



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΡΕΥΝΑΣ & ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗΣ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΩΝ



ΒΑΣΙΛΙΚΗ ΛΟΥΙΖΑ Α. ΧΡΙΣΤΙΔΗ
Πτυχιούχος Μηχανικός Ορυκτών Πόρων

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ
ΜΑΖΑΣ ΣΕ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΕΣ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

*ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΈΡΕΥΝΑ & ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗ ΥΔΡΟΓΟΝΑΝΘΡΑΚΩΝ*

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
2022



[λευκή σελίδα]



ΒΑΣΙΛΙΚΗ ΛΟΥΙΖΑ Α. ΧΡΙΣΤΙΔΗ
Πτυχιούχος Μηχανικός Ορυκτών Πόρων

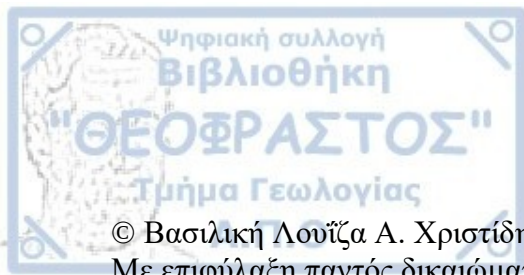
ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ ΜΑΖΑΣ ΣΕ
ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΕΣ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας στα πλαίσια του Προγράμματος Μεταπτυχιακών
Σπουδών "Ερευνα και Εκμετάλλευση Υδρογονανθράκων"

Ημερομηνία Προφορικής Εξέτασης: 14/07/2022

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή

Καθηγητής Γαγάνης Βασίλειος, Επιβλέπων
Καθηγήτρια Σταματάκη Μαρία, Μέλος Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής
Καθηγητής Γεωργακόπουλος Ανδρέας, Μέλος Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής



© Βασιλική Λουΐζα Α. Χριστίδη, Μηχανικός Ορυκτών Πόρων, 2022

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ ΜΑΖΑΣ ΣΕ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΕΣ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ – Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

© Vasiliki Louiza A. Christidi, Mineral Resources Engineer, 2022

All rights reserved.

DEVELOPMENT OF A WORKFLOW TO APPLY THE MATERIAL BALANCE APPROACH IN OIL RESERVOIRS – Master Thesis

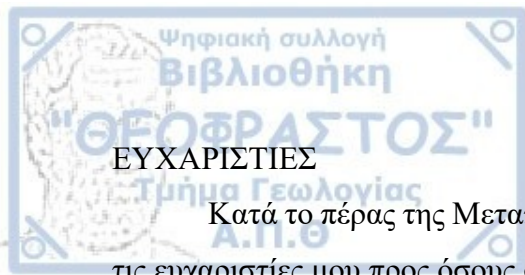
Citation:

Χριστίδη Β.Λ. Α., 2022. – Ανάπτυξη διαδικασίας εφαρμογής της μεθόδου ισοζυγίου μάζας σε ταμειυτήρες πετρελαίου. Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., 85 σελ.

Christidi V.L. A., 2022. – Development of a workflow to apply the material balance approach in oil reservoirs. Master Thesis, School of Geology, Aristotle University of Thessaloniki, 85 pp.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι εκφράζουν τις επίσημες θέσεις του Α.Π.Θ.



ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Κατά το πέρας της Μεταπτυχιακής διπλωματικής μου εργασίας, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου προς όσους συντέλεσαν στην διαδικασία εκπόνησης της.

Πρώτα από όλους θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά, τον επιβλέποντα επίκουρο καθηγητή Δρ. Βασίλειο Γαγάνη, της σχολής Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για την ουσιαστική καθοδήγηση, την εμπιστοσύνη και την υποστήριξη καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας εργασίας.

Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά, τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής την καθηγήτρια της σχολής Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, κα. Σοφία Σταματάκη και τον καθηγητή του τμήματος Γεωλογίας του Αριστοτελείου πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης κ. Ανδρέα Γεωργακόπουλο, που δέχτηκαν λάβουν μέρος στην αξιολόγηση αυτής της μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας. Καθώς και ένα θερμό ευχαριστώ, στην κα. Ευαγγελία Κόφφα, για την πολύτιμη βοήθεια που μου παρείχε και τις καίριες διορθώσεις που υπέδειξε κατά την ολοκλήρωση της εργασίας.

Ακόμα θα ήθελα να ευχαριστήσω, όλους τους προαναφερθέντες καθηγητές και καθηγήτριες για τις πολύτιμες γνώσεις που μετάδωσαν κατά τη διάρκεια του μεταπτυχιακού προγράμματος παρά τις δυσκολίες που προέκυψαν λόγω της πανδημίας. Καθώς και ένα ιδιαίτερο ευχαριστώ στον κ. Γεωργακόπουλο, που ως πρόεδρος του Δ.Μ.Π.Σ «Έρευνα και Εκμετάλλευση Υδρογονανθράκων» φρόντισε να διεξαχθεί το πρόγραμμα με τον καλύτερο δυνατό τρόπο.

Επιπλέον, θα ήθελα να εκφράσω ένα θερμό ευχαριστώ προς την PETEX company, για την παροχή ακαδημαϊκής άδειας χρήσης της Integrated Production Modelling Software (IPM) suite, στο Δ.Μ.Π.Σ. «Έρευνα και Εκμετάλλευση Υδρογονανθράκων».

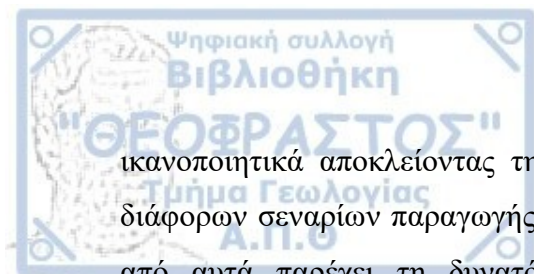
Τέλος, ευχαριστώ εκ βάθους καρδιάς τα οικεία μου πρόσωπα, για την αμέριστη υποστήριξη που μου παρείχαν όλο αυτό το διάστημα.

Η Μηχανική Ταμιευτήρων (Reservoir Engineering) αποτελεί τον κλάδο της Μηχανικής Πετρελαίου (Petroleum Engineering) που μελετά τη ροή των πετρελαϊκών ρευστών στο εσωτερικό ενός υπόγειου πορώδους σχηματισμού, δηλαδή του ταμιευτήρα και που αποσκοπεί στη βελτιστοποίηση της ανάκτησης των υδρογονανθράκων. Καθώς η φυσική προσέγγιση του ταμιευτήρα για τους παραπάνω σκοπούς δεν είναι εφικτή, προκειμένου να εκτιμηθεί η κατάσταση που επικρατεί στον ταμιευτήρα σε κάθε φάση της ζωής τους, έχουν αναπτυχθεί δύο ευρέως χρησιμοποιούμενες μέθοδοι, αυτές της Προσομοίωσης Ταμιευτήρων (Reservoir Simulation) και του Ισοζυγίου Μάζας (Material Balance Method).

Η παρούσα διπλωματική εργασία σκοπό έχει την ανάλυση της Μεθόδου Ισοζυγίου Μάζας σε ταμιευτήρες υδρογονανθράκων και τη λεπτομερή ανάπτυξη μίας διαδικασίας εφαρμογής της μεθόδου με τη χρήση του βιομηχανικού λογισμικού MBal της IPM Suite. Συγκεκριμένα, παρουσιάζονται τα επιμέρους εργαλεία που αξιοποιεί η Μέθοδος Ισοζυγίου Μάζας (Material Balance Method) και η μεθοδολογία (workflow) εφαρμογής της μεθόδου για την εκτίμηση των αβέβαιων χαρακτηριστικών του ταμιευτήρα και για την πρόβλεψη της μελλοντικής απόδοσης. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η υπολογιστική υλοποίηση των παραπάνω στο εργαλείο “material balance” του λογισμικού MBal. Τελικά, αναπτύσσεται μια μελέτη περίπτωσης (Case study) εφαρμογής της προτεινόμενης μεθοδολογίας σε ταμιευτήρα πετρελαίου (αρχικά ακόρεστου και μη ογκομετρικού), με τη χρήση του λογισμικού MBal.

Η μεθοδολογία (workflow) που αναπτύχθηκε χωρίζεται σε δυο μέρη. Το πρώτο μέρος σχετίζεται με την εκτίμηση και χρησιμοποιείται ως μηχανισμό το history matching, το οποίο μέσω της αρχής δοκιμής και σφάλματος υπολογίζει τις βέλτιστες τιμές για τα αρχικά εκτιμώμενα μεγέθη έτσι ώστε να ικανοποιείται η εξίσωση Ισοζυγίου Μάζας. Δεδομένα εισόδου αποτελούν τα ιστορικά δεδομένα παραγωγής, δεδομένα PVT και γεωλογικές εκτιμήσεις για αποθέματα, κορεσμό και ύπαρξη υδροφορέα. Κατά το δεύτερο μέρος της μεθοδολογίας (workflow) για την πρόβλεψη της μελλοντικής απόδοσης, έχοντας πλέον διαθέσιμο το history matched μοντέλο και τη παροχή παραγωγής, πραγματοποιείται ο μηχανισμός πρόβλεψης για διάφορα σενάρια παραγωγής και επιλέγεται το βέλτιστο αυτών.

Τα κυριότερα συμπεράσματα που προκύπτουν είναι πως ενώ η Μέθοδος Ισοζυγίου Μάζας (Material Balance Method) αποτελεί μια υπολογιστικά απλή μέθοδο, με χαμηλές απαιτήσεις σε όγκο δεδομένων, εισαγάγει συγχρόνως μικρό ρίσκο στις προβλέψεις που παρέχει. Ακόμα, είναι ταχύτερη μέθοδος και πιο οικονομική σε σχέση με τις υπόλοιπες μεθόδους. Επιπλέον, ενώ δεν αποτελεί την πιο ακριβή μέθοδο, τα αποτελέσματα που δίνει είναι



ικανοποιητικά αποκλείοντας την εμφάνιση σημαντικών αποκλίσεων. Τέλος, η εφαρμογή διάφορων σεναρίων παραγωγής και η ανάλυση της προβλεπόμενης απόδοσης για κάθε ένα από αυτά παρέχει τη δυνατότητα βελτιστοποίησης της μελλοντικής διαχείρισης του ταμειυτήρα υδρογονανθράκων.

ABSTRACT

Reservoir Engineering is the part of Petroleum Engineering that studies the flow of petroleum fluids inside an underground porous formation, i.e., the reservoir, and aims to optimize the recovery of hydrocarbons. As the physical approximation of the reservoir is not feasible, in order to estimate the reservoir characteristics, two primary used methods have been developed, the Reservoir Simulation and the Material Balance Method.

The purpose of this thesis is the analysis of MBE in hydrocarbon reservoirs and the detailed development of the application of the method using the MBal industrial software of the IPM Suite. Specifically, the individual tools utilized by the Material Balance Method and the workflow of method application are presented to calculate the uncertain characteristics of the reservoir and to predict future performance. Then the computational implementation of the above is presented in the "material balance" tool of the MBal software. Finally, a Case study is developed to apply the proposed methodology to an oil reservoir (initially unsaturated and non-volumetric), using the MBal software.

The workflow developed is divided into two parts. The first part is related to the estimation of reservoir characteristics; It uses as mechanism the history matching process, which through the test and error principle calculates the optimal values for the initially estimated parameters so that the Material Balance equation is satisfied. Input data are historical production data, PVT data and geological estimates for the initials hydrocarbon's volumes in place, reservoir's saturation and the existence of an aquifer. During the second part of the workflow to predict future performance, having the history matched model and production flow rates available, the forecasting mechanism for various production scenarios is carried out and the optimal ones is selected.

The main conclusions that emerge are that while the Material Balance is a computationally simple method, with low data volume requirements, it also introduces a small risk in the forecast. It is a faster method and more economical than the other methods. In addition, while it is not the most accurate method, it gives satisfactory results by excluding the appearance of significant deviations. Finally, the implementation of various production scenarios and the analysis of the reservoir's performance for each of them allow for optimization of the future management of the hydrocarbon reservoir.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΜΒΟΛΩΝ

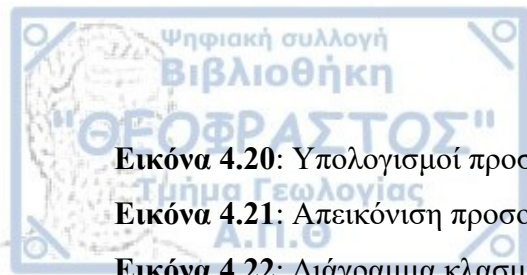
B_g	Ογκομετρικός συντελεστής αερίου [res.vol./st.vol.]
B_o	Ογκομετρικός συντελεστής πετρελαίου [res.vol./st.vol.]
B_w	Ογκομετρικός συντελεστής νερού [res.vol./st.vol.]
c_f	Συμπιεστότητα πόρων πετρώματος (pressure ⁻¹)
c_w	Συμπιεστότητα νερού (pressure ⁻¹)
m	Λόγος όγκου αρχικών αποθεμάτων αερίου προς όγκο αρχικών αποθεμάτων πετρελαίου (res.vol. "of gas cap"/res.vol. "of oil zone")
N	Όγκος αρχικών αποθεμάτων πετρελαίου στον ταμιευτήρα (st.vol.)
G_p	Αθροιστική παραγωγή αερίου (st.vol.)
N_p	Αθροιστική παραγωγή πετρελαίου (st.vol.)
W_p	Αθροιστική παραγωγή νερού (st.vol.)
R_p	Λόγος αθροιστική παραγωγή αερίου προς αθροιστική παραγωγή πετρελαίου $= G_p/N_p$
R_s	Λόγος του εν διαλύσει αερίου στο πετρέλαιο (st.vol.gas/st.vol.oil)
W_e	Αθροιστικά εισερχόμενο νερό από υδροφορέα στον ταμιευτήρα υδρογονανθράκων
S_g	Κορεσμός αερίου
S_o	Κορεσμός πετρελαίου
S_w	Κορεσμός νερού
k	Απόλυτη διαπερατότητα σχηματισμού
k_{ei}	Ενεργός διαπερατότητα κάθε φάσης (πετρελαίου, νερού, αερίου)
k_{ri}	Σχετική διαπερατότητα κάθε φάσης (πετρελαίου, νερού, αερίου)
ρ	Πυκνότητα
φ	Πορώδες
T	Θερμοκρασία
P	Πίεση
P_R	Πίεση ταμιευτήρα
P_b	Πίεση κορεσμού (πίεση στο σημείο bubble point)
n_p	Αριθμός moles παραγωγής αερίου
n_i	Αριθμός moles αρχικών αποθεμάτων αερίου στον ταμιευτήρα
n_f	Αριθμός moles απομένοντος αερίου στον ταμιευτήρα
z	Συντελεστής συμπιεστότητα αερίου

ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1.1: Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας Constant Composition Expansion (CCE).	8
Εικόνα 1.2: Διάγραμμα πίεσης – όγκου, που προκύπτει από Constant Composition Expansion (CCE) πείραμα. Από την τομή των δυο ευθειών προκύπτει το σημείο που αντιστοιχεί στην πίεση σημείου φυσαλίδας (Bubble Point pressure) του ρευστού.	8
Εικόνα 1.3: Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας Differential Vaporization (DV).	9
Εικόνα 1.4: Πειραματική διαδικασία DVC μελέτης.	10
Εικόνα 1.5: Separator test πολλαπλών σταδίων. (El-hoshoudy, 2019).	12
Εικόνα 1.6: Ρύθμιση συσχετίσεων (correlation matching).	13
Εικόνα 1.7: Διαγράμματα σχετικών διαπερατοτήτων προς τους κορεσμούς. (Koederitz, et al., 2018)	18
Εικόνα 1.8: Σύστημα ακτινικής ροής (Dandekar, 2010)	21
Εικόνα 1.9: Σύστημα (α) σταθερής ροής (steady state) και (β) ψευδοσταθερής ροής (pseudo- ή semi-steady state).....	22
Εικόνα 1.10: Απεικόνιση θεωρητικής μεταβολής όγκων ταμιευτήρα καθώς η πίεση μειώνεται κατά Δp , λόγω αύξησης όγκου του ταμιευτήρα.	25
Εικόνα 1.11: Θεωρητικός ταμιευτήρας αερίου, σταθερού όγκου με εισροή νερού. (Ahmed & Meehan, 2012)	30
Εικόνα 2.1: Διάγραμμα $F - E_o$, για ακόρεστο – ογκομετρικό ταμιευτήρα, $We=0$, $m=0$	38
Εικόνα 2.2: Διάγραμμα $(E_o+mE_g) - F$, για την περίπτωση κορεσμένου και ογκομετρικού ταμιευτήρα, $F=N(E_o+E_g)$. Η κλίση της ευθείας που προκύπτει από τη βέλτιστη ευθεία ισούται με τα αποθέματα N	39
Εικόνα 2.3: Διάγραμμα E_g/E_o με F/E_o , για κορεσμένο και μη ογκομετρικό ταμιευτήρα. Η εξίσωση είναι της μορφής $y=ax+b$, με $b= N$ και $a=mN$ επομένως υπολογίζονται μέσω του διαγράμματος τα αποθέματα N και το κλάσμα m	40
Εικόνα 2.4: Διάγραμμα Campbell, επιβεβαιώνει την ύπαρξη ή μη υδροφορέα, καθώς και την ισχύς αυτού. (Anon., 2020).....	41
Εικόνα 2.5: Energy plot δεικτών περιγράφουν τη συμμετοχή του κάθε μηχανισμού παραγωγής ως προς το χρόνο.....	42
Εικόνα 2.6: Διάγραμμα Havlena – Odeh F/E_g προς G_p για ταμιευτήρες αερίου – Εξακρίβωση ύπαρξης ή μη υδροφορέα καθώς και της έντασης συμμετοχής του.	43
Εικόνα 2.7: Διάγραμμα F/E_g προς $\Sigma(\Delta p W_{ED})/(B_g-B_{gi})$. (Ahmed, 2019).....	44
Εικόνα 2.8: Διάγραμμα λόγου P_i/Z_i προς την αθροιστική παραγωγή αερίου.	45

Εικόνα 2.9: Γραφικός προσδιορισμός των αρχικών αποθεμάτων αερίου G (gas initially in place). (Ahmed, 2019)	47
Εικόνα 2.10: Διάγραμμα γραφικής εκτίμησης αποθεμάτων για Μη ογκομετρικό ταμιευτήρα αερίου.....	48
Εικόνα 2.11: Γραφική απεικόνιση του GOR και του Rs, ως προς την πίεση P. Το GOR ταυτίζεται γραφικά με το Rs για ακόρεστο ταμιευτήρα. (Ahmed, T., & Meehan, D. N. 2012)	50
Εικόνα 3.1: Επιλογή εργαλείου Material balance του λογισμικού MBal.	57
Εικόνα 3.2: Επιλογές συστήματος (είδος ταμιευτήρα, μοντέλου ρευστού)	58
Εικόνα 3.3: Εισαγωγή δεδομένων που αφορούν τις ιδιότητες του ρευστού.....	58
Εικόνα 3.4: Εισαγωγή PVT μετρήσεων για τη ρύθμιση συσχετίσεων.	59
Εικόνα 3.5: Ρύθμιση συσχετίσεων (correlation matching).	59
Εικόνα 3.6: Εισαγωγή παραμέτρων που αφορούν τα πετροφυσικά χαρακτηριστικά του ταμιευτήρα και γεωλογικές εκτιμήσεις.....	60
Εικόνα 3.7: Εισαγωγή μοντέλου περιγραφής υδροφορέα.....	60
Εικόνα 3.8: Εισαγωγή δεδομένων για τον προσδιορισμό των σχετικών διαπερατοτήτων.....	61
Εικόνα 3.9: Εισαγωγή ιστορικά καταγεγραμμένων δεδομένων παραγωγής.	61
Εικόνα 3.10: Διάγραμμα κύριων μηχανισμών παραγωγής (Energy Plot), Graphical Method (Campbell plot) και Analytical Method.	63
Εικόνα 3.11: Graphical Method (Campbell plot).....	63
Εικόνα 3.12: Διάγραμμα P - cumulative oil production (Analytical Method).....	64
Εικόνα 3.13: Διορθωμένο διάγραμμα Campbell, ως προς την ύπαρξη υδροφορέα (Graphical method).	65
Εικόνα 3.14: Διορθωμένο Energy plot ως προς την ύπαρξη υδροφορέα.	65
Εικόνα 3.15: Διορθωμένο αναλυτικό διάγραμμα ως προς την ύπαρξη υδροφορέα.	66
Εικόνα 3.16: Διάγραμμα συνάρτησης υδροφορέα με το χρόνο.....	66
Εικόνα 3.17: Διαδικασία παλινδρόμησης (Regression).....	67
Εικόνα 3.18: Διάγραμμα WD (function plot) μετά τη διαδικασία Regression.....	67
Εικόνα 3.19: Διάγραμμα Campbell μετά τη διαδικασία Regression.	68
Εικόνα 3.20: Energy plot μετά τη διαδικασία Regression.	68
Εικόνα 3.21: Αναλυτικό διάγραμμα μετά τη διαδικασία Regression.	69
Εικόνα 3.22: Διάγραμμα πίεσης προς χρόνο για ιστορική παραγωγή και προσομοιωτή.	70
Εικόνα 3.23: α) Καμπύλες κλασματικής ροής κατά τη διαδικασία του Regression. β) Καμπύλη κλασματικής ροής που ταυτίζεται με τα δεδομένα.	71

Εικόνα 3.24: Εισαγωγή τύπου πρόβλεψης, το σημείο έναρξης και τέλους της πρόβλεψης και η συχνότητα αναφοράς.	71
Εικόνα 3.25: α) παράθυρο εισαγωγής δεδομένων ρυθμών ροής για ένα τανκ και β) εισαγωγής δεδομένων breakthrough water και gas saturations.	73
Εικόνα 3.26: Παράθυρο εισαγωγής δεδομένων ρυθμών ροής για πολλά τανκ	73
Εικόνα 3.27: Παράθυρο ορισμού αναφοράς πρόβλεψης.	74
Εικόνα 3.28: Παράθυρο υπολογισμού των δεδομένων πρόβλεψης.	75
Εικόνα 3.29: Διάγραμμα που απεικονίζονται με τα δεδομένα παραγωγής και τα δεδομένα προσομοίωσης.....	75
Εικόνα 4.1: Εισαγωγή επιλογών για το ρευστό του ταμιευτήρα (πετρέλαιο) και χρήσης του Black oil model.	77
Εικόνα 4.2: Εισαγωγή δεδομένων που αφορούν τις ιδιότητες του ρευστού.....	78
Εικόνα 4.3: Παράμετροι όλων των διαθέσιμων συσχετίσεων.	79
Εικόνα 4.4: Εισαγωγή PVT δεδομένων, μοντέλου υδροφορέα, σχετικές διαπερατότητες, ιστορικά δεδομένα παραγωγής.	80
Εικόνα 4.5: Απεικόνιση του GOR με τον χρόνο.....	82
Εικόνα 4.6: Αναλυτικό διάγραμμα (P-cumulative oil production).	83
Εικόνα 4.7: Διάγραμμα Campbell.....	83
Εικόνα 4.8: Energy plot.....	84
Εικόνα 4.9: Αναλυτικό διάγραμμα, πραγματικά ιστορικά δεδομένα παραγωγής και δεδομένα μοντέλου.	84
Εικόνα 4.10: Διάγραμμα Campbell για τις γραφικές μεθόδους, δείχνει την ύπαρξη υδροφορέα.	85
Εικόνα 4.11: Εισαγωγή μοντέλου που περιγράφει τον υδροφορέα.	85
Εικόνα 4.12: Διορθωμένο διάγραμμα Campbell, ως προς την ύπαρξη υδροφορέα (Graphical method).	86
Εικόνα 4.13: Διορθωμένο Energy plot ως προς την ύπαρξη υδροφορέα.	87
Εικόνα 4.14: Διορθωμένο αναλυτικό διάγραμμα ως προς την ύπαρξη υδροφορέα.	87
Εικόνα 4.15: Διάγραμμα συνάρτησης υδροφορέα με το χρόνο.....	88
Εικόνα 4.16 : Διαδικασία παλινδρόμησης (regression) α) υπολογισμός τιμών, β) αποδοχή τιμών.	89
Εικόνα 4.17: Διάγραμμα Campbell μετά τη διαδικασία Regression.	90
Εικόνα 4.18: Energy plot μετά τη διαδικασία Regression.	90
Εικόνα 4.19: Αναλυτικό διάγραμμα μετά τη διαδικασία Regression.	91

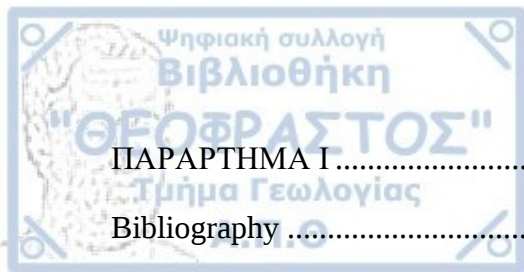


Εικόνα 4.20: Υπολογισμοί προσομοίωσης (run simulation).	92
Εικόνα 4.21: Απεικόνιση προσομοίωσης.....	92
Εικόνα 4.22: Διάγραμμα κλασματικής ροής και κορεσμού.....	93
Εικόνα 4.23: Διόρθωση τιμών των παραμέτρων της εξίσωσης Corey, λόγω της διαδικασίας ταύτισης της καμπύλης κλασματικής ροής του νερού (Fw History matching).	94
Εικόνα 4.24: Επιλογή μοντέλου πρόβλεψης και χρονικού διαστήματος.....	95
Εικόνα 4.25: Τιμές μέσου όρου ροής πετρελαίου ανά ημέρα.....	96
Εικόνα 4.26: Υπολογισμοί πρόβλεψης για το χρονικό διάστημα ιστορικής παραγωγής.	96
Εικόνα 4.27: Διάγραμμα κορεσμών από προσομοίωση και από πρόβλεψη.	97
Εικόνα 4.28: (α) Επιλογή μοντέλου και χρόνου πρόβλεψης, (β) εισαγωγή μέσου όρου παραγωγής ανά ημέρα.	98
Εικόνα 4.29: Υπολογισμοί μελλοντικής πρόβλεψης στη βάση της παραγωγής των 10,000 stb/day.	99

