμπιεστότητας (exact) (10^{-6} psi ⁻¹)	Πειραματικός συντελεστής ισοθερμοκρασι ακής συμπιεστότητας (approximated) (10^{-6} psi ⁻¹)	Συντελεστής ισοθερμοκρασιακ ής συμπιεστότητας από PR (exact) (10^{-6} psi ⁻¹)	Συντελεστής ισοθερμοκρασι ακής συμπιεστότητα ς από PR(approximat ed) (10^{-6} psi ⁻¹)
92.200	92.646	101.774	54.069	0.3758	101.884729	50.9618		40.6062	
122.400	122.995	99.441	52.851	0.4877	100.600409	39.0151	51.7732	34.8301	37.576
151.200	151.933	97.675	52.147	0.5944	99.5253637	31.3335	31.9096	30.6218	32.64
181.300	182.034	95.982	51.565	0.7042	98.5307398	25.6765	25.7145	27.1591	28.825
211.200	211.968	94.376	51.062	0.8121	97.6438015	21.5711	22.5589	24.3757	25.721
241.300	242.150	92.817	50.614	0.9195	96.8350633	18.4588	20.1400	22.0599	23.182
270.700	271.618	91.340	50.222	1.0234	96.1153086	16.1128	18.1931	20.1601	21.084
300.800	301.550	89.887	49.879	1.1285	95.4446154	14.2327	15.7506	18.5147	19.316
330.700	331.194	88.476	49.572	1.2318	94.832143	12.7391	14.3879	17.1096	17.795
360.400	360.715	87.108	49.300	1.3342	94.2668984	11.5262	12.8505	15.8899	16.486
390.300	390.520	85.781	49.076	1.4379	93.735985	10.5151	10.5175	14.8075	15.337
420.300	420.611	84.459	48.861	1.5419	93.2358562	9.6642	10.0578	13.8408	14.314
450.600	450.836	83.156	48.676	1.6464	92.7657823	8.9451	8.6479	12.9766	13.4
485.100	485.105	81.709	48.502	1.7653	92.2676695	8.2601	7.2009	12.1055	12.532
517.400	519.512	80.186	48.285	1.8820	91.8007844	7.6832	8.9888	11.3289	11.71

ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΟΥ ΜΕΙΓΜΑΤΟΣ 80% ΚΑΝΟΝΙΚΟ ΠΕΝΤΑΝΙΟ - 20% ΜΕΘΑΝΙΟ ΣΤΟΥΣ 90°C

Πίεση αντλίας αρχική (bar)	Πίεση αντλίας διορθωμέ νη (bar)	Όγκος αντλίας (cc)	Όγκος ρευστού (cc)	Πειραματι κός συντελεστ ής απόκλισης	Γραμμομοριακός όγκος από PR με την τεχνική προσθετικής διόρθωσης όγκου καταστατικής εξίσωσης (cc)	Πειραματικός συντελεστής ισοθερμοκρασιακ ής συμπιεστότητας (exact) (10^{-6} psi ⁻¹)	Πειραματικός συντελεστής ισοθερμοκρασια κής συμπιεστότητας (approximated) (10^{-6} psi ⁻¹)	Συντελεστής ισοθερμοκρασι ακής συμπιεστότητας από PR (exact) (10^{-6} psi ⁻¹)	Συντελεστής ισοθερμοκρασια κής συμπιεστότητας από PR(approximate d) (10^{-6} psi ⁻¹)
102.600	104.287	118.828	59.856	0.4167	106.514644	68.90906		73.3781	
121.500	123.331	116.867	58.611	0.4826	105.020363	59.09112	76.0703	63.5294	68.221
151.600	153.458	114.415	57.300	0.5871	102.991121	47.33576	51.7765	52.3023	57.563
180.700	182.737	112.314	56.302	0.6869	101.31694	38.95164	41.3812	44.5333	48.219
211.100	213.123	110.350	55.489	0.7895	99.814044	32.38001	32.9613	38.4964	41.376
241.800	243.802	108.481	54.784	0.8917	98.4856332	27.27592	28.7607	33.7868	36.046
270.600	272.711	106.763	54.157	0.9860	97.373025	23.47661	27.4357	30.2373	31.951
297.700	299.584	105.266	53.687	1.0738	96.4385633	20.59952	22.3662	27.5053	28.832
330.100	331.347	103.577	53.225	1.1774	95.4377267	17.81608	18.7305	24.8088	26.115
360.800	361.675	102.010	52.822	1.2754	94.5706545	15.63844	17.3077	22.6489	23.699
390.700	391.396	100.529	52.473	1.3712	93.7923679	13.85715	15.334	20.8392	21.721
420.500	421.152	99.111	52.185	1.4673	93.0743277	12.35066	12.7881	19.2708	20.037
450.700	451.018	97.705	51.923	1.5635	92.4072935	11.06229	11.6046	17.8958	18.568
479.600	479.494	96.400	51.713	1.6554	91.8153584	10.00378	9.80917	16.7383	17.306
517.600	516.530	94.689	51.442	1.7740	91.1019871	8.828236	9.7855	15.4178	16.062

ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΟΥ ΜΕΙΓΜΑΤΟΣ 87% ΤΟΛΟΥΕΝΙΟ - 13% ΜΕΘΑΝΙΟ ΣΤΟΥΣ 28⁰C

Πίεση αντλίας αρχική (bar)	Πίεση αντλίας διορθωμέ νη (bar)	Όγκος αντλίας (cc)	Όγκος ρευστού (cc)	Πειραματι κός συντελεστ ής απόκλισης	Γραμμομοριακός όγκος από PR με την τεχνική προσθετικής διόρθωσης όγκου καταστατικής εξίσωσης (cc)	Πειραματικός συντελεστής ισοθερμοκρασιακή ς συμπιεστότητας (exact) (10^{-6} psi ⁻¹)	Πειραματικός συντελεστής ισοθερμοκρασιακ ής συμπιεστότητας (approximated) (10^{-6} psi ⁻¹)	Συντελεστής ισοθερμοκρασι ακής συμπιεστότητας από PR (exact) (10^{-6} psi ⁻¹)	Συντελεστής ισοθερμοκρασιακ ής συμπιεστότητας από PR(approximate d) (10^{-6} psi ⁻¹)
90.100	90.039	123.209	80.852	0.365		27.867291		7.147861	
121.300	121.177	121.182	79.959	0.485	95.12064422	20.031504	24.574388	6.775599	6.9588
150.700	150.559	119.518	79.364	0.598	94.84401213	15.408037	17.522966	6.454701	6.6129
180.800	180.487	117.98	78.921	0.713	94.57629121	12.239961	12.908572	6.154432	6.3025
210.600	209.965	116.533	78.557	0.826	94.32530769	10.043027	10.794445	5.881875	6.0163
239.400	238.448	115.192	78.263	0.934	94.09382169	8.4812009	9.0689194	5.637964	5.7584
270.200	268.978	113.793	77.984	1.050	93.85680171	7.2187887	8.0663599	5.395471	5.5152
300.200	298.744	112.478	77.760	1.163	93.63594602	6.2735809	6.6670669	5.175964	5.2844
329.800	328.363	111.177	77.535	1.275	93.42548878	5.5330105	6.7361309	4.972451	5.0730
360.100	358.610	109.893	77.353	1.389	93.21946273	4.9278601	5.3642807	4.778461	4.8743
390.200	388.722	108.633	77.187	1.502	93.02267069	4.4391807	4.9048177	4.597908	4.6872
419.400	417.823	107.441	77.057	1.612	92.83984784	4.0494848	4.0014905	4.434244	4.5152
450.200	448.477	106.198	76.934	1.728	92.6545958	3.7072892	3.5955449	4.272335	4.3524
479.600	477.872	105.022	76.827	1.838	92.48356784	3.4311967	3.26418	4.12631	4.1986
517.300	515.283	103.543	76.719	1.980	92.27464928	3.1377618	2.5974171	3.952349	4.0383

ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΟΥ ΜΕΙΓΜΑΤΟΣ 87% ΤΟΛΟΥΕΝΙΟ - 13% ΜΕΘΑΝΙΟ ΣΤΟΥΣ 50°C

Πίεση αντλίας αρχική (bar)	Πίεση αντλίας διορθωμέ νη (bar)	Όγκος αντλίας (cc)	Όγκος ρευστού (cc)	Πειραματι κός συντελεστ ής απόκλισης	Γραμμομοριακός όγκος από PR με την τεχνική προσθετικής διόρθωσης όγκου καταστατικής εξίσωσης (cc)	Πειραματικός συντελεστής ισοθερμοκρασιακ ής συμπιεστότητας (exact) (10^{-6} psi $^{-1}$)	Πειραματικός συντελεστής ισοθερμοκρασι ακής συμπιεστότητα ς (approximated) (10^{-6} psi $^{-1}$)	Συντελεστής ισοθερμοκρασια κής συμπιεστότητας από PR (exact) (10^{-6} psi $^{-1}$)	Συντελεστής ισοθερμοκρασιακ ής συμπιεστότητας από PR(approximate d) (10^{-6} psi $^{-1}$)
61.400	61.985	131.456	82.615	0.2381		34.892572		9.5399	
92.000	92.736	129.258	81.546	0.3515		22.038343	29.190151	8.9612	9.2451
121.300	122.157	127.545	80.914	0.4595	98.10124	15.52015	18.223796	8.4642	8.7084
151.000	151.903	126.014	80.479	0.5683	97.74412	11.573616	12.493954	8.0098	8.2332
180.200	181.054	124.604	80.146	0.6746	97.41366	9.0726349	9.790024	7.6052	7.8044
210.200	210.775	123.220	79.869	0.7826	97.09478	7.3281048	8.0297527	7.2286	7.4141
240.800	241.188	121.852	79.630	0.8928	96.78562	6.0619282	6.7882882	6.8761	7.0498
270.200	270.575	120.563	79.426	0.9990	96.50192	5.1619683	6.020952	6.5633	6.7176
299.800	300.110	119.299	79.255	1.1057	96.23044	4.4744086	5.052498	6.2732	6.4163
329.900	330.169	118.031	79.097	1.2140	95.96704	3.9315424	4.556091	6.0002	6.1350
359.800	360.096	116.801	78.971	1.3220	95.71675	3.5045678	3.692194	5.7484	5.8727
389.800	390.113	115.571	78.848	1.4299	95.47675	3.1603021	3.5794071	5.5136	5.6296
419.000	419.226	114.394	78.748	1.5347	95.2538	2.8872235	2.9903838	5.3013	5.4063
448.400	448.532	113.222	78.661	1.6402	95.03845	2.6590074	2.6041768	5.1015	5.2003
479.200	479.227	112.025	78.600	1.7511	94.82199	2.4593001	1.7272792	4.9056	5.0024
517.200	516.773	110.540	78.518	1.8863	94.56899	2.2576152	1.9350085	4.6830	4.7928

ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΟΥ ΜΕΙΓΜΑΤΟΣ 87% ΤΟΛΟΥΕΝΙΟ - 13% ΜΕΘΑΝΙΟ ΣΤΟΥΣ 90°C

Πίεση αντλίας αρχική (bar)	Πίεση αντλίας διορθωμέ νη (bar)	Όγκος αντλίας (cc)	Όγκος ρευστού (cc)	Πειραματι κός συντελεστ ής απόκλισης	Γραμμομοριακός όγκος από PR με την τεχνική προσθετικής διόρθωσης όγκου καταστατικής εξίσωσης (cc)	Πειραματικός συντελεστής ισοθερμοκρασιακ ής συμπιεστότητας (exact) (10^{-6} psi ⁻¹)	Πειραματικός συντελεστής ισοθερμοκρασιακ ής συμπιεστότητας (approximated) (10^{-6} psi ⁻¹)	Συντελεστής ισοθερμοκρασι ακής συμπιεστότητας από PR (exact) (10^{-6} psi ⁻¹)	Συντελεστής ισοθερμοκρασιακ ής συμπιεστότητας από PR(approximate d) (10^{-6} psi ⁻¹)
50.700	51.790	146.355	83.549	0.1830		38.7864		15.0298	
63.700	64.839	145.233	82.919	0.2274		30.5844	39.9477	14.5041	14.7640
92.300	93.556	143.244	82.014	0.3246		20.0145	26.3517	13.4598	13.9699
120.500	121.850	141.626	81.465	0.4200	102.343986	14.4759	16.3775	12.5591	12.9998
150.300	151.705	140.099	81.067	0.5205	101.789378	11.0292	11.3045	11.7219	12.1317
179.200	180.721	138.702	80.765	0.6177	101.287963	8.9048	8.8657	11.0009	11.3545
209.500	211.052	137.296	80.507	0.7192	100.798776	7.4118	7.2695	10.3289	10.6585
240.200	241.875	135.89	80.264	0.8218	100.334089	6.3543	6.7540	9.7181	10.0179
268.900	270.552	134.581	80.042	0.9167	99.927966	5.6364	6.6442	9.2056	9.4577
299.400	300.906	133.23	79.847	1.0172	99.5228072	5.0632	5.5492	8.7134	8.9555
328.700	330.013	131.937	79.664	1.1130	99.155876	4.6397	5.4286	8.2837	8.4954
359.400	360.539	130.582	79.472	1.2131	98.7916212	4.2903	5.4424	7.8717	8.0746
390.000	391.049	129.252	79.302	1.3130	98.4467246	4.0123	4.8542	7.4947	7.6805
419.100	419.993	128.013	79.165	1.4079	98.1357032	3.7980	4.0997	7.1652	7.3278
449.400	449.973	126.771	79.072	1.5066	97.8287913	3.6148	2.7297	6.8498	7.0055
479.200	479.610	125.547	78.977	1.6040	97.5394424	3.4641	2.7925	6.5610	6.7036
517.400	517.133	124.01	78.887	1.7275	97.1914726	3.3069	2.0853	6.2244	6.3902

ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΟΥ ΜΕΙΓΜΑΤΟΣ 70% ΤΟΛΟΥΕΝΙΟ - 30% ΜΕΘΑΝΙΟ ΣΤΟΥΣ 28°C

