



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΚΜ. Υ/Α & ΕΦ. ΓΕΩΦ

Εκτίμηση Ογκομετρικών Ιδιοτήτων Πετρελαίων με Χρήση
Τεχνικών Μηχανικής Εκμάθησης

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αντωνίου Σπυρίδων

Επιβλέπων: Γαγάνης Βασίλειος
Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2021



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΚΜ. Υ/Α & ΕΦ. ΓΕΩΦ

Εκτίμηση Ογκομετρικών Ιδιοτήτων Πετρελαίων με Χρήση
Τεχνικών Μηχανικής Εκμάθησης

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αντωνίου Σπυρίδων

Επιβλέπων: Γαγάνης Βασίλειος
Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις 22/07/2021

Γαγάνης Βασίλειος, Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ, (Υπογραφή)

Σταματάκη Σοφία, Καθηγήτρια ΕΜΠ, (Υπογραφή)

Μπενάρδος Ανδρέας, Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ, (Υπογραφή)

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2021

Ευχαριστίες

Ολοκληρώνοντας την παρούσα διπλωματική εργασία υπό την επίβλεψη του κ. Γαγάνη Βασίλειου, επίκουρου καθηγητή ΕΜΠ στον τομέα Μεταλλευτικής, οφείλω να εκφράσω ένα πολύ μεγάλο ευχαριστώ προς το πρόσωπό του για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντάς μου το συγκεκριμένο θέμα, καθώς επίσης για την καθοδήγηση, τις συμβουλές και τις πολύτιμες επιστημονικές γνώσεις που μου προσέφερε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας. Είμαι ιδιαίτερα χαρούμενος που κατάφερε να μου μεταδώσει έστω και λίγο από το πάθος του για το αντικείμενο της Μηχανικής Πετρελαιοειδών και εύχομαι να είναι αυτό το έναυσμα για τη μετέπειτα σταδιοδρομία μου.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την κ. Κόφφα Ευαγγελία του εργαστηρίου Εφαρμοσμένης Γεωφυσικής που συνέβαλε στη συγγραφή της εργασίας με τα ευστοχά σχόλια και τις παρατηρήσεις της.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου Ανδρέα και Βασιλική, τη σύντροφό μου Ρεμπέκκα καθώς και τους κοντινούς φίλους μου για την αμέριστη στήριξη, υπομονή και συμπαράσταση που μου προσέφεραν σε όλα τα στάδια των σπουδών μου.

Σπύρος Αντωνίου

Ιούλιος 2021

Περίληψη

Οι ογκομετρικές (PVT) ιδιότητες των πετρελαϊκών ρευστών έχουν θεμελιώδη σημασία για όλους σχεδόν τους υπολογισμούς που σχετίζονται με το αντικείμενο της Μηχανικής Πετρελαίων, όπως η εκτίμηση των αποθεμάτων και της αποδοτικότητας του ταμιευτήρα. Τα οφέλη που αποκομίζονται από τη διαρκή και ακριβή γνώση αυτής της πληροφορίας εφαρμόζονται με στόχο τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού της εκμετάλλευσης και τη μεγιστοποίηση του οφέλους.

Παραδοσιακά, η εκτίμηση των ογκομετρικών ιδιοτήτων γινόταν με τη διεξαγωγή πειραμάτων σε PVT εργαστήρια σε δείγματα πετρελαϊκού ρευστού που συλλέγονταν απευθείας από τον ταμιευτήρα μέσω της γεώτρησης ή σχηματίζονταν με ανασυνδυασμό του πετρελαίου και του αερίου που παράγονται στην επιφάνεια. Πέραν των εργαστηριακών μεθόδων για τον προσδιορισμό των ογκομετρικών ιδιοτήτων, οι υπολογιστικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται ευρέως στην πετρελαϊκή βιομηχανία είναι οι εμπειρικές μαθηματικές συσχετίσεις βασισμένες στο Μοντέλο Μαύρου Πετρελαίου - ΜΜΠ και το Μοντέλο Καταστατικών Εξισώσεων - ΜΚΕ. Οι εργαστηριακές μέθοδοι και το ΜΚΕ μπορούν να προσδιορίσουν με μεγάλη ακρίβεια τις ογκομετρικές ιδιότητες των πετρελαϊκών ρευστών, έχουν όμως μεγάλο κόστος, καθώς απαιτούν την αναλυτική σύσταση του υπό μελέτη ρευστού και απαιτούν πολύ χρόνο. Αντίθετα οι εμπειρικές συσχετίσεις παρέχουν άμεσα εκτιμήσεις καθώς απαιτούν μόνο τη γνώση απλών επιφανειακών ιδιοτήτων, με πολύ μικρότερη όμως ακρίβεια. Συνεπώς, η ανάπτυξη νέων αμέσων, αποτελεσματικών και αξιόπιστων υπολογιστικών μοντέλων προσδιορισμού των πετρελαϊκών ιδιοτήτων αποτελεί πάντα ένα θερμό πεδίο έρευνας.

Εσχάτως, αναπτύχθηκε μια νέα μέθοδος, αυτή της Υπόγειας Ανάλυσης Ρευστού – ΥΑΡ (Downhole Fluid Analysis - DFA). Στην ΥΑΡ, το εργαλείο κατέρχεται μέσα στη γεώτρηση και παρέχει σε πραγματικό χρόνο δεδομένα σύστασης για το ρευστό. Αν και το ακραίο ως προς την πίεση και θερμοκρασία περιβάλλον που επικρατεί μέσα στη γεώτρηση δυσχεραίνει την αποτελεσματικότητα των μετρήσεων, το εργαλείο ΥΑΡ ανταπεξέρχεται ικανοποιητικά. Επομένως, δοθείσης της σύστασης του ρευστού, θα μπορούσε να αναπτυχθεί μεθοδολογία η οποία θα αξιοποιούσε την μετρούμενη σύσταση ώστε να τη συσχετίσει μέσω κατάλληλων υπολογιστικών μεθόδων με τις ζητούμενες PVT ιδιότητες.

Τα τελευταία χρονιά, η τεχνολογία της Τεχνητής Νοημοσύνης και ειδικότερα των Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων – ΤΝΔ (Artificial Neural Network – ANN) έχει

εφαρμοστεί με μεγάλη επιτυχία σε πολυάριθμα προβλήματα που σχετίζονται με τη Μηχανική Πετρελαίων. Τα ΤΝΔ αποτελούν ψηφιοποιημένα μοντέλα του ανθρώπινου εγκεφάλου και χρησιμοποιούνται ως υπολογιστικά προγράμματα που σχεδιάστηκαν για να προσομοιάζουν τον τρόπο με τον οποίο το ανθρώπινο μυαλό επεξεργάζεται την πληροφορία. Τα ΤΝΔ εκπαιδεύονται μέσα από την εμπειρία που αποκτούν από κατάλληλα παραδείγματα και όχι μέσα από αυστηρό προγραμματισμό. Στην περίπτωση της μεθόδου YAP, τα ΤΝΔ φαντάζουν ως εξαιρετικά εργαλεία για την εκτίμηση των PVT ιδιοτήτων.

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως σκοπό να ελέγξει κατά πόσο τα μοντέλα που προκύπτουν από την υλοποίηση και εκπαίδευση ΤΝΔ για την πρόβλεψη των ογκομετρικών ιδιοτήτων με χρήση της σύστασης που παρέχει το εργαλείο YAP, αποτελούν μια υψηλής ακριβείας, γρήγορη και αποτελεσματική μέθοδο εκτίμησης πετρελαϊκών ιδιοτήτων σε σχέση με τις εναλλακτικές. Υλοποιήθηκαν τρία ΤΝΔ που χρησιμοποίησαν ως είσοδο τη σύσταση όπως αυτή προέκυψε από το εργαλείο YAP (σε ομάδες των CO₂, C₁, C₂, C₃₋₅, C₆₊) για να εκτιμήσουν τις τρεις βασικότερες ιδιότητες των πετρελαϊκών ρευστών, τη διαλυτότητα του αερίου στο πετρέλαιο (R_s), το συντελεστή διόγκωσης του πετρελαίου (B_o) και την πίεση του σημείο φυσαλίδας (p_b). Τέλος τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη μέθοδο των ΤΝΔ αντιπαραβλήθηκαν με αυτά της παραδοσιακής μεθόδου των συσχετίσεων όπου, όπως αναμενόταν, η προτεινόμενη μέθοδος παρέχει καλύτερη ακρίβεια λόγω τόσο της πλουσιότερης πληροφορίας εισόδου (σύσταση έναντι επιφανειακών μετρήσεων) όσο και της ευελιξίας που τα ΤΝΔ παρέχουν συγκριτικά με τις παραδοσιακές συσχετίσεις.

Abstract

Oil PVT properties are essential for almost every calculation related to Petroleum Engineering, in order to estimate oil reserves and reservoir efficiency. Having this consistent and accurate information to hand allows for optimal planning of the exploitation and maximization of profit.

Traditionally, the estimation of oil PVT properties was carried out by conducting experiments at PVT laboratories on oil samples gathered directly from the reservoir through the well or from the recombination of oil and gas that are produced at the surface. In addition to the lab methods for the prediction of PVT properties, the computational methods which are widely used in the oil industry are the empirical correlations based on Black Oil Model (BOM) and the Equation of State (EoS) model. Lab methods and the EoS model can accurately determine the oil PVT properties but at a very high cost due to the time-consuming chemical composition analysis they demand. On the other hand, correlations instantly provide estimations since they just demand information about simple surface properties, but these are much less accurate. As a result, the development of new, immediate, effective, and reliable computational models for the estimation of oil properties is always a hot field of study.

Recently, a new method was developed, known as Downhole Fluid Analysis (DFA). In DFA, the tool descends through the well and provides data about the fluid composition in real time. Despite the extreme conditions in terms of pressure and temperature of the downhole environment, the DFA tool performs sufficiently. Therefore, given the fluid composition, a methodology could be developed using the measured composition to correlate it with the requested PVT properties through appropriate computational methods.

During the last few years, Artificial Intelligence (AI) and especially Artificial Neural Networks (ANN) have been applied in numerous problems related to Petroleum Engineering with great success. ANNs are digitalized human brain models and are used as computational programs which are designed to simulate the way the human brain processes information. They are trained through experience gained from examples and not strict programming. In the case of DFA method, ANNs seem like the perfect tool for predicting oil PVT properties.

The main target of this thesis is to test whether the ANN models estimating the PVT properties using the composition provided by the DFA tool, can be an accurate, rapid, and

effective method in comparison to the alternatives. Three ANNs were developed using the composition provided by the DFA tool (CO_2 , C_1 , C_2 , C_{3-5} , C_{6+}) as an input to predict the three main oil properties: the gas solubility in oil (R_s), the oil formation volume factor (B_o) and the bubblepoint pressure (p_b). Finally, ANN method results were compared to the results from traditional correlations and, as it was expected, the proposed ANN method provided estimations with higher accuracy due to both richer input information (composition versus surface data) and versatility.

Πίνακας περιεχομένων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	2
1.1. Υδρογονάνθρακες.....	2
1.2. Ογκομετρικές (PVT) ιδιότητες των πετρελαϊκών ρευστών.....	2
1.3. Μέθοδοι Υπόγειας Ανάλυσης Ρευστού.....	3
1.4. Χρήση ΥΑΡ για τον προσδιορισμό PVT ιδιοτήτων.....	4
1.5. Αντικείμενο της παρούσας εργασίας.....	4
1.6. Περιεχόμενα.....	5
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ ΚΑΙ ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΙΣ ΟΓΚΟΜΕΤΡΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ.....	7
2.1. Η προσέγγιση του Μοντέλου Μαύρου Πετρελαίου.....	7
2.1.1. Βασικές αρχές.....	7
2.1.2. Χρήση συσχετίσεων στο ΜΜΠ.....	9
2.1.3. Πειραματικά PVT δεδομένα.....	10
2.1.4. Διόρθωση εργαστηριακών PVT δεδομένων ως προς το σύστημα διαχωρισμού.....	13
2.2. Επιφανειακές μετρήσεις του ΜΜΠ.....	15
2.2.1. Πυκνότητα πετρελαίου τανκ (API).....	15
2.2.2. Ειδική πυκνότητα αερίου (γ_g).....	16
2.3. Συσχετίσεις ΜΜΠ για την πρόβλεψη ογκομετρικών ιδιοτήτων σε πιέσεις κάτω από το σημείο φουσαλίδας.....	17
2.3.1. Συντελεστής μεταβολής όγκου πετρελαίου (Oil Formation Volume Factor – FVF).....	17
2.3.2. Διαλυτότητα αερίου στο πετρέλαιο – Solution GOR (R_s).....	22
2.4. Συσχετίσεις ΜΜΠ για την πρόβλεψη πίεσης σημείου φουσαλίδας (Bubblepoint pressure).....	27

2.5.	Συσχετίσεις ΜΜΠ για την εκτίμηση ογκομετρικών ιδιοτήτων σε πιέσεις πάνω από το σημείο φυσαλίδας	31
2.5.1.	Πυκνότητα πετρελαίου σε συνθήκες ταμειυτήρα (ρ_o).....	31
2.5.2.	Συσχετίσεις προσδιορισμού πυκνότητας πετρελαίου βάση της σύστασης ...	32
2.5.3.	Συσχετίσεις Πυκνότητας βασισμένες σε δεδομένα πεδίου	40
2.5.4.	Συμπιεστότητα.....	43
2.6.	Διφασικές ιδιότητες πετρελαϊκών ρευστών πάνω από το σημείο φυσαλίδας	45
2.6.1.	B_o για ακόρεστο πετρέλαιο.....	46
2.6.2.	Πυκνότητα ακόρεστου πετρελαίου	47
2.7.	Κινητικές Ιδιότητες.....	47
2.8.	Ρύθμιση των συσχετίσεων (Tuning).....	48
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΥΠΟΓΕΙΑ ΑΝΑΛΥΣΗ ΡΕΥΣΤΟΥ		50
3.1.	Εισαγωγή	50
3.1.1.	Προσδιορισμός σύστασης με το εργαλείο ΥΑΡ	50
3.1.2.	Αέρια Χρωματογραφία GC	50
3.1.3.	Το εργαλείο ΥΑΡ	53
3.2.	Αρχές λειτουργίας.....	54
3.2.1.	Εργαλεία και αισθητήρες.....	54
3.2.2.	Οπτική πυκνότητα – Optical Density (OD).....	56
3.2.3.	Βαθμονόμηση των πινάκων αντιστοίχισης B.....	60
3.3.	Σύγκριση της αποτελεσματικότητας της μεθόδου ΥΑΡ με τις συμβατικές μεθόδους εκτίμησης σύστασης.....	61
3.4.	ΥΑΡ και Μηχανική Εκμάθηση (ME)	69
3.4.1.	Εκτίμηση GOR πριν την εφαρμογή μεθόδων ME.....	69
3.4.2.	Εκτίμηση GOR με την μέθοδο των Dong et al, 2008	71
3.4.3.	Εκτίμηση GOR με τη μέθοδο των Hegeman et al, 2007.....	72

3.4.4.	Εκτίμηση GOR με την μέθοδο των Indo et al, 2015	74
3.4.5.	Εκτίμηση B_0 με την μέθοδο των Zuo et al, 2018	77

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΠΑΛΙΝΔΡΟΜΗΣΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΗΤΑ ΝΕΥΡΩΝΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ..... 79

4.1.	Εισαγωγή	79
4.2.	Παλινδρόμηση (Regression).....	80
4.3.	Παραμετρικές και μη παραμετρικές μέθοδοι.....	81
4.3.1.	Παραμετρικές μέθοδοι.....	81
4.3.2.	Μη παραμετρικές μέθοδοι.....	85
4.4.	Γραμμική Παλινδρόμηση	89
4.4.1.	Ελαχιστοποίηση.....	90
4.5.	Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα ΤΝΔ – Artificial Neural Networks (ANN).....	91
4.5.1.	Εισαγωγή	91
4.5.2.	Βασικά στοιχεία.....	92
4.5.3.	Συνάρτηση Ενεργοποίησης	93
4.5.4.	Επίπεδα Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων	95
4.5.5.	Υπερπαραμέτροι.....	96
4.5.6.	Εκπαίδευση Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων.....	97
4.5.7.	Επαναληπτικές Μέθοδοι.....	101
4.5.8.	Τοπικό και Καθολικό Ελάχιστο	104
4.5.9.	Υπερπροσαρμογή (Overfitting) στα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα	105

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΒΑΣΗ ΔΕΛΟΜΕΝΩΝ ΡΥΤ ΙΔΙΟΤΗΤΩΝ ΠΕΤΡΕΛΑΪΚΩΝ ΡΕΥΣΤΩΝ 108

5.1.	Εισαγωγή	108
5.2.	Είσοδος ΤΝΔ (Σύσταση ρευστού).....	108
5.3.	Έξοδος ΤΝΔ (ΡΥΤ Ιδιότητες Πετρελαίου).....	110
5.3.1.	Moles του αερίου προς τον συνολικό αριθμό moles του ρευστού n_g	111

5.4.	Υπολογισμός R_s	112
5.5.	Υπολογισμός B_o	115
5.6.	Έλεγχος Δεδομένων (Data Screening).....	117
5.6.1.	Εισαγωγή	117
5.6.2.	Θερμοκρασία	117
5.6.3.	Πυκνότητα Σταθεροποιημένου Πετρελαίου (API).....	119
5.6.4.	Πυκνότητα πετρελαίου στο σημείο φυσαλίδας.....	120
5.6.5.	Μοριακό Βάρος Σταθεροποιημένου Πετρελαίου.....	122
5.6.6.	Μοριακό Βάρος Πετρελαίου σε Συνθήκες Ταμειυτήρα.....	123
5.6.7.	Πίεση Σημείου Φυσαλίδας	124
5.6.8.	Λόγος διαλυμένου αερίου προς το πετρέλαιο R_s	126
5.6.9.	Συντελεστής μεταβολής όγκου πετρελαίου B_o	128
5.6.10.	Συμπεράσματα	130

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. ΕΚΤΙΜΗΣΗ B_o , R_s , P_b ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΝΔ ΚΑΙ ΣΥΣΧΕΤΙΣΕΩΝ

132

6.1.	Επισκόπηση της πλατφόρμας Microsoft Azure.....	132
6.2.	Εκτίμηση ογκομετρικού συντελεστή σχηματισμού πετρελαίου B_o	135
6.2.1.	Εκπαίδευση του ΤΝΔ	135
6.2.2.	Αξιολόγηση του ΤΝΔ.....	139
6.2.3.	ΤΝΔ για B_o κάτω από 2 rb/stb.....	142
6.3.	Εκτίμηση R_s	145
6.3.1.	Εκπαίδευση ΤΝΔ.....	145
6.3.2.	Αξιολόγηση ΤΝΔ εκτίμησης R_s	147
6.3.3.	ΤΝΔ για R_s κάτω από 1,500 scf/stb.....	150
6.4.	Εκτίμηση p_b	153
6.4.1.	Εκπαίδευση ΤΝΔ.....	153

6.4.2.	Αξιολόγηση ΤΝΔ εκτίμησης p_b	156
6.5.	Εκτιμήσεις B_o , R_s , p_b από συσχετίσεις.....	158
6.5.1.	Εκτιμήσεις B_o	159
6.5.2.	Εκτιμήσεις R_s	163
6.5.3.	Εκτιμήσεις p_b	167
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7. ΚΡΙΤΙΚΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΕΠΙ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ		171
7.1.	Εισαγωγή	171
7.2.	Κριτική αποτελεσμάτων για την εκτίμηση του B_o	172
7.2.1.	Ειδικές Παρατηρήσεις	172
7.2.2.	Γενικές παρατηρήσεις.....	175
7.3.	Κριτική αποτελεσμάτων για την εκτίμηση του R_s	178
7.3.1.	Ειδικές παρατηρήσεις.....	178
7.3.2.	Γενικές Παρατηρήσεις.....	180
7.4.	Κριτική αποτελεσμάτων για την εκτίμηση του p_b	184
7.4.1.	Γενικές Παρατηρήσεις.....	185
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....		188
8.1.	Γενικά συμπεράσματα	188
8.2.	Προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση	189
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....		191

ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 2.1: Τα στάδια του CCE (Ahmed, 2016)	12
Εικόνα 2.2: Τα στάδια της δοκιμής DV (Γαγάνης, 2021).....	13
Εικόνα 2.3: Σχηματική απεικόνιση συσχέτισης πυκνότητας του Katz σε κανονικές συνθήκες (Ahmed, 2016)	41
Εικόνα 3.1: Σχηματική απεικόνιση των μηχανημάτων της αέριας χρωματογραφίας (Γαγάνης, 2021).....	51
Εικόνα 3.2: Σχηματική αναπαράσταση του εργαλείου YAP (Dong et al, 2008).....	55
Εικόνα 4.1: Σχηματική απεικόνιση Νευρωνικού δικτύου και νευρώνα (Kumar, 2017).....	92
Εικόνα 5.1: Σχηματική αναπαράσταση της εκτόνωσης (flash) και του καταμερισμού των αρχικών moles του ρευστού	112
Εικόνα 6.1: Αρχιτεκτονική TNΔ με συνδυασμό δομικών στοιχείων (Azure ML studio)	135

ΛΙΣΤΑ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 2.1: Διαφορά καμπυλών απόληψης πετρελαίου βάση αντιπροσωπευτικού και μη αντιπροσωπευτικού σημείου φυσαλίδας (Ahmed, 2016)	8
Διάγραμμα 2.2: Διάγραμμα πίεσης - όγκου κατά την πειραματική διαδικασία της ισοθερμοκρασιακής εκτόνωσης υπό σταθερή πίεση (CCE). (Γαγάνης, 2021).....	12
Διάγραμμα 2.3: Σύγκριση καμπύλης B_0 (Συντελεστή μεταβολής όγκου πετρελαίου) DV με τις καμπύλες που προσομοιάζουν το πείραμα DVC (Γαγάνης, 2021)	15
Διάγραμμα 2.4: Καμπύλη B_0 συναρτήσει της πίεσης (Ahmed, 2016).....	18
Διάγραμμα 2.5: Καμπύλη R_s συναρτήσει της πίεσης (Ahmed, 2016)	23
Διάγραμμα 2.6: Συσχετίσεις των Standing-Katz για την πυκνότητα (Ahmed, 2016).....	33
Διάγραμμα 2.7: Διόρθωση της πυκνότητας για την συμπιεστότητα του αργού πετρελαίου (Ahmed, 2016).....	36
Διάγραμμα 2.8: Διόρθωση της πυκνότητας για την ισοθερμοκρασιακή εκτόνωση του πετρελαίου (Ahmed, 2016).....	37

Διάγραμμα 2.9: Φαινόμενη πυκνότητα αερίου διαλυμένου στο πετρέλαιο συναρτήσει της ειδικής πυκνότητας του αερίου και της πυκνότητας API (Ahmed, 2016)	42
Διάγραμμα 2.10: Καμπύλες R_s , B_o , ρ_o συναρτήσει της πίεσης (Ahmed, 2016).....	46
Διάγραμμα 2.11: Σύγκριση καμπυλών B_o πριν και μετά την τεχνική της ρύθμισης (Γαγάνης, 2021).....	49
Διάγραμμα 3.1: Καμπύλες αέριας χρωματογραφίας συστατικών ξηρού αερίου (Γαγάνης, 2021).....	52
Διάγραμμα 3.2: Καμπύλες αέριας χρωματογραφίας συστατικών πετρελαίου (Γαγάνης, 2021).....	52
Διάγραμμα 3.3: Καμπύλες συστατικών πετρελαίου με τα ισόμερη του κάθε στοιχείου (Γαγάνης, 2021).....	53
Διάγραμμα 3.4: Φάσματα οπτικής απορρόφησης ελαφριών συστατικών υδρογονανθράκων και σταθεροποιημένου πετρελαίου (Indo et al, 2015).....	56
Διάγραμμα 3.5: Φάσματα οπτικής απορρόφησης νερού, πετρελαίου και CO_2 (Dong et al, 2008).....	57
Διάγραμμα 3.6: Ο πίνακας αντιστοίχισης B για το πετρέλαιο και οπτική πυκνότητα συναρτήσει του μήκος κύματος του αργού πετρελαίου που αναλύθηκε (κάτω panel). (Indo et al, 2015)	62
Διάγραμμα 3.7: Μετρήσεις πυκνότητας από το εργαλείο YAP (Dong et al, 2008).....	62
Διάγραμμα 3.8: Μετρήσεις σύστασης από το εργαλείο YAP (Dong et al, 2008).....	63
Διάγραμμα 3.9: Σύσταση ρευστού από την περιοχή της Βόρειας Θάλασσας (Dong et al, 2008).....	64
Διάγραμμα 3.10: Σύγκριση συστάσεων από το εργαλείο YAP με τη σύσταση που πρόεκυψε από την αέρια χρωματογραφική ανάλυση (Indo et al, 2015)	65
Διάγραμμα 3.11: Οπτικές πυκνότητες διαφόρων μηκών κύματος για το πτητικό πετρέλαιο σε συνάρτηση με τον χρόνο και η μπάρα ταυτοποίησης τύπου ρευστού. (Indo et al, 2015)	67
Διάγραμμα 3.12: : Εκτίμηση σύστασης του πτητικού πετρελαίου κατά τη διάρκεια της ανάλυσης με το εργαλείο YAP. Το δείγμα αντλήθηκε για την εργαστηριακή ανάλυση	

περίπου στα 11,646 μέχρι 11,873sec ενώ η σύσταση που τελικά συγκρίθηκε με τα εργαστηριακά αποτελέσματα ήταν αυτή στα 11,700sec (Indo et al, 2015)	67
Διάγραμμα 3.13: Σχηματική αναπαράσταση της διαδικασίας που ακολούθησαν οι Mullins et al, 2001 και οι Dong et al, 2002, 2008 για τον υπολογισμό του GOR με εργαλεία YAP (Γαγάνης, 2021).....	70
Διάγραμμα 3.14: Μετρήσεις GOR από το εργαλείο YAP (Dong et al, 2008).....	71
Διάγραμμα 3.15: GOR ρευστού από την περιοχή της Βόρειας Θάλασσας (Dong et al, 2008).....	72
Διάγραμμα 3.16: Επαλήθευση του TNΔ υπολογισμού του GOR με ρευστά από την περιοχή του Κόλπου του Μεξικού (Hegeman et al, 2007).....	74
Διάγραμμα 3.17: Σύγκριση GOR που εκτιμήθηκε από το TNΔ με το GOR που πρόεκυψε από εργαστηριακές μετρήσεις PVT. Το αριστερό σχήμα απεικονίζει τις συγκρίσεις σε λογαριθμική κλίμακα ενώ το δεξί σε γραμμική κλίμακα. Οι μπάρες έχουν πλάτος όσο μια τυπική απόκλιση (1 SD). (Indo et al, 2015)	75
Διάγραμμα 3.18: Εκτίμηση GOR του πτητικού πετρελαίου κατά την διάρκεια της δειγματοληψίας με το εργαλείο YAP. Το δείγμα αντλήθηκε για την εργαστηριακή ανάλυση περίπου στα 11,646 μέχρι 11,873sec ενώ το GOR που τελικά συγκρίθηκε με τα εργαστηριακά αποτελέσματα ήταν στα 11,700sec. Η μπλε μπάρα έχει πλάτος 1-SD (Indo et al, 2015).....	76
Διάγραμμα 3.19: Σύγκριση εκτίμησης FVF μεταξύ TNΔ και εργαστηριακών μετρήσεων PVT (Zuo et al, 2018).....	77
Διάγραμμα 4.1: Ανάλυση παλινδρόμησης σε μια σειρά δεδομένων χρησιμοποιώντας ένα γραμμικό μαθηματικό μοντέλο (Γαγάνης, 2021)	82
Διάγραμμα 4.2: Ανάλυση παλινδρόμησης σε μια σειρά δεδομένων χρησιμοποιώντας ένα πολυπλοκότερο μαθηματικό μοντέλο (Γαγάνης, 2021)	82
Διάγραμμα 4.3: Ανάλυση παλινδρόμησης σε μια σειρά δεδομένων στην περίπτωση που υπάρχουν δυο τιμές εισόδου x_1 , x_2 (Γαγάνης, 2021).....	83
Διάγραμμα 4.4: : Διαφορετικοί βαθμοί πολυπλοκότητας μοντέλου για την απεικόνιση ενός φαινομένου (Γαγάνης, 2021).....	84

Διάγραμμα 4.5: Σύγκριση μοντέλων με διαφορετικούς βαθμούς ευελιξίας. Η περίπτωση της υπερπροσαρμογής (Γαγάνης, 2021).....	85
Διάγραμμα 4.6: Παράδειγμα μοντέλου μη παραμετρικής μεθόδου σε σύγκριση με μοντέλο παραμετρικής μεθόδου (Γαγάνης, 2021).....	86
Διάγραμμα 4.7: Γραμμική παρεμβολή σε μη παραμετρικές μεθόδους (Γαγάνης, 2021)....	87
Διάγραμμα 4.8: Το διάγραμμα του Voronoi (Γαγάνης, 2021).....	88
Διάγραμμα 4.9: Μέθοδος των Ελαχίστων Τετραγώνων (Γαγάνης, 2021).....	89
Διάγραμμα 4.10: : Σχηματική αναπαράσταση των διαδικασιών ενός τεχνητού νευρώνα (Γαγάνης, 2021).....	93
Διάγραμμα 4.11: Γραφικές παραστάσεις της λογιστικής σιγμοειδούς και υπερβολικής εφαπτόμενης (Γαγάνης, 2021).....	94
Διάγραμμα 4.12: Σχηματική αναπαράσταση ενός τεχνητού νευρωνικού δικτύου (Γαγάνης, 2021).....	95
Διάγραμμα 4.13: : Σχηματική απεικόνιση ενός τεχνητού νευρωνικού δικτύου συμπεριλαμβανόμενων των παραμέτρων του (Γαγάνης, 2021).....	98
Διάγραμμα 4.14: Σύγκριση Μεθόδου Κατάβασης Κλίσης (πράσινο) με την Μέθοδο Συζυγούς Κατάβασης Κλίσης (κόκκινο).....	102
Διάγραμμα 4.15: Σύγκριση της Μεθόδου Κατάβασης Κλίσης (πράσινο) με την Μέθοδο του Newton (κόκκινο). Η Μέθοδος του Newton χρησιμοποιεί τη δεύτερη παράγωγο για να συγκλίνει πιο γρήγορα στην λύση (ελάχιστο) της συνάρτησης.	103
Διάγραμμα 4.16: Κίνδυνος παγίδευσης της μεθόδου ελαχιστοποίησης σε τοπικό ελάχιστο (Hurbans, 2019).....	104
Διάγραμμα 4.17: Καμπύλη σφάλματος για τα δεδομένα εκπαίδευσης και επαλήθευσης σε συνάρτηση με τον αριθμό των επαναλήψεων (Γαγάνης, 2021).....	106
Διάγραμμα 4.18: Εκτίμηση ακριβείας ενός εκπαιδευμένου μοντέλου στα δεδομένα εκπαίδευσης, επαλήθευσης και έλεγχου (Γαγάνης, 2021).....	107
Διάγραμμα 5.1: Ιστόγραμμα συχνοτήτων θερμοκρασίας ταμιευτήρα	119
Διάγραμμα 5.2: Ιστόγραμμα συχνοτήτων πυκνότητας API πετρελαίου	120

Διάγραμμα 5.3: Ιστόγραμμα συχνοτήτων πυκνότητας πετρελαίου στο σημείο φυσαλίδας	121
Διάγραμμα 5.4: Ιστόγραμμα συχνοτήτων μοριακού βάρους σταθεροποιημένου πετρελαίου	123
Διάγραμμα 5.5: Ιστόγραμμα συχνοτήτων μοριακού βάρους πετρελαίου σε συνθήκες ταμειυτήρα.....	124
Διάγραμμα 5.6: Ιστόγραμμα συχνοτήτων πίεσης σημείου φυσαλίδας	125
Διάγραμμα 5.7: Σύγκριση DV R_s με flash R_s	126
Διάγραμμα 5.8: Ιστόγραμμα συχνοτήτων flash R_s	128
Διάγραμμα 5.9: Σύγκριση DV B_o με flash B_o	129
Διάγραμμα 5.10: Ιστόγραμμα συχνοτήτων flash B_o	130
Διάγραμμα 6.1: Προσδιορισμός αριθμού κρυφών νευρώνων στην περίπτωση του TNΔ για την εκτίμηση του B_o	137
Διάγραμμα 6.2: Σύγκριση TNΔ B_o με flash B_o (Δεδομένα Εκπαίδευσης).....	140
Διάγραμμα 6.3: Σύγκριση TNΔ B_o με flash B_o (Δεδομένα Ελέγχου).....	140
Διάγραμμα 6.4: Σύγκριση TNΔ B_o με flash B_o ($B_o < 2rb/stb$) (Δεδομένα Εκπαίδευσης) 144	
Διάγραμμα 6.5: Σύγκριση TNΔ B_o με flash B_o ($B_o < 2rb/stb$) (Δεδομένα Ελέγχου).....	144
Διάγραμμα 6.6: Προσδιορισμός αριθμού κρυφών νευρώνων στην περίπτωση του TNΔ για την εκτίμηση του R_s	146
Διάγραμμα 6.7: Σύγκριση TNΔ R_s με flash R_s (Δεδομένα Εκπαίδευσης)	148
Διάγραμμα 6.8: Σύγκριση TNΔ R_s με flash R_s (Δεδομένα Ελέγχου).....	149
Διάγραμμα 6.9: Σύγκριση TNΔ R_s με flash R_s ($R_s < 1,500scf/stb$) (Δεδομένα Εκπαίδευσης).....	152
Διάγραμμα 6.10: Σύγκριση TNΔ R_s με flash R_s ($R_s < 1,500scf/stb$) (Δεδομένα Ελέγχου)	152
Διάγραμμα 6.11: Προσδιορισμός αριθμού κρυφών νευρώνων στην περίπτωση του TNΔ για την εκτίμηση του p_b	155
Διάγραμμα 6.12: Σύγκριση TNΔ p_b με lab p_b (Δεδομένα Εκπαίδευσης).....	157

Διάγραμμα 6.13: Σύγκριση TNΔ p_b με lab p_b (Δεδομένα Έλεγχου).....	158
Διάγραμμα 6.14: Σύγκριση Standing B_o με flash B_o	160
Διάγραμμα 6.15: Σύγκριση Glaso B_o με flash B_o	161
Διάγραμμα 6.16: Σύγκριση Al Marhoun B_o με flash B_o	163
Διάγραμμα 6.17: Σύγκριση Standing R_s με flash R_s	164
Διάγραμμα 6.18: Σύγκριση Glaso R_s με flash R_s	165
Διάγραμμα 6.19: Σύγκριση Al Marhoun R_s με flash R_s	167
Διάγραμμα 6.20: Σύγκριση Standing p_b με lab p_b	168
Διάγραμμα 6.21: Σύγκριση Al Marhoun p_b με εργαστηριακό p_b	169
Διάγραμμα 7.1: Σύγκριση των εκτιμώμενων B_o με τα flash B_o επί του συνόλου της βάσης δεδομένων.....	176
Διάγραμμα 7.2: Σύγκριση των εκτιμώμενων B_o με τα flash B_o επί των πηκτικών ρευστών. Στο διάγραμμα απεικονίζονται για κάθε μέθοδο οι συντελεστές προσδιορισμού R^2 μαζί με τη γραμμή τάσης τους.....	177
Διάγραμμα 7.3: Σύγκριση των εκτιμώμενων TNΔ R_s με τα flash R_s για τα ρευστά με R_s κάτω από 100 scf/stb	181
Διάγραμμα 7.4 : Η αποτύπωση της σιγμοειδούς συνάρτησης στις εκτιμήσεις του R_s (μπλε καμπύλη). Με πράσινο χρώμα είναι σημειωμένη η περιοχή υπερεκτίμησης των τιμών από το μοντέλο του TNΔ.....	182
Διάγραμμα 7.5: Σύγκριση των εκτιμώμενων R_s με τα flash R_s επί του συνόλου των ρευστών. Στο διάγραμμα απεικονίζονται για κάθε μέθοδο οι συντελεστές προσδιορισμού R^2 μαζί με τη γραμμή τάσης τους.....	183
Διάγραμμα 7.6: Σύγκριση των εκτιμώμενων p_b με τα εργαστηριακά p_b επί του συνόλου των ρευστών. Στο διάγραμμα απεικονίζονται για κάθε μέθοδο οι συντελεστές προσδιορισμού R^2 μαζί με την γραμμή τάσης τους.	186

ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1: Πίνακας προσέγγισης του ΜΜΠ (Γαγάνης, 2021).....	9
Πίνακας 2.2: Σταθερές για τη συσχέτιση του B_o των Vasquez-Beggs (Ahmed, 2016)	19
Πίνακας 2.3: Σταθερές για τη συσχέτιση του R_s των Vasquez-Beggs (Ahmed, 2016).....	24
Πίνακας 2.4: Σταθερές για τη συσχέτιση του p_b των Vasquez-Beggs (Ahmed, 2016).....	30
Πίνακας 2.5: Τιμές σταθερών συσχέτισης των Alani-Kennedy (Ahmed, 2016)	39
Πίνακας 3.1: Σύσταση, GOR και πυκνότητα από τη δειγματοληψία στην περιοχή της Βόρειας Θάλασσας (Dong et al, 2008).....	64
Πίνακας 3.2: Η περίπτωση του πτητικού πετρελαίου (Indo et al, 2015)	68
Πίνακας 3.3: Η περίπτωση του αέριου συμπυκνώματος (Indo et al, 2015).....	68
Πίνακας 3.4: Η περίπτωση του μαύρου πετρελαίου (Indo et al, 2015).....	68
Πίνακας 3.5: Η περίπτωση του υγρού αέριου (Indo et al, 2015)	68
Πίνακας 3.6: GOR από τη δειγματοληψία στην περιοχή της Βόρειας Θάλασσας (Dong et al, 2008).....	72
Πίνακας 3.7: Επίδοση του ΤΝΔ για τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την εκπαίδευση του μοντέλου και για τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την επαλήθευσή του (Hegeman et al, 2007).....	73
Πίνακας 3.8: Σύγκριση επιδόσεων των τριών μοντέλων εκτίμησης GOR (Hegeman et al, 2007).....	74
Πίνακας 3.9: Η περίπτωση υπολογισμού GOR του πτητικού πετρελαίου (Indo et al, 2015)	75
Πίνακας 3.10: Η περίπτωση υπολογισμού GOR αέριου συμπυκνώματος (Indo et al, 2015)	76
Πίνακας 3.11: Η περίπτωση υπολογισμού GOR μαύρου πετρελαίου (Indo et al, 2015)...	76
Πίνακας 3.12: Η περίπτωση υπολογισμού GOR υγρού αερίου (Indo et al, 2015)	76
Πίνακας 3.13: Αποτελέσματα των τεσσάρων μεθόδων ΥΑΡ σε σχέση με τα δεδομένα εργαστηριακών μετρήσεων (Zuo et al, 2018)	78
Πίνακας 5.1: : Περιγραφικά στατιστικά στοιχεία θερμοκρασιών ταμιευτήρων	118

Πίνακας 5.2: Περιγραφικά στατιστικά στοιχεία πυκνότητας πετρελαίου.....	119
Πίνακας 5.3: Περιγραφικά στατιστικά στοιχεία πυκνότητας πετρελαίου στο σημείο φυσάλιδας.....	121
Πίνακας 5.4: Περιγραφικά στατιστικά στοιχεία μοριακού βάρους σταθεροποιημένου πετρελαίου	122
Πίνακας 5.5: Περιγραφικά στατιστικά στοιχεία μοριακού βάρους πετρελαίου σε συνθήκες ταμιευτήρα.....	124
Πίνακας 5.6: Περιγραφικά στατιστικά στοιχεία πίεσης σημείου φυσάλιδας.....	125
Πίνακας 5.7: Περιγραφικά στατιστικά στοιχεία flash R_s	127
Πίνακας 5.8: Περιγραφικά στατιστικά στοιχεία flash B_o	130
Πίνακας 6.1: Επίδοση του μοντέλου εκτίμησης B_o του ΤΝΔ ως προς τα δεδομένα εκπαίδευσης και ελέγχου. Σημειώνεται πως στα δεδομένα εκπαίδευσης περιλαμβάνονται τα δεδομένα επαλήθευσης.....	139
Πίνακας 6.2: Επίδοση του μοντέλου εκτίμησης B_o κάτω από 2 rb/stb του ΤΝΔ ως προς τα δεδομένα εκπαίδευσης και ελέγχου. Σημειώνεται πως στα δεδομένα εκπαίδευσης περιλαμβάνονται τα δεδομένα επαλήθευσης.....	143
Πίνακας 6.3: Επίδοση του μοντέλου εκτίμησης R_s του ΤΝΔ ως προς τα δεδομένα εκπαίδευσης και ελέγχου. Σημειώνεται πως στα δεδομένα εκπαίδευσης περιλαμβάνονται τα δεδομένα επαλήθευσης.....	148
Πίνακας 6.4: Επίδοση του μοντέλου εκτίμησης R_s κάτω από 1500 scf/stb του ΤΝΔ ως προς τα δεδομένα εκπαίδευσης και ελέγχου. Σημειώνεται πως στα δεδομένα εκπαίδευσης περιλαμβάνονται τα δεδομένα επαλήθευσης.....	151
Πίνακας 6.5: Επίδοση του μοντέλου εκτίμησης p_b του ΤΝΔ ως προς τα δεδομένα εκπαίδευσης και ελέγχου. Σημειώνεται πως στα δεδομένα εκπαίδευσης περιλαμβάνονται τα δεδομένα επαλήθευσης.....	156
Πίνακας 6.6: Επίδοση της συσχέτισης Standing για το B_o ως προς το flash B_o της βάσης δεδομένων.....	159
Πίνακας 6.7: Επίδοση της συσχέτισης Glaso για το B_o ως προς το flash B_o της βάσης δεδομένων.....	161

Πίνακας 6.8: Επίδοση της συσχέτισης του Al Marhoun για το B_o ως προς το flash B_o της βάσης δεδομένων.....	162
Πίνακας 6.9: Επίδοση της συσχέτισης του Standing για την εκτίμηση του R_s ως προς το flash R_s της βάσης δεδομένων.....	164
Πίνακας 6.10: Επίδοση της συσχέτισης του Glaso για την εκτίμηση του R_s ως προς το flash R_s της βάσης δεδομένων.....	165
Πίνακας 6.11: Επίδοση της συσχέτισης του Al Marhoun για την εκτίμηση του R_s ως προς το flash R_s της βάσης δεδομένων.....	166
Πίνακας 6.12: Επίδοση της συσχέτισης του Standing για την εκτίμηση του p_b ως προς το εργαστηριακό p_b της βάσης δεδομένων.....	168
Πίνακας 6.13: Επίδοση της συσχέτισης του Al Marhoun για την εκτίμηση του p_b ως προς το εργαστηριακό p_b της βάσης δεδομένων.....	169
Πίνακας 7.1: Ρευστά με τη μεγαλύτερη συγκέντρωση σε υδρόθειο της βάσης δεδομένων.....	173
Πίνακας 7.2: Ρευστό με τη μεγαλύτερη συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα της βάσης δεδομένων.....	174
Πίνακας 7.3: Επίδοση μοντέλων πρόβλεψης B_o για τα βαριά έως μέσης πτητικότητας, τα υψηλής πτητικότητας και για το σύνολο της βάσης δεδομένων.....	176
7.4: Σφάλματα και τιμές ρευστών με τη μεγαλύτερη συγκέντρωση σε υδρόθειο της βάσης δεδομένων. Η περίπτωση του R_s	179
Πίνακας 7.5: Πίνακας 7.6: Επίδοση μοντέλων πρόβλεψης R_s για τα βαριά έως μέσης πτητικότητας, τα υψηλής πτητικότητας και για το σύνολο της βάσης δεδομένων.....	184
Πίνακας 7.7: Επίδοση μοντέλων πρόβλεψης p_b για το σύνολο της βάσης δεδομένων.....	186

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. Εισαγωγή

1.1. Υδρογονάνθρακες

Η οικονομική ανάπτυξη και η αύξηση του πληθυσμού σε παγκόσμιο επίπεδο έχουν επιφέρει ραγδαία αύξηση της παγκόσμιας ενεργειακής ζήτησης. Παρ' όλη τη γενικότερη στροφή προς τις «πράσινες» ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, αναμένεται πως οι υδρογονάνθρακες θα παραμείνουν στο προσκήνιο ως η κυριότερη πηγή ενέργειας για τουλάχιστον 100 χρόνια. Αυτό έχει οδηγήσει τις πετρελαϊκές εταιρίες να επενδύουν διαρκώς στην ανάπτυξη και εφαρμογή νέων τεχνολογιών για τη βελτιστοποίηση της παράγωγης. Αυτό το ρόλο αναλαμβάνουν οι εταιρίες υπηρεσιών (service companies) που στοχεύουν στην υλοποίηση νέων προϊόντων προκειμένου να επιτευχθεί αυτός ο σκοπός.

1.2. Ογκομετρικές (PVT) ιδιότητες των πετρελαϊκών ρευστών

Οι ογκομετρικές (PVT) ιδιότητες των πετρελαϊκών ρευστών έχουν καθοριστικό ρόλο σε όλους τους υπολογισμούς που σχετίζονται με τη Μηχανική Πετρελαίων, από την εκτίμηση των αποθεμάτων και την πρόβλεψη της οικονομικής αποδοτικότητας ενός ταμειυτήρα, μέχρι αντικείμενα που αφορούν τη ροή σε πορώδη μέσα κατά την πρωτογενή και δευτερογενή παραγωγή, καθώς και για τις μεθόδους επαυξημένης απόληψης πετρελαίου. Αποτελούν πληροφορία ζωτικής σημασίας για το σχεδιασμό, τη διαχείριση και τη βελτιστοποίηση της παραγωγής. Καθ' όλη τη διάρκεια της εκμετάλλευσης, οι ιδιότητες των πετρελαϊκών ρευστών μεταβάλλονται συνεχώς, αφού η απόληψη πετρελαίου από ένα ταμειυτήρα επιφέρει σημαντικές αλλαγές, κυρίως στην πίεση του συστήματος. Συνεπώς, καθίσταται επιτακτική η δυνατότητα προσδιορισμού των ογκομετρικών ιδιοτήτων σε όλα τα στάδια της παραγωγικής διαδικασίας.

Παραδοσιακά, η πληροφορία για τις πετρελαϊκές ιδιότητες προερχόταν από την άντληση δείγματος πετρελαϊκού ρευστού (ή τη συλλογή του στην επιφάνεια) και στη συνέχεια, τη διεξαγωγή πειραμάτων προσδιορισμού των ογκομετρικών ιδιοτήτων του σε εργαστήρια, μια μέθοδος με πολύ μεγάλη ακρίβεια, αλλά εξαιρετικά χρονοβόρα και κοστοβόρα. Σημειώνεται ότι οι εργαστηριακές δοκιμές εκ των πραγμάτων, μπορούν να προσδιορίσουν τις θερμοδυναμικές ιδιότητες των ρευστών μόνο σε περιορισμένο εύρος πιέσεων και θερμοκρασιών. Για το λόγο αυτό, η πετρελαϊκή βιομηχανία αφιέρωσε ένα πολύ μεγάλο κομμάτι των ερευνών της στην ανάπτυξη υπολογιστικών μεθόδων, που θα μοντελοποιούν

τη θερμοδυναμική συμπεριφορά των ρευστών και θα παρέχουν την απαιτούμενη πληροφορία στον Μηχανικό, πολύ πιο άμεσα και πολύ πιο οικονομικά σε σύγκριση με τις εργαστηριακές μεθόδους. Οι δυο επικρατέστερες προσεγγίσεις είναι η μέθοδος του *Μοντέλου Μαύρου Πετρελαίου – ΜΜΠ (Black Oil Model)* και η μέθοδος του *Μοντέλου Καταστατικών Εξισώσεων – ΜΚΕ (Equation of State – EoS)*. Η πρώτη μέθοδος χρησιμοποιεί εμπειρικές μαθηματικές *συσχετίσεις (correlations)*, οι οποίες παρέχουν εκτίμηση των ογκομετρικών ιδιοτήτων βάση δεδομένων που συλλέγονται στην επιφάνεια (field data) (π.χ. πυκνότητα του σταθεροποιημένου πετρελαίου), άμεσα σε συνθήκες πεδίου, με ελάχιστο κόστος αλλά περιορισμένη ακρίβεια. Η δεύτερη μέθοδος χρησιμοποιεί καταστατικές εξισώσεις που έχουν ως δεδομένα την αναλυτική σύσταση του πετρελαϊκού ρευστού, όπως αυτή προέκυψε από αέρια χρωματογραφία και τα χαρακτηριστικά των συστατικών του ρευστού. Στην περίπτωση αυτή οι εκτιμήσεις είναι ακριβέστερες, όμως απαιτείται η αποστολή δείγματος σε εργαστήριο, μειώνοντας σαφώς την αμεσότητα και αυξάνοντας το οικονομικό κόστος.

1.3. Μέθοδοι Υπόγειας Ανάλυσης Ρευστού

Στις μεθόδους προσδιορισμού των ιδιοτήτων των πετρελαϊκών ρευστών προστέθηκε, εσχάτως, μια ακόμη μέθοδος που δύναται να παρέχει δεδομένα για υπολογιστική εκτίμηση των πετρελαϊκών ιδιοτήτων στις ήδη υπάρχουσες, αυτή της *Υπόγειας Ανάλυσης Ρευστού – ΥΑΡ (Downhole Fluid Analysis – DFA)*. Αν και βρίσκεται ακόμα σε σχετικά πρώιμο στάδιο, η μέθοδος αυτή έχει τη δυνατότητα, να εκτιμήσει πρωτίστως τη σύσταση του πετρελαϊκού ρευστού και πέρα και δευτερευόντως τις ιδιότητές του (π.χ. ιξώδες, πυκνότητα, πίεση βρασμού). Στη μέθοδο αυτή, το εργαλείο ΥΑΡ κατέρχεται μέσα στη γεώτρηση και παρέχει σε πραγματικό χρόνο και συνθήκες πεδίου, πληροφορίες για τη σύσταση του πετρελαϊκού ρευστού. Αυτό επιτυγχάνεται χάρη στην τεχνολογία φασματομετρίας εγγύς – υπέρυθρου (Near - Infrared – NIR), όπου η απορρόφηση της ακτινοβολίας NIR από τους δεσμούς των μορίων των υδρογονανθράκων μετατρέπεται σε σύσταση. Ωστόσο, οι ακραίες συνθήκες που επικρατούν στο εσωτερικό της γεώτρησης, σε συνδυασμό την περιορισμένη ακρίβεια εκτίμησης της σύστασης των βαρύτερων συστατικών του πετρελαίου, περιορίζουν τις εκτιμήσεις του εργαλείου ΥΑΡ σε λιγιστές ομάδες συστατικών (CO_2 , C_1 , C_2 , C_{3-5} , C_{6+}). Βεβαία, η μείωση στην ποιότητα της ανάλυσης αντισταθμίζεται από την άμεση παροχή πληροφορίας, σε συνθήκες πεδίου.

1.4. Χρήση ΥΑΡ για τον προσδιορισμό PVT ιδιοτήτων

Βάση της σύστασης που προκύπτει από το εργαλείο ΥΑΡ δύναται να πραγματοποιηθεί υπολογιστική εκτίμηση των PVT ιδιοτήτων πετρελαϊκού ρευστού. Οι υπολογιστικές μέθοδοι χρησιμοποιούν διαφορές τεχνικές *Ανάλυσης Παλινδρόμησης (Regression Analysis)* για να συσχετίσουν μια ή περισσότερες ανεξάρτητες μεταβλητές (είσοδοι) με μια εξαρτημένη μεταβλητή (έξοδος). Παραδοσιακές μέθοδοι ήταν η Γραμμική Παλινδρόμηση (Linear Regression) και οι επεκτάσεις της στις περιπτώσεις που οι είσοδοι ήταν παραπάνω από μία.

Τα τελευταία χρόνια έχει αναπτυχθεί μια ολόκληρη οικογένεια μεθόδων που μπορούν να αντιμετωπίσουν, μεταξύ άλλων, προβλήματα παλινδρόμησης γνωστή ως τεχνολογία της *Μηχανικής Εκμάθησης – ΜΕ (Machine Learning – ML)* και ειδικότερα των *Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων – ΤΝΔ (Artificial Neural Networks – ANNs)*.

Η τεχνολογία της ΜΕ έχει εφαρμοστεί επιτυχώς σε πολλά προβλήματα της Μηχανικής Πετρελαίων, συμπεριλαμβανόμενου και αυτό της πρόβλεψης της ογκομετρικής συμπεριφοράς των ρευστών. Η ΜΕ εστιάζει στη χρήση αλγορίθμων που έχουν σκοπό την εξαγωγή μοτίβων (πρότυπων) και συσχετίσεων ανάμεσα σε πληθώρα δεδομένων, που θα ήταν αδύνατον να παρατηρηθούν με απλή ανθρώπινη μελέτη. Στη συνέχεια, αξιοποιώντας την πληροφορία που προέκυψε από τα υφιστάμενα δεδομένα, οι αλγόριθμοι προσαρμόζονται και δημιουργούν μαθηματικά μοντέλα τα οποία προβλέπουν με ακρίβεια τη συμπεριφορά μελλοντικών δεδομένων.

Η Ανάλυση παλινδρόμησης μαθηματικοποιεί τα μοτίβα που εξήχθησαν, καθορίζοντας τη σχέση μεταξύ των εξαρτημένων και των ανεξάρτητων μεταβλητών που απαρτίζουν τα δεδομένα. Τέλος, όλα τα παραπάνω υλοποιούνται με τη βοήθεια ενός Τεχνητού Νευρωνικού Δικτύου. Στην περίπτωση της ΥΑΡ ως ανεξάρτητες μεταβλητές (είσοδοι) του ΤΝΔ θεωρούνται η πετρελαϊκή σύσταση που προκύπτει από το εργαλείο ΥΑΡ, ενώ ως ανεξάρτητες μεταβλητές (έξοδοι) οι ζητούμενες ογκομετρικές πετρελαϊκές ιδιότητες.

1.5. Αντικείμενο της παρούσας εργασίας

Κύριο αντικείμενο της παρούσας εργασίας αποτελεί η υλοποίηση ΤΝΔ με σκοπό την πρόβλεψη των βασικότερων ογκομετρικών ιδιοτήτων των πετρελαϊκών ρευστών B_o , R_s , p_b , έχοντας ως δεδομένα την πετρελαϊκή σύσταση, όπως αυτή εκτιμάται από ένα εργαλείο

ΥΑΡ. Χρησιμοποιήθηκε μια βάση δεδομένων που περιείχε 490 ρευστά όλων των τύπων, από μαύρα πετρέλαια μέχρι πετρέλαια υψηλής πτητικότητας.

Αρχικά, πραγματοποιήθηκε στατιστική ανάλυση της βάσης δεδομένων που αξιοποιήθηκε για την εκπόνηση της παρούσας εργασίας. Ελέγχτηκαν όλα τα στατιστικά στοιχεία (εύρος τιμών, κατανομή κ.α.) που τεκμηριώνουν πως πρόκειται για έναν αξιόλογο πληθυσμό δεδομένων που δύναται να χρησιμοποιηθεί για τους σκοπούς της εργασίας και αναμένεται να αποδώσει αξιόπιστα αποτελέσματα.

Έπειτα, υλοποιήθηκαν τα ΤΝΔ που απαιτούσε η εργασία, στο περιβάλλον της διαδικτυακής πλατφόρμας της Microsoft, το Azure. Παρατίθεται αναλυτικά η διαδικασία υλοποίησης των δικτύων, καθώς και οι επιδόσεις που επιτεύχθηκαν.

Στη συνέχεια, υλοποιήθηκαν οι πλέον συνήθεις μαθηματικές συσχετίσεις του ΜΜΠ που χρησιμοποιούνται τακτικά και σε παγκόσμια κλίμακα για την πρόβλεψη των ΡVΤ ιδιοτήτων. Οι σχέσεις αυτές εφαρμόστηκαν σε όλα τα ρευστά της βάσης δεδομένων προκειμένου να εκτιμηθεί κατά ποσό αυτές μπορούν να παρέχουν ακριβείς προβλέψεις.

Τέλος, πραγματοποιήθηκε η σύγκριση των επιδόσεων μεταξύ των παλαιότερων μεθόδων πρόβλεψης των ογκομετρικών ιδιοτήτων πετρελαϊκών ρευστών με χρήση μαθηματικών συσχετίσεων και των νέων μεθόδων εκτίμησης με χρήση της ΥΑΡ και των ΤΝΔ. Στη σύγκριση λήφθηκε υπόψιν η διαφορά στην «ποιότητα» των διαθέσιμων εισόδων των υπολογιστικών μοντέλων, καθώς στη μεν πρώτη περίπτωση είσοδος ήταν η ομαδοποιημένη σύσταση του πετρελαίου (CO₂, C₁, C₂, C₃₋₅, C₆₊), ενώ στη δεύτερη δεδομένα που συλλέχτηκαν στην επιφάνεια. Εξήχθησαν συμπεράσματα για το κατά ποσό οι νέες μέθοδοι εμφανίζουν ικανοποιητικά ακριβέστερη συμπεριφορά ώστε να προτιμώνται από τις παλαιότερες.

1.6. Περιεχόμενα

Στα επόμενα κεφάλαια αναλύονται τα επιμέρους στοιχεία γνώσης που απαιτούνται για την κατανόηση του αντικειμένου της παρούσας εργασίας και στη συνέχεια παρατίθενται η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε, τα αποτελέσματα που λήφθηκαν και η αξιολόγησή τους.

Στο Κεφάλαιο 2 δίνεται μια αναλυτική περιγραφή των ιδιοτήτων ΡVΤ, η χρησιμότητά τους και οι μέθοδοι προσδιορισμού τους, τόσο με χρήση εργαστηριακών μεθόδων όσο και υπολογιστικών όπως οι συσχετίσεις που βασίζονται στο Μοντέλο Μαύρου Πετρελαίου.

Στο Κεφάλαιο 3 δίνονται οι αρχές λειτουργίας του εργαλείου ΥΑΡ, ο τρόπος εφαρμογής του και τα αποτελέσματα που αυτό μπορεί να δώσει για το ρευστό της γεώτρησης στην οποία εισέρχεται.

Στο Κεφάλαιο 4 περιγράφεται αναλυτικά η Ανάλυση Παλινδρόμησης, οι μέθοδοι που ανήκουν σε αυτή την κατηγορία, καθώς και μεθοδολογία με την οποία εφαρμόζεται στην τεχνολογία των ΤΝΔ.

Στο Κεφάλαιο 5 πραγματοποιείται η στατιστική ανάλυση της βάσης δεδομένων, ώστε επαληθευτεί πως τα στοιχεία που περιέχει είναι κατάλληλα να εισαχθούν στα ΤΝΔ της εργασίας και να αποδώσουν ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Στο Κεφάλαιο 6 περιγράφεται η διαδικασία της υλοποίησης των ΤΝΔ, τα αποτελέσματα που επιτεύχθηκαν, καθώς και τα αντίστοιχα αποτελέσματα των μαθηματικών συσχετίσεων

Στο Κεφάλαιο 7 διενεργείται μια αντιπαραβολή των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από το ΤΝΔ και τις συσχετίσεις, ώστε να προκύψει ένα γενικό συμπέρασμα για τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της κάθε μεθόδου και αν τελικά οι πετρελαϊκές εταιρείες έχουν βάσιμους λόγους να επενδύσουν σε αυτές τις νέες τεχνολογίες.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. Ιδιότητες Πετρελαίου και Συσχετίσεις Ογκομετρικής Συμπεριφοράς

2.1. Η προσέγγιση του Μοντέλου Μαύρου Πετρελαίου

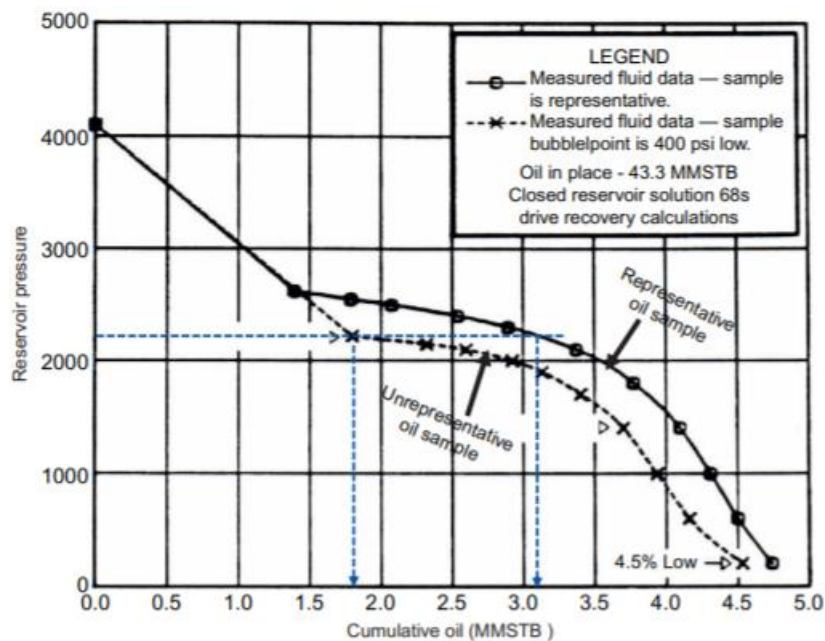
2.1.1. Βασικές αρχές

Από τις πρώτες ήδη προσπάθειες στην εκμετάλλευση υδρογονανθράκων, οι Μηχανικοί αναζητούσαν εργαλεία και μεθόδους που να τους επιτρέπουν την πρόβλεψη της ογκομετρικής συμπεριφοράς και της ισορροπίας φάσεων των πετρελαϊκών ρευστών ενός ταμειυτήρα. Βασικές προσεγγίσεις πρόβλεψης που χρησιμοποιούνται σήμερα είναι το Μοντέλο Μαύρου Πετρελαίου (ΜΜΠ) - Black Oil Model (ΜΟΒ) και το Μοντέλο Καταστατικών Εξισώσεων (ΜΚΕ) - Equation of State Model (ΕοS).

Το ΜΚΕ, βασίζεται στη χρήση καταστατικών εξισώσεων (π.χ. Peng–Robinson), για την περιγραφή της ογκομετρικής συμπεριφοράς και της ισορροπίας φάσεων ενός πετρελαϊκού ρευστού, οι οποίες απαιτούν τη γνώση της σύστασής του, ενώ οι φάσεις στις οποίες βρίσκεται (υγρή, αέρια) δεν εξαρτώνται μόνο από τη θερμοκρασία και την πίεση αλλά και από τη σύσταση του ρευστού. Είναι σαφές ότι η δόμηση ενός τέτοιου μοντέλου είναι πολύ πιο πολύπλοκη αλλά απαραίτητη ειδικά σε περιπτώσεις όπως η εισπίεση CO₂ σε ταμειυτήρες και σε μεθόδους επαύξησης απόληψης πετρελαίου. Δεν είναι όμως άμεσα σχετικό με το αντικείμενο της εργασίας και δεν θα αναλυθεί περαιτέρω.

Η προσέγγιση του ΜΜΠ θεωρεί πως σε οποιοσδήποτε συνθήκες το ρευστό αποτελείται από δύο μόνο «συστατικά», το σταθεροποιημένο πετρέλαιο (Stock-Tank Oil) και το σταθεροποιημένο αέριο (Stock-Tank Gas) όπου κάθε «συστατικό» αποτελεί ουσιαστικά ένα πολυσυστατικό μείγμα.. Η βασική υπόθεση που γίνεται στο μοντέλο αυτό είναι ότι το σύνολο της σύστασης του πετρελαϊκού ρευστού θα παραμείνει σταθερό κατά τη διάρκεια της εκμετάλλευσης και πως η περιγραφή της θερμοδυναμικής του συστήματος εξαρτάται μόνο από, την πίεση και τη θερμοκρασία με τον όγκο να αποτελεί συνάρτηση των προηγούμενων δύο (Pressure – Volume – Temperature - PVT), χωρίς την ανάγκη γνώσης των επί μέρους συστατικών και της ακριβούς σύστασής του. Το ΜΜΠ έχει τη δυνατότητα να περιγράψει την ισορροπία φάσεων του ρευστού κατά τη μεταβολή της πίεσης και της θερμοκρασίας παρέχοντας πληροφορίες για ιδιότητες όπως το B_o, το R_s και το σημείο φυσαλίδας p_b (bubblepoint), το οποίο αφορά στην πίεση (στη συγκεκριμένη περίπτωση

του ταμιευτήρα) κάτω από την οποία, το αέριο που βρίσκεται διαλυμένο μέσα στο πετρέλαιο, εκλύεται και σχηματίζει την δική του ελεύθερη φάση μέσα στον ταμιευτήρα. Η ανάγκη για την όσο δύναται μεγαλύτερη ακρίβεια στην προσέγγιση αυτού του σημείου είναι επιτακτική, καθώς οι υπολογισμοί που αφορούν την απόληψη πετρελαίου μπορεί να έχουν μεγάλη απόκλιση από τους πραγματικούς. Στο Διάγραμμα 2.1 παρουσιάζονται οι υπολογισμοί με τη χρήση ισοζυγίων μάζας για την πρόβλεψη της αθροιστικής απόληξης πετρελαίου, όπου φαίνεται η διαφορά στην πίεση φυσαλίδας που προκύπτει από τη χρήση ενός αντιπροσωπευτικού και ενός μη αντιπροσωπευτικού δείγματος ρευστού από τον ταμιευτήρα σε πειραματικές αναλύσεις.



Διάγραμμα 2.1: Διαφορά καμπυλών απόληξης πετρελαίου βάση αντιπροσωπευτικού και μη αντιπροσωπευτικού σημείου φυσαλίδας (Ahmed, 2016)

Η χρήση του ΜΠΠ δίνει τη δυνατότητα να προσδιοριστούν οι ογκομετρικές ιδιότητες του πετρελαίου, όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.1, για οποιαδήποτε πίεση και θερμοκρασία απαιτηθεί.

p (psi)	T (F)	B _o (vol/vol)	R _s (vol/vol)	ρ (g/cc)	μ (cp)
3000	226	1.694	823	0.659	0.30
2500	226	1.637	691	0.666	0.35
2000	226	1.584	577	0.674	0.41
1500	226	1.536	482	0.684	0.47
1000	226	1.466	352	0.699	0.54
500	226	1.352	202	0.734	0.75
14.7	226	1.109	0	0.802	1.56

Πίνακας 2.1: Πίνακας προσέγγισης του ΜΜΠ (Γαγάνης, 2021)

Το ΜΜΠ βρίσκει εφαρμογή στη συντριπτική πλειονότητα των προσομοιώσεων που πραγματοποιούνται σε ταμειυτήρες και γεωτρήσεις. Αποτελεί απλούστερη προσέγγιση σε σύγκριση με το ΜΚΕ και είναι αποτελεσματική με πολύ λιγότερα δεδομένα, αφού δεν απαιτείται γνώση της σύστασης του ρευστού όπως προαναφέρθηκε. Παρ' όλα αυτά, η ακρίβεια του ΜΜΠ περιορίζεται σε βαριά πετρέλαια καθώς όσο ανεβαίνει η πτητικότητα του τόσο μειώνεται η ακρίβεια. Για το λόγο αυτό υπάρχει και η τροποποιημένη προσέγγιση του ΜΜΠ – μέθοδος Τροποποιημένου Πίνακα Μαύρου Πετρελαίου (Modified Black Oil Table method) – που μπορεί να εφαρμοστεί στις περιπτώσεις αέριων συμπυκνωμάτων, χωρίς βέβαια να επιτυγχάνεται η ακρίβεια που θα είχε η εφαρμογή του μοντέλου ΜΚΕ.

2.1.2. Χρήση συσχετίσεων στο ΜΜΠ

Συχνά τα εργαστηριακά PVT δεδομένα, δεν είναι διαθέσιμα και δεν αρκούν για τους απαιτούμενους υπολογισμούς. Ταυτόχρονα, στα πρώιμα στάδια της εκμετάλλευσης συχνά δεν έχει γίνει ακόμα δειγματοληψία και PVT ανάλυση των ρευστών του ταμειυτήρα. Επίσης, τα αποτελέσματα των εργαστηριακών αναλύσεων συνήθως είναι περιορισμένα (εφόσον τα πειράματα πραγματοποιούνται σε περιορισμένο εύρος πιέσεων και θερμοκρασιών). Σε συνδυασμό με το μεγάλο κόστος των πειραμάτων αυτών και τις δυσκολίες αποστολής του δείγματος από το πεδίο στο εργαστήριο καθιστούν, σε αρκετές περιπτώσεις, τη συλλογή δεδομένων από μετρήσεις που πραγματοποιούνται στην επιφάνεια και τον υπολογιστικό προσδιορισμό των PVT ιδιοτήτων βάσει αυτών, μια πιο γρήγορη λύση.

Στην παραπάνω ιδέα βασίζεται η χρήση συσχετίσεων σε συνδυασμό με το ΜΜΠ για την εκτίμηση των ογκομετρικών ιδιοτήτων των πετρελαϊκών ρευστών. Η βασική θεώρηση του ΜΜΠ ότι το ρευστό σε οποιοσδήποτε συνθήκες αποτελεί μείγμα του πετρελαίου και του αερίου τανκ σε συγκεκριμένη αναλογία, οδήγησε στην ιδέα ανάπτυξης μαθηματικών εξισώσεων (συσχετίσεων). Οι συσχετίσεις μπορούν να δώσουν εκτιμήσεις σύνθετων ογκομετρικών ιδιοτήτων (όπως το B_o και το ρ_b), χρησιμοποιώντας απλές ιδιότητες των δύο αυτών «ψευδοστατικών» οι οποίες μπορούν μετρηθούν στο πεδίο.

Τα απαιτούμενα δεδομένα πεδίου είναι πολύ εύκολο να συλλεχθούν στην επιφάνεια και αφορούν τρεις ιδιότητες των πετρελαϊκών ρευστών. Πρόκειται για την πυκνότητα API του σταθεροποιημένου πετρελαίου, την πυκνότητα του αερίου σε κανονικές συνθήκες και τη διαλυτότητα του αερίου στο πετρέλαιο (R_s), οι οποίες θα αναλυθούν στη συνέχεια του κεφαλαίου αυτού. Μετρώντας αυτές τις ιδιότητες στο πεδίο και με τη χρήση μαθηματικών συσχετίσεων (correlations) διαφόρων συγγραφέων, μαθηματικών εκφράσεων που συσχετίζουν τις τρεις αυτές ιδιότητες μεταξύ τους, καθίσταται δυνατή η εκτίμηση και όλων των υπολοίπων ογκομετρικών ιδιοτήτων των πετρελαϊκών ρευστών για οποιαδήποτε πίεση και θερμοκρασία.

Η ευκολία στη συλλογή των δεδομένων, αλλά και στην υπολογιστική χρήση τους, συνοδεύεται με αναπόφευκτη μείωση στην ακρίβεια των υπολογισμών. Για το λόγο αυτό, δίνεται η δυνατότητα, εάν υπάρχουν διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα, να προσαρμοστούν τα αποτελέσματα αυτής της μεθόδου βάση των εργαστηριακών. Χωρίς προσαρμογή, η χρήση των συσχετίσεων των συσχετίσεων είναι σε θέση να υπολογίσει με σχετική ακρίβεια ιδιότητες πετρελαίων μέτριας πτητικότητας, ενώ χωρίς προσαρμογή στα εργαστηριακά δεδομένα, μόνο χαμηλής πτητικότητας.

Στη συνέχεια του κεφαλαίου αυτού θα παρουσιαστούν αναλυτικά οι ογκομετρικές ιδιότητες των πετρελαϊκών ρευστών καθώς και οι αντίστοιχες συσχετίσεις που έχουν προταθεί στο παρελθόν για τον υπολογισμό τους από τους πλέον αναγνωρισμένους συγγραφείς.

2.1.3. Πειραματικά PVT δεδομένα

Πριν την εισαγωγή των υπολογιστικών μοντέλων ΜΜΠ και ΜΚΕ στη Μηχανική Πετρελαίων, η γνώση της ογκομετρικής συμπεριφοράς μπορούσε να επιτευχθεί αποκλειστικά με συλλογή πειραματικών PVTδεδομένων που να περιγράφουν την

ογκομετρική συμπεριφορά των ρευστών και της ισορροπίας φάσεων μέσα στον ταμιευτήρα.

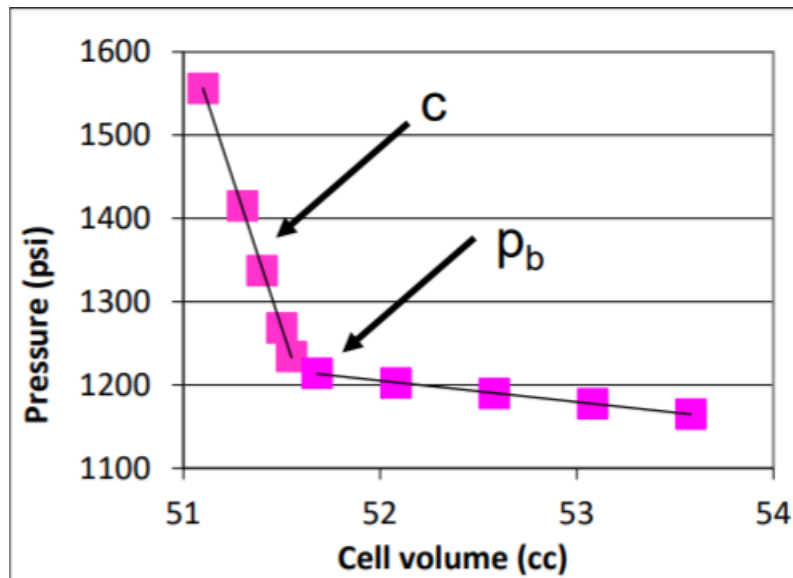
Σήμερα, το ΜΜΠ μπορεί να δώσει υπολογιστικές εκτιμήσεις της ογκομετρικής συμπεριφοράς χρησιμοποιώντας απλές επιφανειακές μετρήσεις. Ωστόσο, όπως θα διευκρινιστεί στη συνέχεια, η συλλογή πειραματικών PVT δεδομένων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη βελτίωση της ακρίβειας του ΜΜΠ. Ταυτόχρονα, το ΜΚΕ απαιτεί την ύπαρξη πειραματικών μετρήσεων προκειμένου να «ρυθμιστεί» έναντι αυτών. Κατά συνέπεια, ανεξάρτητα από την επιλεγμένη μέθοδο περιγραφής της ογκομετρικής συμπεριφοράς, η εκτίμηση μερικών, έστω, τιμών PVT από μια σειρά εργαστηριακών πειραμάτων αποτελούν αναγκαιότητα ώστε αυτές είτε να χρησιμοποιηθούν άμεσα, είτε να τροφοδοτηθούν στη συνέχεια σε κάποιο υπολογιστικό μοντέλο.

Τα PVT πειράματα πραγματοποιούνται σε ένα πειραματικό κελί (PVT cell) που είναι σχεδιασμένο με τέτοιο τρόπο ώστε να μελετά την ογκομετρική συμπεριφορά και την ισορροπία φάσεων του ρευστού σε διάφορες συνθήκες αλλά προσδιορίζοντας διάφορες ιδιότητες των πετρελαϊκών ρευστών. Για τα πετρέλαια, οι πραγματοποιούμενες μελέτες είναι η ισοθερμοκρασιακή εκτόνωση υπό σταθερή σύσταση (Constant Composition Expansion CCE) και η διαφορική εκτόνωση (Differential Vaporization), γνωστή και ως διαφορική απελευθέρωση αερίου (Differential Liberation)

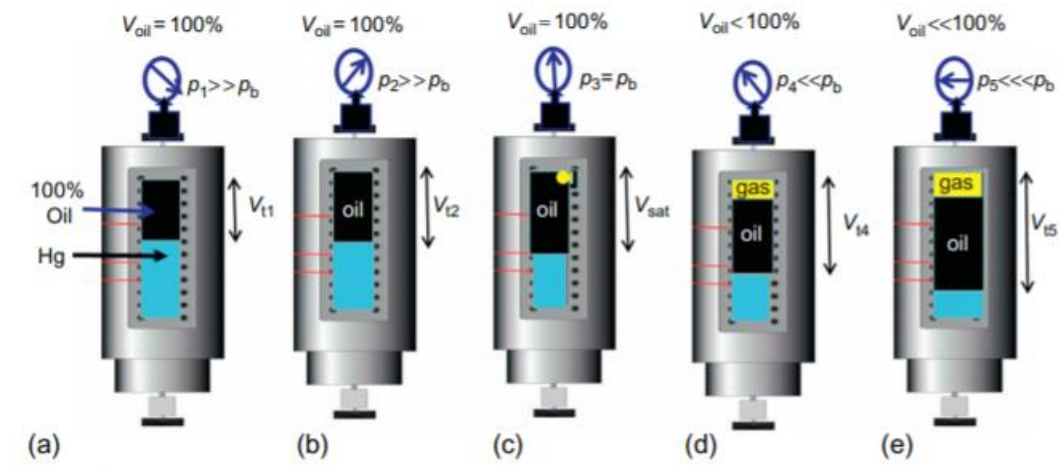
Πείραμα CCE

Στην ισοθερμοκρασιακή εκτόνωση, το κελί καταρχάς θερμαίνεται σε θερμοκρασία ταμιευτήρα και το ρευστό εισάγεται στο κελί και συμπιέζεται σε μια πίεση πολύ υψηλότερη του σημείου φυσαλίδας, ώστε να διασφαλιστεί ότι το πείραμα ξεκινάει με το ρευστό να είναι μονοφασικό (υγρή φάση). Σε κάθε βήμα μείωσης της πίεσης καταγράφεται ο όγκος που το ρευστό καταλαμβάνει στο πειραματικό κελί και καθώς αυτή μειώνεται σταδιακά, κάποια στιγμή φτάνει στην πίεση του σημείου φυσαλίδας p_b όπου αέριο πρωτοεμφανίζεται με τη μορφή φυσαλίδας και παρατηρείται σταδιακά σημαντική αύξηση της συμπιεστότητας c του συστήματος λόγω της ύπαρξης του αερίου (Διάγραμμα 2.2). Εξαιτίας της απότομης αλλαγής της συμπιεστότητας που παρατηρείται, γίνεται δυνατός ο προσδιορισμός του σημείου φυσαλίδας από τη γραφική επεξεργασία των μετρήσεων, καθώς σε πολλές περιπτώσεις το κελί δεν είναι διαφανές, ώστε να είναι διακριτές οι φάσεις αερίου-υγρού. Το πείραμα συνεχίζεται μέχρι το ρευστό να εκτονωθεί και να καταλάβει τον μέγιστο διαθέσιμο όγκο του κελιού. Η σύσταση του ρευστού

παραμένει σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος, αφού δεν υπάρχει απομάκρυνση αερίου από το κελί. Εκτός από τον υπολογισμό του σημείου φυσαλίδας, το πείραμα CCE χρησιμοποιείται επίσης για να δώσει εκτίμηση της συμπίεστικότητας πάνω από το σημείο φυσαλίδας, καθώς αυτή η συμπίεστικότητα σχετίζεται με την κλίση της καμπύλης p-V. Στο Διάγραμμα 2.2 απεικονίζεται σχηματικά η καμπύλη p-V που λαμβάνεται συνήθως από ένα πείραμα CCE ενώ στην Εικόνα 2.1 παρουσιάζονται τα στάδια του πειράματος CCE.



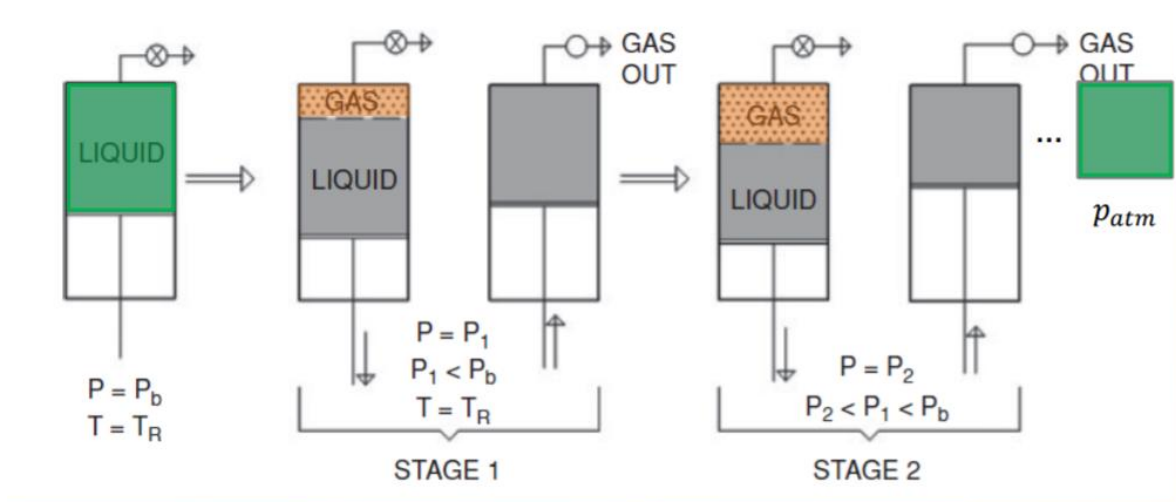
Διάγραμμα 2.2: Διάγραμμα πίεσης - όγκου κατά την πειραματική διαδικασία της ισοθερμοκρασιακής εκτόνωσης υπό σταθερή πίεση (CCE). (Γαγάνης, 2021)



Εικόνα 2.1: Τα στάδια του CCE (Ahmed, 2016)

Πείραμα DV

Όπως και στο προηγούμενο πείραμα, έτσι και στη διαφορική εκτόνωση το δείγμα εισάγεται στο κελί και συμπιέζεται σε πίεση ίση με την πίεση του σημείου φυσαλίδας. Το κελί θερμαίνεται σε θερμοκρασία ταμιευτήρα. Σε κάθε επόμενο βήμα η πίεση μειώνεται, όλο το αέριο που απελευθερώνεται απομακρύνεται από το πειραματικό κελί υπό σταθερή πίεση και εκτονώνεται σε πρότυπες συνθήκες, όπου μετράται ο όγκος του και ο όγκος του πετρελαίου που παρέμεινε στο κελί. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται μέχρι να απελευθερωθεί όλο το αέριο που υπήρχε διαλυμένο μέσα στο πετρέλαιο. Η ποσότητα του πετρελαίου που απομένει στο κελί σε ατμοσφαιρική πίεση και θερμοκρασία ταμιευτήρα ονομάζεται εναπομείναν πετρέλαιο (residual oil). Τέλος, μετράται ο όγκος που προκύπτει από την ψύξη του εναπομείναντος πετρελαίου στους 60°F. Τα βήματα του πειράματος παρουσιάζονται στην Εικόνα 2.2.