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΜΕΘΟΔΟΥ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ ΜΑΖΑΣ.....	5
Εισαγωγή.....	5
1.1 Δεδομένα.....	5
1.2 Μοντέλα περιγραφής συμπεριφοράς ρευστών (PVT models-Fluid models)	6
1.2.1 Εργαστηριακά PVT πειράματα.....	7
1.2.2 Μοντέλα περιγραφής συμπεριφοράς ρευστών (Fluid models).....	12
1.2.3 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα μεθόδων εκτίμησης ιδιοτήτων πετρελαϊκών ρευστών	15
1.3 Μοντέλα υδροφορέων (Aquifer Models)	15
1.4 Μοντέλα σχετικών διαπερατοτήτων (Relative permeability models)	17
1.5 Νόμος του Darcy - Ροή ρευστών σε πορώδες μέσο	19
1.5.1 Εφαρμογή νόμου Darcy σε πολυφασική ροή	23
1.5.2 Κλασματικές ροές (Fractional flows)	24
1.6 Εξισώσεις Ισοζυγίου Μάζας (Material Balance Equation)	24
1.6.1 Εξίσωση Ισοζυγίου Μάζας για ταμιευτήρες πετρελαίου (Material Balance Equation for Oil Reservoirs).....	24
1.6.1.1 Ισοδύναμη έκφραση της εξίσωσης ισοζυγίου μάζας για ταμιευτήρες πετρελαίου	28
1.6.2 Εξίσωση Ισοζυγίου Μάζας για ταμιευτήρες ξηρού αερίου (Material Balance Equation for Dry Gas Reservoirs).....	29
1.6.2.1 Ισοδύναμη έκφραση της εξίσωσης ισοζυγίου μάζας για ταμιευτήρες ξηρού αερίου	31
1.6.3 Ακρίβεια εξίσωσης Ισοζυγίου Μάζας.....	32
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕΘΟΔΟΥ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ ΜΑΖΑΣ.....	34
Εισαγωγή.....	34
2.1 Εκτίμηση κατάστασης ταμιευτήρα	34
2.1.1 Γραφικές μέθοδοι για ταμιευτήρες πετρελαίου	37

2.1.1.1	Havlena-Odeh	37
2.1.1.2	Διάγραμμα Campbell	40
2.1.1.3	Energy Plot.....	41
2.1.2	Γραφικές μέθοδοι για ταμιευτήρες αερίου	42
2.1.2.1	Havlena – Odeh.....	42
2.1.2.2	Διάγραμμα P/Z.....	44
2.1.2.3	Διάγραμμα G-Gp	46
2.1.3	Αναλυτικές μέθοδοι	48
2.1.4	Βοηθητικές γραφικές μέθοδοι.....	49
2.2	Πρόβλεψη Μελλοντικής Παραγωγής	51
2.2.1	Περίπτωση ακόρεστου ταμιευτήρα	53
2.2.2	Περίπτωση κορεσμένου ταμιευτήρα.....	54
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.	ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ MBal.....	56
	Εισαγωγή.....	56
3.1	Ενότητα εισαγωγή δεδομένων (Input section).....	57
3.2	Ενότητα History Matching.....	61
3.3	Ενότητα πρόβλεψης παραγωγής (Production Prediction Section)	71
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.	ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ (CASE-STUDY).....	76
	Εισαγωγή.....	76
4.1	Εισαγωγή δεδομένων και διαμόρφωση βασικού μοντέλου ταμιευτήρα	77
4.1.1	Εισαγωγή δεδομένων και ρύθμιση μοντέλου πετρελαικού ρευστού.....	77
4.1.2	Εισαγωγή δεδομένων και ρύθμιση μοντέλου ταμιευτήρα	79
4.2	History matching μοντέλου	82
4.3	Πρόβλεψη μελλοντικής παραγωγής	94
4.3.1	Πρόβλεψη μελλοντικής παραγωγής (χωρίς μοντέλο γεώτρησης).....	97
4.3.1.1	Αποτελέσματα πρόβλεψης μελλοντικής παραγωγής.....	99
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ		106



ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ I	108
Bibliography	110

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η Μηχανική Ταμιευτήρων (Reservoir Engineering) αποτελεί τον κλάδο της Μηχανικής Πετρελαίου (Petroleum Engineering) που αποσκοπεί στη βελτιστοποίηση της ανάκτησης των υδρογονανθράκων, μελετώντας τη ροή των πετρελαϊκών ρευστών στο εσωτερικό ενός υπόγειου πορώδους σχηματισμού, δηλαδή του ταμιευτήρα.

Καθώς οι ταμιευτήρες αποτελούν υπόγεια συστήματα, οι μηχανικοί ταμιευτήρων δεν μπορούν να προσεγγίσουν φυσικά τον ταμιευτήρα και να παρακολουθήσουν από κοντά τις φυσικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα μέσα σε αυτόν και να συλλέξουν δεδομένα ώστε τελικά να κατευθύνουν την ανάκτηση των υδρογονανθράκων, για τη βέλτιστη παραγωγή τους.

Η άντληση πετρελαίου γίνεται κατά τη φάση της πρωτογενούς, δευτερογενούς ή τριτογενούς παραγωγής. Η φάση της πρωτογενούς παραγωγής αναφέρεται στο πρώτο στάδιο της εξόρυξης πετρελαίου και φυσικού αερίου, όπου η παραγωγή βασίζεται στη φυσική ενέργεια του ταμιευτήρα. Τα φαινόμενα/μηχανισμοί που λαμβάνουν χώρα και παρέχουν τη φυσική ενέργεια που απαιτείται για την παραγωγή πετρελαίου είναι η εκτόνωση του διαλυμένου αερίου (Solution gas drive) στο πετρέλαιο στις εκάστοτε συνθήκες του ταμιευτήρα, η εκτόνωση της υπερκείμενης ζώνης αερίου (Gas cap drive), εφόσον υπάρχει στον ταμιευτήρα, η εισροή νερού από υποκείμενο υδροφορέα λόγω της εκτόνωσης του υποκείμενου νερού (Water drive), η συμπίεση του όγκου του πετρώματος λόγω της παραγωγής ρευστών και η εκτόνωση ενδογενούς νερού (Compaction drive) που συνυπάρχει με τους περιεχόμενους υδρογονάνθρακες, ο διαχωρισμός λόγω βαρύτητας (Gravity drainage drive) και τέλος συνδυασμός των παραπάνω (Combination drive), (Ahmed & Meehan, 2012).

Η εκτίμηση της κατάστασης ενός ταμιευτήρα υδρογονανθράκων, δηλαδή της ισορροπίας φάσεων (κορεσμένος¹ ή ακόρεστος²), της ύπαρξης υδροφορέα και των αρχικών αποθεμάτων πετρελαίου και αερίου (αν υπάρχει), καθώς και η πρόβλεψη των μελλοντικών αποδόσεων υπό διαφορετικά σενάρια διαχείρισης του ταμιευτήρα, καθιστά αναγκαία τη χρήση υπολογιστικών μοντέλων.

Οι δυο ευρέως χρησιμοποιούμενες μέθοδοι για τον παραπάνω σκοπό στη μηχανική ταμιευτήρων (reservoir engineering) είναι η μέθοδος της Προσομοίωσης Ταμιευτήρων

¹ Κορεσμένος ονομάζεται ο ταμιευτήρας πετρελαίου με πίεση μικρότερη από την πίεση σημείου φυσαλίδας, επομένως βρίσκεται σε κατάσταση διφασικής ισορροπίας, ο ταμιευτήρας πληρείται από πετρέλαιο και αέριο.

² Ακόρεστος ονομάζεται ο ταμιευτήρας πετρελαίου με πίεση μεγαλύτερη από την πίεση σημείου φυσαλίδας, επομένως βρίσκεται σε κατάσταση μονοφασικής ισορροπίας, ο ταμιευτήρας πληρείται από πετρέλαιο.

(Reservoir Simulation) και η μέθοδος Ισοζυγίου Μάζας (Material Balance Method). Η βασική διαφορά των δύο μεθόδων έγκειται στο ότι η Reservoir Simulation μέθοδος θεωρεί τον ταμιευτήρα ως ένα σύνολο συνδεδεμένων μπλοκ, δηλαδή χωρίζει θεωρητικά τον ταμιευτήρα σε πολλά μικρότερα τμήματα, ενώ η Material Balance μέθοδος θεωρεί τον ταμιευτήρα ως ένα ενιαίο μπλοκ. Ακόμα η μέθοδος ισοζυγίου μάζας είναι απλούστερη μέθοδος, με λιγότερες απαιτήσεις σε δεδομένα.

Η μέθοδος ισοζυγίου μάζας ή διαφορετικά Material Balance, βασίζεται στη θεμελιώδη αρχή διατήρησης της μάζας. Σύμφωνα με τον Antoine Lavoisier, «η αρχή διατήρησης της μάζας προτάσσει ότι η συνολική μάζα ενός συστήματος-σώματος διατηρείται σταθερή, ανεξαρτήτως των εσωτερικών αλληλεπιδράσεων. Η ύλη μπορεί να αλλάζει μορφές, αλλά η ποσότητά της παραμένει σταθερή». Η μάζα επομένως, διατηρείται σταθερή ανεξάρτητα με τις αλλαγές που συμβαίνουν σε ένα σύστημα.

Η μέθοδος ισοζυγίου μάζας (Material Balance Method) βρίσκει εφαρμογή στη Μηχανική Ταμιευτήρων (Reservoir Engineering), εκφράζοντας την αρχή διατήρησης μάζας των ρευστών ενός ταμιευτήρα, κατά την παραγωγική διαδικασία. Για πρακτικούς λόγους στην πετρελαϊκή βιομηχανία δεν γίνεται αναφορά για μάζες, αλλά για όγκους, καθιστώντας αναγκαία τη χρήση μιας εξίσωσης όγκων. Έτσι παρουσιάστηκε η έννοια της εξίσωσης ισοζυγίου μάζας (MBE), από τον Schilthuis το 1941, όπου απέδωσε το ισοζύγιο μάζας ως ογκομετρικό ισοζύγιο, εξισώνοντας το σύνολο του παραγόμενου όγκου ρευστών στην επιφάνεια, με τη διαφορά του εναπομένουστος από τον αρχικό όγκο ρευστών στον ταμιευτήρα σε κάθε φάση παραγωγής. Όλα τα μεγέθη στην εξίσωση του Schilthuis είναι εκφρασμένα σε συνθήκες ταμιευτήρα. (Ahmed & Meehan, 2012)

Για την εφαρμογή της Material Balance μεθόδου γίνονται οι ακόλουθες παραδοχές:

- Ο ταμιευτήρας θεωρείται μια ενιαία δεξαμενή (tank) με σταθερό όγκο ίσο με αυτόν του πορώδους του πραγματικού ταμιευτήρα,
- Η θερμοκρασία του ταμιευτήρα παραμένει σταθερή,
- Υπάρχει ομοιόμορφη κατανομή της πίεσης στον ταμιευτήρα. Συγκεκριμένα η μέση πίεση θεωρείται ως η πίεση που επικρατεί στο σύνολο του ταμιευτήρα
- Υπάρχει ομοιόμορφη κατανομή του κορεσμού των ρευστών (πετρέλαιο, αέριο, νερό).
- Σε κάθε πτώση πίεσης επιτυγχάνεται πάντα θερμοδυναμική ισορροπία και
- Τα διαθέσιμα δεδομένα παραγωγής είναι αξιόπιστα.

Οι παραπάνω υποθέσεις δεν είναι φυσικά ρεαλιστικές. Οι ταμιευτήρες είναι γενικά ετερογενείς, με σημαντικές διακυμάνσεις στις πιέσεις, ανάμεσα στα όρια του ταμιευτήρα και την περιοχή περιμετρικά των γεωτρήσεων. Ωστόσο, εάν υπάρχουν οι ακριβείς τιμές μέσης πίεσης και διαθέσιμα δεδομένα παραγωγής, τότε το tank model προβλέπει με ακρίβεια τη συμπεριφορά του ταμιευτήρα στις περισσότερες περιπτώσεις. (Okotie & Ikporo, 2018)

Η μέθοδος Ισοζυγίου Μάζας (Material Balance), υλοποιείται σε δύο φάσεις:

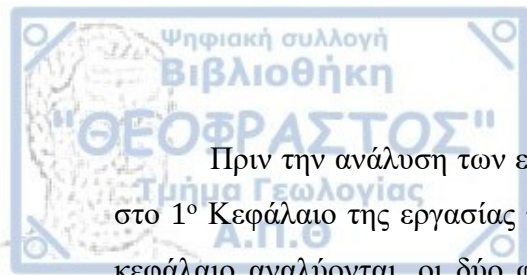
- **Εκτίμηση** της κατάστασης του ταμιευτήρα υδρογονανθράκων, όπου η εφαρμογή της μεθόδου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για:
 - τον υπολογισμό του αρχικού όγκου υδρογονανθράκων στον ταμιευτήρα (OIP³ & GIIP⁴)
 - την εξακρίβωση ύπαρξης ή μη υδροφορέα
 - τον υπολογισμό εισερχόμενου νερού, εφόσον έχει επιβεβαιωθεί η ύπαρξη υδροφορέα
- **Πρόβλεψη** μελλοντικής παραγωγής όπου η εφαρμογή της μεθόδου μπορεί να χρησιμοποιηθεί για:
 - την πρόβλεψη πίεσης του ταμιευτήρα για συγκεκριμένο σενάριο παραγωγής ή/και εισπίεσης
 - την πρόβλεψη μελλοντικής απόδοσης (παραγωγής) του ταμιευτήρα
 - την πρόβλεψη τελικής ανάκτησης υδρογονανθράκων, υπό διάφορους τύπους πρωτογενών και δευτερογενών μηχανισμών παραγωγής (Ahmed & Meehan, 2012)

Προκειμένου ωστόσο να υλοποιηθούν οι παραπάνω φάσεις απαιτείται μια σειρά εργαλείων, τα οποία κρίνονται απαραίτητα. Αυτά είναι:

- Δεδομένα. Αυτά αφορούν σε γεωλογικά/πετροφυσικά δεδομένα αλλά και δεδομένα παραγωγής
- θερμοδυναμικά μοντέλα περιγραφής συμπεριφοράς των ρευστών
- μοντέλα περιγραφής υδροφορέων
- μοντέλα εκτίμησης σχετικών διαπερατοτήτων
- νόμος ροής Darcy και εφαρμογή του για πολυφασική ροή
- κλασματική ροή νερού και αερίου, και
- Εξισώσεις Ισοζυγίου Μάζας (Material Balance Equation) ανάλογα με τον εκάστοτε τύπο ταμιευτήρα υδρογονανθράκων

³ OIP: Oil Initially in Place, αρχικά αποθέματα πετρελαίου

⁴ GIIP: Gas Initially in Place, αρχικά αποθέματα αερίου



Πριν την ανάλυση των επιμέρους φάσεων εφαρμογής της μεθόδου Ισοζυγίου Μάζας, στο 1^ο Κεφάλαιο της εργασίας παρουσιάζονται τα παραπάνω εργαλεία της μεθόδου. Στο 2^ο κεφάλαιο αναλύονται, οι δύο φάσεις εφαρμογής της μεθόδου Ισοζυγίου Μάζας. Η πρώτη φάση, αυτή της εκτίμησης των χαρακτηριστικών που διέπουν τον ταμιευτήρα, όπου αναφέρονται οι γραφικές και αναλυτικές μέθοδοι που αξιοποιούνται για τον σκοπό αυτό, και η δεύτερη φάση εφαρμογής της μεθόδου Ισοζυγίου Μάζας, αυτή της πρόβλεψης της μελλοντικής παραγωγής. Στο 3^ο κεφάλαιο παρουσιάζεται η χρήση του εργαλείου Material Balance του λογισμικού MBal. Στο 4^ο κεφάλαιο παρουσιάζεται μελέτη περίπτωσης της εφαρμογής της Μεθόδου Ισοζυγίου Μάζας (Material Balance Method) για πραγματικά δεδομένα ταμιευτήρα πετρελαίου, με τη χρήση του MBal. Τέλος αναφέρονται τα βασικά συμπεράσματα που προέκυψαν κατά την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΡΓΑΛΕΙΑ ΜΕΘΟΔΟΥ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ ΜΑΖΑΣ

Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα βασικά εργαλεία της μεθόδου ισοζυγίου μάζας (Material balance method) τα οποία είναι απαραίτητα για την εφαρμογή της. Τα εργαλεία αυτά είναι διάφορες κατηγορίες δεδομένων, μοντέλα περιγραφής θερμοδυναμικής συμπεριφοράς των πετρελαϊκών ρευστών ενός ταμιευτήρα, μοντέλα περιγραφής υδροφορέων που δύνανται να επηρεάζουν τον ταμιευτήρα ενδιαφέροντος, μοντέλα περιγραφής των σχετικών διαπερατοτήτων των συμμετεχόντων ρευστών (αέριο, πετρέλαιο, νερό) στο πορώδες μέσο που συνιστά τον ταμιευτήρα, καθώς και ο νόμος ροής του Darcy και η κλασματική ροή των ρευστών. Τέλος, παρουσιάζεται το σημαντικότερο εργαλείο της μεθόδου, η Εξίσωση Ισοζυγίου Μάζας (material balance equation - MBE), η οποία αποτελεί τη μαθηματική έκφραση του ισοζυγίου μάζας για ταμιευτήρες πετρελαίου και ταμιευτήρες αερίου. Ακόμα, καθώς οι ταμιευτήρες υδρογονανθράκων περιγράφονται από πολυφασική ροή, για την ορθή χρήση της εξίσωσης του Darcy στο παρόν κεφάλαιο ορίζονται τόσο ο νόμος του Darcy, όσο και η εφαρμογή του νόμου για πολυφασική ροή.

1.1 Δεδομένα

Τα δεδομένα που απαιτούνται για τη μέθοδο Material Balance, κατηγοριοποιούνται σε τέσσερις ομάδες, τα γεωλογικά και πετροφυσικά δεδομένα, καθώς και τα δεδομένα ταμιευτήρα και παραγωγής. Στις κατηγορίες αυτές περιλαμβάνονται οι παρακάτω παράμετροι:

Γεωλογικά δεδομένα:

- Αρχικά αποθέματα πετρελαίου στον ταμιευτήρα N ή STOIIP (Stock tank oil initially in place) (εκφράζονται σε συνθήκες επιφάνειας (sc) (14.7psia & 60°F))
- Ακτίνα υδροφορέα (Aquifer radius)
- Αναλογία εξωτερικής προς εσωτερική ακτίνα υδροφορέα (Outer/Inner Radius Ratio)
- Γωνία επαφής (Encroachment Angle)

Πετροφυσικά δεδομένα:

- Πορώδες (porosity), φ
- Κορεσμός σε ενδογενές νερό (connate water saturation), S_{wc}
- Συμπιεστότητα σχηματισμού (rock compressibility), c_f
- Συμπιεστότητα νερού (water compressibility), c_w
- Σχετικές διαπερατότητες όλων των φάσεων k_r (πετρελαίου, αερίου, νερού) (relative permeability)

- Πάχος υδροφορέα (aquifer thickness)
- Αλατότητα ενδογενούς νερού (water salinity)

Δεδομένα ταμιευτήρα:

- Αρχική πίεση ταμιευτήρα (initial reservoir pressure)
- Θερμοκρασία ταμιευτήρα (reservoir temperature)
- Ιδιότητες ρευστού (Fluid properties) (υδρογονανθράκων?)

Δεδομένα παραγωγής:

- Καταγεγραμμένη παραγωγή πετρελαίου (N_p), αερίου (G_p) και νερού (W_p) (production data), τα οποία εκφράζονται σε συνθήκες επιφάνειας (sc), όπου και μετρώνται.

Όπως θα αναλυθεί στη συνέχεια του κεφαλαίου, οι PVT ιδιότητες που αποτελούν μέρος των ιδιοτήτων του ρευστού (Fluid properties), υπολογίζονται είτε με τη βοήθεια εργαστηριακών αναλύσεων όπου κατασκευάζουν τους πίνακες μαύρου πετρελαίου (Black Oil Tables - BOT), είτε με τη χρήση συσχετίσεων (Correlations) για τα μοντέλα μαύρου πετρελαίου (Black oil models), είτε καταστατικών εξισώσεων (Equations of state - EoS) για τα μοντέλα πλήρους σύστασης (Compositional models).

1.2 Μοντέλα περιγραφής συμπεριφοράς ρευστών (PVT models-Fluid models)

Τα PVT (Pressure-Volume-Temperature) δεδομένα αποτελούν παραμέτρους που περιγράφουν τη θερμοδυναμική και ογκομετρική συμπεριφορά των ρευστών (υδρογονανθράκων) του ταμιευτήρα σε κάθε επιθυμητή πίεση και θερμοκρασία. Η ακρίβεια των υπολογισμών κατά την εφαρμογή της μεθόδου Material Balance, εξαρτάται κυρίως από την ακρίβεια των PVT δεδομένων. Ιδανικά τα PVT δεδομένα προσδιορίζονται από εργαστηριακά πειράματα, τα οποία διενεργούνται σε αντιπροσωπευτικά δείγματα ρευστού. Ωστόσο, ο προσδιορισμός PVT δεδομένων σε όλο το απαραίτητο εύρος πιέσεων μέσω εργαστηριακών αναλύσεων, είναι πολύ δαπανηρή και χρονοβόρα διαδικασία. Ως εκ τούτου για να υπολογιστούν οι PVT τιμές, αξιοποιούνται δυο διαφορετικά θερμοδυναμικά μοντέλα ρευστών (Fluid models), είτε το Black oil model (μοντέλο μαύρου πετρελαίου), είτε το Compositional model (μοντέλο πολυσυστατικού ρευστού) και ενδεικτικές εργαστηριακές μετρήσεις Black Oil Tables (BOT) (για πολύ μικρότερο εύρος πιέσεων) αξιοποιούνται για την καλύτερη ρύθμιση των correlations και των EoS, με τις διαδικασίες correlation matching και EoS tuning αντίστοιχα, οι οποίες θα αναλυθούν στη συνέχεια. Ωστόσο, η επιλογή του μοντέλου Black oil ή Compositional εξαρτάται τόσο από τη σύσταση του ρευστού του ταμιευτήρα, όσο και από τις διεργασίες που λαμβάνουν χώρα κατά την παραγωγή. Ένα

παράδειγμα τέτοιων διεργασιών είναι η έγχυση διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) εντός του ταμιευτήρα, στο στάδιο της τριτογενούς παραγωγής, όπου επηρεάζει τη σύσταση του ρευστού και καθιστά απαραίτητη τη χρήση Compositional modeling. Το Black oil model, βάση των παραδοχών που θέτει για τη σύσταση του ταμιευτήρα οι οποίες αναλύονται στη συνέχεια, δεν είναι δυνατόν να εφαρμοστεί για το σύνολο των ρευστών των ταμιευτήρων. Όμως αποτελεί τη μέθοδο που χρησιμοποιείται ως επί το πλείστον, καθώς ανταποκρίνεται στο μείζον ποσοστό των τύπων των πετρελαϊκών ρευστών.

Πίνακας 1: Μοντέλα ρευστών

Μοντέλα Ρευστών	Υπολογισμός PVT δεδομένων	
Black Oil Model	Correlations →	Matched correlation
Compositional Model	Equations of States (EoS) →	Tuned EoS

1.2.1 Εργαστηριακά PVT πειράματα

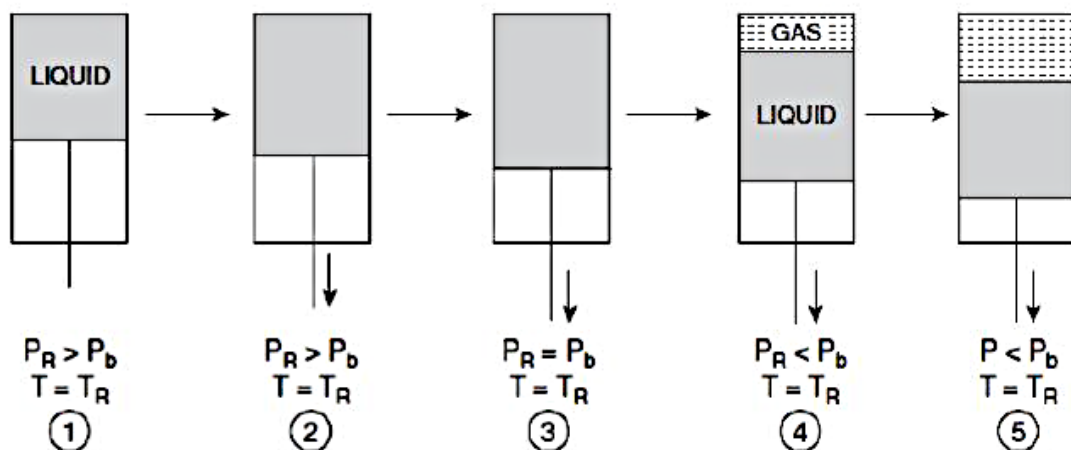
Παραδοσιακά ο πιο ακριβής τρόπος υπολογισμού των PVT δεδομένων είναι μέσω εργαστηριακών πειραμάτων. Τα συνήθη πειράματα που πραγματοποιούνται για το σκοπό αυτό είναι το (εκτόνωση υπό σταθερή σύσταση) Constant Composition Expansion (CCE), το Differential Vaporization (DV) (διαφορική εκτόνωση) και το Separator test (πείραμα διαχωριστή).