Πίεση αντλίας αρχική (bar)	Πίεση αντλίας διορθωμέ- ν η (bar)	Όγκος αντλίας (cc)	Όγκος ρευστού (cc)	Πειραματι- κός συντελεστ ής απόκλισης	Γραμμομοριακός όγκος από PR με την τεχνική προσθετικής διόρθωσης όγκου καταστατικής εξίσωσης (cc)	Πειραματικός συντελεστής ισοθερμοκρασιακής συμπιεστότητας (exact) (10^{-6} psi^{-1})	Πειραματικός συντελεστής ισοθερμοκρασιακ ής συμπιεστότητας (approximated) (10^{-6} psi^{-1})	Συντελεστής ισοθερμοκρασι- ακής συμπιεστότητας από PR (exact) (10^{-6} psi^{-1})	Συντελεστής ισοθερμοκρασιακ ής συμπιεστότητας από PR(approximate d) (10^{-6} psi^{-1})
129.800	129.915	120.087	79.173	0.4467	80.988943	25.7947		10.0151	
152.100	152.248	118.409	78.306	0.5178	80.725026	19.439	33.9915	9.5742	9.7917
181.300	181.446	116.904	77.863	0.6136	80.397825	14.3482	13.4024	9.0483	9.3068
210.600	210.677	115.474	77.498	0.7091	80.088651	11.1931	11.0697	8.5716	8.8061
240.500	240.438	114.076	77.187	0.8060	79.790985	9.07493	9.30838	8.1305	8.3476
270.000	269.701	112.742	76.926	0.9010	79.513604	7.63089	7.99014	7.7348	7.9297
299.600	299.032	111.437	76.697	0.9961	79.249476	6.58391	6.99861	7.3711	7.5504
329.500	328.721	110.135	76.482	1.0919	78.995106	5.79432	6.51274	7.0327	7.1996
359.400	358.381	108.855	76.289	1.1874	78.752953	5.19192	5.86691	6.7209	6.8747
389.800	388.602	107.57	76.110	1.2845	78.517561	4.71369	5.37755	6.4273	6.5722
420.000	418.651	106.315	75.953	1.3810	78.294	4.33673	4.73477	6.1569	6.2904
448.900	447.519	105.123	75.812	1.4735	78.088342	4.04354	4.44301	5.9152	6.0347
479.200	477.632	103.893	75.683	1.5699	77.882664	3.7925	3.87692	5.6801	5.7963
517.100	515.053	102.379	75.547	1.6899	77.638736	3.53983	3.31197	5.4096	5.5429

ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΟΥ ΜΕΙΓΜΑΤΟΣ 70% ΤΟΛΟΥΕΝΙΟ - 30% ΜΕΘΑΝΙΟ ΣΤΟΥΣ 50°C

Πίεση αντλίας αρχική (bar)	Πίεση αντλίας διορθωμέ νη (bar)	Όγκος αντλίας (cc)	Όγκος ρευστού (cc)	Πειραματικ ός συντελεστής απόκλισης	Γραμμομοριακός όγκος από PR με την τεχνική προσθετικής διόρθωσης όγκου καταστατικής εξίσωσης (cc)	Πειραματικός συντελεστής ισοθερμοκρασιακ ής συμπιεστότητας (exact) (10^{-6} psi ⁻¹)	Πειραματικός συντελεστής ισοθερμοκρασιακ ής συμπιεστότητας (approximated) (10^{-6} psi ⁻¹)	Συντελεστής ισοθερμοκρασια κής συμπιεστότητας από PR (exact) (10^{-6} psi ⁻¹)	Συντελεστής ισοθερμοκρασιακ ής συμπιεστότητας από PR(approximate d) (10^{-6} psi ⁻¹)
151.400	152.963	125.869	80.349	0.4955	82.4869452	21.2100		12.2061	
161.900	163.657	125.219	80.086	0.5284	82.3279548	18.8266	21.0954	11.9158	12.0599
180.900	182.701	124.159	79.727	0.5873	82.0544681	15.5538	16.2573	11.4288	11.6692
210.700	212.615	122.612	79.280	0.6796	81.647846	12.0510	12.9666	10.7333	11.0744
241.000	242.818	121.119	78.905	0.7725	81.263017	9.7276	10.8190	10.1050	10.4134
270.100	271.649	119.747	78.607	0.8609	80.9172574	8.1846	9.0530	9.5644	9.8303
299.800	301.174	118.379	78.335	0.9512	80.5828717	7.0363	8.0944	9.0623	9.3093
329.600	330.788	117.040	78.095	1.0415	80.2656348	6.1766	7.1238	8.6039	8.8295
359.800	360.908	115.715	77.885	1.1333	79.9599234	5.5085	6.1804	8.1783	8.3879
388.900	389.839	114.472	77.715	1.2215	79.6809826	5.0061	5.1821	7.8033	7.9882
419.900	420.814	113.171	77.558	1.3159	79.3969331	4.5783	4.5030	7.4341	7.6160
449.300	450.051	111.949	77.421	1.4048	79.1415704	4.2525	4.1726	7.1128	7.2713
480.000	480.462	110.698	77.303	1.4975	78.8880376	3.9745	3.4623	6.8034	6.9561
517.200	517.315	109.180	77.158	1.6093	78.5959858	3.7011	3.5195	6.4588	6.6285

ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΟΥ ΜΕΙΓΜΑΤΟΣ 70% ΤΟΛΟΥΕΝΙΟ - 30% ΜΕΘΑΝΙΟ ΣΤΟΥΣ 90°C

Πίεση αντλίας αρχική (bar)	Πίεση αντλίας διορθωμέ νη (bar)	Όγκος αντλίας (cc)	Όγκος ρευστού (cc)	Πειραματι κός συντελεστ ής απόκλισης	Γραμμομοριακός όγκος από PR με την τεχνική προσθετικής διόρθωσης όγκου καταστατικής εξίσωσης (cc)	Πειραματικός συντελεστής ισοθερμοκρασιακ ής συμπιεστότητας (exact) (10^{-6} psi ⁻¹)	Πειραματικός συντελεστής ισοθερμοκρασια κής συμπιεστότητας (approximated) (10^{-6} psi ⁻¹)	Συντελεστής ισοθερμοκρασιακ ής συμπιεστότητας από PR (exact) (10^{-6} psi ⁻¹)	Συντελεστής ισοθερμοκρασια κής συμπιεστότητας από PR(approximate d) (10^{-6} psi ⁻¹)
140.700	142.324	142.570	83.174	0.4342		38.1321516		19.4532	
157.500	159.094	141.065	82.305	0.4805		30.8323708	43.141	18.5060	18.9722
179.800	181.327	139.551	81.636	0.5432	84.7747182	24.008864	25.306	17.3760	17.9299
203.900	205.928	137.949	80.948	0.6119	84.1393945	18.8163393	23.743	16.2667	16.8100
235.400	237.489	136.235	80.427	0.7012	83.5021881	14.3174611	14.088	15.0223	15.6293
265.800	268.027	134.672	80.016	0.7874	82.9094764	11.3578431	11.569	13.9747	14.4869
295.500	297.749	133.200	79.669	0.8710	82.3849475	9.29076723	10.07	13.0762	13.5164
323.800	326.201	131.832	79.374	0.9508	81.884447	7.80843392	9.0092	12.3094	12.6858
354.800	357.091	130.418	79.134	1.0378	81.4154316	6.57680787	6.7409	11.5641	11.9297
385.200	387.238	129.046	78.914	1.1223	80.9685382	5.64349074	6.3695	10.9112	11.2320
415.000	416.747	127.711	78.708	1.2048	80.5649233	4.91631936	6.1021	10.3332	10.6175
443.400	444.877	126.444	78.517	1.2830	80.1577982	4.35170836	5.9513	9.8308	10.0783
475.900	477.127	125.243	78.396	1.3740	79.7949944	3.82177172	3.3001	9.3059	9.5641
509.700	510.161	123.946	78.266	1.4667	79.4376737	3.37858201	3.4628	8.8173	9.0577

ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΟΥ ΜΕΙΓΜΑΤΟΣ 86% ΚΥΚΛΟΕΞΑΝΙΟ - 14% ΜΕΘΑΝΙΟ ΣΤΟΥΣ 28°C

Πίεση αντλίας αρχική (bar)	Πίεση αντλίας διορθωμέ- νη (bar)	Όγκος αντλίας (cc)	Όγκος ρευστού (cc)	Πειραματικ- ός συντελεστής απόκλισης	Γραμμομοριακός όγκος από PR με την τεχνική προσθετικής διόρθωσης όγκου καταστατικής εξίσωσης (cc)	Πειραματικός συντελεστής ισοθερμοκρασιακ- ής συμπιεστότητας (exact) (10^{-6} psi ⁻¹)	Πειραματικός συντελεστής ισοθερμοκρασια- κής συμπιεστότητας (approximated) (10^{-6} psi ⁻¹)	Συντελεστής ισοθερμοκρασ- ιακής συμπιεστότη- τας από PR (exact) (10^{-6} psi ⁻¹)	Συντελεστής ισοθερμοκρασιακή ς συμπιεστότητας από PR(approximated) (10^{-6} psi ⁻¹)
91.8	91.253	74.103	32.369	0.3602		35.5026		9.5623	
119.4	118.679	72.839	31.808	0.4647	94.5169936	25.5758	43.9475	9.0421	9.298
149.4	148.533	71.585	31.547	0.5785	94.1487041	18.7462	18.9846	8.5311	8.782
180	178.875	70.325	31.384	0.6934	93.79699	14.1757	11.7830	8.0624	8.293
209.2	207.847	69.141	31.236	0.8026	93.4802805	11.1377	11.1996	7.6560	7.856
239.7	238.160	67.919	31.114	0.9163	93.166981	8.8335	8.9197	7.2680	7.459
269.4	267.808	66.738	31.001	1.0270	92.8768096	7.1545	8.4607	6.9209	7.092
299.6	297.911	65.553	30.900	1.1393	92.5971648	5.8489	7.4803	6.5972	6.757
329.5	327.677	64.398	30.813	1.2503	92.3342343	4.8390	6.5237	6.3023	6.448
359	357.168	63.267	30.745	1.3603	92.0859856	4.0398	5.1515	6.0320	6.165
389.1	387.228	62.129	30.687	1.4727	91.8444915	3.3794	4.3582	5.7766	5.903
419.1	417.175	61.007	30.643	1.5849	91.6146341	2.8396	3.2699	5.5402	5.657
449	446.970	59.902	30.612	1.6971	91.3957879	2.3932	2.3568	5.3210	5.429
479.3	477.162	58.792	30.594	1.8113	91.1833175	2.0133	1.3306	5.1137	5.216
517	514.642	57.436	30.586	1.9532	90.9316159	1.6213	0.4985	4.8749	4.993

ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΟΥ ΜΕΙΓΜΑΤΟΣ 86% ΚΥΚΛΟΕΞΑΝΙΟ - 14% ΜΕΘΑΝΙΟ ΣΤΟΥΣ 50°C

Πίεση αντλίας αρχική (bar)	Πίεση αντλίας διορθωμέν η (bar)	Όγκος αντλίας (cc)	Όγκος ρευστού (cc)	Πειραματι κός συντελεστ ής απόκλισης	Γραμμομοριακός όγκος από PR με την τεχνική προσθετικής διόρθωσης όγκου καταστατικής εξίσωσης (cc)	Πειραματικός συντελεστής ισοθερμοκρασιακ ής συμπιεστότητας (exact) (10^{-6} psi ⁻¹)	Πειραματικός συντελεστής ισοθερμοκρασια κής συμπιεστότητας (approximated) (10^{-6} psi ⁻¹)	Συντελεστής ισοθερμοκρασια κής συμπιεστότητας από PR (exact) (10^{-6} psi ⁻¹)	Συντελεστής ισοθερμοκρασια κής συμπιεστότητας από PR(approximate d) (10^{-6} psi ⁻¹)
92.2	92.676	80.416	32.711	0.3493		36.9705		12.1760	
122.2	122.510	78.873	32.275	0.4556		24.6679	31.0017	11.3585	11.759
151.9	152.044	77.489	31.987	0.5604	96.552125	17.4542	20.9252	10.6427	10.994
179.8	179.831	76.25	31.778	0.6584	96.139102	13.0463	16.2995	10.0403	10.336
209.5	209.490	75.036	31.660	0.7642	95.72576	9.8155	8.6513	9.4620	9.746
240.3	240.226	73.788	31.548	0.8732	95.324154	7.4572	7.9108	8.9228	9.188
269.3	269.258	72.621	31.451	0.9757	94.96724	5.8261	7.3040	8.4617	8.689
299.3	299.349	71.428	31.365	1.0818	94.618004	4.5464	6.2723	8.0266	8.241
329.5	329.641	70.243	31.295	1.1886	94.28572	3.5535	5.1292	7.6270	7.824
359.3	359.445	69.105	31.252	1.2943	93.975957	2.7840	3.1112	7.2667	7.444
389.1	389.218	67.971	31.222	1.4001	93.682035	2.1667	2.2747	6.9356	7.099
420.6	420.794	66.799	31.212	1.5132	93.38583	1.6360	0.6748	6.6121	6.772
450.5	450.642	65.66	31.196	1.6198	93.119311	1.2241	1.1612	6.3296	6.469
479.3	479.462	64.58	31.181	1.7225	92.873433	0.8909	1.1718	6.0761	6.201
517.4	517.448	63.222	31.160	1.8577	92.565181	0.5272	1.2290	5.7677	5.920

ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΟΥ ΜΕΙΓΜΑΤΟΣ 86% ΚΥΚΛΟΕΞΑΝΙΟ - 14% ΜΕΘΑΝΙΟ ΣΤΟΥΣ 90°C