Εικόνα 2.2: Τα στάδια της δοκιμής DV (Γαγάνης, 2021)

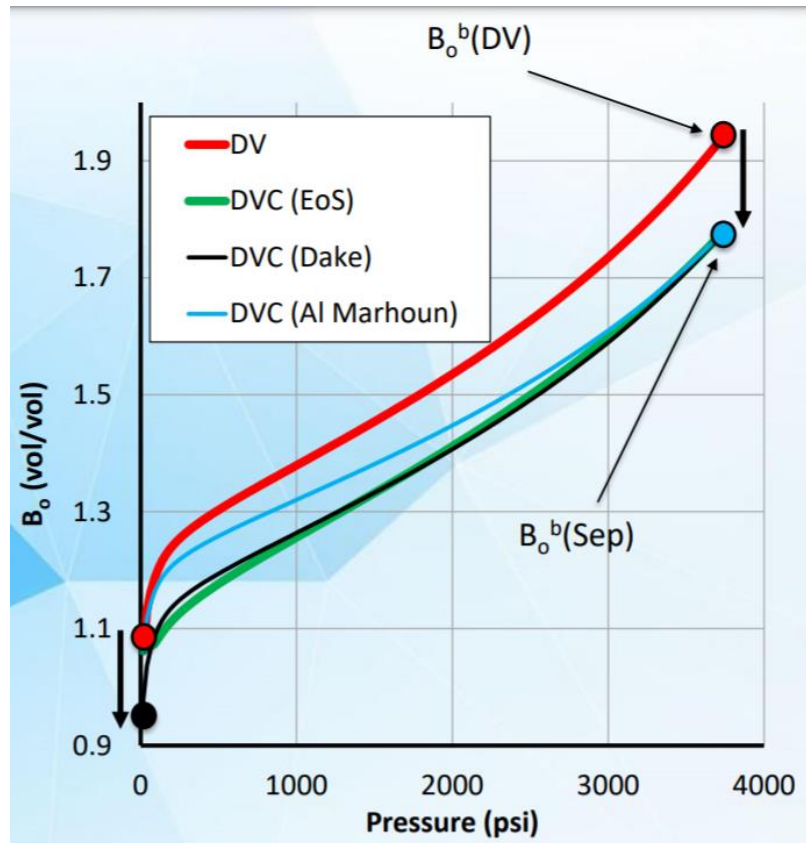
Με τον συνδυασμό των παραπάνω πειραμάτων καθίσταται δυνατό να υπολογιστούν οι βασικές ογκομετρικές παράμετροι των πετρελαϊκών ρευστών όπως, ο λόγος του διαλυμένου αερίου προς το πετρέλαιο R_s , ο συντελεστής μεταβολής όγκου του πετρελαίου B_o και η πυκνότητα.

2.1.4. Διόρθωση εργαστηριακών PVT δεδομένων ως προς το σύστημα διαχωρισμού

Ένα σημαντικό πρόβλημα και με τα δυο πειράματα είναι πως δεν λαμβάνουν υπόψιν τις διαφορετικές πιέσεις και θερμοκρασίες που επικρατούν στο σύστημα διαχωρισμού των παραγόμενων ρευστών στην επιφάνεια και κατά συνέπεια αγνοείται η επίδραση αυτού του συστήματος στις τιμές των B_o , R_s κτλ. Αυτό επηρεάζει κατά πολύ τον τρόπο με τον οποίο

το ρευστό εκτονώνεται σε συνθήκες επιφάνειας (flash) σε κάθε βήμα της πειραματικής διαδικασίας. Για το λόγο αυτό, τα αποτελέσματα των πειραμάτων, πριν χρησιμοποιηθούν για υπολογισμούς, πρέπει να διορθωθούν ώστε να ανταποκρίνονται στις συνθήκες επιφανειακού συστήματος διαχωρισμού της εκμετάλλευσης.

Για την περίπτωση της διαφορικής εκτόνωσης (DV), μια λύση θα ήταν η τροποποίηση της κλασικής πειραματικής διαδικασίας έτσι ώστε το πετρέλαιο που δημιουργείται σε κάθε βήμα της μελέτης DV να εκτονώνεται σε συνθήκες διαχωριστή επιφάνειας (πίεση και θερμοκρασία), ίδιες με αυτές του πραγματικού διαχωριστή στο πεδίο. Κάτι τέτοιο θα επηρέαζε σημαντικά τον όγκο του εναπομείναντος πετρελαίου σε κανονικές συνθήκες V_o^{sc} και κατά συνέπεια το R_s και το B_o του ρευστού, αφού όπως θα αναλυθεί στη συνέχεια του κεφαλαίου, ο όρος V_o^{sc} αποτελεί τον παρονομαστή στο κλάσμα υπολογισμού του B_o και R_s . Το πείραμα αυτό ονομάζεται σύνθετη διαφορική εκτόνωση (DVC) και η υλοποίησή του αποφεύγεται καθώς είναι εξαιρετικά χρονοβόρο και κοστοβόρο για τα εργαστήρια ανάλυσης ρευστών. Ένας δεύτερος τρόπος για να προσαρμοστούν τα δεδομένα στις συνθήκες του επιφανειακού συστήματος διαχωρισμού είναι η μέθοδος του Dake η οποία προσπαθεί με υπολογιστικό τρόπο να εκτιμήσει τα αποτελέσματα της μελέτης DVC βάσει αυτών της μελέτης DV. Με βάση αυτή τη μέθοδο, οι καμπύλες των ιδιοτήτων B_o και R_s της διαφορικής εκτόνωσης προσαρμόζονται έτσι ώστε οι τιμές τους στο σημείο φυσαλίδας να ταυτίζονται με αυτές που προέκυψαν από απευθείας εκτόνωση στην ατμόσφαιρα από το σημείο φυσαλίδας μέσω του επιφανειακού συστήματος διαχωρισμού (Sep). Όπως φαίνεται και στο Διάγραμμα 2.3, οι εκτιμήσεις με χρήση των PVT ιδιοτήτων αυτής της μεθόδου σχεδόν αγγίζουν την πραγματική DVC καμπύλη, όπως αυτή υπολογίζεται από το ΜΚΕ (DVC EoS). Όμως για πολύ χαμηλές πιέσεις, η μέθοδος του Dake μπορεί να οδηγήσει σε μη ρεαλιστικές τιμές και σε αυτό το εύρος χαμηλών πιέσεων χρησιμοποιείται η μέθοδος του Al Marhoun. Για περιπτώσεις που αφορούν πιο ελαφριά και πτητικά πετρέλαια η συγκεκριμένη μέθοδος εμφανίζει πολύ μεγάλη απόκλιση και αυτό αποτελεί μια ακόμα ένδειξη πως η προσέγγιση του ΜΜΠ δεν ανταποκρίνεται με ακρίβεια στα πολύ πτητικά πετρέλαια.



Διάγραμμα 2.3: Σύγκριση καμπύλης B_o (Συντελεστή μεταβολής όγκου πετρελαίου) DV με τις καμπύλες που προσομοιάζουν το πείραμα DVC (Γαγάνης, 2021)

2.2. Επιφανειακές μετρήσεις του ΜΜΠ

2.2.1. Πυκνότητα πετρελαίου τανκ (API)

Ως πυκνότητα του αργού πετρελαίου ορίζεται η μάζα του αργού πετρελαίου προς μια μονάδα του όγκου του σε συγκεκριμένη πίεση και θερμοκρασία και συνήθως μετριέται σε λίβρες ανά κυβικό πόδι (pounds per cubic foot).

Η ειδική πυκνότητα του αργού πετρελαίου ορίζεται ως ο λόγος της πυκνότητας του πετρελαίου προς την πυκνότητα του νερού όταν και οι δυο μετριοούνται σε 60 °F και σε ατμοσφαιρική πίεση:

$$\gamma_o = \frac{\rho_o}{\rho_w} \quad (2.1)$$

όπου

γ_o = ειδική πυκνότητα πετρελαίου

ρ_o = πυκνότητα αργού πετρελαίου σε lb/cf

ρ_w = πυκνότητα του νερού σε lb/cf

Οφείλεται να σημειωθεί ότι η ειδική πυκνότητα του ρευστού είναι αδιάστατη αλλά συνήθως της δίνεται η ένδειξη 60°/60° για να γίνει αντιληπτό ότι πρόκειται για μετρήσεις σε κανονικές συνθήκες – standard conditions (SC). Η πυκνότητα του νερού σε κανονικές είναι περίπου 62.4 lb/cf.

Παρόλο που η ειδική πυκνότητα πετρελαίου χρησιμοποιείται συχνά στην πετρελαϊκή βιομηχανία, η πιο κοινή έκφραση για την πυκνότητα του πετρελαίου είναι η πυκνότητα API (American Petroleum Institute). Πρόκειται για μια αντίστροφη κλίμακα που ξεκινά από την τιμή 10 για τα πολύ βαριά πετρέλαια και αυξάνει για τα πτητικά σε τιμές 60-70.

Η σχέση μεταξύ της πυκνότητας API και της ειδικής πυκνότητας γ_o είναι η ακόλουθη:

$$API = \frac{141.5}{\gamma_o} - 131.5 \quad (2.2)$$

και

$$\gamma_o = \frac{141.5}{API + 131.5}$$

2.2.2. Ειδική πυκνότητα αερίου (γ_g)

Η ειδική πυκνότητα (γ_g) ενός αερίου ορίζεται ως ο λόγος της πυκνότητας του αερίου προς την πυκνότητα του ξηρού αέρα ($\rho_{air} = 0.07634 \text{ lb/cf}$) στις ίδιες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας και μαθηματικά εκφράζεται ως:

$$\gamma_g = \frac{\rho_g}{\rho_{air}} = \frac{m_g/V_g}{m_{air}/V_{air}} = \frac{n_g MW_g/V_g}{n_{air} MW_{air}/V_{air}} \quad (2.3)$$

Η ειδική πυκνότητα του συνολικού αερίου που παράγεται στην επιφάνεια γ_g δύναται να περιγράψει και ως ο σταθμισμένος μέσος όρος των ειδικών πυκνοτήτων του διαχωρισμένου αερίου από κάθε σύστημα διαχωρισμού στην επιφάνεια, που αποτελείται από διάφορους διαχωριστές και τανκ). Αυτή η προσέγγιση του σταθμισμένου μέσου όρου βασίζεται στο GOR που προκύπτει από τα διαφορά συστήματα διαχωρισμού στην επιφάνεια:

$$\gamma_g = \frac{\sum_{i=1}^n (R_{sep})_i (\gamma_{sep})_i + R_{st} \gamma_{st}}{\sum_{i=1}^n (R_{sep})_i + R_{st}} \quad (2.4)$$

όπου

n = αριθμός διαχωριστών,

R_{sep} = το GOR του εκάστοτε διαχωριστή σε scf/stb

γ_{sep} = ειδική πυκνότητα αερίου που προκύπτει από το κάθε σύστημα διαχωρισμού στην επιφάνεια

R_{st} = GOR για το σταθεροποιημένο (stock-tank) πετρέλαιο

γ_{st} = ειδική πυκνότητα stock-tank gas

2.3. Συσχετίσεις ΜΜΠ για την πρόβλεψη ογκομετρικών ιδιοτήτων σε πιέσεις κάτω από το σημείο φυσαλίδας

2.3.1. Συντελεστής μεταβολής όγκου πετρελαίου (Oil Formation Volume Factor – FVF)

Ως συντελεστής μεταβολής όγκου πετρελαίου FVF ορίζεται ο όγκος σε βαρέλια (rb) που καταλαμβάνει μέσα σε ένα ταμιευτήρα συγκεκριμένης πίεσης και θερμοκρασίας, μια μονάδα όγκου stb πετρελαίου μαζί με το αέριο που είναι διαλυμένο μέσα σε αυτό.

$$B_o = \frac{V_{o(rc)}}{V_{o(sc)}} \quad (2.5)$$

όπου

B_o = FVF,

$V_{o(rc)}$ = όγκος πετρελαίου σε συνθήκες ταμιευτήρα (rc)

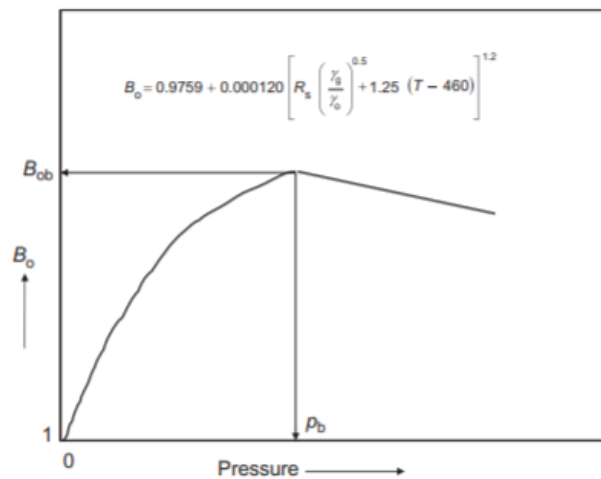
$V_{o(sc)}$ = όγκος πετρελαίου σε κανονικές συνθήκες (sc)

Το B_o είναι πάντα μεγαλύτερο της μονάδας επειδή το αέριο που είναι διαλυμένο στο πετρέλαιο αυξάνει τον όγκο του από τις κανονικές συνθήκες.

Για πιέσεις πάνω από p_b , το B_o αυξάνεται καθώς η πίεση μειώνεται. Αυτό συμβαίνει γιατί, όσο μειώνεται η πίεση τόσο αυξάνεται και ο όγκος του πετρελαίου λόγω της διόγκωσης του. Η τιμή του B_o συνεχίζει να αυξάνεται μέχρι το p_b όπου στο σημείο αυτό εμφανίζει και τη μέγιστη τιμή του (B_{ob}). Σε πιέσεις κάτω από το σημείο φυσαλίδας (κορεσμένος ταμιευτήρας), η τιμή του B_o μειώνεται καθώς το αέριο που είναι διαλυμένο μέσα στο πετρέλαιο απελευθερώνεται. Αυτό μπορεί να γίνει πιο κατανοητό παρατηρώντας το

Διάγραμμα 2.4 που σχεδιάστηκε χρησιμοποιώντας ως συνάρτηση μια από τις συσχετίσεις που θα αναφερθούν στη συνέχεια.

Τυπικές τιμές του B_o κυμαίνονται από λίγο πάνω από 1.0 rb/stb για τα πετρέλαια που δεν περιέχουν σχεδόν καθόλου αέριο μέχρι περίπου 3.0 για τα πολύ πτητικά πετρέλαια. Αυτό σημαίνει πως στην πρώτη περίπτωση οι όγκοι του πετρελαίου που αντλούνται είναι σχεδόν ισοδύναμοι με αυτούς που παράγονται, κάτι που διευκολύνει προφανώς τους ογκομετρικούς υπολογισμούς



Διάγραμμα 2.4: Καμπύλη B_o συναρτήσει της πίεσης (Ahmed, 2016)

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, το B_o σαν ογκομετρική παράμετρος πετρελαίου μπορεί να μετρηθεί σε PVT εργαστήρια. Όμως υπάρχουν και πολλές εμπειρικές σχέσεις απ' όπου μπορεί να υπολογιστεί. Οι περισσότερες από αυτές προσδιορίζουν το B_o συναρτήσει του R_s , της ειδικής πυκνότητας αερίου και πετρελαίου γ_g και γ_o αντίστοιχα και της θερμοκρασίας T .

Συσχέτιση του Standing

Η συσχέτιση του Standing για το B_o προήλθε μελετώντας 105 εργαστηριακά δεδομένα από 22 πετρελαϊκά συστήματα της Καλιφόρνια. Ο μαθηματικός τύπος που προέκυψε ήταν:

$$B_o = 0.9759 + 0.00012 \left[R_s \left(\frac{\gamma_g}{\gamma_o} \right)^{0.5} + 1.25(T - 460) \right]^{1.2} \quad (2.6)$$

όπου

T = θερμοκρασία σε °R,

γ_g = ειδική πυκνότητα αερίου

γ_o = ειδική πυκνότητα πετρελαίου °60/°60.

Το μέσο σχετικό σφάλμα που παρατηρήθηκε σε αυτή την μέθοδο ήταν 1.2%.

Συσχέτιση των Vasquez-Beggs

Οι Vasquez και Beggs ανέπτυξαν την δική τους συσχέτιση βασισμένοι σε 6,000 μετρήσεις B_o διαφόρων πιέσεων. Χρησιμοποιώντας ανάλυση παλινδρόμησης κατέληξαν στη μαθηματική έκφραση:

$$B_o = 1 + C_1 R_s + (T - 520) \left(\frac{API}{\gamma_{gs}} \right) [C_2 + C_3 R_s] \quad (2.7)$$

όπου

R_s = GOR,

T =θερμοκρασία σε °R

γ_{gs} =ειδική πυκνότητα αερίου στο διαχωριστή.

Όπως και στις υπόλοιπες συσχετίσεις των ίδιων συγγραφέων χρησιμοποιείται η εξίσωση

$$\gamma_{g_{100}} = \gamma_{gs} (1 + 5.912 \times 10^{-5}) API T_{sep} \log_{10} \left(\frac{p_{sep}}{114.7} \right)$$

για να αναγάγει την πυκνότητα αερίου σε πίεση διαχωριστή 100 psia και οι παράγοντες C_1 , C_2 , C_3 ανάλογα με την πυκνότητα API του πετρελαίου, αναγράφονται στον Πίνακα 2.2.

Coefficient	API ≤ 30	API > 30
C_1	4.677×10^{-4}	4.670×10^{-4}
C_2	1.751×10^{-5}	1.100×10^{-5}
C_3	-1.811×10^{-8}	1.337×10^{-9}

Πίνακας 2.2: Σταθερές για τη συσχέτιση του B_o των Vasquez-Beggs (Ahmed, 2016)

Το μέσο σχετικό σφάλμα της συσχέτισης ανέρχεται στο 4.7%

Συσχέτιση του Glaso

Ο Glaso πρότεινε τη δική του μαθηματική έκφραση για την εύρεση του B_o . Προέκυψε ύστερα από μελέτη 60 PVT δεδομένων από 45 δείγματα πετρελαίου. Η εξίσωση που κατέληξε ήταν η εξής:

$$B_o = 1 + 10^A \quad (2.8)$$

με

$$A = -6.58511 + 2.91329 \log B_{ob} - 0.27683 (\log B_{ob})^2 \quad (2.9)$$

και το B_{ob} να είναι παράγοντας συσχέτισης, ο οποίος ορίζεται ως

$$B_{ob} = R_s \left(\frac{\gamma_g}{\gamma_o} \right)^{0.526} + 0.968(T - 460) \quad (2.10)$$

όπου

T = θερμοκρασία σε °R,

γ_g, γ_o = ειδική πυκνότητα αερίου και ειδική πυκνότητα πετρελαίου °60/°60

B_{ob} = παράγοντας συσχέτισης

Το μέσο σχετικό σφάλμα της συσχέτισης υπολογίστηκε στο -0.43% με τυπική απόκλιση 2.18%.

Συσχέτιση του Al Marhoun

Ο Al Marhoun ανέπτυξε τη δική του συσχέτιση για τον καθορισμό του B_o ως συνάρτηση του R_s , της ειδικής πυκνότητας αερίου και πετρελαίου και της θερμοκρασίας. Ανέλυσε 160 δεδομένα από 69 ταμειυτήρες της Μέσης Ανατολής με τη μέθοδο της μη γραμμικής παλινδρόμησης και κατέληξε στην παρακάτω έκφραση,

$$B_o = 0.497069 + 0.000862963T + 0.00182594F + 0.00000318099F^2 \quad (2.11)$$

με την παράμετρο F να ορίζεται ως

$$F = R_s^a \gamma_g^b \gamma_o^c \quad (2.12)$$

όπου

T = η θερμοκρασία του συστήματος σε °R

και

οι παράγοντες a, b, c

a	0.742390
b	0.323294
c	-1.202040

Συσχέτιση των *Petrosky-Farshad*

Οι Petrosky και Farshad πρότειναν μια νέα συνάρτηση για την εκτίμηση του B_o παρόμοια με αυτή του Standing, προσθέτοντας όμως τρεις ακόμα παράγοντες για να βελτιώσουν την ακρίβεια της συσχέτισης. Χρησιμοποίησαν ένα μοντέλο μη γραμμικής παλινδρόμησης για να συγκρίνουν τα αποτελέσματα της μεθόδου τους με πειραματικά δεδομένα από πετρελαϊκά συστήματα του Κόλπου του Μεξικού (Gulf of Mexico, GOM). Η εξίσωση τους είχε την μορφή:

$$B_o = 1.0113 + 7.2046 \times 10^{-5} A \quad (2.13)$$

όπου

$$A = \left[R_s^{0.3738} \left(\frac{\gamma_g^{0.2914}}{\gamma_o^{0.6265}} \right) + 0.24626(T - 460)^{0.5371} \right]^{3.0936}$$

με

T = θερμοκρασία σε °R

γ_o = ειδική πυκνότητα πετρελαίου σε °60/°60

Ισοζύγιο μάζας

Από τον ορισμό του B_o όπως αυτός εκφράστηκε μαθηματικά, προέκυψε η παρακάτω έκφραση:

$$B_o = \frac{V_{o(rc)}}{V_{o(sc)}}$$

Ο όγκος του πετρελαίου σε συνθήκες ταμιευτήρα μπορεί να αντικατασταθεί από το συνολικό βάρος του πετρελαϊκού ρευστού διαιρεμένο με την πυκνότητα του πετρελαίου στις συνθήκες του ταμιευτήρα:

$$B_o = \frac{\frac{m_t}{\rho_o}}{V_{o(sc)}}$$

Το συνολικό βάρος του πετρελαϊκού ρευστού ισούται με το βάρος του σταθεροποιημένου πετρελαίου συν το βάρος του διαλυμένου αερίου:

$$B_o = \frac{m_o + \mu_g}{\rho_o V_{o(sc)}}$$

Με δεδομένο το R_s και την ειδική πυκνότητα του αερίου, το βάρος του αερίου υπολογίζεται ως:

$$m_g = \frac{R_s}{379.4} 28.96 \gamma_g$$

Το βάρος του πετρελαίου υπολογίζεται από την σχέση:

$$m_o = (5.615)(62.4) \gamma_o$$

Τελικά, από αντικατάσταση έχουμε:

$$B_o = \frac{(5.615)(62.4) \gamma_o + 0.0136 R_s \gamma_g}{\rho_o} \quad (2.14)$$

Η συσχέτιση του Standing και των Vazquez και Beggs υποδεικνύει ότι το B_o και το R_s εξαρτώνται σχεδόν γραμμικά το ένα με το άλλο. Αυτό το σενάριο είναι πολύ χρήσιμο για τον έλεγχο των αποτελεσμάτων PVT από το πείραμα της διαφορικής εκτόνωσης. Στη μελέτη των Sutton και Farshad εμφανίζεται πως η συσχέτιση του Glaso έχει μεγαλύτερη ακρίβεια από ότι του Standing και των Vazquez-Beggs. Φαίνεται επίσης πως, ύστερα από μελέτη πετρελαίων του Κόλπου, η συσχέτιση του Standing είναι προτιμότερο να χρησιμοποιείται για $B_{ob} < 1.4$ rb/stb ενώ του Glaso για $B_{ob} > 1.4$ rb/stb. Σε γενικές γραμμές η συσχέτιση του Glaso τείνει να υποεκτιμά την τιμή του B_o , σε σχέση με την πραγματική, ενώ των Vasquez-Beggs και Standing τείνει να την υπερεκτιμά.

2.3.2. Διαλυτότητα αερίου στο πετρέλαιο – Solution GOR (R_s)

Το πετρέλαιο στον ταμιευτήρα περιέχει διαλυμένο αέριο, το οποίο αποτελείται κυρίως από μεθάνιο και αιθάνιο, μικρότερες ποσότητες προπανίου, βουτανίου και πεντανίου και ποσότητες από ανόργανες ουσίες. Ο όγκος του διαλυμένου αερίου έχει σημαντικό αντίκτυπο στις ιδιότητες του πετρελαίου. Αυτό διαπιστώνεται και στις εμπειρικές συσχετίσεις, αφού οι περισσότερες εξαρτώνται από το R_s .

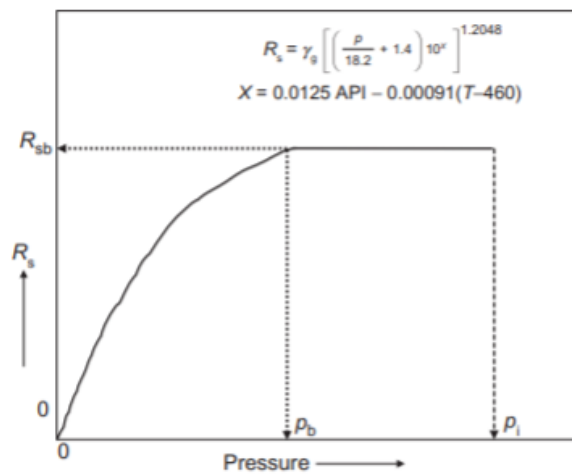
Όσο η πίεση του ταμιευτήρα είναι μεγαλύτερη από την πίεση του σημείου φυσαλίδας (ακόρεστος ταμιευτήρας) το GOR παραμένει σταθερό και ίσο με τη διαλυτότητα R_s για δεδομένη θερμοκρασία ταμιευτήρα, αφού ό,τι αέριο παράγεται στην επιφάνεια ήταν

εξαρχής διαλυμένο στο πετρέλαιο. Όταν όμως η πίεση του ταμιευτήρα πέσει κάτω από την πίεση του σημείου φυσαλίδας (κορεσμένος ταμιευτήρας), τότε προκύπτει ασυνέχεια στην ογκομετρική συμπεριφορά του συστήματος καθώς το αέριο που ήταν διαλυμένο μέσα στο πετρέλαιο απελευθερώνεται και σχηματίζει τη δική του φάση μέσα στον ταμιευτήρα. Το αποτέλεσμα είναι το R_s του πετρελαίου να μειώνεται όσο μειώνεται και η πίεση του ταμιευτήρα. Αυτό φαίνεται και στο Διάγραμμα 2.5 που σχεδιάστηκε χρησιμοποιώντας μια από τις συσχετίσεις που θα αναφερθούν παρακάτω.

Ο λόγος διαλυμένου αερίου προς το πετρέλαιο (Solution GOR) ορίζεται ως ο όγκος του αερίου σε κανονικές συνθήκες (scf) που θα διαλυθεί σε ένα βαρέλι αργού πετρελαίου (stb) όταν αυτά μεταφερθούν σε συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας του ταμιευτήρα,

$$R_s = \frac{V_{gas(sc)}}{V_{oil(sc)}}$$

όπου R_s είναι το solution GOR σε scf/stb, V_{gas} είναι ο όγκος του αερίου σε κανονικές συνθήκες (scf) και V_{oil} ο όγκος του πετρελαίου σε stb.



Διάγραμμα 2.5: Καμπύλη R_s συναρτήσει της πίεσης (Ahmed, 2016)

Το R_s αποτελεί σημαντική πετρελαϊκή ιδιότητα γιατί χρησιμοποιείται για να συσχετίσει τους όγκους του πετρελαίου και του αερίου που παράγονται στην επιφάνεια, με το τι συμβαίνει μέσα στον ταμιευτήρα και για να ξεχωρίσει το ελεύθερο αέριο που υπάρχει στον ταμιευτήρα από το διαλυμένο αέριο στο πετρέλαιο.

Συσχέτιση του Standing

Ως ιδιότητα του πετρελαίου, το R_s μπορεί να προσδιοριστεί με εργαστηριακή ανάλυση δείγματος. Υπάρχουν όμως και εμπειρικές σχέσεις βασισμένες σε εργαστηριακά δεδομένα,

που μπορούν να το προσδιορίσουν. Μια από αυτές είναι του Standing, ο οποίος πρότεινε μια γραφική συσχέτιση για το R_s συναρτήσει της πίεσης, της ειδικής πυκνότητας αερίου, της API και της θερμοκρασίας του συστήματος. Η ανάπτυξη της συσχέτισης βασίστηκε σε 105 πειραματικά δεδομένα από 22 διαφορετικά πετρελαϊκά ρευστά της περιοχής της Καλιφόρνια. Η μαθηματική μορφή της συσχέτισης είναι:

$$R_s = \gamma_g \left[\left(\frac{p}{18,2} + 1.4 \right) 10^{0.0125API - 0.00091(T-460)} \right]^{1.2048} \quad (2.15)$$

όπου

R_s = GOR σε scf/stb

T = θερμοκρασία του συστήματος σε °R

p = η πίεση του συστήματος σε psia

γ_g = ειδική πυκνότητα του αερίου και

API = η πυκνότητα του πετρελαίου σε API

Το μέσο σχετικό σφάλμα για αυτή τη συσχέτιση κυμαίνεται περίπου στο 4,8%.

Συσχέτιση των Vasquez-Beggs

Οι Vasquez και Beggs παρουσίασαν μία βελτιωμένη συσχέτιση για την εκτίμηση του R_s . Η συσχέτιση προέκυψε μετά από ανάλυση παλινδρόμησης (regression analysis) συγκεντρώνοντας δείγμα από 5,008 δεδομένα για R_s . Τα δεδομένα χωρίστηκαν σε δυο κατηγορίες ανάλογα με την API πυκνότητά τους. Η τιμή στην οποία έγινε αυτή η κατηγοριοποίηση ορίστηκε στους 30 °API. Η μαθηματική έκφραση ήταν:

$$R_s = C_1 \gamma_g p^{C_2} \exp \left[C_3 \frac{API}{T} \right] \quad (2.16)$$

με τις σταθερές C_1 , C_2 , C_3 να ορίζονται στον Πίνακα 2.3

Coefficients	API ≤ 30	API > 30
C_1	0.362	0.0178
C_2	1.0937	1.1870
C_3	25.7240	23.931

Πίνακας 2.3: Σταθερές για τη συσχέτιση του R_s των Vasquez-Beggs (Ahmed, 2016)

Παρατηρείται πως η συσχέτιση αυτή βασίζεται στην ειδική πυκνότητα συστήματος διαχωρισμού του αερίου για πίεση διαχωριστή 100 psig. Αν οι συνθήκες του διαχωριστή p_{sep} , T_{sep} είναι γνωστές τότε χρησιμοποιείται ο τύπος

$$\gamma_{g_{100}} = \gamma_{g_s} (1 + 5.912 \times 10^{-5}) API T_{sep} \log_{10} \left(\frac{p_{sep}}{114.7} \right) \quad (2.17)$$

για να διορθώσει την ειδική πυκνότητα του αερίου ως προς πίεση διαχωριστή 100 psig. Αν δεν είναι γνωστές χρησιμοποιείται αναπόφευκτα η ειδική πυκνότητα του αερίου στον διαχωριστή χωρίς διόρθωση.

Ο μετέπειτα ανεξάρτητος έλεγχος που έγινε από τους Sutton και Farshad έδειξε πως το περιθώριο σφάλματος για αυτή τη συσχέτιση κυμαίνεται κατά μέσο όρο στο 12.7%.

Συσχέτιση του Glaso

Ο Glaso εκτίμησε το R_s με μεταβλητές στη συνάρτησή του την πυκνότητα API, την πίεση και τη θερμοκρασία του ταμιευτήρα και την ειδική πυκνότητα του αερίου, προτείνοντας τη δική του συσχέτιση. Συγκέντρωσε και μελέτησε 45 δείγματα πετρελαίου από τη Βόρεια Θάλασσα και η μαθηματική έκφραση στην οποία κατέληξε ήταν:

$$R_s = \gamma_g \left\{ \left[\frac{API^{0.989}}{(T - 460)^{0.172}} (A) \right] \right\}^{1.2255} \quad (2.18)$$

με την παράμετρο A να είναι συνάρτηση της πίεσης με τη μορφή

$$A = 10^{2.8869 - [14.1811 - 3.3093 \log(p)]^{0.5}}$$

Παρατήρησε επίσης πως η μέθοδος του είχε μέσο σχετικό σφάλμα 1.28% με τυπική απόκλιση 6.98%.

Συσχέτιση του Al Marhoun

Ο Al Marhoun ανέπτυξε τη δική του μαθηματική έκφραση για την εύρεση του R_s βασισμένος σε δεδομένα από πετρέλαια της Μέσης Ανατολής. Τα 160 δεδομένα προέκυψαν από πειραματικές μετρήσεις σε πιέσεις κορεσμένου ταμιευτήρα. Η συσχέτιση που πρότεινε είναι,

$$R_s = [a \gamma_g^b \gamma_o^c T^d p]^e \quad (2.19)$$

όπου

$R_s = \text{GOR}$,

γ_g, γ_o = οι ειδικές πυκνότητες του αερίου και του stock tank oil αντίστοιχα και οι παράμετροι a, b, c, d , και e να παίρνουν τις παρακάτω τιμές,

a	185.843208
b	1.877840
c	-3.1437
d	-1.32657
e	1.39844

Συσχέτιση των Petrosky-Farshad

Οι Petrosky και Farshad έχοντας μια διαφορετική προσέγγιση, χρησιμοποίησαν μη γραμμική παλινδρόμηση για να αναπτύξουν τη δική τους συσχέτιση για το R_s . Η βάση δεδομένων PVT που δημιούργησαν αποτελούνταν από 81 εργαστηριακές αναλύσεις πετρελαϊκών συστημάτων του Κόλπου του Μεξικού. Η έκφραση που κατέληξαν ήταν η εξής:

$$R_s = \left[\left(\frac{p}{112.727} + 12.340 \right) \gamma_g^{0.8439} 10^x \right]^{1.73184} \quad (2.20)$$

με τον παράγοντα x να ορίζεται ως

$$x = 7.916 \times 10^{-4} API^{1.5410} - 4.561 \times 10^{-5} (T - 460)^{1.3911}$$

όπου

R_s = GOR,

p, T = πίεση και θερμοκρασία σε psia και °R αντίστοιχα

γ_g, API = ειδική πυκνότητα του αερίου και η πυκνότητα του πετρελαίου API.

Ισοζύγιο μάζας

Χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις του ισοζυγίου μάζας, το R_s μπορεί να υπολογιστεί με ακρίβεια. Η παρακάτω σχέση συνδέει το R_s με την πυκνότητα του πετρελαίου, την ειδική πυκνότητα του αερίου και πετρελαίου και το B_o .

$$R_s = \frac{B_o \rho_o - 62.4 \gamma_o}{0.0136 \gamma_g} \quad (2.21)$$

όπου

ρ_o = πυκνότητα πετρελαίου σε συνθήκες ταμιευτήρα

B_o = FVF πετρελαίου

Θα πρέπει να γίνει σαφές πως το R_s , όπως και οι υπόλοιπες ιδιότητες που θα αναλυθούν στην συνέχεια, είναι στην ουσία συνάρτηση μόνο της πίεσης του ταμιευτήρα καθώς θεωρείται ότι η θερμοκρασία του ταμιευτήρα παραμένει πάντοτε σταθερή κατά τη διάρκεια της παραγωγής.

2.4. Συσχετίσεις ΜΜΠ για την πρόβλεψη πίεσης σημείου φυσαλίδας (Bubblepoint pressure)

Η πίεση του σημείου φυσαλίδας p_b ενός πετρελαϊκού συστήματος ορίζεται ως η υψηλότερη πίεση στην οποία η πρώτη φυσαλίδα αερίου απελευθερώνεται από το πετρέλαιο. Δύναται να μετρηθεί πειραματικά με τη βοήθεια του πειράματος της ισοθερμοκρασιακής εκτόνωσης υπό σταθερή σύσταση (Constant Composition Expansion CCE).

Η προσπάθεια εύρεσης μια σχέσης που να συσχετίζει τις άλλες ιδιότητες του πετρελαίου με το σημείο φυσαλίδας έχει απασχολήσει την πετρελαϊκή κοινότητα περισσότερο από οποιαδήποτε άλλη ιδιότητα. Οι Μηχανικοί, καθώς δεν ήταν πάντα σε θέση να μετρούν αυτήν την ιδιότητα πειραματικά, χρειάστηκαν να αναπτύξουν γραφικές και μαθηματικές συσχετίσεις, χρησιμοποιώντας παραμέτρους που ήταν εύκολα μετρήσιμες στο πεδίο. Οι συσχετίσεις βασίστηκαν ουσιαστικά στην υπόθεση ότι το p_b είναι συνάρτηση του GOR, της ειδικής πυκνότητας του αερίου γ_g , της πυκνότητας API και της θερμοκρασίας T.

Συσχέτιση του Standing

Ο Standing ανέπτυξε την πρώτη ακριβή συσχέτιση η οποία βασίστηκε σε 105 πειραματικά μετρημένες πιέσεις σημείου φυσαλίδας από 22 πετρελαϊκά συστήματα από πετρέλαια της Καλιφόρνια.

$$p_b = 18.2 \left[(R_s/\gamma_g)^{0.83} (10)^a - 1.4 \right] \quad (2.22)$$

με

$$a = 0.00091(T - 460) - 0.0125(API) \quad (2.23)$$

όπου

R_s = GOR σε scf/stb,

T = θερμοκρασία σε °R

p_b = πίεση σημείου φυσαλίδας σε psia.

Θα πρέπει να επισημανθεί ότι σε αυτή τη συσχέτιση ο Standing δεν έλαβε υπόψη τα ανόργανα στοιχεία του συστήματος και το μέσο σχετικό σφάλμα είναι 4.8%.

Συσχέτιση του Lasater

Ο Lasater προσέγγισε διαφορετικά την πρόβλεψη του σημείου φυσαλίδας.

Εισήγαγε τον όρο του γραμμομοριακού κλάσματος (mole fraction) του αερίου y_{gas} ως παράμετρο για τη συσχέτιση του:

$$y_{gas} = \frac{M_o R_s}{M_o R_s + 133.000 \gamma_o}$$

όπου

M_o = το μοριακό βάρος του stock tank oil,

γ_o = η ειδική πυκνότητα του stock tank oil για 60°/60°

Όταν το μοριακό βάρος του πετρελαίου δεν είναι διαθέσιμο μπορεί να εκτιμηθεί από τη σχέση του Cragoe ως συνάρτηση της πυκνότητας API:

$$M_o = \frac{6084}{API - 5.9}$$

Η σχέση που περιέγραψε ο Lasater για την εύρεση του σημείου φυσαλίδας δίνεται ως εξής:

$$p_b = \left(\frac{T}{\gamma_g} \right) A$$

όπου

T = θερμοκρασία σε °R

A = γραφική παράμετρος συναρτήσεως του γραμμομοριακού κλάσματος του αερίου.

Οι Whitson και Brule συμπέραναν ότι η παράμετρος A παίρνει τιμές,

$$A=0.83918[10^{1.17664y_{gas}}]y_{gas}^{0.57246} \text{ για } y_{gas} \leq 0.6$$

και

$$A=0.83918[10^{1.08000y_{gas}}]y_{gas}^{0.31109} \text{ για } y_{gas} > 0.6$$

Συσχέτιση του Glaso

Ο Glaso χρησιμοποίησε την προσέγγιση του Standing παίρνοντας 45 δείγματα από συστήματα υδρογονανθράκων της Βόρειας Θάλασσας, για να αναπτύξει μια ακριβή συσχέτιση για την πρόβλεψη του σημείου φυσαλίδας. Η μαθηματική έκφραση που πρότεινε είναι η εξής:

$$p_b = 10^{-0.30218A^2 + 1.7447A + 1.7669} \quad (2.24)$$

με

$$A = \left(\frac{R_s}{\gamma_g} \right)^{0.816} \frac{(T-460)^{0.172}}{API^{0.989}} \quad (2.25)$$

όπου

R_s = GOR (scf/stb),

γ_g = ειδική πυκνότητα του αερίου στην επιφάνεια,

T = θερμοκρασία σε °R.

Συσχέτιση των Vasquez-Beggs

Η συσχέτιση των Vasquez και Beggs για το σημείο φυσαλίδας προέκυψε από τη συσχέτιση των ιδίων για το R_s . Συνιστάται λοιπόν, όταν χρησιμοποιείται η συσχέτιση των συγκεκριμένων συγγραφέων για την εύρεση του R_s , να χρησιμοποιείται και η συσχέτιση για το σημείο φυσαλίδας των ιδίων.

Η συσχέτιση αυτή βασίζεται στην ειδική πυκνότητα συστήματος διαχωρισμού του αερίου για πίεση διαχωριστή 100 psig. Αν οι συνθήκες του διαχωριστή είναι γνωστές τότε χρησιμοποιείται ο τύπος

$$\gamma_{g100} = \gamma_{gs} (1 + 5.912 \times 10^{-5}) API T_{sep} \log_{10} \left(\frac{p_{sep}}{114.7} \right)$$

για να διορθώσει την ειδική πυκνότητα αερίου για πίεση διαχωριστή 100 psig.

Αν δεν είναι γνωστές, χρησιμοποιείται η ειδική πυκνότητα συστήματος διαχωρισμού χωρίς διόρθωση.

Η μαθηματική έκφραση που πρότειναν οι Vasquez και Beggs για το σημείο φυσαλίδας είναι,

$$p_b = \left[\left(C_1 \frac{R_s}{\gamma_{gs}} \right) 10^a \right]^{C_2} \quad (4.26)$$

με τον εκθέτη $a = C_3 \left(\frac{API}{T} \right)$, όπου το T είναι σε °R.

Για τις σταθερές C_1, C_2, C_3 , οι τιμές βρίσκονται στον παρακάτω Πίνακα 2.4:

Coefficient	API ≤ 30	API > 30
C_1	27.624	56.18
C_2	10.914328	0.84246
C_3	-11.172	-10.393

Πίνακας 2.4: Σταθερές για τη συσχέτιση του p_b των Vasquez-Beggs (Ahmed, 2016)

Συσχέτιση του Al Marhoun

Ο Al Marhoun χρησιμοποίησε 160 πειραματικά μετρημένες πιέσεις σημείου φυσαλίδας από 69 διαφορετικά πετρελαϊκά ρευστά της Μέσης Ανατολής που υπέστησαν PVT ανάλυση.

Συσχέτισε το σημείο φυσαλίδας με το R_s , τη θερμοκρασία και τις ειδικές πυκνότητες αερίου και πετρελαίου. Η σχέση που πρότεινε είναι η εξής:

$$p_b = a R_s^b \gamma_g^c \gamma_o^d T^e \quad (2.27)$$

όπου

T = θερμοκρασία σε °R,

R_s =GOR σε scf/stb,

γ_o και γ_g = ειδικές πυκνότητες του πετρελαίου και του αερίου αντίστοιχα και

τα a, b, c, d, e να παίρνουν τις παρακάτω τιμές.

a	5.38088×10^{-3}
b	0.715082
c	-1.87784
d	3.1437
e	1.32657

Συσχέτιση των Petrosky-Farshad

Η εξίσωση των Petrosky-Farshad για την εύρεση του R_s μπορεί να μετασχηματιστεί και να λυθεί ως προς το σημείο φυσαλίδας για να προκύψει,

$$p_b = \left[\frac{112.727R_s^{0.577421}}{\gamma_g^{0.8439}(10)^x} \right] \quad (2.28)$$

με την παράμετρο x να έχει οριστεί προηγουμένως ως

$$x = 7.916 \times 10^{-4} API^{1.5410} - 4.561 \times 10^{-5} (T - 460)^{1.3911}$$

όπου

R_s = solution GOR

T =θερμοκρασία σε °R

p =πίεση συστήματος σε psia

γ_g = ειδική πυκνότητα του αερίου

Οι συσχετίσεις του Standing μπορούν να χρησιμοποιηθούν ευρέως στο πεδίο για να προβλέψουν την τιμή του σημείου φυσαλίδας, καθώς δεν προκύπτουν σημαντικές διαφορές στην τιμή αυτή για τους περισσότερους ταμιευτήρες πετρελαίου παγκοσμίως.

2.5. Συσχετίσεις ΜΜΠ για την εκτίμηση ογκομετρικών ιδιοτήτων σε πιέσεις πάνω από το σημείο φυσαλίδας

2.5.1. Πυκνότητα πετρελαίου σε συνθήκες ταμιευτήρα (ρ_o)

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, ως πυκνότητα του πετρελαίου ορίζεται η μάζα του πετρελαίου προς μια μονάδα του όγκου του σε συγκεκριμένη πίεση και θερμοκρασία και συνήθως μετριέται σε λίβρες ανά κυβικό πόδι (pounds per cubic foot). Κυμαίνεται από 30

lb/ft³ για τα ελαφριά πτητικά πετρέλαια έως 60 lb/ft³ για τα βαριά με ελάχιστο ή καθόλου διαλυμένο αέριο. Είναι από τις πιο σημαντικές ιδιότητες γιατί η τιμή της ουσιαστικά επηρεάζει τους υπολογισμούς των ογκομετρικών παραμέτρων του πετρελαίου. Αυτή η ιδιότητα συνήθως μετριέται στα εργαστήρια με πειράματα PVT ανάλυσης. Όμως, επειδή δεν είναι πάντα εφικτό να γίνουν αυτές οι αναλύσεις, έχουν αναπτυχθεί εμπειρικές μαθηματικές σχέσεις για να εκτιμηθεί αυτή η ιδιότητα όσο πιο ακριβέστερα γίνεται. Βασισμένες σε περιορισμένα δεδομένα για το πετρέλαιο, αυτές οι συσχετίσεις μπορούν χωριστούν σε δυο κατηγορίες

- Συσχετίσεις που χρησιμοποιούν τη σύσταση του πετρελαίου για να καθορίσουν την πυκνότητα του κορεσμένου πετρελαίου (πίεση μικρότερη του σημείου φυσαλίδας)
- Συσχετίσεις που χρησιμοποιούν περιορισμένα δεδομένα όπως την ειδική πυκνότητα του αερίου και του πετρελαίου, το GOR και την εκάστοτε θερμοκρασία για να εκτιμήσουν την πυκνότητα του πετρελαίου

2.5.2. Συσχετίσεις προσδιορισμού πυκνότητας πετρελαίου βάση της σύστασης

Αν και υπάρχουν αρκετές συσχετίσεις που εκτιμούν την πυκνότητα κορεσμένου πετρελαίου με βάση τη σύστασή του, οι κυριότερες είναι αυτές των Standing-Katz και Alani-Kennedy.

Συσχέτιση των Standing-Katz

Οι Standing και Katz ανέπτυξαν μία γραφική συσχέτιση για την εκτίμηση της πυκνότητας των πετρελαϊκών ρευστών. Οι συγγραφείς χρησιμοποίησαν πειραματικά δεδομένα για τη σύσταση και την πυκνότητα από 15 δείγματα πετρελαίου τα οποία περιείχαν έως 60% κατά mole μεθάνιο. Δυστυχώς η αναφερθείσα συσχέτιση δεν συμπεριλαμβάνει καμία μεθοδολογία διαχείρισης μεγάλων ποσοτήτων ανόργανων ενώσεων στη σύσταση του πετρελαίου.

Η μαθηματική έκφραση που προέκυψε ήταν μια συνάρτηση της πυκνότητας του πετρελαϊκού ρευστού με την πίεση και τη θερμοκρασία:

$$\rho_o = \rho_{sc} + \Delta\rho_p - \Delta\rho_T \quad (2.29)$$

όπου

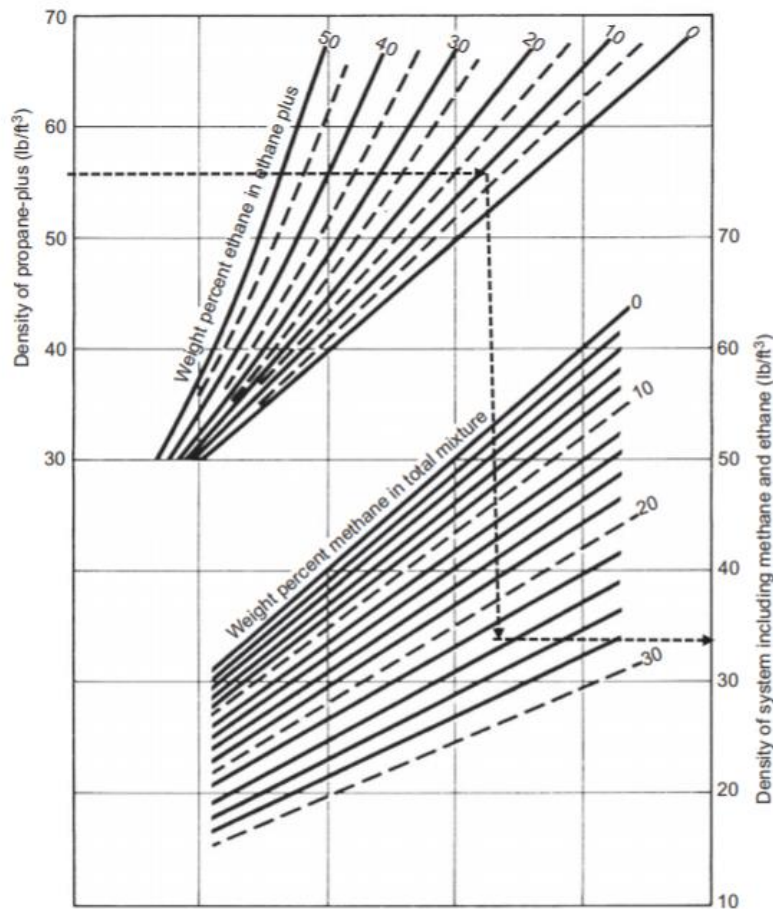
ρ_o = πυκνότητα πετρελαίου σε lb/ft³

ρ_{sc} =πυκνότητα αργού πετρελαίου σε κανονικές συνθήκες σε lb/ft³

$\Delta\rho_p$ = διορθωμένη πυκνότητα ως προς τη συμπιεστότητα του πετρελαίου σε lb/ft³

$\Delta\rho_T$ = διορθωμένη πυκνότητα ως προς τη θερμική διόγκωση του πετρελαίου σε lb/ft³.

Οι συγγραφείς συσχέτισαν τη διόρθωση της πυκνότητας $\Delta\rho_p$ με την πυκνότητα του κλάσματος προπανίου-plus (C_{7+}) $\rho_{C_{3+}}$, το κατά βάρος ποσοστό μεθανίου (C_1) σε ολόκληρο το σύστημα $(m_{C_1})_{C_{1+}}$ και το κατά βάρος ποσοστό αιθανίου(C_2) στο κλάσμα αιθάνιο-plus $(m_{C_2})_{C_{2+}}$. Η γραφική συσχέτιση φαίνεται στο Διάγραμμα 2.6.



Διάγραμμα 2.6: Συσχετίσεις των Standing-Katz για την πυκνότητα (Ahmed, 2016)

Τα παρακάτω βήματα είναι τα προκαθορισμένα για την εκτίμηση της διορθωμένης πυκνότητας σε συγκεκριμένη πίεση και θερμοκρασία.

Βήμα 1^ο . Υπολογίζεται η συνολική μάζα και η μάζα κάθε συστατικού για 1 lb- mol του πετρελαϊκού ρευστού εφαρμόζοντας του παρακάτω τύπους:

$$m_i = X_i M_i \quad \text{και} \quad m_t = \sum x_i M_i$$

όπου

m_i = η μάζα του συστατικού i στο ρευστό σε lb/lb-mol

m_t = η συνολική μάζα 1 lb-mol του ρευστού σε lb/lb-mol

M_i = το μοριακό βάρος του συστατικού i

X_i = το γραμμομοριακό κλάσμα του συστατικού i στο ρευστό

Βήμα 2^ο . Υπολογίζεται το κατά βάρος ποσοστό του μεθανίου στο σύνολο του συστήματος και το κατά βάρος ποσοστό του αιθανίου στο κλάσμα του αιθάνιο-plus εφαρμόζοντας τους παρακάτω τύπους:

$$(m_{C_1})_{C_{1+}} = \left[\frac{x_{C_1} M_{C_1}}{\sum_{i=1}^n x_i M_i} \right] 100 = \left[\frac{m_{C_1}}{m_t} \right] 100 \quad (2.30)$$

και

$$(m_{C_2})_{C_{2+}} = \left[\frac{x_{C_2} M_{C_2}}{m_{C_{2+}}} \right] 100 = \left[\frac{m_{C_2}}{m_t - m_{C_1}} \right] 100 \quad (2.31)$$

όπου

$(m_{C_1})_{C_{1+}}$ = κατά βάρος ποσοστό του μεθανίου στο συνολικό σύστημα

m_{C_1} = το βάρος του μεθανίου σε 1 lb-mol, το οποίο είναι, $x_{C_1} M_{C_1}$

$(m_{C_2})_{C_{2+}}$ = το κατά βάρος ποσοστό του αιθανίου στο κλάσμα αιθάνιο-plus

m_{C_2} = το βάρος του αιθανίου σε 1 lb-mol, το οποίο είναι, $x_{C_2} M_{C_2}$

M_{C_1} = το μοριακό βάρος του μεθανίου

M_{C_2} = το μοριακό βάρος του αιθανίου

Βήμα 3^ο . Υπολογίζεται η πυκνότητα του κλάσματος προπανίου-plus σε κανονικές συνθήκες με τη χρήση των παρακάτω τύπων:

$$\rho_{C_{3+}} = \frac{m_{C_{3+}}}{V_{C_{3+}}} = \frac{\sum_{i=C_3}^n x_i M_i}{\sum_{i=C_3}^n ((x_i M_i) / \rho_{oi})} = \frac{m_t - m_{C_1} - m_{C_2}}{\sum_{i=C_3}^n ((x_i M_i) / \rho_{oi})} \quad (2.32)$$

με

$$m_{C_{3+}} = \sum_{i=C_3} x_i M_i \quad (2.33)$$

και

$$V_{C_{3+}} = \sum_{i=C_3} V_i = \sum_{i=C_3} \frac{m_i}{\rho_{oi}} \quad (2.34)$$

όπου

$\rho_{C_{3+}}$ = η πυκνότητα του κλάσματος προπανίου και βαρύτερων ενώσεων, lb/ft³

$m_{C_{3+}}$ = η μάζα του κλάσματος προπανίου και βαρύτερων ενώσεων σε lb

$V_{C_{3+}}$ = ο όγκος του κλάσματος προπανίου-plus ft³/lb-mol

V_i = ο όγκος του συστατικού i σε 1 lb-mol του ρευστού

m_i = το βάρος του συστατικού i, το οποίο είναι $x_i M_i$ σε lb/lb-mol

ρ_{oi} = η πυκνότητα του συστατικού i (sc) σε lb/ft³ (υπάρχουν πίνακες που είναι υπολογισμένο ήδη)

Βήμα 4^ο . Χρησιμοποιώντας το παραπάνω διάγραμμα, υπολογίζεται η πυκνότητα του πετρελαίου (η οποία βρίσκεται στη δεξιά μεριά του γραφήματος) σε κανονικές συνθήκες. Ο Standing απέδωσε τη μαθηματική έκφραση του διαγράμματος ως εξής:

$$\rho_{sc} = \rho_{C_{2+}} \left[1 - 0.012(m_{C_1})_{C_{1+}} - 0.000158(m_{C_1})_{C_{1+}}^2 \right] + 0.0133(m_{C_1})_{C_{1+}} + 0.00058(m_{C_1})_{C_{2+}}^2 \quad (2.35)$$

με

$$\rho_{C_2} = \rho_{C_{3+}} \left[1 - 0.01386(m_{C_2})_{C_{2+}} - 0.00082(m_2)_{C_{2+}}^2 \right] + 0.379(m_{C_2})_{C_{2+}} + 0.0042(m_{C_2})_{C_{2+}}^2 \quad (2.36)$$

όπου

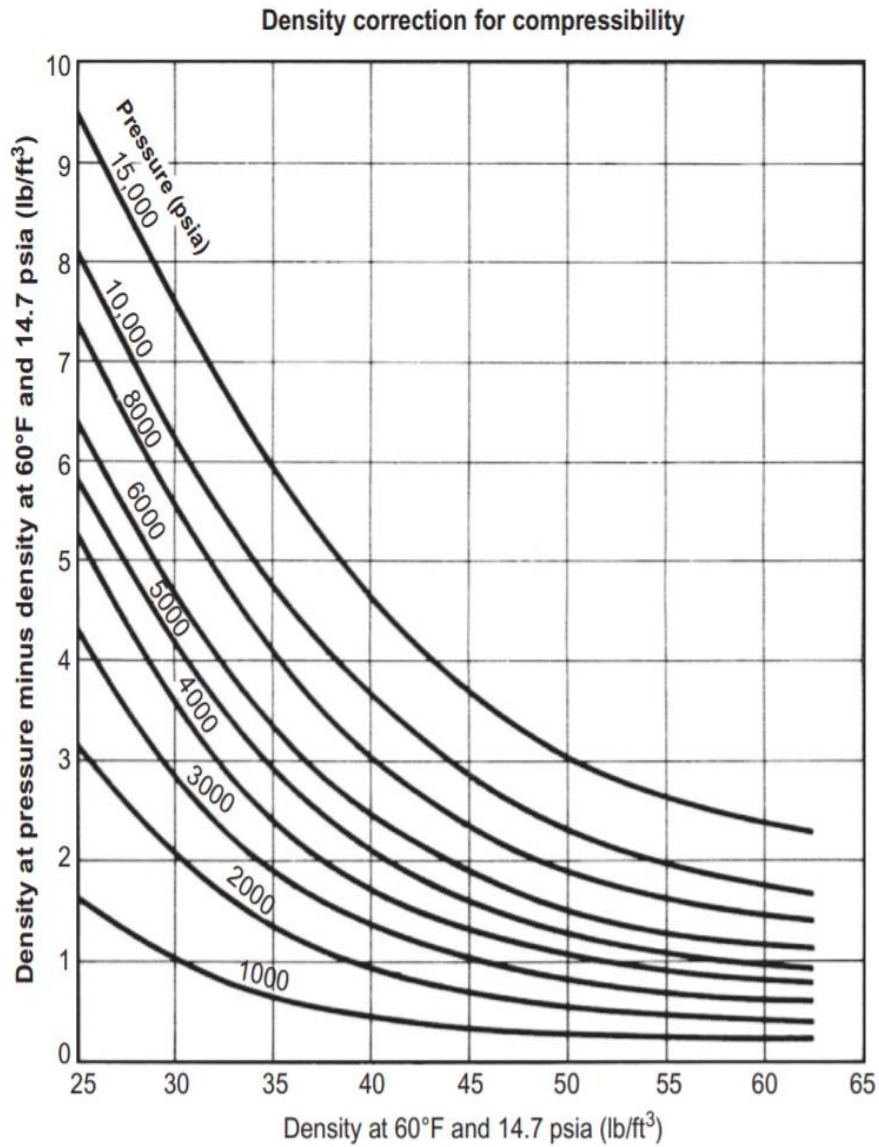
$\rho_{C_{2+}}$ = πυκνότητα του βαρύτερου από του αιθανίου κλάσματος

Βήμα 5^ο . Χρησιμοποιώντας το παρακάτω Διάγραμμα 2.7, μετατρέπεται η πυκνότητα από κανονικές συνθήκες στην πραγματική υπολογίζοντας την τιμή του διορθωτικού παράγοντα της πρόσθετης πίεσης $\Delta\rho_p$:

$$\rho_{p,60} = \rho_{sc} + \Delta\rho_p$$

Μαθηματικά ο όρος Δ_{ρ_p} υπολογίζεται ως,

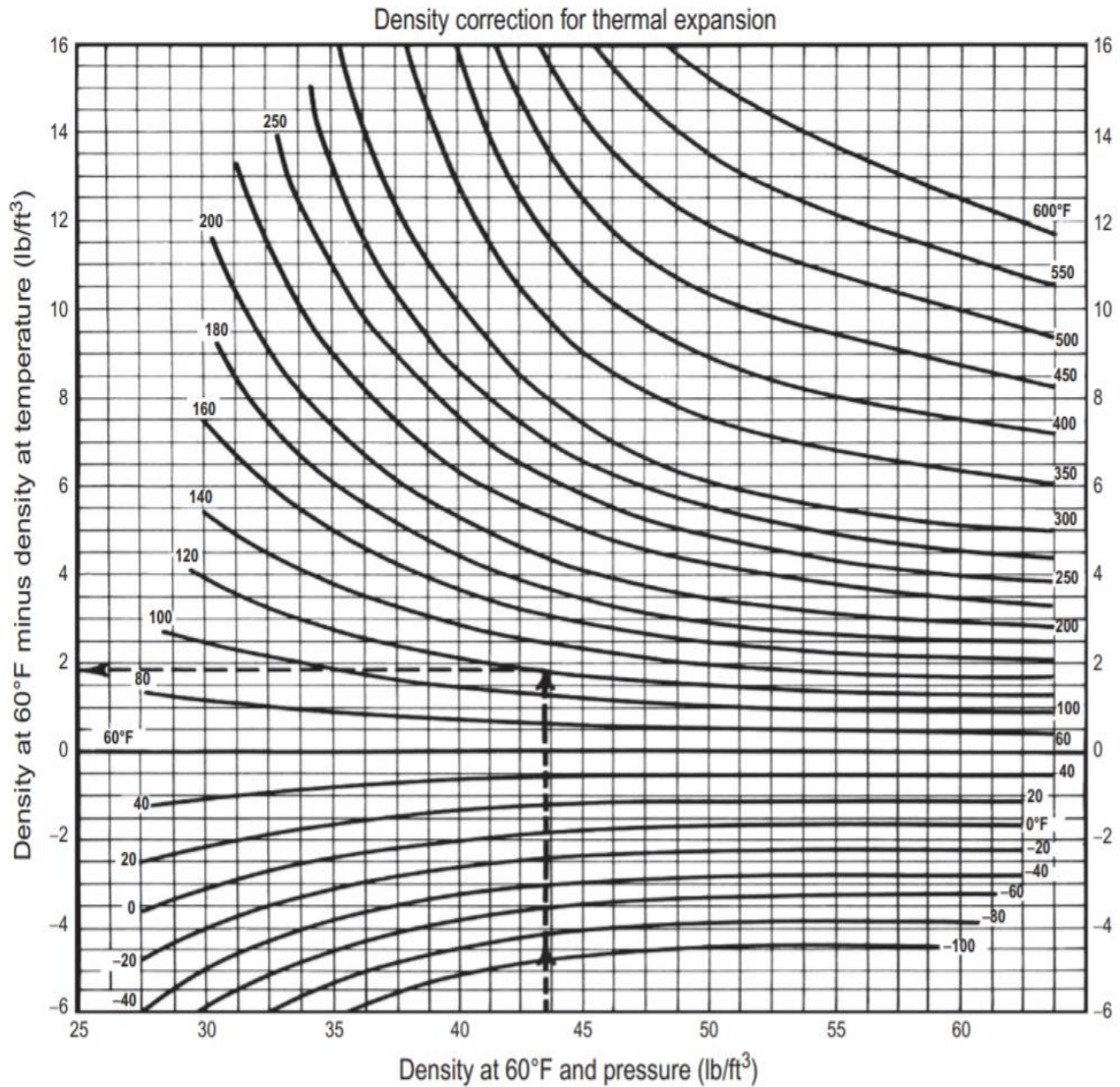
$$\Delta_{\rho_p} = [0.000167 + (0.016181)10^{-0.0425\rho_{sc}}]p - (10^{-8})[0.299 + (263)10^{-0.0603\rho_{sc}}]p^2 \quad (2.37)$$



Διάγραμμα 2.7: Διόρθωση της πυκνότητας για την συμπιεστότητα του αργού πετρελαίου (Ahmed, 2016)

Βήμα 6^ο. Μετατρέπεται η πυκνότητα σε 60 °F και πραγματική πίεση υπολογίζοντας τον όρο της ισοθερμοκρασιακής διόγκωσης Δ_{ρ_T} από το Διάγραμμα 2.8.

$$\rho_o = \rho_{p,60} - \Delta_{\rho_T}$$



Διάγραμμα 2.8: Διόρθωση της πυκνότητας για την ισοθερμοκρασιακή εκτόνωση του πετρελαίου (Ahmed, 2016)

Μαθηματικά ο όρος $\Delta\rho_T$ εκφράζεται ως,

$$\Delta\rho_T = (T - 520) \left[0.0133 + 152.4 (\rho_{sc} + \Delta\rho_p)^{-2.45} \right] - (T - 520)^2 \left[8.1(10^{-6}) - (0.0622)10^{-0.0764(\rho_{sc} + \Delta\rho_p)} \right] \quad (2.38)$$

όπου

T = θερμοκρασία του συστήματος σε °R.

Συσχέτιση των Alani-Kennedy

Η συσχέτιση των Alani-Kennedy χρησιμοποιεί μια μαθηματική έκφραση για να εκτιμήσει τον γραμμομοριακό όγκο του ρευστού V_m , από υδρογονάνθρακες διαφόρων πιέσεων και θερμοκρασιών. Εφαρμόζεται σε πετρελαϊκά ρευστά όπου το κλάσμα των βαρέων υδρογονανθράκων περιγράφεται ως C_{7+} . Η εξίσωση είναι όμοια με την κλασική κυβική καταστατική εξίσωση του Van der Waals και η μορφή της είναι η εξής:

$$V_m^3 - \left[\frac{RT}{p} + b \right] V_m^2 + \frac{aV_m}{p} - \frac{ab}{p} = 0 \quad (2.39)$$

όπου

R = σταθερά των αέριων, 10.73 psia ft³/lb-mol

T = θερμοκρασία σε °R

p = πίεση σε psia

V_m = γραμμομοριακός όγκος σε ft³/lb-mol

α, β = σταθερές για τις καθαρές ενώσεις

Οι συγγραφείς εκτίμησαν πως οι παράγοντες α, β είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας και πρότειναν τις παρακάτω εξισώσεις για τον υπολογισμό τους:

$$\alpha = Ke^{n/T} \quad (2.40)$$

$$b = mT + c \quad (2.41)$$

όπου K, n, m και c είναι σταθερές, αντιστοιχούν στα καθαρά συστατικά του μίγματος και παρατίθενται στον παρακάτω Πίνακα 2.5. Για τις τιμές των α, β για το βαρύ κλάσμα C_{7+} , οι Alani-Kennedy πρότειναν την παρακάτω έκφραση:

$$\ln(a_{C_{7+}}) = 3.8405985(10^{-3})(M)_{C_{7+}} - 9.5638281(10^{-4}) \left(\frac{M}{\gamma} \right)_{C_{7+}} + \frac{261.80818}{T} +$$

$$7.3104464(10^{-6})(M)_{C_{7+}}^2 + 10.753517$$

$$b_{C_{7+}} = 0.03499274(M)_{C_{7+}} - 7.2725403(\gamma)_{C_{7+}} + 2.232395(10^{-4})T$$

$$- 0.016322572 \left(\frac{M}{\gamma} \right)_{C_{7+}} + 6.2256545$$

όπου

$M_{C_{7+}}$ = μοριακό βάρος του C_{7+}

$\gamma_{C_{7+}}$ = ειδική πυκνότητα του C_{7+}

$a_{C_{7+}}, b_{C_{7+}}$ = σταθερές από σχετικές με το κλάσμα επτανίου-plus (C_{7+})

T = θερμοκρασία σε °R

Alani and Kennedy Coefficients					
Components	Temperature Range (°F)	K	n	$m \times 10^4$	c
C_1	70–300	9160.6413	61.893223	3.3162472	0.508743
C_1	301–460	147.47333	3247.4533	-14.072637	1.832666
C_2	100–249	46,709.57	-404.48844	5.1520981	0.522397
C_2	250–460	17,495.34	34.163551	2.8201736	0.623099
C_3		20,247.76	190.2442	2.1586448	0.908325
$i-C_4$		32,204.42	131.63171	3.3862284	1.101383
$n-C_4$		33,016.21	146.15445	2.902157	1.116814
$i-C_5$		37,046.23	299.6263	2.1954785	1.436429
$n-C_5$		37,046.23	299.6263	2.1954785	1.436429
$n-C_6$		52,093.01	254.56097	3.6961858	1.592941
H_2S^a		13,200.00	0	17.9	0.3945
N_2^a		4300	2.293	4.49	0.3853
CO_2^a		8166	126	1.818	0.3872

Πίνακας 2.5: Τιμές σταθερών συσχέτισης των Alani-Kennedy (Ahmed, 2016)

Για τα πετρελαϊκά ρευστά, οι τιμές a , b του μείγματος υπολογίζονται χρησιμοποιώντας τους ακόλουθους τύπους:

$$a_m = \sum_{i=1}^{C_{7+}} a_i x_i \quad (2.42)$$

$$b_m = \sum_{i=1}^{C_{7+}} b_i x_i \quad (2.43)$$

όπου οι παράγοντες a_i , b_i αναφέρονται στις τιμές των καθαρών συστατικών που υπολογίστηκαν στις προηγούμενες Εξισώσεις 2.40, 2.41 στη δεδομένη θερμοκρασία και x_i το γραμμομοριακό κλάσμα του συστατικού i στην υγρή φάση. Τα a_m , b_m χρησιμοποιούνται στην Εξίσωση 2.39 για την επίλυση της εξίσωσης ως προς τον γραμμομοριακό όγκο V_m .

Τέλος, η πυκνότητα του ρευστού στην καθορισμένη πίεση και θερμοκρασία εκτιμάται ως εξής:

$$\rho_o = \frac{M_\alpha}{V_m} \quad (2.44)$$

όπου

ρ_o = πυκνότητα του αργού πετρελαίου σε lb/ft³

$$M_a = \sum x_i M_i$$

2.5.3. Συσχετίσεις Πυκνότητας βασισμένες σε δεδομένα πεδίου

Στο παρελθόν έχουν υπάρξει αρκετές προσπάθειες από τους συγγραφείς που έχουν αναφερθεί, να εκτιμηθεί η πυκνότητα του πετρελαίου χωρίς αυτό να έχει υποστεί προσδιορισμό της σύστασής του. Οι συσχετίσεις που προτάθηκαν, χρησιμοποιούν άλλες ιδιότητες του πετρελαίου, όπως η ειδική πυκνότητα αερίου και πετρελαίου και το GOR. Αυτές που θα παρουσιαστούν είναι:

- Η συσχέτιση του Katz
- Η συσχέτιση του Standing

Συσχέτιση του Katz

Με τον ίδιο τρόπο που ορίζεται η πυκνότητα για κάθε υλικό (μάζα/ όγκο), ορίζεται και η πυκνότητα του κορεσμένου σταθεροποιημένου πετρελαίου (+ το διαλυμένο αέριο) σε κανονικές συνθήκες.

$$\rho_{sc} = \frac{\text{βαρος σταθεροποιημένου πετρελαίου} + \text{βαρος διαλυμένου αερίου}}{\text{ογκος του σταθεροποιημένου πετρελαίου} + \text{αύξηση ογκου στο πετρελαιο λόγω του διαλυμένου αερίου}}$$

ή μαθηματικά,

$$\rho_{sc} = \frac{m_o + m_g}{(V_o)_{sc} + (\Delta V_g)_{sc}}$$

όπου

ρ_{sc} = πυκνότητα πετρελαίου σε κανονικές συνθήκες σε lb/ft³

$(V_o)_{sc}$ = όγκος πετρελαίου σε κανονικές συνθήκες σε ft³/stb

m_o = συνολικό βάρος ενός stb σε lb/stb

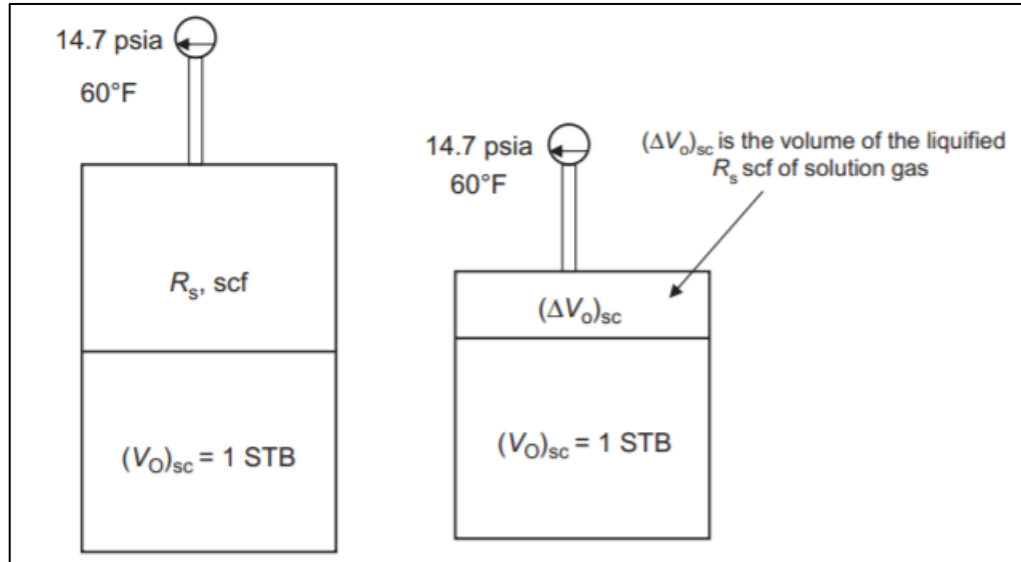
m_g = βάρος του διαλυμένου αερίου lb/stb

$(\Delta V_o)_{sc}$ = η αύξηση όγκου στο πετρέλαιο λόγω του διαλυμένου αερίου

Ο Katz προσπάθησε να σχηματοποιήσει αυτή τη διαδικασία, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.3 εκφράζοντας την αύξηση του όγκου του πετρελαίου συναρτήσει της φαινόμενης

πυκνότητας του αερίου που ήταν διαλυμένο στο πετρέλαιο ρ_{ga} , με την προηγούμενη έκφραση να γίνεται ως εξής:

$$\rho_{sc} = \frac{m_o + m_g}{(V_o)_{sc} + \frac{m_g}{\rho_{ga}}}$$

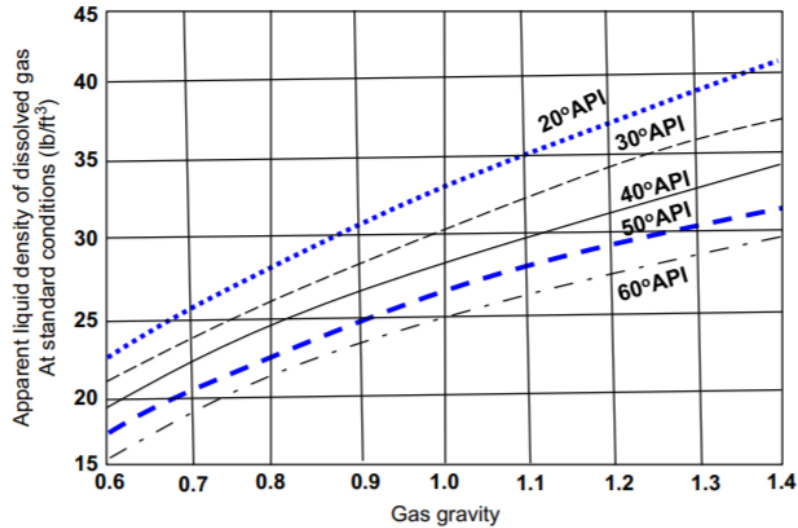


Εικόνα 2.3: Σχηματική απεικόνιση συσχέτισης πυκνότητας του Katz σε κανονικές συνθήκες (Ahmed, 2016)

Συσχέτισε επίσης τη φαινόμενη πυκνότητα του αερίου με την ειδική πυκνότητα του αερίου γ_g , το R_s και την API πυκνότητα του πετρελαίου όπως παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 2.9.

Αντικαθιστώντας αυτά στους όρους του Katz προκύπτει και η τελική σχέση:

$$\rho_{sc} = \frac{350.376\gamma_o + \frac{R_s\gamma_g}{13.1}}{5.615 + \frac{R_s\gamma_g}{13.1\rho_{ga}}} \quad (2.45)$$



Διάγραμμα 2.9: Φαινόμενη πυκνότητα αερίου διαλυμένου στο πετρέλαιο συναρτήσει της ειδικής πυκνότητας του αερίου και της πυκνότητας API (Ahmed, 2016)

Συσχέτιση του Standing

Ο Standing εξέφρασε την πυκνότητα του πετρελαίου ως συνάρτηση του R_s και των ειδικών πυκνοτήτων του πετρελαίου και του αερίου και της θερμοκρασίας του συστήματος. Προέκυψε η σχέση:

$$\rho_o = \frac{62.4\gamma_o + 0.0136R_s\gamma_g}{0.972 + 0.000147 \left[R_s \left(\frac{\gamma_g}{\gamma_o} \right)^{0.5} + 1.25(T - 460) \right]^{1.175}} \quad (2.46)$$

όπου

T = θερμοκρασία συστήματος σε °R

γ_o = ειδική πυκνότητα πετρελαίου °60/°60

γ_g = ειδική πυκνότητα αερίου

R_s =solution GOR σε scf/stb

ρ_o = πυκνότητα του πετρελαίου σε συνθήκες ταμειυτήρα σε lb/ft³

Ισοζύγιο μάζας

Η πυκνότητα του πετρελαίου μπορεί να υπολογιστεί με ακρίβεια από τις εξισώσεις ισοζυγίου μάζας για οποιαδήποτε πίεση και θερμοκρασία. Εξαρτάται από την ειδική πυκνότητα αερίου και πετρελαίου, το R_s και το B_o , με την εξίσωση να έχει την μορφή:

$$\rho_o = \frac{62.4\gamma_o + 0.0136R_s\gamma_g}{B_o} \quad (2.47)$$

όπου

B_o = συντελεστής διόγκωσης πετρελαίου σε rb/stb

γ_g = ειδική πυκνότητα αερίου

γ_o = ειδική πυκνότητα πετρελαίου σε 60°/°60

R_s = GOR σε scf/stb

ρ_o = πυκνότητα του πετρελαίου σε συνθήκες ταμειυτήρα σε lb/ft³

2.5.4. Συμπιεστότητα

Συνήθως, η συμπιεστότητα του ακόρεστου πετρελαίου καθορίζεται από εργαστηριακά δεδομένα PVT. Το δείγμα πετρελαίου εισάγεται στο PVT κελί σε θερμοκρασία ταμειυτήρα και πίεση μεγαλύτερη από αυτή του σημείου φυσαλίδας. Υπό αυτές τις συνθήκες, στο κελί υπάρχει μόνο μια φάση του πετρελαϊκού ρευστού, η υγρή. Καθώς η πίεση μειώνεται, το δείγμα διογκώνεται. Ο όγκος του δείγματος καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος καταγράφεται και συναρτάται με την πίεση. Μόλις το διάγραμμα όγκου-πίεσης του δείγματος είναι διαθέσιμο, μπορεί να υπολογιστεί η στιγμιαία συμπιεστότητα c_o σε οποιαδήποτε πίεση, από τον γραφικά καθορισμένο όγκο V και την αντίστοιχη κλίση $(\partial V/\partial p)_T$ στην πίεση αυτή. Σε πιέσεις πάνω από το σημείο φυσαλίδας, εφαρμόζονται οι παρακάτω εξισώσεις για να εκφράσουν τη συμπιεστότητα.

$$c_o = -\frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial p} \right)_T$$

$$c_o = -\frac{1}{B_o} \left(\frac{\partial B_o}{\partial p} \right)_T \quad (2.48)$$

$$c_o = \frac{1}{\rho_o} \left(\frac{\partial \rho_o}{\partial p} \right)_T$$

όπου

c_o = συμπιεστότητα πετρελαίου σε psia⁻¹

$\left(\frac{\partial V}{\partial p} \right)_T$ = η κλίση της καμπύλης πίεσης/όγκου σε πίεση p

Οι Craft και Hawkins πρότειναν τον όρο της μέσης συμπιεστότητας, ο οποίος υπολογίζει τη συμπιεστότητα με δεδομένα την αρχική πίεση ταμειυτήρα και την τρέχουσα. Χρησιμοποιείται στους υπολογισμούς ισοζυγίων μάζας και εκφράζεται μαθηματικά ως εξής:

$$\bar{c}_o = \frac{V \int_p^{p_i} c_o dp}{V[p_i - p]} = \frac{V - V_i}{V[p_i - p]}$$

όπου το σύμβολο i υποδεικνύει τις αρχικές συνθήκες στον ταμειυτήρα.