Κατά το **Constant Composition Expansion (CCE)** το ρευστό τοποθετείται σε κελί PVT και η πίεση του ξεκινά από την πίεση (P_1) που είναι μεγαλύτερη ή ίση της πίεσης του ταμιευτήρα ($P_1 \geq P_R$) και ασφαλώς πάνω από την πίεση φυσαλίδας (bubble point pressure)⁵ (P_b). Στη συνέχεια η πίεση μειώνεται σταδιακά, ισοθερμοκρασιακά, ώσπου μειώνεται κάτω από την πίεση bubble point (P_b). Σε κάθε βήμα μετρίεται η πίεση (P) καθώς και ο όγκος του πετρελαίου στο κελί (V_i). Δεν αφαιρείται από το κελί καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος καμία ποσότητα ρευστού. Στην **(Εικόνα 1.1)** απεικονίζεται η διαδικασία του CCE, ξεκινώντας από αρχική πίεση ίση με την πίεση του ταμιευτήρα (P_R). Από τα δεδομένα αυτά κατασκευάζεται διάγραμμα P-V (**Εικόνα 1.2**). Στο διάγραμμα που προκύπτει, σχεδιάζονται δυο βέλτιστες ευθείες που περνούν από τα σημεία και οι οποίες παρέχουν :

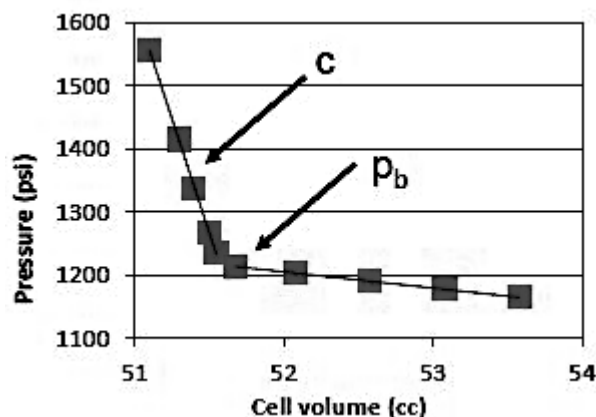
- την πίεση κορεσμού (saturation pressure - P_{sat}), δηλαδή την πίεση στο σημείο φυσαλίδας (bubble point pressure - P_b) στο σημείο τομής τους.

⁵ Πίεση φυσαλίδας (bubble point pressure) είναι η πίεση κατά την οποία εμφανίζεται/απελευθερώνεται η πρώτη φυσαλίδα αερίου από το πετρέλαιο, για συγκεκριμένη θερμοκρασία.

- την ισοθερμοκρασιακή συμπιεστότητα (c_o) του πετρελαίου, που προκύπτει από τη κλίση της ευθείας για τιμές πίεσης μεγαλύτερες του (P_b).
- τον σχετικό όγκο (relative volume - V_{rel}), που δίνεται από το λόγο του συνολικού όγκου υδρογονανθράκων V_t προς όγκου πετρελαίου στο σημείο κορεσμού V_{sat} .
- ακόμα υπολογίζεται η Y- συνάρτηση (Y-Function) σε κάθε βήμα. Η Y-Function χρησιμοποιείται για να διορθώσει τους σχετικούς όγκους (V_{rel}) μέσω των εργαστηριακών μετρήσεων, κάτω από την πίεση κορεσμού. Η μαθηματική έκφραση της εξίσωσης είναι η εξής $Y = (p_{sat} - p) / p(V_{rel} - 1)$. (Tarek, 2016)



Εικόνα 1.1: Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας Constant Composition Expansion (CCE).

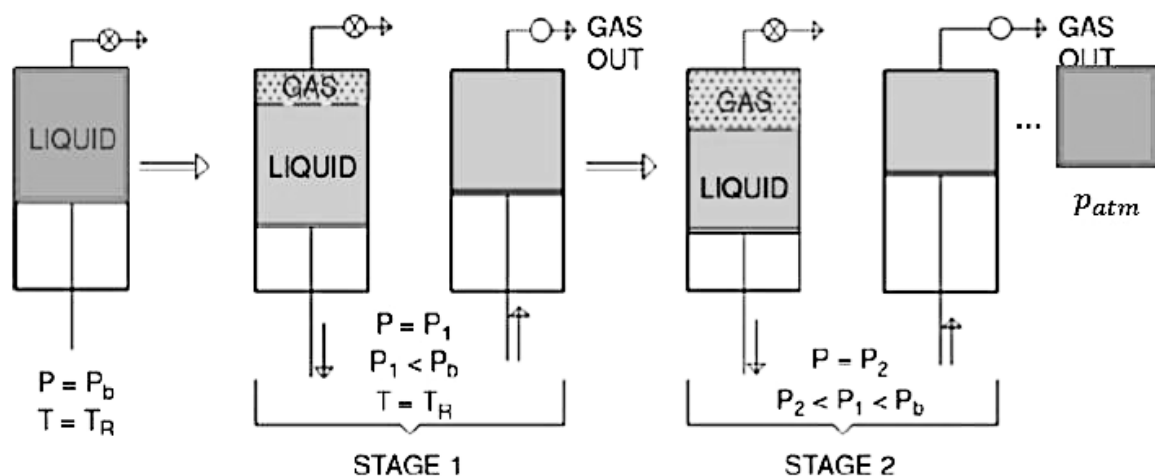


Εικόνα 1.2: Διάγραμμα πίεσης – όγκου, που προκύπτει από Constant Composition Expansion (CCE) πείραμα. Από την τομή των δυο ευθειών προκύπτει το σημείο που αντιστοιχεί στην πίεση σημείου φυσαλίδας (Bubble Point pressure) του ρευστού.

Το **Differential Vaporization (DV)** ή **Differential Liberation (DL)** πείραμα (Εικόνα 1.3) ξεκινάει από την πίεση κορεσμού (ή διαφορετικά πίεση bubble point – P_b) η οποία έχει καθοριστεί από το πείραμα CCE και μειώνεται σταδιακά μέχρι την ατμοσφαιρική πίεση (P_{atm}). Σε κάθε βήμα απομακρύνεται ο όγκος του αερίου που έχει απελευθερωθεί από το

πετρέλαιο, για τη συγκεκριμένη πτώση πίεσης ΔP , εκτονώνεται σε συνθήκες επιφάνειας και καταγράφεται η σύστασή του, ενώ επίσης καταγράφεται τόσο ο όγκος του αερίου, όσο και ο όγκος του εναπομένοντος πετρελαίου. Η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται ισοθερμοκρασιακά, σε θερμοκρασία ταμιευτήρα (T_{res}), ενώ όταν φτάσει σε πίεση P_{atm} κατά το τελευταίο στάδιο, αφού μετρηθεί ο όγκος σε συνθήκες κελιού (P_{atm} και T_{res}), στη συνέχεια ψύχεται σε συνθήκες $T_{amb} = 60^\circ F$ ή $15^\circ C$. Έτσι σε κάθε πίεση (P_i) μπορούν να υπολογιστούν:

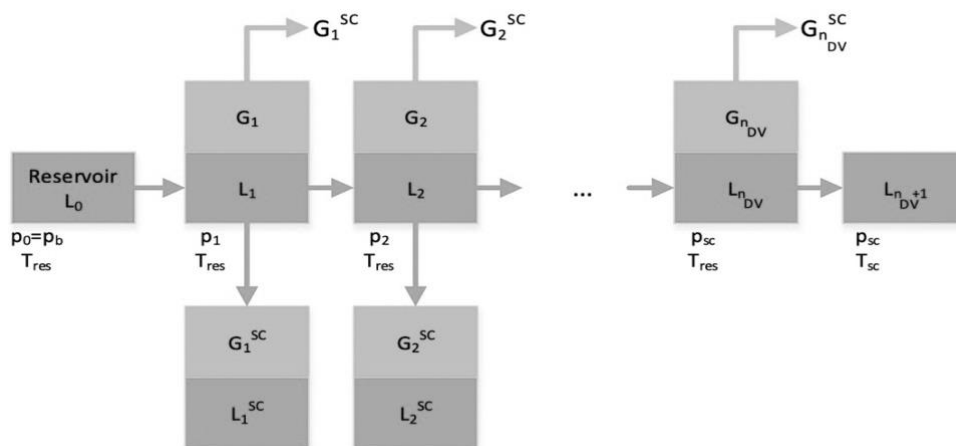
- ο ογκομετρικός συντελεστής (B_{oi}), διαιρώντας τον όγκο πετρελαίου ($V_{o,i}^{TC}$) σε βαρέλια (rb – reservoir barrels) για κάθε πίεση (P_i) με τον τελικό όγκο που απομένει στο τελευταίο στάδιο της διαδικασίας ($V_{o,atm}^{SC}$) στην ατμοσφαιρική πίεση (P_{atm}), σε βαρέλια (STB – stock tank barrels),
- ο ογκομετρικός συντελεστής (B_{gi}) σε ft^3/scf , από τον λόγο του αερίου ($V_{g,i}^{TC}$) σε συνθήκες ταμιευτήρα για κάθε βήμα πίεσης (P_i) κάτω από το σημείο φυσαλίδας, με τον ίδιο όγκο ($V_{g,i}^{SC}$) σε κανονικές συνθήκες μέσω διαφορικής εκτόνωσης,
- ο λόγος διαλυμένου αερίου (R_{si}), διαιρώντας τον όγκο του απελευθερωμένου αερίου σε πρότυπες συνθήκες, για κάθε πίεση (P_i), με τον όγκο του πετρελαίου σε πρότυπες συνθήκες,
- ο συντελεστής συμπιεστότητας αερίου (Z compressibility factor), από τη σχέση $Z = PV/nRT$,
- το ειδικό βάρος αερίου γ_g , που είναι ο λόγος της πυκνότητας αερίου (gas) προς την πυκνότητα του αέρα σε πρότυπες συνθήκες,
- η πυκνότητα ρ_o του εναπομένοντος πετρελαίου ως συνάρτηση της πίεσης. (Tarek, 2016)



Εικόνα 1.3: Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας Differential Vaporization (DV).

Στην πραγματικότητα οι δυο παραπάνω πειραματικές διαδικασίες, δεν προσομοιώνουν με ακρίβεια τις μεταβολές που υφίσταται το ρευστό στον ταμιευτήρα, καθώς δεν λαμβάνουν υπ' όψη τις συνθήκες διαχωρισμού στην επιφάνεια, που εξαρτώνται από τον διαχωριστή (separator) που έχει επιλεγεί. Έτσι είναι απαραίτητη η μετατροπή των δυο πειραματικών διαδικασιών DV και CCE, στις DVC (Composite Differential Vaporization) και CCEC (Composite Constant Composition Expansion) αντίστοιχα.

Οι Dodson et al. (1953) σημείωσαν για πρώτη φορά πως το DVC (**Εικόνα 1.4**) είναι η καλύτερη μέθοδος για την περιγραφή της ακολουθίας απελευθέρωσης αερίου, καθώς λαμβάνει υπόψη ότι οι ιδιότητες των παραγόμενων φάσεων διαφοροποιούνται κατά την εξάντληση του ταμιευτήρα. Το DVC πείραμα σε κάθε βήμα αντί να προωθήσει το εναπομένον πετρέλαιο και να επαναλάβει τη διαδικασία για την επόμενη P_i , όπως στο κλασικό DV, εκτονώνει τον όγκο αυτό μέσω των συνθηκών που επικρατούν στην πραγματικότητα στον διαχωριστή (separator). Από τη διαίρεση των δύο αυτών όγκων ($V_{o,i}^{rs}/V_{o,i}^{sc}$) προκύπτει ο ογκομετρικός συντελεστής πετρελαίου ($B_{o,i}$) σε κάθε P_i .



Εικόνα 1.4: Πειραματική διαδικασία DVC μελέτης.

Το CCEC πείραμα ακολουθεί τα βήματα του CCE, όπως αναλύθηκαν παραπάνω, με τη διαφορά ότι σε κάθε βήμα εκτονώνεται ο όγκος του πετρελαίου μέσω του επιφανειακού συστήματος που αντιστοιχεί σε κάθε περίπτωση. Ωστόσο λόγω του αυξημένου κόστους αυτής της διαδικασίας καθώς και του αυξημένου χρόνου που απαιτείται, η διαδικασία αυτή μπορεί να προσομοιωθεί με τη χρήση καταστατικών εξισώσεων (EoS).

Η πειραματική διαδικασία DVC έχει αυξημένο κόστος και απαιτεί μεγάλες ποσότητες δείγματος ρευστού. Για τη λύση αυτού του προβλήματος χρησιμοποιούνται υπολογιστικές

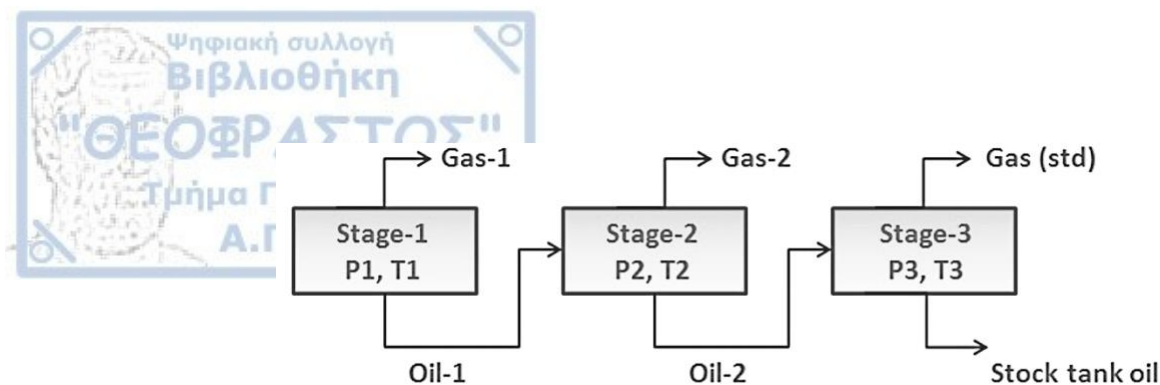
μέθοδοι (όπως αυτές των Amyx et al., 1960, Dake, 1983, Al-Marhoun, 2003 και McCain, 2002) που μετατρέπουν τα πρωτόλεια εργαστηριακά δεδομένα DV, σε DVC αποτελέσματα.

Σύμφωνα με τον Dake (1983) τα αποτελέσματα για B_o και R_s από το κλασικό DV διορθώνονται σε DVC λαμβάνοντας υπόψη το σύστημα διαχωρισμού στην επιφάνεια. Ωστόσο, η μέθοδος του Dake για πολύ χαμηλές πιέσεις, λανθασμένα δίνει ογκομετρικό συντελεστή πετρελαίου (B_o) μικρότερο της μονάδας και αρνητικές τιμές συντελεστή διαλυτότητας R_s . Ταυτόχρονα όσο υψηλότερη είναι η πτητικότητα του ρευστού, τόσο υψηλότερη είναι η πίεση στην οποία εμφανίζονται μη ρεαλιστικές τιμές. Για την επίλυση αυτού του προβλήματος χρησιμοποιείται η διατύπωση του Al Marhoun (2003), η οποία δίνει πολύ καλά αποτελέσματα σε όλο το εύρος πιέσεων. Η χρήση των υπολογιστικών μεθόδων αντικαθιστά την πολύ δαπανηρή και χρονοβόρα διαδικασία του πειράματος DVC. (Gaganis, et al., 2017)

Το Separator test πραγματοποιείται για να περιγράψει την επίδραση των παραμέτρων του συστήματος διαχωριστή στα GOR^6 , πυκνότητα πετρελαίου και ογκομετρικό συντελεστή. Η πειραματική διαδικασία πραγματοποιείται σε συνθήκες πίεσης κορεσμού και θερμοκρασία ταμειυτήρα. Το δείγμα ρευστού διέρχεται μέσα από ένα πολλαπλό σύστημα διαχωριστών, όπως φαίνεται στην (Εικόνα 1.5) και αντιπροσωπεύει το πραγματικό σύστημα διαχωριστών επιφανείας το οποίο μελετάται. Το αέριο που απελευθερώνεται σε κάθε στάδιο, απομακρύνεται και μετριέται το ειδικό βάρος, η σύσταση και ο όγκος του σε επιφανειακές συνθήκες (standard conditions - SC). Επίσης μετριέται ο όγκος του εναπομένου πετρελαίου κατά το τελευταίο στάδιο, σε επιφανειακές συνθήκες ($V_{o,st}^{SC}$). Τα μεγέθη που προσδιορίζονται, σε πίεση κορεσμού, είναι:

- ο ογκομετρικός συντελεστής $B_{o,fb} = (V_{sat}) / (V_{o,st})$, δηλαδή ο λόγος του όγκου του πετρελαίου σε θερμοκρασία ταμειυτήρα (T_{res}) και στο σημείο κορεσμού, όπου αντιστοιχεί την πίεση στο σημείο φυσαλίδας, προς τον τελικό όγκο του πετρελαίου στο tank, σε συνθήκες επιφανείας,
- συντελεστής διαλυτότητας $R_{s,fb} = (V_g^{SC}) / (V_{o,st})$, όπου το V_g^{SC} είναι ο συνολικός όγκος αερίου που απομακρύνθηκε μέσω των διαχωριστήρων, δηλαδή το άθροισμα των GOR του κάθε διαχωριστή και του tank),
- ειδική πυκνότητα πετρελαίου γ_o . (El-hoshoudy, 2019)

⁶ GOR (Gas-Oil ratio) είναι ο λόγος του παραγόμενου όγκου αερίου προς τον παραγόμενο όγκο πετρελαίου, μετρούμενα σε συνθήκες επιφανείας.



Εικόνα 1.5: Separator test πολλαπλών σταδίων. (El-hoshoudy, 2019)

1.2.2 Μοντέλα περιγραφής συμπεριφοράς ρευστών (Fluid models)

Μοντέλο Μαύρου Πετρελαίου (Black oil model)

Το Black Oil Model αποτελεί υπολογιστικό μοντέλο της θερμοδυναμικής συμπεριφοράς των ρευστών, με βασική υπόθεση πως το ρευστό αποτελείται από δύο διαφορετικές φάσεις, το παραγόμενο πετρέλαιο (stock tank oil - STO) και το παραγόμενο αέριο (stock tank gas - STG) στην επιφάνεια, που παραμένουν ποιοτικά σταθερές. Ακόμα το Black Oil Model υποθέτει πως το παραγόμενο αέριο στην επιφάνεια (STG) προέρχεται είτε από το ελεύθερο αέριο που υπάρχει εντός του ταμιευτήρα, είτε από το αέριο που βρίσκεται διαλυμένο στο πετρέλαιο σε συνθήκες πίεσης μεγαλύτερης του σημείου φυσαλίδας (Bubble point), είτε και από τα δύο.

Τα Black Oil Models επιλύουν το πρόβλημα της ισορροπίας των φάσεων με τις συσχετίσεις (Correlations), οι οποίες επιτρέπουν τον μαθηματικό υπολογισμό των PVT ιδιοτήτων, με τη χρήση επιφανειακών μετρήσεων, ως συναρτήσεις της πίεσης και της θερμοκρασίας.

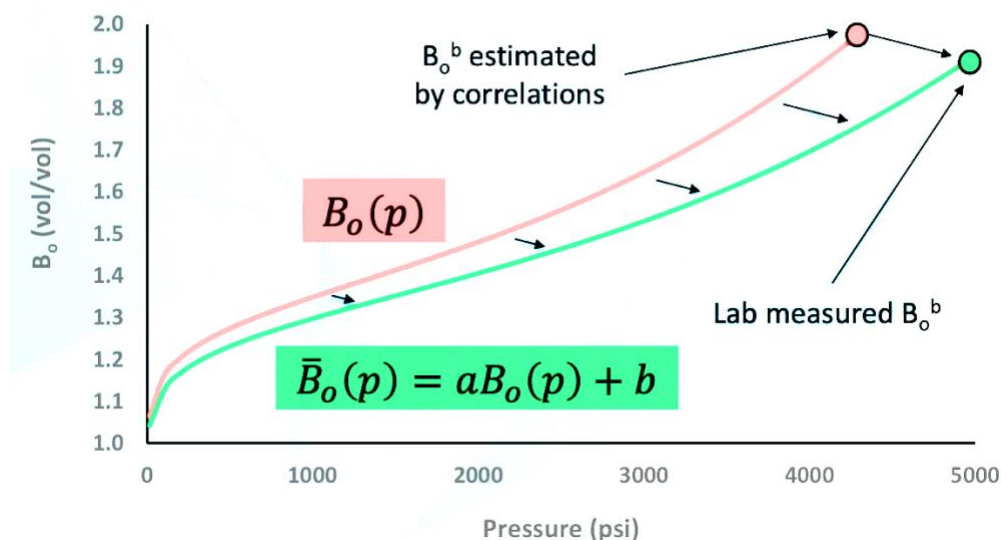
Πολλοί ερευνητές χρησιμοποίησαν αποτελέσματα PVT εργαστηριακών αναλύσεων και δεδομένα πεδίου, ώστε να αναπτύξουν γενικευμένες σχέσεις για την εκτίμηση των ιδιοτήτων των ρευστών των ταμιευτήρων. Τα correlations αποτελούν εμπειρικούς τύπους που έχουν ισχύ σε συγκεκριμένο εύρος συνθηκών και οι κύριες ιδιότητες που υπολογίζουν είναι η πίεση φυσαλίδας (P_b), ο λόγος διαλυμένου αερίου προς πετρέλαιο (R_s ή solution GOR), οι ογκομετρικοί συντελεστές ($B_{o,g,w}$) και το ιξώδες (μ). (Danesh, 1998)

Τα δεδομένα που απαιτούνται για τους υπολογισμούς, είναι απλές μετρήσεις πεδίου, όπως η πυκνότητα πετρελαίου API, το ειδικό βάρος του αερίου γ_g καθώς και ο λόγος του παραγόμενου αερίου προς το παραγόμενο πετρέλαιο, GOR .

Η βιβλιογραφία που είναι διαθέσιμη για correlations εκτίμησης των ιδιοτήτων του ρευστού του ταμιευτήρα, είναι εκτενής. Τα πιο γνωστά και ευρέως χρησιμοποιούμενα είναι τα correlations που αναπτύχθηκαν από τον Standing (1947, 1962, 1977). Ενδεικτικά, άλλα correlations είναι αυτά των Lasater (1958), των Vasquez and Beggs (1980), του Glaso (1980),

Al-Marhoun (1988, 1992), των Dokla and Osman (1992), του Labedi (1990), Ostermann et al. (1983), καθώς και των Suttan and Farshad (1990). (Elsharkawy, et al., 1995)

Προκειμένου τα correlations να είναι σε θέση να εκτιμήσουν με ακρίβεια τις PVT ιδιότητες σε κάθε πίεση, πρέπει να πραγματοποιηθεί η διαδικασία ρύθμισης, κατά την οποία αξιοποιούνται πειραματικά μετρούμενες τιμές. Συγκεκριμένα τα correlations διορθώνονται έτσι ώστε να ικανοποιείται η εξίσωση $y = ax + b$, όπου η τιμή x αντιστοιχεί στην αρχική τιμή που υπολογίζει το correlation, ενώ η τιμή y αντιστοιχεί στην πειραματικά μετρούμενη τιμή. Επομένως, τροποποιείται η τιμή x , πολλαπλασιαστικά και προσθετικά με τις παραμέτρους a και b αντίστοιχα, έτσι ώστε να ταυτίζεται με την πειραματική τιμή y . Όσο πιο κοντά στη τιμή της μονάδας είναι η τιμή της πολλαπλασιαστικής παραμέτρου a και στο μηδέν η τιμή της μεταθετικής παραμέτρου b , τόσο μικρότερη είναι η αναγκαία διόρθωση του αρχικού correlation, γεγονός που καθιστά πιο αξιόπιστο το correlation. Στο διάγραμμα της (Εικόνα 1.6) δίνεται η απεικόνιση με τη μορφή καμπύλης, των τιμών που υπολογίζει κάποιο correlation προσδιορισμού του B_o , καθώς και η διορθωμένη καμπύλη προκειμένου το αρχικό correlation να “σεβαστεί” τις πειραματικές μετρήσεις.



Εικόνα 1.6: Ρύθμιση συσχετίσεων (correlation matching).