Πίεση αντλίας αρχική (bar)	Πίεση αντλίας διορθωμέν η (bar)	Όγκος αντλίας (cc)	Όγκος ρευστού (cc)	Πειραματικός συντελεστής απόκλισης	Γραμμομοριακός όγκος από PR με την τεχνική προσθετικής διόρθωσης όγκου καταστατικής εξίσωσης (cc)	Πειραματικός συντελεστής ισοθερμοκρασιακής συμπίεστότητας (exact) (10^{-6} psi $^{-1}$)	Πειραματικός συντελεστής ισοθερμοκρασια κής συμπίεστότητας (approximated) (10^{-6} psi $^{-1}$)	Συντελεστής ισοθερμοκρασι ακής συμπίεστότητας από PR (exact) (10^{-6} psi $^{-1}$)	Συντελεστής ισοθερμοκρασια κής συμπίεστότητας από PR(approximate d) (10^{-6} psi $^{-1}$)
92.8	93.941	93.659	34.316	0.3305		38.7174		18.8095	
122.1	123.154	92	33.767	0.4264		27.2713	38.0424	17.2225	17.994
151.5	152.404	90.511	33.392	0.5218	100.039212	19.9541	26.3196	15.8664	16.527
179.3	180.032	89.231	33.165	0.6122	99.395551	15.2317	16.9930	14.7561	15.299
209.2	209.902	87.95	33.017	0.7105	98.7543254	11.5959	10.3272	13.7065	14.219
239.5	240.221	86.683	32.898	0.8103	98.1537602	8.9140	8.2041	12.7726	13.230
269.4	270.039	85.452	32.800	0.9081	97.6061907	6.9379	6.9029	11.9608	12.359
298.7	299.343	84.26	32.719	1.0041	97.1046129	5.4390	5.8752	11.2492	11.598
329.2	329.708	83.046	32.660	1.1040	96.618739	4.2178	4.0524	10.5881	10.913
359.3	359.856	81.833	32.588	1.2023	96.1667244	3.2507	5.0819	9.9973	10.288
388.4	388.954	80.679	32.536	1.2975	95.7561734	2.4911	3.7394	9.4804	9.735
419.5	420.172	79.424	32.460	1.3983	95.3410174	1.8214	5.2059	8.9761	9.224
448.5	449.013	78.315	32.455	1.4938	94.9785641	1.3068	0.3198	8.5506	8.760
480.8	481.163	77.097	32.449	1.6011	94.5961772	0.8255	0.3863	8.1163	8.330
522.5	522.615	75.490	32.428	1.7376	94.1335373	0.3170	1.0837	7.6105	7.859

ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΟΥ ΜΕΙΓΜΑΤΟΣ 68% ΚΥΚΛΟΕΞΑΝΙΟ - 32% ΜΕΘΑΝΙΟ ΣΤΟΥΣ 28°C

Πίεση αντλίας αρχική (bar)	Πίεση αντλίας διορθωμέν η (bar)	Όγκος αντλίας (cc)	Όγκος ρευστού (cc)	Πειραματικός συντελεστής απόκλισης	Γραμμομοριακός όγκος από PR με την τεχνική προσθετικής διόρθωσης όγκου καταστατικής εξίσωσης (cc)	Πειραματικός συντελεστής ισοθερμοκρασιακ ής συμπιεστότητας (exact) (10^{-6} psi ⁻¹)	Πειραματικός συντελεστής ισοθερμοκρασιακ ής συμπιεστότητας (approximated) (10^{-6} psi ⁻¹)	Συντελεστής ισοθερμοκρασι ακής συμπιεστότητας από PR (exact) (10^{-6} psi ⁻¹)	Συντελεστής ισοθερμοκρασια κής συμπιεστότητας από PR(approximate d) (10^{-6} psi ⁻¹)
122.5	122.361	69.019	27.840	0.4277		32.8785		13.6667	
151.3	150.994	67.548	27.416	0.5198	79.7448175	25.6394	36.9322	12.7488	13.198
180.2	179.805	66.226	27.145	0.6129	79.3104278	20.1779	23.7839	11.9331	12.333
210	209.361	64.95	26.952	0.7086	78.8951897	15.8873	16.5953	11.1900	11.554
239.8	239.022	63.732	26.818	0.8049	78.5058478	12.5301	11.6238	10.5244	10.851
269.8	268.809	62.531	26.708	0.9015	78.1393881	9.8539	9.5287	9.9244	10.219
298.6	297.484	61.392	26.616	0.9942	77.8074243	7.7690	8.2797	9.4022	9.659
328.6	327.419	60.221	26.536	1.0910	77.4804869	5.9839	6.9490	8.9072	9.151
349.7	348.507	59.403	26.485	1.1590	77.2611593	4.9166	6.2642	8.5855	8.745
389.4	388.095	57.889	26.414	1.2872	76.8716622	3.2452	4.6417	8.0341	8.304
418.1	416.757	56.809	26.378	1.3804	76.6061701	2.2505	3.3226	7.6726	7.851
449.6	448.208	55.637	26.351	1.4831	76.3292953	1.3221	2.2163	7.3074	7.487
478.1	476.693	54.586	26.336	1.5764	76.0905206	0.6016	1.3540	7.0020	7.153
517	515.333	53.173	26.333	1.7040	75.7832649	-0.2283	0.2436	6.6217	6.809

ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΟΥ ΜΕΙΓΜΑΤΟΣ 68% ΚΥΚΛΟΕΞΑΝΙΟ - 32% ΜΕΘΑΝΙΟ ΣΤΟΥΣ 50°C