Με τον ίδιο τρόπο υπολογίζεται η συμπιεστότητα σε συνάρτηση με το B_o και τη ρ_o

Αυστηρά μιλώντας, η συμπιεστότητα ενός πετρελαϊκού ρευστού είναι χρήσιμη μόνο όταν αναφέρεται σε πιέσεις πάνω από το σημείο φυσαλίδας. Μείωση της πίεσης θα επιτρέψει στο αέριο να βγει από το πετρέλαιο και να δημιουργήσει τη δική του φάση, αλλάζοντας τελειώς την μάζα του συστήματος πάνω στην οποία βασίζεται η συμπιεστότητα.

Κατά καιρούς έγιναν επίσης προσπάθειες να συσχετιστεί η συμπιεστότητα χωρίς την ύπαρξη επιπρόσθετων εργαστηριακών δεδομένων PVT από τους πλέον αναγνωρισμένους συγγραφείς. Μερικές από αυτές είναι των Vasquez-Beggs, των Petrosky-Farshad και του Standing.

Συσχέτιση των Vasquez-Beggs

Από συνολικά 4,036 πειραματικά δεδομένα οι Vasquez-Beggs συσχέτισαν την συμπιεστότητα με το R_s , τη γ_{gs} , την πυκνότητα API, την πίεση και την θερμοκρασία. Πρότειναν την ακόλουθη μαθηματική έκφραση:

$$c_o = \frac{-1433 + 5R_{sb} + 17.2(T - 460) - 1180\gamma_{gs} + 12.61^\circ API}{10^{-5}p} \quad (2.49)$$

όπου

T = θερμοκρασία σε °R

p = πίεση πάνω από το p_b σε psia

R_{sb} = GOR στο p_b

γ_{gs} = η διορθωμένη ειδική πυκνότητα όπως ορίζεται από την Εξίσωση 2.17

Συσχέτιση των Petrosky-Farshad

Οι Petrosky-Farshad πρότειναν τη δική τους συσχέτιση για τον καθορισμό της συμπεστότητας του πετρελαίου σε ακόρεστα πετρελαϊκά ρευστά και είναι της μορφής:

$$c_o = 1.705 \times 10^{-7} R_{sb}^{0.69357} \gamma_g^{0.1885} API^{0.3272} (T - 460)^{0.6729} p^{-0.5906} \quad (2.50)$$

Συσχέτιση του Standing

Ο Standing σχεδίασε γραφικά τη δική του συσχέτιση για τη συμπεστότητα ακόρεστου πετρελαϊκού ρευστού την οποία οι Whitson και Brule εξέφρασαν με την ακόλουθη μαθηματική σχέση:

$$c_o = 10^{-6} \exp \left[\frac{\rho_{ob} + 0.004347(p - p_b) - 79.1}{0.0007141(p - p_b) - 12.938} \right] \quad (2.51)$$

όπου

ρ_{ob} = η πυκνότητα πετρελαίου στο σημείο φυσαλίδας

p_b = η πίεση του σημείου φυσαλίδας

2.6. Διφασικές ιδιότητες πετρελαϊκών ρευστών πάνω από το σημείο φυσαλίδας

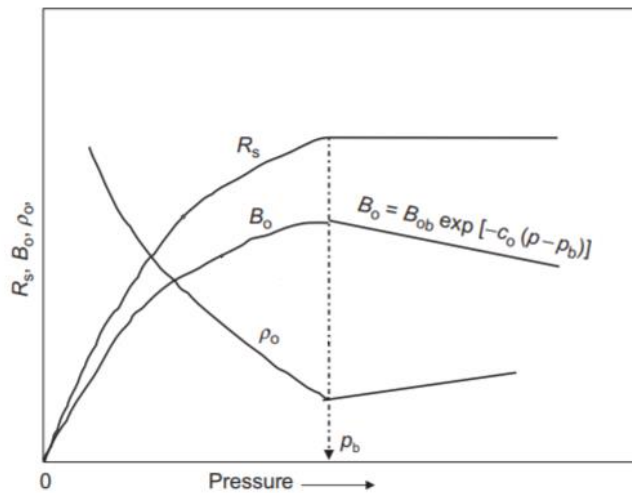
Το Διάγραμμα 2.10 περιγράφει την ογκομετρική συμπεριφορά του R_s , του B_o , και της πυκνότητας του πετρελαίου ρ_o ως συνάρτηση της πίεσης. Όπως ορίστηκε προηγουμένως, το R_s υπολογίζει την τάση του αερίου να διαλυθεί στο πετρέλαιο σε συγκριμένη θερμοκρασία με αύξηση της πίεσης. Καθώς αυξάνεται το R_s , το πετρέλαιο διογκώνεται με αποτέλεσμα την αύξηση του B_o και τη μείωση της πυκνότητας. Με την αύξηση της πίεσης πάνω από το σημείο φυσαλίδας, το R_s παραμένει σταθερό με μέγιστη τιμή του στο σημείο φυσαλίδας R_{sb} . Όμως, καθώς αυξάνεται η πίεση πάνω από το p_b , το πετρέλαιο συστέλλεται και μικραίνει σε όγκο παρατηρώντας ταυτόχρονα και πτώση στην καμπύλη του B_o και άνοδο στην καμπύλη της πυκνότητας μετά το p_b .

Μαθηματικά αυτό εκφράζεται ως:

$$B_o = \frac{(V_o)_{p,T}}{(V_o)_{sc}}$$

$$\rho_o = \frac{\text{συνολικη μαζα}}{(V_o)_{p,T}}$$

Το μέγεθος της αλλαγής του όγκου πάνω από το σημείο φυσαλίδας είναι μια συνάρτηση της συμπιεστότητας. Για να υπολογιστεί η συμπιεστότητα για το B_o και την πυκνότητα του πετρελαίου θα πρέπει να προσδιοριστούν αυτές οι δυο ιδιότητες στο σημείο φυσαλίδας (B_{ob} και ρ_{ob} αντίστοιχα) με μια από τις προηγούμενες μεθόδους και ύστερα να προσαρμοστούν για να μπορεί να διαπιστωθεί τι συμβαίνει πάνω από το σημείο αυτό.



Διάγραμμα 2.10: Καμπύλες R_s , B_o , ρ_o συναρτήσει της πίεσης (Ahmed, 2016)

2.6.1. B_o για ακόρεστο πετρέλαιο

Όπως αναλύθηκε προηγουμένως, μαθηματικά η συμπιεστότητα μπορεί να εκφραστεί ως:

$$c_o = -\frac{1}{V_o} \frac{\partial V_o}{\partial p}$$

Η σχέση αυτή μπορεί να εκφραστεί ισοδύναμα χρησιμοποιώντας τον όρο B_o ως

$$c_o = \frac{-1}{V_o/(V_o)_{sc}} \frac{\partial [V_o/(V_o)_{sc}]}{\partial p} = \frac{-1}{B_o} \frac{\partial B_o}{\partial p} \quad (2.52)$$

Εάν αυτή η σχέση ολοκληρωθεί τότε προκύπτει

$$\int_{p_b}^p -c_o dp = \int_{B_{ob}}^{B_o} \frac{1}{B_o} dB_o \rightarrow -c_o(p - p_b) = \ln\left(\frac{B_o}{B_{ob}}\right) \quad (2.53)$$

Θεωρώντας πως η συμπιεστότητα c_o των πετρελαίων χαμηλής και μέτριας πτητικότητας είναι περίπου σταθερή, λύνοντας το ολοκλήρωμα προκύπτει η σχέση που εκτιμά το B_o για κάθε πίεση πάνω από το p_b ,

$$B_o = B_{ob} \exp[-c_o(p - p_b)] \quad (2.54)$$

όπου

B_o = FVF πετρελαίου σε bbl/stb

B_{ob} = FVF πετρελαίου στο σημείο φυσαλίδας

p = πίεση ενδιαφέροντος

p_b = πίεση στο σημείο φυσαλίδας

2.6.2. Πυκνότητα ακόρεστου πετρελαίου

Η πυκνότητα του πετρελαίου ορίζεται ως ο λόγος της μάζας σε σχέση με τον όγκο σε συγκεκριμένη πίεση και θερμοκρασία και μαθηματικά η σχέση μεταξύ όγκου και πυκνότητας περιγράφεται ως εξής:

$$V_o = \frac{m}{\rho_o}$$

Παραγωγίζοντας την παραπάνω σχέση ως προς την πίεση προκύπτει

$$\left(\frac{\partial V_o}{\rho_o}\right)_T = \frac{-m}{\rho_o^2} \frac{\partial \rho_o}{\partial p}$$

Αντικαθιστώντας τις προηγούμενες δυο εξισώσεις στην Εξίσωση 4.47 και απαλείφοντας τους όρους προκύπτει:

$$c_o = \frac{1}{\rho_o} \frac{\partial \rho_o}{\partial p}$$

Όπως και προηγουμένως, με ολοκλήρωση προκύπτει:

$$\int_{p_b}^p -c_o dp = \int_{B_{ob}}^{B_o} \frac{1}{\rho_o} d\rho_o \rightarrow c_o(p - p_b) = \ln\left(\frac{\rho_o}{\rho_{ob}}\right)$$

Λύνοντας το ολοκλήρωμα προκύπτει η τελική σχέση:

$$\rho_o = \rho_{ob} \exp[c_o(p - p_b)] \quad (2.55)$$

η οποία και πάλι παρέχει την πυκνότητα σε οποιαδήποτε πίεση πάνω από το p_b .

2.7. Κινητικές Ιδιότητες

Εκτός από τις συνήθεις ογκομετρικές ιδιότητες, στους υπολογισμούς που πραγματοποιούν οι Μηχανικοί Πετρελαίων συχνά γίνεται χρήση του ιξώδους. Πρόκειται για υπολογισμούς

οι οποίοι σχετίζονται όχι απλά με τον όγκο που καταλαμβάνουν τα ρευστά σε διάφορες συνθήκες αλλά με την ικανότητά τους να κινηθούν.

Το ιξώδες του πετρελαίου είναι μια πολύ σημαντική ιδιότητα για τα πετρελαϊκά ρευστά που επηρεάζει τη ροή τους μέσα σε σωληνώσεις και πορώδη μέσα. Ορίζεται ως η αντίσταση ενός ρευστού να ρέει και κυμαίνεται από 0.1 cp για πολύ ελαφριά πετρέλαια έως και 100 cp για τα πολύ βαριά. Αυστηρά μιλώντας, σε αντίθεση με το B_o και το R_s , δεν είναι ογκομετρική αλλά κινητική ιδιότητα του ρευστού.

Αποτελεί την πιο δύσκολη ιδιότητα ως προς τον υπολογισμό της με σχετική ακρίβεια, χρησιμοποιώντας συσχετίσεις. Μεταβάλλεται σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία, την πίεση, την πυκνότητα του πετρελαίου και του αερίου, τη διαλυτότητα του αερίου και τη σύσταση των επιφανειακών ρευστών. Το ιξώδες είναι συνήθως μια ιδιότητα που υπολογίζεται στα PVT εργαστήρια. Όταν αυτά δεν είναι διαθέσιμα, χρησιμοποιούνται συσχετίσεις για να το εκτιμήσουν και οι οποίες χωρίζονται σε δυο κατηγορίες: Αυτές που βασίζονται σε επιφανειακά PVT δεδομένα και αυτές που βασίζονται στη σύσταση του πετρελαίου. Επίσης, αναγνωρίζονται τρεις διαφορετικές κατηγορίες τιμών του ιξώδους ανάλογα με τις επικρατούσες συνθήκες: το ιξώδες του αργού πετρελαίου (συνθήκες επιφάνειας), το ιξώδες κορεσμένου πετρελαίου και το ιξώδες ακόρεστου (πίεση πάνω από το σημείο φυσαλίδας) πετρελαίου. Αποτελεί μια ιδιότητα που σχετίζεται κυρίως με τη ροή στον ταμιευτήρα, τη γεώτρηση και τις σωληνώσεις και δεν είναι σχετική με το αντικείμενο της παρούσας εργασίας, για αυτό δεν θα αναλυθεί περισσότερο.

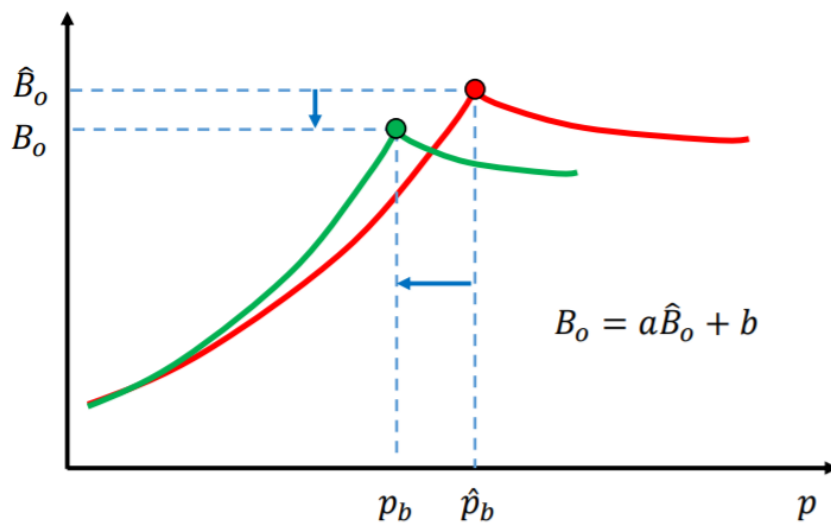
2.8. Ρύθμιση των συσχετίσεων (Tuning)

Το tuning, ή αλλιώς «ρύθμιση», της εκάστοτε επιλεγμένης συσχέτισης, είναι μία σημαντική προϋπόθεση για την παροχή ουσιαστικών και αξιόπιστων προβλέψεων των ιδιοτήτων των πετρελαϊκών ρευστών. Η βασική αρχή λειτουργίας του βασίζεται στην προσαρμογή των παραμέτρων της επιλεγμένης συσχέτισης με σκοπό την επιτυχή αντιστοίχισή τους ή «συντονισμό» τους με τα εργαστηριακά PVT δεδομένα. Τα λογισμικά που εμπεριέχουν την επιλογή της ρύθμισης, χρησιμοποιούν τις καμπύλες των συσχετίσεων που έχουν επιλεγθεί μαζί με τα εργαστηριακά δεδομένα PVT και στη συνέχεια παράγουν μία δεύτερη καμπύλη με τη βοήθεια γραμμικού μετασχηματισμού (automatic linear regression) ξεχωριστά για κάθε μία από τις ιδιότητες του πετρελαϊκού ρευστού. Οι μετασχηματισμένες καμπύλες ικανοποιούν τις πειραματικές μετρήσεις κι επομένως θεωρούνται ακριβέστερες από τις πρωτόλειες.

Για παράδειγμα, στην περίπτωση του B_o , αν η καμπύλη από τις συσχετίσεις είναι μια συνάρτηση της πίεσης της μορφής $\widehat{B}_o(\hat{p})$, με χρήση της τεχνικής της ρύθμισης αυτή θα μετασχηματιστεί σε:

$$B_o(p) = a\widehat{B}_o(\hat{p}) + b$$

Το λογισμικό προσδιορίζει τις βέλτιστες παραμέτρους a και b για τις διαθέσιμες συσχετίσεις όλων των συγγραφέων που έχουν επιλεγεί, ώστε να προσαρμόσει την πρωτόλεια καμπύλη όσο ακριβέστερα γίνεται στα πειραματικά δεδομένα. Μόλις ο υπολογισμός των παραμέτρων ολοκληρωθεί, επιλέγεται για κάθε ιδιότητα ξεχωριστά η συσχέτιση του συγγραφέα που υπέστη τη μικρότερη παραμόρφωση σε σχέση με τους άλλους, δηλαδή το a και το b θα πρέπει να έχουν τιμές όσο πιο κοντά γίνεται στο 1 και το 0 αντίστοιχα. Στο Διάγραμμα 2.11 φαίνεται ο τρόπος με τον οποίο γίνεται ο γραμμικός μετασχηματισμός για την καμπύλη του B_o . Η κόκκινη καμπύλη αναπαριστά την αρχική καμπύλη που προέκυψε από τις συσχετίσεις, ενώ η πράσινη αποτελεί τη μετασχηματισμένη με τη μέθοδο της ρύθμισης, η οποία αναπαριστά σωστά την πειραματικά μετρημένη τιμή p_b και $B_o(p_b)$.



Διάγραμμα 2.11: Σύγκριση καμπυλών B_o πριν και μετά την τεχνική της ρύθμισης (Γαγανής, 2021)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. Υπόγεια Ανάλυση Ρευστού

3.1. Εισαγωγή

3.1.1. Προσδιορισμός σύστασης με το εργαλείο YAP

Η Υπόγεια Ανάλυση Ρευστού (YAP) (Downhole Fluid Analysis - DFA) είναι μια τεχνολογία ανάλυσης του ρευστού που λαμβάνεται στον πυθμένα της γεώτρησης, πρακτικά σε συνθήκες ταμιευτήρα. Κατά αυτό τον τρόπο αποφεύγεται, έστω προσωρινά, η ανάγκη να ληφθεί δείγμα ρευστού που αποτελεί μια δύσκολη, χρονοβόρα και δαπανηρή διαδικασία.

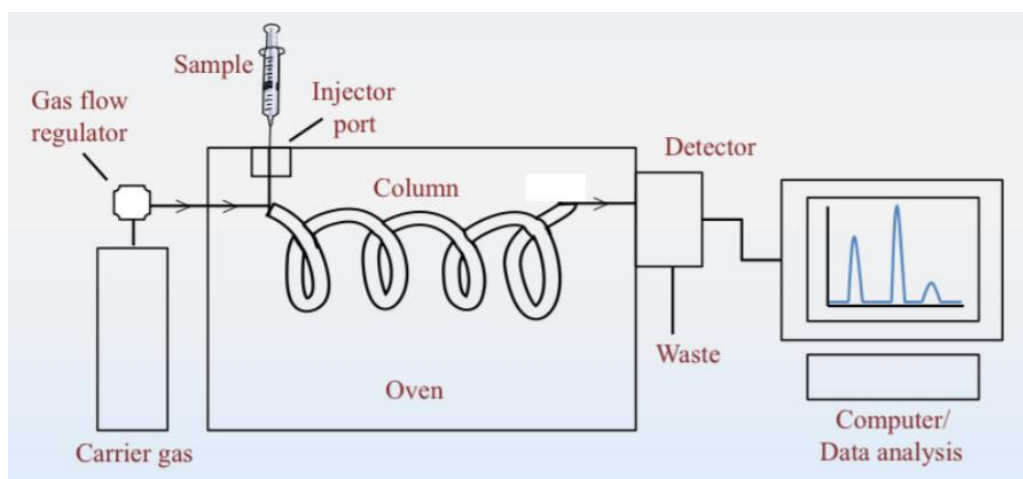
Η δειγματοληψία και η ανάλυση των ρευστών του ταμιευτήρα, από τα πρώτα κίολας στάδια της εκμετάλλευσης, παρέχει μεγάλης σημασίας πληροφορίες για τη διαχείριση του ταμιευτήρα. Πετρελαϊκές ιδιότητες, όπως αυτές που αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, είναι βασικές παράμετροι για το σχεδιασμό και τη βελτιστοποίηση της παραγωγής. Οι συμβατικές μέθοδοι εργαστηριακής ανάλυσης (CCE, DV) του ρευστού που γίνονται σε εργαστήρια PVT, απαιτούν πολύ χρόνο μέχρι να πραγματοποιηθεί η δειγματοληψία, να μεταφερθούν τα δείγματα στο εργαστήριο και να πραγματοποιηθούν οι αναλύσεις. Για το λόγο αυτό λοιπόν, η ανάλυση του πετρελαϊκού ρευστού σε πραγματικό χρόνο που προσφέρει η συγκεκριμένη τεχνολογία είναι ιδιαίτερα ωφέλιμη, καθώς δεν απαιτεί άντληση ρευστών προς δειγματοληψία και ανάλυση. Επίσης αποτελεί μία εναλλακτική λύση έναντι της επιφανειακής δειγματοληψίας καθώς η τελευταία καθίσταται ιδιαίτερα δύσκολη σε ανεπτυγμένα πεδία όπου οι ροές από διαφορετικές γεωτρήσεις συνενώνονται με αποτέλεσμα να μην μπορούν καν να απομονωθούν και να αναλυθούν ξεχωριστά.

3.1.2. Αέρια Χρωματογραφία GC

Πριν την εφαρμογή της τεχνολογίας YAP στην πετρελαϊκή βιομηχανία, μοναδικό τρόπο για την εκτίμηση της σύστασης των πετρελαϊκών ρευστών αποτελούσε παραδοσιακά η αέρια χρωματογραφία - gas chromatography (GC). Η ανάλυση σύστασης αναφέρεται γενικώς στον υπολογισμό και την κατανομή των υδρογονανθράκων και των άλλων ενώσεων που υπάρχουν στα δείγματα των πετρελαϊκών ρευστών. Η δυσκολία σε αυτή την ανάλυση έγκειται στο γεγονός ότι τα πετρελαϊκά ρευστά απαρτίζονται από χιλιάδες διαφορετικά συστατικά σε διαφορετικές συγκεντρώσεις. Η αέρια χρωματογραφία λοιπόν,

είναι μια τεχνική για το διαχωρισμό, την ταυτοποίηση και τον προσδιορισμό της συγκέντρωσης των διαφόρων ενώσεων μέσα σε ένα πετρελαϊκό μείγμα.

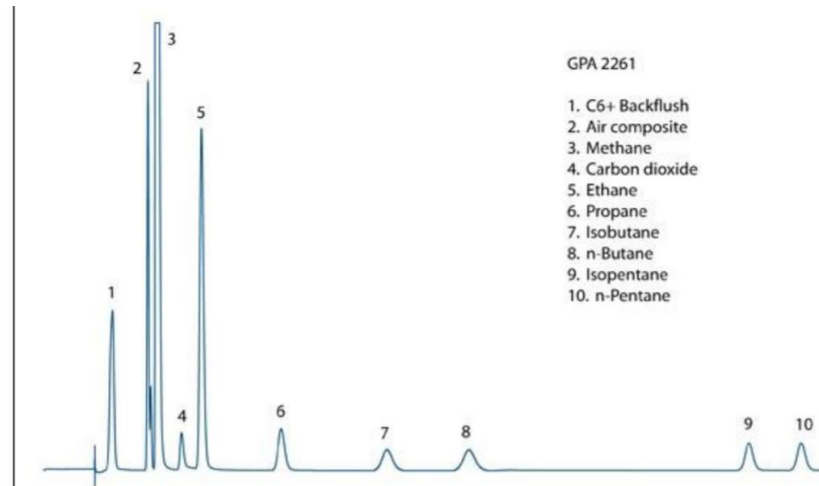
Η διαδικασία της αέριας χρωματογραφίας, όπως αυτή απεικονίζεται στην Εικόνα 3.1, είναι μια χρωματογραφική ανάλυση που χρησιμοποιείται στην μελέτη μειγμάτων υδρογονανθράκων των οποίων η σύσταση δεν επηρεάζεται από την εξάτμιση. Το πρώτο βήμα είναι η έγχυση του μείγματος με τη βοήθεια μιας μικροσύριγγας στη θύρα εισαγωγής, και στην περίπτωση που πρόκειται για υγρό υδρογονάνθρακα, η θέρμανση του πάνω από το σημείο βρασμού, ώστε να αεριοποιηθεί και να μπορέσει να αναλυθεί στον αέριο χρωματογράφο. Στη συνέχεια, με τη βοήθεια ενός αδρανούς αερίου όπως το ήλιο, το δείγμα ρέει μέσα στη σπειροειδή στήλη. Μέσα στη στήλη γίνεται ο διαχωρισμός των συστατικών, καθώς ανάλογα με το μέγεθος τους, τα μικρότερα και ελαφρύτερα συστατικά εξέρχονται πρώτα από τη χρωματογραφική στήλη, ενώ τα μεγαλύτερα και βαρύτερα συστατικά εξέρχονται τελευταία. Ο ανιχνευτής στην έξοδο της στήλης καταγράφει το χρόνο που εξήλθε το κάθε συστατικό, αλλά και τη μάζα του. Η μάζα των συστατικών καθορίζεται από την ποσότητα του CO₂ που εκλύθηκε μετά την καύση του, μόλις αυτά εξήλθαν από τη χρωματογραφική στήλη. Τέλος, από τον ανιχνευτή αποστέλλεται το σήμα στον υπολογιστή, όπου τα δεδομένα συγκεντρώνονται και απεικονίζονται σε διάγραμμα. Κάθε κορυφή στο διάγραμμα αντιστοιχεί σε ένα συστατικό και το εμβαδό της καμπύλης στη μάζα του συστατικού αυτού. Η έκφραση της σύστασης σε % mole επιτυγχάνεται κατόπιν της χρήσης πρότυπης μια καμπύλης βαθμονόμησης δειγμάτων γνωστής σύστασης.



Εικόνα 3.1: Σχηματική απεικόνιση των μηχανημάτων της αέριας χρωματογραφίας (Γαγάνης, 2021)

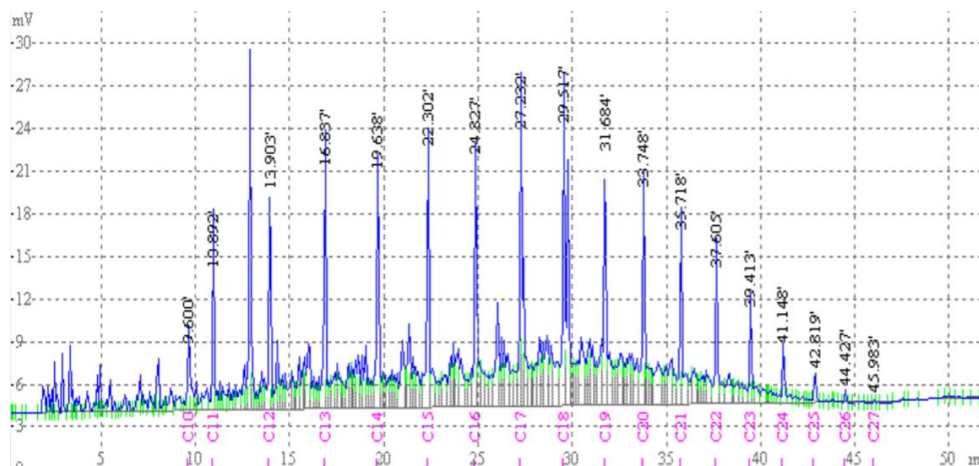
Στο Διάγραμμα 3.1 παρουσιάζεται η χρωματογραφική ανάλυση ενός ξηρού αερίου, όπως το αέριο τανκ ενός πετρελαϊκού μίγματος. Στην προκειμένη περίπτωση, το διάγραμμα

είναι ευανάγνωστο αφού η καμπύλη του κάθε συστατικού είναι ευκρινής, δεν υπάρχουν αλληλεπικαλύψεις και μπορεί να υπολογιστεί με ευκολία η μάζα του.



Διάγραμμα 3.1: Καμπύλες αέριας χρωματογραφίας συστατικών ξηρού αερίου (Γαγάνης, 2021)

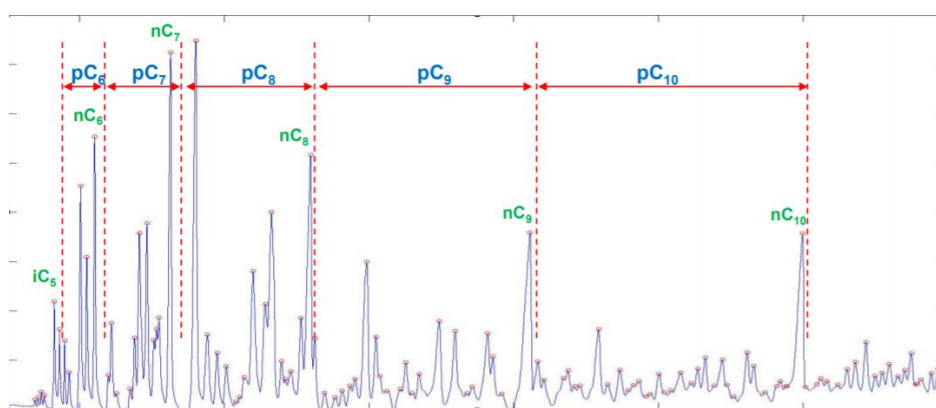
Στην περίπτωση όμως που το δείγμα είναι υγρό, η αέρια χρωματογραφία είναι πολύ πιο σύνθετη. Αυτό συμβαίνει γιατί το υγρό περιέχει εκατοντάδες διαφορετικά συστατικά, τα οποία είναι πολύ δύσκολο να διαχωριστούν και να αναπαρασταθούν σε ένα ευκρινές διάγραμμα. Η πολυπλοκότητα των διαγραμμάτων αυτών παρατηρείται χαρακτηριστικά στο Διάγραμμα 3.2 όπου απεικονίζονται οι καμπύλες των συστατικών ενός υγρού δείγματος.



Διάγραμμα 3.2: Καμπύλες αέριας χρωματογραφίας συστατικών πετρελαίου (Γαγάνης, 2021)

Το Διάγραμμα 3.3 είναι ένα παρόμοιο διάγραμμα με το παραπάνω, που όμως είναι μεγεθυμένο τόσο ώστε να διακρίνονται και οι μικρότερες κορυφές ανάμεσα στις μεγαλύτερες. Τα μόρια των υδρογονανθράκων ευθείας αλυσίδας (C_7 , C_8 , C_9 ,...) αντιστοιχούν στο διάγραμμα με στις υψηλές καμπύλες, αφού η μάζα τους είναι κατά

κανόνα η μεγαλύτερη από κάθε άλλο ισομερές. Όλες οι υπόλοιπες μικρότερες καμπύλες που προηγούνται της μεγάλης καμπύλης αποτελούνται από ισομερή του ίδιου υδρογονάνθρακα, έχουν δηλαδή τα ίδια άτομα άνθρακα, με διαφορετικούς όμως δεσμούς και διάταξη. Καθώς λοιπόν είναι αδύνατον να προσδιοριστούν όλες οι ενδιάμεσες καμπύλες ξεχωριστά, υπολογίζεται η μάζα για όλες τις καμπύλες μαζί ώστε να αποτελέσει την μάζα ενός συστατικού που θα συμπεριλαμβάνει το κανονικό μόριο του υδρογονάνθρακα (ευθεία αλυσίδα) καθώς και όλα τα ισομερή του. Προφανώς αυτό το μόριο δεν υφίσταται στην πραγματικότητα ως ένα συστατικό, και για αυτό πριν την ονομασία του προστίθεται το συνθετικό –ψεύδο (π.χ. όλα τα συστατικά που έχουν 9 άτομα άνθρακα θα θεωρηθούν ως ένα συστατικό που θα ονομάζεται ψεύδο-C₉).



Διάγραμμα 3.3: Καμπύλες συστατικών πετρελαίου με τα ισόμερη του κάθε στοιχείου (Γαγάνης, 2021)

Δυστυχώς είναι αδύνατο υπολογιστεί η μάζα ακόμα και για κάθε ψεύδο-στοιχείο αφού όπως αναφέρθηκε τα συστατικά του πετρελαίου συνήθως ξεπερνούν τα εκατό. Ανάλογα λοιπόν με την ποιότητα της ανάλυσης του δείγματος επιλέγεται ένας αριθμός ατόμων άνθρακα, όπου πάνω από αυτόν όλα τα συστατικά ομαδοποιούνται σε ένα, και κατά συνέπεια υπολογίζονται συνολικά οι μάζες τους. Το συστατικό αυτό ονομάζεται βαρύ κλάσμα, συμβολίζεται με το C_{n+} όπου n είναι ο αριθμός ατόμων άνθρακα που επιλέχθηκε.

3.1.3. Το εργαλείο YAP

Είναι προφανές πως τα εργαλεία YAP δεν μπορούν έχουν τις ίδιες δυνατότητες ανάλυσης της σύστασης σε σχέση με έναν αέριο χρωματογράφο στο εργαστήριο. Δίνουν όμως άμεσα μια πρώτη εικόνα και αυτός είναι και ο βασικότερος λόγος που έχουν ευρεία χρήση στην πετρελαϊκή βιομηχανία.

Τα πρώτα εργαλεία YAP ήταν σε θέση να ξεχωρίζουν επαρκώς το νερό, το πετρέλαιο, και το αέριο μέσα στο ρευστό (Smits et al., 1995), καθώς αυτό αντλούταν από τον ταμιευτήρα.

Τα επομένης γενιάς εργαλεία ΥΑΡ είχαν τη δυνατότητα φιλτραρίσματος του «θορύβου» που πρόσθετε η πιθανή ύπαρξη πολφού με βάση το πετρέλαιο (oil-based mud OBM) (Mullins and Shroer, 2000) και να προσδιορίζουν το GOR (Mullins et al., 2001). Αργότερα αναπτύχθηκαν εργαλεία, τα οποία είχαν τη δυνατότητα ποσοτικοποίησης της σύστασης του πετρελαϊκού ρευστού, αρχικά σε επίπεδο ομάδων C₁, C₂₋₅, C₆₊ και CO₂ (Fujisawa et al., 2002). Το 2008 οι Dong et al παρουσίασαν ένα νέο εργαλείο ΥΑΡ που αύξησε τον αριθμό των ομάδων κατά μια σε C₁, C₂, C₃₋₅, C₆₊ και CO₂, ενώ το 2015 οι Indo et al περιέγραψαν τη μεθοδολογία για την ομαδοποίηση της σύστασης του πετρελαίου σε C₁, C₂, C₃, C₄, C₅, C₆₊ και CO₂.

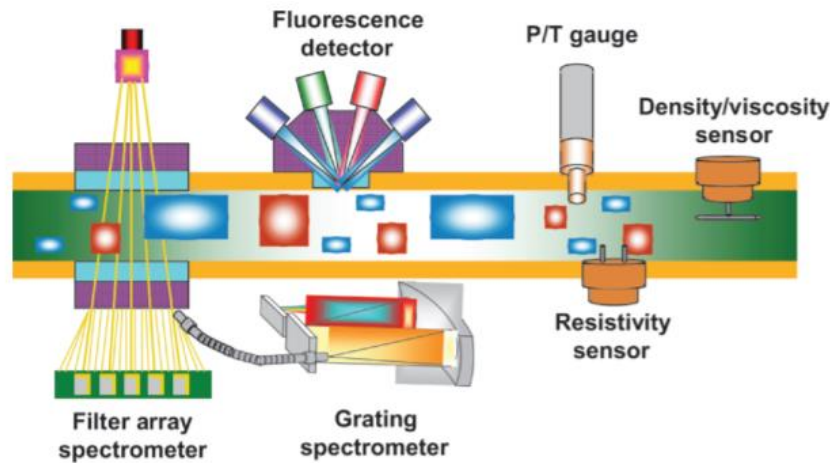
Τα δυο τελευταία εργαλεία των Dong et al (2008) και των Indo et al (2015) που αναφέρθηκαν βασίζονται στην φασματομέτρα ορατού-εγγύς υπέρυθρου (visible-near-infrared spectrometry NIR). Η φασματομέτρα NIR έχει αποδειχτεί πως είναι εξαιρετικά αποτελεσματική στην τεχνολογία ΥΑΡ. Η τεχνολογία αυτή βασίζεται στο ότι η διαφορετική μοριακή δομή των διαφόρων τύπων υδρογονανθράκων προκαλεί απορρόφηση των δονήσεων σε διαφορετικό μήκος κύματος.

Στη συνέχεια του κεφαλαίου αυτού θα αναλυθούν τα ΥΑΡ εργαλεία των Dong et al και Indo et al παραθέτοντας βασικές αρχές λειτουργίας τους, στοιχεία σχετικά με την αποτελεσματικότητά τους καθώς και τη σχέση της μηχανικής εκμάθησης και ειδικότερα των νευρωνικών δικτύων με την ΥΑΡ.

3.2. Αρχές λειτουργίας

3.2.1. Εργαλεία και αισθητήρες

Τα νέας γενιάς εργαλεία ΥΑΡ έχουν ενσωματωμένους πολλαπλούς αισθητήρες συμπεριλαμβανομένων δυο φασματομέτρων, ενός αισθητήρα φθορισμού, ενός μετρητή πίεσης και θερμοκρασίας, ενός αισθητήρα ηλεκτρικής αντίστασης και ενός αισθητήρα για τη μέτρηση του ιξώδους και της πυκνότητας του ρευστού. Στην Εικόνα 3.2 παρουσιάζεται η διάταξη του εργαλείου ΥΑΡ των Dong et al κατά μήκος της ροής στη γεώτρηση.



Εικόνα 3.2: Σχηματική αναπαράσταση του εργαλείου YAP (Dong et al, 2008)

Τα δυο φασματόμετρα, το φασματόμετρο συστοιχίας φίλτρων (Filter Array - FA) και το φασματόμετρο με φράγμα περίθλασης (Grating spectrometer - GR) μοιράζονται το ίδιο οπτικό κελί, καλύπτουν όμως διαφορετικά μήκη κύματος. Τα 20 κανάλια του FA φασματόμετρου έχουν εύρος από 400 nm έως 2,100 nm. Αυτά είναι που καθορίζουν το χρώμα του ρευστού ανάλογα με τη διέγερση δονητικών καταστάσεων στα μόρια του και εντοπίζουν τις μεγαλύτερες απορροφήσεις των φωτονίων από το νερό και το CO₂. Το φασματόμετρο GR εξειδικεύεται σε μήκη κύματος από 1,600nm έως 1,800nm και χρησιμοποιεί 16 κανάλια. Σε αυτό το εύρος το πετρελαϊκό ρευστό έχει χαρακτηριστικές απορροφήσεις που αντιπροσωπεύουν τις διάφορες μοριακές δομές του. Αυτό το φάσμα απορρόφησης της υπέρυθρης ακτινοβολίας χρησιμοποιείται για να προσδιορίσει τη σύσταση του μείγματος, το ποσοστό σε CO₂, το R_s, το ποσοστό σε νερό και το pH του και τον πιθανό βαθμό επιμόλυνσης από τον πολφό διάτρησης της γεώτρησης (oil mud contamination level).

Ο αισθητήρας φθορισμού έχει 3 κανάλια μετρήσεων, 1 αντανάκλασης και 2 φθορισμού. Η κύρια λειτουργία του είναι να εντοπίζει φυσαλίδες αερίου και να ταυτοποιεί τον τύπο του ρευστού και τη φάση στην οποία βρίσκεται.

Οι μετρήσεις για την πυκνότητα και το ιξώδες λαμβάνονται ανάλογα με τα χαρακτηριστικά συντονισμού του δονούμενου αισθητήρα. Έχουν αναπτυχθεί ειδικά μοντέλα για να μεταφράσουν τη συχνότητα συντονισμού του αισθητήρα σε πυκνότητα και ιξώδες.

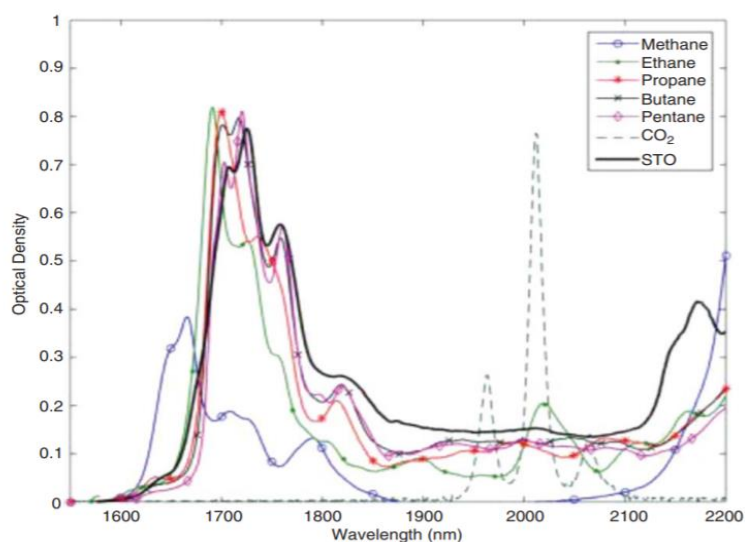
Η ηλεκτρική αντίσταση και ο μετρητής πίεσης και θερμοκρασίας είναι ο κλασικός που λαμβάνει τα δεδομένα διαγραφιών (loggings) αναλύει και επεξεργάζεται κατά την όρυξη

της γεώτρησης. Η ενσωμάτωση των αισθητήρων επιτρέπει στο εργαλείο να γνωρίζει ανά πάσα στιγμή την πίεση και τη θερμοκρασία και ανάλογα να προσδιορίζει τις ιδιότητες του ρευστού και την πιθανή φάση του (αέρια, υγρή φάση).

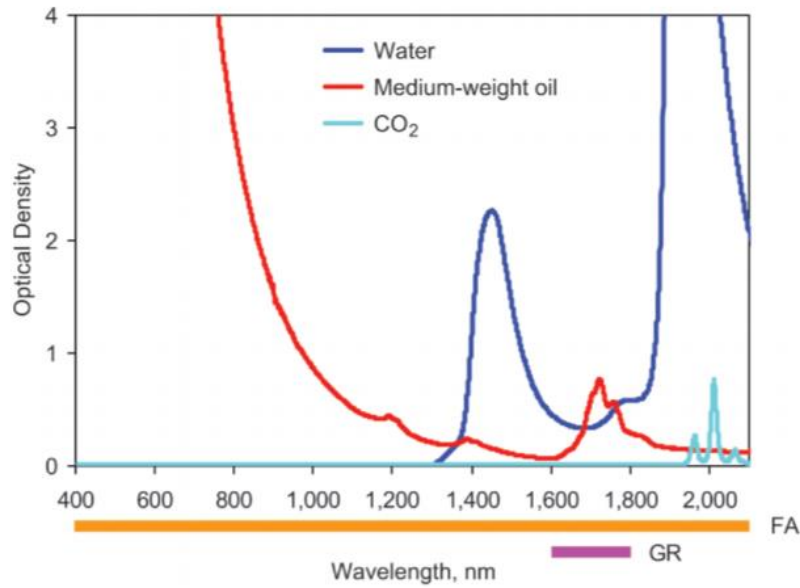
3.2.2. Οπτική πυκνότητα – Optical Density (OD)

Η απορρόφηση της NIR ακτινοβολίας από τους υδρογονάνθρακες συμβαίνει κυρίως λόγω των μοριακών δεσμών υδρογόνου-άνθρακα (C-H). Ωστόσο, ανάλογα με τη μοριακή δομή των υδρογονανθράκων, οι απορροφήσεις διαφέρουν. Τα μόρια του μεθανίου έχουν τέσσερις ομοιοπολικούς C-H δεσμούς. Άλλοι ελαφριοί υδρογονάνθρακες, όπως το αιθάνιο και το προπάνιο απαρτίζονται συνήθως από μεθυλενομάδα $-CH_3$ ενώ μόρια βαρύτερων υδρογονανθράκων ανήκουν σε μεθυλιδενομάδα $-CH_2$ και σπανιότερα σε μεθυλενομάδα $-CH_3$. Λόγω λοιπόν των διαφορετικών δεσμών ανάμεσα στα μόρια του υδρογόνου και του άνθρακα, το φάσμα απορρόφησης της ακτινοβολίας είναι διαφορετικό για κάθε συστατικό του πετρελαϊκού ρευστού. Στο Διάγραμμα 3.4 απεικονίζονται τα διαφορετικά φάσματα απορρόφησης ακτινοβολίας για διαφορετικές ενώσεις που περιέχονται στους υδρογονάνθρακες.

Τα μόρια του νερού έχουν δυο ομοιοπολικούς δεσμούς υδρογόνου-οξυγόνου και τα μόρια του CO_2 δύο διπλούς ομοιοπολικούς δεσμούς οξυγόνου-άνθρακα. Γι' αυτό και οι καμπύλες τους διαφέρουν πολύ από του πετρελαίου όπως παρατηρείται και στο Διάγραμμα 3.5.



Διάγραμμα 3.4: Φάσματα οπτικής απορρόφησης ελαφριών συστατικών υδρογονανθράκων και σταθεροποιημένου πετρελαίου (Indo et al, 2015)



Διάγραμμα 3.5: Φάσματα οπτικής απορρόφησης νερού, πετρελαίου και CO₂ (Dong et al, 2008)

Στον άξονα x των διαγραμμάτων βρίσκονται τα μήκη κύματος στο φάσμα της εγγύς-υπέρυθρου ακτινοβολίας και στον άξονα y βρίσκεται η οπτική πυκνότητα (optical density - OD), μια αδιάστατη μονάδα μέτρησης η οποία μετράει σε λογαριθμική κλίμακα τον λόγο της έντασης του προσπίπτοντος φωτός προς την ένταση του διερχόμενου φωτός, δηλαδή αυτού που απορροφήθηκε από το ρευστό, σε συγκεκριμένο μήκος κύματος. Σύμφωνα με τον νόμο του Beer-Lambert (Fujisawa et al. 2002, Mullins et al. 2000), η οπτική πυκνότητα είναι ανάλογη της συγκέντρωσης κατά μάζα των συστατικών του ρευστού που εξετάζεται και ανάλογη της διαδρομής που το παραγόμενο φως διανύει. Μαθηματικά αυτό εκφράζεται ως:

$$x(\lambda) = -\log[T(\lambda)] = l \sum_k a_k(\lambda) \rho_k \quad (3.1)$$

όπου

λ = μήκος κύματος σε nm

x = οπτική πυκνότητα

T = διαπερατότητα

l = απόσταση της διαδρομής του φωτός σε m

a_k = γραμμομοριακή απορροφητικότητα ή συντελεστής απόσβεσης σε m²/kg

k = πλήθος συστατικών στο ρευστό

ρ_k = συγκέντρωση κατά μάζα σε kg/kg

Ο συντελεστής απόσβεσης α_k είναι ιδιότητα των συστατικών του μείγματος εξαρτώμενη από το μήκος κύματος της ακτινοβολίας και στην ουσία δηλώνει πόσο φως απορροφάται από το συγκεκριμένο συστατικό, ενώ η διαπερατότητα T αναφέρεται στο κλάσμα του φωτός που διέρχεται από το δείγμα και έχει εύρος από 0 – 1. Στην Εξίσωση 3.1 θεωρείται επίσης πως τα συστατικά k του ρευστού είναι πλήρως αναμίξιμα.

Μελετώντας καμπύλες οπτικής πυκνότητας των δομικών στοιχείων των υδρογονανθράκων όπως το μεθάνιο, το αιθάνιο, το προπάνιο κ.α. σε διαγράμματα όπως το 3.4 αντλούνται πληροφορίες για τη σύσταση του πετρελαϊκού ρευστού. Ο λόγος που χρησιμοποιούνται αυτές οι καμπύλες αντί των σταθεροποιημένων πετρελαίων είναι πως, οι καμπύλες που προκύπτουν από τις οπτικές πυκνότητες των σταθεροποιημένων πετρελαίων έχουν ελάχιστες διαφορές μεταξύ τους, με εξαιρούμενες ελάχιστες περιπτώσεις. Συγκεκριμένα, υπάρχει μια γραμμική εξάρτηση μεταξύ του φάσματος οπτικής απορρόφησης που μετρήθηκε και της σύστασης του μείγματος υδρογονανθράκων της μορφής:

$$y = xB \quad (3.2)$$

όπου

y = διάνυσμα της συγκέντρωσης κατά μάζα των συστατικών $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_{6+}$ και CO_2 για το υπό εξέταση πετρελαϊκό μείγμα

x = διάνυσμα γραμμής για το μετρούμενο φάσμα οπτικής απορρόφησης

B = ο πίνακας αντιστοίχισης - mapping matrix, που δημιουργήθηκε βαθμονομώντας μια βάση δεδομένων πετρελαϊκών ρευστών που περιείχε πληροφορίες και για τη σύσταση και για το φάσμα απορρόφησης

Η επί τοις εκατό συγκέντρωση κατά μάζα των επιμέρους συστατικών μπορεί να υπολογιστεί διαιρώντας τη συγκέντρωση κατά μάζα ενός συστατικού με το άθροισμα τους.

Η μαθηματική έκφραση που την περιγράφει είναι:

$$y_{i,c} = \frac{\rho_i}{\rho_c} = \frac{\omega_i}{\omega_c}$$

όπου

$y_{i,c}$ = επί τοις εκατό συγκέντρωση κατά μάζα ενός συστατικού

ρ_i = συγκέντρωση κατά μάζα του συστατικού i σε kg/m^3

ρ_c = το σύνολο της μάζας ρευστού σε kg/m^3

ω_i = ρ_i/ρ_c

ω_c = 1

Από ταμειυτήρα σε ταμειυτήρα υπάρχουν μεγάλες διαφορές σχετικά με τη σύσταση του ρευστού. Στη βάση δεδομένων που περιέχει πληροφορίες για τη σύσταση και το φάσμα απορρόφησης διαφόρων πετρελαϊκών ρευστών, ο τύπος του ρευστού ορίζεται ανάλογα με το διάγραμμα φάσης (διάγραμμα p-T) που προκύπτει από τα PVT πειράματα. Θεωρώντας τους τρεις βασικούς τύπους πετρελαϊκών ρευστών, δηλαδή αέριο (gas), αέριο συμπύκνωμα (gas condensates) και πετρελαίου (black oil), θα απαιτούνται κατ' επέκταση, τρεις διαφορετικοί πίνακες αντιστοίχισης για τη βέλτιστη εκτίμηση της σύστασης, ένας για κάθε τύπο μείγματος υδρογονανθράκων.

Το πρώτο βήμα για τον προσδιορισμό της σύστασης του πετρελαϊκού μείγματος πραγματοποιείται μόλις το φασματόμετρο λάβει τα πρώτα δεδομένα για την οπτική απορρόφηση σε συγκεκριμένο μήκος κύματος του υλικού που ρέει μέσα στο εργαλείο ΥΑΡ. Τα δεδομένα αυτά για την οπτική πυκνότητα του υλικού προκύπτουν από τον υπολογισμό της διαπερατότητας T σε συγκεκριμένο μήκος κύματος όπως αναφέρθηκε προηγουμένως. Στη συνέχεια, οι οπτικές πυκνότητες διορθώνονται για να αντισταθμίσουν τις επιδράσεις που έχει η θερμοκρασία στον ανιχνευτή του φασματόμετρου και στην πηγή της ακτινοβολίας αλλά και για την επίδραση της εσφαλμένης οπτικής ευθυγράμμισης (misalignment).

Δυο είναι οι σημαντικότερες συνθήκες που επηρεάζουν δυσμενώς την εκτίμηση της σύστασης:

- η παρουσία σημαντικής ποσότητας νερού στη γεώτρηση και οι εκτός κλίμακας (πάρα πολύ υψηλές τιμές) της οπτικής πυκνότητας. Η απορρόφηση της ακτινοβολίας που προκαλείται από τεράστιους όγκους νερού μπορεί να αποκρύψει τις καμπύλες των άλλων στοιχείων στο διάγραμμα της οπτικής απορρόφησης. Για το λόγο αυτό, η ροή μεγάλων όγκων νερού μέσα από το εργαλείο ΥΑΡ μπορεί να μειώσει κατά πολύ την ποιότητα των δεδομένων, που με τη σειρά της θα οδηγήσει σε μειωμένης ακρίβειας υπολογισμούς της σύστασης του πετρελαϊκού ρευστού.
- Η παρουσία σωματιδίων όπως αυτά που περιέχονται στους πολφούς, σε άμμο και σε γαλακτώματα, τα οποία προκαλούν σκέδαση του φωτός όταν αυτό προσκρούει

σε αυτά. Όλα αυτά τα συστατικά ανεβάζουν το φάσμα της οπτικής απορρόφησης στο σύνολό του, δίνοντας τιμές οπτικής πυκνότητας που υπερβαίνουν το όριο που μπορεί να μετρήσει το φασματοόμετρο, καθιστώντας το πλέον αναξιόπιστο.

Σε περίπτωση που υπάρχει μεγάλη ποσότητα νερού στον δειγματολήπτη ή παρουσιαστούν εκτός κλίμακας τιμές οπτικής πυκνότητας, η πειραματική διαδικασία τερματίζεται.

Μόλις επιβεβαιωθεί η εγκυρότητα της οπτικής πυκνότητας, τα δεδομένα φιλτράρονται (Savitzky and Golay 1964), εκτιμάται ο θόρυβος που προέκυψε και υπολογίζεται η συνδιακύμανση (covariance) του θορύβου μεταξύ των διαφόρων μηκών κύματος στο χρονικό διάστημα που έγινε το φιλτράρισμα. Η τελευταία χρησιμοποιείται αργότερα κατά τους υπολογισμούς της στατιστικής αβεβαιότητας της σύστασης.

Στη συνέχεια, αντιστοιχείται το φάσμα απορρόφησης του δείγματος με τον κατάλληλο από τους τρεις πίνακες, του αερίου, του αέριου συμπυκνώματος ή του μαύρου πετρελαίου, όπως προαναφέρθηκε. Ο αλγόριθμος επιλέγει αυτόματα τον πίνακα αντιστοίχισης **B** από την Εξίσωση 3.2 που εκτιμά πως αυτό έχει τις περισσότερες πιθανότητες να ταιριάζει με το φάσμα απορρόφησης της δειγματοληψίας, ταυτοποιώντας έτσι τον τύπο του ρευστού που μελετάται. Χρησιμοποιώντας την Εξίσωση 3.2 υπολογίζονται οι επί τοις εκατό περιεκτικότητες των συστατικών του δείγματος C_1 , C_2 , C_3 , C_4 , C_5 , C_{6+} και CO_2 .

Με τη βοήθεια ενός αλγορίθμου Τεχνικού Νευρωνικού Δικτυού (ΤΝΔ) - Artificial Neural Network (AAN) (Hegeman et al. 2007) δίνεται η δυνατότητα να προσδιοριστεί και το GOR του συγκεκριμένου ρευστού. Εκτενέστερη ανάλυση για τα νευρωνικά δίκτυα και τη χρήση τους στην τεχνολογία YAP θα γίνει στην συνέχεια του κεφαλαίου.

3.2.3. Βαθμονόμηση των πινάκων αντιστοίχισης **B**

Οι πίνακες αντιστοίχισης **B** για τους αέριους υδρογονάνθρακες, τα αέρια συμπυκνώματα και τα μαύρα πετρέλαια προέκυψαν από γραμμική παλινδρόμηση (linear regression) με τη μέθοδο των μερικών ελαχίστων τετραγώνων (partial least squares) με. Εφαρμόστηκε στις τιμές μιας βάσης δεδομένων από πετρελαϊκές ιδιότητες, οι οποίες ήταν χωρισμένες σε ομάδες ανάλογα με τον τύπο του ρευστού. Η βάση δεδομένων αποτελούταν από περίπου 500 διαγράμματα φασμάτων οπτικής απορρόφησης από πετρελαϊκά μείγματα ευρείας γκάμας σε ποικίλες θερμοκρασίες (μέχρι 347 °F) και πιέσεις (μέχρι 25,000 psi) με τις αντίστοιχες επί τοις εκατό κατά μάζα συστάσεις και τις PVT ιδιότητες τους. Η βάση δεδομένων έχει κανονικοποιηθεί γιατί η σχέση της οπτικής πυκνότητας με την σύσταση

του ρευστού δεν είναι γραμμική αλλά εξαρτάται από την πίεση και τη θερμοκρασία στην οποία έγινε η μέτρηση.

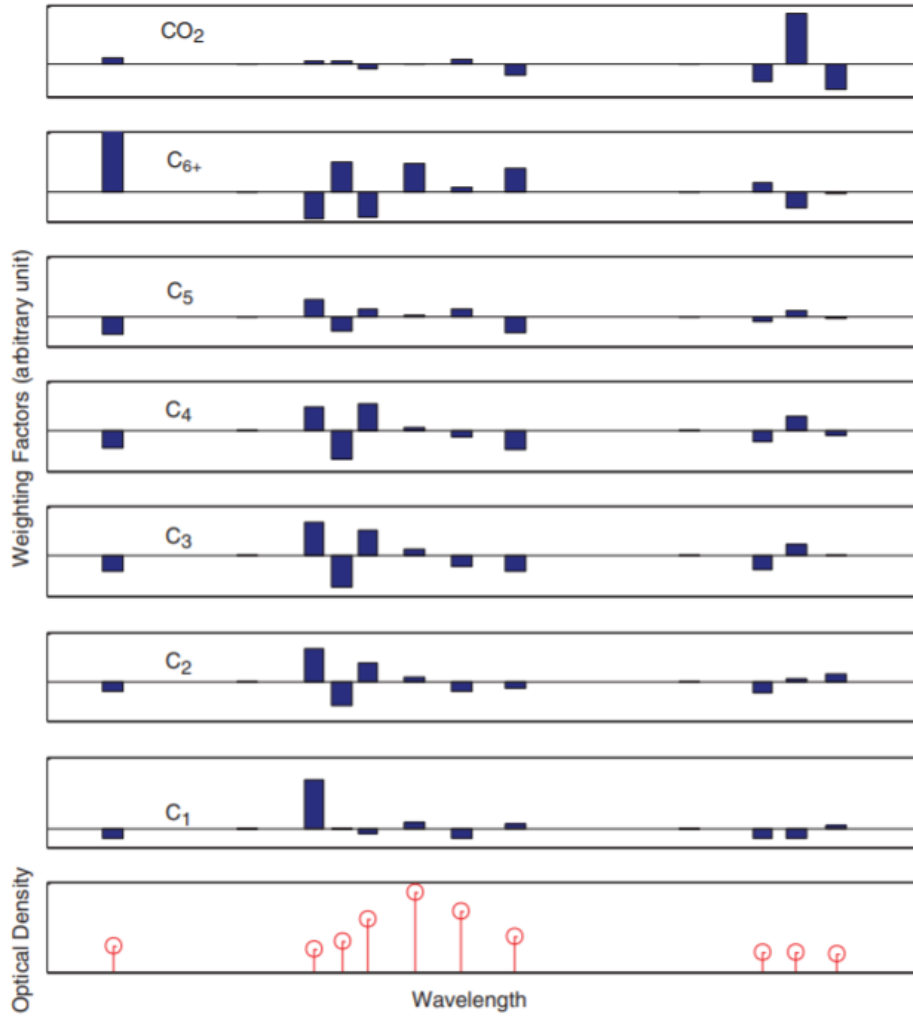
Στον τελευταίο πίνακα του Διαγράμματος 3.6 απεικονίζεται η οπτική πυκνότητα ενός πετρελαίου για μήκη κύματος από 1,500 έως 2,100nm. Στους υπόλοιπους επτά πίνακες αναπαριστώνται γραφικά οι στήλες του πίνακα αντιστοίχισης για το πετρέλαιο που προέκυψε από τη βάση δεδομένων. Παρατηρείται πως η τιμή του πίνακα αντιστοίχισης για το C₁ έχει τον υψηλότερο συντελεστή βαρύτητας, περίπου στα 1,650 nm, εκεί ακριβώς που σχηματίζεται και η κορυφή της καμπύλης του C₁ στο Διάγραμμα 3.4. Το ίδιο συμβαίνει και με το CO₂ στα 2,010 nm ανατρέχοντας πάλι στο Διάγραμμα 3.4. Οι συντελεστές βαρύτητας των C₂, C₃, C₄, C₅ ακολουθούν παρόμοια μοτίβα μεταξύ τους, αλλά οι τιμές και τα πρόσημα τους είναι εντελώς διαφορετικά. Ο συντελεστής βαρύτητας του C₆₊ έχει την υψηλότερη τιμή του στο χαμηλότερο μήκος κύματος του διαγράμματος, παρόλη τη χαμηλότερη απορρόφηση από τη μεθυλενομάδα -CH₂ σε αυτό το μήκος κύματος. Η υψηλή τιμή του συντελεστή βαρύτητας προκύπτει από τα βαριά μόρια όπως τα ασφαλτένια, που περιέχονται στο C₆₊ κλάσμα.

Η συγκέντρωση κατά μάζα κάθε συστατικού *i* του μείγματος υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας τη μετρημένη από το εργαλείο YAP οπτική πυκνότητα για συγκεκριμένο μήκος κύματος με τον συντελεστή βαρύτητας του συστατικού *i* για το ίδιο μήκος κύματος και τελικά αθροίζοντας τα γινόμενα για όλα τα μήκη κύματος.

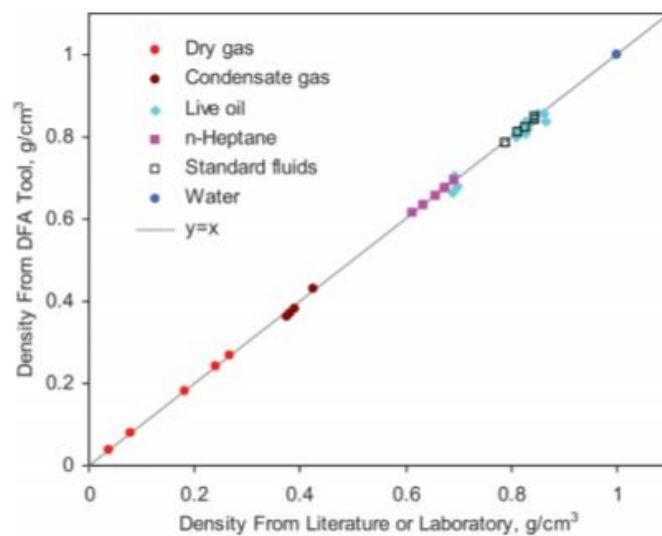
3.3. Σύγκριση της αποτελεσματικότητας της μεθόδου YAP με τις συμβατικές μεθόδους εκτίμησης σύστασης

Εργαλείο YAP των Dong et al, 2008

Προτού το εργαλείο YAP χρησιμοποιηθεί για μετρήσεις στο πεδίο, έγινε μια σειρά από εκτενείς πειραματικές μετρήσεις ώστε να διαπιστωθεί η απόδοση και η ακρίβειά του. Ανάμεσα σε άλλες δοκιμές για την αποτελεσματικότητα του εργαλείου ήταν και οι μετρήσεις πυκνότητας σε σύγκριση με τις διαθέσιμες εργαστηριακές τιμές της βιβλιογραφίας. Τα δεδομένα για την πυκνότητα περιελάμβαναν πληροφορίες για ξηρά αέρια σε πιέσεις από 1,000 έως 10,000 psi, αέρια συμπυκνώματα, μαύρα πετρέλαια, νερό και άλλα πετρελαϊκά ρευστά. Στο Διάγραμμα 3.7 παρατηρείται η εξαιρετικά μεγάλη ακρίβεια των μετρήσεων για όλους τους τύπους που εξεταστήκαν, αφού η μέγιστη απόκλιση της πυκνότητας ήταν μόλις 0.01 gr/cm³ (10kg/m³).

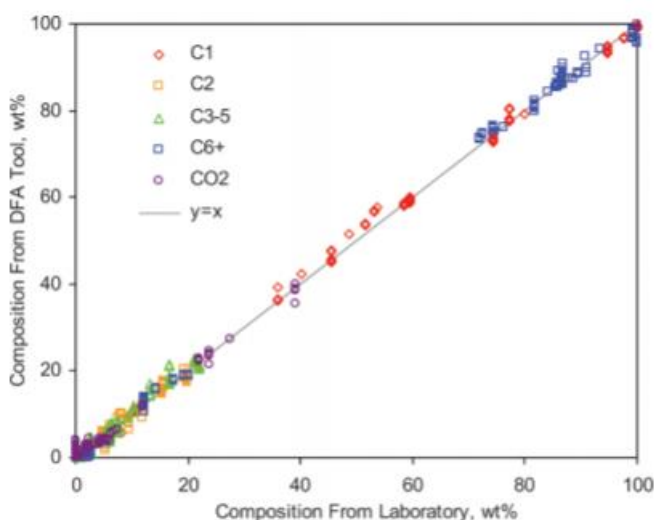


Διάγραμμα 3.6: Ο πίνακας αντιστοίχισης B για το πετρέλαιο και οπτική πυκνότητα συναρτήσει του μήκος κύματος του αργού πετρελαίου που αναλύθηκε (κάτω panel). (Indo et al, 2015)



Διάγραμμα 3.7: Μετρήσεις πυκνότητας από το εργαλείο YAP (Dong et al, 2008)

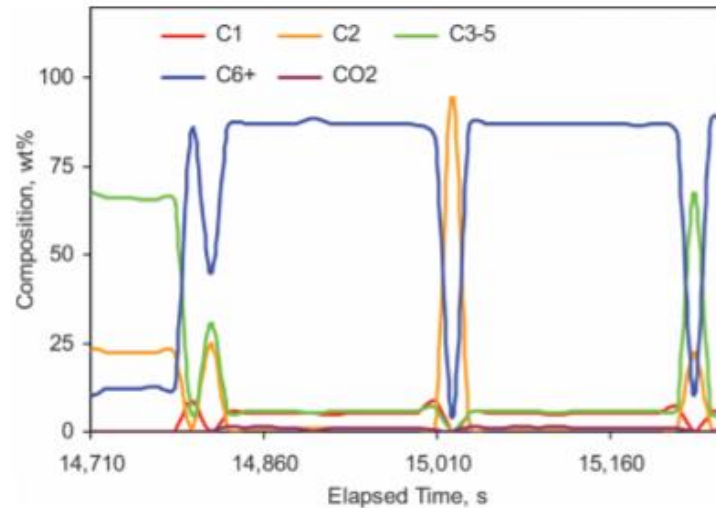
Η αξιολόγησή του στην ακρίβεια μέτρησης της σύστασης των ρευστών παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 3.8. Τα ρευστά που ελέγχθηκαν περιείχαν πληροφορίες για ξηρά αέρια, υγρά συμπυκνώματα και πετρέλαια με GOR από 250 scf/stb έως 2,000 scf/stb. Το ποσοστό του CO₂ κυμαινόταν από 0% έως και 40%. Παρόλη τη μεγάλη γκάμα ρευστών που εξεταστήκαν οι μετρήσεις του εργαλείου ήταν σε μεγάλη συμφωνία με τις εργαστηριακές μετρήσεις.



Διάγραμμα 3.8: Μετρήσεις σύστασης από το εργαλείο YAP (Dong et al, 2008)

Στη συνέχεια δοκιμάστηκε η αποτελεσματικότητα του εργαλείου YAP των Dong et al σε συνθήκες πεδίου. Έγιναν μετρήσεις σε ταμειυτήρες διαφορετικών γεωγραφικών περιοχών, με διαφορετικής σύστασης πολφούς και σε ρευστά διαφορετικής φάσης. Οι δοκιμές αυτές είχαν σαν σκοπό να παρουσιάσουν τις εφαρμογές του στη βιομηχανία και να απεικονίσουν πώς το εργαλείο YAP βελτιστοποιεί τη δειγματοληψία και σκιαγραφεί το προφίλ του ταμειυτήρα σε πραγματικό χρόνο.

Μια από αυτές τις μετρήσεις έγινε σε ταμειυτήρα πετρελαίου σε γεώτρηση με πολφό βασισμένο σε νερό (water based mud - WBM) στην περιοχή της Βόρειας Θάλασσας. Στο Διάγραμμα 3.9 παρουσιάζεται η σύσταση του ρευστού. Πολλές φορές ένα τέτοιο διάγραμμα συνοδεύεται με τη σήμανση για την ποιότητα της μέτρησης κατά τη διάρκεια της δειγματοληψίας. Η σήμανση ποιότητας (quality flag) λαμβάνει υπόψη παράγοντες όπως την ποσότητα του νερού τη δεδομένη χρονική στιγμή και τη σκέδαση του φωτός. Για παράδειγμα αν η ποσότητα του νερού ήταν μεγάλη ο βαθμός εμπιστοσύνης για τον υπολογισμό της σύστασης μειώνεται.



Διάγραμμα 3.9: Σύσταση ρευστού από την περιοχή της Βόρειας Θάλασσας (Dong et al, 2008)

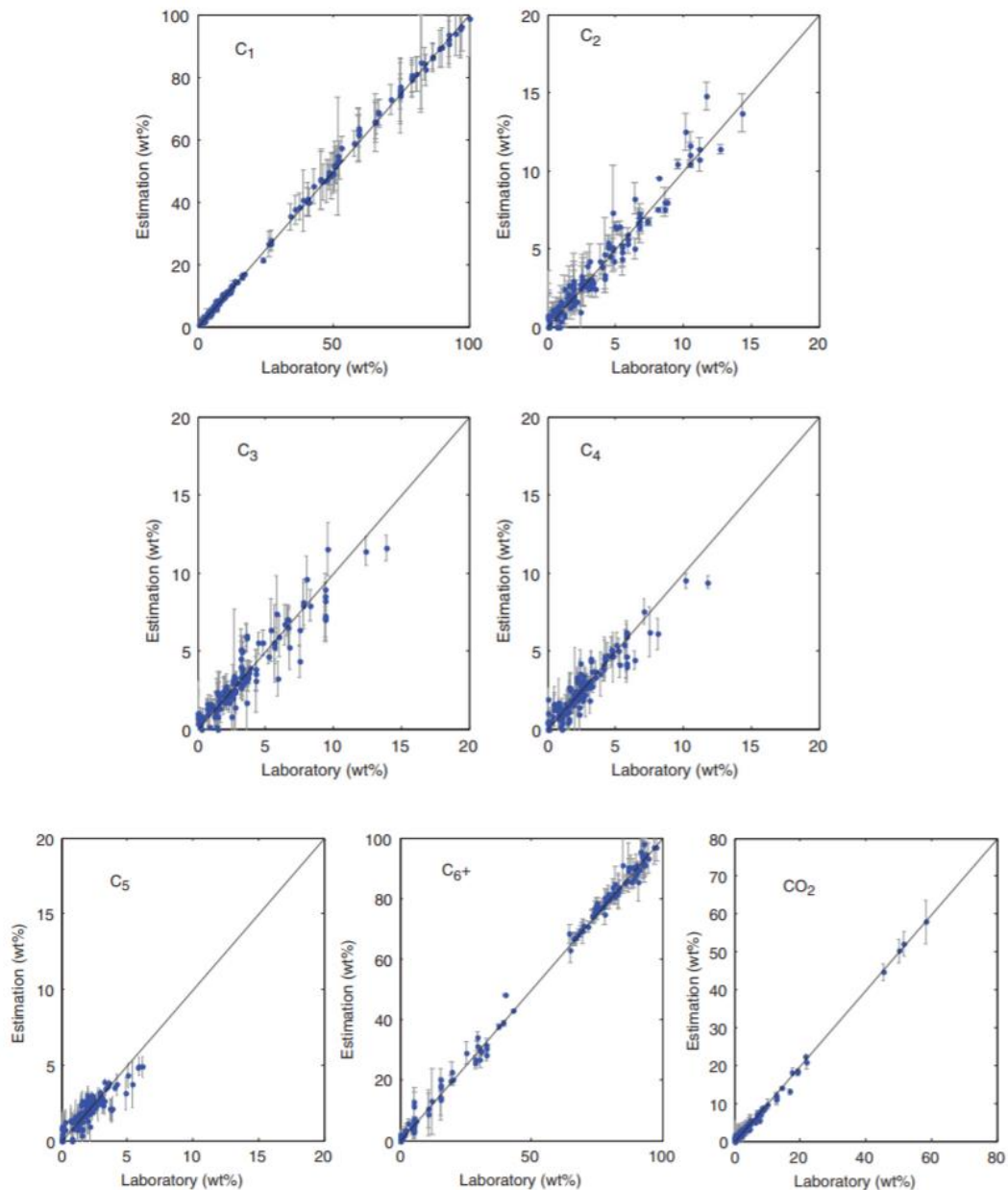
Στη συνέχεια, αντλήθηκαν δείγματα από το ρευστό και αναλύθηκαν σε PVT εργαστήρια. Διαπιστώθηκε πως η σύσταση, η πυκνότητα και το GOR του ρευστού που προσδιορίστηκαν από την YAP, βρίσκονταν σε μεγάλη συμφωνία με τα αποτελέσματα των εργαστηριακών μετρήσεων. Η σύγκριση μεταξύ των μετρήσεων του εργαλείου YAP και των εργαστηριακών εμφανίζεται στον Πίνακα 3.1.

	COMPOSITION, GOR, AND DENSITY						
	Composition (wt%)					GOR (scf/STB)	Density (g/cm ³)
	C1	C2	C3-5	C6+	CO ₂		
Laboratory	7.5	1.1	5.3	85.8	0.0	719	0.72
DFA tool	5.2	1.0	5.8	86.7	1.3	620	0.73

Πίνακας 3.1: Σύσταση, GOR και πυκνότητα από τη δειγματοληψία στην περιοχή της Βόρειας Θάλασσας (Dong et al, 2008)

Εργαλείο YAP των Indo et al, 2015

Εκτιμήσεις για τη σύσταση και το GOR, ώστε να διαπιστωθεί η εγκυρότητα των μετρήσεων του εργαλείου YAP, έγινε και στην περίπτωση των Indo et al, 2015. Οι μετρήσεις στο πεδίο έγιναν με τη μεθοδολογία που περιγράφηκε στην υποενότητα 3.2 και η σύγκριση έγινε σε σχέση με μια βάση δεδομένων διαφορετική από αυτή που χρησιμοποιήθηκε για την δημιουργία των πινάκων Β. Στο Διαγράμματα 3.10 απεικονίζονται



Διάγραμμα 3.10: Σύγκριση συστάσεων από το εργαλείο YAP με τη σύσταση που προέκυψε από την αέρια χρωματογραφική ανάλυση (Indo et al, 2015)

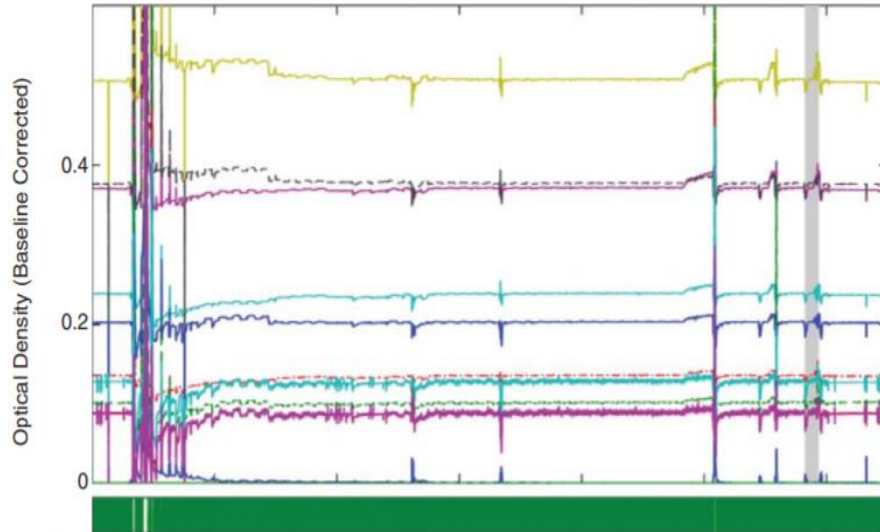
οι εκτιμήσεις της σύστασης κάθε συστατικού του δείγματος με τη χρήση εργαλείου YAP σε σχέση με τον υπολογισμό της σύστασης με αέρια χρωματογραφία. Στο Διάγραμμα 3.10 παρουσιάζονται επίσης οι εκτιμώμενες στατιστικές αβεβαιότητες με τη ράβδο του σφάλματος να έχει πλάτος όσο μια τυπική απόκλιση (SD). Τα δείγματα συμπεριλάμβαναν και σε αυτή την περίπτωση αέριους υδρογονάνθρακες με GOR πάνω από 100,000 scf/stb, αέρια συμπυκνώματα με GOR από 5,200 έως 100,000 scf/stb και πετρέλαια από 150 έως 3,500 scf/stb. Η τυπική απόκλιση μεταξύ των δυο μεθόδων ήταν 1.1%wt για το C₁,

0.8%wt για το C₂, 0.9%wt για το C₃, 0.7%wt για το C₄, 0.6%wt για το C₅, 2.6%wt για το C₆₊ και 0.7%wt για το CO₂.

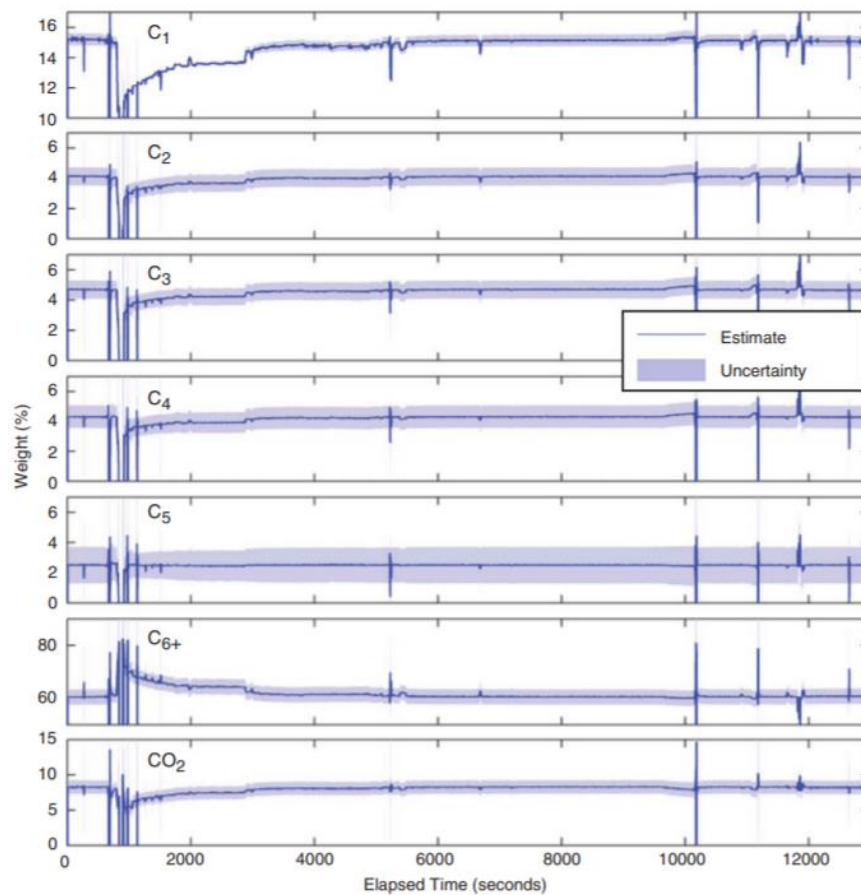
Το εργαλείο δοκιμάστηκε σε συνθήκες πεδίου ύστερα από την αξιολόγησή του. Επιλέχθηκαν να γίνουν μετρήσεις που αφορούν 4 τύπους πετρελαϊκού ρευστού, ενός υγρού αερίου, ενός αέριου συμπυκνώματος, ενός πτητικού πετρελαίου και ενός βαρέος πετρελαίου. Σε κάθε περίπτωση τα δεδομένα που αποκτήθηκαν από τη ανάλυση σε πραγματικό χρόνο με το εργαλείο ΥΑΡ συγκρίθηκαν με τα εργαστηριακά PVT αποτελέσματα για τα ίδια δείγματα.

Στο Διάγραμμα 3.11 απεικονίζεται η οπτική πυκνότητα πτητικού πετρελαίου σε συνάρτηση με τον χρόνο, ενώ η μπάρα κάτω από το διάγραμμα υποδεικνύει βάση του αλγορίθμου αναγνώρισης τύπου ρευστού, τι τύπος ρευστού ρέει εκείνη την χρονική στιγμή μέσα από τον αναλυτή. Πριν τα 700 sec μέσα στον αναλυτή υπάρχει το εναπομείναν ρευστό από την προηγούμενη μέτρηση. Στα 700sec περίπου ξεκινάει και η άντληση, οι οπτικές πυκνότητες κυμαίνονται σε μεγάλο εύρος λόγω των σωματιδίων λάσπης που ρέουν μπροστά από το φασματόμετρο. Σε όλο το χρονικό διάστημα που πραγματοποιείται η μέτρηση η μπάρα είναι πράσινη (ο αλγόριθμος αναγνώρισης εκτιμά πως ρέει πετρέλαιο) εκτός από τη στιγμή των 700sec που είναι άσπρη. Αυτό συμβαίνει γιατί, η οπτική πυκνότητα ξεπέρασε το εύρος όπου θεωρείται έγκυρη, όπως αναφέρθηκε στην υποενότητα 3.2.

Στο Διάγραμμα 3.12 φαίνονται οι συστάσεις που προέκυψαν από τις οπτικές πυκνότητες του Διαγράμματος 3.11 μαζί με τις αντίστοιχες αβεβαιότητες ενώ στον Πίνακα 3.2 παρουσιάζονται οι μετρήσεις που προέκυψαν από το εργαλείο ΥΑΡ σε σχέση με τα εργαστηριακά PVT αποτελέσματα.