Μοντέλο ρευστού πλήρους σύστασης Compositional model

Για τα μοντέλα πλήρους σύστασης, τα Compositional models, το ρευστό μπορεί να έχει τυχαία σύσταση, καθώς λαμβάνονται υπόψη όλα τα επιμέρους συστατικά που το απαρτίζουν. Τα συστατικά του ρευστού μπορεί να είναι συστατικά υδρογονανθράκων, ανόργανα, (π.χ. μεθάνιο, αιθάνιο, υδρόθειο, διοξείδιο του άνθρακα κ.α.) ή και ψευδοσυστατικά. Η κύρια υπόθεση για το compositional model, είναι ότι τα συστατικά μπορούν να επιμερίζονται τόσο

στην υγρή, όσο και στην αέρια φάση του ταμιευτήρα. Η χρήση του compositional model είναι απαραίτητη για ρευστά τα οποία έχουν πολύ μεγάλη πτητικότητα, καθώς και για αυτά τα ρευστά κοντά στο κρίσιμο σημείο (near critical). Άλλες περιπτώσεις που χρησιμοποιείται, όπως αναφέρθηκε, είναι είτε κατά την τριτογενή παραγωγή, είτε για ταμιευτήρα αέριου συμπυκνώματος που πραγματοποιείται η διαδικασία του gas recycling, είτε εάν ο ταμιευτήρας δεν είναι πλέον οικονομικά εκμεταλλεύσιμος και αξιοποιείται για αποθήκευση διοξειδίου του άνθρακα (CO₂). Έτσι για τη μελέτη του ρευστού, είναι αναγκαίο, κάθε στιγμή να γνωρίζουμε τη σύσταση του. (El-Banbi, et al., 2018)

Καταστατική εξίσωση (Equation of State - EoS), είναι η αναλυτική έκφραση που συσχετίζει την πίεση P και τη θερμοκρασία T , με τον όγκο V . Οι EoS αναπαριστούν αριθμητικά τη σύσταση (z) του ρευστού, την αλλαγή των φάσεων και τη συμπεριφοράς του. Χρησιμοποιούνται για τη μοντελοποίηση και την πρόβλεψη της θερμοδυναμικής κατάστασης του συστήματος. Οι καταστατικές εξισώσεις χρειάζονται ρύθμιση καθώς μπορεί να μη αναπαριστούν ορθά τα παραπάνω μεγέθη, έτσι εξετάζεται αν υπολογίζουν ορθά τις πειραματικές τιμές. Η διαδικασία της ρύθμισης της καταστατικής εξίσωσης ονομάζεται EoS tuning και κατά αυτή τη διαδικασία δίνονται εναλλακτικές τιμές στις αβέβαιες παραμέτρους της, ώστε να κατορθώσει να αναπαραγάγει ορθά τις πειραματικές τιμές. Με αυτόν τον τρόπο αυξάνεται η ακρίβεια των εκτιμήσεων που δίνει η καταστατική εξίσωση.

Το πιο απλό παράδειγμα καταστατικής εξίσωσης είναι αυτής των ιδανικών αερίων, που δίνεται από την εξίσωση $P = \frac{RT}{V}$. Η καταστατική εξίσωση van der Waals είναι η πρώτη κυβική καταστατική εξίσωση που αναπτύχθηκε από τον Van der Waals, $\left(P + \frac{a}{v^2}\right)(v - b) = RT$.

Λόγω της ταχείας ανάπτυξης των ηλεκτρονικών υπολογιστών, η προσέγγιση των υπολογισμών των φυσικών ιδιοτήτων και της ισορροπίας φάσεων, μέσω καταστατικών εξισώσεων αποτελεί χρήσιμο εργαλείο. Έχουν αναπτυχθεί πολλές καταστατικές εξισώσεις, αρκετές από τις οποίες αποτελούν τροποποίηση της καταστατικής εξίσωσης του Van der Waals. Οι καταστατικές εξισώσεις (EoS) που έχουν αναπτυχθεί, ποικίλουν σε πολυπλοκότητα, από απλές με 2 ή 3 παραμέτρους έως περίπλοκες με περισσότερες από 50 παραμέτρους. (Tarek, 2018)

Δύο από τις πιο γνωστές και ευρέως χρησιμοποιούμενες καταστατικές εξισώσεις τις οποίες αξιοποιεί και το λογισμικό MBal είναι των Soave-Redlich-Kwong και των Peng-Robinson.

1.2.3 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα μεθόδων εκτίμησης ιδιοτήτων πετρελαϊκών ρευστών

Τα εργαστηριακά πειράματα DVC και CCEC έχουν τη μεγαλύτερη ακρίβεια αποτελεσμάτων, αλλά ταυτόχρονα και πολύ υψηλό κόστος. Οι πειραματικές διαδικασίες DV και CCE δίνουν ικανοποιητικά αποτελέσματα, με βασική προϋπόθεση τη διόρθωση αυτών σύμφωνα με τις μεθόδους των Dake ή Al-Marhoun. Οι πειραματικές διαδικασίες στο σύνολο τους αποτελούν χρονοβόρα διαδικασία, γεγονός που τις καθιστά δύσχρηστες σε αρκετές περιπτώσεις που χρειάζονται άμεσα αποτελέσματα. Επιπρόσθετα, οι πειραματικές μετρήσεις πραγματοποιούνται σε περιορισμένο εύρος συνθηκών του ταμιευτήρα.

Εν αντιθέσει με τις εργαστηριακές αναλύσεις, τα Correlations πραγματοποιούνται με απλές μετρήσεις πεδίου, γεγονός που αποτελεί το βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου, εξαιτίας της ευκολίας και της ταχύτητας των υπολογισμών. Ωστόσο το μειονέκτημα της μεθόδου έγκειται στην περιορισμένη ακρίβεια υπολογισμών και το συγκεκριμένο εύρος συνθηκών.

Η χρήση καταστατικής εξίσωσης (Equation of State - EoS) είναι ιδιαίτερα ακριβής μέθοδος υπολογισμού, όμως απαιτεί τη σύσταση του ρευστού. Η διαδικασία αυτή καθιστά περίπλοκη τη μέθοδο, καθώς η πλειοψηφία των συστατικών παρουσιάζουν μεγάλη ετερογένεια ως προς τα ισομερή συστατικά. Το πρόβλημα έγκειται στο γεγονός ότι όλα τα ισομερή συστατικά με τον ίδιο αριθμό ατόμων άνθρακα θεωρούνται ψευδοσυστατικά. Επιπλέον ο χρόνος υπολογισμού αυξάνεται σημαντικά. Ωστόσο η ακριβής αναπαραγωγή της θερμοδυναμικής συμπεριφοράς του πετρελαϊκού ρευστού στις συνθήκες των εργαστηριακών μελετών αποτελεί την καλύτερη δυνατή ένδειξη ότι η ρυθμισμένη καταστατική εξίσωση προβλέπει με ακρίβεια τη θερμοδυναμική συμπεριφορά σε οποιοσδήποτε άλλες συνθήκες κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Η μέθοδος των καταστατικών εξισώσεων βρίσκει εφαρμογή σε σύνθετες περιπτώσεις που δεν διέπονται από την αρχή του Black oil model και είναι απαραίτητη η χρήση του Compositional model.

1.3 Μοντέλα υδροφορέων (Aquifer Models)

Σχεδόν όλοι οι ταμιευτήρες υδρογονανθράκων περιβάλλονται από πετρώματα που φέρουν νερό και ονομάζονται υδροφορείς. Κατά την παραγωγική διαδικασία ρευστών από τον ταμιευτήρα, προκαλείται πτώση πίεσης εντός του ταμιευτήρα και η διαφορά πίεσης που δημιουργείται ανάμεσα στον υδροφορέα και τον ταμιευτήρα υδρογονανθράκων προκαλεί εισροή νερού, από το σημείο επαφής νερού-υδρογονανθράκων (Oil-Water-Contact, OWC) προς τον ταμιευτήρα υδρογονανθράκων, σύμφωνα με τον νόμο ροής ρευστών σε πορώδη

μέσα. Η εισροή νερού έχει ως αποτέλεσμα τη μερική ή πλήρη αντιστάθμιση της πτώσης πίεσης εντός του ταμιευτήρα υδρογονανθράκων. (Tarek, 2018)

Η εισροή νερού από τον υδροφορέα, εντός του ταμιευτήρα υδρογονανθράκων δεν μπορεί να μετρηθεί, έτσι η εκτίμηση του μεγέθους αυτού πραγματοποιείται αξιοποιώντας τα μαθηματικά υπολογιστικά μοντέλα υδροφορέων.

Οι υδροφορείς μπορεί να είναι σημαντικά μεγαλύτεροι από τους ταμιευτήρες πετρελαίου ή φυσικού αερίου που συνορεύουν ή μπορεί να είναι τόσο μικροί σε μέγεθος που να είναι αμελητέας επίδρασης στην απόδοση του ταμιευτήρα. Ακόμα σε πολλές περιπτώσεις, ο όγκος πόρων του υδροφορέα δεν είναι σημαντικά μεγαλύτερος από τον όγκο πόρων του ίδιου του ταμιευτήρα υδρογονανθράκων, έτσι, η εκτόνωση του νερού στον υδροφορέα είναι αμελητέα σε σχέση με το συνολικό ενεργειακό σύστημα και ο ταμιευτήρας να συμπεριφέρεται ογκομετρικά. Σε αυτή την περίπτωση, οι επιπτώσεις της εισροής νερού μπορούν να αγνοηθούν. Επίσης σε άλλες περιπτώσεις, η διαπερατότητα του υδροφορέα μπορεί να είναι αρκετά χαμηλή, ώστε να απαιτείται πολύ μεγάλη διαφορά πίεσης προτού διεισδύσει σημαντική ποσότητα νερού στον ταμιευτήρα υδρογονανθράκων. Σε αυτήν την περίπτωση, οι επιπτώσεις της εισροής νερού μπορούν επίσης να αγνοηθούν. (Tarek, 2018)

Συχνά, στο στάδιο της έρευνας ενός ταμιευτήρα, δύσκολα παρέχονται λεπτομερείς πληροφορίες σχετικά με την ύπαρξη αλλά και τα χαρακτηριστικά του υδροφορέα. Ωστόσο ανάλογες πληροφορίες από κοντινές γεωτρήσεις μπορούν να αποτελέσουν σοβαρές ενδείξεις. Η μελέτη για την ύπαρξη αλλά και την επίδραση ενός υδροφορέα πραγματοποιείται στη βάση της παραγωγής από ένα ταμιευτήρα υδρογονανθράκων, αξιοποιώντας τα δεδομένα αθροιστικής παραγωγής στην επιφάνεια πετρελαίου, αερίου και νερού σε δεδομένες πτώσεις πίεσης. Τα παραπάνω δεδομένα αξιοποιούνται κατά τις γραφικές και αναλυτικές μεθόδους, οι οποίες θα αναλυθούν σε επόμενο κεφάλαιο, με στόχο τον προσδιορισμό της ύπαρξής ή μη του υδροφορέα. Ωστόσο τα χαρακτηριστικά του θα προσδιοριστούν μέσω μοντέλων περιγραφής υδροφορέων (Aquifer model). Τα μοντέλα υδροφορέα που χρησιμοποιούνται από το MBal είναι τα (Petroleum Experts, 2018):

- Small Pot
- Schilthuis steady state
- Hurst steady-state
- Hurst - Van Everdingen - Dake
- Hurst - Van Everdingen - Odeh
- Vogt - Wang

- Fetkovich semi - steady state
- Fetkovich steady state
- Hurst - Van Everdingen Modified
- Carter – Tracy

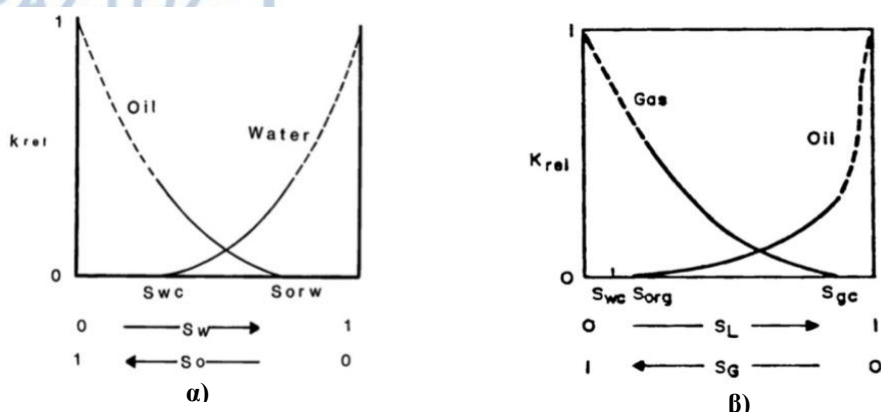
1.4 Μοντέλα σχετικών διαπερατοτήτων (Relative permeability models)

Η απόλυτη διαπερατότητα k (absolute permeability) είναι η ιδιότητα του πορώδους μέσου που εκφράζει την ικανότητα του να επιτρέπει σε ένα ρευστό με το οποίο είναι κορεσμένο να ρέει μέσω των πόρων του. Όταν δύο ή περισσότερα ρευστά ρέουν ταυτόχρονα, εισάγεται η έννοια της σχετικής διαπερατότητας $k_{r(o,g,w)}$ (relative permeability) κάθε φάσης σε συγκεκριμένο κορεσμό, που εκφράζει αμοιβαίες παρεμβολές κάθε ρευστού στην ομαλή ροή του άλλου. Η σχετική διαπερατότητα $k_{r(o,g,w)}$, εξίσωση (1.1), είναι ο λόγος της ενεργού διαπερατότητας $k_{e(o,g,w)}$ της φάσης, προς την απόλυτη διαπερατότητα του πετρώματος k . Ενώ η ενεργός διαπερατότητα $k_{e(o,g,w)}$ (effective permeability) υπολογίζεται εργαστηριακά μέσω αναλύσεων που γίνονται σε δείγματα πυρήνα του σχηματισμού (core analysis).

$$k_{r(o,g,w)} = \frac{k_{e(o,g,w)}}{k} \quad (1.1)$$

Σε πολλές περιπτώσεις, τα δεδομένα σχετικής διαπερατότητας από πραγματικά δείγματα ενδέχεται να μην είναι διαθέσιμα, επομένως είναι απαραίτητο να εκτιμηθούν οι τιμές σχετικής διαπερατότητας $k_{r(o,g,w)}$ με κάποιον άλλο τρόπο. Για αυτό το σκοπό έχουν αναπτυχθεί αρκετά μαθηματικά μοντέλα που συνδέουν τον κορεσμό S με τη σχετική διαπερατότητα $k_{r(o,g,w)}$.

Τα παρακάτω διαγράμματα της (Εικόνα 1.7) περιγράφουν ποιοτικά τη σχέση του κορεσμού με τη σχετική διαπερατότητα. Το διάγραμμα α) αφορά σύστημα πετρελαίου – νερού, ενώ το διάγραμμα β) αφορά σύστημα αερίου – πετρελαίου.



Εικόνα 1.7: Διαγράμματα σχετικών διαπερατοτήτων προς τους κορεσμούς. (Koederitz, et al., 2018)

Στο α) διάγραμμα της (Εικόνα 1.7), εμφανίζεται στα αριστερά η καμπύλη της σχετικής διαπερατότητας για το πετρέλαιο και στα δεξιά η καμπύλη σχετικής διαπερατότητας για το νερό. Η σχετική διαπερατότητα και ο βαθμός κορεσμού παίρνουν τιμές από το μηδέν έως τη μονάδα. Το σημείο s_{wc} αντιστοιχεί στον ελάχιστο βαθμό κορεσμού σε νερό, δηλαδή όταν το νερό που πληροί το πορώδες μέσο είναι μόνο το ενδογενές, ενώ μόνο η πετρελαϊκή φάση ρέει εντός του πορώδους μέσου. Ταυτόχρονα στο σημείο αυτό ο μέγιστος βαθμός κορεσμού σε πετρέλαιο ισούται με $(1 - s_{wc})$. Συγκεκριμένα στο σημείο αυτό ($s_w = s_{wc}$ ή $s_o = 1 - s_{wc}$), η σχετική διαπερατότητα του νερού (k_{rw}) παίρνει την ελάχιστη τιμή της, η οποία ισούται με μηδέν, ενώ η σχετική διαπερατότητα του πετρελαίου (k_{ro}) λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της, λίγο μικρότερη της μονάδας. Αντίστοιχα στο σημείο (s_{or}) εμφανίζεται ο υπολειμματικός βαθμός κορεσμού σε πετρέλαιο, ενώ ο βαθμός κορεσμού του νερού είναι ο μέγιστος και ίσος με ($s_w = 1 - s_{or}$). Σε αυτό το σημείο η σχετική διαπερατότητα του νερού (k_{rw}) προσεγγίζει τη μέγιστη τιμή της, λίγο μικρότερη της μονάδας, ενώ η σχετική διαπερατότητα του πετρελαίου (k_{ro}) την ελάχιστη, που ισούται με το μηδέν.

Στο β) διάγραμμα της (Εικόνα 1.7), η καμπύλη στα αριστερά αντιπροσωπεύει τις σχετικές διαπερατότητες για το αέριο και η δεξιά για το πετρέλαιο. Στο σημείο τομής των δυο καμπυλών οι σχετικές διαπερατότητες για αέριο και πετρέλαιο ταυτίζονται. Σημειώνεται ότι οι σχετικές διαπερατότητες του αερίου (k_{rg}) και πετρελαίου (k_{ro}), εκφράζονται συναρτήσει του βαθμού κορεσμού του αερίου (s_g) ή του βαθμού κορεσμού συνολικά της υγρής φάσης (s_L), δηλαδή πετρελαίου και νερού μαζί. Στο σημείο του υπολειμματικού βαθμού κορεσμού σε πετρέλαιο ως προς το αέριο (s_{or}), η τιμή σχετικής διαπερατότητας πετρελαίου (k_{ro}) λαμβάνει την ελάχιστη τιμή της, δηλαδή ισούται με το μηδέν. Αντίθετα στο σημείο αυτό, η σχετική διαπερατότητα για το αέριο (k_{rg}) λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της, που είναι λίγο μικρότερη της μονάδας. Σημειώνεται πως στο σημείο αυτό ο βαθμός κορεσμού σε αέριο

λαμβάνει τη μέγιστη τιμή του που ισούται με ($s_g = 1 - s_{or}$). Αντίστοιχα στο σημείο (s_{gc}) αντιστοιχεί η κρίσιμη τιμή του βαθμού κορεσμού σε αέριο, δηλαδή αντιστοιχεί στον υπολειμματικό βαθμό κορεσμού σε αέριο, ενώ ο βαθμός κορεσμού της υγρής φάσης είναι ο μέγιστος και ίσος με ($s_o = 1 - s_{gc}$). Στο σημείο αυτό η σχετική διαπερατότητα του αερίου (k_{rg}) λαμβάνει την ελάχιστη τιμή μηδέν, ενώ η σχετική διαπερατότητα του πετρελαίου τη μέγιστη τιμή της, που είναι λίγο μικρότερη της μονάδας. (Koederitz, et al., 2018)

Οι τιμές σχετικής διαπερατότητας πέραν του ορίου των τιμών του βαθμού κορεσμού (π.χ. για $s_w > 1 - s_{or}$, ή $s_o > 1 - s_{wc}$) δεν μπορούν να υφίσταται, παρά μόνο θεωρητικά. Οι οριακές τιμές των σχετικών διαπερατοτήτων εναλλακτικά ονομάζονται διαπερατότητες τελικών σημείων (end points relative permeabilities). Το εύρος αυτών των τιμών αποδίδεται στο διάγραμμα με διακεκομμένες γραμμές, που αντιστοιχούν σε τιμές σχετικής διαπερατότητας μεγαλύτερες από τις μέγιστες. Επομένως αποτελούν τιμές που δεν υφίστανται στην πραγματικότητα, καθώς υπερβαίνουν τις οριακές τιμές του βαθμού κορεσμού.

Μια από τις μεθόδους που ακολουθούνται για τον μαθηματικό προσδιορισμό των σχετικών διαπερατοτήτων είναι η μέθοδος του Corey (Corey, 1954). Η μέθοδος αυτή αξιοποιεί τον κορεσμό του πορώδους μέσο σε αέριο ή πετρέλαιο για τον υπολογισμό των σχετικών διαπερατοτήτων τους. Ο Corey το 1954 πρότεινε μία απλή μαθηματική έκφραση για τον υπολογισμό των σχετικών διαπερατοτήτων, η γενική μορφή της οποίας δίνεται από την (εξίσωση 1.2) (Petroleum Experts, 2018).

$$k_{rx} = E_x \left(\frac{S_x - S_{rx}}{S_{mx} - S_{rx}} \right)^{nx} \quad (1.2)$$

Όπου:

E_x : το τελικό σημείο για τη φάση x

nx : ο εκθέτης Corey

S_x : ο βαθμός κορεσμού της φάσης x

S_{rx} : ο υπολειμματικός βαθμός κορεσμού της φάσης x

S_{mx} : ο μέγιστος βαθμός κορεσμού της φάσης x

1.5 Νόμος του Darcy - Ροή ρευστών σε πορώδες μέσο

Ο νόμος του Darcy περιγράφει τη ροή ρευστών σε πορώδες μέσο και η μαθηματική απόδοση της γενικής μορφής του νόμου του Darcy, για την περίπτωση γραμμικού ταμιευτήρα, δίνεται από την εξίσωση (1.3).

$$Q = -\frac{kA}{\mu L} \Delta p \quad (1.3)$$

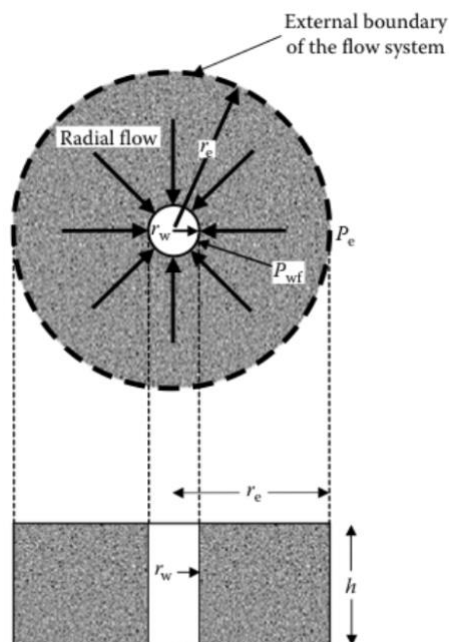
Όπου:

- Q : ρυθμός ροής
 k : απόλυτη διαπερατότητα
 μ : ιξώδες του ρευστού
 A : εμβαδό διατομής
 L : μήκος
 Δp : πτώση πίεσης

Η παραπάνω εξίσωση (1.3) περιγράφει την πιο απλή περίπτωση μονοφασικής ροής. Συγκεκριμένα στην περίπτωση αυτή έγιναν οι παρακάτω υποθέσεις:

- ολόκληρο το πορώδες μέσο είναι πλήρως κορεσμένο με μία μόνο φάση, δηλαδή 100% κορεσμός,
- το ρευστό είναι ασυμπίεστο,
- η ροή είναι οριζόντια, σταθερή και γραμμική,
- ο ρυθμός ροής είναι αρκετά χαμηλός, ώστε να είναι άμεσα ανάλογος με τη διαφορά πίεσης ή την υδραυλική κλίση,
- το ρέον ρευστό δεν αντιδρά με το πορώδες μέσο (Dandekar, 2010)

Η ροή των ρευστών ταμιευτήρα από μια κυλινδρική ζώνη αποστράγγισης προς μια γεώτρηση χαρακτηρίζεται από το σύστημα ακτινικής ροής, το οποίο φαίνεται στην **(Εικόνα 1.8)**. Η εξίσωση Darcy για το σύστημα ακτινικής ροής μπορεί να γραφτεί με τη μορφή της εξίσωσης (1.4). Επιλύοντας περαιτέρω τη διαφορική εξίσωση προκύπτει η εξίσωση (1.5).



Εικόνα 1.8: Σύστημα ακτινικής ροής (Dandekar, 2010)

$$Q = \frac{k}{\mu} A \frac{dP}{dr} \quad (1.4)$$

$$Q = \frac{2\pi kh(P_e - P_{wf})}{\mu \ln(r_e/r_w)} \quad (1.5)$$

Όπου:

Q : ρυθμός ροής

k : απόλυτη διαπερατότητα

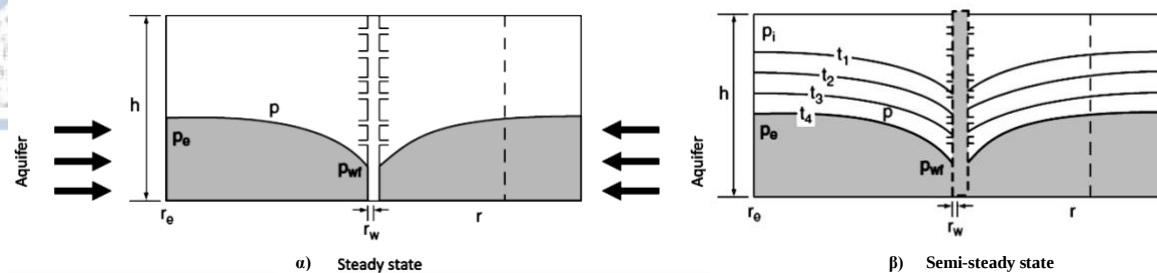
h : πάχος

P_e, P_{wf} : πίεση στο όριο ακτίνας αποστράγγισης και πίεση στα όρια της γεώτρησης αντίστοιχα

μ : ιξώδες ρευστού

r_e, r_w : ακτίνα αποστράγγισης και ακτίνα γεώτρησης αντίστοιχα

Η ακτινωτή ροή χωρίζεται σε δύο κατηγορίες, ανάλογα με το αν υπάρχει ή όχι υδροφορέας που προωθεί το ρευστό. Οι κατηγορίες αυτές είναι σταθερής ροής (steady state) και ψευδοσταθερής ροής (pseudo- ή semi-steady state) όπως περιγράφονται στην (Εικόνα 1.9α) και (Εικόνα 1.9β) αντίστοιχα. Η εξίσωση του Darcy για τις δυο περιπτώσεις τροποποιείται στις εξισώσεις (1.6) για σταθερή και (1.7) ψευδοσταθερή ροή, αντίστοιχα.