Πίεση αντλίας αρχική (bar)	Πίεση αντλίας διορθωμέ- νη (bar)	Όγκος αντλίας (cc)	Όγκος ρευστού (cc)	Πειραμα- τικός συντελεσ- τής απόκλιση ς	Γραμμομοριακός όγκος από PR με την τεχνική προσθετικής διόρθωσης όγκου καταστατικής εξίσωσης (cc)	Πειραματικός συντελεστής ισοθερμοκρασιακ- ής συμπιεστότητας (exact) (10^{-6} psi ⁻¹)	Πειραματικός συντελεστής ισοθερμοκρασια- κής συμπιεστότητας (approximated) (10^{-6} psi ⁻¹)	Συντελεστής ισοθερμοκρασια- κής συμπιεστότητας από PR (exact) (10^{-6} psi ⁻¹)	Συντελεστής ισοθερμοκρασια- κής συμπιεστότητας από PR(approximate d) (10^{-6} psi ⁻¹)
153	153.559	73.787	28.326	0.5070			0.5083	16.4010	
181.7	182.065	72.395	27.993	0.5941	80.6201442	28.5929	0.5988	15.2081	15.791
209.8	210.097	71.148	27.783	0.6804	80.1046642	18.5262	0.6869	14.1820	14.684
239.8	240.014	69.892	27.634	0.7732	79.5950298	12.3901	0.7801	13.2188	13.690
270.9	271.051	68.612	27.501	0.8690	79.1049241	10.6673	0.8760	12.3383	12.769
299.6	299.917	67.428	27.376	0.9571	78.6801476	10.8760	0.9645	11.6101	11.968
329.3	329.591	66.26	27.304	1.0491	78.2711266	6.1234	1.0549	10.9384	11.268
360.2	360.492	65.071	27.255	1.1454	77.8717661	3.9896	1.1484	10.3094	10.618
389	389.452	63.962	27.209	1.2353	77.5195792	4.0450	1.2355	9.7760	10.038
419.4	419.806	62.823	27.192	1.3307	77.1711235	1.4393	1.3263	9.2673	9.518
448.6	448.981	61.742	27.176	1.4224	76.8543067	1.3489	1.4131	8.8207	9.041
479.3	479.635	60.612	27.170	1.5191	76.5387935	0.5106	1.5039	8.3908	8.603
517.1	517.335	59.222	27.164	1.6382	76.172913	0.4159	1.6150	7.9101	8.146

ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΟΥ ΜΕΙΓΜΑΤΟΣ 68% ΚΥΚΛΟΕΞΑΝΙΟ - 32% ΜΕΘΑΝΙΟ ΣΤΟΥΣ 90°C

Πίεση αντλίας αρχική (bar)	Πίεση αντλίας διορθωμένη (bar)	Όγκος αντλίας (cc)	Όγκος ρευστού (cc)	Πειραματι- κός συντελεστ ής απόκλισης	Γραμμομοριακός όγκος από PR με την τεχνική προσθετικής διόρθωσης όγκου καταστατικής εξίσωσης (cc)	Πειραματικός συντελεστής ισοθερμοκρασιακή ς συμπιεστότητας (exact) (10^{-6} psi ⁻¹)	Πειραματικός συντελεστής ισοθερμοκρασιακ ής συμπιεστότητας (approximated) (10^{-6} psi ⁻¹)	Συντελεστής ισοθερμοκρασιακ ής συμπιεστότητας από PR (exact) (10^{-6} psi ⁻¹)	Συντελεστής ισοθερμοκρασια- κής συμπιεστότητας από PR(approximate d) (10^{-6} psi ⁻¹)
152.1	153.281	86.825	29.729	0.4727		41.7678		26.0682	
181.5	182.434	85.32	29.338	0.5552	83.4157229	29.6624	31.3054	23.5420	24.764
211	211.753	83.893	29.029	0.6376	82.5426023	22.0148	24.9139	21.4283	22.454
240.9	241.603	82.525	28.793	0.7216	81.739056	16.8279	18.7771	19.6126	20.496
270.8	271.496	81.198	28.599	0.8054	81.0068878	13.2077	15.5964	18.0600	18.817
300.2	300.927	79.914	28.429	0.8874	80.3463044	10.6196	13.9659	16.7382	17.384
330.5	331.210	78.638	28.301	0.9724	79.7203184	8.6279	10.2662	15.5514	16.132
359.3	360.055	77.441	28.196	1.0531	79.1681045	7.1693	8.9473	14.5554	15.043
390.6	391.354	76.173	28.114	1.1413	78.6114791	5.9302	6.4177	13.5977	14.067
419.4	420.225	75.009	28.041	1.2223	78.1327218	5.0196	6.1878	12.8100	13.197
449.7	450.364	73.829	28.009	1.3085	77.6644751	4.2466	2.6060	12.0705	12.434
480.5	481.005	72.64	27.987	1.3964	77.2179596	3.6026	1.7667	11.3929	11.726
518.8	519.017	71.155	27.953	1.5050	76.7008472	2.9545	2.1922	10.6410	11.009