Διάγραμμα 3.11: Οπτικές πυκνότητες διαφόρων μηκών κύματος για το πητικό πετρέλαιο σε συνάρτηση με τον χρόνο και η μπάρα ταυτοποίησης τύπου ρευστού. (Indo et al, 2015)



Διάγραμμα 3.12: : Εκτίμηση σύστασης του πητικού πετρελαίου κατά τη διάρκεια της ανάλυσης με το εργαλείο YAP. Το δείγμα ανλήθηκε για την εργαστηριακή ανάλυση περίπου στα 11,646 μέχρι 11,873sec ενώ η σύσταση που τελικά συγκρίθηκε με τα εργαστηριακά αποτελέσματα ήταν αυτή στα 11,700sec (Indo et al, 2015)

	Composition (wt%)							
	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆₊	CO ₂	Nitrogen
Laboratory GC	14.8	4.7	5.1	3.5	2.7	60.6	8.4	0.2
Spectrometer	15.2	4.1	4.7	4.3	2.5	60.5	8.2	–
Error bar (68%)	0.4	0.6	0.6	0.7	1.2	2.8	1.0	–

Πίνακας 3.2: Η περίπτωση του πτητικού πετρελαίου (Indo et al, 2015)

Με παρόμοιο τρόπο όπως η περίπτωση του πτητικού πετρελαίου που μόλις περιγράφηκε εκτελέστηκαν οι δοκιμές για τους υπόλοιπους τύπους ρευστών με τα αποτελέσματα να παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες.

	Composition (wt%)							
	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆₊	CO ₂	Nitrogen
Laboratory GC	35.0	10.5	7.3	3.9	2.4	32.7	7.7	0.6
Spectrometer	34.3	8.5	7.9	5.4	3.6	32.7	7.6	–
Error bar (68%)	6.2	0.2	1.4	1.1	0.3	2.4	0.9	–

Πίνακας 3.3: Η περίπτωση του αέριου συμπυκνώματος (Indo et al, 2015)

	Composition (wt%)							
	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆₊	CO ₂	Nitrogen
Laboratory GC	3.6	1.8	2.3	2.3	2.2	87.8	0.0	0.1
Spectrometer	3.4	1.8	2.6	2.6	1.4	87.8	0.0	–
Error bar (68%)	1.4	1.0	0.9	1.0	1.4	6.6	2.0	–

Πίνακας 3.4: Η περίπτωση του μαύρου πετρελαίου (Indo et al, 2015)

	Composition (wt%)							
	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆₊	CO ₂	Nitrogen
Laboratory GC	56.8	5.2	2.2	1.1	0.6	4.6	25.3	4.2
Spectrometer	56.7	5.6	3.6	1.9	0.7	3.5	27.7	–
Error bar (68%)	10.5	2.5	2.8	2.3	1.8	2.3	1.2	–

Πίνακας 3.5: Η περίπτωση του υγρού αέριου (Indo et al, 2015)

Το συμπέρασμα που απορρέει από τα δεδομένα είναι πως στις περιπτώσεις του πτητικού πετρελαίου, του αέριου συμπυκνώματος και μαύρου πετρελαίου οι μετρήσεις του εργαλείου ΥΑΡ είναι σε πολύ καλή συμφωνία με αυτές του αέριου χρωματογράφου. Πιο συγκεκριμένα πιο κοντά στις εργαστηριακές μετρήσεις έρχεται το μαύρο πετρέλαιο, ενώ ακολουθούν η περίπτωση του πτητικού πετρελαίου και του αέριου συμπυκνώματος. Και στις τρεις περιπτώσεις, η απόκλιση μεταξύ της σύστασης που μετρήθηκε από τον αέριο χρωματογράφο και της σύστασης που εκτίμησε το εργαλείο ΥΑΡ κυμάνθηκε στο 1%. Στην περίπτωση του υγρού αέριου η απόκλιση που προέκυψε ήταν λίγο μεγαλύτερη. Αυτό οφείλεται στο ότι υπήρξε σημαντικότερη παρουσία αζώτου από ότι στις προηγούμενες

τρεις περιπτώσεις και αυτό οδηγεί σε αποτελέσματα μικρότερης ακρίβειας, καθώς το οπτικό φασματοόμετρο του εργαλείου YAP δεν είναι σε θέση να ανιχνεύσει το άζωτο. Παρατηρείται επίσης ότι σε γενικές γραμμές η μέθοδος YAP τείνει να υπερεκτιμά το C₁ και αυτό γιατί η οπτική απορρόφηση του μεθανίου επηρεάζεται πολύ από την πίεση.

Τέλος καθίσταται σαφές από τα αποτελέσματα της μεθόδου πως οι εκτιμήσεις της σύστασης βρεθήκαν σε πολύ καλή συμφωνία με τις εργαστηριακές μετρήσεις για όλους τους τύπους ρευστών.

3.4. YAP και Μηχανική Εκμάθηση (ME)

3.4.1. Εκτίμηση GOR πριν την εφαρμογή μεθόδων ME

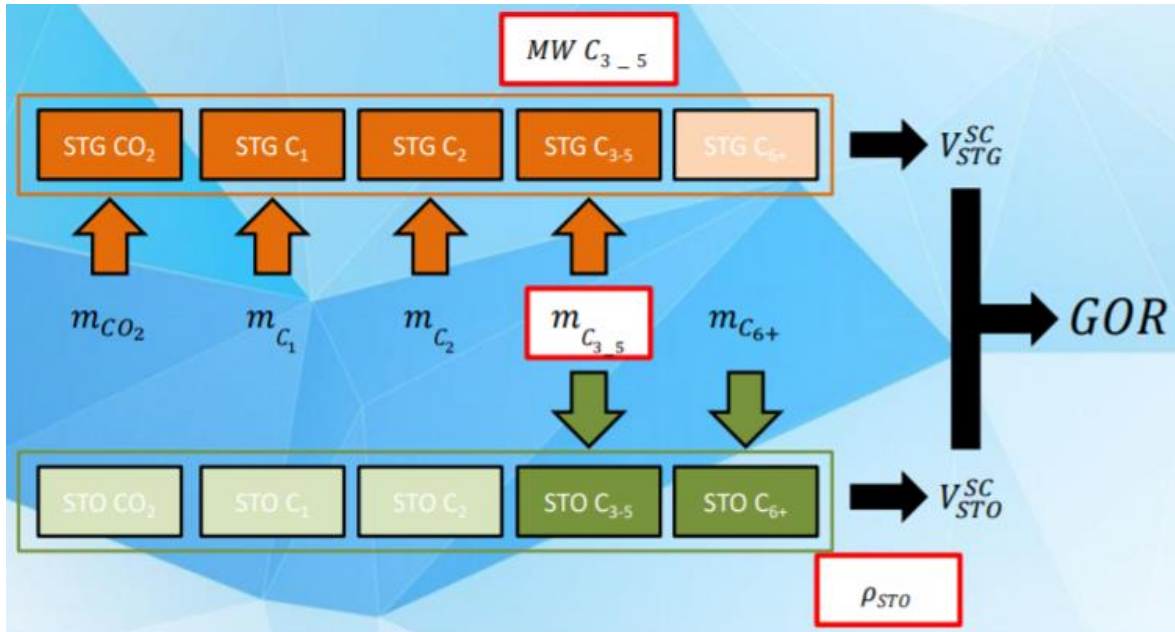
Όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 2, οι τρόποι εκτίμησης και μοντελοποίησης της συμπεριφοράς των πετρελαϊκών ρευστών είναι η ανάλυση των ρευστών σε PVT εργαστήρια (CCE, DV), η εκτίμηση των ογκομετρικών ιδιοτήτων τους είτε με ΜΚΕ είτε με απλές συσχετίσεις, όπου χρησιμοποιώντας τις μετρήσιμες στο πεδίο ιδιότητες του ρευστού, δύναται να εκτιμηθούν και οι υπόλοιπες ιδιότητες του.

Από τις αρχές της χημείας, αποδείχτηκε πως τα δεδομένα που αντλούνται από τα εργαλεία YAP μπορούν με τη χρήση κατάλληλων αλγορίθμων να προσδιορίσουν με υπολογιστικό, όχι πειραματικό τρόπο, αρχικά το GOR του ρευστού και στη συνέχεια και άλλες ιδιότητες του. Αρχικά παρατηρήθηκε μια συσχέτιση του λόγου της κορυφής του μεθανίου προς το πετρέλαιο στο φάσμα οπτικής απορρόφησης με το GOR του πετρελαίου που μελετάται (Mullins et al. 2001; Dong et al. 2002, 2008). Ήταν μόνο το 2007 όταν οι Hegeman et al συνδύασαν τα δεδομένα για τη σύσταση των ρευστών από τα εργαλεία YAP με μεθόδους μηχανικής εκμάθησης, συγκεκριμένα μοντέλα Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων - ΤΝΔ και η ποιότητα των εκτιμήσεων για το GOR βελτιώθηκε.

Αλγόριθμος Εκτίμησης GOR

Πριν την εφαρμογή των ΤΝΔ και της ME στην YAP οι Mullins et al, 2001 και στη συνέχεια οι Dong et al, 2002, 2008 βασίστηκαν στη συμπεριφορά του κάθε συστατικού σε κανονικές συνθήκες για να υπολογίσουν το GOR ενός ρευστού με τα δεδομένα της σύστασης από το εργαλείο YAP. Σύμφωνα με τον ορισμό του, το GOR, όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 2, υπολογίζεται ως ο λόγος του όγκου του διαλυμένου στο πετρέλαιο αερίου όπως αυτό μετράται αφού έχει εκλυθεί σε κανονικές συνθήκες (scf) προς τον όγκο του πετρελαίου που απομένει σε κανονικές συνθήκες. Οι ερευνητές προσπάθησαν να

βρουν ένα τρόπο να υπολογίσουν τον αριθμητή V_{gas}^{SC} και τον παρονομαστή V_{oil}^{SC} . Με δεδομένα μόνο την περιορισμένης λεπτομέρειας σύσταση του πετρελαϊκού ρευστού σε 5 στοιχεία (C_1 , C_2 , C_{3-5} , C_{6+} , CO_2) εκτίμησαν το V_{gas}^{SC} και το V_{oil}^{SC} . Η διαδικασία που ακολούθησαν παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 3.13.



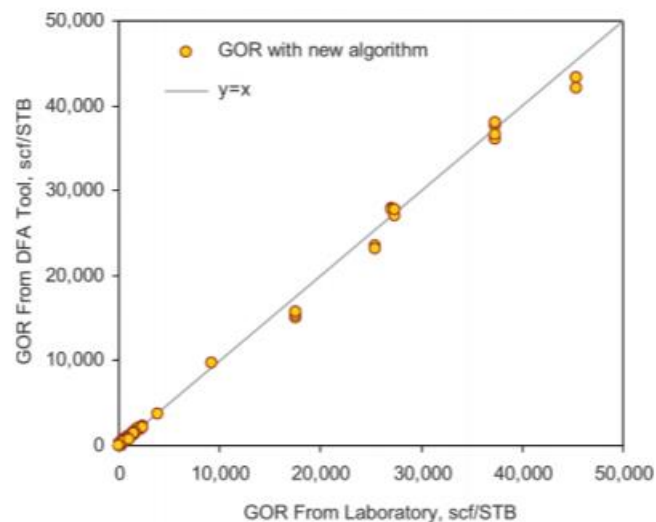
Διάγραμμα 3.13: Σχηματική αναπαράσταση της διαδικασίας που ακολούθησαν οι Mullins et al, 2001 και οι Dong et al, 2002, 2008 για τον υπολογισμό του GOR με εργαλείο YAP (Γαγάνης, 2021)

Είναι γνωστό πως τα στοιχεία CO_2 , C_1 , C_2 , των οποίων το εργαλείο YAP μπορούσε να εκτιμήσει τη συγκέντρωσή τους ξεχωριστά, είναι αέρια σε κανονικές συνθήκες. Αντίστοιχα, το συστατικό C_{6+} είναι υγρό σε κανονικές συνθήκες. Σε κανονικές συνθήκες το C_3 και το C_4 είναι επίσης αέρια, ενώ το C_5 είναι υγρό. Το πρώτο βήμα τους λοιπόν ήταν να δημιουργήσουν μια συσχέτιση που να εκτιμά πόση μάζα από το κλάσμα $m_{C_{3-5}}$, όταν βρεθεί σε κανονικές συνθήκες θα μετατραπεί σε αέριο και πόση σε υγρό. Στη συνέχεια, έχοντας ως δεδομένα από τις μετρήσεις YAP τις μάζες για το κάθε κλάσμα, διαίρεσαν τη μάζα του κάθε κλάσματος με το μοριακό του βάρος ώστε να προκύψουν τα mole για το κάθε κλάσμα. Στην περίπτωση του μεικτού κλάσματος $m_{C_{3-5}}$ έπρεπε να συντάξουν μια ακόμη συσχέτιση που να υπολογίζει το μοριακό βάρος του κλάσματος C_{3-5} . Έχοντας υπολογίσει όλα τα mole για τα αέρια κλάσματα, βασισμένοι στο νόμο του Avogadro ότι 1 mol οποιουδήποτε αερίου καταλαμβάνει ακριβώς τον ίδιο όγκο ανεξαρτήτως της σύστασής του, πολλαπλασίασαν τα mole του κάθε κλάσματος ξεχωριστά με 23.69 lt/mole ώστε να προκύψουν οι όγκοι του κάθε κλάσματος σε κανονικές

συνθήκες. Προσθέτοντας τους όγκους των αερίων κλασμάτων προέκυψε ο αριθμητής του GOR, δηλαδή το V_{gas}^{SC} . Για τον παρονομαστή, έχοντας υπολογίσει ήδη με τη συσχέτιση πόσο από την μάζα του κλάσματος $m_{C_{3-5}}$ θα γίνει αέριο, υπολογίστηκε και η συμπληρωματική μάζα του υγρού. Πρόσθεσαν σε αυτή τη μάζα κλάσματος C_{6+} και στη συνέχεια με μια ακόμη συσχέτιση που εκτιμά την πυκνότητα ρ_{sto} του stock tank πετρελαίου διαίρεσαν το σύνολο της μάζας των υγρών κλασμάτων με την πυκνότητα ώστε να προκύψει ο όγκος των υγρών κλασμάτων, και κατά συνέπεια ο παρονομαστής $V_{oil(sc)}$. Τέλος, διαίρεσαν το V_{gas}^{SC} με το V_{oil}^{SC} και προσδιόρισαν το GOR.

3.4.2. Εκτίμηση GOR με την μέθοδο των Dong et al, 2008

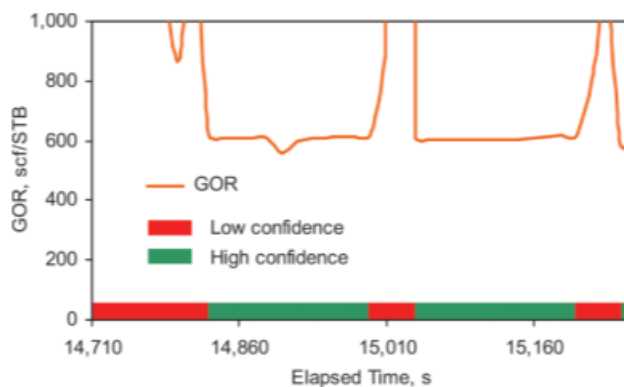
Όπως αναφέρθηκε και στην υποενότητα 3.3, οι Dong et al χρησιμοποίησαν μια βάση δεδομένων που κάλυπτε τύπους ρευστών, ξηρά αέρια, αέρια συμπυκνώματα, και πετρέλαια με GOR από 250 scf/stb έως και παραπάνω από 2,000 scf/stb. Στη συνέχεια σύγκριναν τα GOR που εκτιμήθηκαν από τον αλγόριθμο της YAP με τους υπολογισμούς των GOR από τα PVT εργαστήρια. Στο Διάγραμμα 3.14 απεικονίζεται αυτή η σύγκριση. Τα αποτελέσματα ήταν σε καλή συμφωνία με αυτά των εργαστηρίων.



Διάγραμμα 3.14: Μετρήσεις GOR από το εργαλείο YAP (Dong et al, 2008)

Για να διαπιστωθεί η αποτελεσματικότητα του αλγορίθμου σε πραγματικό χρόνο έγιναν μετρήσεις στο πεδίο, σε διάφορες γεωγραφικές περιοχές. Στην παράγραφο 3.3 παρουσιάστηκαν οι μετρήσεις που έγιναν στην περιοχή της Βόρειας Θάλασσας σε ταμειυτήρα πετρελαίου.

Στο διάγραμμα 3.15 παρουσιάζονται οι μετρήσεις του GOR από το εργαλείο ΥΑΡ σε πραγματικό χρόνο μαζί με τη σήμανση ποιότητας και στον Πίνακα 3.6 τα αποτελέσματα του εργαλείου ΥΑΡ και του εργαστηρίου για τις μετρήσεις στη Βόρεια Θάλασσα.



Διάγραμμα 3.15: GOR ρευστού από την περιοχή της Βόρειας Θάλασσας (Dong et al, 2008)

	GOR (scf/stb)
Laboratory GC	719
DFA Tool	620

Πίνακας 3.6: GOR από τη δειγματοληψία στην περιοχή της Βόρειας Θάλασσας (Dong et al, 2008)

Οι δοκιμές στο πεδίο έδειξαν πως οι μετρήσεις του GOR σε πραγματικό χρόνο με το εργαλείο ΥΑΡ των Dong et al ήταν σε μεγάλη συμφωνία με τις μετρήσεις των εργαστηρίων. Χρησιμοποιήθηκε επίσης και ένα παλαιότερης γενιάς εργαλείο και παρατηρήθηκε πως το GOR που εκτιμούσε εμφάνιζε σαφώς μεγαλύτερη απόκλιση από την εργαστηριακή τιμή και περισσότερο θόρυβο.

3.4.3. Εκτίμηση GOR με τη μέθοδο των Hegeman et al, 2007

Οι Hegeman et al δημιούργησαν μια βάση δεδομένων με 1,834 αντιπροσωπευτικά δείγματα ρευστών από διάφορες γεωγραφικές περιοχές του πλανήτη για να εκπαιδεύσουν (train) ένα ΤΝΔ για την εκτίμηση του GOR. Τα δεδομένα κάλυπταν ένα αρκετά μεγάλο εύρος από τύπους ρευστών και συστάσεων. Τα δύο τρίτα της βάσης δεδομένων περιείχαν πληροφορίες για πετρέλαια ενώ το άλλο ένα τρίτο για αέρια συμπυκνώματα. Όμως, παρόλο που υπήρχε μεγάλο εύρος τιμών για κάθε μία από τις ιδιότητες της βάσης δεδομένων, η πλειονότητα των ρευστών αφορούσε τα χαμηλής πτητικότητας πετρέλαια και σε αέρια συμπυκνώματα με χαμηλό ποσοστό υγρού (συμπυκνώματος). Για κάθε δείγμα, οι συστάσεις που αναλύθηκαν από τα εργαστήρια, μετασχηματίστηκαν σε ομάδες

πέντε στοιχείων, C₁, C₂, C₃₋₅, C₆₊, CO₂ (όπως στο εργαλείο ΥΑΡ των Dong et al) ενώ τα κλάσματα των συστάσεων έχουν κανονικοποιηθεί έτσι ώστε να προκύπτει άθροισμα 100%. Με αυτόν το τρόπο συστατικά που είναι αδύνατο να μετρήσει το εργαλείο ΥΑΡ, όπως το άζωτο και υδρογόνο, εξαιρέθηκαν από τη βάση δεδομένων.

Αρχικά, η απόδοση του ΤΝΔ των Hegeman et al ελέγχθηκε υπολογίζοντας το GOR δειγμάτων που δεν είχαν χρησιμοποιηθεί στην εκπαίδευση του δικτύου. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο παρακάτω Πίνακα 3.7.

PERFORMANCE OF ANN MODEL AGAINST TRAINING AND VALIDATION DATA		
	Training Data *	Validation Set
Number of points	1,650	184
Mean relative error (%)	1.5	3.0
Mean absolute relative error (%)	10.5	11.5
Standard deviation of mean relative error (%)	17.2	20.7

* Training data include both the training set and the calibration set.

Πίνακας 3.7: Επίδοση του ΤΝΔ για τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την εκπαίδευση του μοντέλου και για τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την επαλήθευσή του (Hegeman et al, 2007)

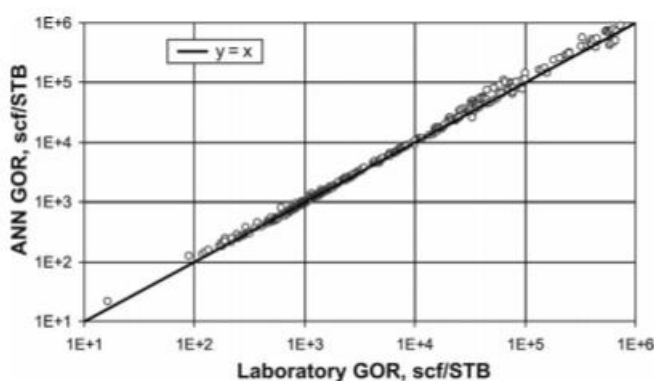
Το μοντέλο ανταποκρίθηκε το ίδιο καλά στα δεδομένα εκπαίδευσης και στα δεδομένα επαλήθευσης παρουσιάζοντας μόνο 1.5% αύξηση του μέσου σχετικού σφάλματος μεταξύ τους λόγω του μικρού μεγέθους του πληθυσμού των δεδομένων επαλήθευσης (validation data). Το 3% μέσο σχετικό σφάλμα για τα άγνωστα στο μοντέλο δεδομένα, είναι ένα πολύ μικρό ποσοστό, αν ληφθεί υπόψιν πως πρόκειται για ένα μοντέλο που εκτιμά τιμές GOR που κυμαίνονται από 10 έως και 100,000 scf/stb.

Στη συνέχεια, η επίδοση του μοντέλου συγκρίθηκε με τις επιδόσεις των αλγορίθμων εκτίμησης GOR των εργαλείων ΥΑΡ των Fujisawa et al (2002) και Dong et al (2008). Τα αποτελέσματα απεικονίζονται στον Πίνακα 3.8 όπου παρατηρείται πως η επίδοση του ΤΝΔ είναι σαφώς καλύτερη από των άλλων δυο προγενέστερων αλγορίθμων. Τα δεδομένα επαλήθευσης ήταν τα μόνα δεδομένα που ήταν άγνωστα και για τα τρία GOR μοντέλα. Σημειώνεται πως ως DFA Tool 1 εννοείται το εργαλείο των Fujisawa et al όπου η σύσταση εκτιμάται σε 4 ομάδες (C₁, C₂₋₅, C₆₊, CO₂) και ως DFA Tool 2 εννοείται το εργαλείο των Dong et al όπου, όπως και στο ΤΝΔ η σύσταση εκτιμάται σε 5 ομάδες (C₁, C₂, C₃₋₅, C₆₊, CO₂).

PERFORMANCE OF GOR MODELS							
Data Set	Number of Points	Mean Relative Error (%)			Mean Absolute Relative Error (%)		
		ANN	DFA Tool 1	DFA Tool 2	ANN	DFA Tool 1	DFA Tool 2
All points	1,834	1.6	-9.7	-10.0	10.6	23.2	17.1
Training data	1,650	1.5	-9.8	-9.9	10.5	22.9	17.1
Validation set	184	3.0	-8.7	-10.8	11.5	25.8	16.5

Πίνακας 3.8: Σύγκριση επιδόσεων των τριών μοντέλων εκτίμησης GOR (Hegeman et al, 2007)

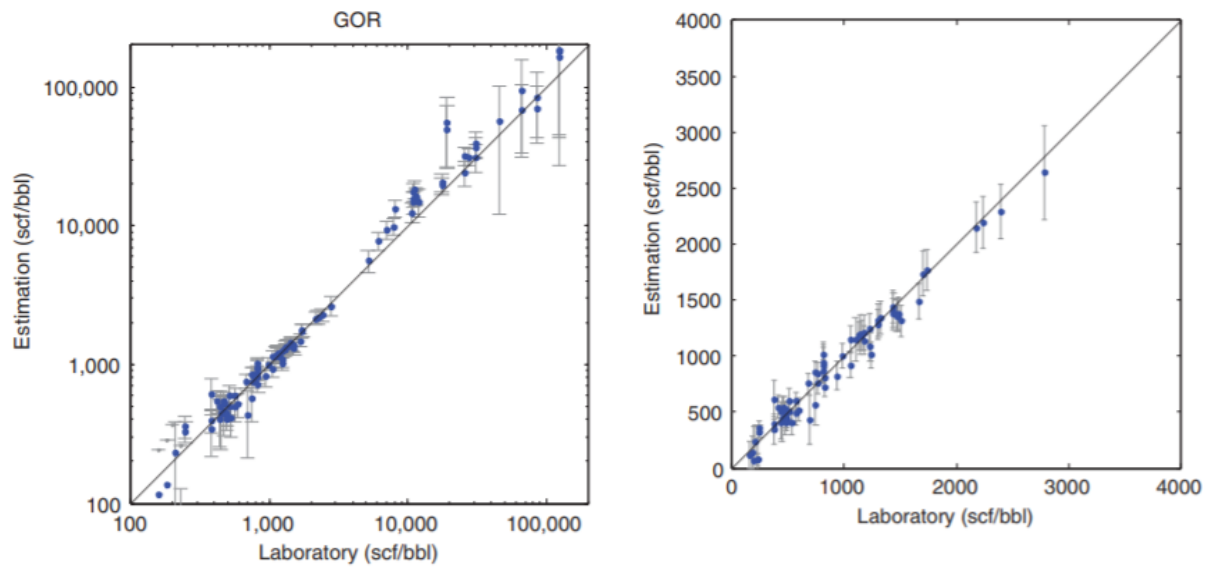
Τέλος, έγιναν παραπάνω έλεγχοι με επιπλέον δείγματα από διάφορες γεωγραφικές περιοχές όπως η Βόρεια Θάλασσα, ο Κόλπος του Μεξικού και η Μέση Ανατολή. Αποδείχτηκε πως δεν υπάρχει καμία εξάρτηση μεταξύ του σφάλματος και της γεωγραφικής περιοχής. Στο Διάγραμμα 3.16 παρουσιάζονται ως παράδειγμα τα αποτελέσματα του ελέγχου που έγινε σε ρευστά από τον Κόλπο του Μεξικού με τα αποτελέσματα να επαληθεύουν αυτή τη διαπίστωση.



Διάγραμμα 3.16: Επαλήθευση του ΤΝΔ υπολογισμού του GOR με ρευστά από την περιοχή του Κόλπου του Μεξικού (Hegeman et al, 2007)

3.4.4. Εκτίμηση GOR με την μέθοδο των Indo et al, 2015

Οι Indo et al το 2015 χρησιμοποίησαν το ΤΝΔ των Hegeman et al (2007) που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη παράγραφο και το συνδύασαν με το δικό τους εργαλείο YAP που είχε τη δυνατότητα να διακρίνει τη σύσταση σε 7 ομάδες. Στο Διάγραμμα 3.17 συγκρίνονται οι τιμές του GOR που εκτίμησε το ΤΝΔ με τις τιμές του GOR που προέκυψαν από τις εργαστηριακές μετρήσεις σε PVT εργαστήρια. Τα δείγματα που μελετήθηκαν είναι τα ίδια με αυτά που αναφέρθηκαν στην παράγραφο 3.3 (Εργαλείο YAP των Indo et al, 2015).



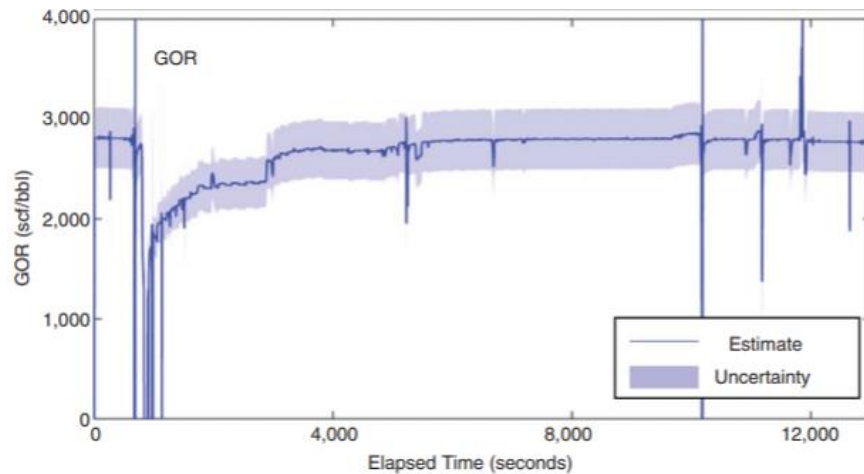
Διάγραμμα 3.17: Σύγκριση GOR που εκτιμήθηκε από το ΤΝΔ με το GOR που προέκυψε από εργαστηριακές μετρήσεις PVT. Το αριστερό σχήμα απεικονίζει τις συγκρίσεις σε λογαριθμική κλίμακα ενώ το δεξί σε γραμμική κλίμακα. Οι μπάρες έχουν πλάτος όσο μια τυπική απόκλιση (1 SD). (Indo et al, 2015)

Παρατηρήθηκε πως η παρουσία του κλάσματος C_{6+} επηρεάζει κατά πολύ τον υπολογισμό του GOR των αέριων συμπυκνωμάτων ειδικά στις υψηλές τιμές GOR, παρόλο που το κλάσμα αυτό είναι μικρό σε αυτόν τον τύπο ρευστών. Στις χαμηλές τιμές του GOR, το κλάσμα C_1 είναι αυτό που επηρεάζει το περιθώριο σφάλματος. Γενικά, η τυπική απόκλιση για όλο το εύρος τιμών κυμάνθηκε στα 100 scf/stb και στο 68% των δειγμάτων οι τιμές του GOR βρίσκονται μέσα στα όρια μίας τυπικής απόκλισης.

Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 3.3 σε συνέχεια της σύγκρισης του GOR που εκτιμήθηκε από το εργαλείο YAP με τις εργαστηριακές μετρήσεις από PVT εργαστήρια, έγιναν δοκιμές σε 4 τύπους πετρελαϊκών ρευστών ώστε να διαπιστωθεί η απόδοσή του σε πραγματικό χρόνο και σε συνθήκες πεδίου. Στον Πίνακα 3.9 και στο Διάγραμμα 3.18 απεικονίζονται τα αποτελέσματα από την δειγματοληψία πτητικού πετρελαίου. Η διαφορά του εργαστηριακού GOR με το GOR του ΤΝΔ κυμάνθηκε στο 3% (80 scf/stb) σε αυτή την περίπτωση.

GOR (scf/stb)	
Laboratory GC	2,729
Spectrometer	2,803
Error bar (68%)	304

Πίνακας 3.9: Η περίπτωση υπολογισμού GOR του πτητικού πετρελαίου (Indo et al, 2015)



Διάγραμμα 3.18: Εκτίμηση GOR του πηκτικού πετρελαίου κατά την διάρκεια της δειγματοληψίας με το εργαλείο ΥΑΡ. Το δείγμα αντλήθηκε για την εργαστηριακή ανάλυση περίπου στα 11,646 μέχρι 11,873sec ενώ το GOR που τελικά συγκρίθηκε με τα εργαστηριακά αποτελέσματα ήταν στα 11,700sec. Η μπλε μπάρα έχει πλάτος 1-SD (Indo et al, 2015)

Στους πίνακες που ακολουθούν απεικονίζονται τα αποτελέσματα υπολογισμού του GOR για τους άλλους τύπους ρευστών.

	GOR (scf/stb)
Laboratory GC	11,000
Spectrometer	11,600
Error bar (68%)	2,000

Πίνακας 3.10: Η περίπτωση υπολογισμού GOR αέριου συμπυκνώματος (Indo et al, 2015)

	GOR (scf/stb)
Laboratory GC	517
Spectrometer	461
Error bar (68%)	186

Πίνακας 3.11: Η περίπτωση υπολογισμού GOR μαύρου πετρελαίου (Indo et al, 2015)

	GOR (scf/stb)
Laboratory GC	185,000
Spectrometer	360,000
Error bar (68%)	200,000

Πίνακας 3.12: Η περίπτωση υπολογισμού GOR υγρού αερίου (Indo et al, 2015)

Στο αέριο συμπύκνωμα η απόκλιση από την εργαστηριακή τιμή του GOR ήταν 5% (600 scf/stb), στο μαύρο πετρέλαιο 12% (60 scf/stb) ενώ στο υγρό αέριο ήταν πολύ μεγαλύτερη. Στην τελευταία περίπτωση, υπάρχει μια τάση στο ΤΝΔ να προβλέπει τιμές πάνω από τις πραγματικές, καθώς το περιθώριο σφάλματος για το μικρό σχετικά σε αυτή την περίπτωση

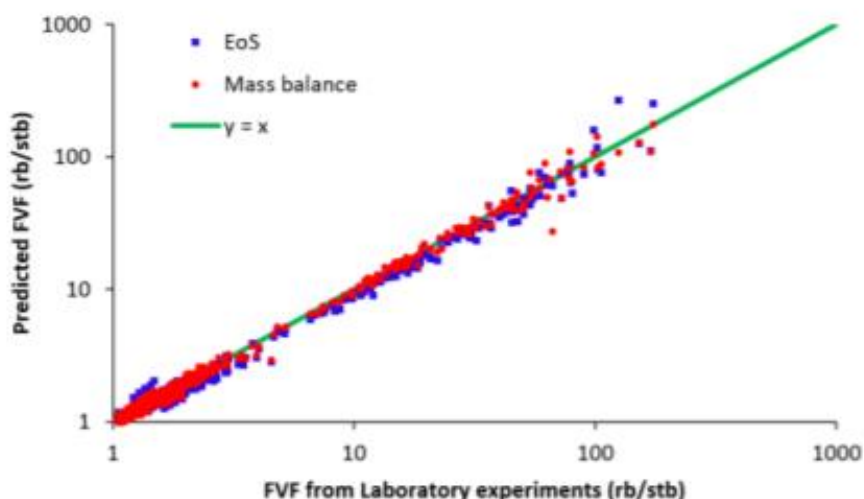
κλάσμα του συστατικού C_{6+} , είναι πολύ μεγάλο και επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την εκτίμηση.

Γενικά, αποδείχτηκε πως οι μετρήσεις του εργαλείου ΥΑΡ και των εργαστηριακών μετρήσεων βρίσκονται σε πολύ καλή συμφωνία.

3.4.5. Εκτίμηση B_o με την μέθοδο των Zuo et al, 2018

Οι Zuo et al το 2018 σύγκριναν στη δική τους μελέτη τέσσερις μεθόδους εκτίμησης του ογκομετρικού συντελεστή σχηματισμού πετρελαίου (Formation Volume Factor, B_o) με δεδομένα από εργαλείο ΥΑΡ: τη μέθοδο του ΜΚΕ, τη μέθοδο του ισοζυγίου μάζας, τη μέθοδο του ΤΝΔ των Hegeman et al, 2007 και την μέθοδο της οπτικής πυκνότητας OD (ο αλγόριθμος που εφάρμοσαν οι Mullins και Dong). Αξιοποίησαν μια βάση δεδομένων αποτελούμενη από 1,357 ρευστά με $FVF < 3$ rb/stb.

Στη συνέχεια, επαλήθευαν τις αποδόσεις των μεθόδων αυτών με τις μετρήσεις των εργαστηρίων PVT και του αερίου χρωματογράφου. Στο Διάγραμμα 3.19 και στον Πίνακα 3.13 απεικονίζονται οι συγκρίσεις μεταξύ των μεθόδων που χρησιμοποίησαν δεδομένα από τα εργαλεία ΥΑΡ και των πειραματικών στα εργαστήρια μετρήσεων. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση εκτίμησης του FVF από το ΤΝΔ τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με τις μετρήσεις από το πείραμα DV με ένα στάδιο πτώση πίεσης.



Διάγραμμα 3.19: Σύγκριση εκτίμησης FVF μεταξύ ΤΝΔ και εργαστηριακών μετρήσεων PVT (Zuo et al, 2018)

	No. of samples	FVF range (res bbl/STB)	Mean relative error (%)	Mean absolute relative error (%)
EoS	1357	1 - 5	1.34	3.19
ANN	203	1 - 5	0.19	2.67
Mass balance	1357	1 - 5	0.3	2.19
OD	127	1 - 3.25	0.4	1.9

Πίνακας 3.13: Αποτελέσματα των τεσσάρων μεθόδων ΥΑΡ σε σχέση με τα δεδομένα εργαστηριακών μετρήσεων (Zuo et al, 2018)

Στην μέθοδο του ΤΝΔ μόνο το 15% της βάσης δεδομένων μπορούσε να χρησιμοποιηθεί (το υπόλοιπο 85% χρησιμοποιήθηκε για την εκπαίδευση του μοντέλου) και στην μέθοδο OD αξιοποιήθηκαν δεδομένα από διαφορετική βάση δεδομένων. Παρατηρήθηκε πως στην συγκεκριμένη περίπτωση η μέθοδος OD και του ισοζυγίου μάζας επιτυγχάνουν τις καλύτερες εκτιμήσεις FVF όταν έχουν ως δεδομένα μετρήσεις σύστασης που έχουν ληφθεί το εργαλείο ΥΑΡ.

Στο κεφάλαιο που ακολουθεί θα αναλυθούν λεπτομερώς οι βασικές αρχές λειτουργίας των ΤΝΔ και με ποιον τρόπο δημιουργήθηκε το μοντέλο που περιέγραψαν οι Hegeman et al, 2008 για να εκτιμήσουν το GOR και κατά συνέπεια και τις άλλες ογκομετρικές ιδιότητες των πετρελαϊκών ρευστών όπως το FVF και η πυκνότητα. Οι ίδιες αρχές θα χρησιμοποιηθούν για την ανάπτυξη των μοντέλων ΤΝΔ που προτείνει η παρούσα διπλωματική εργασία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.

Παλινδρόμηση και Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα

4.1. Εισαγωγή

Τεχνητή Νοημοσύνη

Ο ορός Τεχνητή Νοημοσύνη (TN) - Artificial Intelligence (AI) αναφέρεται στον κλάδο της πληροφορικής και της επιστήμης των υπολογιστών που ασχολείται με την κατασκευή συσκευών και λογισμικών ικανά να εκτελέσουν ευφυείς υπολογισμούς, παρόμοιους με αυτούς που το ανθρώπινο μυαλό πραγματοποιεί σε καθημερινή βάση. Περιλαμβάνει μεθόδους, εργαλεία και συστήματα που προσομοιάζουν τον τρόπο εκμάθησης του ανθρώπινου εγκεφάλου και το πως αυτός λειτουργεί ώστε να επιλύει προβλήματα.

Μηχανική Εκμάθηση

Η Μηχανική Εκμάθηση (ME) - Machine Learning (ML) αποτελεί ένα υποσύνολο της TN που εστιάζει στην χρήση αλγορίθμων, που όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, μιμούνται την διαδικασία εκμάθησης του ανθρώπινου εγκεφάλου, βελτιώνοντας διαρκώς την απόδοσή τους. Σκοπός της ME είναι να εξάγει μοτίβα μέσα από πληθώρα δεδομένων, βρίσκοντας συσχετίσεις μεταξύ τους που δεν θα ήταν εφικτό να παρατηρηθούν μέσα από ανθρώπινη μελέτη, μια διαδικασία που είναι γνωστή ως «εκπαίδευση». Ουσιαστικά αποτελούν μια ομάδα αλγορίθμων που είναι σε θέση να προσαρμοστεί και να προβλέψει τη συμπεριφορά μελλοντικών δεδομένων, βασισμένη στην πληροφορία που προέκυψε από προηγούμενα διαθέσιμα δεδομένα. Αρχικά, πριν την εκπαίδευσή τους, οι αλγόριθμοι είναι παντελώς ανακριβείς, αλλά βελτιώνονται προβλέποντας τα νέα δεδομένα και σε κάθε βήμα αναπροσαρμόζονται, βασισμένοι σε μια διαδικασία δοκιμής και σφάλματος (trial and error), έτσι όπως συχνά λειτουργεί και η διαδικασία εκμάθησης του ανθρώπινου εγκεφάλου. Κατά αυτή την έννοια προσομοιάζει τη διαδικασία με την οποία ο ανθρώπινος εγκέφαλος εξάγει συσχετισμούς για ό,τι συμβαίνει γύρω του, μέσω των παραδειγμάτων.

Η παλινδρόμηση σε μοντέλα TNΔ που θα αναλυθεί στη συνέχεια αποτελεί απλά μία από τις διαθέσιμες μεθόδους ME και είναι αυτή που είναι συναφής με το αντικείμενο της παρούσας εργασίας.

4.2. Παλινδρόμηση (Regression)

Η παλινδρόμηση (Regression) είναι μια μέθοδος ΜΕ που στοχεύει στον καθορισμό της μαθηματικής σχέσης μεταξύ μίας (ή περισσότερων) εξαρτημένης μεταβλητής, γνωστής ως «έξοδος» που συνήθως συμβολίζεται με y , και μιας σειράς άλλων ανεξάρτητων μεταβλητών γνωστών ως «είσοδοι» που συνήθως συμβολίζονται με x .

Η παλινδρόμηση βρίσκει πολλές φορές χρήση στην εύρεση μιας μαθηματικής έκφρασης ή αλλιώς ενός μαθηματικού μοντέλου που περιγράφει ένα φυσικό φαινόμενο και έχει τη μορφή μιας συνήθους συνάρτησης της μορφής $y = f(x)$. Αποτελεί μια αλγεβρική (ενίοτε και διαφορική) μαθηματική σχέση που χρησιμοποιεί ένα σύνολο από δεδομένα που αφορούν αυτό το φαινόμενο και που έχουν προκύψει από την παρατήρησή του, ώστε μέσα από την ανάλυσή τους με αυτή την μέθοδο να προκύψει η σχέση που αναζητείται. Η χρησιμότητα της μαθηματικής έκφρασης έγκειται στο ότι για οποιαδήποτε μελλοντική τιμή της εισόδου x , η αναμενόμενη απόκριση y του φαινομένου μπορεί να προβλεφθεί από τη συνάρτηση $y = f(x)$ χωρίς πλέον να απαιτείται να πραγματοποιηθεί και να παρατηρηθεί το ίδιο το φαινόμενο. Η χρήση της μαθηματικής έκφρασης, αντί των αρχικών δεδομένων, σημαίνει πως, εφόσον βρεθεί η μαθηματική σχέση που περιγράφει το φυσικό φαινόμενο, η βάση δεδομένων δεν θα είναι πλέον απαραίτητη για την περιγραφή του φαινομένου αυτού, αφού το μαθηματικό μοντέλο θα είναι αυτό που θα κάνει πλέον τις απαραίτητες εκτιμήσεις για οποιοσδήποτε μελλοντικές τιμές εισόδου.

Από την παραπάνω περιγραφή φαίνεται ότι η μέθοδος της παλινδρόμησης δεν σχετίζεται αποκλειστικά με τη ΜΕ καθώς όλες οι γνωστές συσχετίσεις (όχι μόνο στο χώρο της Μηχανικής Πετρελαίων) εκπληρώνουν αντίστοιχο σκοπό, όπως, για παράδειγμα, οι συσχετίσεις των PVT ιδιοτήτων με χρήση επιφανειακών δεδομένων που θα συζητηθούν στο Κεφάλαιο 6. Η διαφορά μεταξύ των συνήθων συσχετίσεων και των συνθετότερων μοντέλων ΜΕ, όπως τα ΤΝΔ, θα αποσαφηνιστεί στη συνέχεια.

Με την ανάλυση του μαθηματικού μοντέλου που έχει προκύψει από τη διαδικασία της παλινδρόμησης, καθίσταται δυνατό να μελετηθεί η ευαισθησία της σχέσης μεταξύ της εξαρτημένης μεταβλητής y (τιμή εξόδου) και των ανεξάρτητων μεταβλητών x (τιμές εισόδου) αξιοποιώντας αντίστροφα τη μαθηματική έκφραση του μοντέλου. Έτσι, αν υπάρχει κάποια επιθυμητή τιμή εξόδου y , το μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να προσδιοριστούν οι τιμές εισόδου x οι οποίες, όταν εφαρμοστούν, θα προκύψει η επιθυμητή τιμή εξόδου. Με αυτόν τον τρόπο γίνεται εφικτό να επιτευχθεί η βέλτιστη τιμή

εξόδου y χωρίς να χρειαστεί να μετρηθεί με πειραματικό τρόπο και χωρίς να επαναληφθεί με φυσικό τρόπο το πείραμα πολλές φορές μέχρι να προκύψουν οι βέλτιστες τιμές εισόδου.

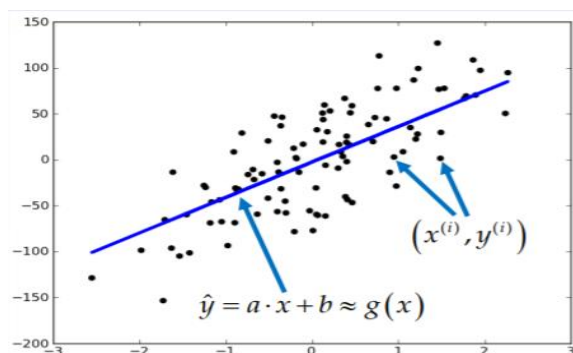
Αυστηρά μιλώντας, δεν υπάρχει εγγύηση ότι η παραγόμενη σχέση $f(x)$ εκφράζει απόλυτα σωστά το υπό παρατήρηση φυσικό φαινόμενο. Ουσιαστικά, αυτό που επιδιώκεται κατά την ανάπτυξη της, με δεδομένα ένα σύνολο πειραματικών μετρήσεων που αντιστοιχούν σε τιμές εισόδου x_i και τιμές εξόδου y_i , να προκύψει μια μαθηματική μορφή η οποία θα παρέχει τιμές εξόδου \hat{y} όσο το δυνατόν πιο κοντά στις πειραματικές τιμές, όταν σε αυτήν εισάγονται οι παράμετροι x , που επηρεάζουν την παράμετρο y . Εφόσον η $f(x)$ αναπαράγει τα πειραματικά δεδομένα με ικανοποιητική ακρίβεια, τότε αναμένεται ότι θα αναπαραγάγει επίσης με ακρίβεια την πραγματική έξοδο y για οποιαδήποτε τυχαία είσοδο x .

Ένα παράδειγμα χρήσης της μεθόδου της παλινδρομικής ανάλυσης στην πετρελαϊκή βιομηχανία είναι το μοντέλο υπολογισμού GOR των Hegeman et al, 2007 που αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, το οποίο έχει ως τιμές εισόδου x τη σύσταση που προσδιορίζεται από το εργαλείο YAP και ως τιμή εξόδου y την τιμή του GOR, με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια σε σύγκριση με την πειραματικά μετρημένη τιμή.

4.3. Παραμετρικές και μη παραμετρικές μέθοδοι

4.3.1. Παραμετρικές μέθοδοι

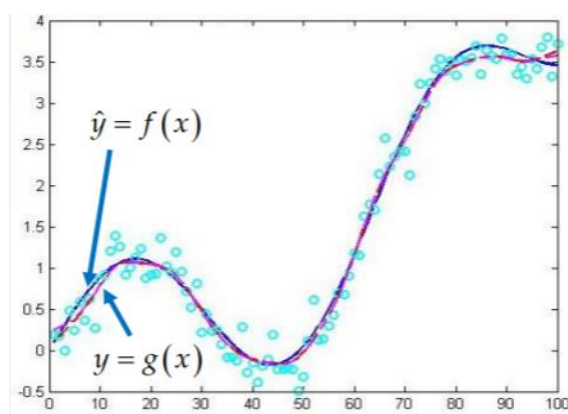
Η ανάλυση παλινδρόμησης πραγματοποιείται μέσω δύο βασικών κατηγοριών μεθόδων: Τις παραμετρικές και τις μη παραμετρικές. Στην πρώτη περίπτωση, έχοντας ως δεδομένα ένα σύνολο πειραματικά μετρημένων τιμών $x^{(i)}$ και $y^{(i)}$ επιλέγεται η παραμετρική μαθηματική σχέση που τα διέπει (π.χ. ένα πολώνυμο όπου παράμετροι είναι οι συντελεστές των μονωνύμων του), ώστε από εδώ και στο εξής για όποια τιμή x εισήχθη στη μαθηματική έκφραση να προσδιορίζεται η αντίστοιχη τιμή y . Αυτό παρουσιάζεται και στο Διάγραμμα 4.1 όπου τα μαύρα σημεία απεικονίζουν τα διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα ενώ η μπλε ευθεία αποτελεί τη γραφική παράσταση της βέλτιστης γραμμικής μαθηματικής σχέσης που προέκυψε από την ανάλυση παλινδρόμησης.



Διάγραμμα 4.1: Ανάλυση παλινδρόμησης σε μια σειρά δεδομένων χρησιμοποιώντας ένα γραμμικό μαθηματικό μοντέλο (Γαγάνης, 2021)

Ουσιαστικά, αυτό που πραγματοποιείται με την ανάλυση παλινδρόμησης με παραμετρική μέθοδο είναι η εύρεση των τιμών των παραμέτρων (στην παραπάνω περίπτωση που έχουμε γραμμική σχέση πρόκειται για τις παραμέτρους a , b), ώστε η γραφική παράσταση του μαθηματικού μοντέλου να διέρχεται κατά το βέλτιστο τρόπο ανάμεσα από τα σημεία. Είναι προφανές πως στο Διάγραμμα 4.1 η γραμμική σχέση που επιλέχτηκε δεν είναι η κατάλληλη αφού πολλά από τα σημεία βρίσκονται σε μεγάλη απόσταση από την ευθεία.

Αν και η γραμμική σχέση αποτελεί την απλούστερη μορφή μαθηματικού μοντέλου, στο Διάγραμμα 4.2 εμφανίζεται η περίπτωση όπου επιλέχτηκε ένα πιο σύνθετο μοντέλο για να εκφράσει τη σχέση που διέπει τα x και y με εμφανώς καλύτερα αποτελέσματα. Συμπεραίνεται, επομένως, πως όσο πιο ευέλικτο και πολύπλοκο είναι το μοντέλο τόσο καλύτερα μπορεί να αναπαραγάγει τα πειραματικά σημεία.

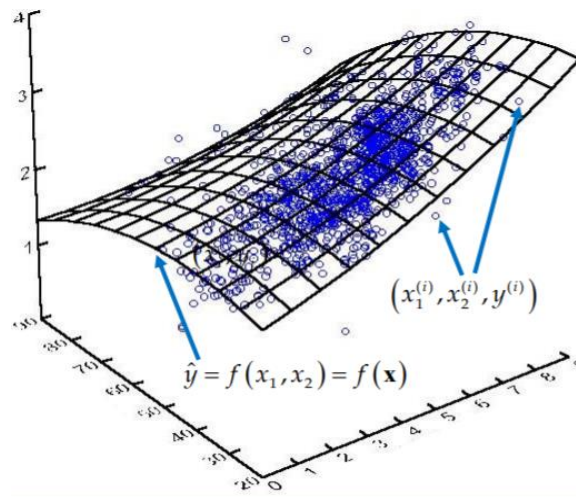


Διάγραμμα 4.2: Ανάλυση παλινδρόμησης σε μια σειρά δεδομένων χρησιμοποιώντας ένα πολυπλοκότερο μαθηματικό μοντέλο (Γαγάνης, 2021)

Η μεγαλύτερη δυσκολία των παραμετρικών μεθόδων είναι η επιλογή του κατάλληλου παραμετρικού μοντέλου, ώστε να απεικονιστεί όσο ακριβέστερα γίνεται η σχέση που διέπει τα x και τα y . Από τη στιγμή που θα επιλεγεί το κατάλληλο μοντέλο και

υπολογιστούν οι σωστές τιμές των παραμέτρων, τότε τα πειραματικά δεδομένα δεν απαιτούνται πουθενά για τους επόμενους υπολογισμούς, καθώς η σχέση που εκφράζει το φαινόμενο αυτό έχει πλέον διατυπωθεί μαθηματικά και για κάθε καινούργιο x που θα εισάγεται θα μπορεί να εκτιμηθεί το αντίστοιχο y , με ακρίβεια ανάλογη της καταλληλότητας του μοντέλου.

Προφανώς η μέθοδος που περιγράφηκε μπορεί να γενικευτεί και στην περίπτωση που οι τιμές εισόδου x έχουν περισσότερες από μια διαστάσεις κι επομένως η είσοδος σε κάθε πειραματική μέτρηση αποτελεί ένα διάνυσμα αντί για απλά ένα βαθμωτό μέγεθος. Στην περίπτωση αυτή, η αποτύπωση του μοντέλου και των πειραματικών σημείων δεν γίνεται σε δυο διαστάσεις, αλλά σε περισσότερες. Στο Διάγραμμα 4.3 παρουσιάζεται η περίπτωση όπου οι μεταβλητές εισόδου x είναι δύο και η απεικόνιση του μοντέλου στον χώρο δεν είναι πλέον καμπύλη αλλά επιφάνεια. Το ζητούμενο μοντέλο έχει τη μορφή $y = f(x_1, x_2)$

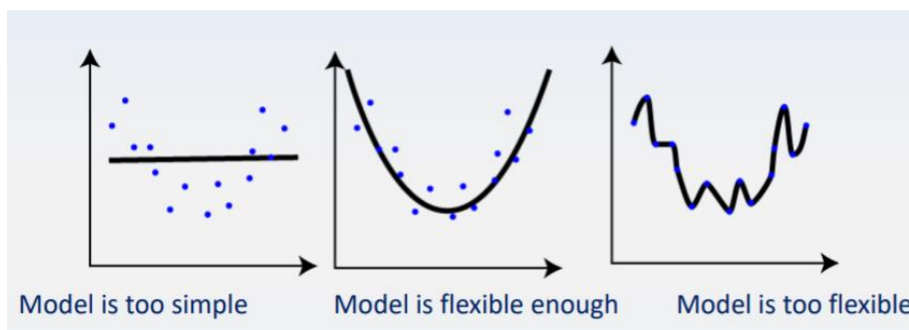


Διάγραμμα 4.3: Ανάλυση παλινδρόμησης σε μια σειρά δεδομένων στην περίπτωση που υπάρχουν δυο τιμές εισόδου x_1, x_2 (Γαγάνης, 2021)

Υπερπροσαρμογή του Μοντέλου (Model Overfitting)

Όπως αναφέρθηκε, η μεγαλύτερη δυσκολία στις παραμετρικές μεθόδους είναι η επιλογή του καταλληλότερου μαθηματικού μοντέλου για την περιγραφή ενός φαινομένου. Ξεκινώντας από την απλούστερη περίπτωση ενός γραμμικού μοντέλου, η πολυπλοκότητα του μοντέλου μπορεί να αυξηθεί (πχ αυξάνοντας τον βαθμό εάν πρόκειται για πολυώνυμα), ώστε αυτό να απεικονίσει ακριβέστερα το φαινόμενο που μελετάται. Στο Διάγραμμα 4.4 παρουσιάζονται τρεις περιπτώσεις όπου επιλέχθηκαν διαφορετικής πολυπλοκότητας μοντέλα για την αποτύπωση ενός φαινομένου. Παρατηρείται πως, στην πρώτη περίπτωση που επιλέχτηκε το απλούστερο μοντέλο, η ευθεία γραμμή δεν επαρκεί

για να περιγράψει ικανοποιητικά το φαινόμενο, αφού αρκετά από τα σημεία βρίσκονται σε μεγάλη απόσταση από αυτή. Στη δεύτερη περίπτωση, το λίγο πιο ευέλικτο μοντέλο που επιλέχθηκε ανταποκρίνεται με μεγαλύτερη ακρίβεια στο φαινόμενο προς μελέτη, καθώς η καμπύλη διέρχεται ανάμεσα από τα περισσότερα σημεία με εξαίρεση ορισμένα, τα όποια πιθανώς οφείλονται στον θόρυβο και τα σφάλματα της πειραματικής διαδικασίας κατά την οποία μετρήθηκαν και καταγράφηκαν οι τιμές των εισόδων και των εξόδων. Στην τρίτη περίπτωση επιλέχθηκε ένα υπερβολικά ευέλικτο μοντέλο για να περιγράψει αυτό το φαινόμενο με αποτέλεσμα η $f(x)$ που παράχθηκε από τη διαδικασία της παλινδρόμησης να εμφανίζει εξαιρετική ταύτιση με τα σημεία στα οποία βασίστηκε. Κατά κανόνα, όμως κανένα φυσικό φαινόμενο που απασχολεί τους Μηχανικούς στον χώρο των υδρογονανθράκων δεν θα περιγραφόταν από μια τόσο αφύσικα σύνθετη και πολύπλοκη καμπύλη, καθώς τα περισσότερα φαινόμενα διέπονται από απλές, ομαλές και λείες σχέσεις. Επαφίεται λοιπόν στον Μηχανικό η επιλογή του κατάλληλου μοντέλου, ώστε να βρεθεί η ισορροπία ανάμεσα σε ένα υπερβολικά απλό μοντέλο που δεν περιγράφει επαρκώς το φαινόμενο και σε ένα υπερβολικά σύνθετο μοντέλο το οποίο περιγράφει αποκλειστικά τα συγκεκριμένα δεδομένα, χωρίς όμως να αναπαριστά ρεαλιστικά την πραγματική μαθηματική σχέση.

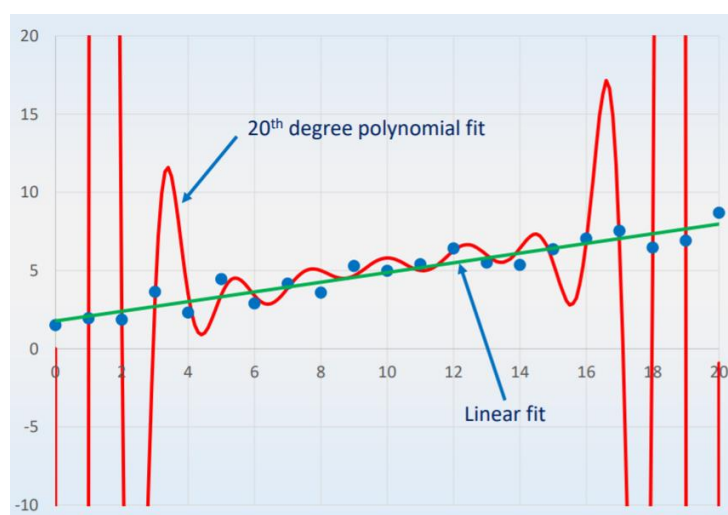


Διάγραμμα 4.4: Διαφορετικοί βαθμοί πολυπλοκότητας μοντέλου για την απεικόνιση ενός φαινομένου (Γαγάνης, 2021)

Στο Διάγραμμα 4.5 συγκρίνονται δύο μοντέλα με διαφορετικούς βαθμούς πολυπλοκότητας. Είναι φανερό πως η πράσινη καμπύλη (γραμμική προσέγγιση) διέρχεται με πολύ μικρή απόκλιση μέσα από τα σημεία, χωρίς όμως να ταυτίζεται απόλυτα με αυτά. Από την άλλη μεριά, η κόκκινη καμπύλη (20^ο βαθμού πολυωνυμική προσέγγιση) διέρχεται σχεδόν από το κάθε ένα σημείο ξεχωριστά. Όπως αναφέρθηκε, στην περίπτωση που εξετάζεται ένα φυσικό φαινόμενο, η πράσινη αποτελεί τη βέλτιστη λύση. Αυτό συμβαίνει γιατί, παρόλο που για τα συγκεκριμένα αυτά σημεία η κόκκινη καμπύλη έχει

μεγαλύτερη ακρίβεια, στην περίπτωση που εισαχθούν διαφορετικά δεδομένα από αυτά που αναλύθηκαν για να υπολογιστεί η κόκκινη καμπύλη (για παράδειγμα η τιμή εισόδου 1.5 ή 18.5), το μοντέλο θα δώσει εντελώς μη ρεαλιστικές εκτιμήσεις με τεράστια απόκλιση από τις πραγματικές τιμές εξόδου. Παρατηρείται πως, στην περίπτωση που δοθεί ως τιμή εισόδου x , π.χ. ανάμεσα στο 1 και το 2, τότε ακολουθώντας την κόκκινη καμπύλη η έξοδος y θα έχει μια ακραία θετική τιμή, κάτι δεν ανταποκρίνεται στην πραγματικότητα του φαινομένου.

Ως υπερπροσαρμογή (overfitting) ορίζεται η ανάπτυξη ενός παραμετρικού μοντέλου τόσο ακριβούς, που να περιγράφει εξαιρετικά τα πειραματικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του, αλλά να απέχει δραματικά από την πραγματική σχέση που συνδέει την είσοδο με την έξοδο. Για οποιαδήποτε άλλα δεδομένα τα οποία περιέχουν θόρυβο, πειραματικό σφάλμα κτλ, το μοντέλο θα εκτιμήσει τις τιμές εξόδου με υπερβολικά μεγάλο σφάλμα, καθιστώντας το παντελώς ανακριβές και αναξιόπιστο.



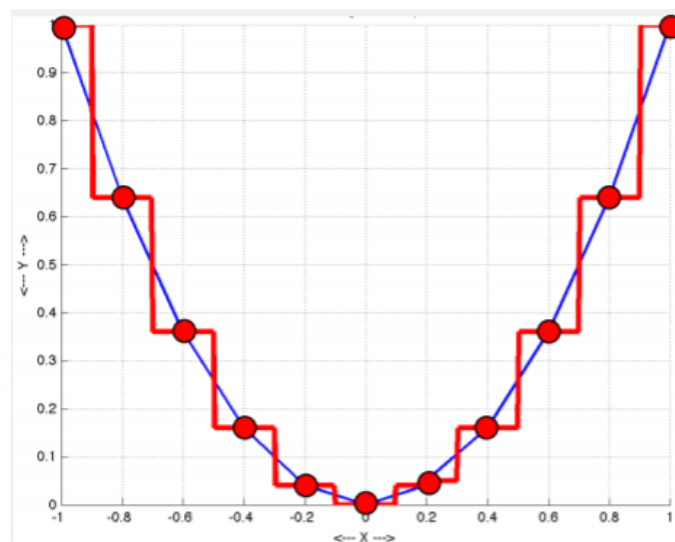
Διάγραμμα 4.5: Σύγκριση μοντέλων με διαφορετικούς βαθμούς ευελιξίας. Η περίπτωση της υπερπροσαρμογής (Γαγάνης, 2021)

4.3.2. Μη παραμετρικές μέθοδοι

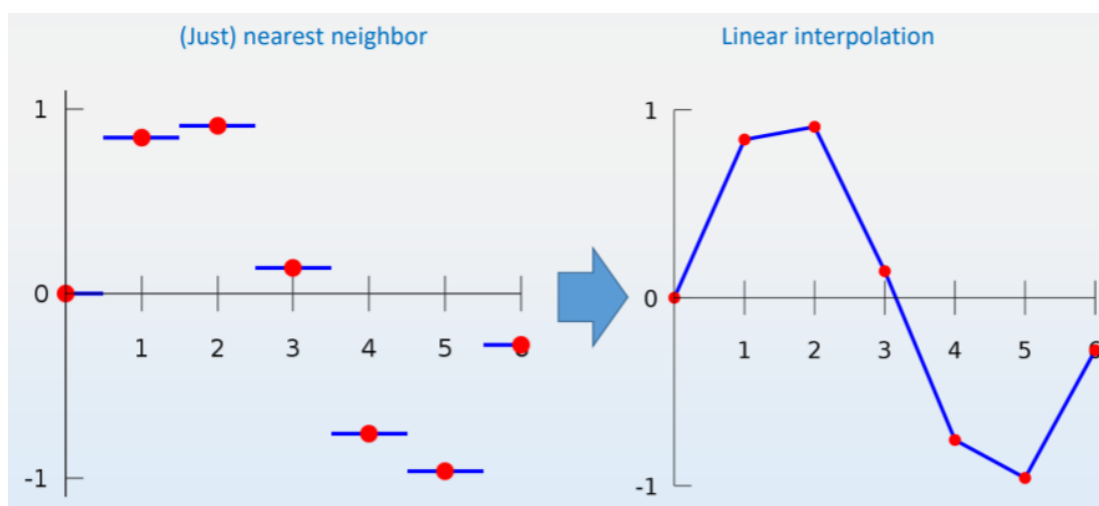
Τη δεύτερη κατηγορία μεθόδων ανάλυσης παλινδρόμησης αποτελούν οι μη παραμετρικές μέθοδοι. Οι μέθοδοι αυτές δεν απαιτούν την επιλογή ενός παραμετρικού μαθηματικού μοντέλου για την εκτίμηση των τιμών εξόδου και συνεπώς δεν πραγματοποιείται προσδιορισμός παραμέτρων μέσα από αυτή την μέθοδο. Στο Διάγραμμα 4.6, ως παράδειγμα εφαρμογής αυτής της μεθόδου, αποτυπώνονται με κόκκινα σημεία τα πειραματικά σημεία μιας τυχαίας ιδιότητας που πρέπει να προβλεφθεί. Η βασική αρχή

είναι πως για οποιαδήποτε μελλοντική τιμή εισόδου x ζητηθεί η αντίστοιχη τιμή εξόδου y τότε, το y θα υιοθετήσει την τιμή του πλησιέστερου στο ζητούμενο x σημείου από αυτά που προσδιορίστηκαν με πειραματική διαδικασία, το οποίο είναι ήδη διαθέσιμο και η τιμή του είναι γνωστή. Η εφαρμογή αυτού του κανόνα οδηγεί σε προβλέψεις για κάθε είσοδο, η γραφική παράσταση των οποίων είναι η ασυνεχής κόκκινη γραμμή. Είναι προφανές πως, σε σύγκριση με την μπλε καμπύλη του Διαγράμματος 4.6 που αποτελεί το πραγματικό μαθηματικό μοντέλο που συσχετίζει τα σημεία μεταξύ τους (δεν θεωρείται γνωστό), η κόκκινη γραμμή έχει σαφέστατα μικρότερη ακρίβεια. Η καμπύλη παύει να είναι συνεχής αλλά εμφανίζει πλέον «σκαλοπάτια», με το κάθε σκαλοπάτι να αντιπροσωπεύει την τιμή εξόδου y για όλες τις τιμές εισόδου x που είναι πλησιέστερες στην επιθυμητή τιμή εισόδου x .

Για να βελτιωθεί η έλλειψη ακρίβειας των μη παραμετρικών μεθόδων, εφαρμόζονται μέθοδοι, οι οποίες χρησιμοποιούν μεν την ίδια αρχή της υιοθέτησης της τιμής του πιο κοντινού γείτονα, όμως αξιοποιούν την πληροφορία των γειτόνων με πιο έξυπνο τρόπο. Μια από αυτές είναι η γραμμική παρεμβολή (linear interpolation) που απεικονίζεται στο Διάγραμμα 4.7. Στη γραμμική παρεμβολή, η τιμή εξόδου y μιας μελλοντικής εισόδου x προκύπτει



Διάγραμμα 4.6: Παράδειγμα μοντέλου μη παραμετρικής μεθόδου σε σύγκριση με μοντέλο παραμετρικής μεθόδου (Γαγάνης, 2021)



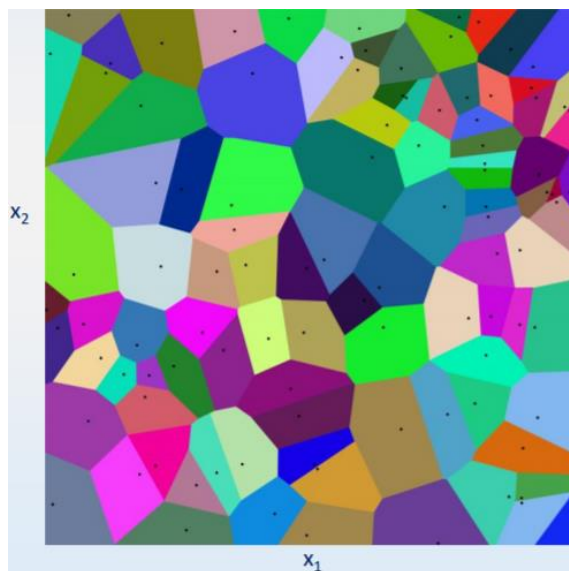
Διάγραμμα 4.7: Γραμμική παρεμβολή σε μη παραμετρικές μεθόδους (Γαγάνης, 2021)

από συνδυασμό των δυο κοντινότερων σε αυτό το x τιμών εξόδου. Πράγματι, για κάθε τιμή εισόδου μεταξύ των δύο αυτών κοντινότερων, θεωρείται ότι το πραγματικό φαινόμενο διέπεται από την ευθεία γραμμή (γραμμική παρεμβολή) κι επομένως η εκτίμηση της εξόδου δίνεται από την τιμή της ευθείας για την επιθυμητή νέα είσοδο. Το μη παραμετρικό αυτό μοντέλο είναι συνθετότερο, ανεβάζοντας έτσι την πολυπλοκότητα, παρέχοντας εξόδους με συνέχεια της τιμής και βελτιώνοντας ταυτόχρονα την ακρίβειά του.

Σε συνέχεια της γραμμικής παρεμβολής, ως ακόμη πιο σύνθετη μέθοδος, χρησιμοποιείται η παρεμβολή με χρήση δευτεροβάθμιων πολυωνύμων. Σε αυτή τη μέθοδο, η τιμή εξόδου y από μελλοντικό x προκύπτει από τα τρία κοντινότερα σημεία σε αυτό. Αρχή της παρεμβολής αυτής είναι πως από τρία σημεία διέρχεται η καμπύλη ενός πολυωνύμου 2^{ου} βαθμού. Με τη βοήθεια αυτού του τοπικού τριώνυμου προκύπτουν και οι τιμές εξόδου y για οποιαδήποτε τιμή εισόδου x απαιτηθεί. Η μέθοδος αυτή αυξάνει ακόμα περισσότερο την πολυπλοκότητα του μοντέλου, καθιστώντας πλέον την παράγωγο της καμπύλης συνεχή (χωρίς απότομες αλλαγές κλίσης).

Όπως και στις παραμετρικές μεθόδους, έτσι και αυτή η μέθοδος μπορεί να γενικευτεί και σε δυο διαστάσεις. Ένα παράδειγμα μη παραμετρικών μεθόδων σε δυο διαστάσεις είναι το διάγραμμα του Voronoi. Το διάγραμμα αυτό αποτελεί συνάρτηση δυο μεταβλητών εισόδου x_1 , x_2 και μιας εξόδου y . Στο Διάγραμμα 4.8 απεικονίζεται ένα παράδειγμα εφαρμογής του αλγορίθμου Voronoi, όπου τα μαύρα σημεία αποτελούν τις τιμές εισόδου

των πειραματικών σημείων της βάσης δεδομένων. Το επίπεδο χωρίζεται σε περιοχές όπου κάθε περιοχή διαφορετικού χρώματος λαμβάνει την ίδια τιμή εξόδου y με την τιμή του πειραματικά μετρημένου μαύρου σημείου, το οποίο αποτελεί το πλησιέστερο από όλα τα υπόλοιπα σημεία εντός της συγκεκριμένης περιοχής. Σημειώνεται ότι, η μεθοδολογία αυτή, δεν μπορεί να γενικευτεί σε περισσότερες από δύο διαστάσεις.

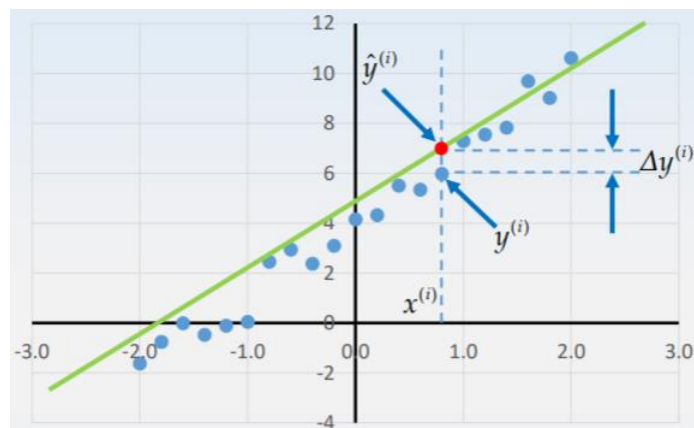


Διάγραμμα 4.8: Το διάγραμμα του Voronoi (Γαγάνης, 2021)

Συμπεραίνεται πως, οι μη παραμετρικές μέθοδοι είναι σαφώς πιο εύχρηστες από τις παραμετρικές, καθώς δεν απαιτούν τον προσδιορισμό του μοντέλου και κατά συνέπεια ούτε την εύρεση των τιμών των παραμέτρων. Όμως, προσδίδουν σαφώς μικρότερη ακρίβεια στις μετρήσεις. Για να ενισχυθεί η ακρίβειά τους, εκτός από τις μεθόδους παρεμβολής που αναφέρθηκαν, απαιτείται και ένας τεράστιος όγκος από πειραματικά δεδομένα, ο οποίος πολύ συχνά δεν είναι διαθέσιμος. Από την άλλη πλευρά, οι παραμετρικές μέθοδοι μπορούν να οδηγήσουν σε μοντέλα αξιοπρεπούς ακρίβειας ακόμη και με μικρότερο όγκο δεδομένων εκπαίδευσης, αφού ένα μεγάλο μέρος πληροφορίας σχετικά με τη συμπεριφορά του υπό ανάπτυξη μοντέλου προσδίδεται από την επιλογή της μαθηματικής παραμετρικής μορφής του. Το μαθηματικό μοντέλο στις παραμετρικές μεθόδους είναι καθολικό, και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για οποιαδήποτε άλλη βάση δεδομένων υπό μελέτη εφόσον αυτή αφορά το ίδιο φυσικό φαινόμενο, σε αντίθεση με τις παραμετρικές μεθόδους όπου το μοντέλο τους έχει χρήση μόνο για τη συγκεκριμένη βάση δεδομένων. Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα που αποτελούν το αντικείμενο αυτής της εργασίας ανήκουν στις παραμετρικές μεθόδους.

4.4. Γραμμική Παλινδρόμηση

Όπως συζητήθηκε και στην αρχή του παρόντος κεφαλαίου, παλινδρόμηση είναι η μοντελοποίηση της συσχέτισης δυο μεταβλητών, της ανεξάρτητης μεταβλητής x και της εξαρτημένης y . Στην περίπτωση της απλής γραμμικής παλινδρόμησης αυτό γίνεται εφαρμόζοντας μια γραμμική εξίσωση στα υπάρχοντα δεδομένα. Αποτελεί το πιο απλό μοντέλο παλινδρόμησης που μπορεί να προσαρμοστεί στα δεδομένα και γραφικά αναπαριστάται με μια ευθεία γραμμή. Ανάμεσα σε άλλες μεθόδους για την εύρεση των βέλτιστων παραμέτρων του μοντέλου, η συνηθέστερη είναι η Μέθοδος των Ελαχίστων Τετραγώνων - MET (Least Squares method). Σκοπός αυτής της μεθόδου, όπως και στις υπόλοιπες παραμετρικές, είναι, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η εύρεση των παραμέτρων του μαθηματικού μοντέλου που συσχετίζουν βέλτιστα την εξαρτημένη τιμή εξόδου y με την ανεξάρτητη τιμή εισόδου x . Στο Διάγραμμα 4.9 απεικονίζεται ως παράδειγμα ένα σύνολο πειραματικών δεδομένων με μια πιθανή ευθεία (παραμετρικό μοντέλο) η οποία, ωστόσο, δεν έχει ακόμα βελτιστοποιηθεί εφαρμόζοντας την MET.



Διάγραμμα 4.9: Μέθοδος των Ελαχίστων Τετραγώνων (Γαγάνης, 2021)

Ως βέλτιστη λύση ορίζεται το παραμετρικό μοντέλο με μορφή ευθείας γραμμής $\hat{y}^{(i)} = ax^{(i)} + b$ όπου για όλες τις τιμές εισόδου x από το σύνολο των διαθέσιμων πειραματικών δεδομένων, ελαχιστοποιείται το άθροισμα J των τετραγώνων των διαφορών της εκτιμώμενης τιμής εξόδου \hat{y} με την πειραματικά μετρημένη y , για καθένα από τα N διαθέσιμα πειραματικά δεδομένα, όπως αυτό περιγράφεται μαθηματικά στην Εξίσωση 4.1.

$$J = \sum_{i=1}^N (\Delta y^{(i)})^2 = \sum_{i=1}^N (\hat{y}^{(i)} - y^{(i)})^2 \quad (4.1)$$

όπου,

J = το συνολικό σφάλμα προς ελαχιστοποίηση

Οι βέλτιστες τιμές των παραμέτρων a , b είναι αυτές που ελαχιστοποιούν το συνολικό σφάλμα J . Σημειώνεται, ότι ελαχιστοποιώντας το J , ουσιαστικά ελαχιστοποιείται το τετράγωνο της διαφοράς καθώς αυτό που επιζητείται είναι το συνολικό σφάλμα να προσεγγίσει το μηδέν και όχι να λάβει μια υπερβολικά αρνητική τιμή, κάτι που θα γινόταν εάν η διαφορά δεν ήταν υψωμένη στο τετράγωνο.

4.4.1. Ελαχιστοποίηση

Παραπάνω αναφέρθηκε ο όρος ελαχιστοποίηση ως η απαραίτητη μέθοδος για την εύρεση των βέλτιστων τιμών των παραμέτρων του υπό ανάπτυξη μοντέλου. Αυτή είναι και η ουσία της παλινδρόμησης, να βρεθεί δηλαδή το ελάχιστο σφάλμα ανάμεσα σε όλες τις πειραματικά μετρημένες τιμές εξόδου και τις εκτιμώμενες τιμές εξόδου που προκύπτουν από το μοντέλο παλινδρόμησης.

Γενικά, τα προβλήματα ελαχιστοποίησης χωρίζονται σε δυο κατηγορίες : Αυτά που έχουν κλειστή μορφή λύσης και αυτά που για την επίλυσή τους χρειάζεται να εφαρμοστούν επαναληπτικές αριθμητικές μέθοδοι. Στην πρώτη περίπτωση, οι βέλτιστες παράμετροι του μοντέλου μπορούν να υπολογιστούν απευθείας με τη χρήση συγκεκριμένων εξισώσεων, όπως ακριβώς συμβαίνει και στην MET για τα γραμμικά μοντέλα, που αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο. Στη δεύτερη περίπτωση, το μοντέλο αρχικοποιείται με τυχαίες τιμές των παραμέτρων του, και σε κάθε επανάληψη του αλγόριθμου υπολογίζεται το συνολικό σφάλμα και οι παράμετροι βελτιώνονται κατά λίγο. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι το σφάλμα να ελαχιστοποιηθεί και να προσδιοριστούν οι βέλτιστες τιμές των παραμέτρων. Σημειώνεται ότι, όλα τα προβλήματα που αφορούν την εκπαίδευση ΤΝΔ χρησιμοποιούν αποκλειστικά επαναληπτικές μεθόδους για την εύρεση των βέλτιστων τιμών των παραμέτρων τους.

Μια τελευταία παρατήρηση που πρέπει να επισημανθεί για τα προβλήματα γραμμικής παλινδρόμησης είναι πως δεν σχετίζονται μόνο με μοντέλα γραμμικών εξισώσεων αλλά και με πολυωνυμικά, εκθετικά, λογαριθμικά κτλ, τα οποία, όπως και το απλό γραμμικό έχουν κλειστή μορφή λύσης όμοια με την MET που αναλύθηκε παραπάνω. Ο λόγος για τον οποίο συμβαίνει αυτό είναι πως προβλήματα γραμμικής παλινδρόμησης είναι όσα η μαθηματική τους μορφή είναι γραμμική ως προς τις παραμέτρους του μοντέλου και όχι προς τις μεταβλητές εισόδου, όπως για παράδειγμα το παρακάτω μοντέλο που είναι δεν είναι γραμμικό ως την είσοδο x αλλά είναι γραμμικό ως προς τις παραμέτρους a , b , c .

$$\hat{y}^{(i)} = a \exp(x^{(i)}) + b \exp(\sin(x^{(i)})) + c(x^{(i)})^3$$

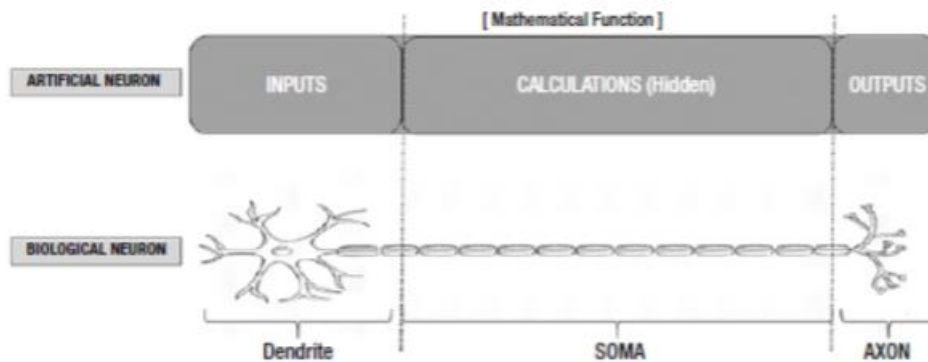
όπου οι παράμετροι a , b επηρεάζουν γραμμικά το μοντέλο.