Εικόνα 1.9: Σύστημα (α) σταθερής ροής (steady state) και (β) ψευδοσταθερής ροής (pseudo- ή semi-steady state)

$$Q^{rc} = \frac{k}{\mu} \frac{2\pi h}{\ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right) + S} (P_e - P_{wf}) \quad (1.6)$$

$$Q^{rc} = \frac{k}{\mu} \frac{2\pi h}{\ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right) - \frac{1}{2} + S} (P_e - P_{wf}) \quad (1.7)$$

Όπου:

Q : ρυθμός ροής

k : απόλυτη διαπερατότητα

h : πάχος

P_e, P_{wf} : πίεση στο όριο ακτίνας αποστράγγισης και πίεση στα όρια της γεώτρησης αντίστοιχα

μ : ιξώδες ρευστού

r_e, r_w : ακτίνα αποστράγγισης και ακτίνα γεώτρησης αντίστοιχα

S : επιδερμικός συντελεστής⁷

Εάν αντικατασταθεί η πίεση στο όριο της ακτίνας αποστράγγισης με τη μέση πίεση $\bar{P}$ του ταμιευτήρα, οι εξισώσεις (1.6) και (1.7) τροποποιούνται στις εξισώσεις (1.8) και (1.9) αντίστοιχα.

$$Q^{rc} = \frac{k}{\mu} \frac{2\pi h}{\ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right) - \frac{1}{2} + S} (\bar{P} - P_{wf}) \quad (1.8)$$

⁷ Skin factor ή Επιδερμικός ονομάζεται ο συντελεστής που δείχνει εάν έχει επηρεαστεί η διαπερατότητα του πετρώματος στη περιοχή περιμετρικά της γεώτρησης από διάφορα φαινόμενα όπως ο γεωτρητικός πολφός.

$$Q^{rc} = \frac{k}{\mu} \frac{2\pi h}{\ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right) - \frac{3}{4} + S} (\bar{P} - P_{wf}) \quad (1.9)$$

Στη περίπτωση ακτινωτής ροής, όπως αναλύθηκε, η εξίσωση του Darcy περιγράφει μονοφασική ροή και επομένως η διαπερατότητα που αναφέρεται είναι η απόλυτη διαπερατότητα (absolute permeability). (Ahmed, 2009)

1.5.1 Εφαρμογή νόμου Darcy σε πολυφασική ροή

Για την περίπτωση πολυφασικής ροής, η έννοια της απόλυτης διαπερατότητας πρέπει να τροποποιηθεί, ώστε η εξίσωση του Darcy να περιγράψει τη συμπεριφορά ροής του ρευστού όταν υπάρχουν περισσότερα από ένα ρευστά στον ταμιευτήρα. Η μετατροπή πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας την ενεργό διαπερατότητα (effective permeability). Έτσι ο νόμος του Darcy επαναδιατυπώνεται και περιγράφει την παραγωγή οποιασδήποτε φάσης νερό, πετρέλαιο ή αέριο. Η εξίσωση (1.10) περιγράφει την πολυφασική γραμμική ροή, ενώ η πολυφασική ακτινωτή ροή δίνεται σύμφωνα με τις εξισώσεις (1.11) και (1.12) για σταθερή και ψευδοσταθερή ροή αντίστοιχα. (Ahmed, 2009)

$$Q_{o,g,w} = \frac{k_{e(o,g,w)} A}{\mu_{o,g,w} L} \Delta p \quad (1.10)$$

$$Q_{o,g,w} = \frac{k_{e(o,g,w)}}{\mu_{o,g,w}} \frac{2\pi h}{\ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right) - \frac{1}{2} + S} (\bar{P} - P_{wf}) \quad (1.11)$$

$$Q_{o,g,w} = \frac{k_{e(o,g,w)}}{\mu_{o,g,w}} \frac{2\pi h}{\ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right) - \frac{3}{4} + S} (\bar{P} - P_{wf}) \quad (1.12)$$

Όπου

$Q_{o,g,w}$:	η ροή ρευστού για πετρέλαιο, αέριο και νερό
$k_{e(o,g,w)}$:	ενεργός διαπερατότητα για κάθε φάση (πετρέλαιο, αέριο και νερό)
$\mu_{o,g,w}$:	ιξώδες κάθε φάσης
h :	πάχος ταμιευτήρα
$r_{e,w}$:	ακτίνα αποστράγγισης και ακτίνα γεώτρησης
$\bar{P}, P_{wf}$:	μέση πίεση ταμιευτήρα και πίεση ταμιευτήρα στη ακτίνα αποστράγγισης
S :	επιδερμικός συντελεστής

Ο πρώτος όρος της εξίσωσης του Darcy, σε κάθε περίπτωση, περιγράφει την κινητικότητα λ (mobility), ο δεύτερος τη γεωμετρία G του ταμιευτήρα και ο τρίτος την διαφορά της πίεσης του ταμιευτήρα με την πίεση του ρέοντος ρευστού στη γεώτρηση (pressure drawdown). Η γεωμετρία και η διαφορά πίεσης αυτή, δεν διαφοροποιείται για την κάθε φάση (πετρέλαιο, αέριο ή νερό), αυτό που διαφοροποιείται είναι η κινητικότητα (mobility) της κάθε φάσης. Όπως φαίνεται στην εξίσωση (1.13), η κινητικότητα (mobility) κάθε φάσης περιγράφεται από το κλάσμα της ενεργού διαπερατότητας (k) της φάσης ως προς το ιξώδες (μ) αυτής.

$$\lambda = \frac{k_e}{\mu} \quad (1.13)$$

Έτσι όλες οι παραπάνω εκφράσεις έχουν κοινή μορφή $Q_{o,g,w} = \lambda_{o,g,w} * G * \Delta p$.

1.5.2 Κλασματικές ροές (Fractional flows)

Η κλασματική ροή νερού F_w και αερίου F_g , εκφράζουν το ποσοστό του ρευστού, από το σύνολο των ρευστών που ρέουν εντός του ταμιευτήρα, που αντιστοιχεί στο νερό και στο αέριο αντίστοιχα. Η κλασματική ροή του νερού F_w δίνεται από την εξίσωση (1.14) και κλασματική ροή του αερίου F_g από την εξίσωση (1.15).

$$F_w = \frac{q_w^{RC}}{q_w^{RC} + q_o^{RC}} \quad (1.14)$$

$$F_g = \frac{q_g^{RC}}{q_w^{RC} + q_g^{RC} + q_o^{RC}} \quad (1.15)$$

1.6 Εξισώσεις Ισοζυγίου Μάζας (Material Balance Equation)

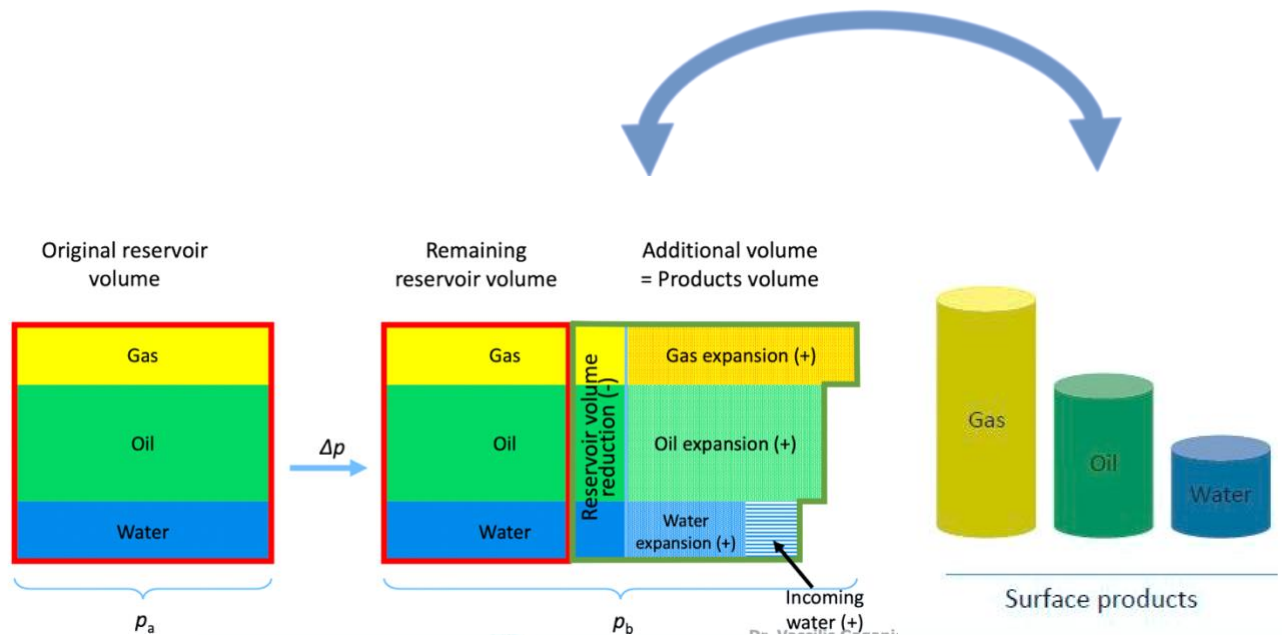
Η MBE αποτελεί τη μαθηματική έκφραση της αρχής διατήρησης της μάζας των φάσεων που συνυπάρχουν σε έναν ταμιευτήρα, εκφρασμένη με τη μορφή ογκομετρικού ισοζυγίου, αφού τα μετρούμενα μεγέθη στην επιφάνεια (στο πεδίο) είναι όγκοι. Η MBE διατυπώνεται τόσο για ταμιευτήρες πετρελαίου, όσο και για ξηρού αερίου, ενώ αποτελεί το κυριότερο εργαλείο της Material Balance μεθόδου.

1.6.1 Εξίσωση Ισοζυγίου Μάζας για ταμιευτήρες πετρελαίου (Material Balance Equation for Oil Reservoirs)

Στην (Εικόνα 1.10), αναλύονται οι αλλαγές που επέρχονται στο σύστημα του ταμιευτήρα, για πτώση πίεσης ΔP , από P_a σε P_b , μέσω μιας θεωρητικής αύξησης του όγκου του ταμιευτήρα. Στην πραγματικότητα η πτώση πίεσης κατά ΔP πραγματοποιείται λόγω μεταφοράς μάζας, ωστόσο περιγράφεται ισοδύναμα μέσω της θεωρητικής αύξησης του όγκου

του ταμιευτήρα. Το αριστερό σχήμα αντιπροσωπεύει τον όγκο του ρευστού (Original reservoir volume) στην αρχική πίεση P_a , για ένα ταμιευτήρα πετρελαίου με υπερκείμενη ζώνη αερίου και ύπαρξη υδροφορέα. Ο αρχικός συνολικός όγκος ρευστού που απεικονίζεται μέσω της συμπαγούς κόκκινης γραμμής, είναι ο όγκος πόρων του ταμιευτήρα που πληρούνται από υδρογονάνθρακες (Hydrocarbon pore volume - HCPV).

Το μεσαίο σχήμα στην (Εικόνα 1.10) απεικονίζει το θεωρητικό αποτέλεσμα της πτώσης πίεσης κατά ΔP , επιτρέποντας στο ρευστό να εκτονωθεί εντός του ταμιευτήρα. Ο όγκος "Oil expansion", αποτελεί τον επιπλέον όγκο που θα καταλάμβανε το πετρέλαιο, λόγω εκτόνωσης, μαζί με το διαλυμένο σε αυτό αέριο. Ο όγκος "Gas expansion", αντιπροσωπεύει τον επιπρόσθετο όγκο της υπερκείμενης ζώνης αερίου που δημιουργείται λόγω εκτόνωσης του αερίου. Ο όγκος "Water expansion" και "Incoming water", αντιπροσωπεύουν τους επιπρόσθετους όγκους του υδροφορέα λόγω εκτόνωσης και εισροής επιπρόσθετου νερού από υδροφορέα αντίστοιχα. Τέλος ο όγκος "Reservoir volume reduction", περιγράφει τη μείωση του όγκου των πόρων HCPV, εξαιτίας της συμπιεστότητας του σχηματισμού. Σύμφωνα με την παραπάνω θεώρηση, η συνολική ποσότητα υδρογονανθράκων που αντλείται, για τη συγκεκριμένη πτώση πίεσης, που αντιστοιχεί στους παραγόμενους όγκους που απεικονίζονται στο δεξιό σχήμα της εικόνα, εκφρασμένοι σε συνθήκες πίεσης P_b , θα είναι ίση με το άθροισμα των παραπάνω όγκων λόγω εκτόνωσης. (Dake, 1978)



Εικόνα 1.10: Απεικόνιση θεωρητικής μεταβολής όγκων ταμιευτήρα καθώς η πίεση μειώνεται κατά Δp , λόγω αύξησης όγκου του ταμιευτήρα.

Επομένως, το ογκομετρικό ισοζύγιο υλικού μπορεί να εκφραστεί σε συνθήκες ταμειυτήρα (rb) ως:

Αντλούμενος όγκος = συνολική εκτόνωση + οποιαδήποτε φυσική εισροή νερού

Εξισώνοντας τους παραπάνω όγκους, προκύπτει η γενική μορφή της Material Balance Equation (MBE), που δίνεται από την εξίσωση (1.16).

$$N_p(B_o^b + (R_p - R_s^b)B_g^b) + W_p B_w^b = NB_o^a \left[\frac{(B_o^b - B_o^a) + (R_s^a - R_s^b)B_g^b}{B_o^a} + m \left(\frac{B_g^b}{B_o^a} - 1 \right) + (1 + m) \frac{(c_w S_{wc} + c_f)}{1 - S_{wc}} \Delta p \right] + W_e B_w^b \quad (1.16)$$

Όπου:

N: αρχικός όγκος αποθεμάτων πετρελαίου (STOIIP), σε συνθήκες επιφανείας, $= V \frac{1 - S_{wc}}{B_o^a}$ (stb)

m: ο λόγος του όγκου αερίου καλύμματος, προς τον όγκο των αρχικών αποθεμάτων σε πετρέλαιο.

N_p : όγκος παραγωγής πετρελαίου, σε συνθήκες επιφανείας (stb)

W_p : όγκος παραγωγής νερού, σε συνθήκες επιφανείας (stb)

W_e : το νερό που εισέρχεται στον ταμειυτήρα από εξωτερική πηγή, από έναν υδροφορέα ή από μια γεώτρηση εισπίεσης νερού (stb)

R_p : ή $GOR = R_p = \frac{G_p}{N_p}$ είναι ο λόγος του όγκου του παραγόμενου αερίου, προς τον όγκο παραγόμενου πετρελαίου, σε συνθήκες επιφανείας (scf/stb)

R_s : ο λόγος του διαλυμένου αερίου προς πετρέλαιο, δηλαδή ο όγκος αερίου (scf) που θα παραχθεί στην επιφάνεια από ένα βαρέλι πετρελαίου (stb), (scf/stb)

$B_{o,g,w}$: ογκομετρικοί συντελεστές πετρελαίου, αερίου, νερού (bbl/STB)

c_w, c_f : συμπίεστικότητα νερού και συμπίεστικότητα σχηματισμού, αντίστοιχα (psi^{-1})

Οι όγκοι εκτόνωσης που συνθέτουν την εξίσωση (1.16) δίνονται παρακάτω, από τις εξισώσεις (1.17, 1.18, 1.19, 1.20, 1.21). Σημαντικό για την κατανόηση των εξισώσεων είναι ο μηχανισμός μετατροπής των όγκων σε διαφορετικές συνθήκες. Ο πολλαπλασιασμός του όγκου μιας παραγόμενης φάσης σε συνθήκες επιφάνειας, με τον ογκομετρικό συντελεστή της εν λόγω φάσης αποδίδει τον όγκο που θα καταλάμβανε η φάση αυτή σε συνθήκες ταμειυτήρα.

Συγκεκριμένα:

- συνολικός αντλούμενος όγκος (υπόγεια απόληψη) σε συνθήκες πίεσης ταμιευτήρα P_b , εξίσωση (2.2).

$$Total\ production = N_p(B_o^b + (R_p - R_s^b)B_g^b) + W_p B_w^b (rb) \quad (1.17)$$

Όπου το N_p αποτελεί την παραγωγή πετρελαίου στην επιφάνεια, το γινόμενο $N_p R_p$ αποτελεί την παραγωγή αερίου στην επιφάνεια (ελεύθερου και διαλυμένου στο πετρέλαιο), ενώ το γινόμενο $N_p R_s$ είναι ο παραγόμενος όγκος μόνο του αερίου που ήταν διαλυμένο στο πετρέλαιο σε συνθήκες ταμιευτήρα. Τέλος το W_p είναι ο παραγόμενος όγκος νερού στην επιφάνεια. Ο πολλαπλασιασμός των παραπάνω μεγεθών με τους ογκομετρικούς συντελεστές της εκάστοτε φάσης, $N_p B_o$, $N_p R_p B_g$, $N_p R_s B_g$ και $W_p B_w$ μετατρέπει τους όγκους σε συνθήκες ταμιευτήρα.

Επισημαίνεται πως με τη βοήθεια της διαφοράς $(R_p - R_s^b)$ στην εξίσωση (1.17) επιτυγχάνεται ο υπολογισμός του όγκου του παραγόμενου ελεύθερου αερίου του ταμιευτήρα.

- εκτόνωση πετρελαίου και αερίου διαλυμένου σε αυτό, δίνονται από την εξίσωση (1.18)

$$Total\ oil\ expansion = N[(B_o^b - B_o^a) + (R_s^a - R_s^b)B_g^b] (rb) \quad (1.18)$$

Το αρχικό HCPV για το πετρέλαιο σε πίεση P_a είναι ίσο με NB_o^a (rb) και NB_o^b είναι ο συνολικός όγκος του πετρελαίου σε πίεση P_b . Η συνολική εκτόνωση του όγκου του πετρελαίου σε συνθήκες πίεσης ταμιευτήρα P_b δίνεται από το άθροισμα της εκτόνωσης του αρχικού όγκου του πετρελαίου $N(B_o^b - B_o^a)$ και του όγκου αερίου που θα απελευθερωθεί από το πετρέλαιο $N(R_s^a - R_s^b)B_g^b$, ενώ συγκεκριμένα ο ογκομετρικός συντελεστής αερίου B_g^b μετατρέπει τον όγκο αερίου σε συνθήκες ταμιευτήρα.

- εκτόνωση της υπερκείμενης ζώνης αερίου, εξίσωση (1.19)

$$Gas\ cap\ expansion = mNB_o^a \left(\frac{B_g^b}{B_g^a} - 1 \right) (rb) \quad (1.19)$$

Το γινόμενο mNB_o^a αντιστοιχεί στον αρχικό συνολικό όγκο HCPV της υπερκείμενης ζώνης αερίου σε συνθήκες ταμιευτήρα P_a . Το $mNB_o^a \frac{B_g^b}{B_g^a}$ αντιστοιχεί στον όγκο του αερίου καλύμματος σε πίεση ταμιευτήρα P_b . Από τη διαφορά των δυο όγκων αερίου καλύμματος σε

συνθήκες ταμιευτήρα, δηλαδή τελικού (για πίεση $P_b = P_a - \Delta P$) πλην του αρχικού (για πίεση P_a) προκύπτει ο όγκος εκτόνωσης της υπερκείμενης ζώνης αερίου, σε συνθήκες ταμιευτήρα.

- συμπίεση πόρων λόγω της εκτόνωσης του ενδογενούς νερού και της μείωσης του όγκου των πόρων, εξίσωση (1.20)

$$\text{Total rock and connate water expansion} = (1 + m)NB_o^a \left(\frac{c_w S_{wc} + c_f}{1 - S_{wc}} \right) \Delta p \quad (rb) \quad (1.20)$$

Το γινόμενο $(1 + m)NB_{oi}$ αντιπροσωπεύει το συνολικό HCPV. Η σχέση (1.20) προκύπτει από το άθροισμα της εκτόνωσης του ενδογενούς νερού και της μείωσης του όγκου των πόρων, οι οποίες δίνονται από τις σχέσεις $\Delta V_w = (1 + m)NB_o^a c_w \frac{S_{wc}}{1 - S_{wc}} \Delta P$ και $\Delta PV = (1 + m)NB_o^a \frac{c_f}{1 - S_{wc}} \Delta P$

- Τέλος η καθαρή εισροή νερού, εξίσωση (1.21)

$$\text{Water influx} = W_e \quad (rb) \text{ ή } W_e B_w^b \quad (stb) \quad (1.21)$$

1.6.1.1 Ισοδύναμη έκφραση της εξίσωσης ισοζυγίου μάζας για ταμιευτήρες πετρελαίου

Παραπάνω διατυπώθηκε η γενική μορφή της MBE (εξίσωση 1.16) καθώς ακόμα αναλύθηκαν όλοι οι επιμέρους όροι της εξίσωσης. Προκειμένου να απλοποιηθεί η MBE, οι (Havlena & Odeh, 1963), διατύπωσαν την ισοδύναμη συμπαγή μορφή της εξίσωσης ισοζυγίου μάζας (MBE) που δίνεται από την (εξίσωση 1.22).

$$F = N(E_o + mE_g + (1 + m)E_{f,w}) + W_e = NE_t + W_e \quad (1.22)$$

Όπου:

- F: όγκος παραγωγής στην επιφάνεια, για πτώση πίεσης από P_a σε P_b , εκφρασμένος σε συνθήκες ταμιευτήρα P_b
- N: ο όγκος των αποθεμάτων πετρελαίου σε συνθήκες επιφάνειας (STOOIP).
- m: ο λόγος του όγκου του αερίου προς τον όγκο του πετρελαίου αρχικά στον ταμιευτήρα. Εάν ο ταμιευτήρας είναι ακόρεστος και επομένως δεν υπάρχει αέριο κάλυμμα, τότε $m=0$. Το m δίνει έμμεσα τα αποθέματα αερίου.
- E_o : όρος εκτόνωσης του πετρελαίου και του διαλυμένου αερίου σε αυτό.

E_g : όρος εκτόνωσης του ελεύθερου αερίου

$E_{f,w}$: όρος εκτόνωσης του ενδογενούς νερού και μείωσης του όγκου των πόρων του πετρώματος

W_e : νερό που εισέρχεται στον ταμιευτήρα από εξωτερική πηγή, από έναν υδροφορέα ή από μια γεώτρηση εισπίεσης νερού, (rb).

Οι συντελεστές της εξίσωσης (1.22) (F , E_o , E_g , $E_{f,w}$) ορίζονται παρακάτω, σύμφωνα με τις εξισώσεις (1.23, 1.24, 1.25, 1.26), αξιοποιώντας τους ογκομετρικούς συντελεστές ($B_{g,o,w}$), τον συντελεστή του εν διαλύσει αερίου (R_s), της συμπιεστότητας πετρώματος (c_f) και νερού (c_w), καθώς και το κορεσμό σε νερό (S_w). Οι παρακάτω εξισώσεις είναι ιδιαίτερα χρήσιμες καθώς μπορούν να επιλυθούν ως επιμέρους όροι της MBE, όπως θα αναλυθεί σε επόμενα κεφάλαια. Ακόμα τα μεγέθη των παρακάτω εξισώσεων είναι γνωστά, καθώς αποτελούν είναι δεδομένα παραγωγής (πετρελαίου N_p και νερού W_p) και PVT δεδομένα τα οποία υπολογίζονται όπως με τους τρόπους που αναλύθηκαν παραπάνω.

$$F = N_p (B_o^{(b)} + (R_p + R_s^{(b)}) B_g^{(b)}) + W_p B_w^{(b)} \quad (1.23)$$

$$E_o = (B_o^{(b)} - B_o^{(a)}) + (R_s^{(b)} - R_s^{(a)}) B_g^{(b)} \quad (1.24)$$

$$E_g = B_o^{(a)} (B_g^{(b)} / B_g^{(a)} - 1) \quad (1.25)$$

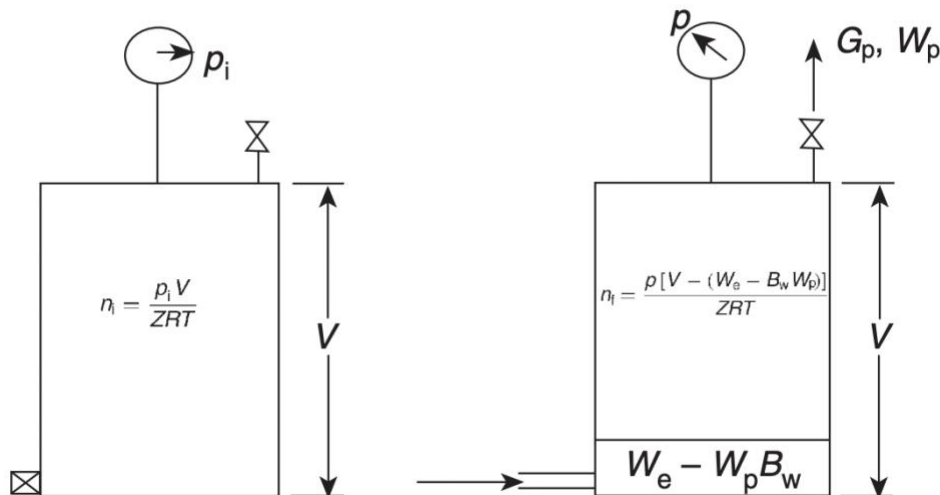
$$E_{f,w} = B_o^{(a)} \frac{c_w S_w + c_f}{1 - S_{wc}} (\Delta p) \quad (1.26)$$

$$R_p = \frac{G_p}{N_p} \quad (1.27)$$

1.6.2 Εξίσωση Ισοζυγίου Μάζας για ταμιευτήρες ξηρού αερίου (Material Balance Equation for Dry Gas Reservoirs)

Οι ταμιευτήρες που περιέχουν μόνο αέριο ονομάζονται ταμιευτήρες αερίου. Αυτού του είδους ταμιευτήρες περιέχουν μείγμα υδρογονανθράκων, που βρίσκεται εξ ολοκλήρου σε αέρια κατάσταση. Το μείγμα αυτό, σε συνδυασμό με τις συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας στην οποία βρίσκεται, μπορεί να είναι ξηρό, υγρό ή αέριο συμπύκνωμα. Οι ταμιευτήρες αερίου χωρίζονται σε δύο κατηγορίες σε σχέση με την ύπαρξη αλλά και την επίδραση πιθανού υδροφορέα, τους μη ογκομετρικούς και ογκομετρικούς. Στη πρώτη περίπτωση υπάρχει εισροή

νερού στον ταμιευτήρα από υδροφορέα, ενώ στη δεύτερη δεν υπάρχει εισροή νερού. Στην (Εικόνα 1.11) απεικονίζεται μη ογκομετρικός ταμιευτήρας αερίου και η πτώση πίεσης λόγω μεταφοράς μάζας κατά τη διαδικασία παραγωγής.