4.5. Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα ΤΝΔ – Artificial Neural Networks (ANN)

4.5.1. Εισαγωγή

Τα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα αποτελούν ψηφιοποιημένα μαθηματικά μοντέλα του ανθρώπινου εγκεφάλου και χρησιμοποιούνται ως υπολογιστικά προγράμματα που σχεδιάστηκαν για να προσομοιάζουν τον τρόπο με τον οποίο το ανθρώπινο μυαλό επεξεργάζεται την πληροφορία. Τα ΤΝΔ εκπαιδεύονται μέσα από την εμπειρία που αποκτούν από κατάλληλα παραδείγματα και όχι μέσα από αυστηρό προγραμματισμό. Αποτελούνται από πληθώρα μονάδων επεξεργασίας πληροφοριών (κύτταρα, νευρώνες, κόμβους) που συνδέονται μεταξύ τους με ορισμένες παραμέτρους (γνωστές ως βάρη) για να συνθέσουν μια νευρωνική δομή. Οι νευρώνες αυτοί οργανώνονται σε επίπεδα και κάθε νευρώνας εκτελεί απλές μαθηματικές συναρτήσεις. Ως μονάδα, ένας νευρώνας είναι σχετικά ανίσχυρος αλλά η ισχύς επεξεργασίας πληροφοριών των ΤΝΔ πηγάζει από τη σύνδεση πολλών νευρώνων σε ένα δίκτυο.

Η έμπνευση από τον ανθρώπινο εγκέφαλο προκύπτει από τους νευρώνες του ανθρώπινου εγκεφάλου που συνδέονται μεταξύ τους και μεταδίδουν ηλεκτρικά σήματα μέσω των νευρικών ινών σε άλλους νευρώνες. Οι τεχνητοί νευρώνες είναι αντίστοιχοι με τους βιολογικούς, όπου οι τελευταίοι έχουν δενδρίτες, συνάψεις και άξονες. Οι τεχνητοί νευρώνες, που είναι στην ουσία μαθηματικές συναρτήσεις, έχουν εισροές (μία ή περισσότερες), οι οποίες αντιπροσωπεύουν τους δενδρίτες, και οι έξοδοι αντιπροσωπεύουν τους άξονες. Στην Εικόνα 4.1 απεικονίζεται η ομοιότητα που περιγράφηκε.



Εικόνα 4.1: Σχηματική απεικόνιση Νευρωνικού δικτύου και νευρώνα (Kumar, 2017)

4.5.2. Βασικά στοιχεία

Τα βασικά στοιχεία ενός τεχνητού νευρώνα είναι:

- Οι τιμές εισόδου των ανεξάρτητων μεταβλητών x_i
- Τα βάρη (weights) της κάθε ανεξάρτητης μεταβλητής x_i που αντιστοιχούν στη σημαντικότητα και τη συνεισφορά της κάθε μεταβλητής στην ενεργοποίηση του νευρώνα
- Η συνάρτηση μεταφοράς (transfer function) όπου για κάθε είσοδο υπολογίζονται το γινόμενο της τιμής εισόδου x_i με το βάρος $w^{(1)}$ που της αντιστοιχεί. Τα επιμέρους γινόμενα αθροίζονται (όπως συμβαίνει σε ένα διανυσματικό εσωτερικό γινόμενο) και στο αποτέλεσμα προστίθεται μια παράμετρος $b^{(1)}$ η οποία ονομάζεται πόλωση (bias). Το άθροισμα που προκύπτει περιγράφεται από τη σχέση

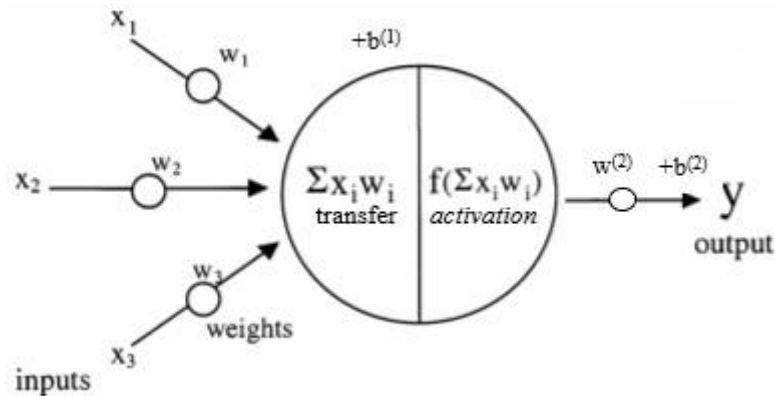
$$v(\mathbf{x}) = \sum x_i w^{(1)} + b^{(1)} \quad (4.2)$$

- Η συνάρτηση ενεργοποίησης (activation function) $\varphi(v)$. Αποτελεί μια μη γραμμική συνάρτηση η οποία εφαρμόζεται στη συνάρτηση μεταφοράς v του νευρώνα. Το αποτέλεσμα που προκύπτει από την εφαρμογή της συνάρτησης ενεργοποίησης πολλαπλασιάζεται ξανά με ένα ακόμα βάρος $w^{(2)}$. Στη συνέχεια, στην περίπτωση των δικτύων όπου υπάρχουν περισσότεροι από έναν νευρώνα, τα γινόμενα προστίθενται μεταξύ τους. Τέλος, στο τελικό άθροισμα προστίθεται μια ακόμα σταθερά πόλωσης $b^{(2)}$. Το τελικό αποτέλεσμα αποτελεί και την τιμή εξόδου

y του νευρωνικού δικτύου. Τα παραπάνω περιγράφονται μαθηματικά από τη Εξίσωση 4.3.

$$y = \mathbf{w}^{(2)} \varphi(v) + \mathbf{b}^{(2)} = \mathbf{w}^{(2)} \varphi(\mathbf{w}^{(1)} x_i + \mathbf{b}^{(1)}) + \mathbf{b}^{(2)} \quad (4.3)$$

Στο διάγραμμα 4.10 παρουσιάζεται η σχηματική απεικόνιση ενός νευρώνα.



Διάγραμμα 4.10: : Σχηματική αναπαράσταση των διαδικασιών ενός τεχνητού νευρώνα (Γαγάνης, 2021)

4.5.3. Συνάρτηση Ενεργοποίησης

Η συνάρτηση ενεργοποίησης μπορεί να είναι μια οποιαδήποτε μη γραμμική συνάρτηση. Αυτός είναι και ο λόγος που τα νευρωνικά δίκτυα ανήκουν στην κατηγορία της μη γραμμικής παλινδρόμησης. Χρησιμοποιούνται κυρίως σιγμοειδείς συναρτήσεις, καθώς έχουν μαθηματικές ιδιότητες που συνεισφέρουν θετικά στη διαδικασία εκπαίδευσης του νευρωνικού δικτύου, όπως το ότι είναι συνεχείς, φραγμένες και γνησίως αύξουσες σε όλο το πεδίο ορισμού τους. Τέλος, είναι μεγάλης σημασίας πως είναι παραγωγίσιμες, καθιστώντας εφικτή την εφαρμογή του κανόνα της αλυσίδας, στην παραπάνω σχέση, ώστε να μπορεί να εφαρμοστεί ο αλγόριθμος οπισθοδιάδοσης (back-propagation) του σφάλματος για την εκπαίδευσή τους, κάτι που θα αναλυθεί στη συνέχεια.

Συνηθέστερες συναρτήσεις ενεργοποίησης αποτελούν η λογιστική σιγμοειδής

$$\varphi(x) = \frac{1}{1 + \exp(-x)}$$

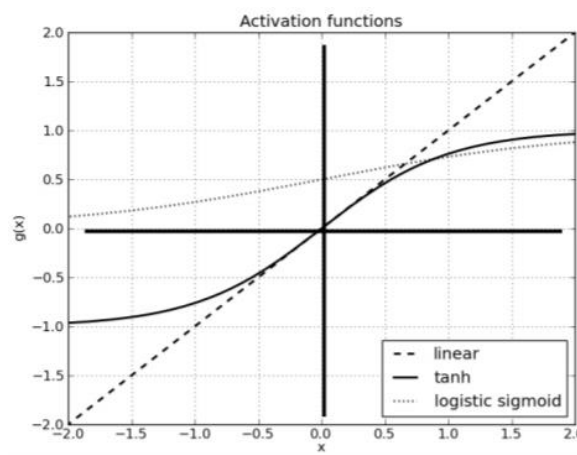
στο διάστημα $[0,1]$

και η υπερβολική εφαπτόμενη

$$\varphi(x) = \frac{\exp(2x) - 1}{\exp(2x) + 1}$$

στο διάστημα $[-1,1]$.

Στο διάγραμμα 4.11 παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις των δυο αυτών συναρτήσεων. Αξίζει να σημειωθεί πως αποτελούν τις κύριες συναρτήσεις που χρησιμοποιούνται διότι έχουν πολύ ομαλή κλίση στα διαστήματά τους, με συνέπεια η μεταβολή της τιμής εξόδου να μεταβάλλεται όσο το δυνατόν ηπιότερα γίνεται, ώστε να μην υπάρχουν έντονες διακυμάνσεις τιμών μετά από κάθε επανάληψη.



Διάγραμμα 4.11: Γραφικές παραστάσεις της λογιστικής σιγμοειδούς και υπερβολικής εφαπτόμενης (Γαγάνης, 2021)

Μετασχηματισμός Δεδομένων (Data Transformation)

Συχνά, για να αποφευχθούν αριθμητικές δυσκολίες, οι τιμές εισόδου x_i ενός ΤΝΔ μετασχηματίζονται πριν εισαχθούν στη συνάρτηση ενεργοποίησης. Συνήθως χρησιμοποιείται η κανονικοποίηση στο διάστημα $[0,1]$ min-max,

$$\hat{x}_i = \frac{x_i - \min(x_i)}{\max(x_i) - \min(x_i)}$$

όπου,

$\min(x_i)$ = η ελάχιστη τιμή που λαμβάνει η είσοδος x_i (αν υποτεθεί πως στο Τ.Ν.Δ εισάγεται μια βάση δεδομένων που αποτελείται από πολλές εισόδους x_i)

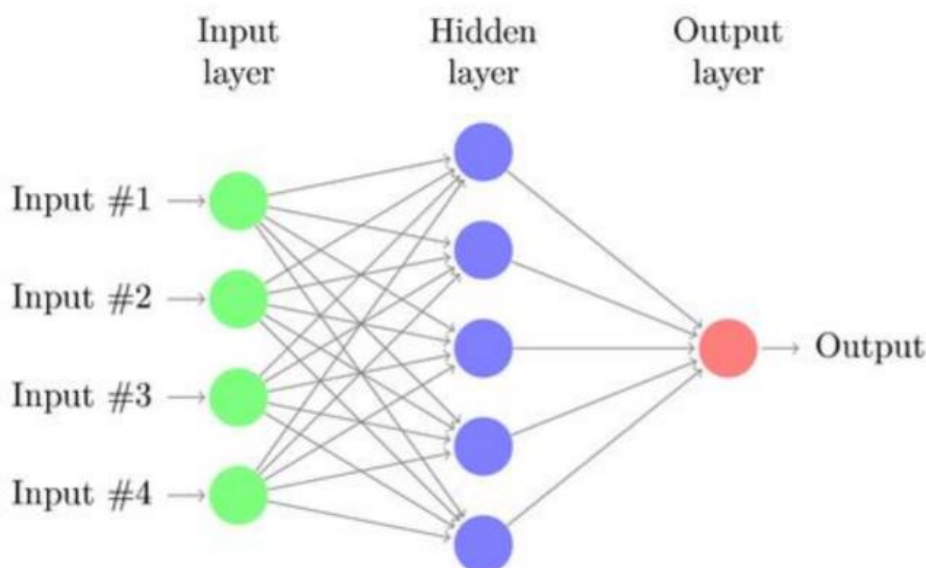
$\max(x_i)$ = η μέγιστη τιμή που λαμβάνει η είσοδος x_i

\hat{x}_i = η κανονικοποιημένη τιμή x_i που θα εισαχθεί στη συνάρτηση ενεργοποίησης.

4.5.4. Επίπεδα Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων

Τα ΤΝΔ καθορίζονται ανάλογα με τον αριθμό των νευρώνων που τα αποτελούν καθώς και με τον τρόπο που αυτοί συνδέονται μεταξύ τους μέσω των συνάψεων. Στην γενική τους μορφή, τα νευρωνικά δίκτυα χωρίζονται σε επίπεδα (layers). Το πρώτο επίπεδο ονομάζεται επίπεδο εισόδου (input layer) και σε αυτό περιέχονται όλες οι τιμές εισόδου x_i . Το τελευταίο επίπεδο ονομάζεται επίπεδο εξόδου (output layer) και σε αυτό περιέχονται όλες οι τιμές εξόδου y_i του δικτύου. Ανάμεσα στα δυο αυτά επίπεδα περιέχονται ένα ή περισσότερα κρυφά επίπεδα (hidden layers) τα οποία περιέχουν τους κρυφούς κόμβους (hidden nodes) μέσα στους οποίους πραγματοποιούνται οι συναρτήσεις μεταφοράς και ενεργοποίησης του δικτύου.

Οι νευρώνες των διαφόρων επιπέδων του δικτύου συνδέονται μεταξύ τους μέσω των συνάψεων. Οι συνάψεις αυτές εφαρμόζουν ουσιαστικά τις παραμέτρους του μοντέλου (βάρη) w και (πολώσεις) b σε κάθε νευρώνα. Στο Διάγραμμα 4.12 παρουσιάζεται η γενική εικόνα ενός τεχνητού νευρωνικού δικτύου.



Διάγραμμα 4.12: Σχηματική αναπαράσταση ενός τεχνητού νευρωνικού δικτύου (Γαγάνης, 2021)

Συνολικά, τα δίκτυα αυτής της μορφής ονομάζονται νευρωνικά δίκτυα πρόσθιας διάδοσης (feed forward neural networks) καθώς η ροή πληροφορίας ακολουθεί αποκλειστικά μια

κατεύθυνση, από την είσοδο προς την έξοδο του δικτύου, δηλαδή από τα αριστερά προς τα δεξιά έτσι ώστε οι τιμές εισόδου x_i να μετασχηματιστούν σε τιμές εξόδου y_i .

4.5.5. Υπερπαράμετροι

Ως υπερπαράμετροι ορίζονται τα χαρακτηριστικά του ΤΝΔ που επηρεάζουν τη συμπεριφορά του και την εκπαίδευση του. Επιλέγονται είτε από τον αρχιτέκτονα του δικτύου είτε καθορίζονται κατά τη δημιουργία του. Η ορθή επιλογή τους επιτυγχάνεται μέσα από το συνδυασμό πείρας πάνω στο αντικείμενο μελέτης καθώς και πολλαπλών δοκιμών ενώ ταυτόχρονα αποτελούν καθοριστικό παράγοντα για την επιτυχή εκπαίδευση και λειτουργία του δικτύου.

Συνήθεις υπερπαράμετροι ενός δικτύου είναι:

- Ο αριθμός τιμών εισόδου και εξόδου του ΤΝΔ, που καθορίζονται από τη διαθέσιμη βάση δεδομένων για τα οποία αναπτύσσεται το ΤΝΔ
- Ο αριθμός των κρυφών επιπέδων του ΤΝΔ. Για τα απλούστερα νευρωνικά δίκτυα, ένα κρυφό επίπεδο συνήθως αρκεί, ενώ για πολυπλοκότερα με πολλαπλές τιμές εξόδου, συνήθως χρησιμοποιούνται περισσότερα κρυφά επίπεδα.
- Ο αριθμός των νευρώνων των κρυφών δικτύων. Καθορίζεται από τον δημιουργό του δικτύου. Όσο μεγαλύτερος ο αριθμός των νευρώνων, τόσο πιο πολύπλοκο και ευέλικτο θα είναι το μαθηματικό μοντέλο που ορίζει το ΤΝΔ. Πρέπει να δοθεί μέγιστη προσοχή στον αριθμό αυτό, καθώς ένας πολύ μικρός αριθμός νευρώνων ίσως να οδηγήσει σε ευελιξία που να μην επαρκεί για να περιγράψει με ακρίβεια το φαινόμενο υπό μελέτη, ενώ αντίθετα ένας μεγάλος αριθμός νευρώνων μπορεί να οδηγήσει στην υπερπροσαρμογή του μοντέλου, όπως αναφέρθηκε στην ενότητα 4.2.
- Η συνάρτηση ενεργοποίησης που πραγματοποιείται στους νευρώνες των κρυφών επιπέδων.
- Οι αρχικές τιμές των παραμέτρων (βάρη και πολώσεις) του ΤΝΔ. Σημειώνεται πως συνηθίζεται να έχουν μικρές αρχικές τιμές αλλά όχι μηδενικές, καθώς στην περίπτωση αυτή μπορεί να οδηγήσουν στην παράλυση του δικτύου (τα βάρη και οι πολώσεις να μεταβάλλονται ελάχιστα έως καθόλου μετά από κάθε επανάληψη κι επομένως να μην επιτυγχάνεται εκπαίδευση).

- Ο αλγόριθμος εκπαίδευσης. Ουσιαστικά πρόκειται για την επιλεγμένη επαναληπτική μέθοδο που μειώνει το σφάλμα σε κάθε επανάληψη, με στόχο την ελαχιστοποίησή του. Κατά βάση χρησιμοποιούνται οι μέθοδοι βελτιστοποίησης Κατάβασης Κλίσης (gradient descent), η BFGS (Broyden–Fletcher–Goldfarb–Shanno), η μέθοδος Newton και η μέθοδος Levenberg-Marquardt που θα αναλυθούν στη συνέχεια της παραγράφου. Για τη μεταβολή των παραμέτρων του δικτύου ανάλογα με τη μέθοδο ελαχιστοποίησης του σφάλματος, χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος οπισθοδιάδοσης σφάλματος.
- Ο ρυθμός εκπαίδευσης του ΤΝΔ. Ένας γρήγορος ρυθμός μπορεί να οδηγήσει σε περιορισμένη ακρίβεια του παραγόμενου μοντέλου ενώ ένα μικρότερος ρυθμός θα χρειαστεί παραπάνω χρόνο, συχνά, με καλύτερα αποτελέσματα.
- Η συνάρτηση κόστους. Η εκπαίδευση ενός ΤΝΔ αποτελεί ουσιαστικά ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης και συγκεκριμένα ελαχιστοποίησης, αφού το μαθηματικό μοντέλο που προκύπτει από το δίκτυο σκοπεύει στην ελαχιστοποίηση του σφάλματος μεταξύ της πειραματικά μετρημένης τιμής εισόδου y και της εκτιμώμενης τιμής εξόδου \hat{y} . Στις περισσότερες περιπτώσεις, το σφάλμα υπολογίζεται με μια συνάρτηση που βασίζεται στην ΜΕΤ που αναλύθηκε στην προηγούμενη ενότητα.

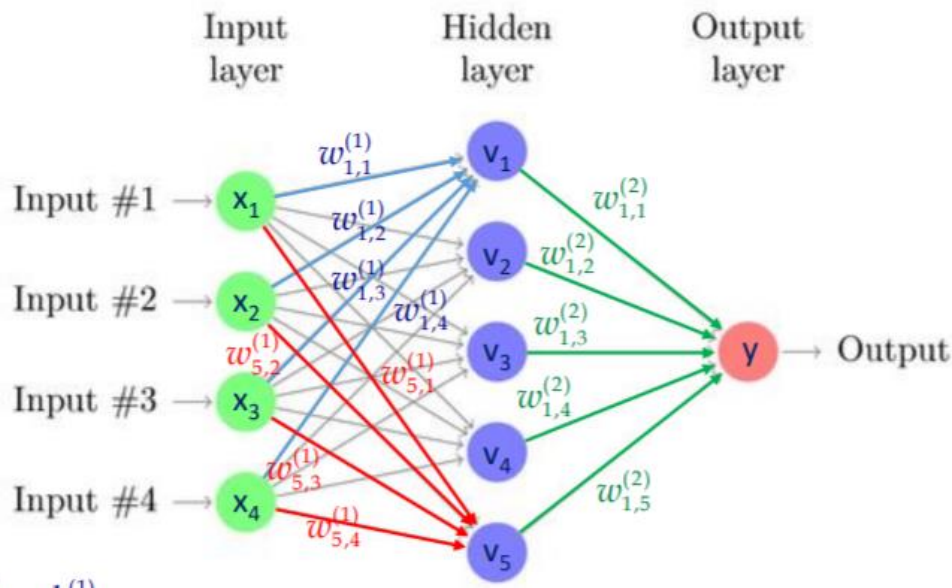
4.5.6. Εκπαίδευση Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων

Η εκπαίδευση (training) ενός ΤΝΔ έγκειται στη διαδικασία με την οποία οι παράμετροι του μοντέλου, μεταβάλλονται με τέτοιο τρόπο ώστε η πειραματικά μετρημένη τιμή εξόδου y να προσεγγίζει όσο το δυνατόν καλύτερα την εκτιμώμενη από το μοντέλο τιμή εξόδου \hat{y} . Όπως αναφέρθηκε παραπάνω τα βάρη και οι πολώσεις του δικτύου αποτελούν τις προς ρύθμιση παραμέτρους του μοντέλου.

Για την εκπαίδευση του ΤΝΔ απαιτείται αρχικά μια βάση δεδομένων η οποία αποτελείται από τις πειραματικά μετρημένες τιμές εισόδου x_i του δικτύου και τις πειραματικά μετρημένες τιμές εξόδου y_i . Στη συνέχεια το μοντέλο εκτιμά το σφάλμα μεταξύ των δύο τιμών εξόδου για όλα τα διαθέσιμα δεδομένα εκπαίδευσης βάση της συνάρτησης κόστους και τα αθροίζει. Το σφάλμα αξιοποιείται από τη μέθοδο εκπαίδευσης του δικτύου, έτσι ώστε σε κάθε επανάληψη τα βάρη να μεταβάλλονται και η εκτιμώμενη τιμή εξόδου για κάθε πειραματική είσοδο να πλησιάζει την πειραματική τιμή εξόδου. Αυτό αποτελεί τη

βασική αρχή του αλγορίθμου εκπαίδευσης. Για τα ΤΝΔ η κάθε επανάληψη του αλγορίθμου εκπαίδευσης ονομάζεται εποχή. Στο τέλος κάθε εποχής υπολογίζεται το συνολικό σφάλμα του δικτύου και η εκπαίδευση τερματίζεται μόλις το συνολικό σφάλμα μειωθεί κάτω από μια προκαθορισμένη τιμή ή επιτευχθεί ικανοποιητική ακρίβεια για το δίκτυο.

Στο Διάγραμμα 4.13 απεικονίζεται η σχηματική αναπαράσταση ενός τεχνητού νευρωνικού δικτύου με τέσσερις τιμές εισόδου x , πέντε κρυφούς νευρώνες και μια τιμή εξόδου y με τα βάρη και τις πολώσεις τους.



Διάγραμμα 4.13: : Σχηματική απεικόνιση ενός τεχνητού νευρωνικού δικτύου συμπεριλαμβανόμενων των παραμέτρων του (Γαγάνης, 2021)

Στο παράδειγμα αυτό, ισχύουν όσα περιγράφηκαν στην προηγούμενη ενότητα που αφορούσαν τα βασικά στοιχεία του νευρώνα. Όμως, στην περίπτωση αυτή που αντιπροσωπεύει τα δίκτυα, δεν υπάρχει μόνο ένας νευρώνας. Προκειμένου να περιγραφεί με απλό και συμπαγή τρόπο η συνάρτηση που διέπει το δίκτυο, οι τιμές εισόδου x , τα βάρη, οι πολώσεις και οι τιμές εξόδου y μετασχηματίζονται σε πίνακες και διανύσματα για την καλύτερη διαχείριση και ανάγνωση τους.

- Οι τιμές εισόδου $x^{(i)}$ μετασχηματίζονται με ένα διάνυσμα x μεγέθους $[n \times 1]$

όπου n = πλήθος τιμών εισόδου.

- Τα βάρη μεταξύ του επιπέδου εισόδου και του κρυφού $w^{(1)}$ μετασχηματίζονται σε ένα πίνακα $W^{(1)}$ μεγέθους $[m \times n]$

όπου m = πλήθος κρυφών νευρώνων

- Οι πολώσεις $b^{(1)}$ μετασχηματίζονται σε ένα διάνυσμα $\mathbf{b}^{(1)}$ μεγέθους $[m \times 1]$
- Τα βάρη $w^{(2)}$ μετασχηματίζονται σε ένα πίνακα $\mathbf{W}^{(2)}$ μεγέθους $[1 \times m]$
- Οι πολώσεις $b^{(2)}$ μετασχηματίζονται σε ένα διάνυσμα $\mathbf{b}^{(2)}$ μεγέθους $[s \times 1]$

όπου s = πλήθος τιμών εξόδου

- Οι τιμές εξόδου y μετασχηματίζονται σε ένα διάνυσμα \mathbf{y} μεγέθους $[s \times 1]$

Σημειώνεται πως στην περίπτωση της συγκεκριμένης εργασίας, η τιμή εξόδου y θα είναι μία με αποτέλεσμα τα διανύσματα $\mathbf{b}^{(2)}$ και \mathbf{y} να απλοποιούνται σε βαθμωτά μεγέθη.

Με βάση όλα τα παραπάνω, η Εξίσωση 4.3 μετατρέπεται ως εξής:

$$\hat{\mathbf{y}} = \mathbf{W}^{(2)} \times s(\mathbf{W}^{(1)}\mathbf{x} + \mathbf{b}^{(1)}) + \mathbf{b}^{(2)} \quad (4.4)$$

όπου,

\mathbf{x} = τιμή εισόδου

$\hat{\mathbf{y}}$ = εκτιμώμενη από το μοντέλο τιμή εξόδου

s = οποιαδήποτε μη γραμμική συνάρτηση ενεργοποίησης, όπως για παράδειγμα η λογιστική σιγμοειδής

Σε κάθε επανάληψη (εποχή) της εκπαιδευτικής διαδικασίας, το νευρωνικό δίκτυο υπολογίζει το σφάλμα μεταξύ των εκτιμώμενων τιμών εξόδου $\hat{\mathbf{y}}$ και των πειραματικά μετρημένων τιμών εξόδου \mathbf{y} . Η συνήθης συνάρτηση κόστους που υπολογίζει το σφάλμα είναι της μορφής,

$$J = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N (\hat{\mathbf{y}} - \mathbf{y})^T (\hat{\mathbf{y}} - \mathbf{y}) \quad (4.5)$$

όπου,

T = ανάστροφο διάνυσμα/πίνακας

N = πλήθος των πειραματικών δεδομένων

J = συνολικό σφάλμα του ΤΝΔ όταν εφαρμόζεται στη βάση δεδομένων που χρησιμοποιείται.

Αντικαθιστώντας τη Εξίσωση 4.4 στη Εξίσωση 4.5 προκύπτει μια σχέση που εκφράζει το σφάλμα J συναρτήσει των παραμέτρων του δικτύου δηλαδή τα $\mathbf{W}^{(1)}$, $\mathbf{W}^{(2)}$, $\mathbf{b}^{(1)}$, $\mathbf{b}^{(2)}$.

$$J = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N (\mathbf{W}^{(2)} \times s(\mathbf{W}^{(1)}\mathbf{x}_i + \mathbf{b}^{(1)}) + \mathbf{b}^{(2)} - \mathbf{y}_i)^T (\mathbf{W}^{(2)} \times s(\mathbf{W}^{(1)}\mathbf{x}_i + \mathbf{b}^{(1)}) + \mathbf{b}^{(2)} - \mathbf{y}_i) \quad (4.6)$$

Αυτή είναι η σχέση του μεταξύ του συνολικού σφάλματος J και κάθε βάρους και πόλωσης ξεχωριστά για την οποία το νευρωνικό δίκτυο καλείται να βρει τις βέλτιστες τιμές ώστε το J να είναι όσο το δυνατόν μικρότερο.

Στη συνέχεια, εφαρμόζοντας μεθόδους ελαχιστοποίησης που θα αναλυθούν παρακάτω, τα βάρη και οι πολώσεις μεταβάλλονται σε κάθε επανάληψη ώστε το σφάλμα να μειώνεται. Κοινός παρονομαστής για σχεδόν όλες τις μεθόδους ελαχιστοποίησης είναι η εύρεση και η χρήση της παραγώγου του σφάλματος J ως προς τις παραμέτρους του νευρωνικού δικτύου, καθώς η κατεύθυνση της αντίθετης παραγώγου αποτελεί πάντα κατεύθυνση κατά την οποία το σφάλμα μειώνεται. Με τη βοήθεια του κανόνα της αλυσίδας, η παράγωγος του σφάλματος J ως προς οποιαδήποτε παράμετρο πχ. τον πίνακα βαρών $\mathbf{W}^{(1)}$ μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$\frac{\partial J}{\partial \mathbf{W}^{(1)}} = \frac{\partial J}{\partial \hat{\mathbf{y}}} \frac{\partial \hat{\mathbf{y}}}{\partial \mathbf{W}^{(1)}} \quad (4.7)$$

με την ίδια σχέση να ισχύει και για τους υπόλοιπους πίνακες και διανύσματα βαρών και πολώσεων. Ο πρώτος όρος στο δεξιό μέλος της (4.7) αποτελεί τον τρόπο μεταβολής του συνολικού σφάλματος ως προς την έξοδο του ΤΝΔ. Ο δεύτερος όρος εκφράζει τον τρόπο μεταβολής της εξόδου του ΤΝΔ ως τις παραμέτρους του. Για τον προσδιορισμό του δεύτερου όρου χρησιμοποιείται η τεχνική γνωστή ως «οπισθοδιάδοση» του σφάλματος. Ο συνδυασμός των δύο δίνει τη ζητούμενη κλίση για την αξιοποίηση του σφάλματος που προκύπτει από τη συνάρτηση κόστους μεταβάλλοντας τα βάρη W και οι πολώσεις b σε κάθε επανάληψη.

4.5.7. Επαναληπτικές Μέθοδοι

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η εκπαίδευση ενός δικτύου αποτελεί πρόβλημα βελτιστοποίησης και συγκεκριμένα ελαχιστοποίησης. Ειδικότερα πρόκειται για πρόβλημα βελτιστοποίησης χωρίς περιορισμούς και οι τιμές που μπορούν να λάβουν οι παράμετροι είναι ελεύθερες. Σε αντίθεση με τα προβλήματα γραμμικής παλινδρόμησης όπου οι τιμές των παραμέτρων μπορούν να βρεθούν κατευθείαν με την εφαρμογή κλειστής λύσης, η εκπαίδευση των ΤΝΔ ανήκει στα προβλήματα μη γραμμικής παλινδρόμησης. Παρατηρώντας την Εξίσωση 4.4, ορισμένες από τις παραμέτρους του δικτύου δεν είναι γραμμικά σχετιζόμενες με τη συνάρτηση σφάλματος, καθώς η συνάρτηση ενεργοποίησης τις επηρεάζει. Αυτή είναι η αιτία που τα προβλήματα των ΤΝΔ ανήκουν στην κατηγορία της μη γραμμικής παλινδρόμησης και επιδέχονται λύση μόνο με επαναληπτικές μεθόδους ελαχιστοποίησης.

Για τα προβλήματα που αφορούν την επίλυση προβλημάτων με τη χρήση τεχνητών νευρωνικών δικτύων, οι μέθοδοι ελαχιστοποίησης που συνήθως εφαρμόζονται είναι περιγράφονται παρακάτω.

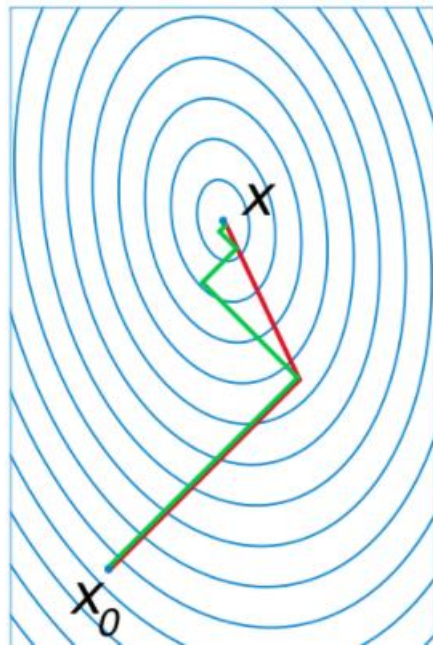
Μέθοδος Κατάβασης Κλίσης (Steepest Descend ή Gradient Descent)

Μια από τις συνηθέστερες και ταυτόχρονα η απλούστερη μέθοδος ελαχιστοποίησης είναι η Μέθοδος Κατάβασης Κλίσης (Steepest Descend ή Gradient Descent). Αποτελεί έναν αλγόριθμο βελτιστοποίησης πρώτης τάξης για την εύρεση του τοπικού ελαχίστου μιας παραγωγίσιμης συνάρτησης, καθώς χρησιμοποιεί παραγώγους της ίδιας τάξης (την κλίση, gradient). Κάνοντας επαναλαμβανόμενα βήματα σε αντίθετη κατεύθυνση από αυτή της κλίσης (παραγώγου) της συνάρτησης σε συγκεκριμένο σημείο, ο αλγόριθμος κατευθύνεται προς το τοπικό ελάχιστο. Ξεκινώντας δηλαδή από ένα σημείο x_0 , και για όσες επαναλήψεις απαιτηθεί, ο αλγόριθμος κινείται από το x_i προς το x_{i+1} και ελαχιστοποιεί τη συνάρτηση κατά μήκος της καμπύλης που εκτείνεται από το x_i προς την κατεύθυνση του $-\nabla f(x_i)$. Η συγκεκριμένη μέθοδος έχει ένα σημαντικό μειονέκτημα, καθώς απαιτεί συνήθως ένα μεγάλο αριθμό επαναλήψεων και συγκλίνει σχετικά αργά στο τοπικό ελάχιστο. Για αυτό και αρκετές φορές χρησιμοποιείται η εξέλιξη αυτής της μεθόδου, η Μέθοδος της Συζυγούς Κατάβασης Κλίσης (Conjugate Gradient Descent).

Μέθοδος Συζυγούς Κατάβασης Κλίσης

Η Μέθοδος Συζυγούς Κατάβασης Κλίσης είναι ένας αλγόριθμος για την εύρεση του πλησιέστερου τοπικού ελαχίστου μιας συνάρτησης με n μεταβλητές, με την προϋπόθεση

ότι αυτή η συνάρτηση είναι παραγωγίσιμη. Χρησιμοποιεί συζυγείς κατευθύνσεις (conjugate directions) αντί για την ίδια τη μερική παράγωγο προκειμένου να συγκλίνει στο ελάχιστο. Με αυτόν τον τρόπο, η κατεύθυνση ως προς την οποία θα μεταβληθούν τα βάρη σε κάθε επανάληψη εξαρτάται όχι μόνο από την τοπική κλίση αλλά και από τις κλίσεις που υπολογίστηκαν στα προηγούμενα βήματα, με αποτέλεσμα αυτή να έχει «μνήμη». Απαιτεί λιγότερα βήματα από την προηγούμενη Μέθοδο Κατάβασης Κλίσης όπως φαίνεται και στο Διάγραμμα 4.14.

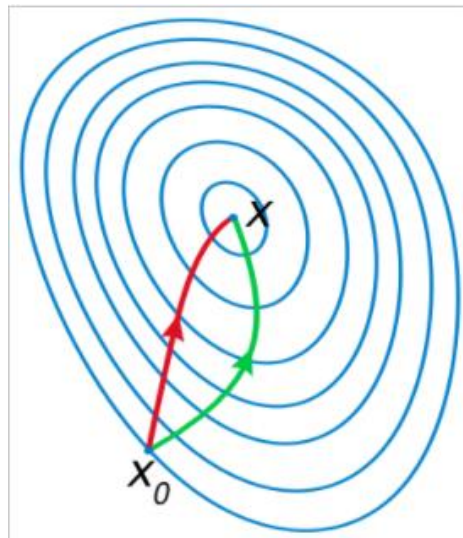


Διάγραμμα 4.14: Σύγκριση Μεθόδου Κατάβασης Κλίσης (πράσινο) με την Μέθοδο Συζυγούς Κατάβασης Κλίσης (κόκκινο).

Μέθοδος του Newton

Μια ακόμα μέθοδος που χρησιμοποιείται στην εκπαίδευση νευρωνικών δικτύων είναι η μέθοδος του Newton. Στην αριθμητική ανάλυση, η μέθοδος Newton είναι μια επαναληπτική μέθοδος για την εύρεση των ριζών μιας παραγωγίσιμης συνάρτησης f , οι οποίες είναι οι λύσεις της εξίσωσης $f(x) = 0$. Εφαρμόζοντας την ίδια μέθοδο στην παράγωγο της συνάρτησης $f'(x)$ υπολογίζονται οι ρίζες της παραγωγού $f'(x) = 0$ κι επομένως προσδιορίζονται οι τιμές x που ελαχιστοποιούν την $f(x)$. Απαιτεί πολύ λιγότερα βήματα από την προηγούμενη μέθοδο και συγκλίνει στο ελάχιστο πολύ πιο γρήγορα. Αυτό επιτυγχάνεται αξιοποιώντας τη συμπεριφορά της παραγώγου δεύτερης τάξης της συνάρτησης από τον υπολογισμό του Εσσιανού πίνακα (Hessian matrix) σε κάθε βήμα. Επομένως, αντί να εκμεταλλεύεται μόνο τις κλίσεις (πρώτη παράγωγος,

gradient) της συνάρτησης σφάλματος, η μέθοδος Newton λαμβάνει περαιτέρω υπόψιν την καμπυλότητά της (δεύτερη παράγωγος).



Διάγραμμα 4.15: Σύγκριση της Μεθόδου Κατάβασης Κλίσης (πράσινο) με την Μέθοδο του Newton (κόκκινο). Η Μέθοδος του Newton χρησιμοποιεί τη δεύτερη παράγωγο για να συγκλίνει πιο γρήγορα στην λύση (ελάχιστο) της συνάρτησης.

Μέθοδος BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno)

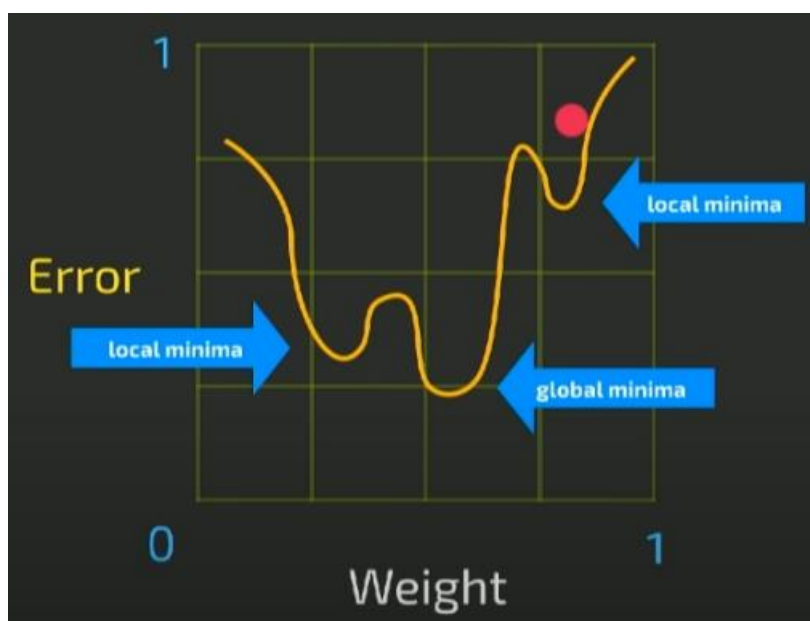
Η Μέθοδος BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) είναι μια επαναληπτική μέθοδος ελαχιστοποίησης που υπολογίζει την κατεύθυνση της μείωσης μιας συνάρτησης f αξιοποιώντας μόνο πληροφορία για την κλίση της παραγώγου (gradient). Η επιτυχία της έγκειται στη σταδιακή βελτίωση της προσέγγισης του Εσσιανού πίνακα της συνάρτησης κόστους.

Μέθοδος των Levenberg-Marquardt

Η Μέθοδος των Levenberg-Marquardt είναι μια επαναληπτική μέθοδος που εντοπίζει το ελάχιστο μιας συνάρτησης f , η οποία εκφράζεται ως το άθροισμα τετραγώνων μη γραμμικών συναρτήσεων. Αποτελεί μια βασική μέθοδο για την επίλυση μη γραμμικών προβλημάτων ελαχίστων τετραγώνων και θεωρείται ένας συνδυασμός μεταξύ της Μεθόδου Κατάβασης Κλίσης και της Μεθόδου Newton. Όταν η αρχική τιμή της επανάληψης είναι μακριά από το ελάχιστο, η μέθοδος συμπεριφέρεται σαν τη Μέθοδο Κατάβασης Κλίσης ενώ όταν βρίσκεται πιο κοντά συμπεριφέρεται σαν τη Μέθοδο Newton.

4.5.8. Τοπικό και Καθολικό Ελάχιστο

Παρατηρείται πως όλες οι παραπάνω μέθοδοι έχουν τη δυνατότητα να συγκλίνουν στο τοπικό ελάχιστο μιας συνάρτησης και όχι στο καθολικό. Έτσι, για την περίπτωση εκπαίδευσης ΤΝΔ, ελλοχεύει ο κίνδυνος η μέθοδος ελαχιστοποίησης να παγιδευτεί σε αυτό το τοπικό ελάχιστο, που μπορεί να απέχει αρκετά από τη τιμή του καθολικού κι επομένως οι τιμές των βαρών που προέκυψαν από τη διαδικασία ελαχιστοποίησης να οδηγούν σε συνολικό σφάλμα πολύ μεγαλύτερο από όσο θα μπορούσε να έχει επιτευχθεί. Στο Διάγραμμα 4.16 απεικονίζεται μια τυχαία καμπύλη σφάλματος ως προς ένα βάρος του νευρωνικού δικτύου.



Διάγραμμα 4.16: Κίνδυνος παγίδευσης της μεθόδου ελαχιστοποίησης σε τοπικό ελάχιστο (Hurbans, 2019)

Ανάλογα με την αρχική τιμή που θα δοθεί στα βάρη (θέση κόκκινου σημείου), η μέθοδος ελαχιστοποίησης θα συγκλίνει και σε ένα αντίστοιχο τοπικό ελάχιστο. Δυστυχώς όπως αναφέρθηκε δεν υπάρχει τρόπος μια επαναληπτική μέθοδος ελαχιστοποίησης να συγκλίνει κατευθείαν στο καθολικό ελάχιστο. Για αυτό απαιτείται η επανάληψη της διαδικασίας εκπαίδευσης με τυχαίες αρχικές τιμές για τα βάρη με την ελπίδα ότι μια από αυτές τις αρχικές τιμές θα οδηγήσει σε λύση κοντά στο καθολικό ελάχιστο. Πολύ συχνά, εφόσον δεν υπάρχει τρόπος για το νευρωνικό δίκτυο να γνωρίζει εάν το ελάχιστο που κατέληξε η μέθοδος ελαχιστοποίησης είναι το καθολικό, η μέθοδος τερματίζεται όταν συγκλίνει σε ένα ικανοποιητικό για τις απαιτήσεις του δικτύου τοπικό ελάχιστο στη συνάρτηση σφάλματος.

4.5.9. Υπερπροσαρμογή (Overfitting) στα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα

Όπως αναλύθηκε και στην ενότητα 4.2, το πρόβλημα της υπερπροσαρμογής (overfitting) αφορά την εκπαίδευση του ΤΝΔ έτσι ώστε αυτό να αναπαράγει με εξαιρετική ακρίβεια κάθε ένα επιμέρους ζεύγος σημείων από τη συγκεκριμένη βάση δεδομένων ως προς την οποία εκπαιδεύτηκε, αλλά το μοντέλο που προκύπτει να μην μπορεί να γενικεύσει με αξιοπιστία σε καινούργια ή άγνωστα στοιχεία. Ουσιαστικά, αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η αρχιτεκτονική του μοντέλου που επιλέχθηκε ήταν πολύ περισσότερο ευέλικτη από όσο επέτρεψαν τα δεδομένα.

Αυτό που προκαλείται με την υπερπροσαρμογή είναι η περιγραφή του θορύβου, που αναπόφευκτα υπάρχει σε όλα τα δεδομένα, ως ένα σημαντικό χαρακτηριστικό που περιγράφει το φαινόμενο. Αντί λοιπόν να εξαχθούν συμπεράσματα για τη γενική συμπεριφορά φαινόμενου από τα δεδομένα, το μοντέλο εξειδικεύεται μόνο για το συγκεκριμένο σύνολο δεδομένων.

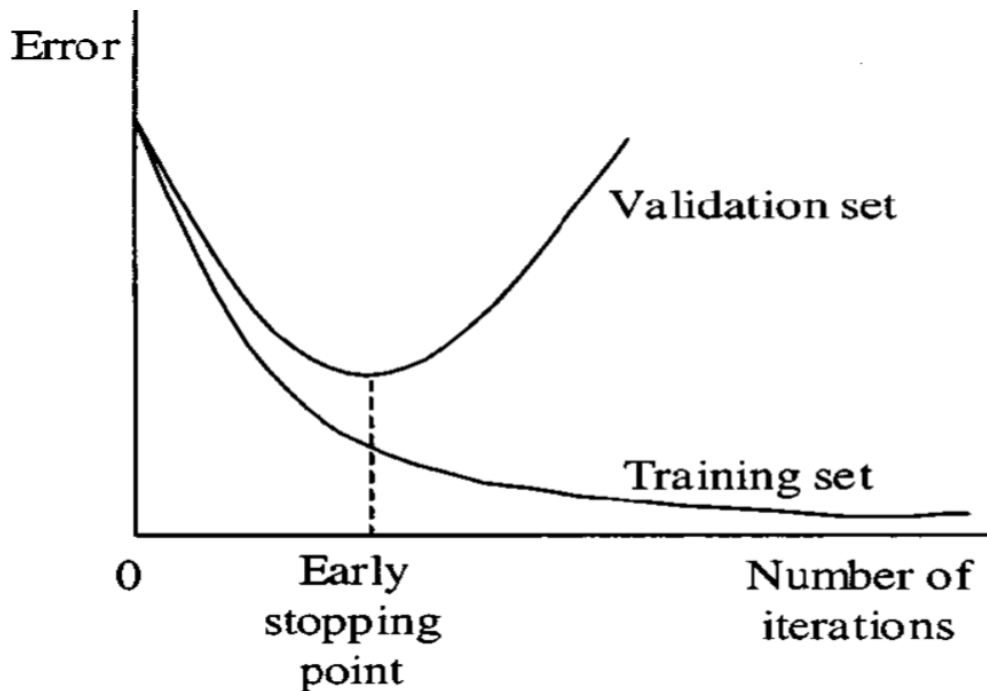
Αυτό στα ΤΝΔ συμβαίνει εάν ο αριθμός των νευρώνων που υπάρχουν στο κρυφό επίπεδο είναι αδικαιολόγητα μεγάλος ως προς τον αριθμό των διαθέσιμων δεδομένων. Δυστυχώς είναι αδύνατον να καθοριστεί εκ των προτέρων ο ακριβής αριθμός των νευρώνων που θα περιγράφουν επαρκώς το φαινόμενο και θα παράγουν ένα μοντέλο τόσο ευέλικτο όσο απαιτείται.

Για να αποφευχθεί το ενδεχόμενο υπερπροσαρμογής του νευρωνικού δικτύου αλλά και για να επαληθευτεί η ακρίβειά του, το σύνολο των δεδομένων που χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία του δικτύου χωρίζεται στις εξής τρεις κατηγορίες:

- Δεδομένα εκπαίδευσης (training data) : Αποτελούν συνήθως το 70%-80% των δεδομένων και βάση αυτών βελτιστοποιούνται οι παράμετροι του νευρωνικού δικτύου
- Δεδομένα επαλήθευσης (validation data) : Αποτελούν το 10%-15% των δεδομένων και έχουν σκοπό τον διαρκή έλεγχο του σφάλματος κατά τη διαδικασία εκπαίδευσης πάνω σε αυτά τα δεδομένα τα οποία δεν συμμετέχουν στον υπολογισμό του προς ελαχιστοποίηση σφάλματος J
- Δεδομένα ελέγχου ή πρόβλεψης (testing data) : Αποτελούν το 10%-15% των δεδομένων και χρησιμοποιούνται στην εκτίμηση του μοντέλου μετά το πέρας της εκπαίδευσης.

Σημειώνεται πως στη βιβλιογραφία οι παραπάνω δύο τελευταίοι όροι συχνά συναντώνται και εναλλακτικά.

Στο Διάγραμμα 4.17 παρουσιάζεται η καμπύλη του σφάλματος για δεδομένα εκπαίδευσης και επαλήθευσης σε συνάρτηση του αριθμού επαναλήψεων μιας μεθόδου ελαχιστοποίησης. Ξεκινώντας τη διαδικασία της εκπαίδευσης με τυχαίες τιμές βαρών και πλώσεων, το σφάλμα του μοντέλου τόσο στο σύνολο εκπαίδευσης όσο και το σύνολο επαλήθευσης είναι σημαντικό. Στη συνέχεια, ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης σε κάθε επαναληπτικό βήμα, προσδιορίζει τιμές των παραμέτρων που οδηγούν σε σφάλμα μικρότερο από τα προηγούμενα. Παρατηρώντας την καμπύλη των δεδομένων εκπαίδευσης στο Διάγραμμα 4.17 φαίνεται πως όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των επαναλήψεων τόσο το σφάλμα εκπαίδευσης μειώνεται και πλησιάζει στο μηδέν εξαιτίας της εφαρμογής της μεθόδου ελαχιστοποίησης σφάλματος .



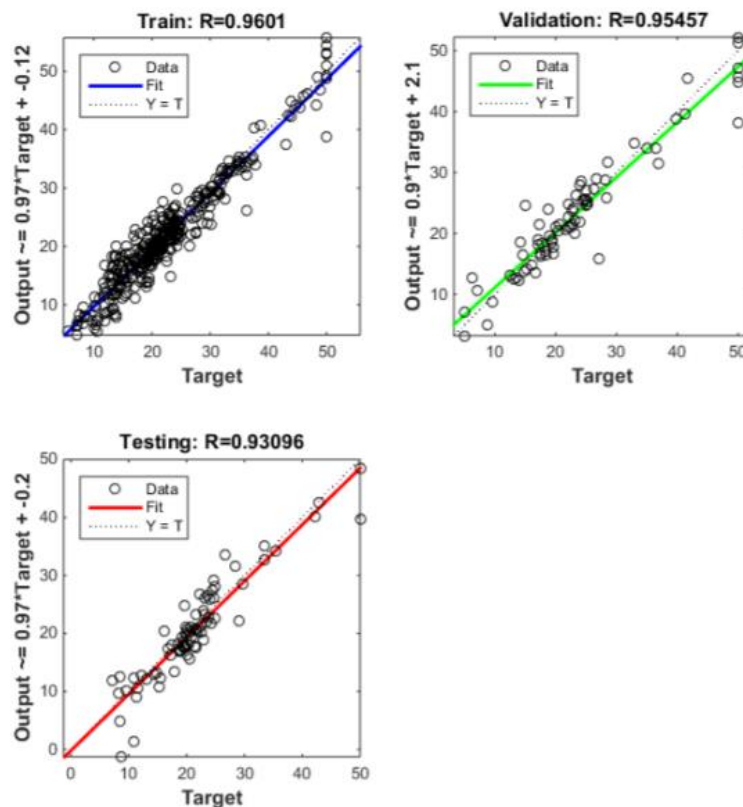
Διάγραμμα 4.17: Καμπύλη σφάλματος για τα δεδομένα εκπαίδευσης και επαλήθευσης σε συνάρτηση με τον αριθμό των επαναλήψεων (Γαγάνης, 2021)

Για να αποφευχθεί το ενδεχόμενο υπερπροσαρμογής στα δεδομένα εκπαίδευσης, σε κάθε επανάληψη το ΤΝΔ υπολογίζει ταυτόχρονα με το σφάλμα των δεδομένων εκπαίδευσης και το σφάλμα των δεδομένων επαλήθευσης, το οποίο ωστόσο δεν αξιοποιείται στη συνάρτηση σφάλματος J του μοντέλου. Η ιδανική στιγμή για τη διακοπή της εκπαίδευσης είναι όταν σταματήσει πλέον να μειώνεται το σφάλμα επί ενός αγνώστου για το δίκτυο

σύνολο δεδομένων, που αποτελούν τα δεδομένα επαλήθευσης. Αυτή η χρονική στιγμή ονομάζεται και σημείο πρόωρης διακοπής της εκπαίδευσης (early stopping point).

Εφόσον το μοντέλο ανταποκριθεί ικανοποιητικά τόσο στα δεδομένα επαλήθευσης όσο και σε αυτά της επαλήθευσης, τελική δοκιμή για την αξιοπιστία του μοντέλου αποτελεί η ανάλυση της τελευταία κατηγορίας δεδομένων, αυτά των δεδομένων ελέγχου. Εάν το μοντέλο δώσει ακριβείς προβλέψεις για το εντελώς ανεξάρτητο και ξένο σύνολο των δεδομένων ελέγχου, τότε πλέον το μοντέλο θεωρείται αξιόπιστο.

Ένας οπτικός τρόπος εκτίμησης της αξιοπιστίας του μοντέλου είναι η γραφική παράσταση της επιθυμητής τιμής εξόδου y του μοντέλου (δηλαδή της πειραματικά μετρημένης) σε σύγκριση με την εκτιμώμενη από το μοντέλο τιμή εξόδου \hat{y} . Στο Διάγραμμα 4.18 απεικονίζονται τα διαγράμματα από ένα εκπαιδευμένο μοντέλο ΤΝΔ για τις τρεις κατηγορίες δεδομένων.



Διάγραμμα 4.18: Εκτίμηση ακριβείας ενός εκπαιδευμένου μοντέλου στα δεδομένα εκπαίδευσης, επαλήθευσης και ελέγχου (Γαγάνης, 2021)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. Βάση δεδομένων PVT ιδιοτήτων πετρελαϊκών ρευστών

5.1. Εισαγωγή

Στο προηγούμενο κεφάλαιο αναλύθηκαν οι βασικές αρχές που διέπουν τη λειτουργία και εκπαίδευση των ΤΝΔ. Αναφέρθηκε πως κάθε δίκτυο έχει ένα επίπεδο εισόδου (input) όπου σε αυτό περιέχονται όλες οι τιμές εισόδου x και ένα επίπεδο εξόδου (output) όπου περιέχονται όλες οι τιμές εξόδου y . Υπενθυμίζεται πως το νευρωνικό δίκτυο, εκτός από τις τιμές εισόδου x απαιτείται να γνωρίζει και τις πειραματικά μετρημένες τιμές εξόδου y , αφού βάση αυτών πραγματοποιείται η εκπαίδευση του δικτύου (ελαχιστοποίηση της συνάρτησης κόστους). Τιμές εισόδου x για το αντικείμενο της παρούσας εργασίας θα αποτελεί η σύσταση του πετρελαίου κατά μάζα (C_1 , C_2 , C_{3-5} , C_{6+} , CO_2), δηλαδή οι τιμές που μπορεί να μετρήσει το εργαλείο YAP και ως τιμές εξόδου οι PVT ιδιότητες ενδιαφέροντος, δηλαδή τα B_o , R_s και P_b , σε αναλογία με το τεχνητό νευρωνικό δίκτυο των Hegeman et al, 2007 που αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 3.

Για τη βάση δεδομένων που χρησιμοποιήθηκε για το αντικείμενο της εργασίας απαιτήθηκαν ορισμένες προσαρμογές στα πρωτόλεια δεδομένα, ενώ στην περίπτωση του R_s και του B_o όπως θα αναλυθεί στην συνέχεια, οι τιμές για αυτές τις ιδιότητες δεν ήταν άμεσα διαθέσιμες και προέκυψαν με υπολογισμούς από τα υπόλοιπο σύνολο των δεδομένων.

5.2. Είσοδος ΤΝΔ (Σύσταση ρευστού)

Ανάμεσα σε άλλες πληροφορίες για τις ιδιότητες των πετρελαϊκών ρευστών που περιλαμβάνει η διαθέσιμη βάση δεδομένων, τη βασικότερη αποτελεί η % κατά mole σύσταση του κάθε ρευστού, η οποία έχει μετρηθεί αναλυτικά στο εργαστήριο με χρήση αέριας χρωματογραφίας και η οποία θα πρέπει να μετασχηματιστεί στην είσοδο που θα μετρούσε το εργαλείο YAP. Η σύσταση του πετρελαϊκού ρευστού είναι αποθηκευμένη στη βάση δεδομένων κατά mole και όχι κατά μάζα, όπως θα διατίθεται από την YAP, πρέπει λοιπόν, πριν εισαχθούν ως τιμές εισόδου στο δίκτυο, η συγκέντρωση των συστατικών για όλα τα δείγματα της βάσης δεδομένων να εκφραστούν κατά μάζα.

Η μετατροπή της έκφρασης της σύστασης από mole σε μάζα πραγματοποιείται με τη μεθοδολογία που θα αναλυθεί παρακάτω.

Είναι γνωστό πως η μάζα κάθε συστατικού προκύπτει από το γινόμενο των mole του συστατικού με το μοριακό βάρος. Στη συγκεκριμένη περίπτωση όπου τα mole είναι εκφρασμένα σε βάση επί τοις εκατό (το άθροισμα των mole για όλα τα συστατικά ενός ρευστού ισούται με 100%), τότε μαθηματικά αυτό εκφράζεται ως εξής:

$$w_i = z_i \times MW_i \quad (5.1)$$

όπου,

z_i = mole του συστατικού i επί τοις εκατό, σε mol %

MW_i = μοριακό βάρος του συστατικού, σε g/mol

w_i = μάζα του συστατικού i επί τοις εκατό, σε g %

Σε αντίθεση με το άθροισμα των moles, το άθροισμα των μαζών όλων των συστατικών του πετρελαϊκού ρευστού δεν θα ισούται με εκατό τοις εκατό. Επομένως, θα πρέπει η επί τοις εκατό μάζα κάθε συστατικού να διαιρεθεί με το άθροισμα όλων των γινόμενων των mole κάθε συστατικού με το αντίστοιχο μοριακό του βάρος. Η Εξίσωση 5.2 αποτελεί την εξίσωση υπολογισμού της επί τοις εκατό μάζας για όλα τα συστατικά ενός πετρελαϊκού ρευστού.

$$w_i = \frac{z_i \times MW_i}{\sum_{j=1}^n z_j \times MW_j} \quad (5.2)$$

όπου,

z_j = mole επί τοις εκατό του συστατικού j , σε mol %

n = πλήθος συστατικών του πετρελαϊκού ρευστού

MW_j = μοριακό βάρος του συστατικού j

Οι τιμές w της σύστασης εκφρασμένης κατά μάζα που θα προκύψουν από την εφαρμογή της Εξίσωσης 5.2 θα αποτελέσουν και τις τιμές εισόδου x (inputs) του νευρωνικού δικτύου της εργασίας.

Ανόργανες Ενώσεις

Επισημαίνεται πως τα ρευστά που περιέχονται στη βάση δεδομένων ενδέχεται να περιέχουν δυο ακόμα ανόργανα στοιχεία εκτός του διοξειδίου του άνθρακα CO_2 , το άζωτο N_2 και το υδρόθειο H_2S τα οποία έχουν μετρηθεί πειραματικά για κάθε ένα από τα ρευστά. Όμως όπως περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 3, το εργαλείο YAP δεν μπορεί να αντιληφθεί τις συγκεντρώσεις αυτών των δυο συστατικών κι επομένως, η χρήση του δεν ενδείκνυται σε κοιτάσματα με υψηλό ποσοστό αζώτου και υδρόθειου. Τα δύο αυτά συστατικά είναι εφικτό να μετρηθούν στο αέριο που παράγεται στην επιφάνεια (το αέριο τανκ), με χρήση σωλήνων Draeger, με αποτέλεσμα να είναι εκ των πρότερων γνωστό αν είναι σκόπιμο να χρησιμοποιηθεί εργαλείο YAP για την ανάλυση του ρευστού του συγκεκριμένου ταμιευτήρα. Συνεπώς, τα δυο ανόργανα συστατικά N_2 και H_2S εξαιρέθηκαν από τη βάση δεδομένων και δεν συμπεριλήφθηκαν στην παραπάνω διαδικασία, προκειμένου να προσομοιωθεί ρεαλιστικά η συμπεριφορά του εργαλείου YAP.

Ομαδοποιημένα Συστατικά

Οι διαθέσιμες εισοδοί για τα νευρωνικά δίκτυα της εργασίας είναι 5 (C_1 , C_2 , C_{3-5} , C_{6+} , CO_2). Ωστόσο, η βάση δεδομένων περιέχει πληροφορίες για κάθε ένωση άνθρακα ξεχωριστά μέχρι το C_{11} (το επόμενο συστατικό είναι ομαδοποιημένο σε C_{12+}). Θα πρέπει λοιπόν, αφού μετατραπούν οι συστάσεις όλων των συστατικών από κατά mole % σε κατά μάζα %, να αθροιστούν τα ποσοστά των συστατικών C_3 , C_4 και C_5 (που θα αποτελούν το ομαδοποιημένο ψευδοσυστατικό C_{3-5}) και τα ποσοστά των συστατικών από το C_6 και πάνω (που θα αποτελούν το ομαδοποιημένο ψευδοσυστατικό C_{6+}) ώστε να προκύψουν οι κατάλληλες τιμές εισόδου για το νευρωνικό δίκτυο.

Τα αθροίσματα αυτά πρέπει να υπολογιστούν αφού έχουν πραγματοποιηθεί οι μετατροπές από τις συγκεντρώσεις κατά mole % σε κατά μάζα %, εφόσον δεν υπάρχει πληροφορία για το μοριακό βάρος των ομαδοποιημένων συστατικών. Τέλος, όσον αφορά το ψευδοσυστατικό C_{12+} , το μοριακό του βάρος είναι ήδη υπολογισμένο πειραματικά και διατίθεται για κάθε ρευστό της βάσης δεδομένων.

5.3. Έξοδος TNA (PVT Ιδιότητες Πετρελαίου)

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, οι τιμές εξόδου y του τεχνητού νευρωνικού δικτύου της εργασίας θα είναι το R_s , το B_o , και το P_b του πετρελαϊκού ρευστού. Το νευρωνικό δίκτυο της εργασίας ανήκει στην κατηγορία της επιβλεπομένης μάθησης

(supervised learning). Αυτό συνεπάγεται ότι είναι απαραίτητη η πληροφορία για τις πειραματικά μετρημένες τιμές εξόδου y , ώστε μέσω των μεθόδων που αναλύθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, η συνάρτηση κόστους μεταξύ των εκτιμώμενων από το νευρωνικό δίκτυο τιμών εξόδου \hat{y} και των πειραματικών μετρημένων τιμών εξόδου y που περιέχονται στην βάση δεδομένων να ελαχιστοποιηθεί και να προσδιοριστούν οι βέλτιστες τιμές των βαρών του.

Η βάση δεδομένων που χρησιμοποιείται για τους σκοπούς της εργασίας περιείχε το σημείο φυσαλίδας P_b ως πληροφορία έτοιμη για εισαγωγή στις εξόδους του ΤΝΔ. Ωστόσο, οι τιμές του R_s και του B_o δεν είναι διαθέσιμες και θα πρέπει να υπολογιστούν βάσει άλλων δεδομένων που περιέχονται στη βάση δεδομένων. Τα δεδομένα αυτά είναι:

- Η πυκνότητα του σταθεροποιημένου πετρελαίου (stock-tank oil) ρ_{sto} σε kg/m^3
- Το μοριακό βάρος του σταθεροποιημένου πετρελαίου MW_{sto} σε g/mole
- Τα mole του αερίου προς τον συνολικό αριθμό mole του ρευστού n_g
- Η πυκνότητα του πετρελαϊκού ρευστού στο σημείο φυσαλίδας ρ_b σε kg/m^3
- Το μοριακό βάρος του πετρελαϊκού ρευστού $RF MW$ σε g/mole
- Η θερμοκρασία του ταμιευτήρα T_{res} σε K

και ζητούμενα είναι:

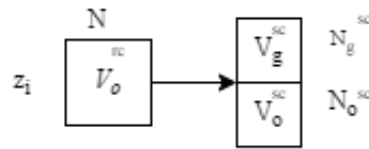
- Ο λόγος του διαλυμένου αερίου προς το πετρέλαιο R_s σε m^3/m^3
- Ο συντελεστής μεταβολής όγκου του πετρελαίου B_o σε m^3/m^3

5.3.1. Moles του αερίου προς τον συνολικό αριθμό moles του ρευστού n_g

Τα μεγέθη B_o και R_s σχετίζονται με το διαχωρισμό των αρχικών moles του ρευστού (που βρίσκεται σε συνθήκες ταμιευτήρα) σε moles των επιμέρους φάσεων που σχηματίζονται στο υγρό και το αέριο τανκ. Το μέγεθος που εκφράζει αυτόν τον διαχωρισμό είναι το μοριακό κλάσμα n_g και σε αυτή την παράγραφο παρουσιάζεται η μέθοδος εκτίμησής του από τα υπόλοιπα πειραματικά δεδομένα.

Αν υποθεθεί πως ένα μονοφασικό ρευστό συγκεκριμένης σύστασης (z_i) και συγκεκριμένων moles (N) που βρίσκεται σε συνθήκες ταμιευτήρα, εκτονωθεί σε κανονικές συνθήκες (flash), τότε τα συνολικά moles του ρευστού θα επιμεριστούν στο αέριο που ήταν αρχικά

διαλυμένο στο ρευστό (N_g^{sc}) και στο σταθεροποιημένο πετρέλαιο (N_o^{sc}), όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 5.1.



Εικόνα 5.1: Σχηματική αναπαράσταση της εκτόνωσης (flash) και του καταμερισμού των αρχικών moles του ρευστού

Ως n_g ορίζεται το κλάσμα που στο αριθμητή έχει τα moles που περιέχονται στο σταθεροποιημένο αέριο και στον παρονομαστή το σύνολο των moles που περιέχονταν αρχικά στο ρευστό. Μαθηματικά εκφράζεται ως

$$n_g = \frac{N_g^{sc}}{N_g^{sc} + N_o^{sc}}$$

όπου

N_g^{sc} = moles του αερίου σε κανονικές συνθήκες

N_o^{sc} = moles του πετρελαίου σε κανονικές συνθήκες

n_g = το κλάσμα των moles του ρευστού

και αποτελεί απαραίτητη πληροφορία για την μεθοδολογία προσδιορισμού των R_s και B_o όπως θα αναλυθεί παρακάτω.

5.4. Υπολογισμός R_s

Από τον ορισμό του R_s που αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 2 προκύπτει η μαθηματική έκφραση

$$R_s = \frac{V_g^{sc}}{V_o^{sc}}$$

όπου,

V_g^{sc} = ο όγκος του αερίου σε κανονικές συνθήκες

V_o^{sc} = ο όγκος του πετρελαίου σε κανονικές συνθήκες

Η βάση δεδομένων δεν περιέχει πληροφορίες για τους όγκους του αερίου και του πετρελαίου, οπότε θα πρέπει η παραπάνω σχέση να ανασχηματιστεί με τέτοιο τρόπο ώστε να εκφράζεται βάσει των δεδομένων που είναι διαθέσιμα.

Υπό αυτό το πρίσμα, η παραπάνω σχέση του R_s μπορεί να εκφραστεί λαμβάνοντας υπόψιν τον νόμο του Avogadro, πως ένα mole αερίου καταλαμβάνει συγκεκριμένο όγκο σε κανονικές συνθήκες και να μετασχηματιστεί σε:

$$R_s = \frac{23.69 N_g^{sc}}{V_o^{sc}} \quad (5.3)$$

όπου έχει χρησιμοποιηθεί η ιδιότητα ότι οποιοδήποτε αέριο σε συνθήκες επιφάνειας καταλαμβάνει όγκο 23.69 lt/mole. Προφανώς κάτι αντίστοιχο δεν ισχύει για υγρά όπως το πετρέλαιο.

Από την άλλη πλευρά, ο όγκος V_o^{sc} του πετρελαίου, μπορεί να εκφραστεί συναρτήσει της πυκνότητας και της μάζας του ως εξής:

$$\rho = \frac{m}{V} \rightarrow V = \frac{m}{\rho}$$

Με τη σειρά της, η μάζα του πετρελαίου μπορεί να εκφραστεί συναρτήσει των mole του πετρελαίου σε κανονικές συνθήκες και του μοριακού βάρους του, που είναι ήδη γνωστό από τη βάση δεδομένων, καταλήγοντας στην σχέση,

$$V_o^{sc} = \frac{N_o^{sc} \times MW_o^{sc}}{\rho_o^{sc}} \quad (5.4)$$

Αντικαθιστώντας τη σχέση αυτή στη σχέση του R_s προκύπτει,

$$R_s = \frac{23.69 N_g^{sc}}{\frac{N_o^{sc} \times MW_o^{sc}}{\rho_o^{sc}}} \quad (5.5)$$

Ανασχηματίζοντας την Εξίσωση 5.5 προκύπτει η σχέση,

$$R_s = 23.69 \frac{N_g^{sc}}{N_o^{sc}} \frac{\rho_o^{sc}}{MW_o^{sc}} \quad (5.6)$$

όπου το κλάσμα $\frac{\rho_o^{sc}}{MW_o^{sc}}$ είναι γνωστό από τα διαθέσιμα δεδομένα.

Προφανώς το κλάσμα $\frac{N_g^{sc}}{N_o^{sc}}$ που είναι άγνωστο, μπορεί να μετασχηματιστεί με τέτοιο τρόπο ώστε να εκφραστεί βάσει του μοριακού κλάσματος n_g το οποίο είναι γνωστό από τα δεδομένα.

Πράγματι, προσθαφαιρώντας τον όρο N_g^{sc} στον παρονομαστή και στη συνέχεια αντιστρέφοντας το κλάσμα προκύπτει,

$$\frac{N_g^{sc}}{N_o^{sc}} = \frac{N_g^{sc}}{N_o^{sc} + N_g^{sc} - N_g^{sc}} = \frac{1}{\frac{N_o^{sc} + N_g^{sc} - N_g^{sc}}{N_g^{sc}}} = \frac{1}{\frac{N_o^{sc} + N_g^{sc}}{N_g^{sc}} - 1} \quad (5.7)$$

Όμως το κλάσμα $\frac{N_o^{sc} + N_g^{sc}}{N_g^{sc}}$ είναι το αντίστροφο του κλάσματος n_g . Συνεπώς η παραπάνω σχέση μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$\frac{N_g^{sc}}{N_o^{sc}} = \frac{1}{\frac{1}{n_g} - 1} = \frac{1}{\frac{1 - n_g}{n_g}} = \frac{n_g}{1 - n_g} \quad (5.8)$$

άρα,

$$\frac{N_g^{sc}}{N_o^{sc}} = \frac{n_g}{1 - n_g} \quad (5.9)$$

Αντικαθιστώντας την Εξίσωση 5.9 στην Εξίσωση 5.6 τότε προκύπτει,

$$R_s = 23.69 \frac{n_g}{1 - n_g} \frac{\rho_o^{sc}}{MW_o^{sc}} \quad (5.10)$$

όπου,

R_s = λόγος διαλυμένου αερίου προς το πετρέλαιο σε m^3/m^3

ρ_o^{sc} = πυκνότητα του πετρελαίου σε κανονικές συνθήκες σε kg/m^3

MW_o^{sc} = μοριακό βάρος του πετρελαίου σε κανονικές συνθήκες σε g/mol

με όλους τους όρους της εξίσωσης να είναι πλέον γνωστοί από τη βάση δεδομένων.

Σημειώνεται πως με την μέθοδο αυτή που περιγράφηκε, το R_s που υπολογίζεται είναι αυτό με τη μέθοδο εκτόνωσης flash (απευθείας εκτόνωση από τις συνθήκες ταμιευτήρα σε συνθήκες επιφάνειας) και όχι με τη μέθοδο DV που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 2. Επομένως, πρόκειται ακριβώς για την τιμή του R_s που ενδιαφέρει τους ογκομετρικούς υπολογισμούς.

5.5. Υπολογισμός B_o

Όμοια με την μεθοδολογία που περιγράφηκε για τον υπολογισμό του R_s πραγματοποιείται και ο υπολογισμός του B_o . Από τον ορισμό του B_o που αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 2 προκύπτει η μαθηματική έκφραση,

$$B_o = \frac{V_o^{rc}}{V_o^{sc}}$$

όπου,

V_o^{rc} = όγκος πετρελαίου σε συνθήκες ταμιευτήρα

V_o^{sc} = όγκος πετρελαίου σε κανονικές συνθήκες

Εφόσον οι όγκοι δεν είναι γνωστοί, θα περιγραφούν βάσει της πυκνότητας, του αριθμού των moles και των μοριακών βαρών. Συνεπώς, η σχέση θα μετασχηματιστεί σε:

$$B_o = \frac{m_o^{rc} / \rho_o^{rc}}{m_o^{sc} / \rho_o^{sc}} = \frac{N_o^{rc} MW_o^{rc} / \rho_o^{rc}}{N_o^{sc} MW_o^{sc} / \rho_o^{sc}} \quad (5.11)$$

Χωρίζοντας την εξίσωση σε γνωστά και μη γνωστά κλάσματα προκύπτει,

$$B_o = \frac{N_o^{rc} MW_o^{rc} \rho_o^{sc}}{N_o^{sc} MW_o^{sc} \rho_o^{rc}} \quad (5.12)$$

με το κλάσμα $\frac{N_o^{rc}}{N_o^{sc}}$ να είναι αυτό για το οποίο δεν υπάρχουν πληροφορίες στα δεδομένα. Με παρόμοιο τρόπο όπως στην περίπτωση υπολογισμού του R_s , μπορεί να εκφραστεί συναρτήσει του κλάσματος n_g που είναι γνωστό.

Ο ορός N_o^{rc} αποτελεί το σύνολο των mole του ρευστού, αφού αφορά τα mole του πετρελαίου σε συνθήκες ταμιευτήρα, όταν αυτό ήταν ακόμα μονοφασικό. Είναι στην

ουσία το άθροισμα των mole του αερίου και του πετρελαίου, όταν αυτά βρίσκονται πλέον σε κανονικές συνθήκες. Αυτό περιγράφεται μαθηματικά από την Εξίσωση 5.13,

$$\frac{N_o^{rc}}{N_o^{sc}} = \frac{N_o^{sc} + N_g^{sc}}{N_o^{sc}} = 1 + \frac{N_g^{sc}}{N_o^{sc}} \quad (5.13)$$

Όμως το κλάσμα $\frac{N_g^{sc}}{N_o^{sc}}$ υπολογιστηκε ήδη από την Εξίσωση 5.9. Άρα, η παραπάνω εξίσωση μπορεί να εκφραστεί ως,

$$\frac{N_o^{rc}}{N_o^{sc}} = 1 + \frac{n_g}{1 - n_g} = \frac{1 - n_g + n_g}{1 - n_g} = \frac{1}{1 - n_g} \quad (5.14)$$

Αντικαθιστώντας την παραπάνω σχέση στην Εξίσωση 5.12 προκύπτει,

$$B_o = \frac{1}{1 - n_g} \frac{MW_o^{rc} \rho_o^{sc}}{MW_o^{sc} \rho_o^{rc}} \quad (5.15)$$

όπου,

B_o = λόγος του όγκου του πετρελαίου σε συνθήκες ταμιευτήρα προς τον όγκο του πετρελαίου σε κανονικές συνθήκες, σε m^3/m^3

MW_o^{rc} = μοριακό βάρος του πετρελαϊκού ρευστού σε συνθήκες ταμιευτήρα σε g/mol

MW_o^{sc} = μοριακό βάρος του πετρελαίου σε κανονικές συνθήκες σε g/mol

ρ_o^{sc} = πυκνότητα του πετρελαίου σε κανονικές συνθήκες σε kg/m^3

ρ_o^{rc} = πυκνότητα του πετρελαϊκού ρευστού σε συνθήκες ταμιευτήρα σε kg/m^3

Όπως και στην περίπτωση υπολογισμού του R_s έτσι και στην περίπτωση υπολογισμού του B_o , σημειώνεται πως με τη μέθοδο που περιγράφηκε παραπάνω, το B_o που υπολογίζεται είναι το ίδιο με τη μέθοδο εκτόνωσης flash (απευθείας εκτόνωση από τις συνθήκες ταμιευτήρα σε συνθήκες επιφάνειας) και όχι με τη μέθοδο DV που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 2.

Σημειώνεται ότι, το R_s και το B_o που υπολογίζονται με την πειραματική μέθοδο DV παρουσιάζουν συνήθως λίγο μεγαλύτερες τιμές με την αντίστοιχη μέθοδο εκτόνωσης

flash. Αυτό συμβαίνει διότι, σε αντίθεση με την εκτόνωση flash όπου το ρευστό εκτονώνεται απευθείας στην ατμόσφαιρα, η μέθοδος DV πραγματοποιείται σε πολλά στάδια και πάντα σε συνθήκες ταμειυτήρα (εκτός από το τελευταίο στάδιο), με αποτέλεσμα να απελευθερώνεται περισσότερο αέριο συνολικά και το πετρέλαιο να υφίσταται μεγαλύτερη συρρίκνωση.

5.6. Έλεγχος Δεδομένων (Data Screening)

5.6.1. Εισαγωγή

Πριν η βάση δεδομένων εισαχθεί στο νευρωνικό δίκτυο θα πρέπει να ελεγχθεί αν τα στοιχεία που περιέχει είναι ακριβή, ολοκληρωμένα (δεν υπάρχουν τιμές που να λείπουν) και παρουσιάζουν μια στατιστική κατανομή, όσο το δυνατόν πιο κοντά στην κανονική. Επίσης, πρέπει να βεβαιωθεί πως κάθε στοιχείο της βάσης δεδομένων λαμβάνει λογικές και αναμενόμενες τιμές και πως το σύνολο των στοιχείων είναι κατάλληλο για στατιστική ανάλυση. Ο στατιστικός έλεγχος των δεδομένων ονομάζεται Data Screening. Είναι μια από τις βασικότερες διαδικασίες που προετοιμάζουν τα δεδομένα πριν εισαχθούν στο ΤΝΔ εξασφαλίζοντας ότι ο πληθυσμός εκπαίδευσης δεν θα περιέχει εσφαλμένες τιμές. Είναι προφανές πως αν τα δεδομένα που θα εισαχθούν στο δίκτυο είναι εξ αρχής ελαττωματικά ή λανθασμένα, τότε και το νευρωνικό θα δώσει εξίσου λανθασμένα αποτελέσματα ή δεν θα μπορεί καν να εκπαιδευτεί επαρκώς. Στην επιστήμη των υπολογιστών αυτό το μοτίβο συναντάται με τον όρο *garbage in, garbage out* (GIGO).

Στο σύνολό της η βάση δεδομένων περιέχει πληροφορίες για 490 ρευστά. Ύστερα από τη στατιστική ανάλυση και τη μελέτη των ελάχιστων και μέγιστων τιμών της κάθε ιδιότητας, εξαιρέθηκαν 3 ρευστά, καθώς οι τιμές που λάμβαναν σε ορισμένα από τα στοιχεία της βάσης δεδομένων, δεν ήταν ρεαλιστικές, αποτελούσαν δηλαδή ακραία σημεία (outliers). Συνεπώς, το πλήθος των ρευστών της βάσης δεδομένων που κρίθηκαν κατάλληλα για να εισαχθούν στο ΤΝΔ είναι 487.

5.6.2. Θερμοκρασία

Στον Πίνακα 5.1 και στο Διάγραμμα 5.1 αντίστοιχα παρουσιάζονται τα περιγραφικά στατιστικά στοιχεία και το ιστόγραμμα συχνοτήτων που αφορούν τη θερμοκρασία των ρευστών της βάσης δεδομένων, δηλαδή τη θερμοκρασία του ταμειυτήρα από τον οποίο λήφθηκαν τα δείγματα. Παρατηρήθηκε πως οι θερμοκρασίες των ρευστών που περιέχονται στη βάση δεδομένων έχουν ένα μεγάλο εύρος τιμών από 85.08 °F έως 348.8 °F. Αυτό

σημαίνει πως η βάση δεδομένων περιέχει στοιχεία για μια ικανοποιητική γκάμα θερμοκρασιών που περιγράφουν από αβαθή, σχεδόν ψυχρά πετρέλαια έως και πολύ βαθιά και πολύ πιο θερμά. Αναλύοντας το ιστόγραμμα συχνοτήτων φαίνεται πως το σχήμα που προκύπτει είναι πολύ κοντά στην καμπύλη της κανονικής κατανομής, καθιστώντας το δείγμα των διαθέσιμων ρευστών αντιπροσωπευτικό για όλο το εύρος τιμών, κάτι που επίσης επαληθεύεται και από τη στατιστική ασυμμετρία, η οποία εκτιμάται κοντά στο μηδέν.

ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑ	T_{res} (°F)
Μέσος	204.9
Τυπικό σφάλμα	2.2
Διάμεσος	204.0
Επικρατούσα τιμή	250.0
Μέση απόκλιση τετραγώνου	48.6
Διακύμανση	2,357.4
Κύρτωση	-0.1
Ασυμμετρία	0.2
Εύρος	263.0
Ελάχιστο	85.8
Μέγιστο	348.8
Άθροισμα	99,796.4
Πλήθος	487

Πίνακας 5.1: : Περιγραφικά στατιστικά στοιχεία θερμοκρασιών ταμιευτήρων



Διάγραμμα 5.1: Ιστόγραμμα συχνοτήτων θερμοκρασίας ταμειυτήρα

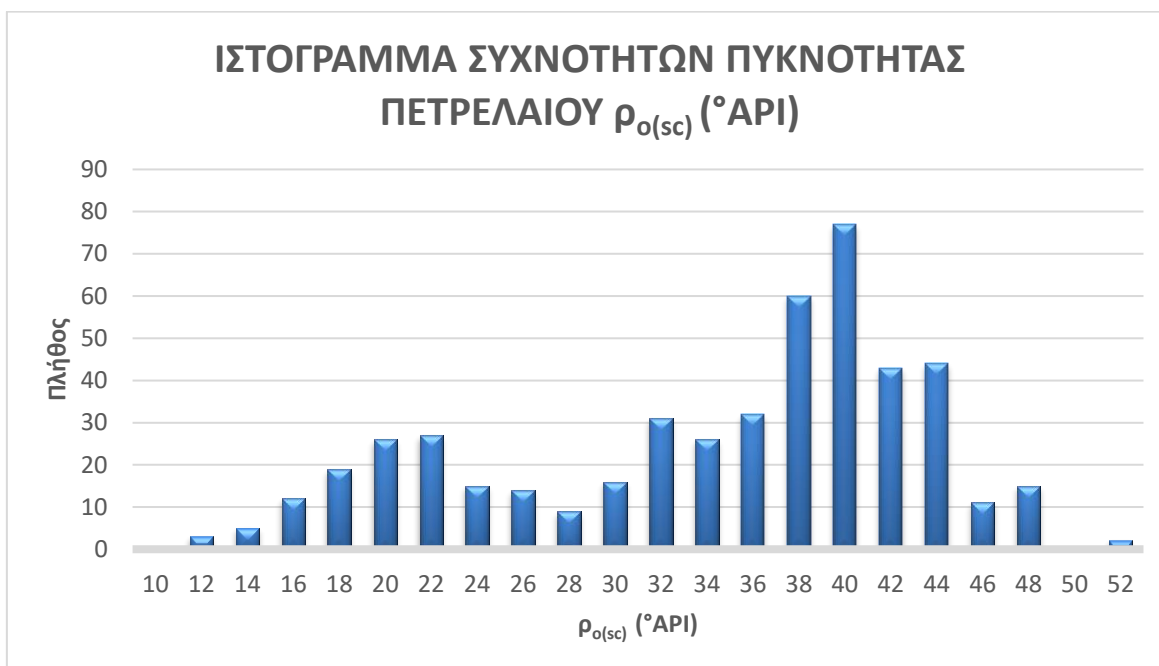
5.6.3. Πυκνότητα Σταθεροποιημένου Πετρελαίου (API)

Μια εξίσου σημαντική ιδιότητα του πετρελαίου αποτελεί η πυκνότητα του σταθεροποιημένου πετρελαίου (stock tank oil) ρ_o^{sc} .

ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ ρ_o^{sc} (°API)	
Μέσος	33.2
Τυπικό σφάλμα	0.4
Διάμεσος	36.4
Επικρατούσα τιμή	15.3
Μέση απόκλιση τετραγώνου	9.1
Διακύμανση	82.8
Κύρτωση	-0.7
Ασυμμετρία	-0.6
Εύρος	40.6
Ελάχιστο	10.1
Μέγιστο	50.7
Άθροισμα	16,186
Πλήθος	487

Πίνακας 5.2: Περιγραφικά στατιστικά στοιχεία πυκνότητας πετρελαίου

Από την ανάλυση των στατιστικών στοιχείων για την πυκνότητα του πετρελαίου διαπιστώθηκε πως η βάση δεδομένων περιέχει βαριά πετρέλαια από σχεδόν 10 °API μέχρι πετρέλαια πολύ υψηλής πτητικότητας των 50°API που φτάνουν τα όρια του αέριου συμπυκνώματος. Στον Πίνακα 5.2 αναγράφονται τα περιγραφικά στατιστικά στοιχεία που αφορούν την πυκνότητα του πετρελαίου σε κανονικές συνθήκες ενώ στο Διάγραμμα 5.2 απεικονίζεται το ιστόγραμμα συχνοτήτων της εν λόγω ιδιότητας.



Διάγραμμα 5.2: Ιστόγραμμα συχνοτήτων πυκνότητας API πετρελαίου

Αναλύοντας το παραπάνω ιστόγραμμα, προκύπτει πως για όλες τις τιμές των ρευστών υπάρχει μια επαρκής εκπροσώπηση στα ρευστά της βάσης δεδομένων, με τις τιμές από 30-45 °API να χαρακτηρίζουν την πλειονότητα των ρευστών. Το σχήμα που σχηματίζεται πλησιάζει στην κανονική κατανομή, κάτι που υποδεικνύεται και από την ελάχιστη αρνητική τιμή της στατιστικής ασυμμετρίας για τα δεδομένα που αφορούν την πυκνότητα του σταθεροποιημένου πετρελαίου.

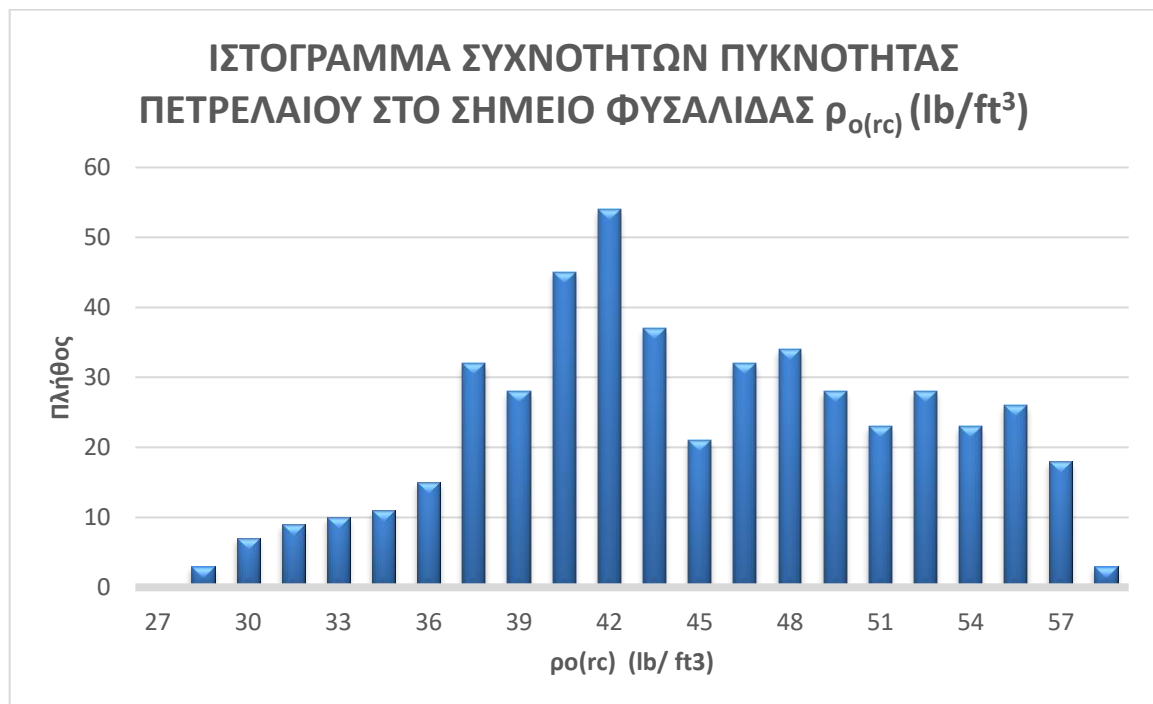
5.6.4. Πυκνότητα πετρελαίου στο σημείο φυσαλίδας

Η πυκνότητα αυτή αφορά το ρευστό σε συνθήκες ταμειυτήρα ρ_o^{rc} και συγκεκριμένα στο σημείο φυσαλίδας του. Λαμβάνει σαφώς μικρότερες τιμές από τις αντίστοιχες της πυκνότητας του σταθεροποιημένου πετρελαίου, αφού στο πετρελαϊκό ρευστό σε συνθήκες ταμειυτήρα είναι διαλυμένο και αέριο. Αναλυτικότερα, η βάση δεδομένων περιέχει τιμές από 27-57 lb/ft³, που, όμοια με την πυκνότητα του σταθεροποιημένου πετρελαίου,

υποδεικνύει ότι πρόκειται για πετρέλαια βαριά έως και πολύ πτητικά. Στον Πίνακα 5.3 δίνονται τα περιγραφικά στατιστικά στοιχεία της πυκνότητας στο σημείο φυσαλίδας.

ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ ΣΤΟ ΣΗΜΕΙΟ ΦΥΣΑΛΙΔΑΣ ρ_o^{rc} (lb/ft³)	
Μέσος	44.0
Τυπικό σφάλμα	0.3
Διάμεσος	43.1
Επικρατούσα τιμή	44.5
Μέση απόκλιση τετραγώνου	6.9
Διακύμανση	48.1
Κύρτωση	-0.7
Ασυμμετρία	0.0
Εύρος	30.0
Ελάχιστο	27.5
Μέγιστο	57.5
Άθροισμα	21,436.8
Πλήθος	487

Πίνακας 5.3: Περιγραφικά στατιστικά στοιχεία πυκνότητας πετρελαίου στο σημείο φυσαλίδας



Διάγραμμα 5.3: Ιστόγραμμα συχνοτήτων πυκνότητας πετρελαίου στο σημείο φυσαλίδας

Στο Διάγραμμα 5.3 απεικονίζεται το ιστόγραμμα συχνοτήτων της πυκνότητας πετρελαίου στο σημείο φυσαλίδας. Μελετώντας το διάγραμμα παρατηρείται πως όλο το εύρος τιμών

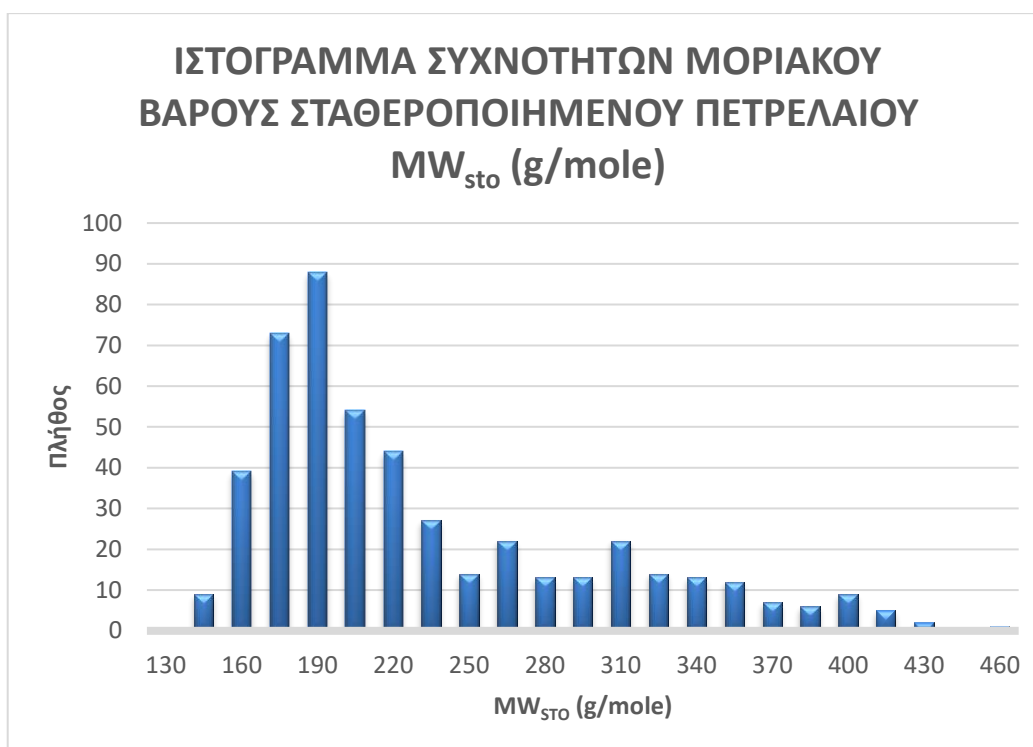
αντιπροσωπεύεται επαρκώς στη βάση δεδομένων κυρίως για τις τιμές από 40 lb/ft³ και πάνω. Το σχήμα είναι εξαιρετικά κοντά στην καμπύλη της κανονικής κατανομής κάτι που γίνεται αντιληπτό και από την εξαιρετικά κοντά στο μηδέν τιμή της στατιστικής ασυμμετρίας για τα δεδομένα της πυκνότητας του πετρελαίου στο σημείο φυσαλίδας.

5.6.5. Μοριακό Βάρος Σταθεροποιημένου Πετρελαίου

Στον Πίνακα 5.4 και στο Διάγραμμα 5.4 παρουσιάζονται τα περιγραφικά στατιστικά στοιχεία και το ιστόγραμμα συχνοτήτων αντίστοιχα που αφορούν το μοριακό βάρος του πετρελαίου σε συνθήκες επιφάνειας (τανκ) MW_o^{sc} . Το εύρος τιμών αυτής της ιδιότητας στη βάση δεδομένων κυμαίνεται από 134 g/mole έως και 451 g/mole. Παρατηρώντας το ιστόγραμμα συχνοτήτων διαπιστώνεται ότι η πληθώρα ρευστών ανήκει στο εύρος 150-240 g/mole, κάτι φυσιολογικό, αφού όπως παρατηρήθηκε και προηγουμένως, η πυκνότητα API του πετρελαίου κυμάνθηκε στους 30-45 °API για την πλειονότητα των ρευστών. Αυτό προκαλεί το ιστόγραμμα να απέχει ελαφρώς από την καμπύλη της κανονικής κατανομής, με τη στατιστική ασυμμετρία να λαμβάνει μια τιμή πολύ κοντά στο 1.

ΜΟΡΙΑΚΟ ΒΑΡΟΣ ΣΤΑΘΕΡΟΠΟΙΗΜΕΝΟΥ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ $MW_{στο}$ (g/mole)	
Μέσος	224.2
Τυπικό σφάλμα	3.1
Διάμεσος	196.6
Επικρατούσα τιμή	231.5
Μέση απόκλιση τετραγώνου	67.7
Διακύμανση	4,579.8
Κύρτωση	0.3
Ασυμμετρία	1.1
Εύρος	316.8
Ελάχιστο	134.7
Μέγιστο	451.5
Άθροισμα	109,174.6
Πλήθος	487

Πίνακας 5.4: Περιγραφικά στατιστικά στοιχεία μοριακού βάρους σταθεροποιημένου πετρελαίου



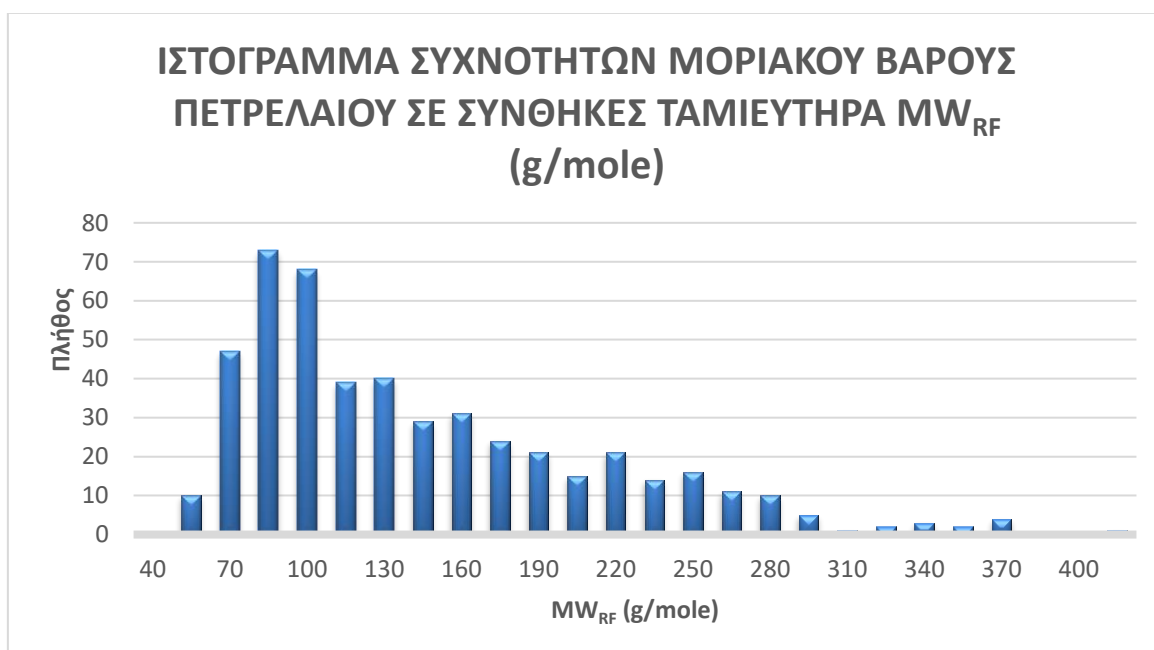
Διάγραμμα 5.4: Ιστόγραμμα συχνοτήτων μοριακού βάρους σταθεροποιημένου πετρελαίου

5.6.6. Μοριακό Βάρος Πετρελαίου σε Συνθήκες Ταμειυτήρα

Όμοια με την ιδιότητα που μόλις περιγράφηκε, η γκάμα τιμών που λαμβάνει το μοριακό βάρος του ρευστού σε συνθήκες ταμειυτήρα είναι επίσης ικανοποιητική. Λαμβάνει σαφώς μικρότερες τιμές από τις αντίστοιχες της προηγούμενης ιδιότητας, αφού στο μοριακό βάρος σε συνθήκες ταμειυτήρα περιέχεται και το διαλυμένο αέριο, με τις ελάχιστες τιμές να ξεκινάνε από 50 g/mole και να φτάνουν έως και τα 400 g/mole για τα βαρύτερα πετρέλαια. Ίδια εικόνα με το ιστόγραμμα συχνοτήτων του μοριακού βάρους του σταθεροποιημένου πετρελαίου παρουσιάζεται και σε αυτήν την ιδιότητα, με την πλειονότητα των ρευστών να λαμβάνουν τιμές από 70 έως και 280 g/mole, και την τιμή της στατιστικής ασυμμετρίας να βρίσκεται κοντά στο 1. Στον Πίνακα 5.5 παρουσιάζονται τα περιγραφικά στατιστικά στοιχεία ενώ στο Διάγραμμα 5.5 απεικονίζεται το ιστόγραμμα συχνοτήτων του μοριακού βάρους πετρελαίου σε συνθήκες ταμειυτήρα MW_o^{rc} .

ΜΟΡΙΑΚΟ ΒΑΡΟΣ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ ΣΕ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΑ MW_{RF} (g/mole)	
Μέσος	137.3
Τυπικό σφάλμα	3.2
Διάμεσος	117.2
Επικρατούσα τιμή	150.2
Μέση απόκλιση τετραγώνου	69.7
Διακύμανση	4,862.0
Κύρτωση	0.7
Ασυμμετρία	1.1
Εύρος	351.3
Ελάχιστο	49.5
Μέγιστο	400.9
Άθροισμα	66,876.8
Πλήθος	487

Πίνακας 5.5: Περιγραφικά στατιστικά στοιχεία μοριακού βάρους πετρελαίου σε συνθήκες ταμιευτήρα



Διάγραμμα 5.5: Ιστόγραμμα συχνοτήτων μοριακού βάρους πετρελαίου σε συνθήκες ταμιευτήρα.

5.6.7. Πίεση Σημείου Φυσαλίδας

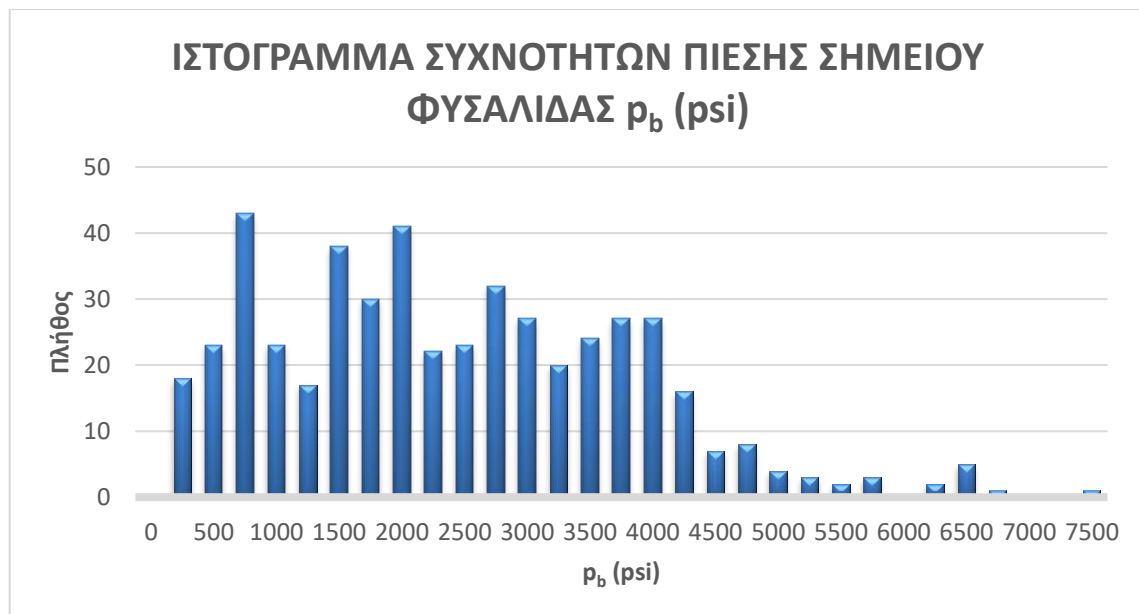
Αποτελεί μια από τις σημαντικότερες ιδιότητες που περιέχει η βάση δεδομένων, αφού με μόνο έναν αριθμό μπορεί να σχηματιστεί μια εικόνα για την πητικότητα του ρευστού. Η συγκεκριμένη βάση δεδομένων περιέχει τιμές σημείου φυσαλίδας p_b από 60 έως και

7,300psi, ένα απολύτως ικανοποιητικό εύρος. Στον Πίνακα 5.6 παρουσιάζονται τα περιγραφικά στατιστικά στοιχεία των τιμών της πίεσης σημείου φυσαλίδας.

ΠΙΕΣΗ ΣΗΜΕΙΟΥ ΦΥΣΑΛΙΔΑΣ p_b (psi)	
Μέσος	2,304.0
Τυπικό σφάλμα	63.9
Διάμεσος	2,172.0
Επικρατούσα τιμή	219.0
Μέση απόκλιση τετραγώνου	1,410.2
Διακύμανση	1,988,801.1
Κύρτωση	0.0
Ασυμμετρία	0.5
Εύρος	7,236.3
Ελάχιστο	66.7
Μέγιστο	7,303.0
Άθροισμα	1,122,040.2
Πλήθος	487

Πίνακας 5.6: Περιγραφικά στατιστικά στοιχεία πίεσης σημείου φυσαλίδας

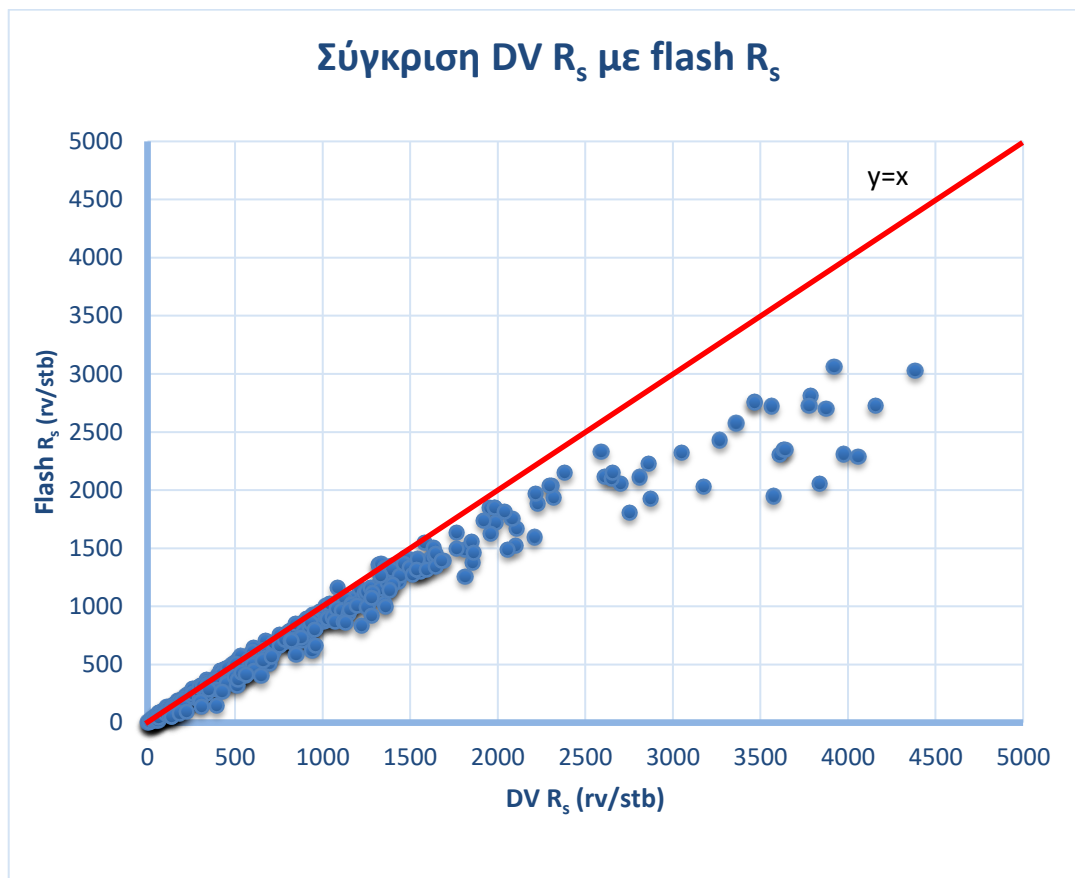
Στο Διάγραμμα 5.6 απεικονίζεται το ιστόγραμμα συχνοτήτων της ιδιότητας. Αναλύοντας το σχήμα, τα περισσότερα ρευστά λαμβάνουν τιμές μέχρι 4,000 psi, με το ιστόγραμμα να πλησιάζει αρκετά στην καμπύλη της κανονικής κατανομής, και την τιμή της στατιστικής ασυμμετρίας να βρίσκεται στο 0.5.



Διάγραμμα 5.6: Ιστόγραμμα συχνοτήτων πίεσης σημείου φυσαλίδας

5.6.8. Λόγος διαλυμένου αερίου προς το πετρέλαιο R_s

Το R_s αποτελεί μια από τις δυο ιδιότητες που δεν περιέχονταν εξ αρχής στη βάση δεδομένων αλλά έπρεπε να προσδιοριστεί με τη μέθοδο που περιγράφηκε στην παράγραφο 5.4. Όπως αναφέρθηκε, το R_s που υπολογίστηκε ήταν αυτό της εκτόνωσης (flash). Για να επαληθευτεί αν τα αποτελέσματα από τους υπολογισμούς ήταν λογικά, συγκρίθηκε το flash R_s που υπολογίστηκε από την μέθοδο με το DV R_s που περιείχε ήδη η βάση δεδομένων. Στο Διάγραμμα 5.7 παρουσιάζεται η σύγκριση μεταξύ των δυο R_s .



Διάγραμμα 5.7: Σύγκριση DV R_s με flash R_s

Υπενθυμίζεται πως το DV R_s έχει μεγαλύτερες τιμές από το αντίστοιχο flash R_s , αφού με την μέθοδο DV η εκτόνωση γίνεται σταδιακά σε υψηλή θερμοκρασία με αποτέλεσμα να απελευθερώνεται περισσότερο αέριο. Αυτό γίνεται κατανοητό παρατηρώντας στο διάγραμμα ότι τα σημεία βρίσκονται λίγο κάτω από την διαγώνιο. Όσο μεγαλύτερο είναι το R_s ενός ρευστού, δηλαδή η πητικότητα του, τόσο μεγαλύτερη φαίνεται να είναι και η διαφορά μεταξύ των δυο R_s , διότι υπάρχει περισσότερο διαλυμένο αέριο που μπορεί να απελευθερωθεί. Για αυτό και τα ρευστά με υψηλό R_s φαίνεται να απέχουν μεγαλύτερη

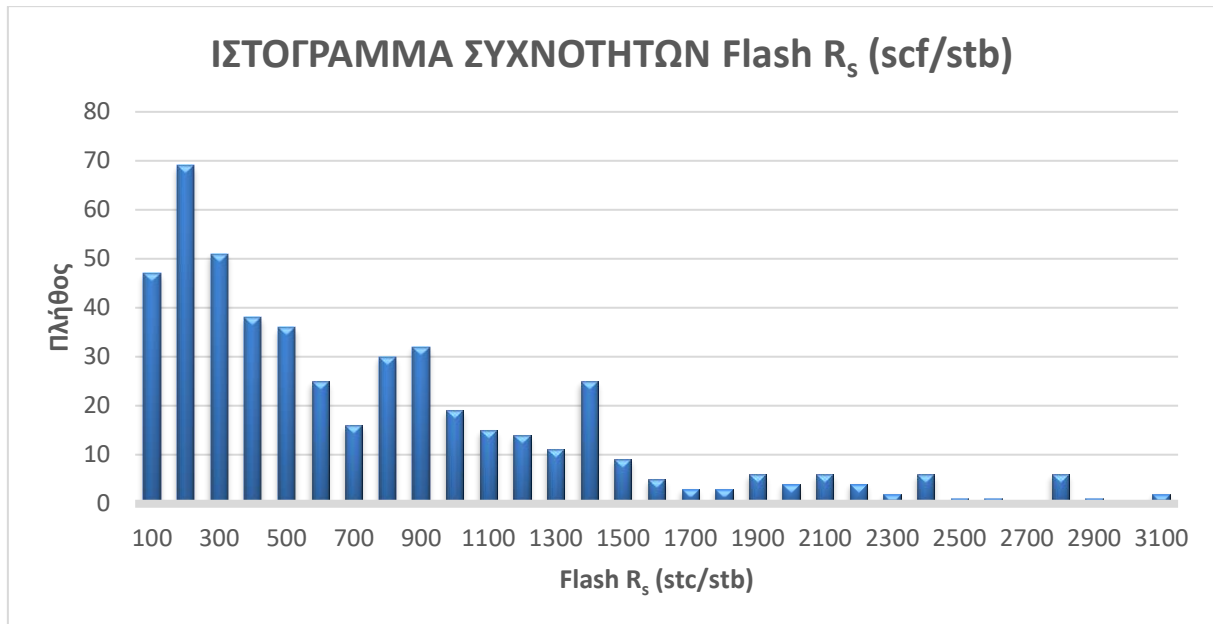
απόσταση από τη διαγώνιο. Συμπεραίνεται πως σύμφωνα με το παραπάνω διάγραμμα, οι υπολογισμοί για την εύρεση των τιμών του flash R_s ήταν σωστοί.

Παρόμοια με τις υπόλοιπες πετρελαϊκές ιδιότητες, το ελάχιστο και το μέγιστο του R_s δίνουν μια μεγάλη γκάμα στις τιμές του που κυμαίνεται από 4 έως και 3,060 scf/stb. Τα περιγραφικά στατιστικά στοιχεία του flash R_s αναγράφονται στον Πίνακα 5.7.

FLASH R_s (scf/stb)	
Μέσος	709.6
Τυπικό σφάλμα	28.6
Διάμεσος	503.2
Επικρατούσα τιμή	51.0
Μέση απόκλιση τετραγώνου	632.1
Διακύμανση	399,488.4
Κύρτωση	1.5
Ασυμμετρία	1.3
Εύρος	3,056.9
Ελάχιστο	4.6
Μέγιστο	3,061.5
Άθροισμα	345,575
Πλήθος	487

Πίνακας 5.7: Περιγραφικά στατιστικά στοιχεία flash R_s

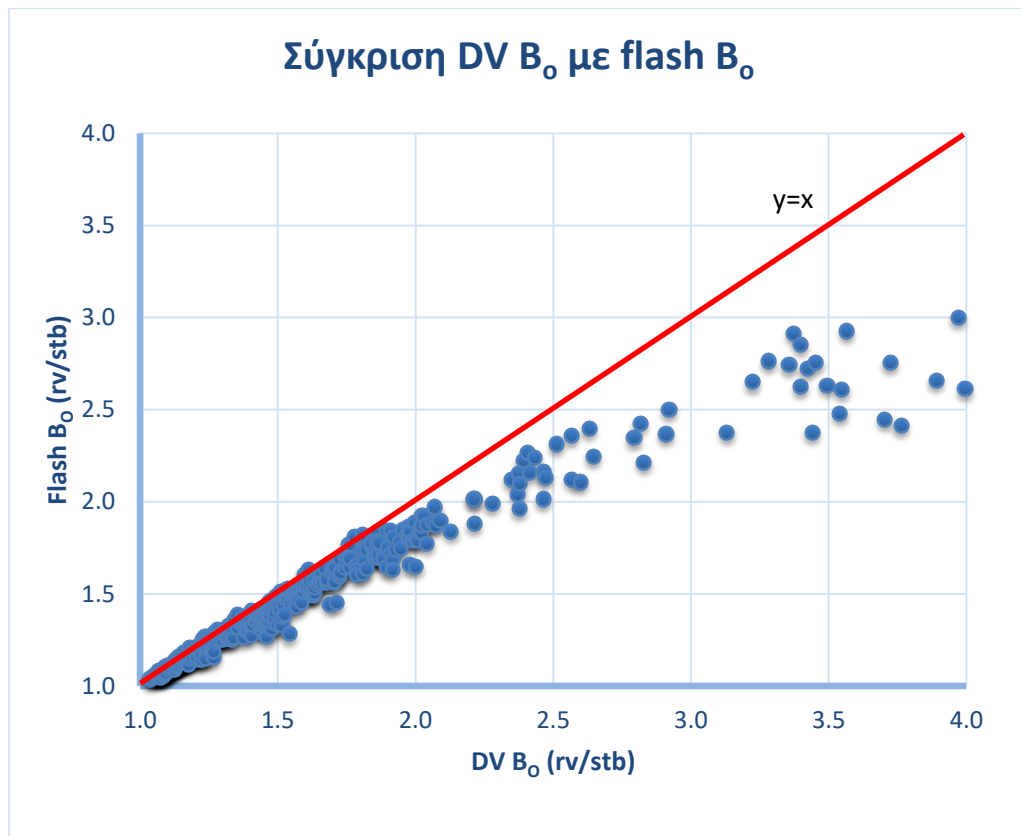
Στο Διάγραμμα 5.8 παρουσιάζεται το ιστόγραμμα συχνοτήτων για το flash R_s . Είναι εμφανές πως η πλειοψηφία των τιμών ανήκει στο εύρος από 100 μέχρι 1,450 scf/stb. Είναι απολύτως λογικό καθώς τον κύριο όγκο των ρευστών αποτελούν πετρέλαια χαμηλής και μέσης πτητικότητας. Αντίθετα, τα ρευστά με πολύ υψηλή πτητικότητα είναι λίγα και μάλιστα οι τιμές του R_s εκτοξεύονται. Αυτό έχει ως συνέπεια το ιστόγραμμα να απέχει από την καμπύλη της κανονικής κατανομής και τη στατιστική ασυμμετρία να ανέρχεται στο 1.3.



Διάγραμμα 5.8: Ιστόγραμμα συχνοτήτων flash R_s

5.6.9. Συντελεστής μεταβολής όγκου πετρελαίου B_o

Η δεύτερη από τις ιδιότητες που δεν περιείχε η βάση δεδομένων ήταν το B_o (Formation Volume Factor - FVF). Όπως και το R_s έτσι και το B_o υπολογίζεται με την μέθοδο που περιγράφηκε στην ενότητα 5.4 και αφορά το flash B_o . Και σε αυτήν την περίπτωση, το DV B_o λαμβάνει ελαφρώς υψηλότερες τιμές από τις αντίστοιχες του flash B_o όπως αυτό φαίνεται στο Διάγραμμα 5.9, με την διαφορά να αυξάνεται όσο μεγαλώνει η ίδια η τιμή του B_o , δηλαδή η πτητικότητα του πετρελαίου.

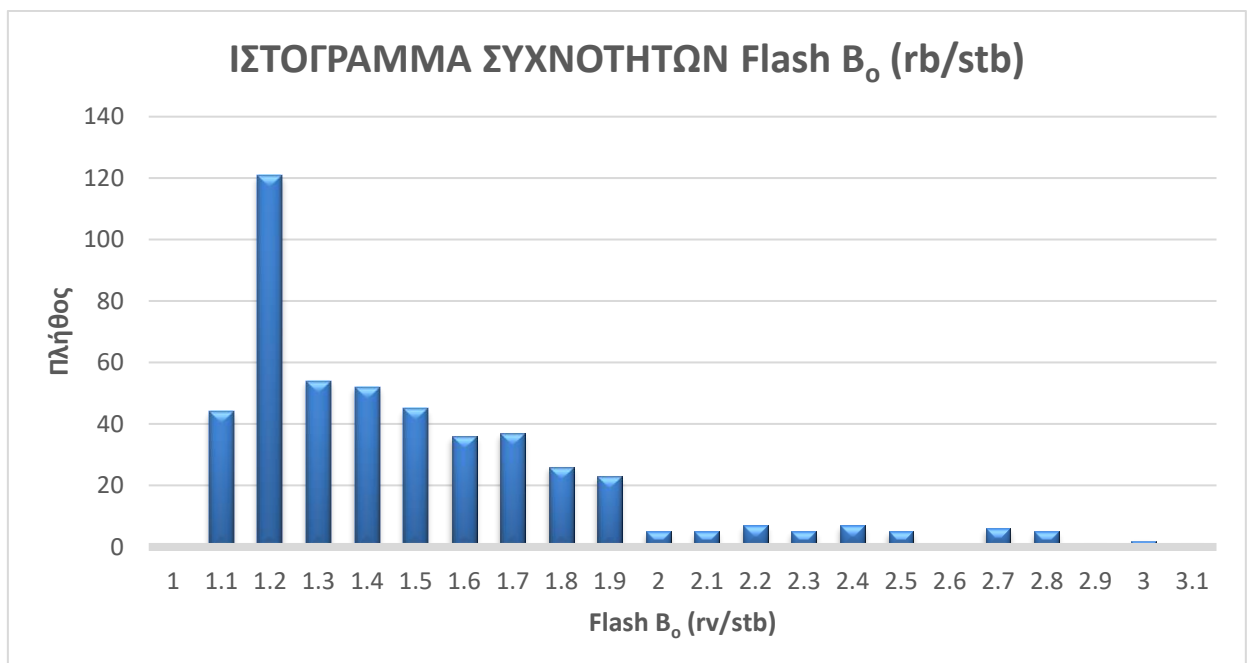


Διάγραμμα 5.9: Σύγκριση DV B₀ με flash B₀

Οι τιμές του flash B₀ κυμαίνονται από 1.05 rb/stb για τα πολύ βαριά πετρέλαια έως και 3 rb/stb για τα ρευστά υψηλής πηκτικότητας. Η πλειονότητα των τιμών του flash B₀ κυμαίνεται μεταξύ 1.05 και 2 rb/stb. Στον Πίνακα 5.8 αναγράφονται τα περιγραφικά στατιστικά στοιχεία του B₀ ενώ στο Διάγραμμα 5.10 απεικονίζεται το ιστόγραμμα συχνοτήτων που προέκυψε.

Το ιστόγραμμα διαφέρει αρκετά από την καμπύλη της κανονικής κατανομής, όπως υποδεικνύει και η τιμή της στατιστικής ασυμμετρίας που εκτιμάται στο 1.5. Η εικόνα αυτή θεωρείται λογική αφού οι τιμές του B₀ ξεκινάνε από το 1.05 rb/stb με αποτέλεσμα να σχηματίζουν κανονική κατανομή που έχει μετατοπιστεί.

B_o (rv/stb)	
Μέσος	1.5
Τυπικό σφάλμα	0.0
Διάμεσος	1.3
Επικρατούσα τιμή	1.1
Μέση απόκλιση τετραγώνου	0.4
Διακύμανση	0.2
Κύρτωση	2.5
Ασυμμετρία	1.6
Εύρος	2.0
Ελάχιστο	1.0
Μέγιστο	3.0
Άθροισμα	709
Πλήθος	487

Πίνακας 5.8: Περιγραφικά στατιστικά στοιχεία flash B_o Διάγραμμα 5.10: Ιστόγραμμα συχνοτήτων flash B_o

5.6.10. Συμπεράσματα

Κατόπιν της στατιστική ανάλυσης της βάσης δεδομένων που περιγράφηκε συμπεραίνεται πως πρόκειται για ένα σύνολο δεδομένων με μεγάλο εύρος τιμών που μπορούν να περιγράψουν ικανοποιητικά πετρέλαια βαριά έως και χαμηλής και μέσης πτητικότητας.

Δυστυχώς η βάση δεδομένων δεν περιέχει αρκετά δεδομένα για πετρέλαια υψηλής πτητικότητας. Συνεπώς, όταν τα δεδομένα αυτά εισαχθούν στα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα του επόμενου κεφαλαίου, αναμένεται να μπορούν να εκτιμήσουν με ακρίβεια τα p_b , R_s και B_o για τα βαριά, χαμηλής και μέσης πτητικότητας πετρέλαια και με λιγότερη ακρίβεια τα υψηλής πτητικότητας, καθώς η πληροφορία για αυτά είναι ελλιπής. Το γεγονός αυτό λαμβάνεται υπόψη κατά το σχεδιασμό των ΤΝΔ και αντιμετωπίζεται μεθοδικά στο επόμενο κεφάλαιο. Τέλος, ένα σημαντικό στοιχείο που ενδέχεται να επηρεάσει την ακρίβεια των προβλέψεων των ΤΝΔ είναι το γεγονός ότι, η είσοδος των ΤΝΔ δεν θα περιλαμβάνει βασική πληροφορία, όπως είναι ο διαχωρισμός του κλάσματος C3-5 στα επιμέρους συστατικά του καθώς και η ανάλυση του C6+ σε λεπτομερέστερη περιγραφή του βαρέος κλάσματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6.

Εκτίμηση B_o , R_s , p_b με χρήση ΤΝΔ και συσχετίσεων

6.1. Επισκόπηση της πλατφόρμας Microsoft Azure

Τα ΤΝΔ της παρούσας εργασίας σχεδιάστηκαν και υλοποιήθηκαν στη διαδικτυακή πλατφόρμα της Microsoft, το Azure.

Το Microsoft Azure είναι μια δημόσια πλατφόρμα υπολογιστικού «νέφους» (cloud computing platform) που δημιουργήθηκε από την εταιρία Microsoft και παρέχει στους χρήστες της πρόσβαση σε πάνω από 600 διαδικτυακές υπηρεσίες. Οι παροχές αυτές ποικίλουν από υπολογιστικές υπηρεσίες και χώρους αποθήκευσης δεδομένων, μέχρι προγραμματιστικά εργαλεία και εφαρμογές Τεχνητής Νοημοσύνης και Μηχανικής Εκμάθησης.

Η υπηρεσία που χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια της εργασίας άνηκε στην κατηγορία υπηρεσιών Μηχανική Εκμάθηση Azure (Azure Machine Learning), ένα περιβάλλον νέφους που έχει ως βασική λειτουργία την εκπαίδευση, αξιοποίηση, τον αυτοματισμό και τη διαχείριση μοντέλων ΜΕ. Πιο συγκεκριμένα, η ΜΕ Azure έχει χρήσεις για οποιοδήποτε είδος ΜΕ (κλασσική ή βαθιά – deep ML) και οποιοδήποτε είδος εκπαίδευσης (επιβλεπόμενες, μη επιβλεπόμενες). Επίσης, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να διαλέξει, ανάλογα με τις απαιτήσεις και τις προτιμήσεις του, ανάμεσα σε ένα περιβάλλον που απαιτείται η χρήση κώδικα προγραμματισμού ή σε ένα περιβάλλον με καθόλου ή ελάχιστη χρήση κώδικα, όπως το Στούντιο Μηχανικής Εκμάθησης Azure (Azure Machine Learning Studio classic).

Το Στούντιο Μηχανικής Εκμάθησης Azure είναι η πλατφόρμα στην οποία υλοποιήθηκαν τα ΤΝΔ για την εκτίμηση των πετρελαϊκών ιδιοτήτων R_s , B_o και p_b με χρήση δεδομένων σύστασης από το εργαλείο YAP. Αποτελεί μια διαδικτυακή πλατφόρμα που λειτουργεί σε περιβάλλον φυλλομετρητή (web browser) χωρίς τη χρήση κάποιας άλλης εγκατεστημένης εφαρμογής. Το περιβάλλον αυτό είναι εξαιρετικά φιλικό, ειδικά προς τους αρχάριους με την ΜΕ χρήστες, καθώς, όπως αναφέρθηκε παραπάνω δεν απαιτεί καμία γνώση κώδικα προγραμματισμού (Python, C++ κ.α.), αφού όλες οι διεργασίες γίνονται μέσω γραφικής διεπαφής (graphical interface).

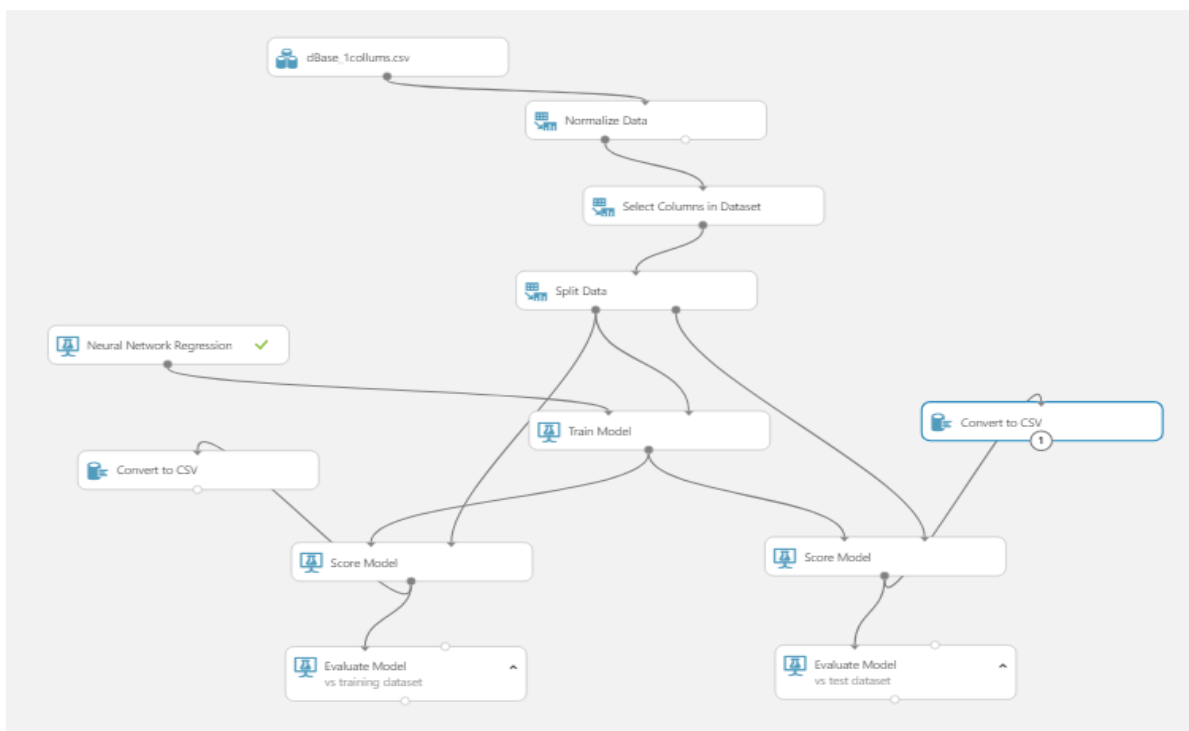
Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να ανεβάσει (upload) τη βάση δεδομένων ενδιαφέροντος στην πλατφόρμα και στη συνέχεια, συνδυάζοντας τα εκατοντάδες δομικά στοιχεία (modules) που παρέχονται, να κατασκευάσει εξ' ολοκλήρου το ΤΝΔ της αρεσκείας του. Αξίζει να αναφερθεί πως η αρχιτεκτονική των ΤΝΔ πραγματοποιείται με την τεχνική «σύρε κι άφησε» (drag and drop) των δομικών στοιχείων. Με τον όρο «δομικά στοιχεία» εννοούνται επιμέρους λειτουργίες που επιτρέπουν την επεξεργασία των πρωτόλειων δεδομένων, την προετοιμασία και εισαγωγή τους στο ΤΝΔ, την εκπαίδευση και αξιολόγηση του τελευταίου.

Ένα τυπικό ΤΝΔ όπως αυτά που κατασκευάστηκαν για τις ανάγκες της εργασίας περιλαμβάνει:

1. Τη βάση δεδομένων απ' όπου εισάγονται στο ΤΝΔ οι τιμές εισόδου x και οι τιμές εξόδου y .
2. Το δομικό στοιχείο «Κανονικοποίηση Δεδομένων» (Normalize Data). Σε αυτό πραγματοποιείται ο μετασχηματισμός των δεδομένων ανάλογα με τις ανάγκες του ΤΝΔ όπως περιγράφηκε στην ενότητα 4.5. Μερικές από τις μεθόδους μετασχηματισμού που δύναται να εφαρμοστούν είναι η Min – Max και η Zscore.
3. Το δομικό στοιχείο «Επιλογή Στηλών στη Βάση Δεδομένων» (Select Columns in Dataset). Με αυτό επιλέγονται από την, ευρεία εν γένει, βάση δεδομένων οι στήλες που θα αξιοποιηθούν από το ΤΝΔ.
4. Το δομικό στοιχείο «Διαχωρισμός Δεδομένων» (Split Data). Σε αυτό γίνεται ο διαχωρισμός της βάσης σε δεδομένα εκπαίδευσης, επαλήθευσης και ελέγχου, με όποιο τρόπο επιθυμεί ο χρήστης.
5. Το δομικό στοιχείο «Παλινδρόμηση Νευρωνικού Δικτύου» (Neural Network Regression). Χρησιμοποιείται για την επίλυση προβλημάτων μη γραμμικής παλινδρόμησης και σε αυτό ρυθμίζονται από τον χρηστή όλες οι υπερπαραμέτροι του ΤΝΔ όπως, ο αριθμός των κρυφών νευρώνων (hidden nodes), ο ρυθμός εκπαίδευσης, οι αρχικές τιμές των βαρών, ο αριθμός των επαναλήψεων που πραγματοποιεί ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης (εποχές) κα. Ανάλογα με το πρόβλημα προς επίλυση του εκάστοτε ΤΝΔ, το δομικό στοιχείο μπορεί να αντικατασταθεί με διαφορετικά όπως αυτό της «Γραμμικής Παλινδρόμησης» (Linear Regression), της «Ταξινόμησης» (Classification) ή από κάποια από τα

δεκάδες αλλά που αντιστοιχούν στους υπόλοιπους τύπους επίλυσης προβλημάτων ΜΕ που υποστηρίζει το Azure ML studio.

6. Το δομικό στοιχείο «Εκπαίδευση Μοντέλου» (Train Model). Εδώ γίνεται η επιλογή της στήλης που περιέχει τις επιθυμητές τιμές εξόδου y του μοντέλου, βάση των οποίων θα γίνει η εκπαίδευση του ΤΝΔ. Σημειώνεται ότι το Azure υποστηρίζει ΤΝΔ όπου η έξοδος είναι βαθμωτό μέγεθος, όχι διανυσματικό.
7. Το δομικό στοιχείο «Αποτελέσματα Μοντέλου» (Score Model). Εδώ προσδιορίζονται όλα τα αποτελέσματα που προέκυψαν μετά το πέρας της εκπαίδευσης. Γίνεται η σύγκριση μεταξύ των τιμών εξόδου \hat{y} που εκτίμησε το ΤΝΔ και των επιθυμητών τιμών εξόδου y που περιείχε αρχικά η βάση δεδομένων. Για τα ΤΝΔ της παρούσας εργασίας απαιτήθηκαν δύο τέτοια δομικά στοιχεία καθώς το πρώτο έδινε πληροφορίες για την ακρίβεια του ΤΝΔ ως προς τα δεδομένα εκπαίδευσης, ενώ το δεύτερο ως προς τα δεδομένα ελέγχου, τα όποια ήταν άγνωστα για το μοντέλο. Για την εξαγωγή και επεξεργασία των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκε το δομικό στοιχείο «Μετατροπή σε CSV» (Convert to CSV), έτσι ώστε τα αποτελέσματα να μπορούν να μεταφερθούν σε περιβάλλον Excel για την περαιτέρω ανάλυση και επεξεργασία τους.
8. Το δομικό στοιχείο «Εκτίμηση Μοντέλου» (Evaluate Model). Αποτελεί και το τελευταίο δομικό στοιχείο που χρησιμοποιήθηκε. Σε αυτό παρέχονται πληροφορίες, όπως το απόλυτο σφάλμα και ο συντελεστής προσδιορισμού (ή προσαρμογής) R^2 (coefficient of determination) μεταξύ των εκτιμώμενων από το ΤΝΔ τιμών εξόδου \hat{y} και των επιθυμητών τιμών εξόδου y που περιέχει η βάση δεδομένων. Επίσης απαιτήθηκαν δύο δομικά στοιχεία για τους ίδιους λόγους που αναφέρθηκαν παραπάνω.



Εικόνα 6.1: Αρχιτεκτονική ΤΝΔ με συνδυασμό δομικών στοιχείων (Azure ML studio)

Η Εικόνα 6.1 απεικονίζει την αρχιτεκτονική των ΤΝΔ που αναλύθηκε παραπάνω και χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση των B_o , R_s και p_b .

Στις παραγράφους που ακολουθούν περιγράφεται αναλυτικά η διαδικασία εκπαίδευσης και ελέγχου των ΤΝΔ της παρούσας εργασίας.

6.2. Εκτίμηση ογκομετρικού συντελεστή σχηματισμού πετρελαίου B_o

6.2.1. Εκπαίδευση του ΤΝΔ

Τιμές εισόδου x και τιμές εξόδου y του ΤΝΔ

- Είσοδοι ΤΝΔ:** Η εκτίμηση του B_o στην πίεση φουσαλίδας απαιτεί γνώση της σύστασης του ρευστού αλλά και γνώση της θερμοκρασίας του ταμιευτήρα, καθώς η διόγκωση του πετρελαίου που περιγράφεται από το B_o εξαρτάται από τη θερμοκρασία στην οποία βρισκόταν το ρευστό μέσα στον ταμιευτήρα. Συνεπώς οι είσοδοι x_i στην περίπτωση αυτή ήταν 5, οι συστάσεις κατά μάζα των C_1 , C_2 , C_{3-5} , C_{6+} και η θερμοκρασία T_{res} . Το CO_2 δεν συμπεριλήφθηκε στις εισόδους του ΤΝΔ, καθώς το άθροισμα των συστάσεων κατά μάζα ισούταν με 100% και συνεπώς εισάγοντας μόνο τα C_2 , C_{3-5} και C_{6+} , το ΤΝΔ αφαιρώντας από το 100% είχε γνώση και για την τιμή του CO_2 .

- **Έξοδος ΤΝΔ:** Η μοναδική έξοδος \hat{y} του ΤΝΔ ήταν η εκτίμηση του B_o . Ως πρόβλημα επιβλεπομένης μάθησης δόθηκε στο ΤΝΔ η επιθυμητή τιμή εξόδου y του B_o που περιεχόταν στη βάση δεδομένων.

Κανονικοποίηση Δεδομένων

Στην περίπτωση του ΤΝΔ που υλοποιήθηκε για την εκτίμηση του B_o κανονικοποιήθηκαν μόνο οι τιμές εισόδου της θερμοκρασίας T_{res} , καθώς οι αριθμητικά υψηλές τιμές που λάμβανε η συγκεκριμένη πετρελαϊκή ιδιότητα (είχε εκφραστεί σε $^{\circ}K$) δυσχέραινε την αποτελεσματική και ακριβή εκπαίδευση του ΤΝΔ. Η μέθοδος μετασχηματισμού δεδομένων που εφαρμόστηκε ήταν η Κανονικοποίηση Min – Max που περιγράφηκε στην παράγραφο 4.5.

Διαχωρισμός Δεδομένων

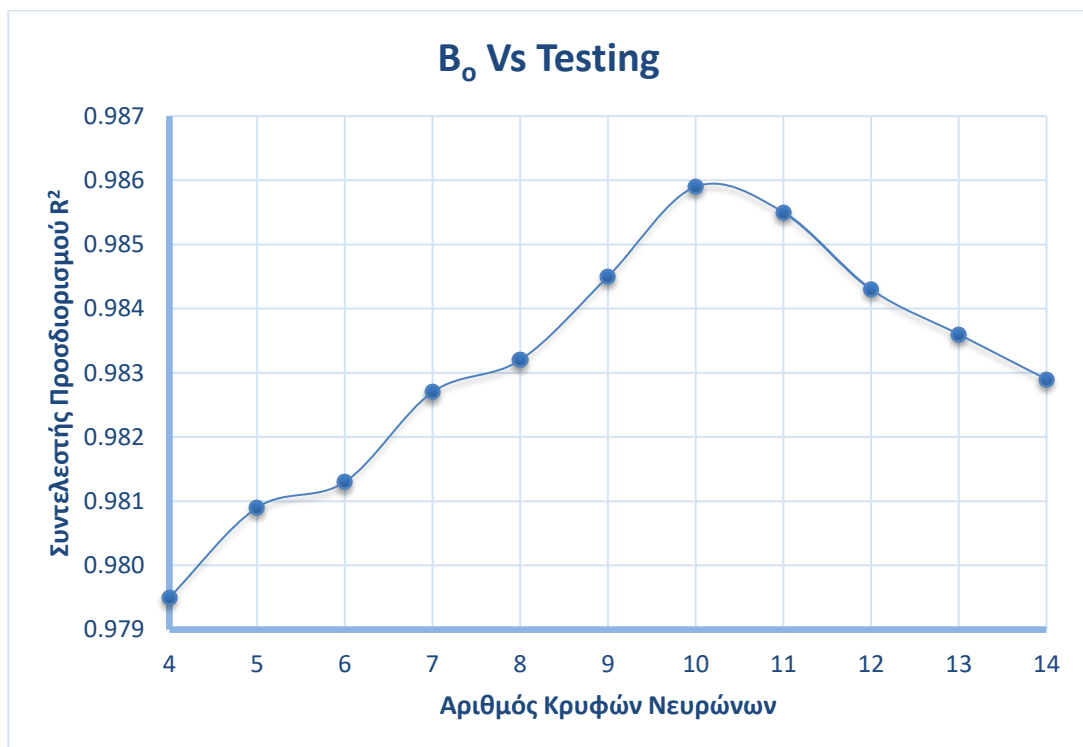
Αρχικά, καθορίστηκε το ποσοστό των δεδομένων που απαιτεί το ΤΝΔ της εκτίμησης του B_o για την εκπαίδευση, επαλήθευση και τον τελικό έλεγχο του. Ύστερα από δοκιμές, αποφασίστηκε βάσει της ακρίβειας που απέδωσαν οι εκτιμήσεις του ΤΝΔ, η βάση δεδομένων των 487 ρευστών να χωριστεί σε:

- 76,5% των συνολικών ρευστών (επιλέχθηκαν τυχαία 373 ρευστά από τα 487) για την εκπαίδευση (training data) του ΤΝΔ
- 8,5% των συνολικών ρευστών (επιλέχθηκαν τυχαία 41 ρευστά από τα 487) για την επαλήθευση (validation data) του ΤΝΔ
- 15% των συνολικών ρευστών (επιλέχθηκαν τυχαία 73 ρευστά από τα 487) για τον τελικό έλεγχο ακρίβειας (testing data) του ΤΝΔ

Αριθμός Κρυφών Νευρώνων

Η πρώτη υπερπαράμετρος που ορίστηκε ήταν ο αριθμός των κρυφών νευρώνων (hidden nodes) που θα περιείχε το (μοναδικό) κρυφό επίπεδο του ΤΝΔ για την εκτίμηση του B_o . Υπενθυμίζεται πως ένας μικρός αριθμός κρυφών νευρώνων μπορεί να οδηγήσει σε ελλιπή εκπαίδευση του δικτύου ενώ ένας μεγάλος αριθμός νευρώνων μπορεί να οδηγήσει το ΤΝΔ σε υπερπροσαρμογή πάνω στα δεδομένα εκπαίδευσης. Ύστερα από δοκιμές (εκπαίδευση και έλεγχος του ΤΝΔ) βρέθηκε πως ο αριθμός των 10 κρυφών νευρώνων είναι αυτός που προσδίδει τη βέλτιστη ακρίβεια της εκτίμησης του B_o , τόσο όταν αυτή συγκρίνεται με τα δεδομένα εκπαίδευσης και επαλήθευσης όσο και με τα δεδομένα ελέγχου. Η επιλογή

αυτού του αριθμού έγινε βάση του συντελεστή προσδιορισμού R^2 μεταξύ των εκτιμώμενων τιμών B_o από το ΤΝΔ και των τιμών B_o των δεδομένων ελέγχου για διάφορους αριθμούς κρυφών νευρώνων. Ο συντελεστής προσδιορισμού (coefficient of determination) R^2 εκφράζει τον βαθμό συσχέτισης μεταξύ των μεταβλητών x και y , πως δηλαδή η μια μεταβλητή μεταβάλλεται ως προς την άλλη. Η μέγιστη τιμή που μπορεί να λάβει ο συντελεστής προσδιορισμού είναι $R^2=1$, όταν υπάρχει τέλεια συσχέτιση μεταξύ των μεταβλητών x και y . Από το Διάγραμμα 6.1 γίνεται προκύπτει πως η μέγιστη τιμή του συντελεστή R^2 επιτυγχάνεται στους 10 κρυφούς νευρώνες.



Διάγραμμα 6.1: Προσδιορισμός αριθμού κρυφών νευρώνων στην περίπτωση του ΤΝΔ για την εκτίμηση του B_o

Παράλληλα με την προσπάθεια εύρεσης του αριθμού νευρώνων που προσδίδει τη βέλτιστη ακρίβεια στο μοντέλο του ΤΝΔ, έγινε, πάλι βάση του συντελεστή R^2 , η ρύθμιση των υπολοίπων υπερπαραμέτρων. Όλοι οι αριθμοί των υπερπαραμέτρων που ακολουθούν προσδιορίστηκαν ύστερα από πολυάριθμες δόκιμες διαφορετικών τιμών των υπερπαραμέτρων και σε διάφορους συνδυασμούς μεταξύ τους.

- **Μέγιστος αριθμός των εποχών εκπαίδευσης ΤΝΔ** (αριθμός επαναλήψεων που πρέπει να εκτελέσει ο αλγόριθμος ελαχιστοποίησης): Ύστερα από πολυάριθμες δόκιμες προέκυψε πως ο αριθμός των 100,000 εποχών σε συνδυασμό με τους 10

κρυφούς νευρώνες απέδιδε τη βέλτιστη ακρίβεια στην εκτίμηση της τιμής του B_0 από το ΤΝΔ. Για αριθμό εποχών μεγαλύτερο των 100,000 παρατηρήθηκε αύξηση της ακρίβειας εκτίμησης του ΤΝΔ ως προς τα δεδομένα εκπαίδευσης και μείωσης ως προς τα δεδομένα ελέγχου, κάτι που υποδεικνύει πως πάνω από την συγκεκριμένη τιμή επέρχεται υπερπροσαρμογή του ΤΝΔ

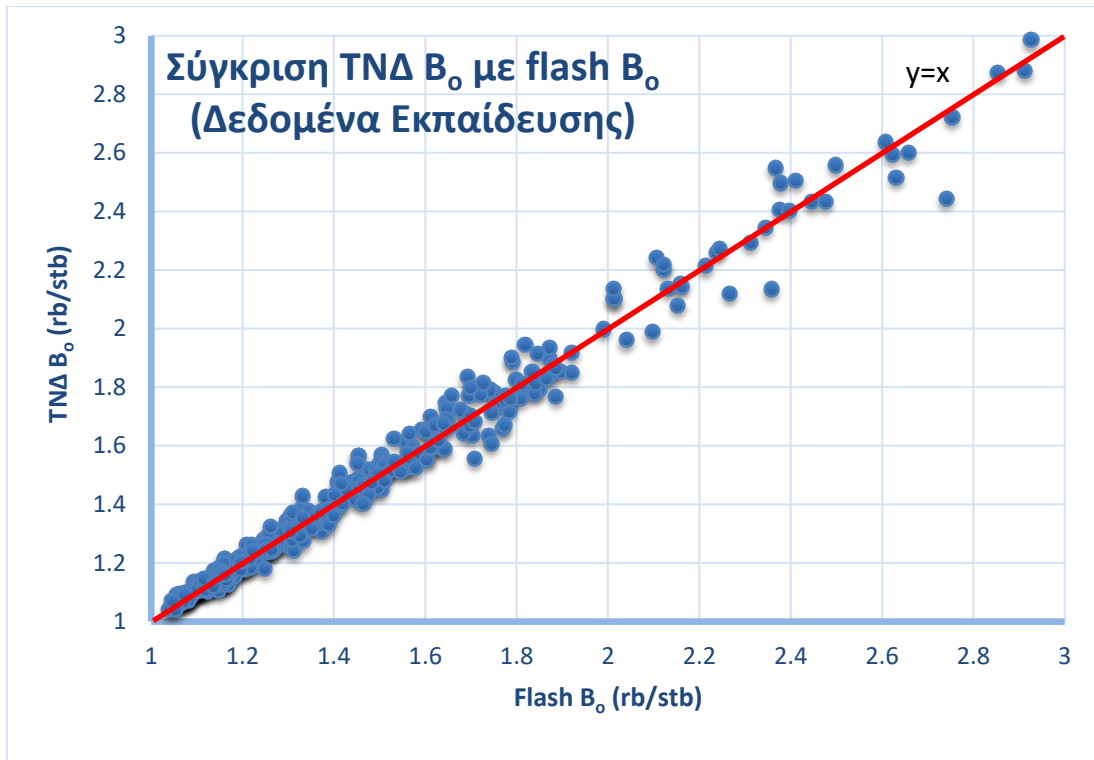
- **Ρυθμός εκπαίδευσης ΤΝΔ:** Η τιμή αυτής της υπερπαραμέτρου ορίστηκε ίση με 0.01 καθώς σε συνδυασμό με τον σχετικά μεγάλο αριθμό εποχών ήταν αρκετή ώστε ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης του ΤΝΔ να φτάσει στο βέλτιστο δυνατό τοπικό ελάχιστο της συνάρτησης κόστους.
- **Συνάρτηση Ενεργοποίησης:** Ως συνάρτηση ενεργοποίησης επιλέχθηκε η συνήθης λογιστική σιγμοειδής που περιγράφηκε στην υποενότητα 4.5.3 του Κεφαλαίου 4.
- **Συνάρτηση Κόστους:** Ως συνάρτηση κόστους επιλέχθηκε η συνάρτηση τετραγωνικού σφάλματος που περιγράφηκε στην Εξίσωση 4.5. (squared error cost function)
- **Αλγόριθμος Ελαχιστοποίησης:** Το δομικό στοιχείο «Παλινδρόμηση Νευρωνικού Δικτύου» που χρησιμοποιήθηκε στην αρχιτεκτονική των ΤΝΔ της εργασίας υποστήριζε την μέθοδο της Συζυγούς Κατάβασης Κλίσης με *ορμή* (momentum) όμοια με αυτή που περιγράφηκε στην ενότητα 4.5. Ο συντελεστής ορμής χρησιμοποιείται για την ταχύτερη ώθηση της αναφερθείσας μεθόδου στο τοπικό ελάχιστο. Αυτό επιτυγχάνεται προσθέτοντας ένα ποσοστό της ανανέωσης των βαρών από το προηγούμενο βήμα του αλγορίθμου ελαχιστοποίησης στο επόμενο. Τυπικές τιμές του συντελεστή ορμής γ κυμαίνονται από 0.8 έως 0.9. Για το παρόν ΤΝΔ η τιμή ορίστηκε ίση με $\gamma = 0.9$
- **Παράμετρος τυχειότητας των Αρχικών Τιμών Βαρών:** Η υπερπαραμέτρος αυτή έλαβε πολλαπλές τιμές κατά τη διάρκεια των δοκιμών από 0.2 έως 0.6. Με τη συνεχή αλλαγή αυτής της υπερπαραμέτρου επιτυγχάνεται διαφορετική αρχικοποίηση όλων των βαρών του ΤΝΔ για κάθε εκπαίδευση που διενεργείται. Η εκπαίδευση του ΤΝΔ πραγματοποιήθηκε πάνω από είκοσι φορές, με σκοπό την εύρεση του βέλτιστου τοπικού ελάχιστου της συνάρτησης κόστους.

6.2.2. Αξιολόγηση του ΤΝΔ

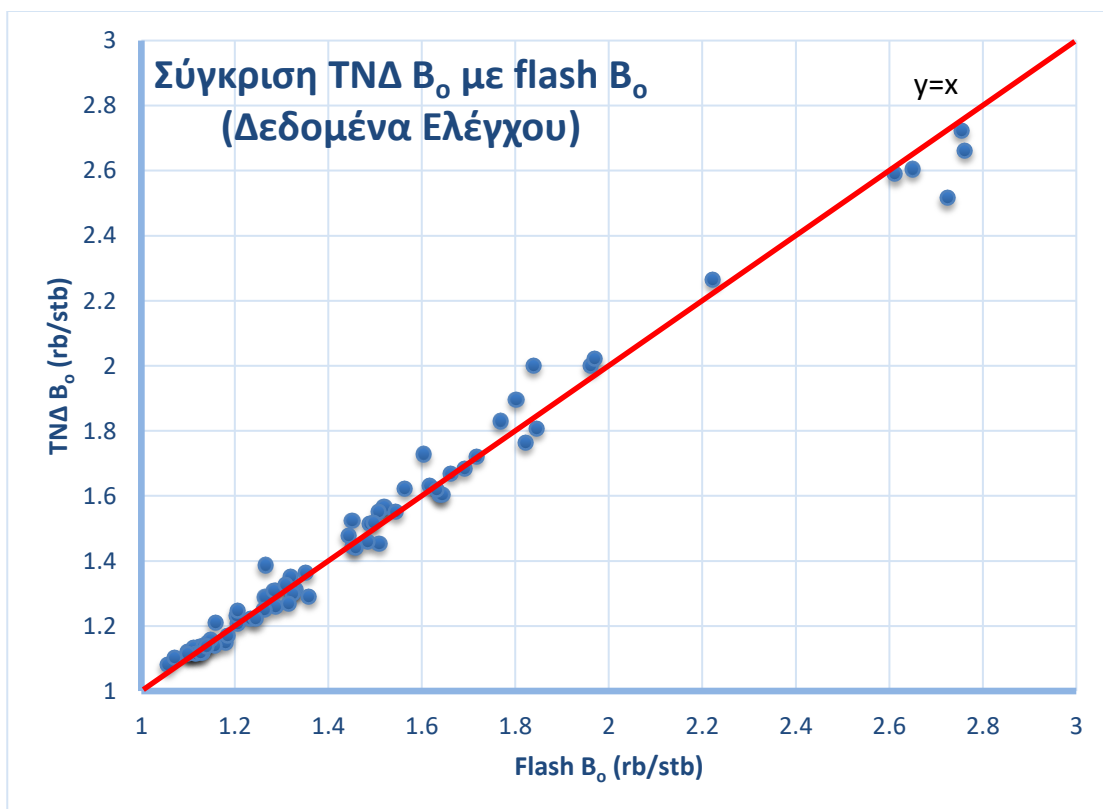
Τελευταίο βήμα πριν την ολοκλήρωση της διαδικασίας αποτελεί η αξιολόγηση του μοντέλου που προέκυψε από την εκπαίδευση του ΤΝΔ. Αυτό πραγματοποιείται ελέγχοντας την επίδοση που επέδειξε το εκπαιδευμένο μοντέλο όταν οι προβλέψεις του συγκρίθηκαν με τα δεδομένα εκπαίδευσης και τα άγνωστα ως προς αυτό δεδομένα ελέγχου. Το μοντέλο εκτίμησης B_o βρέθηκε να αποδίδει εξίσου καλά όταν συγκρίνεται τόσο με τα δεδομένα εκπαίδευσης όσο και με τα δεδομένα ελέγχου, κάτι που υποδεικνύει την αξιοπιστία του. Στον Πίνακα 5.1 παρατίθενται τα αποτελέσματα της επίδοσης του μοντέλου ενώ στα Διαγράμματα 5.1, 5.2 απεικονίζεται η σύγκριση των εκτιμώμενων B_o από το μοντέλο με τις τιμές B_o των δεδομένων εκπαίδευσης και ελέγχου αντίστοιχα που περιείχε η βάση δεδομένων.

	Δεδομένα Εκπαίδευσης	Δεδομένα ελέγχου
Πλήθος	414	73
Μέσο Σφάλμα* (rb/stb)	0.004	0.006
Μέσο Απόλυτο Σφάλμα* (rb/stb)	0.031	0.035
Μέσο Σχετικό Σφάλμα*	0.37 %	0.57 %
Μέσο Σχετικό Απόλυτο Σφάλμα*	2.03 %	2.22 %
Συντελεστής R^2*	0.9865	0.9859

Πίνακας 6.1: Επίδοση του μοντέλου εκτίμησης B_o του ΤΝΔ ως προς τα δεδομένα εκπαίδευσης και ελέγχου. Σημειώνεται πως στα δεδομένα εκπαίδευσης περιλαμβάνονται τα δεδομένα επαλήθευσης.



Διάγραμμα 6.2: Σύγκριση ΤΝΔ Β₀ με flash Β₀ (Δεδομένα Εκπαίδευσης)



Διάγραμμα 6.3: Σύγκριση ΤΝΔ Β₀ με flash Β₀ (Δεδομένα Ελέγχου)

Το μέσο σφάλμα (mean error) και το μέσο σχετικό σφάλμα (mean relative error) λαμβάνουν τιμές με πρόσημα και μπορούν να υποδείξουν αν το μοντέλο σε γενικές γραμμές τείνει να υπερεκτιμά ή να υποεκτιμά κατά μέσο όρο την τιμή του B_o σε σχέση με την τιμή του flash B_o της βάσης δεδομένων. Συνεπώς από τις εξαιρετικά κοντά στο 0 τιμές που λαμβάνουν αυτά τα δυο στατιστικά στοιχεία συμπεραίνεται πως το μοντέλο του ΤΝΔ είναι αμερόληπτο καθώς δεν έχει τάση να υπερεκτιμήσει ή να υποεκτιμήσει την τιμή του B_o κάτι που υποστηρίζεται και από την ισόμερη κατανομή των σημείων πάνω και κάτω από τη διαγώνιο των Διαγραμμάτων 6.2, 6.3.

Από την άλλη πλευρά, το μέσο απόλυτο σφάλμα (mean absolute error) και το μέσο απόλυτο σχετικό σφάλμα (mean absolute relative error) δίνουν μια εικόνα για τη διασπορά των εκτιμήσεων, δηλαδή ποσό απέχουν κατά μέσο όρο οι τιμές που εκτίμησε το ΤΝΔ από αυτές της βάσης δεδομένων. Αυτό επαληθεύεται και από τα δυο διαγράμματα όπου τα σημεία φαίνεται να απέχουν πολύ λίγο από τις διαγωνίους.

Σε γενικές γραμμές φαίνεται πως το μοντέλο εκτίμησης B_o που υλοποιήθηκε από το ΤΝΔ ανταποκρίθηκε με ικανοποιητική ακρίβεια. Οι τιμές μέσου σχετικού απόλυτου σφάλματος 2.03% και 2.22% των δεδομένων εκπαίδευσης και ελέγχου αντίστοιχα είναι αποδέκτες. Η κατά 0.19% μεγαλύτερη τιμή μέσου σχετικού απόλυτου σφάλματος των δεδομένων ελέγχου σε σχέση με τα δεδομένα εκπαίδευσης δεν πρέπει να προκαλεί καμία ανησυχία καθώς είναι λογικό λόγω του μικρότερου πλήθους δεδομένων. Η τιμή του μέσου απόλυτου σχετικού σφάλματος των δεδομένων ελέγχου είναι εξαιρετικά μικρή για ένα μοντέλο που εκτιμά τιμές B_o που κυμαίνονται από 1.05 έως και 3 rb/stb, δηλαδή για μια πολύ ευρεία γκάμα πτητικότητας των ρευστών.

$$* \text{Μέσο Σφάλμα} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x)$$

$$* \text{Μέσο Απόλυτο Σφάλμα} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - x|$$

$$* \text{Μέσο Σχετικό Σφάλμα} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - x)}{x}$$

$$* \text{Μέσο Σχετικό Απόλυτο Σφάλμα} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{x_i - x}{x} \right|$$

$$* \text{Συντελεστής Προσδιορισμού } R^2 = \left(\frac{n(\sum x_i x) - (\sum x)(\sum x_i)}{\sqrt{[n \sum x^2 - (\sum x)^2][n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2]}} \right)^2$$

όπου,

x = πειραματική τιμή

n = πλήθος ρευστών

x_i = εκτιμούμενη τιμή

6.2.3. ΤΝΔ για B_0 κάτω από 2 rb/stb

Ανατρέχοντας στο Κεφάλαιο 5 και στο Διάγραμμα 5.10 του ιστογράμματος συχνοτήτων του B_0 της βάσης δεδομένων παρατηρείται πως πάνω από τα 2 rb/stb δεν υπάρχει αρκετά μεγάλο πλήθος τιμών. Το ίδιο συμπέρασμα μπορεί να προκύψει και από την παρατήρηση των Διαγραμμάτων 6.2 και 6.3. Ειδικά στο Διάγραμμα 6.2 η αραιώση των σημείων πάνω από τα 2 rb/stb είναι χαρακτηριστική. Για το λόγο αυτό αποφασίστηκε η υλοποίηση ενός ακόμα ΤΝΔ που να εκτιμάει την τιμή του B_0 , μόνο για τα ρευστά της βάσης δεδομένων που λάμβαναν τιμές B_0 κάτω από 2 rb/stb. Το συνολικό πλήθος των ρευστών μειώθηκε από τα συνολικά 487 ρευστά της βάσης δεδομένων στα 442 ρευστά. Έτσι, δοκιμάζεται η ανάπτυξη ΤΝΔ σε σημαντικά μικρότερο εύρος τιμών B_0 με πολύ μικρή επίπτωση στο πλήθος των διαθέσιμων δεδομένων εκπαίδευσης.

Υπερπαράμετροι

Οι υπερπαράμετροι του ΤΝΔ ορίστηκαν με τον ίδιο τρόπο όπως του ΤΝΔ της υποενότητας 6.2.1. και έλαβαν τις εξής τιμές:

- **Αριθμός κρυφών νευρώνων:** 12
- **Αριθμός εποχών:** 100,000
- **Ρυθμός εκπαίδευσης:** 0.01
- **Συντελεστής ορμής γ :** 0.85

Παράλληλα με τον ορισμό των υπερπαραμέτρων έπρεπε να οριστεί εκ νέου το ποσοστό των δεδομένων εκπαίδευσης, επαλήθευσης και ελέγχου. Πάλι βάση δοκιμών τα ποσοστά αυτά ορίστηκαν σε:

Δεδομένα εκπαίδευσης: 81% (362 ρευστά)

Δεδομένα επαλήθευσης: 9% (36 ρευστά)

Δεδομένα ελέγχου: 10% (44 ρευστά)

καθώς παρατηρήθηκε πως η μείωση του πλήθους των δεδομένων εκπαίδευσης δυσχέραινε τη διαδικασία της εκπαίδευσης του ΤΝΔ αφού επηρέαζε την ακρίβεια των προβλέψεων του.

Αξιολόγηση μοντέλου

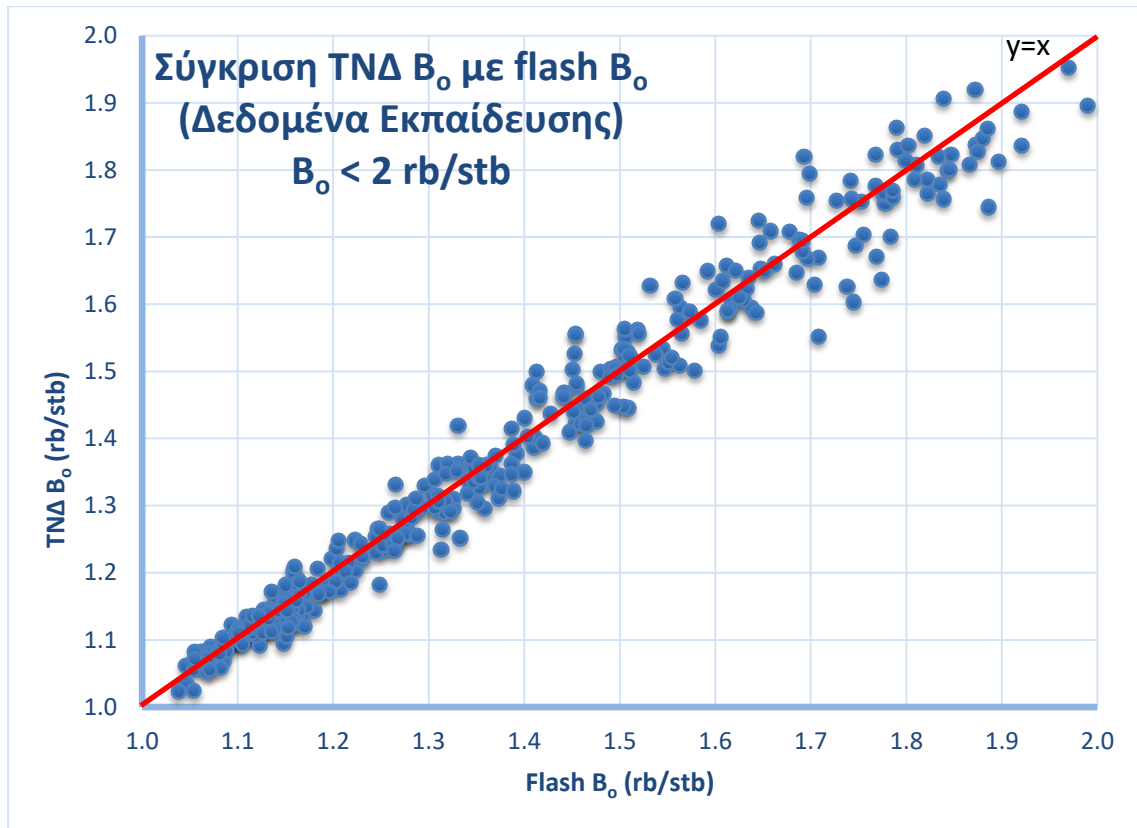
Οι επιδόσεις του μοντέλου εκτίμησης B_o κάτω από 2 rb/stb ήταν σαφώς καλύτερες από ότι του προηγούμενου μοντέλου, όπως αναμενόταν. Στον Πίνακα 6.2 παρατίθενται τα αποτελέσματα της επίδοσης του μοντέλου ενώ στα Διαγράμματα 6.4 και 6.5 παρουσιάζεται η σύγκριση των εκτιμώμενων B_o από το μοντέλο με τις τιμές B_o των δεδομένων εκπαίδευσης και ελέγχου αντίστοιχα.