Εικόνα 1.11: Θεωρητικός ταμιευτήρας αερίου, σταθερού όγκου με εισροή νερού. (Ahmed & Meehan, 2012)

Σύμφωνα με τον Ahmed T. (2018), εφαρμόζεται ένα ισοζύγιο μάζας ή ισοζύγιο γραμμομορίων (moles) για το αέριο, που δίνεται από την εξίσωση (1.28).

$$n_p = n_i - n_f \quad (1.28)$$

Όπου:

- n_p : αριθμός moles παραγωγής αερίου
- n_i : αριθμός moles αρχικών αποθεμάτων αερίου στον ταμιευτήρα
- n_f : αριθμός moles απομένοντος αερίου στον ταμιευτήρα

Θεωρώντας πως ο ταμιευτήρας αερίου, αντιπροσωπεύει τη θεωρητική κατάσταση που παρουσιάζεται στην (Εικόνα 1.11), η εξίσωση (1.28) επαναδιατυπώνεται στην εξίσωση (1.29), χρησιμοποιώντας το νόμο των πραγματικών αερίων. Η εξίσωση (1.29) είναι ουσιαστικά η γενική μορφή της εξίσωσης ισοζυγίου μάζας (material balance equation (MBE)).

$$\frac{p_{sc} G_p}{RT_{sc}} = \frac{p_i V}{z_i RT} - \frac{[V - (W_e - W_p)]}{zRT} \quad (1.29)$$

Όπου:

- p_i : αρχική πίεση στον ταμιευτήρα

G_p : αθροιστική παραγωγή αερίου στην επιφάνεια (scf)

p : τρέχουσα πίεση ταμιευτήρα

V : αρχικός όγκος αερίου V , σε συνθήκες ταμιευτήρα (rcf) (GIIP - Gas initially in place)

z_i : συντελεστής συμπίεστικότητας αερίου στην πίεση p_i

z : συντελεστής συμπίεστικότητας αερίου σε πίεση p

T : θερμοκρασία ταμιευτήρα

W_e : αθροιστική εισροή νερού, σε συνθήκες ταμιευτήρα (rb)

W_p : αθροιστική παραγωγή νερού, σε συνθήκες ταμιευτήρα (rb)

1.6.2.1 Ισοδύναμη έκφραση της εξίσωσης ισοζυγίου μάζας για ταμιευτήρες ξηρού αερίου

Οι (Havlena & Odeh, 1963) διατύπωσαν τη γραμμική μορφή της Material Balance Equation για ταμιευτήρες ξηρού αερίου, ξεκινώντας από την κλασσική μορφή (εξίσωση 1.30) η οποία αποτελεί διαφορετική διατύπωση της (εξίσωσης 1.29), εκφρασμένη με τη μορφή ογκομετρικού ισοζυγίου. Σημειώνεται πως στην παρούσα εξίσωση, το μέγεθος W_e εφόσον είναι πολλαπλασιασμένο με τον ογκομετρικό συντελεστή B_w^b , είναι σε συνθήκες επιφανείας (stb), αντίστοιχα και για την εξίσωση (1.31).

$$G_p B_g^b + W_p B_w^b = G(B_g^a - B_g^b) + G B_g^b \frac{c_w S_w^b + c_f}{1 - S_w^b} \Delta p + W_e B_w^b \quad (1.30)$$

Συμφώνα με τους Havlena και Odeh, η εξίσωση (1.29), διατυπώνεται με τη μορφή της εξίσωσης (1.31). Το πρώτο μέλος της εξίσωσης, αντιστοιχεί στον όγκο που καταλαμβάνουν τα προϊόντα στην επιφάνεια, εκφρασμένα σε συνθήκες ταμιευτήρα P_b . Το δεύτερο μέλος αντιπροσωπεύει τη θεωρητική αύξηση του όγκου του ταμιευτήρα, εκφρασμένο σε συνθήκες ταμιευτήρα P_b , ακριβώς όπως και στην περίπτωση του ταμιευτήρα πετρελαίου.

$$F = G(E_g + E_{fw}) + W_e B_w^b = G E_t + W_e B_w^b \quad (1.31)$$

Όπου:

$$F = G_p B_g^b + W_p B_w^b \quad (1.32)$$

$$E_g = B_g^a - B_g^b \quad (1.33)$$

$$E_{fw} = B_g \frac{c_w S_w^b + c_f}{1 - S_w^b} \quad (1.34)$$

1.6.3 Ακρίβεια εξίσωσης Ισοζυγίου Μάζας

Η ακρίβεια της εξίσωσης Ισοζυγίου Μάζας (MBE) συνδέεται αναπόσπαστα με τα μεγέθη που εισάγονται σε αυτή, καθώς και την πίεση. Συγκεκριμένα, (Σταμάτακη, 20XX??):

Για την πίεση

Η πίεση που αναφέρονται όλα τα εξαρτώμενα από αυτή μεγέθη, στην MBE, είναι η μέση πίεση ταμιευτήρα. Ωστόσο, η μέτρηση της μέσης πίεσης του ταμιευτήρα απαιτεί τη διακοπή της παραγωγικής διαδικασίας μέχρι να εξισορροπηθούν όλες οι πιέσεις στο εσωτερικό του και έτσι η μέτρηση πίεσης σε οποιοδήποτε σημείο να αντιπροσωπεύει τη μέση πίεση. Η διαδικασία αυτή είναι ιδιαίτερα χρονοβόρα και για λόγους κόστους αποφεύγεται. Έτσι η πίεση που δύναται να καταγραφεί κατά την διάρκεια της παραγωγικής διαδικασίας του ταμιευτήρα είναι η πίεση του ταμιευτήρα στα όρια της γεώτρησης. Επομένως, καθίσταται απαραίτητη η μετατροπή της μετρούμενης πίεσης στα όρια του ταμιευτήρα, σε μέση πίεση ταμιευτήρα. Η μετατροπή αυτή είναι σαφώς λιγότερο ακριβής από την πραγματική καταγραφή της μέσης πίεσης του ταμιευτήρα και επηρεάζει όλα τα εξαρτώμενα από αυτή μεγέθη.

PVT δεδομένα

Τα PVT (pressure-volume-temperature) δεδομένα, όπως θα αναλύθηκε στο παρόν κεφάλαιο, υπολογίζονται μέσω συσχετίσεων (correlations), σχετικά αξιόπιστων που όμως δεν εγγυώνται τον ακριβή υπολογισμό τους. Από την πειραματική ανάλυση του δείγματος είτε για απευθείας υπολογισμό των δεδομένων, είτε για την ρύθμιση των συσχετίσεων (correlation matching), προκύπτουν οι δύο παρακάτω πηγές σφάλματος. Πρώτον, αν το δείγμα ρευστού που λαμβάνεται είναι από ανασυνδυασμό (recombination) στην επιφάνεια, είτε λαμβάνεται απευθείας από τον πυθμένα της γεώτρησης. Δεύτερον, το γεγονός ότι λόγω αυξημένου κόστους, το DVC, αντικαθίστανται με τη χρήση υπολογιστικών μεθόδων που μετατρέπουν το πειράματα DV σε DVC.

Δεδομένα παραγωγής

Η μέτρηση αθροιστικής παραγωγής κάθε φάσης είναι αξιόπιστη αν αφορά παραγωγή από ένα κοιτάσμα. Στις περισσότερες περιπτώσεις όπου γίνεται ταυτόχρονη παραγωγή από κοιτάσματα, η μέτρηση αθροιστικής παραγωγής είναι ενιαία. Ενώ η συνεισφορά κάθε κοιτάσματος ως προς τη συνολική παραγωγή προσδιορίζεται μέσω περιοδικών δοκιμών στα παραγωγικά φρεάτια (intermittent well testing). Παρόλα αυτά όσον αφορά τα μεγέθη αθροιστικής παραγωγής πετρελαίου (N_p) και νερού (W_p) δεν αποτελεί σοβαρή πηγή



σφάλματος για το ισοζύγιο μάζας. Ωστόσο, υπάρχει αρκετή αβεβαιότητα στις μετρήσεις αθροιστικής παραγωγής αερίου (G_p) και λόγου αερίου-πετρελαίου (R_p).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΜΕΘΟΔΟΥ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ ΜΑΖΑΣ

Εισαγωγή

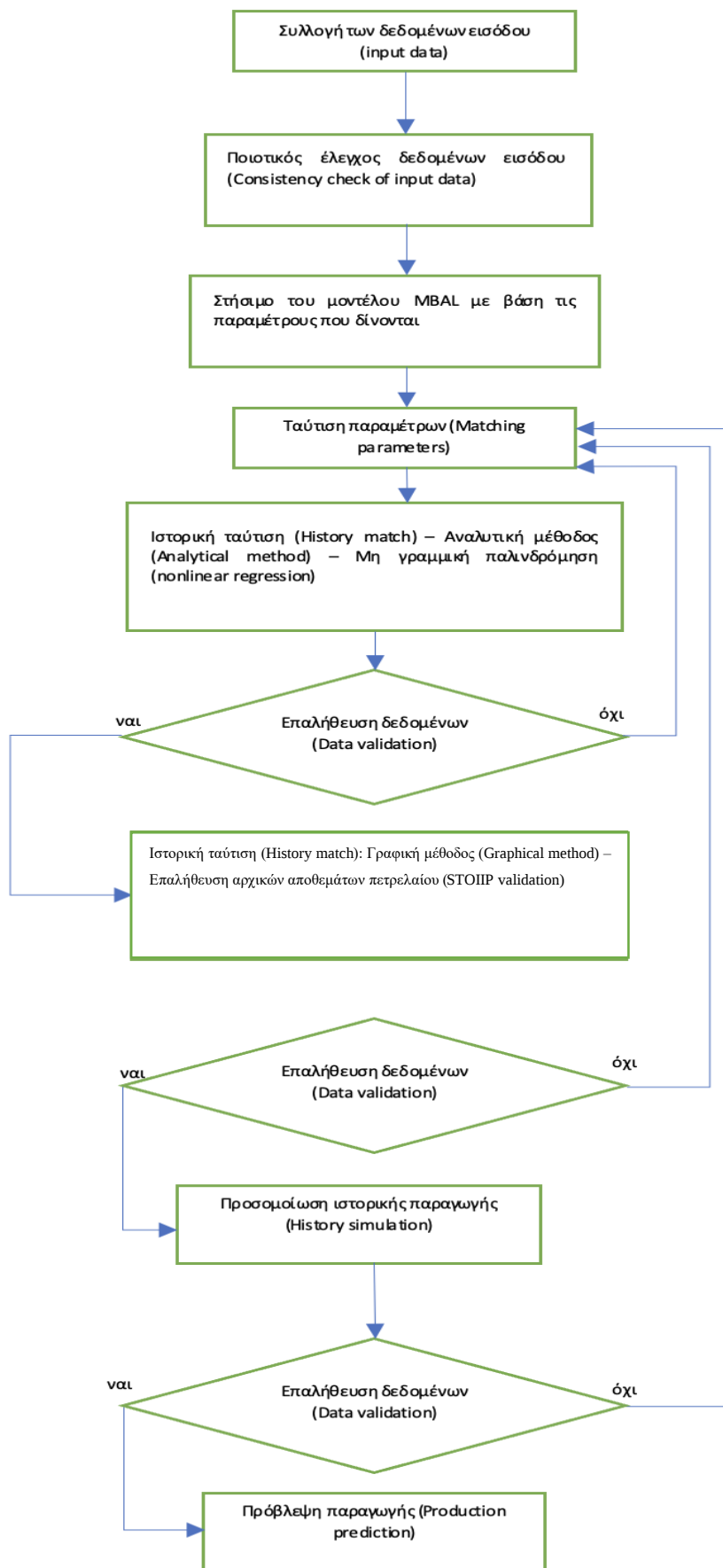
Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται οι δυο φάσεις εφαρμογής της μεθόδου Ισοζυγίου Μάζας (Material Balance). Η πρώτη φάση εφαρμογής της μεθόδου Ισοζυγίου Μάζας Material Balance αφορά στην εκτίμηση της τρέχουσας κατάστασης του ταμιευτήρα. Η κατάσταση του καθορίζεται από το αν είναι κορεσμένος ή ακόρεστος ταμιευτήρας, αλλά και αν είναι ογκομετρικός ταμιευτήρας ή μη ογκομετρικός ταμιευτήρας. Ο χαρακτηρισμός του ως κορεσμένος ή ακόρεστος σχετίζεται με την πίεση κορεσμού του ρευστού, και την ύπαρξη αέριου καλύμματος στον ταμιευτήρα ενώ ο χαρακτηρισμός του ως ογκομετρικός ταμιευτήρας ή μη ογκομετρικός ταμιευτήρας σχετίζεται με την ύπαρξη πιθανού υποκείμενου ή γειτονικού υδροφορέα αλλά και την επίδραση αυτού. Η δεύτερη φάση εφαρμογής της μεθόδου Ισοζυγίου Μάζας (Material Balance) αφορά τη πρόβλεψη μελλοντικής παραγωγής, όπου διάφορα σενάρια παραγωγής μπορούν να υλοποιηθούν, ώστε να επιλεγεί το βέλτιστο από αυτά. Σημειώνεται πως τα μεγέθη αθροιστικής παραγωγής στη πρώτη φάση εφαρμογής της μεθόδου (εκτίμηση) αποτελούν δεδομένα, ενώ στη δεύτερη φάση εφαρμογής της μεθόδου (πρόβλεψη) αποτελούν ζητούμενα μεγέθη.

2.1 Εκτίμηση κατάστασης ταμιευτήρα

Για πρώτη φάση εφαρμογής της μεθόδου Ισοζυγίου Μάζας έχουν αναπτυχθεί διάφορες γραφικές και αναλυτικές μέθοδοι. Οι γραφικές μέθοδοι δεν επιλύουν την ίδια τη Material Balance Equation (MBE), αλλά προσδιορίζουν επιμέρους όρους της εξίσωσης και μέσω διαγραμμάτων εξάγονται συμπεράσματα για την συμπεριφορά/κατάσταση του ταμιευτήρα. Αντίθετα, η αναλυτική μέθοδος αφορά στην απευθείας επίλυση της MBE για ιστορικά δεδομένα παραγωγής προκειμένου να ελεγχθούν και να διορθωθούν οι αρχικές υποθέσεις που γίνονται για την κατάσταση του ταμιευτήρα.

Στη γενική περίπτωση τα βήματα που ακολουθούνται σε αυτή τη φάση εφαρμογής της μεθόδου Material Balance, περιγράφονται από το παρακάτω αναλυτικό διάγραμμα (**Διάγραμμα 2-1**). Συγκεκριμένα, η εφαρμογή της material balance μεθόδου με γραφικές μεθόδους πραγματοποιείται μέσω του προσδιορισμού των επιμέρους όρων της MBE δηλαδή των τιμών F , E_o , E_g και E_{fw} , για κάθε χρονικό διάστημα καταγραφής δεδομένων παραγωγής. Ο προσδιορισμός των τιμών πραγματοποιείται εφαρμόζοντας την εξίσωση material balance διαδοχικά μεταξύ δυο καταγεγραμμένων τιμών πίεσης (ΔP), διατηρώντας κάθε φορά ως αρχική πίεση την πρώτη τιμή της ιστορικής καταγραφής ως σταθερή αφετηρία. Καθώς η αρχική πίεση παραμένει σταθερή για κάθε εφαρμογή, το πλήθος εφαρμογών της εξίσωσης

ισοζυγίου μάζας που προκύπτει θα έχει το ίδιο N (Όγκος αρχικών επιτόπου αποθεμάτων πετρελαίου) και m (Λόγος αερίου/πετρελαίου αρχικά στον ταμιευτήρα). Επομένως εάν υπάρχουν n καταγραφές δεδομένων παραγωγής προκύπτουν $n-1$ τιμές για τους επιμέρους όρους της MBE. Οι $n-1$ τιμές των επιμέρους όρων της εξίσωσης ισοζυγίου μάζας αποτελούν τη βάση των διαγραμμάτων που κατασκευάζονται για την ερμηνεία της κατάστασης του ταμιευτήρα. Στο παρόν κεφάλαιο θα αναλυθούν τόσο οι γραφικές όσο και οι αναλυτικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την ερμηνεία της κατάστασης ταμιευτήρων πετρελαίου αλλά ταμιευτήρων αερίου, στο πλαίσιο της πρώτης φάσης εφαρμογής της Μεθόδου ισοζυγίου μάζας.



Διάγραμμα 2-1: Αναλυτικό διάγραμμα περιγραφής βημάτων (Workflow) Material Balance Μεθόδου.

Οι γραφικές μέθοδοι αποσκοπούν στον προσδιορισμό των μηχανισμών παραγωγής που διέπουν τον ταμειυτήρα, όπως το ελεύθερο αέριο εντός του ταμειυτήρα και η ύπαρξη υδροφορέα. Παρακάτω θα αναφερθούν οι κύριες γραφικές μέθοδοι που εφαρμόζονται για το σκοπό αυτό, όπως τα διαγράμματα που προκύπτουν από τη μέθοδο Havlena – Odeh, το διάγραμμα Campbell, το Energy plot, τα διαγράμματα P/Z καθώς και το διάγραμμα σύγκρισης του GOR με το Solution GOR.

Οι γραφικές μέθοδοι που αξιοποιούνται και από το λογισμικό MBal (Petroleum Experts, 2018) για τον προσδιορισμό της κατάστασης του ταμειυτήρα είναι οι εξής:

Για ταμειυτήρες πετρελαίου:

- Havlena-Odeh
- F/E προς We/Et
- (F-We)/Et προς F (Campbell plot)
- F-We προς Et
- (F-We)/(Eo+Efw) προς Eg/(Eo+Efw)
- F/Et προς F (Campbell plot – No Aquifer)

Για ταμειυτήρες Αερίου/ Αέρια συμπυκνώματα:

- P/Z
- P/Z (over pressured)
- Havlena-Odeh (over pressured)
- Havlena-Odeh (water drive)
- (F-We)/Et (Cole)
- Roach (unknown compressibility)
- F/Et (Cole – No Aquifer)

2.1.1 Γραφικές μέθοδοι για ταμειυτήρες πετρελαίου

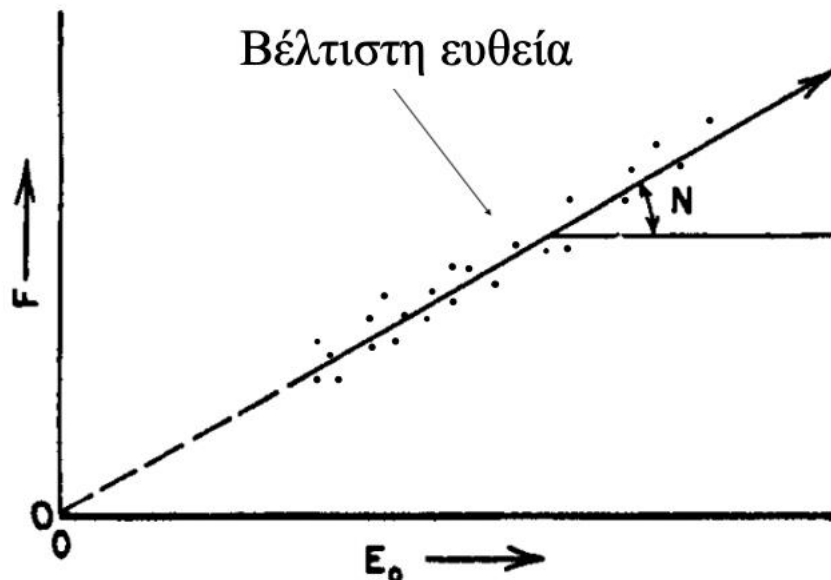
2.1.1.1 Havlena-Odeh

Το 1963, οι Havlena και Odeh παρουσίασαν τεχνικές για τη γραφική ερμηνεία της εξίσωσης material balance ως ευθεία γραμμή. Η μέθοδος των Havlena – Odeh επιλύει επιμέρους όρους της MBE και εφαρμόζεται τόσο για ταμειυτήρες πετρελαίου όσο και για ταμειυτήρες αερίου. Η εφαρμογή της μεθόδου πραγματοποιείται για διαδοχικά διαστήματα πτώσης πίεσης, με σταθερή αφετηρία του διαστήματος, την αρχική πίεση των ιστορικών δεδομένων παραγωγής και κάθε επόμενη πίεση. Παρακάτω παρουσιάζονται οι περιπτώσεις για ακόρεστο-ογκομετρικό ταμειυτήρα και για κορεσμένο-ογκομετρικό ταμειυτήρα.

Αν ο υπό μελέτη ταμιευτήρας είναι ακόρεστος και ογκομετρικός, η πίεση P βρίσκεται πάνω από την πίεση κορεσμού, έτσι δεν υπάρχει ελεύθερο αέριο στον ταμιευτήρα και δεν υπάρχει εισροή νερού από υδροφορέα. Σε αυτή την περίπτωση τα μεγέθη m και W_e ισούνται με το μηδέν καθώς η εξίσωση (1.22) των Havlena – Odeh, που αναλύθηκε στο κεφάλαιο 2, απλοποιείται και παίρνει τη μορφή της εξίσωσης (2.1) από την οποία μπορούν να υπολογιστούν τα αρχικά αποθέματα πετρελαίου N .

$$F = NE_t = NE_o \quad (2.1)$$

Η γραφική επίλυση για ακόρεστο – ογκομετρικό ταμιευτήρα, δίνεται με τη βοήθεια της εξίσωσης (2.1), ευθείας μορφής $y = ax$. Για πλήθος τιμών F και E_o που προκύπτουν από την εφαρμογή της μεθόδου για διαστήματα πτώσης πίεσης, είναι δυνατή η κατασκευή διαγράμματος, όπως φαίνεται στην (Εικόνα 2.1). Η κλίση της βέλτιστης ευθείας που διέρχεται από τα σημεία, αντιστοιχεί στα αποθέματα N .



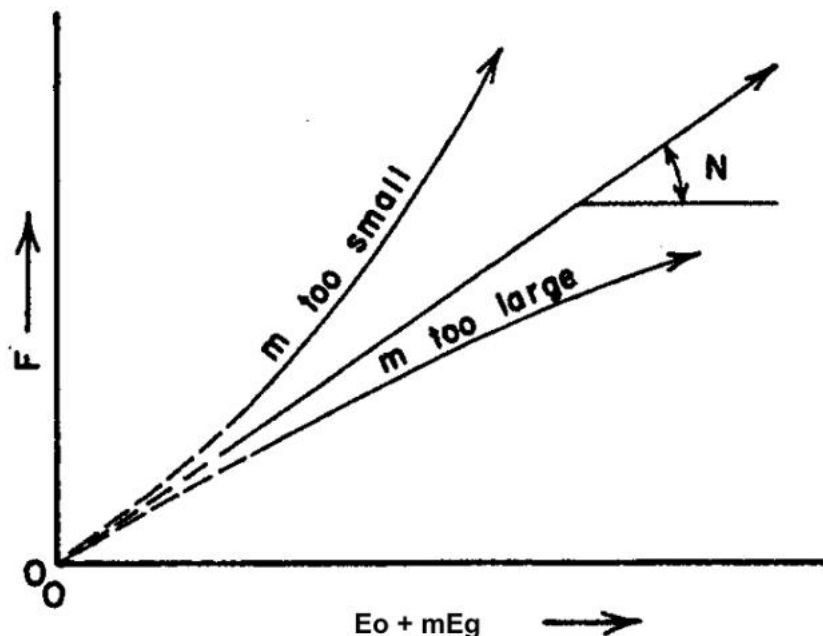
Εικόνα 2.1: Διάγραμμα $F - E_o$, για ακόρεστο – ογκομετρικό ταμιευτήρα, $W_e=0$, $m=0$

Αν ο ταμιευτήρας είναι κορεσμένος και ογκομετρικός, δηλαδή η πίεση P βρίσκεται κάτω από την αρχική πίεση σημείου φυσαλίδας (Bubble point pressure), υπάρχει ελεύθερο αέριο στον ταμιευτήρα και δεν υπάρχει εισροή νερού από υδροφορέα, τότε η εξίσωση (1.22) απλοποιείται στη μορφή της εξίσωσης (2.2).

$$F = NE_t = N(E_o + mE_g) \quad (2.2)$$

Το διάγραμμα που προκύπτει για πλήθος τιμών F και E_t , για κορεσμένο-ογκομετρικό ταμιευτήρα, σύμφωνα με την εξίσωση (2.2), είναι της μορφής $y=ax$, όπου η κλίση a ισούται

με τα αποθέματα N . Εάν η εκτιμωμένη τιμή m που δόθηκε είναι μικρότερη ή μεγαλύτερη της πραγματικής, τότε το διάγραμμα θα αποκλίνει από τη μορφή της ευθείας και παίρνει τη μορφή καμπύλης γραμμής, όπως φαίνεται στην (Εικόνα 2.2). Αντίθετα, αν η τιμή m είναι σωστή, τότε η βέλτιστη ευθεία θα είναι της μορφής ευθείας γραμμής που διέρχεται από το κέντρο των αξόνων.