	Δεδομένα Εκπαίδευσης	Δεδομένα ελέγχου
Πλήθος	398	44
Μέσο Σφάλμα (rb/stb)	-0.003	-0.003
Μέσο Απόλυτο Σφάλμα (rb/stb)	0.025	0.027
Μέσο Σχετικό Σφάλμα	-0.15 %	-0.20 %
Μέσο Σχετικό Απόλυτο Σφάλμα	1.82 %	1.87 %
Συντελεστής R^2	0.9810	0.9767

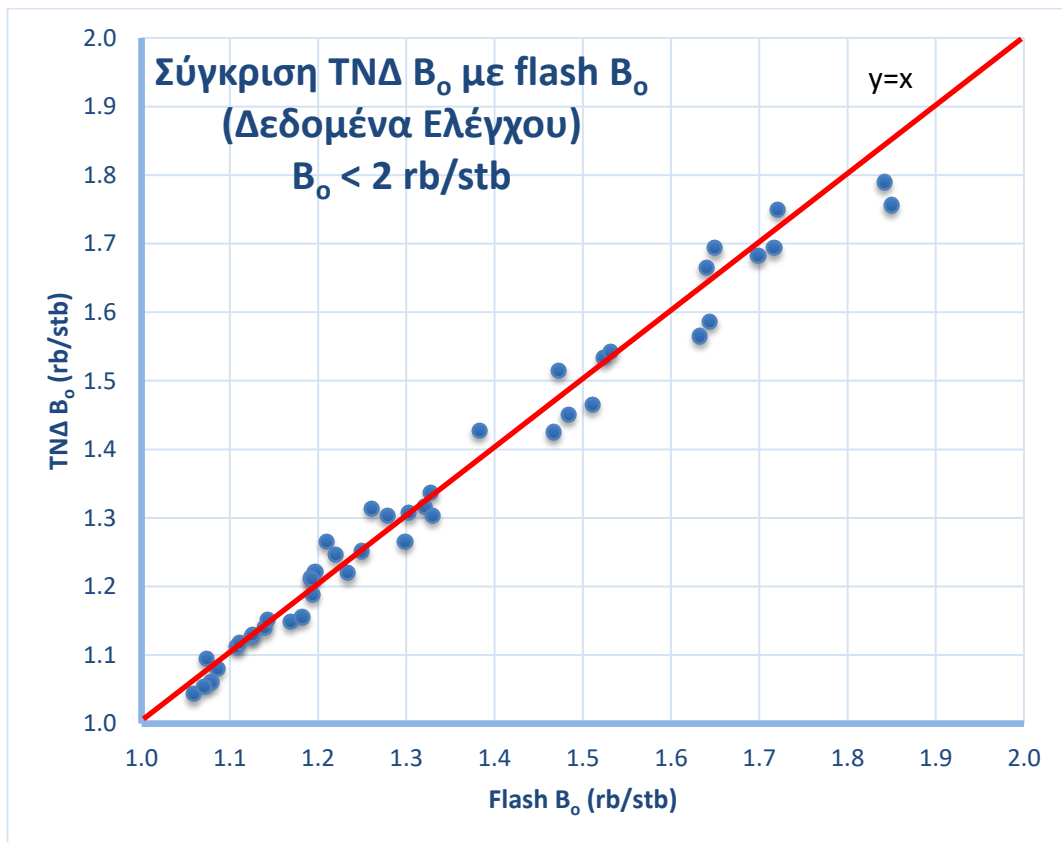
Πίνακας 6.2: Επίδοση του μοντέλου εκτίμησης B_o κάτω από 2 rb/stb του ΤΝΔ ως προς τα δεδομένα εκπαίδευσης και ελέγχου. Σημειώνεται πως στα δεδομένα εκπαίδευσης περιλαμβάνονται τα δεδομένα επαλήθευσης.

Σε σύγκριση με το προηγούμενο μοντέλο παρατηρήθηκε σαφής μείωση των σφαλμάτων. Συγκεκριμένα το μέσο σχετικό απόλυτο σφάλμα μειώθηκε από 2.03% σε 1.82% και από 2.22% σε 1.87% για τα δεδομένα εκπαίδευσης και ελέγχου αντίστοιχα. Αποδεικνύεται λοιπόν πως το μοντέλο εκτίμησης τιμών B_o κάτω από 2 rb/stb παρέχει σαφώς ακριβέστερες προβλέψεις από ότι το προηγούμενο μοντέλο που εκτιμούσε τις τιμές των B_o για όλα τα ρευστά της βάσης δεδομένων.

Η συντριπτική πλειοψηφία των κοιτασμάτων πετρελαίου σε όλο τον κόσμο περιέχει αποτελείται από ρευστά με B_o μικρότερο του 2 rb/stb, καθώς πάνω από αυτή την τιμή το πετρέλαιο είναι ιδιαίτερα μεγάλης πητικότητας. Συνεπώς υλοποιήθηκαν δυο διαφορετικά ΤΝΔ για τις ανάγκες των Μηχανικών ανάλογα με την πητικότητα του κοιτάσματος. Για την εφαρμογή των εκπαιδευμένων ΤΝΔ στην πράξη, προτείνεται η χρήση, αρχικά του καθολικού μοντέλου. Αν οι εκτιμήσεις του B_o λάβουν τιμές κάτω από



Διάγραμμα 6.4: Σύγκριση ΤΝΔ B_0 με flash B_0 ($B_0 < 2$ rb/stb) (Δεδομένα Εκπαίδευσης)



Διάγραμμα 6.5: Σύγκριση ΤΝΔ B_0 με flash B_0 ($B_0 < 2$ rb/stb) (Δεδομένα Ελέγχου)

2 rb/stb τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί το μοντέλο για εκτιμήσεις B_o κάτω από 2 rb/stb ώστε να επιτευχθεί μεγαλύτερη ακρίβεια. Διαφορετικά, διατηρείται η χρήση του καθολικού TNA.

6.3. Εκτίμηση R_s

6.3.1. Εκπαίδευση TNA

Τιμές εισόδου x και τιμές εξόδου y του TNA

- **Είσοδοι TNA:** Σε αντίθεση με την εκτίμηση του B_o , η εκτίμηση του R_s ενός ρευστού απαιτεί γνώση μόνο της σύστασης του, καθώς το πόσο αέριο είναι διαλυμένο μέσα στο πετρέλαιο σε συνθήκες σημείου φυσαλίδας εξαρτάται μόνο από τα συστατικά που απαρτίζουν το ρευστό. Συνεπώς, ως είσοδοι x_i του TNA ορίστηκαν τα 4 συστατικά C_1 , C_2 και C_{3-5} και C_{6+} καθώς το CO_2 δεν συμπεριλήφθηκε. Ο λόγος ήταν ο ίδιος που περιγράφηκε και στο TNA εκτίμησης B_o , ότι δηλαδή το άθροισμα των συστάσεων κατά μάζα ισούται με 100% και συνεπώς το TNA είχε έμμεσα γνώση για τη σύσταση κατά μάζα του CO_2 .
- **Έξοδος TNA:** Ως μοναδική έξοδος \hat{y} του TNA ορίστηκε η εκτίμηση της τιμής του R_s . Ως πρόβλημα επιβλεπομένης μάθησης δόθηκε στο TNA η επιθυμητή τιμή εξόδου y του R_s που περιεχόταν στη βάση δεδομένων.

Κανονικοποίηση Δεδομένων

Στην περίπτωση του παρόντος TNA κανονικοποιήθηκαν οι επιθυμητές τιμές εξόδου y του R_s , καθώς οι εξαιρετικά μεγάλες αριθμητικές τιμές (5 – 3,000 scf/stb) που λάμβανε η συγκεκριμένη ιδιότητα δυσχέραιναν τους υπολογισμούς του αλγορίθμου ελαχιστοποίησης του σφάλματος, με αποτέλεσμα η διαδικασία να τερματίζεται μετά πρώτες επαναλήψεις. Η μέθοδος μετασχηματισμού δεδομένων που εφαρμόστηκε ήταν η Κανονικοποίηση Min – Max.

Διαχωρισμός Δεδομένων

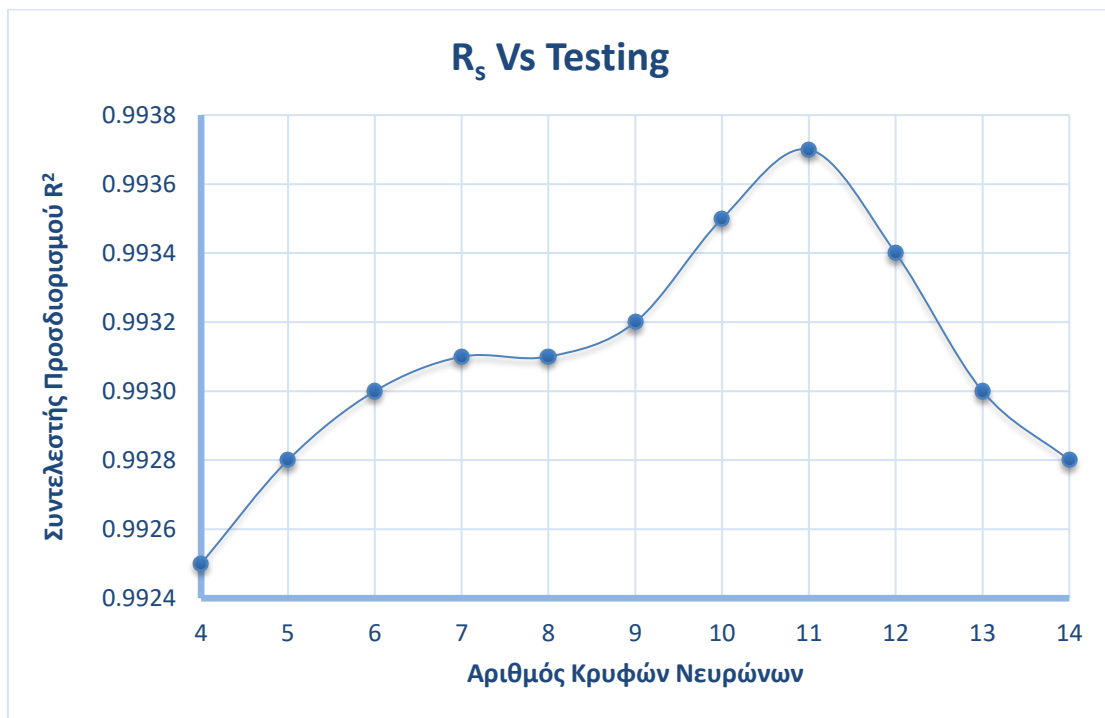
Ύστερα από δόκιμες που βασίστηκαν στην ακρίβεια των προβλέψεων του TNA ορίστηκαν τα ίδια ποσοστά με το TNA εκτίμησης B_o . Η βάση δεδομένων με πλήθος 487 ρευστά χωρίστηκε σε:

- 76,5% των συνολικών ρευστών (επιλέχθηκαν τυχαία 373 ρευστά από τα 487) για την εκπαίδευση (training data) του TNA

- 8,5% των συνολικών ρευστών (επιλέχθηκαν τυχαία 41 ρευστά από τα 487) για την επαλήθευση (validation data) του ΤΝΔ
- 15% των συνολικών ρευστών (επιλέχθηκαν τυχαία 73 ρευστά από τα 487) για τον τελικό έλεγχο ακρίβειας (testing data) του ΤΝΔ

Αριθμός Κρυφών Νευρώνων

Ίδια μεθοδολογία ακολουθήθηκε και στην εύρεση του αριθμού κρυφών νευρώνων που θα απέδιδαν τη μέγιστη δυνατή ακρίβεια στις προβλέψεις των τιμών του R_s . Ύστερα από αρκετές δόκιμες, πάλι βάση του βέλτιστου συντελεστή R^2 μεταξύ των εκτιμώμενων τιμών R_s από το ΤΝΔ και των τιμών R_s των δεδομένων ελέγχου, παρατηρήθηκε πως ο αριθμός των 11 νευρώνων ήταν ο πλέον κατάλληλος. Στο Διάγραμμα 6.6 φαίνεται πως η μέγιστη τιμή που έλαβε ο συντελεστής R^2 επιτυγχάνεται στους 11 κρυφούς νευρώνες.



Διάγραμμα 6.6: Προσδιορισμός αριθμού κρυφών νευρώνων στην περίπτωση του ΤΝΔ για την εκτίμηση του R_s

Με γνώμονα τη βέλτιστη τιμή του συντελεστή R^2 ως προς τα δεδομένα ελέγχου ορίστηκαν και οι υπόλοιπες υπερπαραμέτροι του ΤΝΔ. Οι τιμές των υπερπαραμέτρων που ακολουθούν προέκυψαν ύστερα από πολυάριθμους συνδυασμούς μεταξύ τους

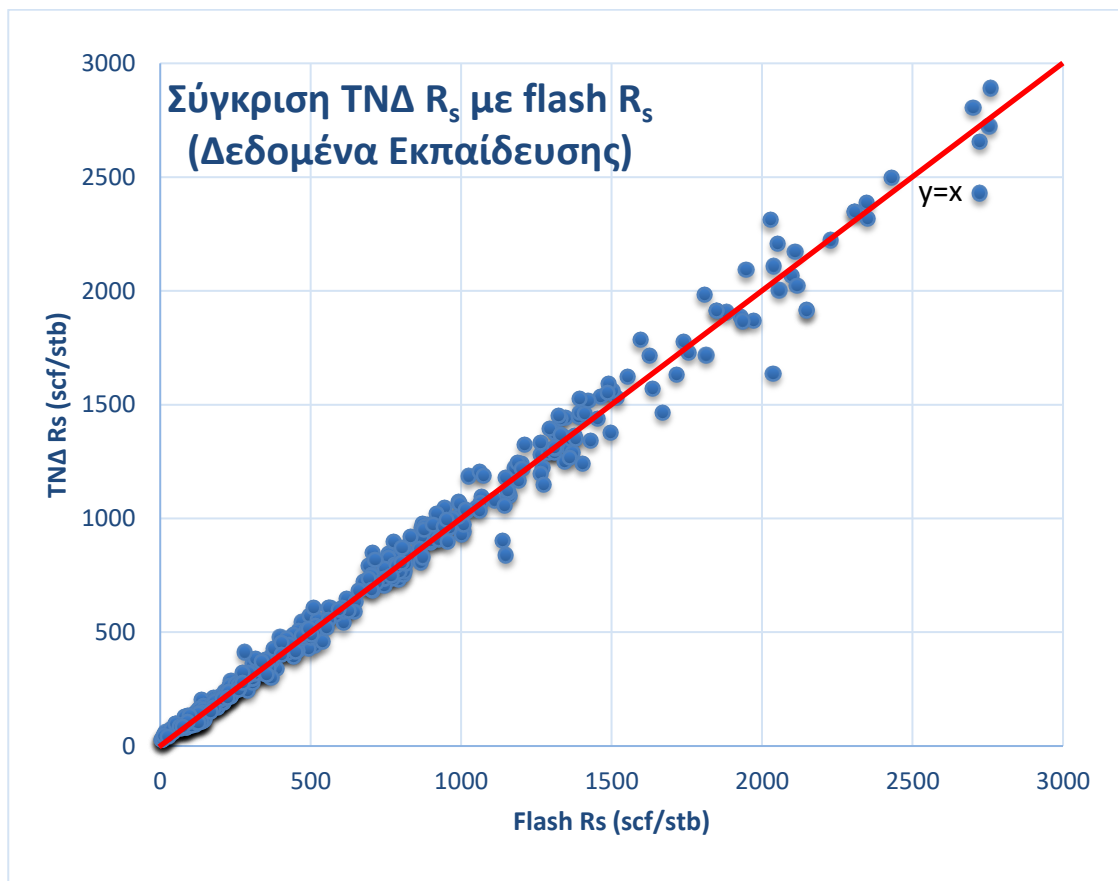
- **Μέγιστος αριθμός των εποχών εκπαίδευσης ΤΝΔ:** Η τιμή αυτής της υπερπαραμέτρου ορίστηκε ίση με 50,000 καθώς σε συνδυασμό με τους 11 κρυφούς νευρώνες το ΤΝΔ απέδιδε τη μέγιστη ακρίβεια στις προβλέψεις του. Παρατηρήθηκε πως πάνω από τις 50,000 η ακρίβεια των εκτιμήσεων ως προς τα δεδομένα ελέγχου μειωνόταν αισθητά σε αντίθεση με την ακρίβεια εκτιμήσεων ως προς τα δεδομένα εκπαίδευσης που παρέμενε σταθερή κάτι που υποδεικνύει πως πάνω από αυτή την τιμή το ΤΝΔ υπερπροσαρμοζόταν.
- **Ρυθμός εκπαίδευσης ΤΝΔ:** Η τιμή αυτής της υπερπαραμέτρου ορίστηκε ίση με 0.01 καθώς σε συνδυασμό με τον σχετικά μεγάλο αριθμό εποχών ήταν αρκετή ώστε ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης του ΤΝΔ να φτάσει στο βέλτιστο δυνατό τοπικό ελάχιστο της συνάρτησης κόστους.
- **Συνάρτηση Κόστους:** Ως συνάρτηση κόστους επιλέχθηκε η συνάρτηση τετραγωνικού σφάλματος που περιγράφηκε στην Εξίσωση 4.5. (squared error cost function)
- **Συνάρτηση Ενεργοποίησης:** Ως συνάρτηση ενεργοποίησης επιλέχθηκε η συνήθης λογιστική σιγμοειδής που περιγράφηκε στην υποενότητα 4.5.3 του Κεφαλαίου 4.
- **Αλγόριθμος Ελαχιστοποίησης:** Χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Κατάβασης Κλίσης με ορμή. Ο συντελεστής ορμής ορίστηκε ίσος με $\gamma=0.9$
- **Παράμετρος τυχειότητας των Αρχικών Τιμών Βαρών:** Η υπερπαραμέτρος αυτή έλαβε πολλαπλές τιμές κατά την διάρκεια των δοκιμών από 0.2 έως 0.6. Με τη συνεχή αλλαγή αυτής της υπερπαραμέτρου επιτυγχάνεται διαφορετική αρχικοποίηση όλων των βαρών του ΤΝΔ για κάθε εκπαίδευση που διενεργείται. Η εκπαίδευση του ΤΝΔ πραγματοποιήθηκε πάνω από είκοσι φορές, με σκοπό την εύρεση του βέλτιστου τοπικού ελάχιστου της συνάρτησης κόστους.

6.3.2. Αξιολόγηση ΤΝΔ εκτίμησης R_s

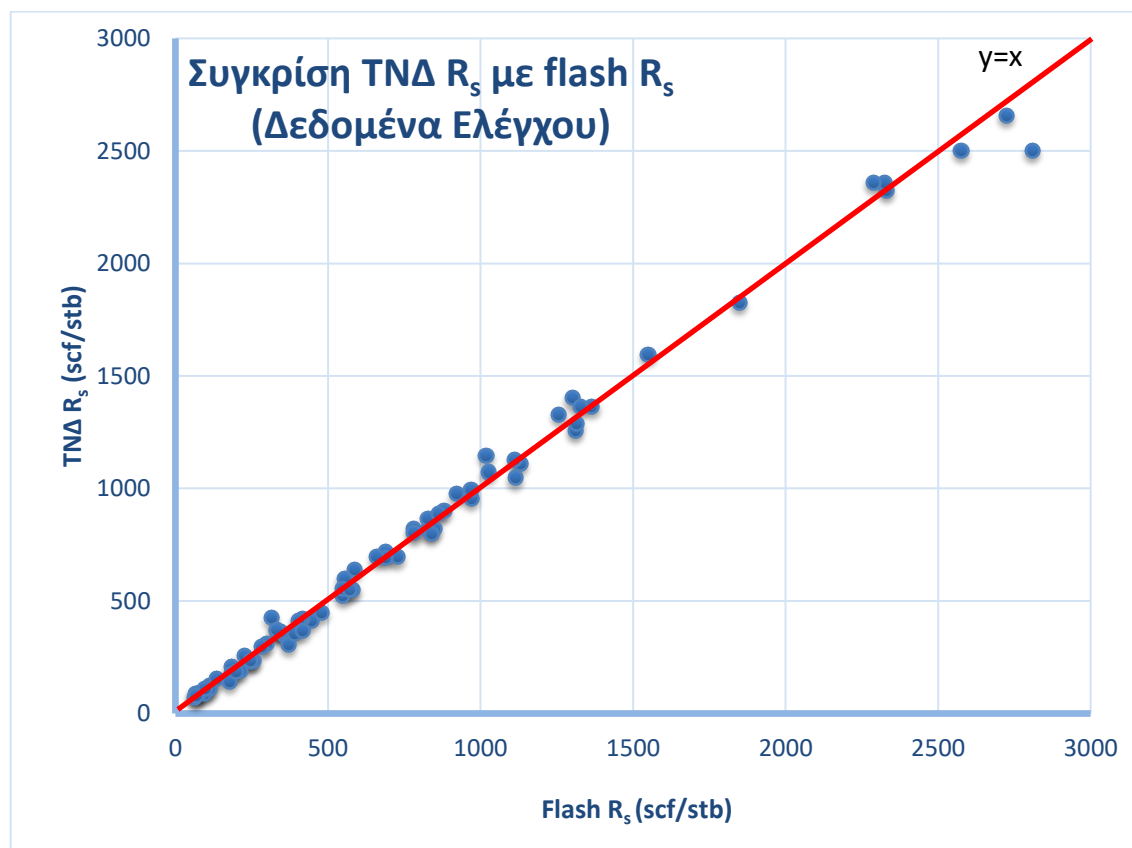
Στη συνέχεια ακολούθησε η αξιολόγηση του μοντέλου εκτίμησης R_s από την εκπαίδευση του ΤΝΔ. Ελέγχθηκαν οι επιδόσεις των προβλέψεων R_s τόσο ως προς τα δεδομένα εκπαίδευσης όσο και προς τα δεδομένα ελέγχου. Στον Πίνακα 6.3 αναγράφονται τα αποτελέσματα της επίδοσης του μοντέλου ενώ στα Διαγράμματα 6.7 και 6.8 απεικονίζεται η σύγκριση των εκτιμώμενων τιμών R_s από το μοντέλο με τις τιμές R_s των δεδομένων εκπαίδευσης και ελέγχου αντίστοιχα που περιείχε η βάση δεδομένων.

	Δεδομένα Εκπαίδευσης	Δεδομένα ελέγχου
Πλήθος	414	73
Μέσο Σφάλμα (scf/stb)	8.57	1.11
Μέσο Απόλυτο Σφάλμα (scf/stb)	40.45	34.64
Μέσο Σχετικό Σφάλμα	10.59 %	1.58 %
Μέσο Σχετικό Απόλυτο Σφάλμα	15.11 %	6.66 %
Συντελεστής R^2	0.9901	0.9937

Πίνακας 6.3: Επίδοση του μοντέλου εκτίμησης R_s του ΤΝΔ ως προς τα δεδομένα εκπαίδευσης και ελέγχου. Σημειώνεται πως στα δεδομένα εκπαίδευσης περιλαμβάνονται τα δεδομένα επαλήθευσης.



Διάγραμμα 6.7: Σύγκριση ΤΝΔ R_s με flash R_s (Δεδομένα Εκπαίδευσης)



Διάγραμμα 6.8: Σύγκριση TNΔ R_s με flash R_s (Δεδομένα Ελέγχου)

Αναλύοντας τα στατιστικά στοιχεία του Πίνακα 6.3 δίνεται η εντύπωση πως οι προβλέψεις του μοντέλου πάσχουν σημαντικά ως προς την ακρίβειά τους. Ειδικά η τιμή του μέσου σχετικού απόλυτου σφάλματος ως προς τα δεδομένα εκπαίδευσης έχει εκτοξευτεί, αν συγκριθεί με την αντίστοιχη του μοντέλου εκτίμησης B_o . Όμως μια πιο προσεκτική ματιά στις διαφορές των τάξεων μεγέθους της ιδιότητας αυτή μπορεί να εξηγήσει αυτή τη τεράστια αύξηση. Η βάση δεδομένων περιείχε ρευστά με R_s που κυμαινόταν από 5 έως και 3,000 scf/stb. Ένα σφάλμα της τάξης ακόμα και των 500 scf/stb αν αναφέρεται σε τιμές R_s κοντά στα 3,000 θα αποδώσει τιμές σχετικού απόλυτου σφάλματος περίπου 16%. Αντίστοιχα ένα σφάλμα της τάξης των 5 scf/stb αν αναφέρεται σε τιμές κοντά στα 5 scf/stb θα αποδώσει τιμές σχετικού απόλυτου σφάλματος κοντά στο 100%. Εύκολα προκύπτει το συμπέρασμα πως στην δεύτερη περίπτωση η εκτίμηση του μοντέλου είχε πολύ μεγαλύτερη ακρίβεια παρ' όλο το τεράστιο σχετικό απόλυτο σφάλμα, αφού ουσιαστικά κατάφερε να προβλέψει πως στην επιφάνεια η ποσότητα του αερίου που εκλύθηκε από το πετρέλαιο θα είναι σχεδόν μηδαμινή. Συνεπώς, ο Μηχανικός στον οποίο

θα δοθεί εκτίμηση του R_s λανθασμένη κατά μόνο 5 scf/stb θα πρέπει αν είναι απόλυτα ικανοποιημένος, αν αναλογιστεί τις τάξεις μεγέθους που μπορεί να λάβει αυτή η πετρελαϊκή ιδιότητα. Επομένως, συμπεραίνεται πως οι εκτιμήσεις που προέκυψαν από το μοντέλο του ΤΝΔ βρίσκονται σε πολύ καλή συμφωνία με τις τιμές R_s των ρευστών της βάσης δεδομένων μια διαπίστωση που ενισχύεται και από το πόσο κοντά στη διαγώνιο βρίσκεται η πλειονότητα των σημείων, τόσο στο Διάγραμμα 6.7 όσο και στο Διάγραμμα 6.8.

Επίσης, αυτό που προκαλεί εντύπωση είναι το ότι το μοντέλο ανταπεξήλθε καλύτερα όταν συγκρίθηκε με τα δεδομένα ελέγχου από ότι με τα δεδομένα εκπαίδευσης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το μικρό πλήθος ρευστών των δεδομένων ελέγχου συνέβαλε θετικά στον περιορισμό του σφάλματος για τους λόγους που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο.

Σε γενικές γραμμές το μοντέλο εκτίμησης R_s που υλοποιήθηκε από το ΤΝΔ ανταποκρίθηκε με μεγάλη ακρίβεια στο σύνολο της βάσης δεδομένων, με την ακρίβεια να μειώνεται όσο αυξάνεται η πτητικότητα του ρευστού.

6.3.3. ΤΝΔ για R_s κάτω από 1,500 scf/stb

Όμοια με την περίπτωση του B_o , ανατρέχοντας στο διάγραμμα 5.8 του Κεφαλαίου 5 του ιστογράμματος συχνοτήτων του R_s , παρατηρείται μόνο μικρό πλήθος ρευστών πάνω από 1,500 scf/stb. Αυτό γίνεται πιο εύκολα αντιληπτό και από τη χαρακτηριστική αραιώση πάνω από τα 1,500 scf/stb του Διαγράμματος 6.7. Για το λόγο αυτό αποφασίστηκε και στη περίπτωση του R_s , η υλοποίηση ενός ακόμα ΤΝΔ όπου το μοντέλου εκτίμησης R_s θα προβλέπει τιμές μέχρι 1,500 scf/stb. Το συνολικό πλήθος ρευστών της βάσης δεδομένων μειώθηκε από 487 σε 437 ρευστά.

Υπερπαράμετροι

Οι υπερπαράμετροι του ΤΝΔ ορίστηκαν με τον ίδιο τρόπο όπως του ΤΝΔ της υποενότητας 6.3.1. και έλαβαν τις εξής τιμές:

- **Αριθμός κρυφών νευρώνων:** 11
- **Αριθμός εποχών:** 25,000
- **Ρυθμός εκπαίδευσης:** 0.01
- **Συντελεστής ορμής γ :** 0.80

Παράλληλα με τον ορισμό των υπερπαραμέτρων έπρεπε να οριστεί εκ νέου το ποσοστό των δεδομένων εκπαίδευσης, επαλήθευσης και ελέγχου. Πάλι βάση δοκιμών τα ποσοστά αυτά ορίστηκαν σε:

- **Δεδομένα εκπαίδευσης:** 81% (354 ρευστά)
- **Δεδομένα επαλήθευσης:** 9% (39 ρευστά)
- **Δεδομένα ελέγχου:** 10% (44 ρευστά)

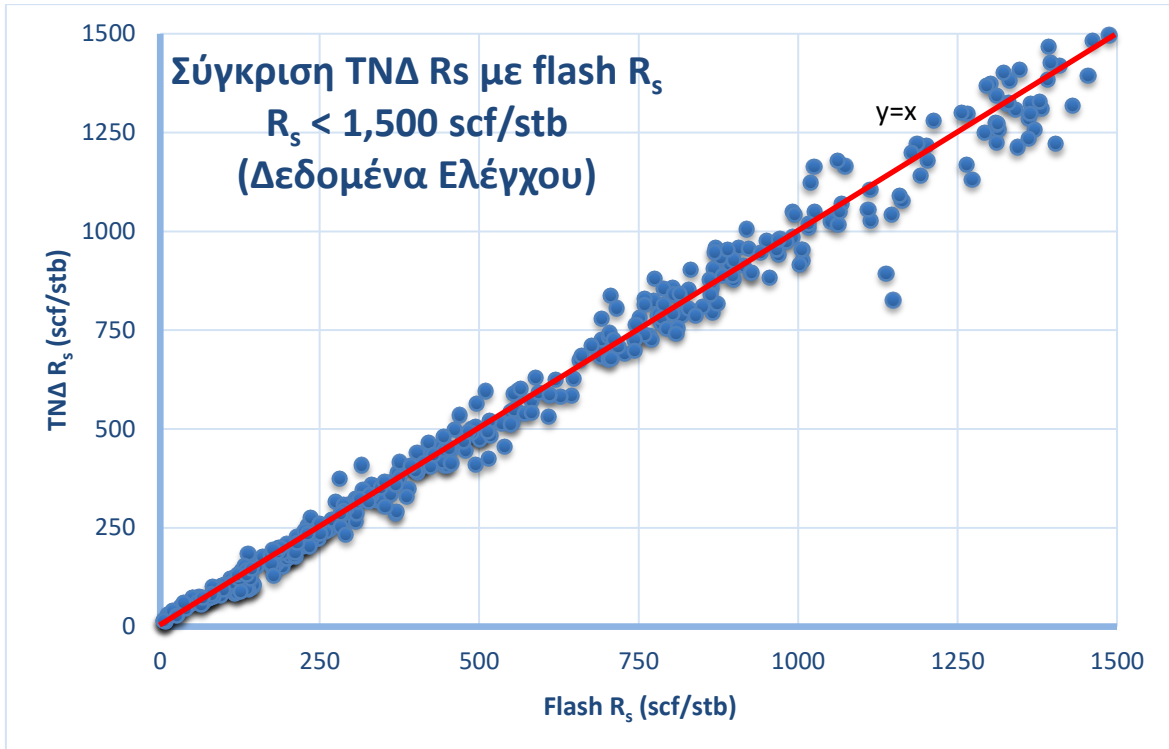
καθώς παρατηρήθηκε πως η μείωση του πλήθους των δεδομένων εκπαίδευσης δυσχέραινε τη διαδικασία της εκπαίδευσης του ΤΝΔ αφού επηρέαζε την ακρίβεια των προβλέψεων του.

Αξιολόγηση μοντέλου

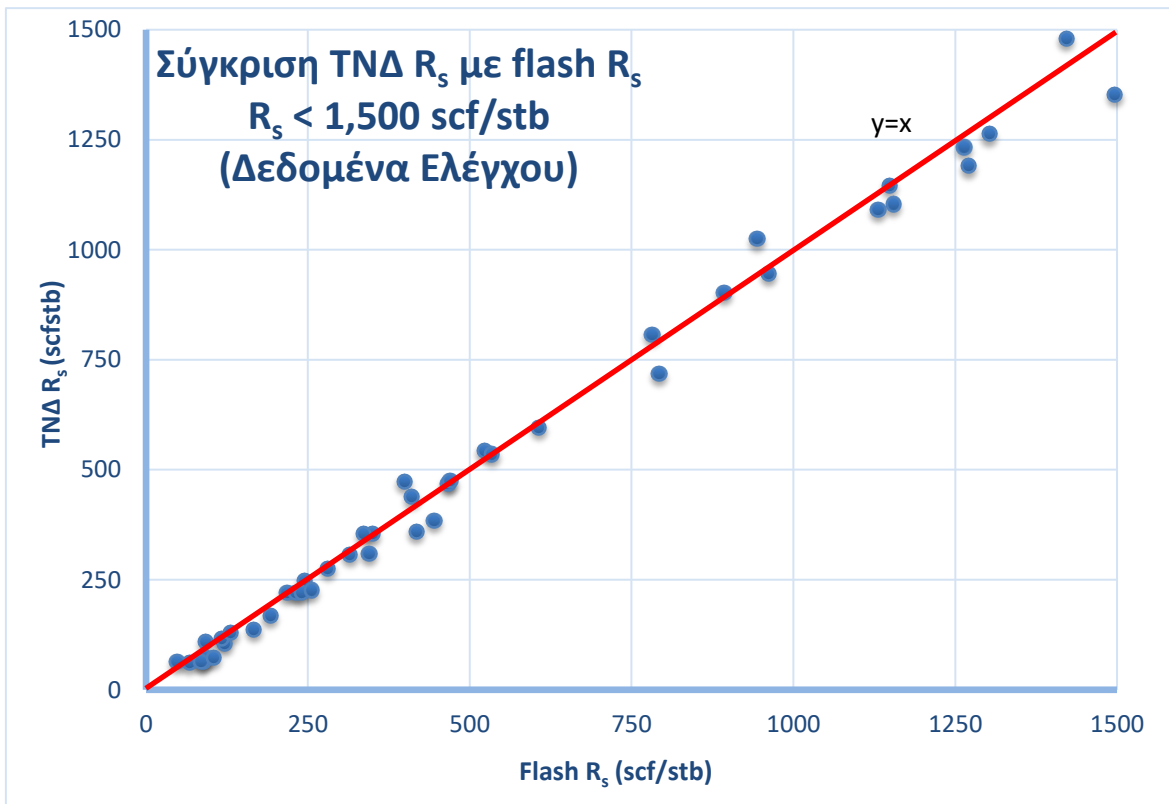
Οι επιδόσεις του μοντέλου εκτίμησης R_s κάτω από 1,500 scf/stb ήταν πιο ακριβείς ως προς τα δεδομένα εκπαίδευσης ενώ όταν συγκρίθηκε με τα δεδομένα ελέγχου, η ακρίβεια μειώθηκε ελάχιστα. Στον Πίνακα 6.4 παρατίθενται τα αποτελέσματα της επίδοσης του μοντέλου, ενώ στα Διαγράμματα 6.9 και 6.10 απεικονίζεται η σύγκριση των τιμών R_s που εκτίμησε το μοντέλο ως προς τα δεδομένα εκπαίδευσης και ελέγχου αντίστοιχα.

	Δεδομένα Εκπαίδευσης	Δεδομένα ελέγχου
Πλήθος	393	73
Μέσο Σφάλμα (scf/stb)	-5.25	-12
Μέσο Απόλυτο Σφάλμα (scf/stb)	30.95	28
Μέσο Σχετικό Σφάλμα	1.69 %	-3.65 %
Μέσο Σχετικό Απόλυτο Σφάλμα	9.83 %	8.41 %
Συντελεστής R^2	0.9901	0.9937

Πίνακας 6.4: Επίδοση του μοντέλου εκτίμησης R_s κάτω από 1,500 scf/stb του ΤΝΔ ως προς τα δεδομένα εκπαίδευσης και ελέγχου. Σημειώνεται πως στα δεδομένα εκπαίδευσης περιλαμβάνονται τα δεδομένα επαλήθευσης.



Διάγραμμα 6.9: Σύγκριση TNΔ R_s με flash R_s ($R_s < 1,500$ scf/stb) (Δεδομένα Εκπαίδευσης)



Διάγραμμα 6.10: Σύγκριση TNΔ R_s με flash R_s ($R_s < 1,500$ scf/stb) (Δεδομένα Ελέγχου)

Έχει παρατηρηθεί πως η συντριπτική πλειονότητα των κοιτασμάτων πετρελαίου περιέχουν ρευστά με R_s μικρότερο από 1,500 scf/stb. Από αυτά τα ρευστά, τα περισσότερα έχουν B_o κάτω από 2 rb/stb κάτι που επιβεβαιώνεται και από την παρούσα εργασία καθώς σχεδόν όλα τα ρευστά με R_s μεγαλύτερο από 1,500 scf/stb που εξαιρέθηκαν για την υλοποίηση του παρόντος ΤΝΔ είχαν τιμές B_o πάνω από 2rb/stb. Συνεπώς, ύστερα από την εμπειριστατωμένη παρατήρηση των αποτελεσμάτων των δύο ΤΝΔ (του καθολικού και του μοντέλου εκτίμησης R_s κάτω από 1,500scf/stb), προτείνεται η χρήση, αρχικά του καθολικού. Αν οι προβλέψεις του υποδείξουν ότι πρόκειται για κοίτασμα με ρευστό διαλυτότητας κάτω από 1,500 scf/stb, τότε είναι καλύτερο να χρησιμοποιηθεί το μοντέλο εκτίμησης R_s κάτω από 1,500scf/stb, σε συνδυασμό με το αντίστοιχο μοντέλο για το B_o , ώστε να προσδοθεί μεγαλύτερη ακρίβεια στις εκτιμήσεις. Διαφορετικά, διατηρείται η χρήση του καθολικού ΤΝΔ.

6.4. Εκτίμηση p_b

6.4.1. Εκπαίδευση ΤΝΔ

Τιμές εισόδου x και τιμές εξόδου y του ΤΝΔ

- **Είσοδοι ΤΝΔ:** Η εκτίμηση του p_b ενός ρευστού απαιτεί γνώση της θερμοκρασίας του ταμιευτήρα, πέρα από γνώση της σύστασης του. Συνεπώς, ως είσοδοι x_i του ΤΝΔ ορίστηκαν τα συστατικά $C_1, C_2, C_{3-5}, C_{6+}$ και η θερμοκρασία T_{res} . Το CO_2 δεν συμπεριλήφθηκε γιατί όπως αναφέρθηκε και στις προηγούμενες δυο ενότητες, το ΤΝΔ έχει έμμεσα γνώση για το ποσοστό του συστατικού αυτού.
- **Έξοδος ΤΝΔ:** Ως μοναδική έξοδος \hat{y} του ΤΝΔ ορίστηκε η εκτίμηση της τιμής του p_b . Ως πρόβλημα επιβλεπομένης μάθησης δόθηκε στο ΤΝΔ η επιθυμητή τιμή εξόδου y του p_b που περιεχόταν στη βάση δεδομένων.

Κανονικοποίηση Δεδομένων

Οι τιμές που κανονικοποιήθηκαν για την διευκόλυνση της εκπαίδευσης του ΤΝΔ για την εκτίμηση του p_b ήταν οι τιμές εξόδου του p_b και η θερμοκρασία T_{res} , λόγω των μεγάλων αριθμητικών τιμών που λάμβαναν οι συγκεκριμένες ιδιότητες. Η μέθοδος μετασχηματισμού δεδομένων που εφαρμόστηκε ήταν η Κανονικοποίηση Min – Max.

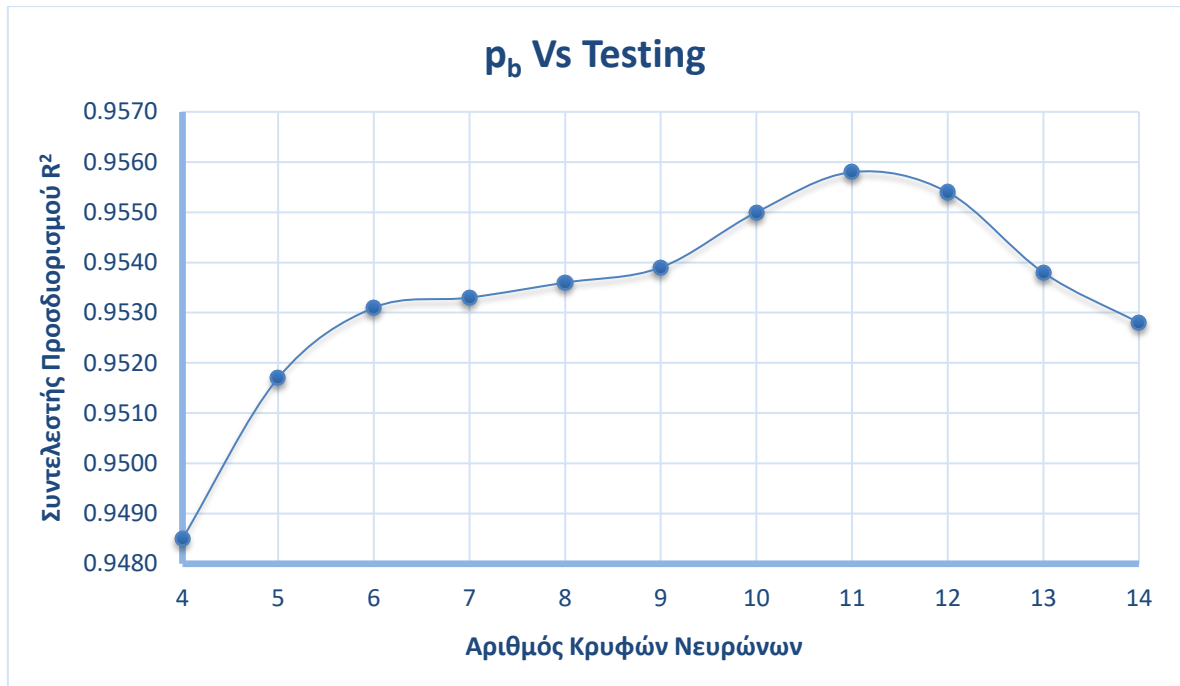
Διαχωρισμός Δεδομένων

Ύστερα από πολυάριθμες δόκιμες που βασίστηκαν στην ακρίβεια των προβλέψεων του ΤΝΔ ορίστηκαν τα ίδια ποσοστά με το ΤΝΔ εκτίμησης των προηγούμενων δυο ιδιοτήτων. Η βάση δεδομένων με πλήθος 487 ρευστά χωρίστηκε σε:

- 76,5% των συνολικών ρευστών (επιλέχθηκαν τυχαία 373 ρευστά από τα 487) για την εκπαίδευση (training data) του ΤΝΔ
- 8,5% των συνολικών ρευστών (επιλέχθηκαν τυχαία 41 ρευστά από τα 487) για την επαλήθευση (validation data) του ΤΝΔ
- 15% των συνολικών ρευστών (επιλέχθηκαν τυχαία 73 ρευστά από τα 487) για τον τελικό έλεγχο ακρίβειας (testing data) του ΤΝΔ

Αριθμός Κρυφών Νευρώνων

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την εύρεση του αριθμού κρυφών νευρώνων που θα απέδιδαν τη μέγιστη δυνατή ακρίβεια στις προβλέψεις του p_b ήταν ίδια με των ΤΝΔ των προηγούμενων δυο ιδιοτήτων. Πραγματοποιήθηκαν πολυάριθμες δόκιμες και προέκυψε πως το ΤΝΔ με 11 κρυφούς νευρώνες εκτιμούσε με βέλτιστη ακρίβεια, βάση του συντελεστή προσδιορισμού R^2 , την τιμή p_b των δεδομένων ελέγχου. Στο Διάγραμμα 6.11 συγκρίνονται οι επιδόσεις που κατάφερε το ΤΝΔ ανάλογα με τον αριθμό των κρυφών νευρώνων.



Διάγραμμα 6.11: Προσδιορισμός αριθμού κρυφών νευρώνων στην περίπτωση του ΤΝΔ για την εκτίμηση του ρ_b

Βάσει της βέλτιστης τιμής του συντελεστή R^2 ως προς τα δεδομένα ελέγχου ορίστηκαν και οι υπόλοιπες υπερπαραμέτροι του ΤΝΔ. Η τιμές των υπερπαραμέτρων που ακολουθούν προέκυψαν ύστερα από πολυάριθμους συνδυασμούς μεταξύ τους

- **Μέγιστος αριθμός των εποχών εκπαίδευσης ΤΝΔ:** Στην περίπτωση του ΤΝΔ εκτίμησης ρ_b η τιμή των εποχών εκπαίδευσης ορίστηκε ίση με 100,000 καθώς σε συνδυασμό με του κρυφούς νευρώνες το ΤΝΔ απέδιδε τη βέλτιστη δυνατή ακρίβεια στις προβλέψεις του.
- **Ρυθμός εκπαίδευσης ΤΝΔ:** Η τιμή αυτής της υπερπαραμέτρου ορίστηκε ίση με 0.01 καθώς σε συνδυασμό με τον σχετικά μεγάλο αριθμό εποχών ήταν αρκετή, ώστε ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης του ΤΝΔ να φτάσει στο βέλτιστο δυνατό τοπικό ελάχιστο της συνάρτησης κόστους.
- **Συνάρτηση Ενεργοποίησης:** Ως συνάρτηση ενεργοποίησης επιλέχθηκε η συνήθης λογιστική σιγμοειδής που περιγράφηκε στην υποενότητα 4.5.3 του Κεφαλαίου 4.
- **Συνάρτηση Κόστους:** Ως συνάρτηση κόστους επιλέχθηκε η συνάρτηση τετραγωνικού σφάλματος που περιγράφηκε στην Εξίσωση 4.5. (squared error cost function)

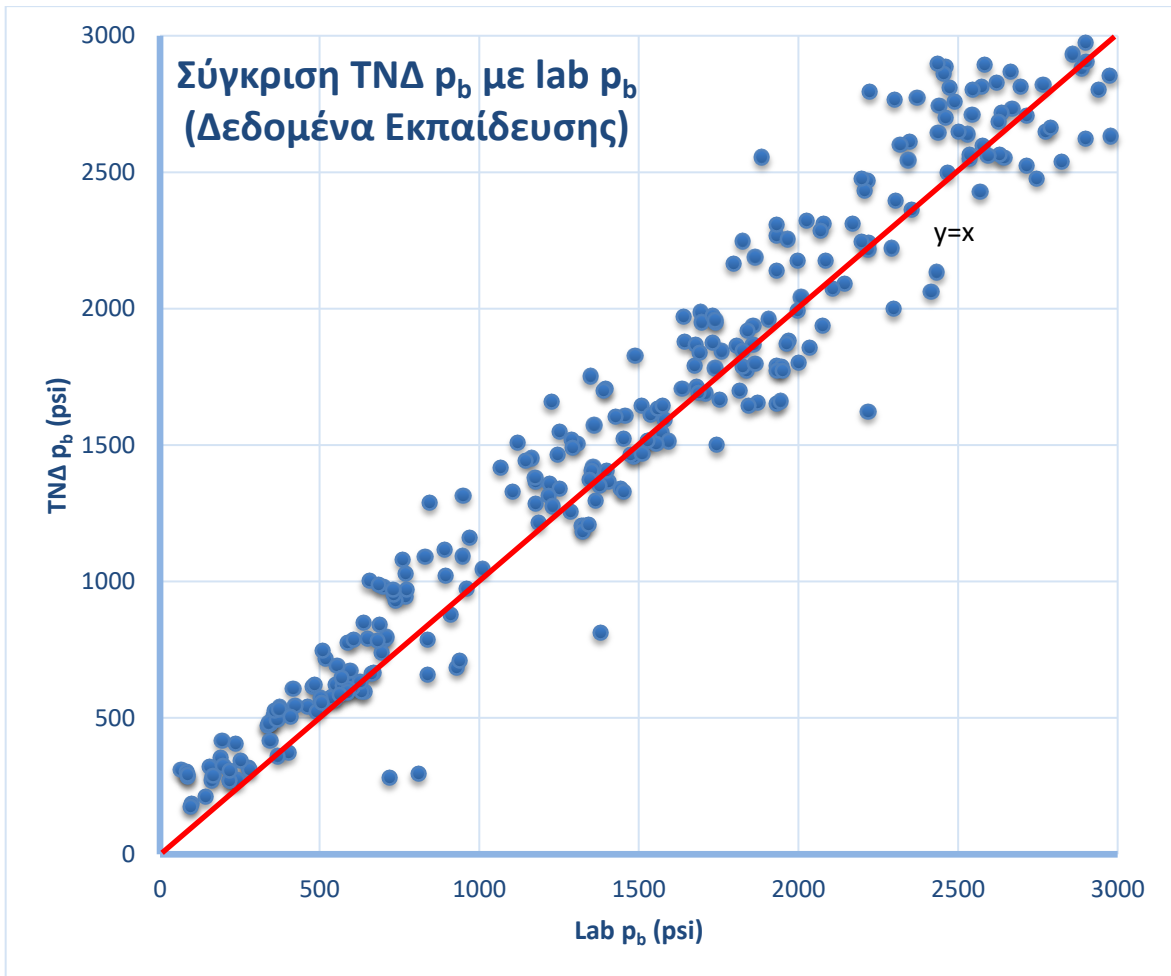
- **Αλγόριθμος Ελαχιστοποίησης:** Χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Κατάβασης Κλίσης με ορμή. Ο συντελεστής ορμής ορίστηκε ίσος με $\gamma=0.85$
- **Παράμετρος τυχαιότητας των Αρχικών Τιμών Βαρών:** Η υπερπαραμέτρος αυτή έλαβε πολλαπλές τιμές κατά την διάρκεια των δοκιμών από 0.2 έως 0.6. Με τη συνεχή αλλαγή αυτής της υπερπαραμέτρου επιτυγχάνεται διαφορετική αρχικοποίηση όλων των βαρών του ΤΝΔ για κάθε εκπαίδευση που διενεργείται. Η εκπαίδευση του ΤΝΔ πραγματοποιήθηκε πάνω από είκοσι φορές, με σκοπό την εύρεση του βέλτιστου τοπικού ελάχιστου της συνάρτησης κόστους.

6.4.2. Αξιολόγηση ΤΝΔ εκτίμησης p_b

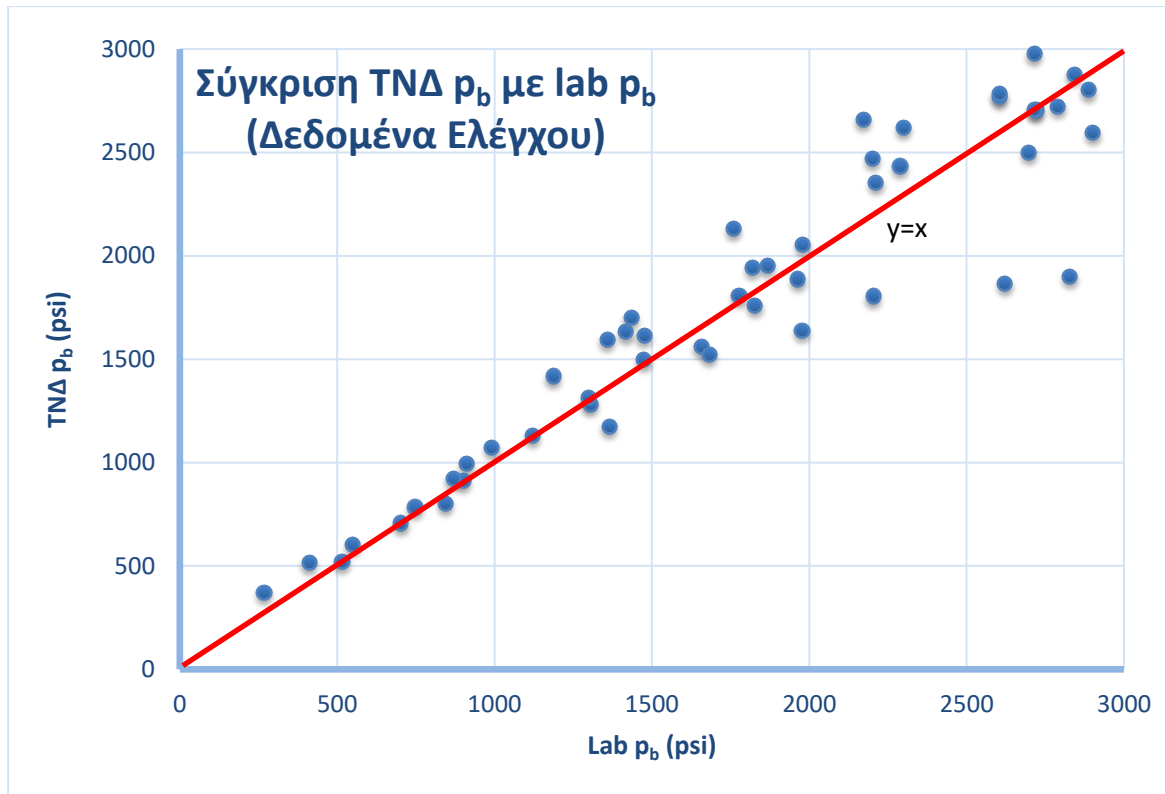
Στην συνέχεια αξιολογήθηκαν τα αποτελέσματα του μοντέλου ως προς τα δεδομένα εκπαίδευσης και ελέγχου. Στον Πίνακα 6.5 παρατίθενται τα αποτελέσματα της επίδοσης του μοντέλου ενώ στα Διαγράμματα 6.12 και 6.13 παρουσιάζεται η σύγκριση των εκτιμώμενων τιμών p_b με τις τιμές p_b των δεδομένων εκπαίδευσης και ελέγχου αντίστοιχα.

	Δεδομένα Εκπαίδευσης	Δεδομένα ελέγχου
Πλήθος	414	73
Μέσο Σφάλμα (psi)	71	16
Μέσο Απόλυτο Σφάλμα (psi)	181	179
Μέσο Σχετικό Σφάλμα	10.47 %	2.22%
Μέσο Σχετικό Απόλυτο Σφάλμα	15.39 %	8.36 %
Συντελεστής R^2	0.9709	0.9558

Πίνακας 6.5: Επίδοση του μοντέλου εκτίμησης p_b του ΤΝΔ ως προς τα δεδομένα εκπαίδευσης και ελέγχου. Σημειώνεται πως στα δεδομένα εκπαίδευσης περιλαμβάνονται τα δεδομένα επαλήθευσης.



Διάγραμμα 6.12: Σύγκριση TNΔ p_b με lab p_b (Δεδομένα Εκπαίδευσης)



Διάγραμμα 6.13: Σύγκριση TNΔ p_b με lab p_b (Δεδομένα Ελέγχου)

Αναλύοντας τα στατιστικά του Πίνακα 6.4 δίνεται η εντύπωση, όπως στην περίπτωση του R_s , ότι οι προβλέψεις του μοντέλου είναι σημαντικά ανακριβείς. Αυτό συμβαίνει γιατί, όπως και στην περίπτωση του R_s , η βάση δεδομένων περιέχει ρευστά με p_b που κυμαίνονται από 67 έως και 7,303 psi, δηλαδή σε ένα τεράστιο εύρος τιμών. Συνεπώς στα χαμηλά p_b , τα σχετικά μικρά σφάλματα (π.χ. της τάξης των 100 psi) μετατρέπονται σε ακραία σχετικά σφάλματα. Ένας ακόμη λόγος που δικαιολογεί τα μεγαλύτερα σφάλματα σε αυτή την ιδιότητα είναι πως πρόκειται για μια από τις πιο δύσκολες ως προς την πρόβλεψη των τιμών της.

Σε γενικές γραμμές οι εκτιμήσεις του μοντέλου βρέθηκαν σε καλή συμφωνία με το σύνολο της βάσης δεδομένων με την ακρίβεια να ελαττώνεται στα πολύ χαμηλά και πολύ υψηλό p_b .

6.5. Εκτιμήσεις B_o , R_s , p_b από συσχετίσεις

Σε συνέχεια της εκπαίδευσης των παραπάνω TNΔ, τα αποτελέσματα που προέκυψαν συγκρίθηκαν με την εναλλακτική μέθοδο εκτίμησης των τιμών των τριών πετρελαϊκών ιδιοτήτων και για το λόγο αυτό υλοποιήθηκαν οι συσχετίσεις (correlations) του Μοντέλου Μαύρου Πετρελαίου. Υπενθυμίζεται πως το ΜΜΠ δεν απαιτεί γνώση της σύστασης του

ρευστού, αφού όλες οι εκτιμήσεις προκύπτουν βάση των δεδομένων πεδίου, τα όποια είναι εύκολο μετρηθούν ή να συλλεχθούν στην επιφάνεια. Πρόκειται για την ειδική πυκνότητα αέριου τανκ γ_g , την πυκνότητα του σταθεροποιημένου (τανκ) πετρελαίου API, τη διαλυτότητα του αέριου R_s και τη θερμοκρασία και πίεση του ταμιευτήρα T_{res} και p . Οι συσχετίσεις χρησιμοποιούν αυτές τις ιδιότητες ως δεδομένα για να εκτιμήσουν τις υπόλοιπες ογκομετρικές ιδιότητες. Για τις ανάγκες της εργασίας υλοποιήθηκαν οι συσχετίσεις των πιο συχνά χρησιμοποιούμενων τριών συγγραφέων (Standing, Glaso, Al Marhoun) για την εκτίμηση των ιδιοτήτων B_o και R_s και δυο ακόμη για την εκτίμηση του p_b (Standing, Al Marhoun).

6.5.1. Εκτιμήσεις B_o

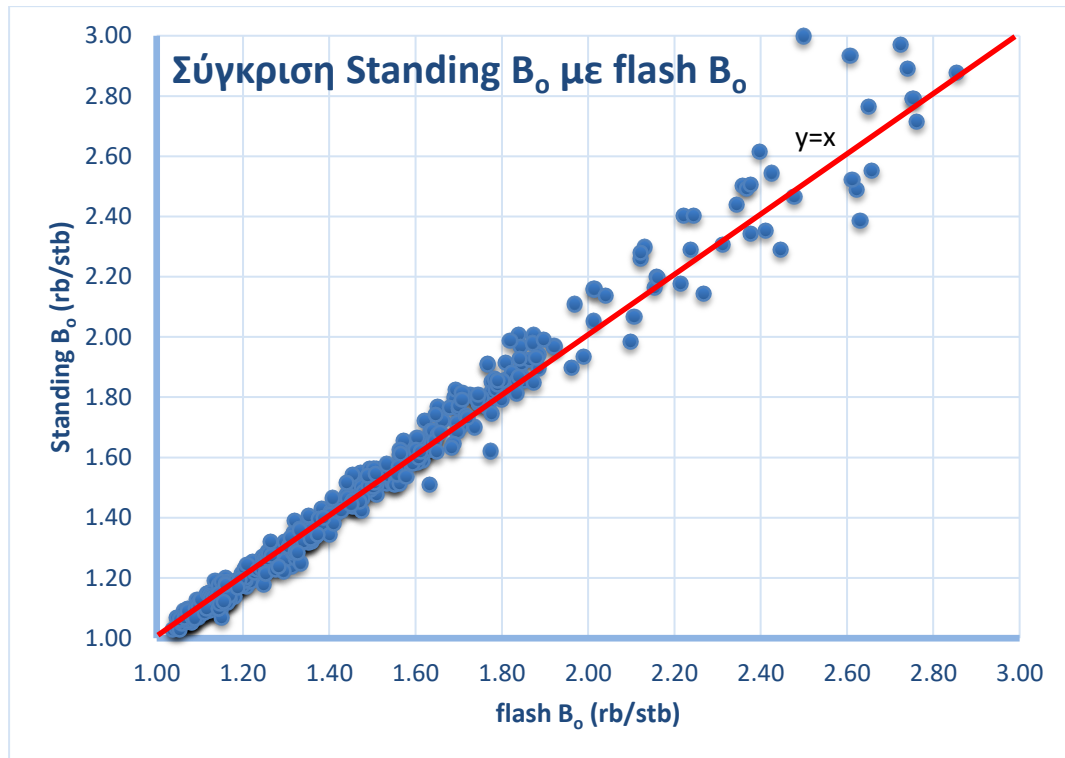
Τα αποτελέσματα των εκτιμήσεων των τιμών B_o , όπως και στην περίπτωση των ΤΝΔ συγκρίθηκαν με τις αντίστοιχες τιμές flash B_o που περιείχε η βάση δεδομένων.

Αποτελέσματα από τη συσχέτιση του Standing

Στον Πίνακα 6.6 παρατίθενται τα αποτελέσματα των επιδόσεων της συσχέτισης του Standing ενώ στο Διάγραμμα 6.14 παρουσιάζεται η σύγκριση των εκτιμώμενων από τη συσχέτιση του Standing τιμών B_o με τις τιμές flash B_o της βάσης δεδομένων.

	Συσχέτιση Standing
Πλήθος	487
Μέσο Σφάλμα (rb/stb)	0.013
Μέσο Απόλυτο Σφάλμα (rb/stb)	0.036
Μέσο Σχετικό Σφάλμα	0.64 %
Μέσο Σχετικό Απόλυτο Σφάλμα	2.21 %
Συντελεστής R^2	0.9828

Πίνακας 6.6: Επίδοση της συσχέτισης Standing για το B_o ως προς το flash B_o της βάσης δεδομένων



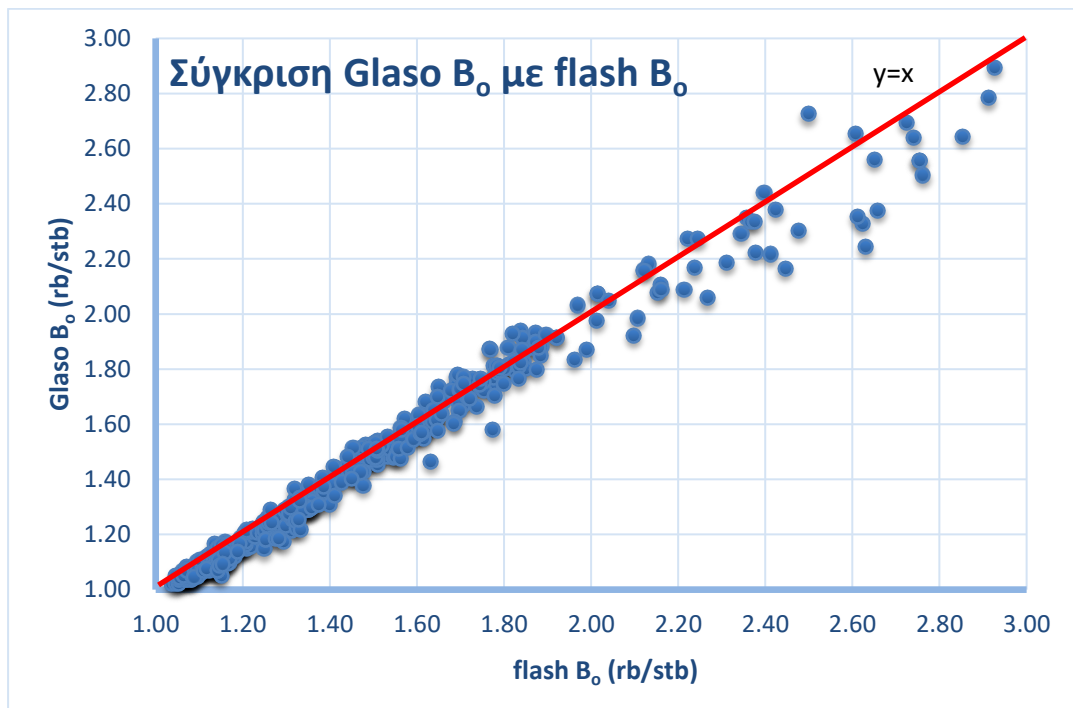
Διάγραμμα 6.14: Σύγκριση Standing B_0 με flash B_0 .

Αναλύοντας το μέσο σφάλμα και μέσο απόλυτο σφάλμα προκύπτει πως η συσχέτιση του Standing για το B_0 δεν δείχνει καμία τάση για την υπερέκτιμηση ή την υποεκτίμηση της τιμής του. Παρατηρώντας όμως το Διάγραμμα 6.14 φαίνεται πως η συσχέτιση έχει μια τάση να υπερεκτίμα την τιμή B_0 στα πιο πτητικά ρευστά. Σε γενικές γραμμές, η αρκετά χαμηλή τιμή του μέσου απόλυτου σφάλματος υποδεικνύει ότι η συσχέτιση του Standing για την εκτίμηση της τιμής του B_0 ανταποκρίθηκε με μεγάλη ακρίβεια, με την ακρίβεια αυτή να φθίνει όσο αυξάνουν οι τιμές του B_0 , όπως φαίνεται και από την αύξηση της διασποράς των σημείων από την διαγώνιο του Διαγράμματος.

Αποτελέσματα από τη συσχέτιση του Glaso

Στον Πίνακα 6.7 αναγράφονται τα αποτελέσματα των επιδόσεων της συσχέτισης του Glaso ενώ στο Διάγραμμα 6.15 απεικονίζεται η σύγκριση των εκτιμώμενων από τη συσχέτιση του Glaso τιμών B_0 με τις τιμές flash B_0 της βάσης δεδομένων.

	Συσχέτιση Glaso
Πλήθος	487
Μέσο Σφάλμα (rb/stb)	-0.028
Μέσο Απόλυτο Σφάλμα (rb/stb)	0.042
Μέσο Σχετικό Σφάλμα	-1.93 %
Μέσο Σχετικό Απόλυτο Σφάλμα	2.70 %
Συντελεστής R^2	0.9799

Πίνακας 6.7: Επίδοση της συσχέτισης Glaso για το B_o ως προς το flash B_o της βάσης δεδομένωνΔιάγραμμα 6.15: Σύγκριση Glaso B_o με flash B_o

Οι μικρές τιμές του μέσου σφάλματος και μέσου απόλυτου σφάλματος δίνουν την εικόνα πως σε γενικές γραμμές η συσχέτιση δεν έχει καμία τάση υπερεκτίμησης ή υποεκτίμησης. Όμως παρατηρώντας το Διάγραμμα 6.13 φαίνεται ότι όταν πρόκειται για πρόβλεψη τιμής B_o στα πιο πτητικά ρευστά, υπάρχει μια τάση υποεκτίμηση της τιμής του B_o σε σχέση με την πειραματική. Γενικά, η συσχέτιση ανταποκρίθηκε με καλή ακρίβεια στις προβλέψεις τις τιμής του B_o , κάτι που επαληθεύεται και από τη σχετικά χαμηλή τιμή του μέσου απόλυτου σχετικού σφάλματος, με εξαίρεση, όπως και στη συσχέτιση του Standing, τα υψηλής πτητικότητας ρευστά.

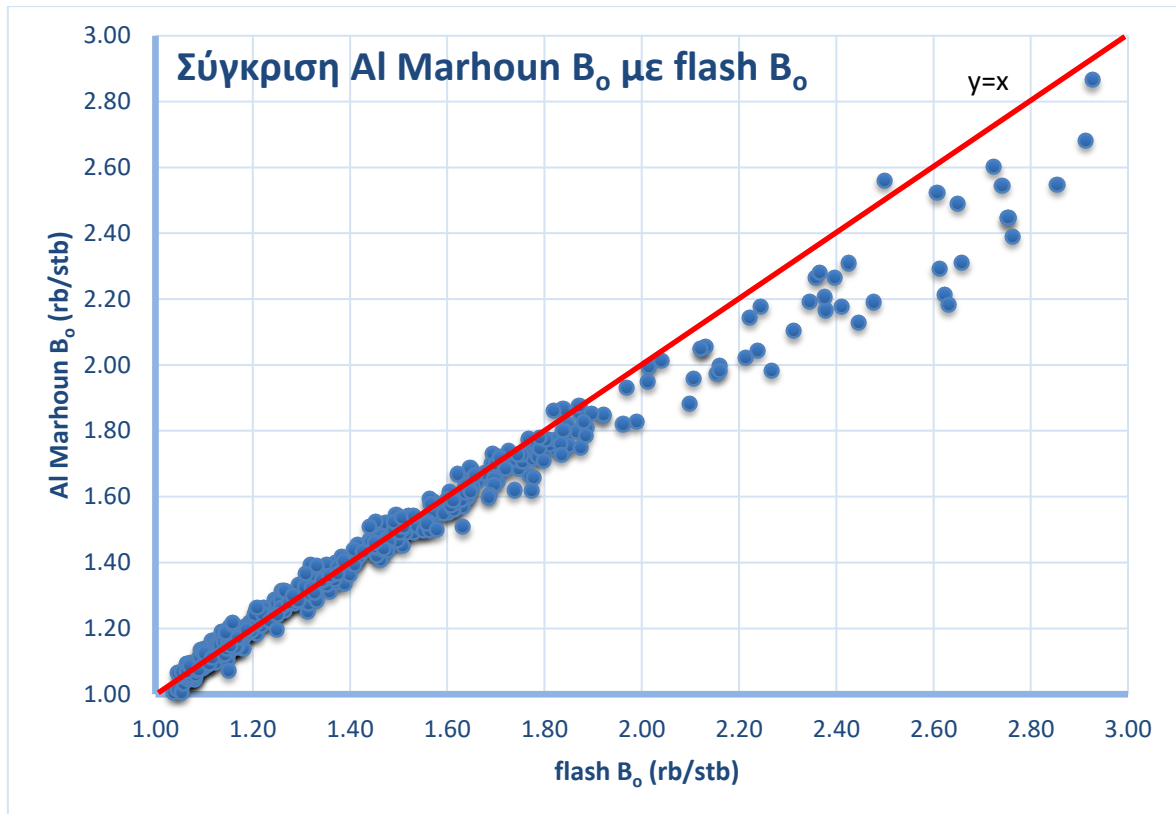
Αποτελέσματα από τη συσχέτιση του Al Marhoun

Στον Πίνακα 6.8 αναγράφονται τα αποτελέσματα των επιδόσεων της συσχέτισης του Al Marhoun ενώ στο Διάγραμμα 6.14 απεικονίζεται η σύγκριση των εκτιμώμενων από τη συσχέτιση του Al Marhoun τιμών B_o με τις τιμές flash B_o της βάσης δεδομένων.

	Συσχέτιση Al Marhoun
Πλήθος	487
Μέσο Σφάλμα (rb/stb)	-0.022
Μέσο Απόλυτο Σφάλμα (rb/stb)	0.040
Μέσο Σχετικό Σφάλμα	-0.87 %
Μέσο Σχετικό Απόλυτο Σφάλμα	2.32 %
Συντελεστής R^2	0.9825

Πίνακας 6.8: Επίδοση της συσχέτισης του Al Marhoun για το B_o ως προς το flash B_o της βάσης δεδομένων

Ίδια εικόνα με τις προηγούμενες δυο συσχετίσεις παρατηρείται και σε αυτή την περίπτωση. Το μέσο σφάλμα και το μέσο απόλυτο σφάλμα λαμβάνουν χαμηλές τιμές, όμως παρατηρώντας το Διάγραμμα 6.16, η συσχέτιση έχει μια τάση να υποεκτιμά τις τιμές του B_o των πιο πτητικών ρευστών, όμοια με τη συσχέτιση του Glaso. Το μέσο σχετικό απόλυτο σφάλμα και ο συντελεστής R^2 υποδεικνύουν ότι οι εκτιμήσεις της τιμής του B_o που προέκυψαν από τη συσχέτιση του Al Marhoun βρίσκονται σε καλή συμφωνία με τις πειραματικές τιμές του B_o .



Διάγραμμα 6.16: Σύγκριση AI Marhoun B_o με flash B_o

6.5.2. Εκτιμήσεις R_s

Τα αποτελέσματα των εκτιμήσεων των τιμών R_s , όπως και στην περίπτωση των ΤΝΔ συγκρίθηκαν με τις αντίστοιχες τιμές flash R_s που περιείχε η βάση δεδομένων.

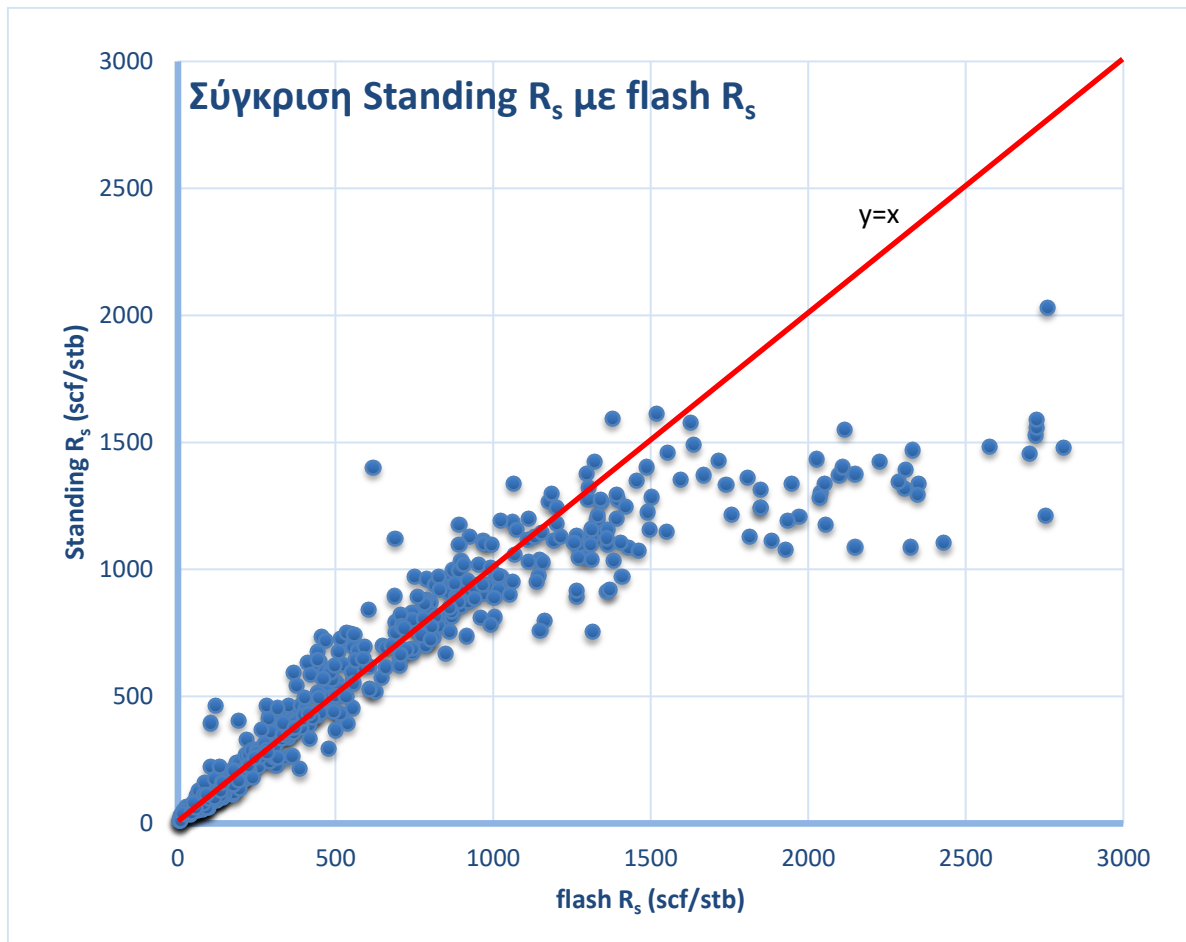
Αποτελέσματα από τη συσχέτιση του Standing

Στον Πίνακα 6.9 παρατίθενται τα αποτελέσματα των επιδόσεων της συσχέτισης του Standing, ενώ στο Διάγραμμα 6.14 απεικονίζεται η σύγκριση των εκτιμώμενων από τη συσχέτιση του AI Marhoun τιμών R_s με τις τιμές flash R_s της βάσης δεδομένων.

Αναλύοντας τα στατιστικά στοιχεία δίνεται η εντύπωση πως οι προβλέψεις της συσχέτισης πάσχουν σημαντικά ως προς την ακρίβειά τους. Υπενθυμίζεται όμως, ότι αυτές οι τιμές είναι παραπλανητικές, καθώς οφείλονται στο τεράστιο εύρος τιμών που λαμβάνει η ιδιότητα αυτή, όπως αναφέρθηκε και στην υποενότητα 6.3.2. Το μέσο σχετικό σφάλμα υποδεικνύει πως υπάρχει μια σχετική τάση υποεκτίμησης της τιμής του R_s . Παρατηρώντας και το Διάγραμμα 6.17 είναι εμφανές πως μετά τα 1,500 scf/stb, η συσχέτιση υποεκτιμά διαρκώς και σε μεγάλο βαθμό την τιμή του R_s . Σε γενικές γραμμές η συσχέτιση του Standing για την εκτίμηση του R_s έχει μια σχετικά καλή ακρίβεια μέχρι τα 1,500 scf/stb.

	Συσχέτιση Standing
Πλήθος	487
Μέσο Σφάλμα (scf/stb)	-78
Μέσο Απόλυτο Σφάλμα (scf/stb)	149
Μέσο Σχετικό Σφάλμα	3.37 %
Μέσο Σχετικό Απόλυτο Σφάλμα	20.64 %
Συντελεστής R^2	0.8404

Πίνακας 6.9: Επίδοση της συσχέτισης του Standing για την εκτίμηση του R_s ως προς το flash R_s της βάσης δεδομένων



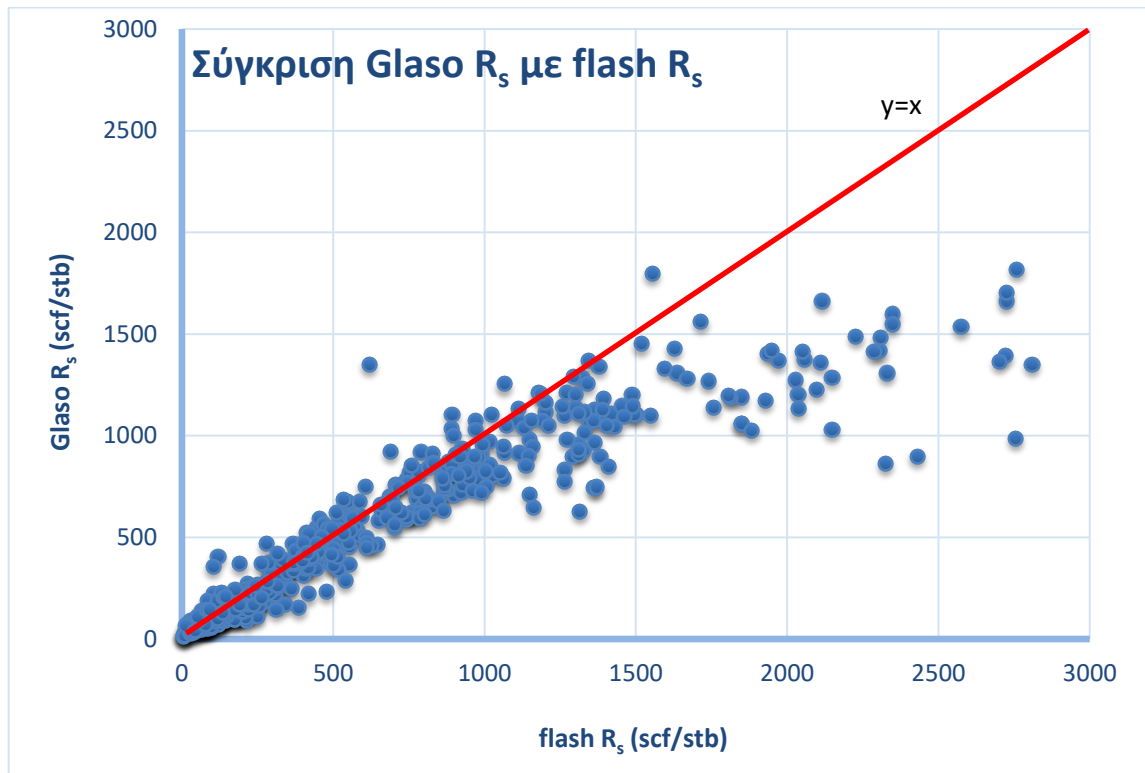
Διάγραμμα 6.17: Σύγκριση Standing R_s με flash R_s

Αποτελέσματα από τη συσχέτιση του Glaso

Στον Πίνακα 6.10 αναγράφονται τα αποτελέσματα των επιδόσεων της συσχέτισης του Glaso, ενώ στο Διάγραμμα 6.18 απεικονίζεται η σύγκριση των εκτιμώμενων από τη συσχέτιση του Glaso τιμών R_s με τις τιμές flash R_s της βάσης δεδομένων.

	Συσχέτιση Glaso
Πλήθος	487
Μέσο Σφάλμα (scf/stb)	-134
Μέσο Απόλυτο Σφάλμα (scf/stb)	168
Μέσο Σχετικό Σφάλμα	-5.50 %
Μέσο Σχετικό Απόλυτο Σφάλμα	25.89 %
Συντελεστής R^2	0.8581

Πίνακας 6.10: Επίδοση της συσχέτισης του Glaso για την εκτίμηση του R_s ως προς το flash R_s της βάσης δεδομένων



Διάγραμμα 6.18: Σύγκριση Glaso R_s με flash R_s

Ίδια εικόνα με την εκτίμηση της συσχέτισης του Standing παρατηρείται και σε αυτή τη συσχέτιση. Το μέσο σφάλμα ενισχύει την εντύπωση υποεκτίμησης της τιμής του R_s που γίνεται αντιληπτή μετά τα 1500 scf/stb του Διαγράμματος 6.16. Το μέσο απόλυτο σχετικό σφάλμα που λαμβάνει τιμές κοντά στο 25% υποδηλώνει τη χαμηλή ακρίβεια αυτής της συσχέτισης, που περιορίζεται στα χαμηλής πτητικότητας ρευστά για ακριβέστερες προβλέψεις.

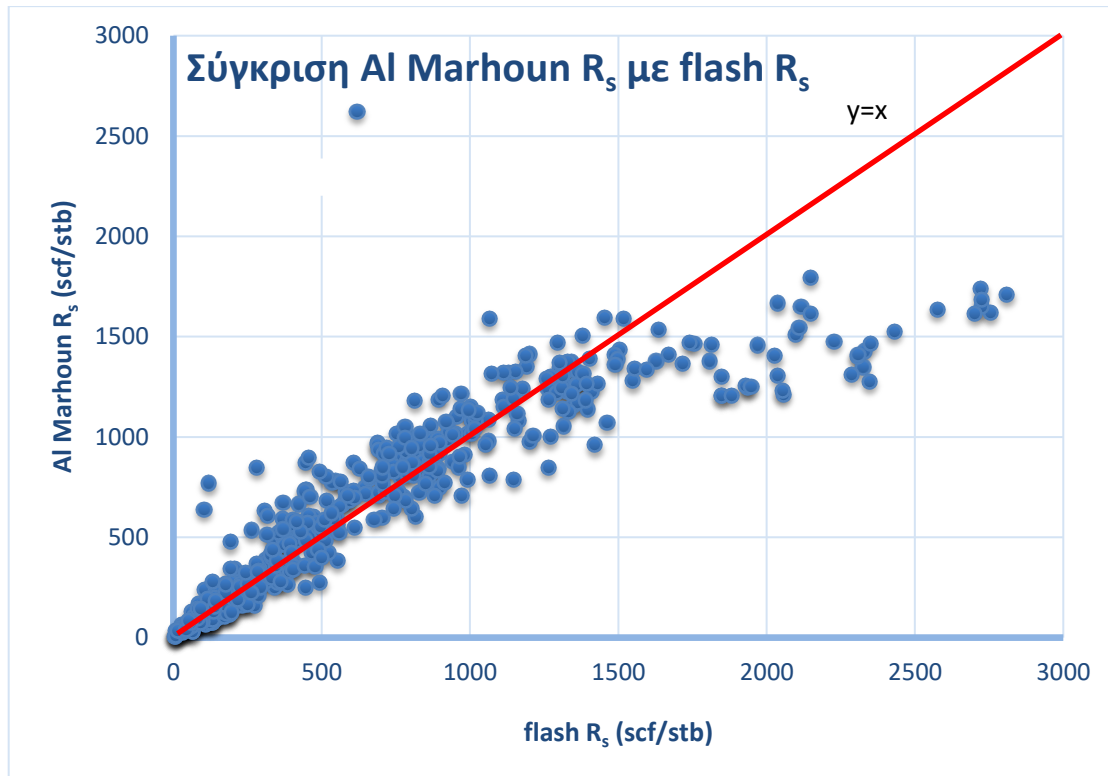
Αποτελέσματα από τη συσχέτιση του Al Marhoun

Στον Πίνακα 6.11 παρατίθενται τα αποτελέσματα των επιδόσεων της συσχέτισης του Al Marhoun, ενώ στο Διάγραμμα 6.19 απεικονίζεται η σύγκριση των εκτιμώμενων από τη συσχέτιση του Al Marhoun τιμών R_s με τις τιμές flash R_s της βάσης δεδομένων.

	Συσχέτιση Al Marhoun
Πλήθος	487
Μέσο Σφάλμα (scf/stb)	-30
Μέσο Απόλυτο Σφάλμα (scf/stb)	156
Μέσο Σχετικό Σφάλμα	10.57 %
Μέσο Σχετικό Απόλυτο Σφάλμα	26.93 %
Συντελεστής R^2	0.8180

Πίνακας 6.11: Επίδοση της συσχέτισης του Al Marhoun για την εκτίμηση του R_s ως προς το flash R_s της βάσης δεδομένων

Μελετώντας τα στατιστικά στοιχεία προκύπτει μια παρόμοια εντύπωση με των προηγούμενων δυο συσχετίσεων εκτίμησης του R_s , αφού και σε αυτή τη συσχέτιση πάνω από τα 1500 scf/stb γίνεται αντιληπτή μια σαφής υποεκτίμηση του R_s . Σημειώνεται πως το μέσο σχετικό απόλυτο σφάλμα που προέκυψε από τη σύγκριση των προβλέψεων της συσχέτισης του Al Marhoun με τα πειραματικά flash R_s ήταν το μεγαλύτερο μεταξύ των συσχετίσεων. Συνεπώς και σε αυτή την περίπτωση η ακρίβεια των προβλέψεων της συσχέτισης περιορίζεται στα χαμηλής πτητικότητας ρευστά.



Διάγραμμα 6.19: Σύγκριση AI Marhoun R_s με flash R_s

6.5.3. Εκτιμήσεις p_b

Τα αποτελέσματα των εκτιμήσεων των τιμών p_b , όπως και στην περίπτωση των ΤΝΔ συγκρίθηκαν με τις αντίστοιχες τιμές των πειραματικών p_b που περιείχε η βάση δεδομένων.

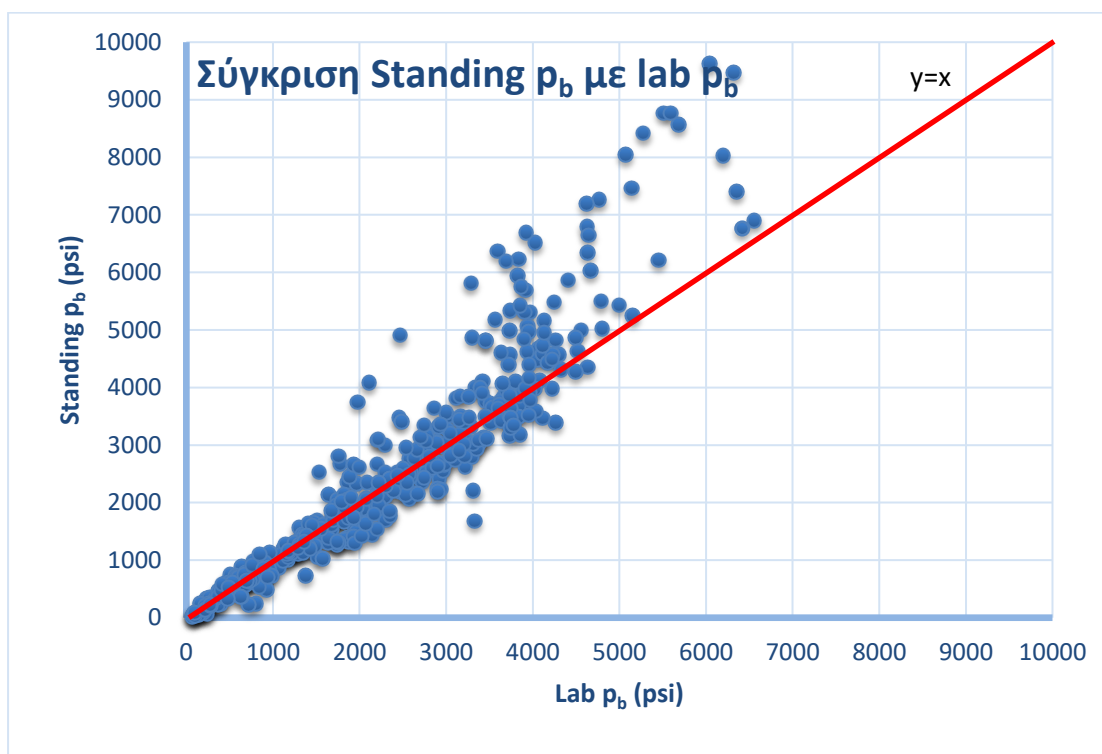
Αποτελέσματα από τη συσχέτιση του Standing

Στον Πίνακα 6.12 αναγράφονται τα αποτελέσματα των επιδόσεων της συσχέτισης του Standing, ενώ στο Διάγραμμα 6.18 απεικονίζεται η σύγκριση των εκτιμώμενων από τη συσχέτιση του Standing τιμών p_b με τις εργαστηριακές τιμές p_b της βάσης δεδομένων.

Εκ πρώτης όψεως, αναλύοντας τα αποτελέσματα των εκτιμήσεων της συσχέτισης του Standing για το p_b , φαίνεται πως η ακρίβεια πάσχει σημαντικά. Όπως και το R_s , το p_b μπορεί να λάβει τιμές μέσα σε ένα τεράστιο εύρος. Σε συνδυασμό με το ότι είναι η πιο δύσκολη πετρελαϊκή ιδιότητα ως προς την πρόβλεψη της, κάνει τα σφάλματα να είναι παραπλανητικά. Παρατηρώντας το Διάγραμμα 6.20 υπάρχει μια σαφής υπερεκτίμηση του p_b για τιμές πάνω από 3,000 psi, κάτι που υποδεικνύεται και τη θετική τιμή του μέσου σφάλματος. Συμπεραίνεται πως η συσχέτιση του Standing αποδίδει προβλέψεις με σχετική ακρίβεια μέχρι τα 3,000 – 4,000 psi.

	Συσχέτιση Standing
Πλήθος	487
Μέσο Σφάλμα (psi)	196
Μέσο Απόλυτο Σφάλμα (psi)	413
Μέσο Σχετικό Σφάλμα	3.32 %
Μέσο Σχετικό Απόλυτο Σφάλμα	16.92 %
Συντελεστής R^2	0.8787

Πίνακας 6.12: Επίδοση της συσχέτισης του Standing για την εκτίμηση του p_b ως προς το εργαστηριακό p_b της βάσης δεδομένων



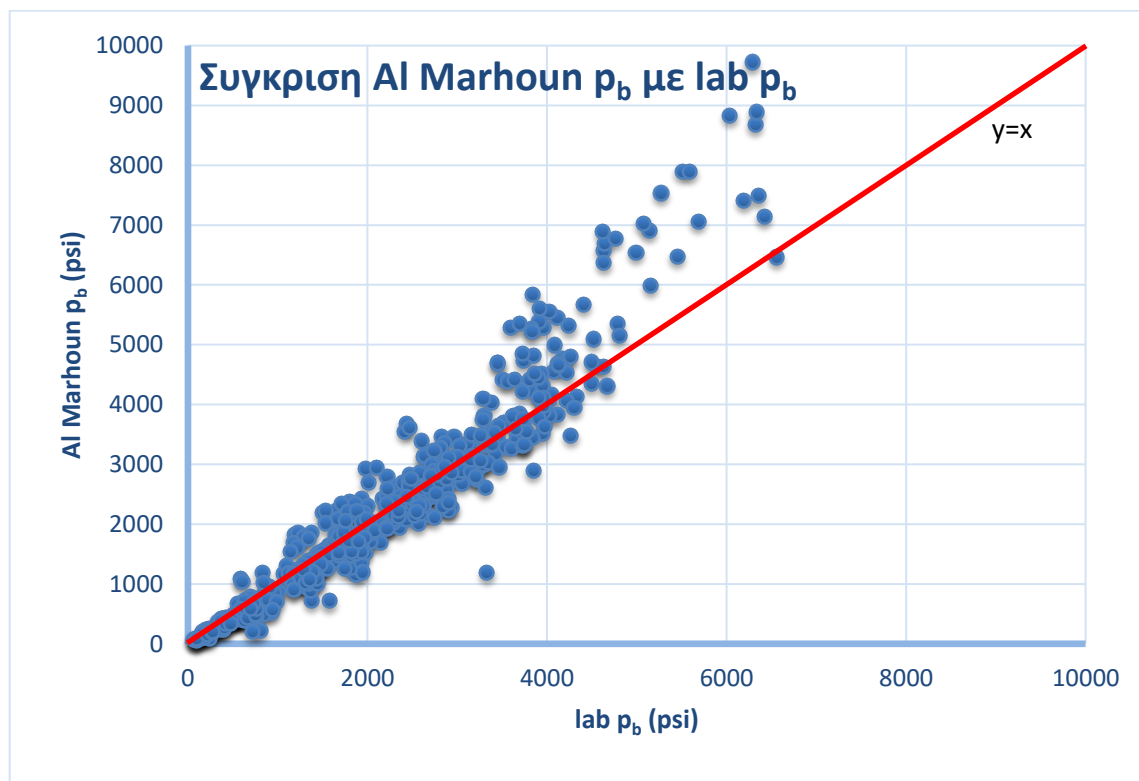
Διάγραμμα 6.20: Σύγκριση Standing p_b με lab p_b

Αποτελέσματα από τη συσχέτιση του Al Marhoun

Στον Πίνακα 6.13 αναγράφονται τα αποτελέσματα των επιδόσεων της συσχέτισης του Al Marhoun ενώ στο Διάγραμμα 6.21 απεικονίζεται η σύγκριση των εκτιμώμενων από τη συσχέτιση του Al Marhoun τιμών p_b με τις εργαστηριακές τιμές p_b της βάσης δεδομένων.

Συσχέτιση AI Marhoun	
Πλήθος	487
Μέσο Σφάλμα (psi)	115
Μέσο Απόλυτο Σφάλμα (psi)	369
Μέσο Σχετικό Σφάλμα	-0.44 %
Μέσο Σχετικό Απόλυτο Σφάλμα	16.35 %
Συντελεστής R^2	0.9130

Πίνακας 6.13: Επίδοση της συσχέτισης του AI Marhoun για την εκτίμηση του ρ_b ως προς το εργαστηριακό ρ_b της βάσης δεδομένων



Διάγραμμα 6.21: Σύγκριση AI Marhoun ρ_b με εργαστηριακό ρ_b

Αναλύοντας το Διάγραμμα 6.19 φαίνεται πως η υπερεκτίμηση που παρατηρήθηκε στη συσχέτιση του Standing, ισχύει και για τις εκτιμήσεις από τη συσχέτιση του AI Marhoun για πάνω από τα 4,000 psi. Το σχεδόν μηδενικό μέσο σφάλμα οφείλεται πιθανώς στις ελάχιστες εξαιρέσεις όπου η συσχέτιση υποεκτίμησε ακραία την τιμή του ρ_b . Σε γενικές γραμμές οι προβλέψεις των τιμών του ρ_b της συσχέτισης του AI Marhoun βρίσκονται σε

μια σχετική συμφωνία με τις εργαστηριακές τιμές μέχρι τα 4,000 psi, αποδίδοντας λίγο καλύτερα από τις αντίστοιχες του Standing.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7.

Κριτική και συμπεράσματα επί των αποτελεσμάτων

7.1. Εισαγωγή

Στο προηγούμενο κεφάλαιο αναλύθηκε η διαδικασία της υλοποίησης των ΤΝΔ, καθώς και τα αποτελέσματα που αυτά κατάφεραν ως προς τις πειραματικές τιμές των ογκομετρικών ιδιοτήτων B_o , R_s , p_b . Επίσης, παρατέθηκαν και τα αποτελέσματα που πέτυχε η παραδοσιακή μέθοδος των εμπειρικών μαθηματικών συσχετίσεων του ΜΜΠ πάλι ως προς τις εργαστηριακές τιμές. Συνεπώς, σε αυτό το κεφάλαιο θα πραγματοποιηθεί η σύγκριση των παραπάνω μεθόδων μεταξύ τους, ώστε στο τέλος να προκύψει μια κατά το δυνατόν ξεκάθαρη εικόνα για το ποια μέθοδος είναι η αποτελεσματικότερη και υπό ποιες προϋποθέσεις.

Απαραίτητα δεδομένα για αυτή τη σύγκριση ήταν:

- Σύσταση όπως αυτή εισάχθηκε στο ΤΝΔ (τα συστατικά CO_2 , C_1 , C_2 , C_{3-5} , C_{6+} που έχει τη δυνατότητα να ανιχνεύσει το εργαλείο YAP και τα δύο ανόργανα συστατικά N_2 , H_2S που το εργαλείο YAP αδυνατεί να ανιχνεύσει)
- Πυκνότητα API
- Θερμοκρασία T_{res}
- Οι πειραματικές τιμές DV και Flash B_o , R_s και το σημείο φυσαλίδας p_b
- Οι τιμές που εκτίμησαν τα μοντέλα των ΤΝΔ και οι συσχετίσεις για τις τρεις ογκομετρικές ιδιότητες ενδιαφέροντος
- Τα σχετικά απόλυτα σφάλματα που προέκυψαν από τη σύγκριση των εκτιμώμενων τιμών των ΤΝΔ και οι συσχετίσεις ως προς τις πειραματικές τιμές

Σημειώνεται πως όλα τα παραπάνω δεδομένα συγκεντρώθηκαν και για τα 487 ρευστά της βάσης δεδομένων.

Στη συνέχεια έγινε μελέτη των απρόσμενα μεγάλων σφαλμάτων του κάθε ρευστού ξεχωριστά (per case) ώστε να παρατηρηθεί αν αυτό οφειλόταν σε κάποιους συγκεκριμένους παράγοντες, σε σφάλματα της εφαρμογής των μεθόδων ή στην αδυναμία των ίδιων των μεθόδων.

Τέλος, πραγματοποιήθηκε μια γενική σύγκριση για το πώς ανταποκρίνεται η κάθε μέθοδος στα βαριά, μέχρι μέσης πτητικότητας πετρέλαια, πώς στα πτητικά πετρέλαια και πώς στο σύνολο των ρευστών της βάσης δεδομένων.

7.2. Κριτική αποτελεσμάτων για την εκτίμηση του B_o

7.2.1. Ειδικές Παρατηρήσεις

Το B_o ήταν η πιο εύκολη ιδιότητα ως προς την σύγκριση των σφαλμάτων, καθώς σε καμία από τις μεθόδους δεν υπήρξε περίπτωση ρευστού όπου το απολυτό σχετικό σφάλμα να ξεπέρασε το 20%. Κατά συνέπεια, εντοπίστηκαν όλα τα «ύποπτα» ρευστά για τα οποία τουλάχιστον μία από τις μεθόδους εκτίμησης απέδωσε σχετικό απολυτό σφάλμα πάνω από 10%.

Ανόργανες ενώσεις

Μια από τις βασικότερες αιτίες απρόσμενα υψηλών σφαλμάτων στην περίπτωση εκτίμησης του B_o βρέθηκε να είναι η υψηλή συγκέντρωση σε ανόργανα συστατικά και ειδικότερα του H_2S . Τα σφάλματα αυτά φάνηκε να αφορούν σχεδόν αποκλειστικά τη μέθοδο των ΤΝΔ, καθώς οι συσχετίσεις ανταπεξήλθαν στο 99% των περιπτώσεων ικανοποιητικά στην εκτίμηση του B_o ρευστών με υψηλή συγκέντρωση σε υδρόθειο. Σημειώνεται ότι η βάση δεδομένων που χρησιμοποιήθηκε δεν περιείχε ρευστά με υψηλή συγκέντρωση N_2 με αποτέλεσμα να μην μπορεί να ελεγχθεί η αποτελεσματικότητα των μοντέλων σε ρευστά τέτοιου τύπου.

Παρατηρήθηκε πως, για τη συντριπτική πλειονότητα των ρευστών με υδρόθειο H_2S πάνω από 10% κατά mole, η μέθοδος των ΤΝΔ αδυνατεί να εκτιμήσει με ακρίβεια την τιμή του B_o . Πιο συγκεκριμένα παρατίθενται στον Πίνακα 7.1 οι τιμές που εκτίμησε το μοντέλο του ΤΝΔ και τα σφάλματα που προέκυψαν για τα δυο ρευστά της βάσης δεδομένων με την υψηλότερη συγκέντρωση H_2S % κατά mole.

	Ρευστό 392	Ρευστό 414
<i>H₂S</i> (% κατά mole)	20.47%	19.05%
<i>Flash B_o</i> (rb/stb)	1.71	1.75
<i>TNA B_o</i> (rb/stb)	1.56	1.61
Σχετικό Απόλυτο Σφάλμα	9%	8%

Πίνακας 7.1: Ρευστά με τη μεγαλύτερη συγκέντρωση σε υδρόθειο της βάσης δεδομένων

Είναι εμφανές πως το TNA υποεκτίμησε ακραία την τιμή του B_o και των δυο ρευστών. Αυτό συνέβη γιατί το υδρόθειο ως συστατικό στο πετρέλαιο επηρεάζει κατά πολύ τη διόγκωσή του. Υπενθυμίζεται πως το εργαλείο YAP δεν έχει τη δυνατότητα να ανιχνεύσει το H_2S και για το λόγο αυτό εξαιρέθηκε από την σύσταση της YAP, που χρησιμοποιήθηκε ως είσοδος των TNA της παρούσας εργασίας. Συνεπώς, το TNA που δεν είχε εικόνα για τη συγκέντρωση του H_2S , δεν έλαβε υπόψιν τη διόγκωση (υψηλότερες τιμές B_o) που προκαλεί το συστατικό αυτό στο πετρέλαιο και υποεκτίμησε σημαντικά τις τιμές των δυο ρευστών, με το φαινόμενο να γενικεύεται και στα υπόλοιπα ρευστά με υψηλή συγκέντρωση H_2S . Το αποτέλεσμα ήταν τα σχετικά απόλυτα σφάλματα να εκτοξευτούν. Σε μια περιοχή όπου τα σχετικά απόλυτα σφάλματα κυμαίνονται στο 3% για τις εκτιμήσεις του μοντέλου TNA εδώ παρατηρούνται εξαιρετικά μεγαλύτερες τιμές. Η εκτιμήσεις των συσχετίσεων και των τριών συγγραφέων φάνηκαν να επηρεάζονται αλλά όχι σε τόσο ακραίο βαθμό.

Εξαιρέση όλων των παραπάνω αποτελούν οι περιπτώσεις των ρευστών με υψηλή συγκέντρωση τόσο σε H_2S όσο και σε CO_2 . Παρατηρήθηκε πως και το μοντέλο TNA και οι συσχετίσεις καταφέρνουν αξιοπρεπή αποτελέσματα, όταν παράλληλα με την υψηλή συγκέντρωση H_2S υπάρχει και υψηλή συγκέντρωση σε CO_2 . Αυτό συμβαίνει γιατί το CO_2 έχει παρόμοιες ιδιότητες με το H_2S ως προς την διόγκωση που προκαλούν στο πετρέλαιο και συνεπώς το CO_2 επιτρέπει σε όλες τις μεθόδους (ειδικά το μοντέλο εκτίμησης B_o του TNA που έχει ακριβή γνώση για τη συγκέντρωση του CO_2) να πετύχουν εκτιμήσεις με μικρότερα σφάλματα.

Μια ακόμα παρατήρηση προέκυψε για τα ρευστά με εξαιρετικά μεγάλη συγκέντρωση μόνο σε CO_2 . Διαπιστώθηκε πως οι εκτιμήσεις που είχαν πραγματοποιηθεί με τη μέθοδο των συσχετίσεων έπασχαν σημαντικά όταν επρόκειτο να προβλέψουν τιμές B_o ρευστών

που περιείχαν πάνω από 10% κατά mole CO₂ και είχαν την τάση να υπερεκτιμήσουν κατά πολύ την τιμή του B_o. Χαρακτηριστική περίπτωση αποτελεί το Ρευστό 466 το οποίου οι τιμές και τα σφάλματα παρατίθενται στον Πίνακα 7.2. Το ρευστό περιέχει CO₂ με συγκέντρωση 19.59 % κατά mole, όπου κυρίως οι παλαιότερες συσχετίσεις του Standing και του Glaso αδυνατούν να το αντιληφθούν με συνέπεια τα σφάλματα να μεγαλώνουν. Η ακραία υπερεκτίμηση της τιμής του B_o από τις δυο αυτές συσχετίσεις συμβαίνει γιατί, οι συσχετίσεις αντιλαμβάνονται τη συγκέντρωση του CO₂ μέσω της ειδικής πυκνότητας αερίου γ_g και της διαλυτότητας R_s. Καθώς το CO₂ είναι αέριο σε κανονικές συνθήκες, το γ_g και το R_s αυξάνονται. Το συγκεκριμένο ρευστό τυγχάνει να έχει και πολύ υψηλή τιμή ειδικής πυκνότητας πετρελαίου με αποτέλεσμα η μεγάλη τιμή του λογού γ_o/γ_g και η αυξημένη τιμή του R_s να είναι αιτία που το σφάλμα εκτινάσσεται σε αυτή την περίπτωση. Το μοντέλο του ΤΝΔ που λαμβάνει υπόψιν πλήρως τη συγκέντρωση του CO₂ δεν επηρεάστηκε καθόλου στη συγκεκριμένη περίπτωση με το σφάλμα να παραμένει σε πολύ χαμηλές τιμές.

	Ρευστό 466
CO₂ (% κατά mole)	19.59%
Flash B_o (rb/stb)	2.5
Standing B_o (rb/stb)	3
Glaso B_o (rb/stb)	2.73
Σχετικό Απόλυτο Σφάλμα Standing B_o	20%
Σχετικό Απόλυτο Σφάλμα Glaso B_o	9%

Πίνακας 7.2: Ρευστό με τη μεγαλύτερη συγκέντρωση διοξειδίου του άνθρακα της βάσης δεδομένων

Ένα πολύ σημαντικό συμπέρασμα που προκύπτει από την παραπάνω διαπίστωση είναι πως είναι εξαιρετικά δύσκολο να αποδοθεί μια εσφαλμένη εκτίμηση σε έναν μόνο παράγοντα, ειδικά στην περίπτωση των συσχετίσεων του ΜΜΠ, όπου οι εκτιμήσεις γίνονται βάση δεδομένων πεδίου. Κάτι ακόμα που ενισχύει αυτό το συμπέρασμα είναι ότι τα διαγράμματα που σχεδιαστήκαν για να αντιπαραβάλλουν ιδιότητες των ρευστών (π.χ. πυκνότητα API, θερμοκρασία ταμιευτήρα κ.α.) με τα σχετικά απόλυτα σφάλματα των

εκτιμήσεων δεν έδειξαν καμία ξεκάθαρη τάση μεταξύ των δύο. Ο μοναδικός τρόπος για να εντοπιστεί σε ποια ή ποιες ιδιότητες οφείλονται τα απρόσμενα σφάλματα είναι αυτός της γειτνίασης, δηλαδή της μελέτης ρευστών με σχετικά παρόμοιες τιμές ιδιοτήτων. Συνοψίζοντας, είναι αδύνατον να προκύψει ξεκάθαρο συμπέρασμα για κάθε απρόσμενο σφάλμα της εκτίμησης των ρευστών, καθώς αποτελεί συνδυασμό παρά πολλών παραγόντων ταυτόχρονα που οδήγησαν στην εσφαλμένη πρόβλεψη.

7.2.2. Γενικές παρατηρήσεις

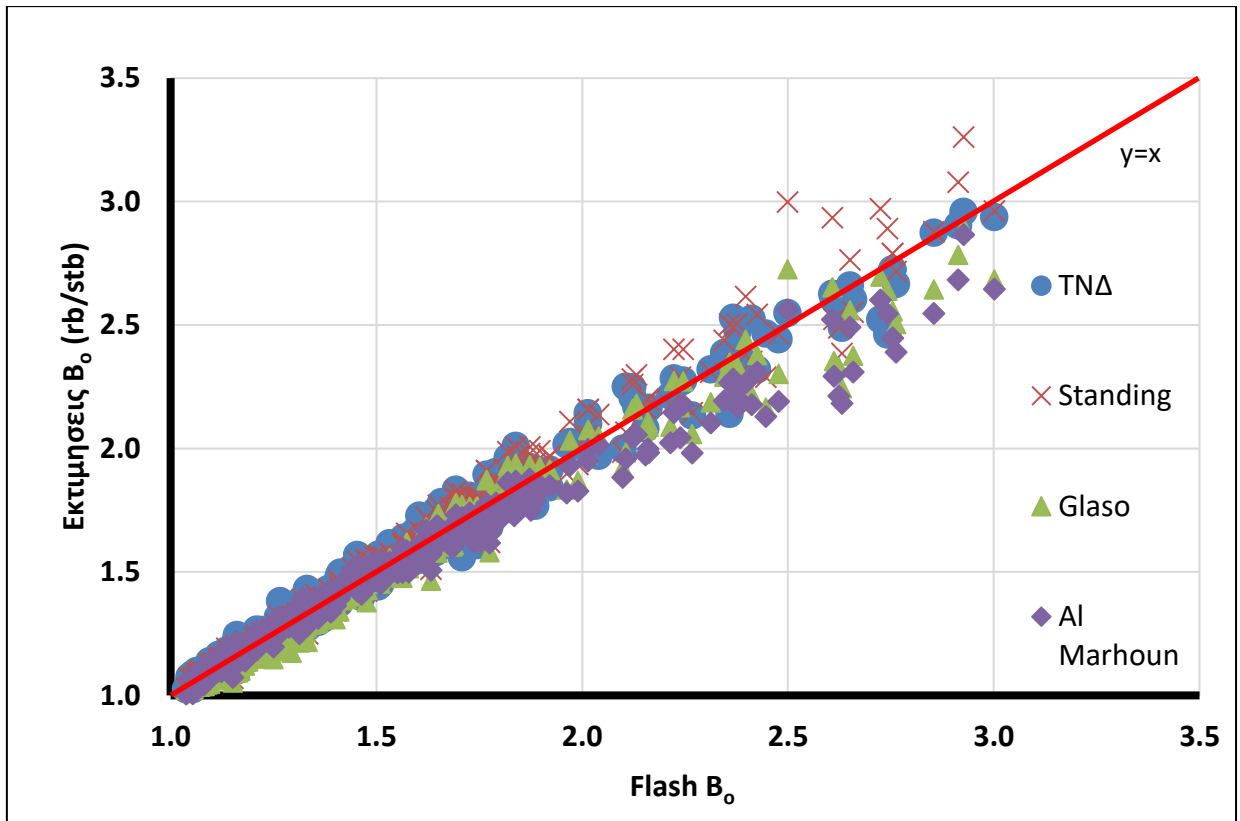
Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε μια γενική αξιολόγηση των μεθόδων για:

- Το σύνολο της βάσης δεδομένων (B_0 από 1.05 – 3.00 rb/stb)
- Τα βαρέα και μέσης πτητικότητας πετρέλαια (B_0 από 1.05 – 2.00 rb/stb)
- Τα υψηλής πτητικότητας πετρέλαια (B_0 από 2.00 – 3.00 rb/stb)

Ο διαχωρισμός έγινε βάση της παρατήρησης ότι οι τιμές των σφαλμάτων σε όλες τις μεθόδους αρχίζουν να αυξάνονται μετά τα 1.8 rb/stb και εκτινάσσονται όταν ξεπεράσουν τα 2 rb/stb. Επίσης, είναι γνωστό πως οι συσχετίσεις υστερούν όσο ανεβαίνει η πτητικότητα των ρευστών και οφείλεται να γίνει μια σύγκριση εστιασμένη σε αυτό το εύρος τιμών, ώστε να μελετηθεί η αποτελεσματικότητα της μεθόδου των ΤΝΔ.

Στο Διάγραμμα 7.1 απεικονίζεται η σύγκριση των τιμών B_0 που εκτιμηθήκαν από τις μεθόδους του ΤΝΔ και των συσχετίσεων, ως προς τις πειραματικές τιμές flash B_0 για το σύνολο της βάσης δεδομένων. Εύκολα γίνεται αντιληπτό πως στα χαμηλής και μέχρι μέσης πτητικότητας ρευστά, όλες οι μέθοδοι εκτιμούν με μεγάλη ακρίβεια τις τιμές του B_0 . Συνεπώς, θα ήταν άδικο να ασκηθεί μια κριτική στο σύνολο του πληθυσμού. Στον Πίνακα 7.3 παρατίθενται τα επιμέρους αποτελέσματα των μεθόδων.

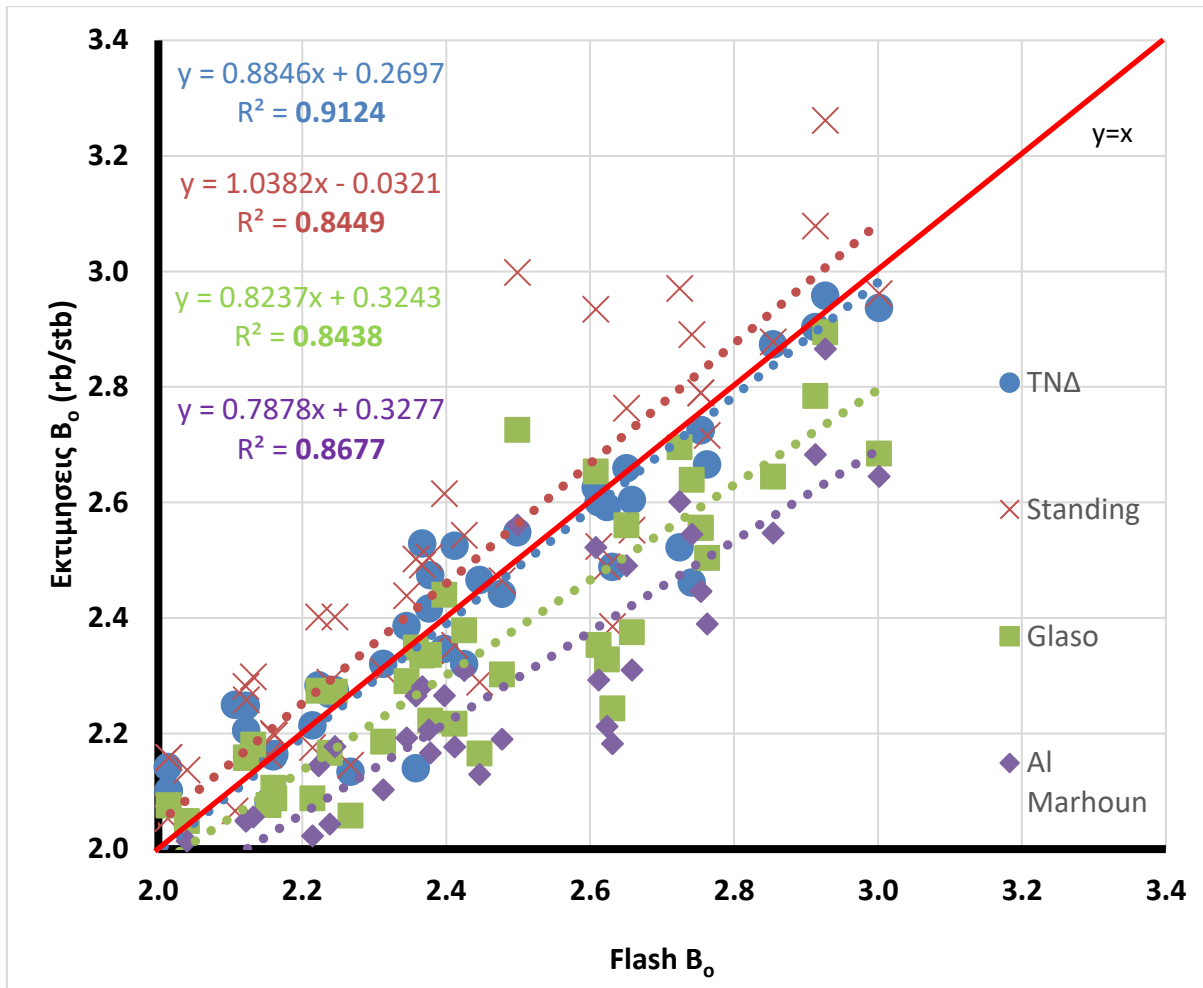
Η συνέπεια όλων των μεθόδων στην εκτίμηση του B_0 για τιμές κάτω από 2 rb/stb επιβεβαιώνεται και από το μέσο σχετικό απόλυτο σφάλμα που λαμβάνει την ίδια περίπου τιμή. Παρατηρείται όμως, στις επιδόσεις των συσχετίσεων, σημαντική αύξηση του μέσου απόλυτου σχετικού σφάλματος για την περίπτωση των πτητικών πετρελαίων. Αντίθετα το ΤΝΔ παραμένει συνεπές και σε αυτό το εύρος τιμών του B_0 . Στο Διάγραμμα 7.2 απεικονίζεται η σύγκριση των τιμών B_0 που εκτιμηθήκαν από τις μεθόδους του ΤΝΔ και των συσχετίσεων, ως προς τις πειραματικές τιμές flash B_0 , μόνο για την περίπτωση των πτητικών πετρελαίων.



Διάγραμμα 7.1: Σύγκριση των εκτιμώμενων B_o με τα flash B_o επί του συνόλου της βάσης δεδομένων

ΕΠΙΔΟΣΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ B_o			
	Μέσο Σχετικό Απόλυτο Σφάλμα		
	$B_o < 2.00$ (rb/stb)	$B_o \geq 2.00$ (rb/stb)	Full Range B_o
Standing B_o	2%	5%	2.21%
Glaso B_o	2%	5%	2.70%
Al Marhoun B_o	2%	7%	2.32%
ANN B_o	2%	3%	2.13%

Πίνακας 7.3: Επίδοση μοντέλων πρόβλεψης B_o για τα βαριά έως μέσης πτητικότητας, τα υψηλής πτητικότητας και για το σύνολο της βάσης δεδομένων



Διάγραμμα 7.2: Σύγκριση των εκτιμώμενων B_o με τα flash B_o επί των πτητικών ρευστών. Στο διάγραμμα απεικονίζονται για κάθε μέθοδο οι συντελεστές προσδιορισμού R^2 μαζί με τη γραμμή τάσης τους.

Με τη βοήθεια του διαγράμματος γίνεται ακόμη πιο ξεκάθαρη η ανωτερότητα της μεθόδου των ΤΝΔ ως προς τις συσχετίσεις στις εκτιμήσεις πετρελαίων υψηλής πτητικότητας. Αυτό επιτεύχθηκε γιατί η εκπαίδευση και τα ρευστά που περιείχε η βάση δεδομένων στόχευε στην αποτελεσματικότερη εκτίμηση των τιμών B_o ειδικά σε αυτό το εύρος τιμών, όπου είναι γνωστό πως οι συσχετίσεις υστερούν σημαντικά.

Η επίδοση που πέτυχε το μοντέλο του ΤΝΔ για την εκτίμηση του B_o θα μπορούσε να είχε βελτιωθεί ακόμα περισσότερο, εάν η βάση δεδομένων περιείχε περισσότερα ρευστά με υψηλές τιμές B_o . Αν η εύρεση περισσότερων πειραματικών δεδομένων ήταν αδύνατη, τότε η εισαγωγή «συνθετικών» δεδομένων στην πρωτόλεια βάση θα ήταν μια ικανοποιητική λύση. Τα συνθετικά δεδομένα δεν έχουν μετρηθεί πειραματικά αλλά αποτελούν ένα αντίγραφο των ήδη υφιστάμενων δεδομένων. Στη συγκεκριμένη περίπτωση το πλήθος των

ρευστών με B_0 πάνω από 2 rb/stb θα μπορούσε να είχε διπλασιαστεί, ώστε το ΤΝΔ αντλήσει πληροφορία και να εξάγει μοτίβα από μεγαλύτερο αριθμό δεδομένων.

Από την άλλη πλευρά, η ακρίβεια των εκτιμήσεων των τιμών του B_0 για τα υψηλής πητικότητας ρευστά είναι σαφώς μειωμένη. Από το διάγραμμα 7.2 γίνεται επίσης εμφανής η τάση υποεκτίμησης ή υπερεκτίμησης της τιμής του B_0 κάθε μεθόδου. Παρατηρείται πως η συσχέτιση του Standing τείνει να υπερεκτιμήσει, στη συντριπτική πλειονότητα των ρευστών την τιμή του B_0 , ενώ αντίθετα οι συσχετίσεις του Glaso και του Al Marhoun έχουν τάση να υποεκτιμήσουν τις τιμές του B_0 , με την τελευταία συσχέτιση να πετυχαίνει τις χειρότερες επιδόσεις. Το ΤΝΔ δεν δείχνει καμία τάση υποεκτίμησης ή υπερεκτίμησης της τιμής του B_0 .

Γενικά, το μοντέλο του ΤΝΔ αποδείχθηκε πως ήταν το ακριβέστερο και το πιο συνεπές στις εκτιμήσεις του B_0 σε όλο το εύρος τιμών σε σύγκριση με τις συσχετίσεις των Standing, Glaso και Al Marhoun. Ειδικότερα, στην περίπτωση των πητικών πετρελαίων όπου οι συσχετίσεις παραδοσιακά υστερούν, οι εκτιμήσεις του ΤΝΔ κατάφεραν με διαφορά το μικρότερο μέσο απόλυτο σχετικό σφάλμα. Συνεπώς, συμπεραίνεται πως οι παλαιότερες μέθοδοι εκτίμησης του B_0 που προκύπτουν από συσχετίσεις μπορούν να αντικατασταθούν επάξια από τη σύγχρονη, γρήγορη και αποτελεσματική μέθοδο των ΤΝΔ.

7.3. Κριτική αποτελεσμάτων για την εκτίμηση του R_s

7.3.1. Ειδικές παρατηρήσεις

Το R_s ήταν σαφώς πιο δύσκολη ιδιότητα ως προς τη σύγκριση των σφαλμάτων καθώς τα μέσα απόλυτα σφάλματα σε μερικές περιπτώσεις λάμβαναν εξωφρενικά μεγάλες τιμές σε όλες τις μεθόδους πρόβλεψης. Συνεπώς δεν ορίστηκε κάποια τιμή σφάλματος πάνω από την οποία κάποιο ρευστό θα μπορούσε να θεωρηθεί «ύποπτο» αλλά όλα τα ρευστά της βάσης εξετάστηκαν ένα προς ένα ξεχωριστά.

Ανόργανες ενώσεις

Και στην περίπτωση της εκτίμησης του R_s , φάνηκε πως οι υψηλές συγκεντρώσεις σε ανόργανες ενώσεις και ιδιαίτερα του H_2S επηρεάζουν τις εκτιμήσεις των μοντέλων, κυρίως του ΤΝΔ. Χαρακτηριστική είναι η περίπτωση των ρευστών με τη μεγαλύτερη συγκέντρωση σε H_2S στο σύνολο των ρευστών, που περιγράφηκαν και στην περίπτωση

της εκτίμησης του B_o . Στον Πίνακα 7.4 παρατίθενται οι τιμές που εκτίμησε το μοντέλο του ΤΝΔ και τα σφάλματα που προέκυψαν για τα συγκεκριμένα ρευστά.

	Ρευστό 392	Ρευστό 414
<i>H₂S</i> (% κατά mole)	20.47%	19.05%
<i>Flash R_s</i> (scf/stb)	834	901
<i>ΤΝΔ R_s</i> (scf/stb)	1,149	1,138
Σχετικό Απόλυτο Σφάλμα	27%	21%

7.4: Σφάλματα και τιμές ρευστών με τη μεγαλύτερη συγκέντρωση σε υδρόθειο της βάσης δεδομένων. Η περίπτωση του R_s .

Όπως και στην περίπτωση του B_o , το μοντέλο ΤΝΔ υποεκτίμησε ακραία την τιμή του R_s καθώς δεν είχε καμία πληροφορία για τη συγκέντρωση του H_2S στα ρευστά. Σε μια περιοχή όπου το μέσο απόλυτο σχετικό σφάλμα για την περίπτωση του ΤΝΔ κυμαίνεται στο 5%, οι τιμές έχουν εκτοξευτεί. Οι συσχετίσεις, με εξαίρεση αυτή του Glaso, δεν φάνηκε να επηρεάζονται ιδιαίτερα.

Σχέση μεταξύ p_b , θερμοκρασίας και R_s

Η επομένη διαπίστωση σχετίζεται με τις εκτιμήσεις R_s των συσχετίσεων. Παρατηρήθηκε το έξης μοτίβο: για τα ρευστά με υψηλή τιμή πίεσης του σημείου φυσαλίδας και ταυτόχρονα υψηλή θερμοκρασία ταμειυτήρα, οι συσχετίσεις έδειξαν μια ξεκάθαρη τάση υπερεκτίμησης των τιμών του R_s . Αντίθετα, για τα ρευστά με χαμηλή τιμή πίεσης του σημείου φυσαλίδας σε συνδυασμό με χαμηλή θερμοκρασία ταμειυτήρα, οι συσχετίσεις έδειξαν ξεκάθαρη τάση υποεκτίμησης τις τιμές του R_s .

Αν και αντικειμενικά η ιδιότητα R_s εξαρτάται αποκλειστικά από τη σύσταση του ρευστού, οι συσχετίσεις έχουν ανάγκη από άλλα δεδομένα για να προβλέψουν την τιμή του R_s . Πιο συγκεκριμένα οι συσχετίσεις εκτίμησης του R_s έχουν σαν δεδομένα εισόδου τη θερμοκρασία ταμειυτήρα T_{res} και το σημείο φυσαλίδας p_b . Καθώς οι δυο αυτές ιδιότητες εξαρτώνται η μια από την άλλη, είναι απαραίτητη η είσοδος της θερμοκρασίας ως πληροφορία, για να καθοριστεί η θερμοκρασία στην οποία το p_b λαμβάνει τη συγκεκριμένη τιμή. Συνεπώς, όταν οι δυο αυτές τιμές είναι αυξημένες, οι συσχετίσεις εκτιμούν πως το πετρέλαιο έχει τη δυνατότητα κρατήσει υπό διάλυση μεγάλη ποσότητα αερίου (μέχρι το σημείο φυσαλίδας) υπερεκτιμώντας την τιμή του R_s . Αντίθετα, όταν

λαμβάνουν χαμηλές τιμές, οι συσχετίσεις εκτιμούν πως το πετρέλαιο δεν έχει τη δυνατότητα να κρατήσει υπό διάλυση μεγάλο όγκο αερίου, υποεκτιμώντας την τιμή του R_s .

Οι περιπτώσεις αυτών των ρευστών είναι αρκετές δίνοντας ένα σαφές πλεονέκτημα στη μέθοδο των ΤΝΔ. Το ΤΝΔ, που εκπαιδεύτηκε βάση μόνο της σύστασης του ρευστού συμπεράνε ότι ο κανόνας που ορίζει το R_s είναι πολύ πιο σύνθετος, από ότι άπλα η σχέση θερμοκρασίας και σημείου φυσαλίδας. Για παράδειγμα, η συσχέτιση του Glaso προσπαθεί με μια εκθετική σχέση, να ορίσει τη σχέση που διέπει το R_s με το p_b σε συγκεκριμένη θερμοκρασία. Το μοντέλο εκτίμησης R_s από την εκπαίδευση του ΤΝΔ έχει τη δυνατότητα να γίνει πολύ πιο ευέλικτο από ότι μια εκθετική σχέση.

7.3.2. Γενικές Παρατηρήσεις

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε μια γενική αξιολόγηση των μεθόδων για:

- Το σύνολο της βάσης δεδομένων (R_s από 5 – 3,061 scf/stb)
- Τα ρευστά με R_s από 5-50 scf/stb
- Τα υψηλής πτητικότητας πετρέλαια (B_o από 2.00 – 3.00 rb/stb)

Η εστίαση στις εξαιρετικά χαμηλές τιμές R_s πραγματοποιήθηκε διότι σε αυτό το εύρος τιμών παρατηρήθηκαν πολύ μεγάλες ασυμφωνίες ανάμεσα στις εκτιμήσεις των προσδιοριστικών μεθόδων και των εργαστηριακών τιμών, ειδικότερα στην περίπτωση του μοντέλου του ΤΝΔ. Επίσης, είναι γνωστό πως οι συσχετίσεις υστερούν όσο αυξάνεται η πτητικότητα των ρευστών και οφείλεται να γίνει μια εστιασμένη σύγκριση σε αυτό το εύρος τιμών ώστε να μελετηθεί η αποτελεσματικότητα της μεθόδου των ΤΝΔ.

Πιο συγκεκριμένα τα μέσα απόλυτα σχετικά σφάλματα που παρατηρήθηκαν στα ρευστά με R_s χαμηλότερο του 50 scf/stb ήταν τα εξής:

Standing: 55%

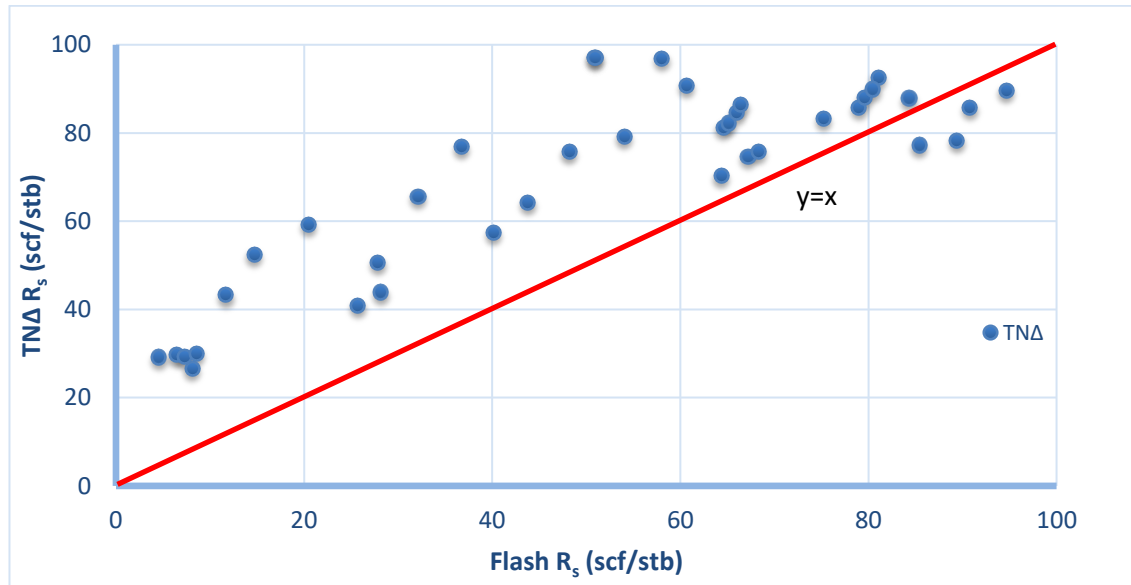
Glaso: 81%

Al Marhoun: 54%

ΤΝΔ: 141%

Αν και όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 6, τα μεγάλα σφάλματα εκτίμησης του R_s και ειδικότερα στα ρευστά με πολύ χαμηλή τιμή R_s δεν είναι πάντοτε αντιπροσωπευτικά, στην

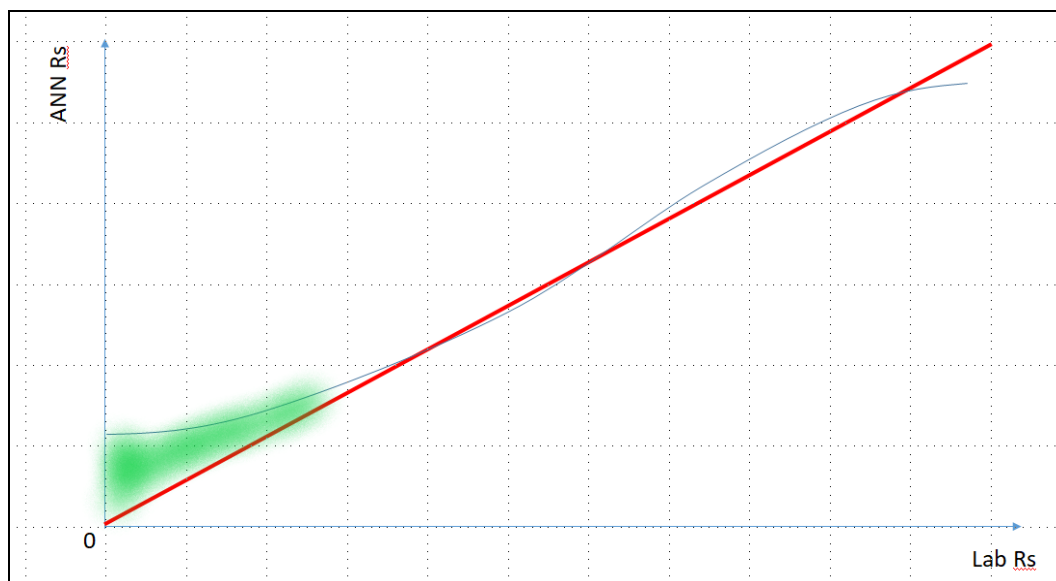
περίπτωση αυτή, ειδικά οι προβλέψεις του ΤΝΔ απείχαν πολύ από τις πειραματικές. Στο Διάγραμμα 7.3 απεικονίζεται η σύγκριση των τιμών R_s που εκτίμησε το μοντέλο του ΤΝΔ με τις πειραματικές τιμές flash R_s , στο εύρος από 0 – 100 scf/stb.



Διάγραμμα 7.3: Σύγκριση των εκτιμώμενων ΤΝΔ R_s με τα flash R_s για τα ρευστά με R_s κάτω από 100 scf/stb

Παρατηρώντας το διάγραμμα φαίνεται η διαρκής υπερεκτίμηση του R_s από το μοντέλο του ΤΝΔ. Συμβαίνει δε σε τέτοιο βαθμό που υποδεικνύει πως το ΤΝΔ δεν έχει αντιληφθεί τη «φυσική» του φαινόμενου που διέπει το R_s στις πολύ χαμηλές τιμές. Αυτό αποτελεί και ένα από τα βασικά μειονεκτήματα των ΤΝΔ. Τα ΤΝΔ πρέπει να εξάγουν την πληροφορία για την φυσική ενός προβλήματος μέσα από τα δεδομένα. Αν τα δεδομένα δεν επαρκούν ή γίνει κάποια λάθος ρύθμιση στην εκπαίδευση του ΤΝΔ, τότε μπορεί να οδηγηθεί σε προβλέψεις με μεγάλη ανακρίβεια. Στη συγκεκριμένη περίπτωση πιθανολογείται πως οι αποτυχημένες προβλέψεις οφείλονται και στους δυο παράγοντες που αναφέρθηκαν. Η αιτία της πολύ μεγάλης υπερεκτίμησης των τιμών εντοπίζεται σε ένα φαινόμενο που παρατηρείται συχνά στα αποτελέσματα που έχουν προκύψει από ένα ΤΝΔ και έχει να κάνει με την ίδια τη φύση του. Καθώς οι τιμές εισόδου που εισέρχονται σε κάθε κρυφό νευρώνα μετασχηματίζονται από τη συνάρτηση ενεργοποίησης, συνήθως τη σιγμοειδή. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα στα αρχικά στάδια της εκπαίδευσης, οι εκτιμήσεις να βρίσκονται σε μεγάλη συσχέτιση με την σιγμοειδή συνάρτηση, με τον βαθμό συσχέτισης να μειώνεται όσο το ΤΝΔ εκπαιδεύεται. Στην περίπτωση του ΤΝΔ για την εκτίμηση του R_s συνέβη ακριβώς αυτό, όπου για τις πολύ χαμηλές τιμές το ΤΝΔ δεν κατάφερε να

εκπαιδευτεί πλήρως. Η σχηματική αναπαράσταση του φαινομένου που περιγράφηκε απεικονίζεται στο διάγραμμα 7.4.

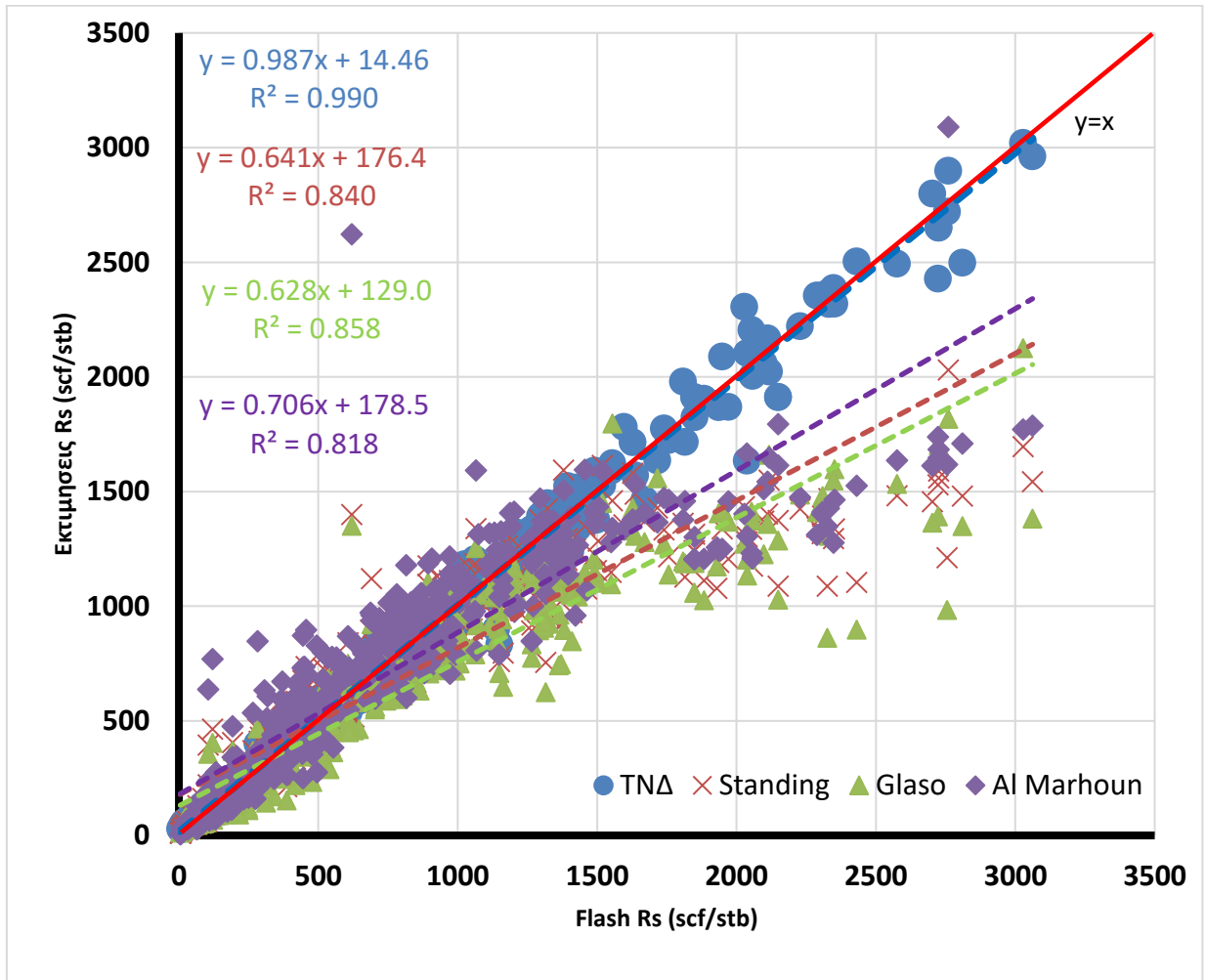


Διάγραμμα 7.4 : Η αποτύπωση της σιγμοειδούς συνάρτησης στις εκτιμήσεις του R_s (μπλε καμπύλη). Με πράσινο χρώμα είναι σημειωμένη η περιοχή υπερεκτίμησης των τιμών από το μοντέλο του ΤΝΔ.

Δυστυχώς, η ατέλεια αυτή στο ΤΝΔ επιβαρύνει κατά πολύ το μέσο σχετικό απόλυτο σφάλμα επί του συνόλου της βάσης δεδομένων. Ένας πρώτος τρόπος αντιμετώπισης θα ήταν η χρήση συνθετικών δεδομένων όπως αναφέρθηκε και στην περίπτωση του B_o . Ένας δεύτερος τρόπος θα ήταν η χρήση μια συσχέτισης (π.χ. του Al Marhoun) για την εκτίμηση των ελάχιστης πτητικότητας ρευστών (μέχρι $R_s = 50$ scf/stb) και η χρήση του ΤΝΔ για τιμές R_s από 100 scf/stb και πάνω. Ανάμεσα μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια γραμμική παρεμβολή για να εξομαλύνει την ασυνέχεια που θα προκύψει από τη χρήση δυο διαφορετικών μεθόδων.

Τέλος παρουσιάζεται στο Διάγραμμα 7.5 η σύγκριση όλων των μεθόδων επί του συνόλου των εργαστηριακών R_s που περιείχε η βάση δεδομένων ενώ στον Πίνακα 7.4 αναγράφονται τα επιμέρους αποτελέσματα των μεθόδων για τα βαριά έως μεσαίας πτητικότητας πετρέλαια, τα υψηλής πτητικότητας και το σύνολο των ρευστών. Από τα αποτελέσματα προκύπτει το πως το μοντέλο του ΤΝΔ είναι αυτό που επιτυγχάνει τις ακριβέστερες προβλέψεις σε όλο το εύρος της βάσης δεδομένων. Η διαφορά με τα αποτελέσματα των συσχέτισεων είναι ακόμα μεγαλύτερη στα πτητικά πετρέλαια. Πάνω από τα 1500 scf/stb όπου οι συσχέτισεις αδυνατούν πλέον να εκτιμήσουν με ακρίβεια τις τιμές του R_s , το μοντέλο του ΤΝΔ παρουσιάζεται συνεπές και αξιόπιστο.

Η μέθοδος των συσχετίσεων φαίνεται πως υστερεί σε πολύ μεγάλο βαθμό όταν πρόκειται να προβλέψει R_s ρευστών υψηλής πητικότητας. Πιο συγκεκριμένα από το Διάγραμμα 7.5 παρατηρείται σαφής υποεκτίμηση των τιμών του R_s από τις συσχετίσεις όλων των



Διάγραμμα 7.5: Σύγκριση των εκτιμώμενων R_s με τα flash R_s επί του συνόλου των ρευστών. Στο διάγραμμα απεικονίζονται για κάθε μέθοδο οι συντελεστές προσδιορισμού R^2 μαζί με τη γραμμή τάσης τους.

συγγραφέων, με τη συσχέτιση του Al Marhoun να επιτυγχάνει λίγο καλύτερα αποτελέσματα από ότι του Standing και του Glaso.

ΕΠΙΔΟΣΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ R_s			
	Μέσο Σχετικό Απόλυτο Σφάλμα		
	$R_s < 1500$ (scf/stb)	$R_s \geq 1500$ (scf/stb)	Full Range R_s
Standing R_s	19%	31%	20.64%
Glazo R_s	25%	33%	25.89%
Al Marhoun R_s	27%	27%	26.93%
ANN R_s	15%	5%	13.69%

Πίνακας 7.5: Πίνακας 7.6: Επίδοση μοντέλων πρόβλεψης R_s για τα βαριά έως μέσης πητικότητας, τα υψηλής πητικότητας και για το σύνολο της βάσης δεδομένων

Γενικά, και στην περίπτωση της εκτίμησης του R_s , το μοντέλο του ΤΝΔ αποδείχθηκε το ακριβέστερο για όλο το εύρος τιμών. Αν εξαιρεθούν τα 10 – 15 ρευστά με την πολύ μικρή τιμή R_s , τότε το μέσο σχετικό απόλυτο σφάλμα επί του συνόλου των ρευστών πέφτει στο 9%, μια εξαιρετικά σημαντική μείωση. Στα πητικά ρευστά η διαφορά στην απόδοση μεταξύ των μεθόδων είναι ακόμα μεγαλύτερη. Συνεπώς, συμπεραίνεται πως οι παλαιότερες μέθοδοι εκτίμησης του R_s από συσχετίσεις μπορούν να αντικατασταθούν επάξια από τη σύγχρονη, γρήγορη και αποτελεσματική μέθοδο των ΤΝΔ.

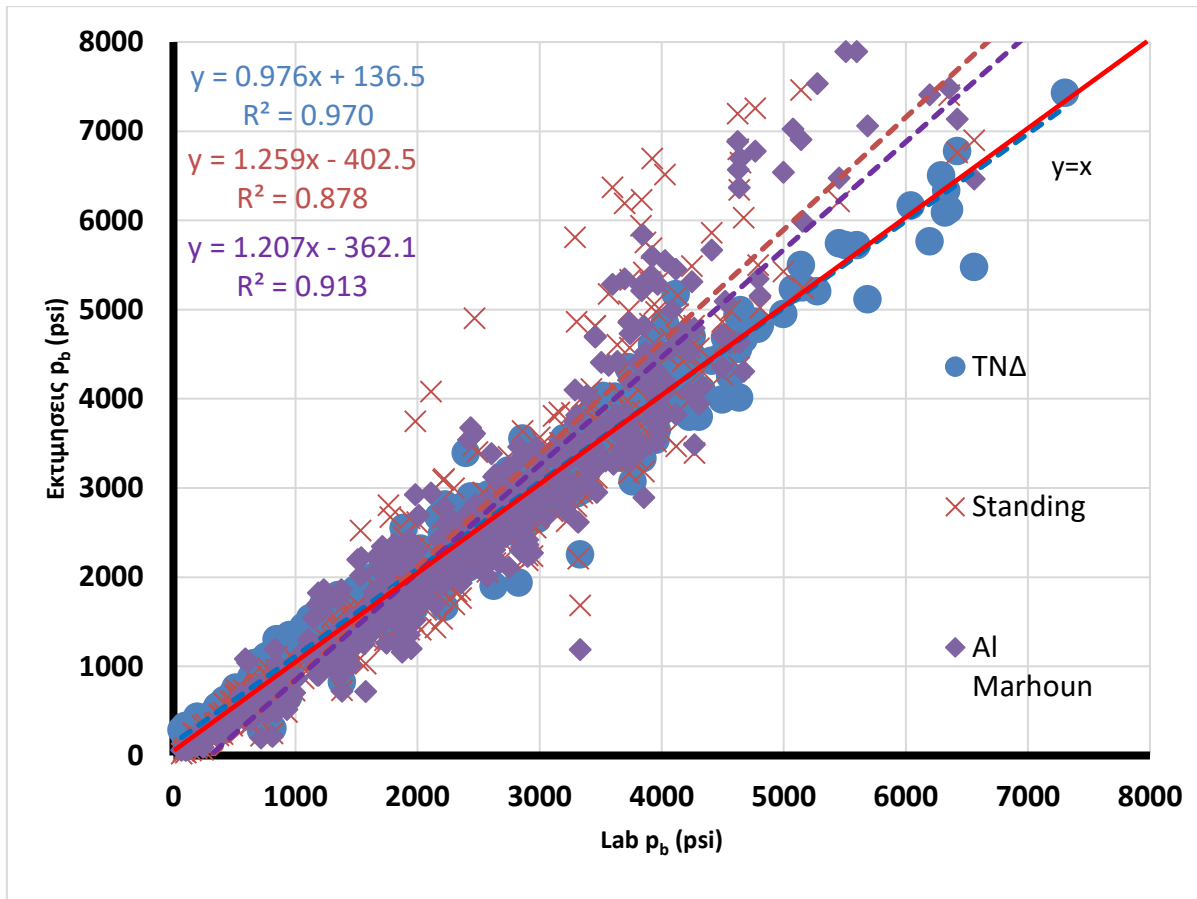
7.4. Κριτική αποτελεσμάτων για την εκτίμηση του p_b

Το p_b ήταν με διαφορά η πιο δύσκολη ιδιότητα ως προς τη σύγκριση των σφαλμάτων καθώς και ως προς την εύρεση της αιτίας τους. Συνεπώς δεν ορίστηκε κάποια τιμή σφάλματος πάνω από την οποία κάποιο ρευστό θα μπορούσε να θεωρηθεί ύποπτο.

Επίσης, στην περίπτωση της εκτίμησης του p_b η κριτική έγινε, ως επί το πλείστον, επί του συνόλου της βάσης δεδομένων, καθώς το p_b είναι μια ιδιότητα με ισοκατανεμημένες τιμές σε όλο το εύρος της που δεν εξαρτάται μόνο από την πητικότητα του ρευστού.

7.4.1. Γενικές Παρατηρήσεις

Στο Διάγραμμα 7.6 παρουσιάζεται η σύγκριση των συσχετίσεων του Standing, Al Marhoun και του μοντέλου του TNΔ με τα εργαστηριακά p_b που περιείχε η βάση δεδομένων ενώ στον Πίνακα 7.5 παρατίθενται τα αποτελέσματα των μεθόδων επί του συνόλου των ρευστών. Παρατηρώντας το διάγραμμα φαίνεται πως το TNΔ είναι το πιο συνεπές και αξιόπιστο σε όλο το εύρος των τιμών του p_b , κάτι που επιβεβαιώνεται από τη γραμμή τάσης του και από τη διασπορά των σημείων σε σχέση με τη διαγώνιο. Ειδικότερα, στα ρευστά με υψηλό p_b το μοντέλο του TNΔ είναι πολύ πιο ακριβές από τις άλλες δυο συσχετίσεις του Standing και του Al Marhoun που φαίνεται να υστερούν πάνω από 3000 και 4000 psi αντίστοιχα. Ενδεικτικά, το μέσο απόλυτο σχετικό σφάλμα μόνο για τα ρευστά με υψηλό p_b (πάνω από 3000 psi) κυμαίνεται στο 7% για το μοντέλο TNΔ, ενώ για τις συσχετίσεις πολύ πιο ψηλά, με τη συσχέτιση του Standing να κυμαίνεται στο 20% και της λίγο ακριβέστερης του Al Marhoun στο 15%. Τέλος, και σε αυτή την περίπτωση το TNΔ δεν κατάφερε να εκτιμήσει με πολύ μεγάλη ακρίβεια τα πολύ χαμηλά p_b , λόγω της επίδρασης της σιγμοειδούς συνάρτησης, όπως περιγράφηκε στην προηγούμενη



Διάγραμμα 7.6: Σύγκριση των εκτιμώμενων p_b με τα εργαστηριακά p_b επί του συνόλου των ρευστών. Στο διάγραμμα απεικονίζονται για κάθε μέθοδο οι συντελεστές προσδιορισμού R^2 μαζί με την γραμμή τάσης τους.

ΕΠΙΔΟΣΗ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ p_b	
	Μέσο Σχετικό Απόλυτο Σφάλμα
	Full Range p_b
Standing p_b	16.92%
AI Marhoun p_b	16.35%
ANN p_b	14.25%

Πίνακας 7.7: Επίδοση μοντέλων πρόβλεψης p_b για το σύνολο της βάσης δεδομένων

ενότητα, κάτι που ανεβάζει σημαντικά τον μέσο όρο του σχετικού απόλυτου σφάλματος του μοντέλου ΤΝΔ.

Γενικά, όπως και στις δυο προηγούμενες περιπτώσεις, η βέλτιστη εκτίμηση του ρ_b επιτυγχάνεται από το μοντέλο του ΤΝΔ για όλο το εύρος τιμών που περιείχε η βάση δεδομένων. Στις υψηλές τιμές το ΤΝΔ απέδειξε πως και στην περίπτωση προσδιορισμού αυτής της ιδιότητας παραμένει συνεπές και αξιόπιστο εκεί που οι συσχετίσεις υστερούν σημαντικά.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8. Συμπεράσματα

8.1. Γενικά συμπεράσματα

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η ανάδειξη δυο νέων σχετικά τεχνολογιών στον χώρο της Μηχανικής Πετρελαίων, της Υπόγειας Ανάλυσης Ρευστού και των Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων. Πιο συγκεκριμένα, η εργασία εστίασε στο πως ο συνδυασμός αυτών των δύο τεχνολογιών δύναται να αντικαταστήσει παραδοσιακές μεθόδους εκτίμησης, όπως οι εμπειρικές συσχετίσεις ή ακόμα, σε ορισμένες περιπτώσεις, τις εργαστηριακές. Για τον σκοπό αυτό υλοποιήθηκαν τρία ΤΝΔ που να προσδιορίζουν τις βασικότερες ογκομετρικές ιδιότητες, τη διαλυτότητα του αερίου στο πετρέλαιο R_s , το συντελεστή μεταβολής όγκου του πετρελαίου B_o και το σημείο φυσαλίδας p_b . Τα ΤΝΔ αξιοποίησαν τη σύσταση του ρευστού όπως αυτή προσδιορίζεται από το εργαλείο YAP στις ομάδες συστατικών CO_2 , C_1 , C_2 , C_{3-5} , C_{6+} για να προβούν στις εκτιμήσεις των τιμών τους. Τέλος, τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τα μοντέλα εκτίμησης των ΤΝΔ συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα των συσχετίσεων τριών διάσημων συγγραφέων, του Standing, του Glaso και του Al Marhoun. Καθ' όλη την εν λόγω διαδικασία εξήχθησαν συμπεράσματα, τα σημαντικότερα των οποίων αναφέρονται παρακάτω:

- Ξεκινώντας από τα αρνητικά, η μέθοδος των ΤΝΔ φάνηκε να υστερεί σημαντικά στις περιπτώσεις ρευστών με υψηλή συγκέντρωση ανόργανων ουσιών και πιο συγκεκριμένα του H_2S . Καθώς το εργαλείο YAP δεν δύναται να ανιχνεύσει την ύπαρξη του H_2S η σύσταση που εισάγεται μετέπειτα στο ΤΝΔ δεν περιέχει πληροφορία για την συγκέντρωσή του. Συνεπώς τα ΤΝΔ πρόβλεψης των B_o και R_s υποεκτιμούν σημαντικά τις τιμές αυτών των ιδιοτήτων.
- Το δεύτερο αρνητικό συμπέρασμα που παρατηρήθηκε ήταν η επιρροή που είχε στα μοντέλα των ΤΝΔ εκτίμησης του R_s και p_b η σιγμοειδής συνάρτηση ενεργοποίησης, λόγω της ελλιπούς εκπαίδευσης. Το ΤΝΔ ήταν αδύνατο να προβεί σε ακριβείς προβλέψεις των ρευστών με σχεδόν μηδενικές τιμές R_s και p_b . Τρόποι αντιμετώπισης προταθήκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο και στηρίζονται στην επανάληψη της εκπαίδευσης με λεπτομερέστερα εργαλεία που δίνουν μεγαλύτερο έλεγχο της διαδικασίας στον χρήστη.
- Στην περίπτωση εκτίμησης του B_o αποδείχθηκε πως στα χαμηλής πτητικότητας ρευστά, όλες οι προσδιοριστικές μέθοδοι ανταποκρίνονται ικανοποιητικά. Το

πλεονέκτημα της μεθόδου των ΤΝΔ έναντι των συσχετίσεων εμφανίζεται στα υψηλής πτητικότητας ρευστά, εκεί όπου οι συσχετίσεις υστερούν. Το μικρό πλήθος ρευστών υψηλής πτητικότητας δεν έδειξε να επηρεάζει σημαντικά την ακρίβεια του ΤΝΔ σε αυτή την γκάμα τιμών B_o .

- Στην περίπτωση εκτίμησης του R_s , το μοντέλο του ΤΝΔ επιτυγχάνει καλύτερα αποτελέσματα σε σύγκριση με αυτά των συσχετίσεων για όλο το εύρος τιμών της βάσης δεδομένων. Το βασικό πλεονέκτημα του ΤΝΔ έγκειται και σε αυτή την περίπτωση, στην πρόβλεψη της τιμής του R_s των πτητικών πετρελαίων. Στις περιπτώσεις όπου οι συσχετίσεις αδυνατούν να προσεγγίσουν την πειραματική τιμή του R_s , το ΤΝΔ παρουσιάζεται αξιόπιστο και συνεπές.
- Η περίπτωση της εκτίμησης του p_b ήταν η δυσκολότερη και από την πλευρά του ΤΝΔ και από αυτή των συσχετίσεων. Αφορά μια ιδιότητα πολύ δύσκολη ως προς τον προσδιορισμό της. Βεβαία και σε αυτή την περίπτωση τα καλύτερα αποτελέσματα επιτυγχάνονται από το μοντέλο του ΤΝΔ και αφορούν το συνολικό εύρος τιμών της βάσης δεδομένων

Εν κατακλείδι, η παρούσα εργασία απέδειξε πως ο συνδυασμός της ΥΑΡ και των ΤΝΔ παρέχει πολύ πιο άμεσα, αξιόπιστα και για μεγαλύτερη γκάμα ρευστών πληροφορίες για τις ογκομετρικές ιδιότητες των πετρελαϊκών ρευστών R_s , B_o , p_b από ότι οι παραδοσιακές συσχετίσεις. Με μια απλή βάση δεδομένων και με μια δημοφιλή και σύγχρονη τεχνολογία όπως τα ΤΝΔ επιτεύχθηκε η εκτίμηση με μεγάλη ακρίβεια τριών εξαιρετικά σημαντικών πετρελαϊκών ιδιοτήτων. Προφανώς, η ακρίβεια που επιτυγχάνουν δεν είναι ίδια με τις εργαστηριακές μεθόδους ή του μοντέλου Καταστατικών Εξισώσεων, όμως σε περιπτώσεις που η πληροφορία είναι αναγκαίο να ληφθεί άμεσα και οικονομικά ενδέχεται να προτιμηθούν από τις ακριβέστερες σε σχέση με αυτή μεθόδους.

8.2. Προτάσεις για περαιτέρω διερεύνηση

Ένα πολύ σημαντικό στοιχείο που επηρεάζει την αδυναμία λήψης εξαιρετικά καλών προβλέψεων, πέρα από την έλλειψη πληροφορίας για το N_2 και H_2S , είναι το γεγονός ότι η είσοδος των ΤΝΔ δεν περιλαμβάνει εξίσου βασικές πληροφορίες όπως, η επιμέρους συγκέντρωση των συστατικών C_3 , C_4 , C_5 (από το κλάσμα C_{3-5}) καθώς και η ανάλυση του κλάσματος C_{6+} σε λεπτομερέστερη περιγραφή. Η αδυναμία αυτή προτείνεται να ξεπεραστεί με την χρήση ΤΝΔ τα όποια, εκμεταλλευόμενα πληροφορίες δεδομένων πεδίου

(όταν αυτές είναι διαθέσιμες) όπως η ειδική πυκνότητα αερίου τανκ γ_g και η πυκνότητα API του πετρελαίου τανκ να μπορούν να προβούν σε εκτιμήσεις των ιδιοτήτων του C₃₋₅ και του βαρέος κλάσματος, αυξάνοντας σημαντικά την ακρίβεια της μεθόδου.

Βιβλιογραφικές Αναφορές

- [1] P. P. Tarek Ahmed, Equations of State and PVT analysis - Applications for Improved Reservoir Modeling, Kidlington, Oxford: Gulf Professional Publishing is an imprint of Elsevier, 2016.
- [2] P. Boyun Guo, L. P. Xinghui and T. P. Xuehao, Petroleum Production Engineering - Second Edition, Kidlington, Oxford: Gulf Professional Publishing is an imprint of Elsevier, 2017.
- [3] C. H. Whitson and M. R. Brule, «PHASE BEHAVIOR,» Henry L. Doherty Memorial Fund of AIME SPE Inc., Richardson, Texas, 2000.
- [4] C. S. Dong , M. S. S. O'Keefe, H. S. Elshahawi, M. S. S. Hashem, S. S. S. Williams, D. E. N. Stensland, P. S. Hegeman, R. S. Vasques, T. S. Terabayashi, O. S. Mullins και E. S. Donzier, «New Downhole-Fluid-Analysis Tool for Improved Characterization,» *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, December 2008.
- [5] K. Indo, H. Kai και P. S. Julian, «Estimation of Fluid Composition From Downhole Optical Spectrometry,» *SPE Journal*, December 2015.
- [6] J. P. Zuo, P. Julian, A. Gisolf, K. Wang, L. Chen and D. S. Hadrien, «A NEW FLUID PROPERTY - INSITU FORMATION VOLUME FACTORS FROM FORMATION TESTING,» σε *SPWLA 57th Annual Logging Symposium*, Reykjavik, Iceland, 2016.
- [7] P. S. Hegeman, C. S. S. Dong, N. S. Varotsis and V. S. T. U. ο. C. Gaganis, «Application of Artificial Neural Networks to Downhole Fluid Analysis,» *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, February 2009.