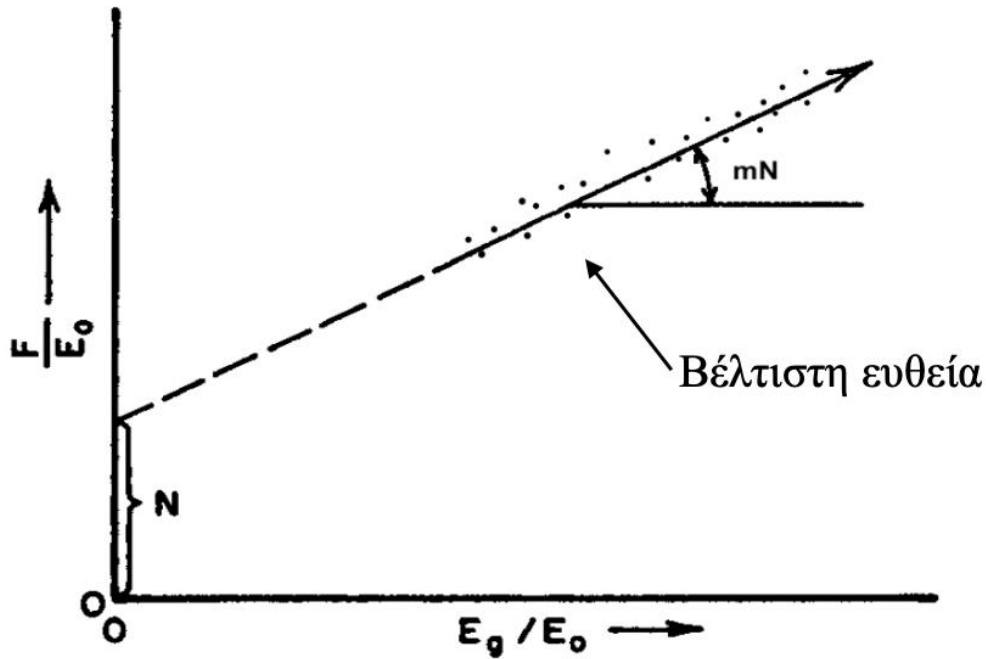


Εικόνα 2.2: Διάγραμμα $(E_o + mE_g) - F$, για την περίπτωση κορεσμένου και ογκομετρικού ταμιευτήρα, $F = N(E_o + E_g)$. Η κλίση της ευθείας που προκύπτει από τη βέλτιστη ευθεία ισούται με τα αποθέματα N .

Εναλλακτικά, για κορεσμένο-ογκομετρικό ταμιευτήρα, ο γραφικός τρόπος προσδιορισμού των δύο παραμέτρων N και m , γίνεται μέσω του διαγράμματος της (Εικόνα 2.3). Για το σκοπό αυτό η εξίσωση (2.2), διαιρείται με τον όρο εκτόνωσης του πετρελαίου (E_o). Η νέα εξίσωση (2.3) είναι της μορφής $y = ax + b$.

$$\frac{F}{E_o} = N + mN \frac{E_g}{E_o} \quad (2.3)$$

Από το διάγραμμα υπολογίζονται τα αρχικά αποθέματα πετρελαίου (N), καθώς και ο λόγος (m) αερίου καλύμματος προς αρχικά αποθέματα πετρελαίου. Από το σημείο τομής του άξονα y με τη βέλτιστη ευθεία που περνάει από τα σημεία ή της προέκτασης της, υπολογίζονται τα αποθέματα πετρελαίου N , ενώ από την κλίση της ευθείας υπολογίζεται το γινόμενο του κλάσματος m με τα αποθέματα N . Επομένως έχοντας υπολογίσει προηγούμενα το N , προσδιορίζεται και ο λόγος m .



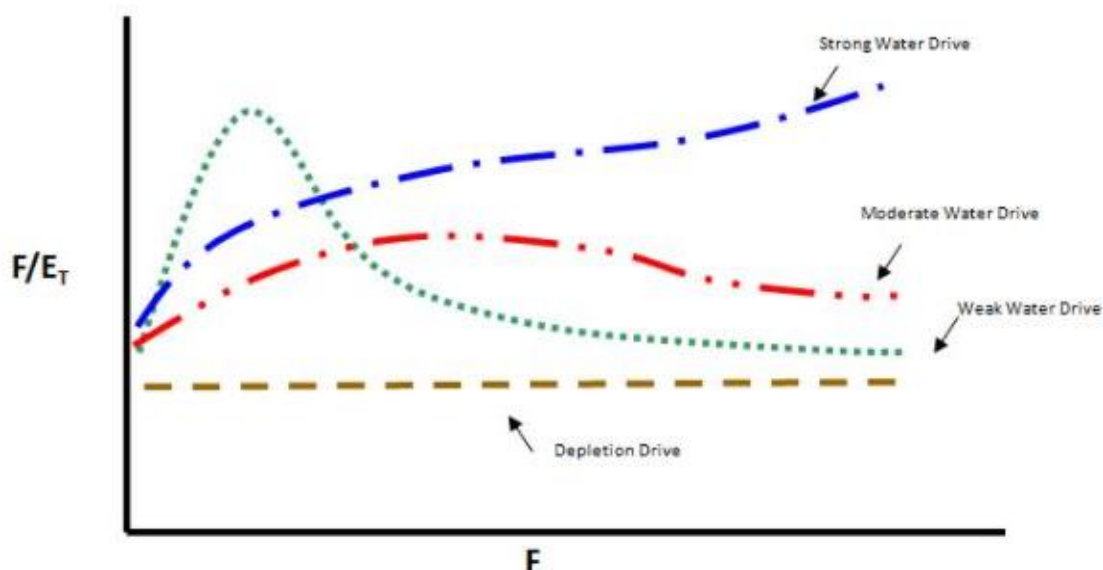
Εικόνα 2.3: Διάγραμμα E_g/E_o με F/E_o , για κορεσμένο και μη ογκομετρικό ταμιευτήρα. Η εξίσωση είναι της μορφής $y=ax+b$, με $b= N$ και $a=mN$ επομένως υπολογίζονται μέσω του διαγράμματος τα αποθέματα N και το κλάσμα m .

2.1.1.2 Διάγραμμα Campbell

Το διάγραμμα Campbell, αποτελεί την καλύτερη ένδειξη σχετικά με την ύπαρξη ή μη υποκείμενου ή γειτονικού υδροφορέα σχηματισμού, ο οποίος μπορεί να επηρεάζει την παραγωγή από έναν ταμιευτήρα πετρελαίου. Η μεθοδολογία που ακολουθείται για τη δημιουργία του βασίζεται στην υπόθεση ότι ο υπό μελέτη ταμιευτήρας είναι ογκομετρικός ($W_e=0$) και χρησιμοποιείται η εξίσωση ισοζυγίου μάζας, προκειμένου να υπολογιστούν οι όροι που εμπλέκονται στο διάγραμμα αυτό. Συγκεκριμένα στο διάγραμμα του Campbell απεικονίζονται στον άξονα X, ο όγκος παραγωγής στην επιφάνεια (F) σε συνθήκες ταμιευτήρα και στον άξονα Y ο λόγος (F/E_t) του όγκου παραγωγής στην επιφάνεια (F), σε συνθήκες ταμιευτήρα, προς τον όρο ολικής εκτόνωσης (**Εικόνα 2.4**). Αυτοί οι επιμέρους όροι εξίσωσης ισοζυγίου Μάζας (Material Balance Equation), υπολογίζονται για διαστήματα πτώσης πίεσης όπου υπάρχουν δεδομένα παραγωγής.

Για να επιβεβαιωθεί η αρχική υπόθεση του ογκομετρικού ταμιευτήρα, τότε το διάγραμμα που προκύπτει από τα δεδομένα, θα έχει μορφή ευθείας οριζόντιας γραμμής και ο λόγος F/E_t θα είναι ένας σταθερός αριθμός, ο οποίος θα ταυτίζεται με τα αποθέματα πετρελαίου N . Αντίθετα εάν αποκλίνει από την μορφή οριζόντιας ευθείας, αυτό υποδεικνύει μια μη υπολογισμένη πηγή ενέργειας. Η πηγή ενέργειας προέρχεται από την επίδραση

υδροφορέα λόγω εισροής, W_e . Μάλιστα, μέσα από το διάγραμμα του Campbell μπορεί να επιβεβαιωθεί τόσο η ύπαρξη υδροφορέα, όσο και να προσδιοριστεί ποιοτικά η ισχύς του όπως φαίνεται στην (Εικόνα 2.4).



Εικόνα 2.4: Διάγραμμα Campbell , επιβεβαιώνει την ύπαρξη ή μη υδροφορέα, καθώς και την ισχύς αυτού. (Anon., 2020)

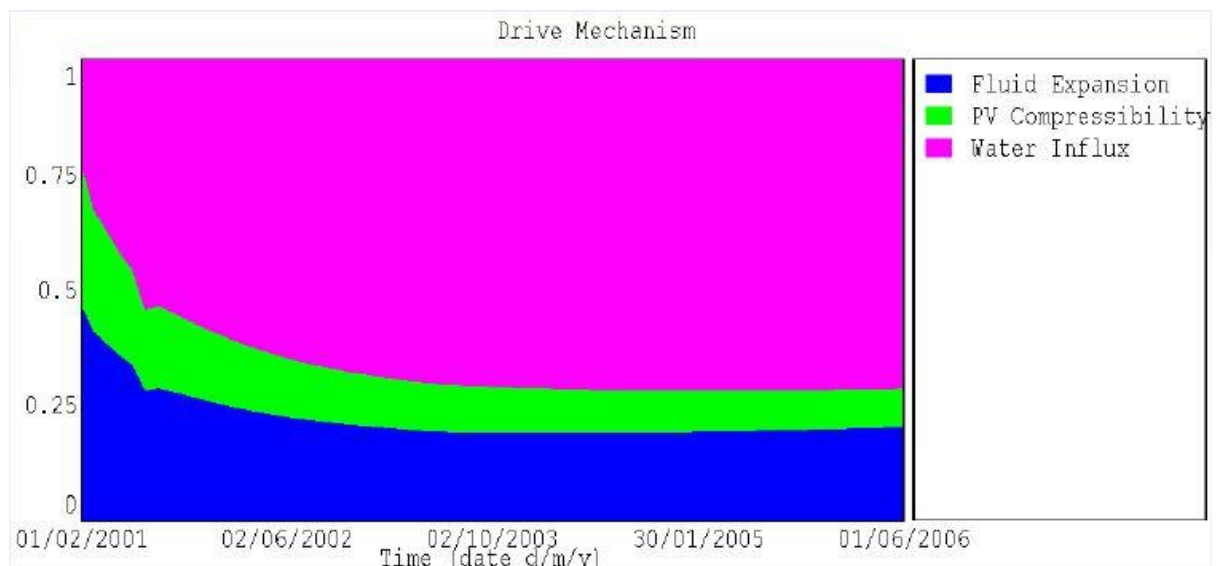
2.1.1.3 Energy Plot

Το Energy plot αποτελεί ένα διάγραμμα το οποίο αποτυπώνει το βαθμό συμμετοχής του κάθε μηχανισμού παραγωγής σε ένα ταμειυτήρα υδρογονανθράκων. Υπάρχουν τέσσερις δείκτες που περιγράφουν τους επιμέρους μηχανισμούς που συμμετέχουν στην παραγωγή ενός ταμειυτήρα πετρελαίου σε κάθε χρονική στιγμή. Οι δείκτες αυτοί προκύπτουν από την εξίσωση ευθείας γραμμή της εξίσωσης Material Balance που αναπτύχθηκε από τους Havlena και Odeh, διαιρώντας την με τον όγκο της παραγωγής στην επιφάνεια σε συνθήκες ταμειυτήρα (F). Ως αποτέλεσμα δημιουργείται η εξίσωση (2.4) που αποτελείται από τέσσερα κλάσματα, όπου το καθένα αντιστοιχεί σε έναν από τους τέσσερις δείκτες και εκφράζει το ποσοστό συμμετοχής του κάθε μηχανισμού στην παραγωγική διαδικασία. Το άθροισμα των δεικτών ισούται με τη μονάδα, που εκφράζει το 100%. Στον **Πίνακας 2**, παρουσιάζονται οι δείκτες των μηχανισμών αυτών. Οι δείκτες αποτυπώνονται σε stacked plots ως προς το χρόνο ή την πίεση, όπως φαίνεται στην (Εικόνα 2.5).

$$\frac{NE_o}{F} + \frac{NmE_g}{F} + \frac{N(1+m)E_{fw}}{F} + \frac{W_e}{F} = 1 \quad (2.4)$$

Πίνακας 2: Δείκτες που περιγράφουν τη συμμετοχή του κάθε μηχανισμού παραγωγής στην παραγωγή.

$DDI = \frac{NE_o}{F}$	Εκτόνωση πετρελαίου και διαλυμένου αερίου (Depletion Drive Index)
$SDI = \frac{NmE_g}{F}$	Εκτόνωση αερίου καλύμματος (Segregation Drive Index)
$CDI = \frac{N(1+m)E_{fw}}{F}$	Εκτόνωση ενδογενούς νερού και μείωση του όγκου των πόρων του σχηματισμού (Formation and Connate Water Compressibility Index)
$WDI = \frac{W_e}{F}$	Συμμετοχή υδροφορέα (Water Drive Index)



Εικόνα 2.5: Energy plot δεικτών περιγράφουν τη συμμετοχή του κάθε μηχανισμού παραγωγής ως προς το χρόνο.

2.1.2 Γραφικές μέθοδοι για ταμειντήρες αερίου

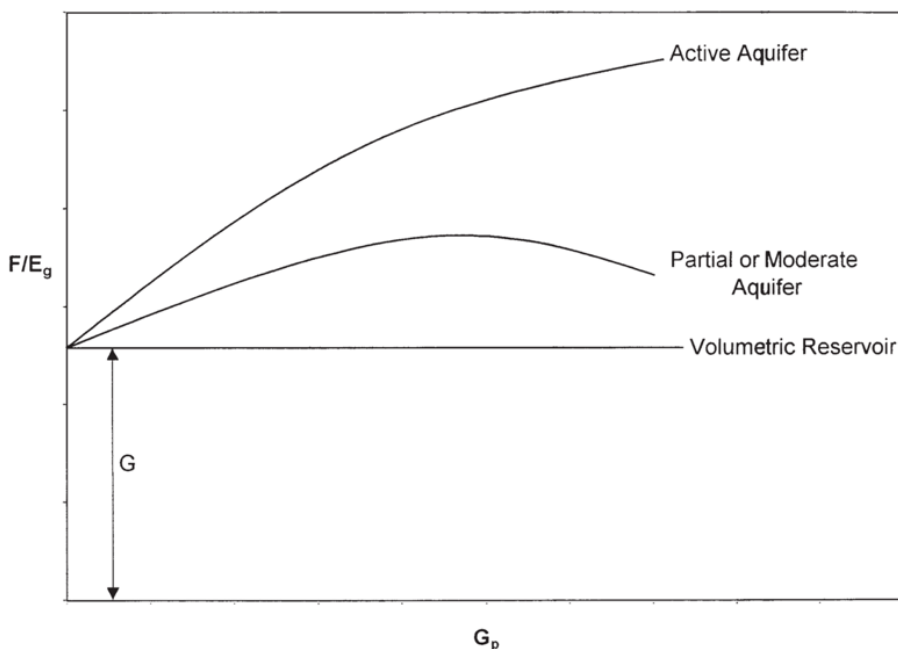
2.1.2.1 Havlena – Odeh

Καθώς η εκτόνωση του ενδογενούς νερού και η μείωση του όγκου των πόρων του σχηματισμού θεωρούνται αμελητέες σε σχέση με την εκτόνωση του αερίου, ο όρος E_{fw} απλοποιείται κατά κανόνα από την εξίσωση (1.31), η οποία επαναδιατυπώνεται στην εξίσωση (2.5). Η εξίσωση αυτή διαιρείται με τον συντελεστή εκτόνωσης αερίου E_g δίνοντας την

εξίσωση (2.6). Οι όροι του αριστερού μέλους της εξίσωσης F/E_g , υπολογίζονται για διαστήματα πτώσης πίεσης των ιστορικών δεδομένων παραγωγής, διατηρώντας σταθερή την αρχική τιμή πίεσης. Με τις τιμές της αθροιστικής παραγωγής αερίου G_p , κατασκευάζεται το διάγραμμα της (Εικόνα 2.6). Από το συγκεκριμένο διάγραμμα, εξάγονται συμπεράσματα για τον μηχανισμό παραγωγής που συμμετέχει στην παραγωγή φυσικού αερίου. Στην περίπτωση ογκομετρικού ταμιευτήρα αερίου, η βέλτιστη ευθεία που διέρχεται από τα σημεία θα είναι παράλληλη με τον άξονα των τετμημένων, εφόσον $W_e = 0$ τότε $F/E_g = G = constant$. Το σημείο τομής της ευθείας αυτής με τον άξονα των τεταγμένων αντιπροσωπεύει την τιμή των αρχικών αποθεμάτων αερίου στον ταμιευτήρα (GIIP). Αντίθετα, αν υπάρχει εισροή νερού στον ταμιευτήρα $W_e \neq 0$, τότε τα σημεία δεν αποδίδουν ευθεία γραμμή, όπως φαίνεται στη (Εικόνα 2.6). Επιπλέον, υποδεικνύουν την ένταση με την οποία συμμετέχει ο υδροφορέας στην παραγωγή.

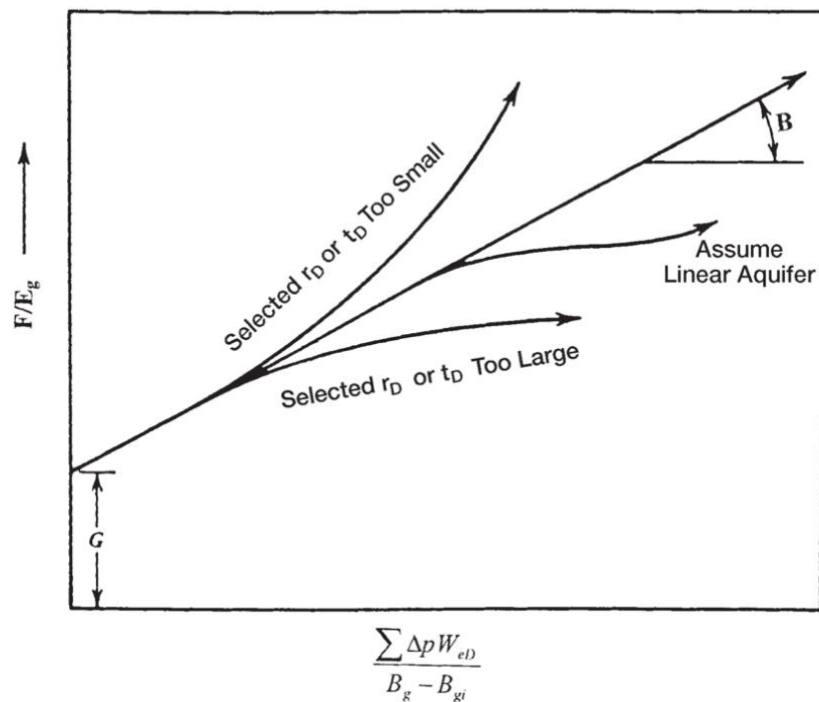
$$F = GE_g + W_e B_w^b \quad (2.5)$$

$$\frac{F}{E_g} = G + \frac{W_e B_w^b}{E_g} \quad (2.6)$$



Εικόνα 2.6: Διάγραμμα Havlena – Odeh F/E_g προς G_p για ταμιευτήρες αερίου – Εξακρίβωση ύπαρξης ή μη υδροφορέα καθώς και της έντασης συμμετοχής του.

Εναλλακτικά, μπορούν να υπολογιστούν με την ίδια μεθοδολογία τα μεγέθη F/E_g και $W_e B_w^b/E_g$ της εξίσωσης (2.6), για κάθε βήμα πτώσης πίεσης, θέτοντας ως προϋπόθεση ότι η εισροή νερού είναι σταθερή. Από τις τιμές που προκύπτουν κατασκευάζεται το διάγραμμα της (Εικόνα 2.7). Εάν η εκτίμηση για το μέγεθος του υδροφορέα είναι σωστή, τότε η βέλτιστη ευθεία που διέρχεται από τα σημεία είναι της μορφής $y = ax + b$, διαφορετικά θα αποκλίνει από την μορφή αυτή.



Εικόνα 2.7: Διάγραμμα F/E_g προς $\Sigma(\Delta p W_{el})/(B_g - B_{gi})$. (Ahmed, 2019)

2.1.2.2 Διάγραμμα P/Z

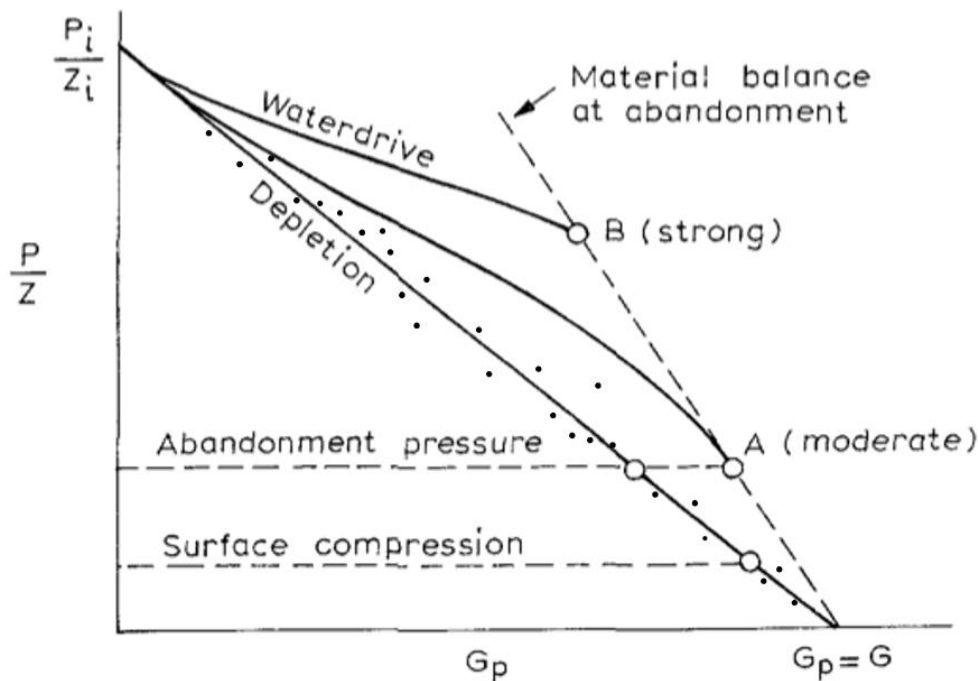
Το διάγραμμα P/Z δίνει τη δυνατότητα υπολογισμού των αρχικών αποθεμάτων αερίου, καθώς και της εκτίμησης για την ύπαρξη ή μη υδροφορέα. Η αρχική θεώρηση που θέτει η συγκεκριμένη γραφική μέθοδος, είναι πως ο ταμιευτήρας είναι ογκομετρικός $W_e = 0$, επομένως δεν υπάρχει υδροφορέας που υποστηρίζει ως κινητήριος μηχανισμός τον ταμιευτήρα αερίου.

Η εξίσωση (1.29), που παρουσιάστηκε στο 1^ο κεφάλαιο και αποτελεί τη γενική μορφή του material balance equation (MBE) για ταμιευτήρες ξηρού αερίου, απλοποιείται στη μορφή της εξίσωσης (2.7). Ωστόσο η νέα αυτή εξίσωση, μπορεί να εκφραστεί σε δυο διαφορετικές μορφές όσον αφορά α) τον λόγο p/z και β) το B_g .

$$\frac{p_{sc} G_p}{T_{sc}} = \left(\frac{p_i}{z_i T} \right) V - \left(\frac{p}{z T} \right) V \quad (2.7)$$

Η αναδιάταξη της εξίσωσης (2.7) ως προς P/z δίνεται από την εξίσωση (2.8). Η εξίσωση είναι γραμμική ως προς την αθροιστική παραγωγή αερίου G_p και το διάγραμμα που προκύπτει για ζεύγη τιμών p/z και αθροιστικής παραγωγής αερίου G_p , παρουσιάζεται στην (Εικόνα 2.8).

$$\frac{p}{z} = \frac{p_i}{z_i} - \left(\frac{p_{sc} T}{T_{sc} V} \right) G_p \quad (2.8)$$



Εικόνα 2.8: Διάγραμμα λόγου P_i/Z_i προς την αθροιστική παραγωγή αερίου.

Σύμφωνα με το διάγραμμα της (Εικόνα 2.8), καθώς η πίεση (p) μειώνεται στον ταμιευτήρα, κατά την παραγωγική διαδικασία, ο λόγος πίεσης προς τον συντελεστή συμπίεστικότητας P_i/Z_i μειώνεται γραμμικά έως τη τιμή μηδέν, με αποτέλεσμα να τέμνει τον άξονα των τετμημένων. Στο σημείο τομής, η τιμή αθροιστικής παραγωγής αερίου (G_p), θα αντιπροσωπεύει τα αρχικά αποθέματα αερίου ($GIIP$ ή G). Στην πραγματικότητα, η τιμή P_i/Z_i δεν προσεγγίζει την τιμή μηδέν, έτσι από την προέκταση της βέλτιστης ευθείας που περνάει από τα σημεία του διαγράμματος, υπολογίζονται τα αρχικά αποθέματα. Ωστόσο, εάν το διάγραμμα αποκλίνει από την ευθεία, όπως φαίνεται στην (Εικόνα 2.8), ενδεικτικά στα σημεία A, B, τότε σηματοδοτείται η ύπαρξη υδροφορέα και μάλιστα μπορεί να εκτιμηθεί ποιοτικά η ισχύς του από το σχήμα της γραμμής που προκύπτει.

2.1.2.3 Διάγραμμα G-G_p

Η εξίσωση (2.7) εκφράζεται συναρτήσει του ογκομετρικού συντελεστή αερίου B_g , ώστε να προκύψει η εξίσωση (2.12). Η νέα εξίσωση (2.12) κατασκευάζεται από τη συνδυαστική επίλυση των παρακάτω εξισώσεων (2.9, 2.10, 2.11), καθώς και της εξίσωσης (2.7):

$$B_{gi} = \frac{V}{G} \quad (2.9)$$

$$B_g = \frac{p_{sc} z_i T}{T_{sc} p} \quad (2.10)$$

Από (2.9) και (2.10) :

$$\frac{p_{sc} z_i T}{T_{sc} p_i} = \frac{V}{G} \quad (2.11)$$

Από (2.11) και (2.7) :

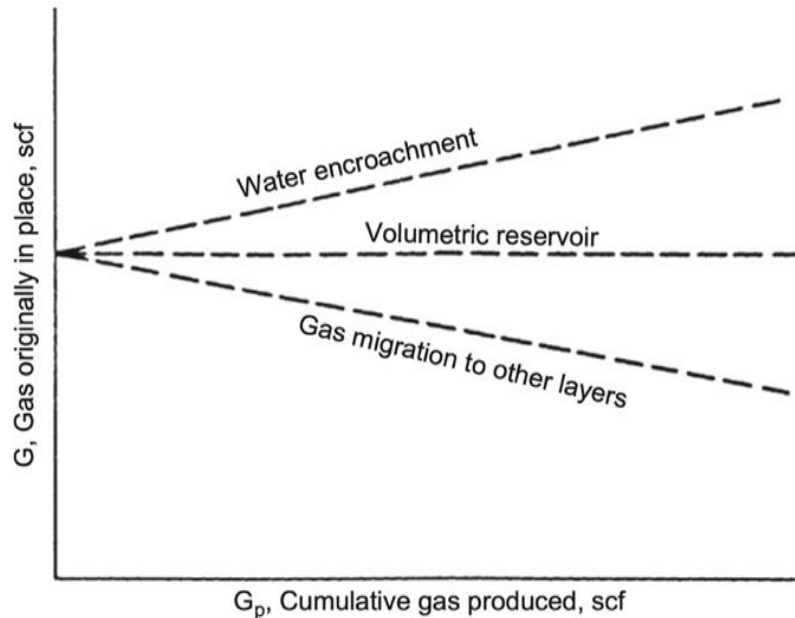
$$G = \frac{G_p B_g}{(B_g - B_{gi})} \quad (2.12)$$

Για ζεύγη τιμών του δεξιού μέλους της εξίσωσης (2.12) για κάθε βήμα πτώσης πίεσης, κατασκευάζεται διάγραμμα αρχικών αποθεμάτων αερίου G προς την αθροιστική παραγωγή αερίου G_p (**Εικόνα 2.9**), που δίνει τη δυνατότητα εκτίμησης ύπαρξης υδροφορέα. Σημειώνεται πως η γραφική μέθοδος θέτει ως αρχική θεώρηση πως ο ταμιευτήρας είναι ογκομετρικός.

Στην αρχή της παραγωγικής ζωής ενός ταμιευτήρα, ο παρονομαστής του δεξιού μέλους της εξίσωσης ισοζυγίου μάζας, εξίσωση (2.12), είναι πολύ μικρός, ενώ ο αριθμητής είναι σχετικά μεγάλος. Μια μικρή αλλαγή στον παρονομαστή μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλη απόκλιση στην υπολογιζόμενη τιμή των αρχικών αποθεμάτων αερίου. Επομένως δεν ενδείκνυται η εφαρμογή αυτής της γραφικής μεθόδου στην αρχή της παραγωγικής ζωής του ταμιευτήρα.

Εάν οι υπολογισμοί, όπως αποτυπώνεται στην (**Εικόνα 2.9**), δίνουν σταθερές τιμές για τα αρχικά αποθέματα αερίου G , ο ταμιευτήρας λειτουργεί ογκομετρικά και το υπολογισμένο G είναι αξιόπιστο και επιβεβαιώνει την αρχική θεώρηση για $W_e = 0$. Σε αντίθετη περίπτωση, όπου η ευθεία γραμμή έχει κλίση και δεν είναι παράλληλη ως προς τον άξονα των τετμημένων,

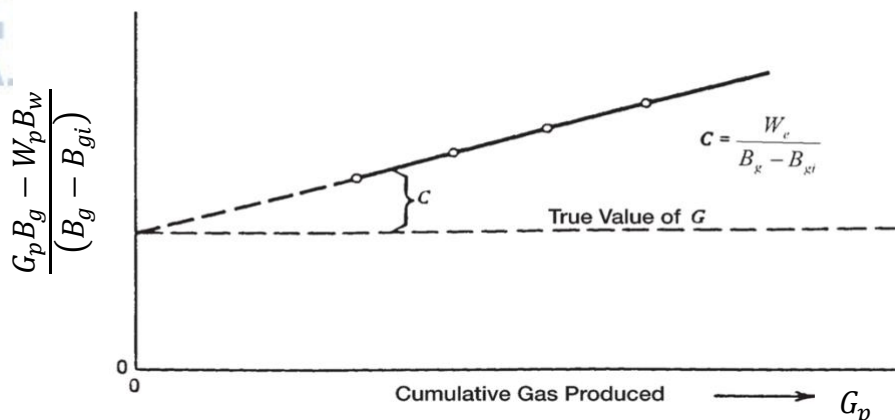
τότε η αρχική θεώρηση ογκομετρικού ταμιευτήρα αερίου είναι λανθασμένη. Ειδικότερα, αν οι τιμές του υπολογιζόμενου G αυξάνονται κατά τη διάρκεια παραγωγής, τότε υποδηλώνεται η ύπαρξη υδροφορέα, ενώ εάν έχουν πτωτική τάση υποδηλώνεται πως υπάρχει μετανάστευση αερίου προς άλλα στρώματα.



Εικόνα 2.9: Γραφικός προσδιορισμός των αρχικών αποθεμάτων αερίου G (gas initially in place). (Ahmed, 2019)

Στην περίπτωση μη ογκομετρικού ταμιευτήρα αερίου, δηλαδή υπάρχει εισροή νερού $W_e \neq 0$, η εξίσωση (2.12) τροποποιείται λαμβάνοντας υπόψιν την καθαρή εισροή νερού ($W_e - W_p B_w$), ώστε να δώσει την εξίσωση (2.13). Κατασκευάζοντας διάγραμμα (**Εικόνα 2.10**) για ζεύγη τιμών του δεξιού μέλους της εξίσωσης (2.13) και των ιστορικών δεδομένων παραγωγής αερίου G_p , για κάθε βήμα πτώσης πίεσης, μπορεί να υπολογιστεί η τιμή των αρχικών αποθεμάτων αερίου G και η εισροή νερού W_e . Αυτό επιτυγχάνεται καθώς η μορφή της βέλτιστης ευθείας που διέρχεται από τα σημεία αυτά είναι της μορφής $y = ax + b$, από την τομή της με τον άξονα των τεταγμένων υπολογίζεται η τιμή των αρχικών αποθεμάτων αερίου G , ενώ από την κλίση της ευθείας προσδιορίζεται η τιμή της αθροιστικής εισροής νερού W_e .

$$G = \frac{G_p B_g - (W_e - W_p B_w)}{(B_g - B_{gi})} \Leftrightarrow G + \frac{W_e}{(B_g - B_{gi})} = \frac{G_p B_g - W_p B_w}{(B_g - B_{gi})} \quad (2.13)$$



Εικόνα 2.10: Διάγραμμα γραφικής εκτίμησης αποθεμάτων για Μη ογκομετρικό ταμιευτήρα αερίου.

2.1.3 Αναλυτικές μέθοδοι

Οι αναλυτικές μέθοδοι, σε αντίθεση με τις γραφικές, επιλύουν τη εξίσωση ισοζυγίου μάζας (MBE) εξίσωση (1.16). Η MBE επιλύεται ως προς την παραγωγή πετρελαίου N_p θεωρώντας δεδομένες, επομένως και σωστές, τις εκτιμήσεις όλων των μεγεθών, δηλαδή των χαρακτηριστικών του ταμιευτήρα (N , m , W_e), και των δεδομένων παραγωγής (G_p , W_p , P). Στη συνέχεια συγκρίνεται το υπολογιζόμενο N_p με το καταγεγραμμένο. Εάν το Material Balance έχει εφαρμοστεί σωστά, δηλαδή οι υποθέσεις για το μοντέλο και οι παράμετροι είναι ορθές και ακριβείς, τότε θα πρέπει να ικανοποιείται η MBE. Επομένως, θα πρέπει να υπάρχει ταύτιση του υπολογιζόμενου από την MBE N_p με το καταγεγραμμένο N_p από τα πραγματικά δεδομένα παραγωγής πετρελαίου. Εάν υπάρχει απόκλιση, το γεγονός αυτό σηματοδοτεί το ότι μία από τις παραμέτρους του μοντέλου είναι λανθασμένη, είτε η εκτίμηση για τον υδροφορέα W_e , είτε για το αέριο κάλυμμα εντός του ταμιευτήρα m , είτε για τα αποθέματα N . Στη συνέχεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος της παλινδρόμησης (Regression) για να προσδιορίσει τις άγνωστες παραμέτρους για τον ταμιευτήρα αλλά και τον υδροφορέα.

Κατά την εφαρμογή της αναλυτικής μεθόδου η MBE (εξίσωση 1.16) επιλύεται ως προς την παραγωγή πετρελαίου (N_p) όπως φαίνεται παρακάτω (2.14). Ενώ εάν γίνει αρχική θεώρηση για ογκομετρικό και ακόρεστο ταμιευτήρα η εξίσωση ισοζυγίου μάζας (MBE), που επιλύεται κατά την αναλυτική μέθοδο, απλοποιείται κατάλληλα.

$$N_p = \frac{NB_o^a}{(B_o^b + (R_p - R_s^b)B_g^b)} \left[\frac{(B_o^b - B_o^a) + (R_s^a - R_s^b)B_g^b}{B_o^a} + m \left(\frac{B_g^b}{B_g^a} - 1 \right) + (1 + m) \frac{(c_w S_{wc} + c_f) \Delta p}{1 - S_{wc}} \right] + \frac{B_w^b (W_e - W_p)}{(B_o^b + (R_p - R_s^b)B_g^b)} \quad (2.14)$$

2.1.4 Βοηθητικές γραφικές μέθοδοι

Solution-GOR και GOR

Η γραφική απεικόνιση του Solution GOR (R_s) και του GOR (R_p) συναρτήσει της πίεσης (P) δεν προκύπτει από την επίλυση επιμέρους όρων της MBE, όπως συμβαίνει κατά την εφαρμογή των γραφικών μεθόδων. Ωστόσο, αποτελεί έναν επιπλέον έλεγχο για την εκτίμηση της κατάστασης του ταμιευτήρα υδρογονανθράκων. Συγκεκριμένα, αν ο υπό μελέτη ταμιευτήρας πετρελαίου είναι κορεσμένος ή ακόρεστος.

Το GOR (R_p) προκύπτει από τα ιστορικά δεδομένα παραγωγής, από τον λόγο παραγόμενου αερίου (G_p) προς παραγόμενο πετρέλαιο (N_p), ενώ το solution GOR (R_s) δίνεται από PVT αναλύσεις όπως αναφέρθηκε στο **κεφάλαιο 1.2**. Όταν ο ταμιευτήρας είναι ακόρεστος τότε το R_s είναι σταθερό και ισούται με το R_p εξίσωση (2.15) καθώς όλο το αέριο που παράγεται στην επιφάνεια ήταν διαλυμένο στο πετρέλαιο στις συνθήκες ταμιευτήρα.

$$GOR = R_s \quad (2.15)$$

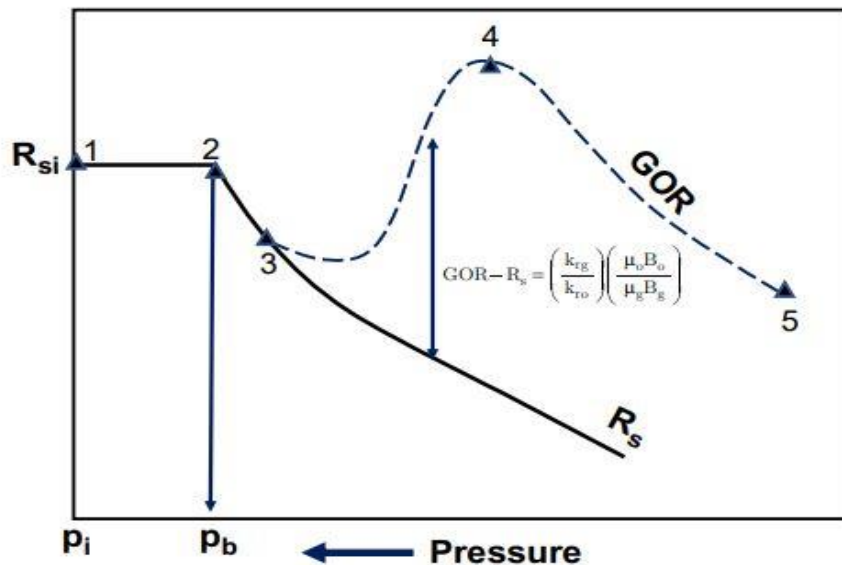
Αντίθετα στην περίπτωση κορεσμένου ταμιευτήρα, που βρίσκεται σε πίεση κάτω από το σημείο Bubble point, το R_s μειώνεται. Με τη πτώση της πίεσης απελευθερώνονται οι πιο πτητικές ενώσεις του πετρελαίου, εντός του ταμιευτήρα. Έτσι δημιουργείται ελεύθερο αέριο και το R_s δεν ισούται πλέον με το GOR, εξίσωση (3.16).

$$GOR = R_s + \left(\frac{k_{rg}}{k_{ro}} \right) \left(\frac{\mu_o B_o}{\mu_g B_g} \right) \quad (2.16)$$

Όπου:

- GOR ή R_p : λόγος παραγόμενου αερίου προς παραγόμενο πετρέλαιο (gas-oil ratio), (scf/STB)
- R_s : λόγος διαλυμένου αερίου προς το πετρέλαιο (solution gas-oil ratio), (scf/STB)
- k_{rg} : σχετική διαπερατότητα αερίου (relative permeability to gas)
- k_{ro} : σχετική διαπερατότητα πετρελαίου (relative permeability to oil)
- B_o : ογκομετρικός συντελεστής πετρελαίου (oil formation volume factor), (bbl/STB)
- B_g : ογκομετρικός συντελεστής αερίου (gas formation volume factor), (bbl/scf)
- μ_o : ιξώδες πετρελαίου (oil viscosity), (cp)
- μ_g : ιξώδες αερίου (gas viscosity), (cp)

Επομένως από την ταύτιση ή την απόκλιση του solution GOR (R_s) και του GOR (R_p) συμπεραίνεται αν ο ταμιευτήρας είναι μονοφασικός με το $m = 0$ ή διφασικός και με $m > 0$. Η γραφική απεικόνιση των δύο μεγεθών, καθώς και η συσχέτιση τους, παρουσιάζεται στην (Εικόνα 2.11).



Εικόνα 2.11: Γραφική απεικόνιση του GOR και του R_s , ως προς την πίεση P . Το GOR ταυτίζεται γραφικά με το R_s για ακόρεστο ταμιευτήρα. (Ahmed, T., & Meehan, D. N. 2012)

Στο σημείο 1 του διαγράμματος, η πίεση του ταμιευτήρα είναι πάνω από την πίεση του σημείου bubble point P_b και δεν υπάρχει ελεύθερο αέριο στον ταμιευτήρα. Το GOR και το R_s παραμένουν σταθερά έως η πίεση να φτάσει στην πίεση bubble point, στο σημείο 2. Εκεί το αέριο αρχίζει και απελευθερώνεται αυξάνοντας τον κορεσμό του. Έτσι, καθώς η πίεση μειώνεται, από το σημείο 2 στο σημείο 3, το GOR και το R_s μειώνονται. Όμως το ελεύθερο αέριο δεν ρέει παρά μόνο όταν ο κορεσμός του αερίου S_g φτάσει τον κρίσιμο κορεσμό S_{gc} ⁸, στο σημείο 3. Στο σημείο αυτό το GOR και το R_s διαφοροποιούνται και η εξίσωση που αντιπροσωπεύει τη σχέση των δύο μεγεθών όπως αναφέρθηκε προγενέστερα είναι η εξίσωση (2.16). Στο σημείο 4, το GOR λαμβάνει τη μέγιστη τιμή του, η ραγδαία αύξηση των τιμών οφείλεται στο ότι το ελεύθερο αέριο κινείται ταχύτερα από το πετρέλαιο εντός της γεώτρησης, με αποτέλεσμα αρχικά να παράγονται μεγάλες ποσότητες αερίου. Στο σημείο 5, καθώς το μεγαλύτερο ποσοστό του εκτονωμένου αερίου έχει παραχθεί, το GOR πλέον δεν έχει τόσο μεγάλη διαφορά με το R_s .

⁸ S_{gc} : κρίσιμος αερίου ονομάζεται ο κορεσμός πάνω από την οποίο το αέριο μπορεί να ρέει.

2.2 Πρόβλεψη Μελλοντικής Παραγωγής

Για την πρόβλεψη της μελλοντικής παραγωγής απαιτείται αρχικά η γνώση της κατάστασης του ταμιευτήρα, δηλαδή αν αφορά σε ακόρεστο ή κορεσμένο ταμιευτήρα υδρογονανθράκων και αν υφίσταται υδροφορέας, ο οποίος μπορεί να επιδρά στην παραγωγική διαδικασία. Η γνώση αυτή προκύπτει κατά την πρώτη φάση εφαρμογής της μεθόδου Ισοζυγίου Μάζας (Material Balance), όπως αναλύθηκε στην προηγούμενη ενότητα.

Όπως παρουσιάστηκε στο το πρώτο στάδιο εφαρμογής της μεθόδου, κατά την εκτίμηση των χαρακτηριστικών του ταμιευτήρα, τα μεγέθη αθροιστικής παραγωγής N_p , G_p και W_p είναι γνωστά καθώς έχουν καταγραφεί κατά το διάστημα συλλογής των δεδομένων παραγωγής. Αντίθετα, στο δεύτερο μέρος εφαρμογής της μεθόδου, κατά την πρόβλεψη της μελλοντικής παραγωγής, τα μεγέθη N_p , G_p και W_p είναι ζητούμενα. Όπως θα αναλυθεί στη συνέχεια, η μέθοδος που ακολουθείται για τον υπολογισμό αυτών, συνδυάζει τη MBE και την εξίσωση του Darcy μέσω της κλασματικής ροής (fractional flow) η οποία ορίστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο.

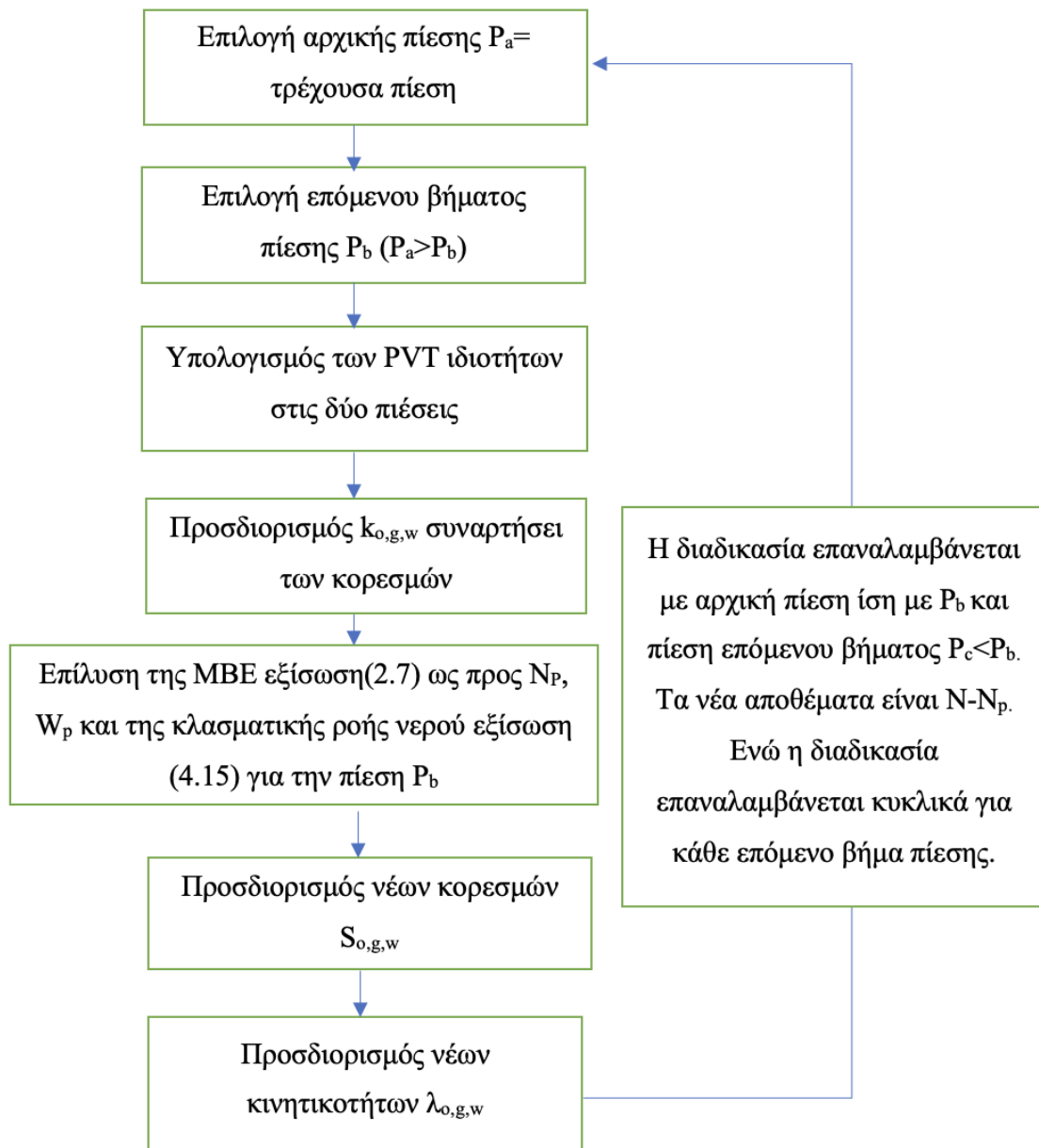
Ακόμα η Material Balance αποτελεί μια ογκομετρική μέθοδο που μπορεί να εκτιμήσει την παραγωγή για κάθε πτώση πίεσης που παρατηρείται ή να παρέχει την παραγωγή συναρτήσει της μέσης πίεσης του ταμιευτήρα. Είναι αναγκαία λοιπόν η έννοια της ροής του ρευστού, μέσω του νόμου του Darcy, προκειμένου να εισαχθεί και η έννοια του χρόνου στην εκτίμηση της μελλοντικής παραγωγής.

Τα βήματα εφαρμογής της μεθόδου για την πρόβλεψη της μελλοντικής παραγωγής στην πράξη, είναι τα εξής:

- Αρχικά τίθεται ως πίεση P_a η τρέχουσα πίεση και επιλέγεται ως P_b κάθε επόμενο βήμα πίεσης.
- Υπολογίζονται οι PVT παράμετροι για τις δύο πιέσεις και επιλύονται οι εξισώσεις ως προς N_p , G_p και W_p .
- Εν συνεχεία προσδιορίζονται οι νέοι κορεσμοί και η νέα κινητικότητα λ .
- Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται για κάθε επόμενο βήμα πίεσης P_c . Δηλαδή η πίεση P_b αποτελεί πλέον την αρχική πίεση και η πίεση P_c την πίεση της επόμενης χρονικής στιγμής, για την οποία υπολογίζονται εκ νέου οι PVT παράμετροι και τα ζητούμενα μεγέθη N_p , G_p και W_p .
- Τα νέα αποθέματα που τίθενται για κάθε επόμενο βήμα πίεσης είναι τα αρχικά αποθέματα μείον την παραγωγή που υπολογίστηκε στο προηγούμενο βήμα ($N - N_p$).

Σε κάθε επόμενο βήμα από τα αρχικά αποθέματα αφαιρείται η αθροιστική παραγωγή που έχει υπολογιστεί μέχρι στιγμής.

Στο παρακάτω διάγραμμα ροής (Διάγραμμα 2-2) παρουσιάζονται τα βήματα που ακολουθούνται για ταμειυτήρα που δεν υπάρχει ελεύθερο αέριο.



Διάγραμμα 2-2: Διάγραμμα ροής της μεθοδολογίας πρόβλεψης μελλοντικής παραγωγής για ταμειυτήρα που δεν υπάρχει ελεύθερο αέριο.

2.2.1 Περίπτωση ακόρεστου ταμιευτήρα

Στην περίπτωση αυτή ο ταμιευτήρας θεωρείται μονοφασικός, άρα περιλαμβάνει μόνο την υγρή πετρελαϊκή φάση. Προκειμένου να εκτιμηθούν οι αθροιστικές μελλοντικές παραγωγές σε πετρέλαιο, νερό και αέριο πραγματοποιούνται τα εξής βήματα:

Αντικαθιστώντας τον νόμο Darcy στην (εξίσωση 1.14) της κλασματικής ροής νερού, προκύπτει η εξίσωση (2.17). Η κλασματική ροή μπορεί επίσης να εκφραστεί συναρτήσει των δεδομένων παραγωγής N_p και W_p , μετατρέποντας την παροχή (q_w^{RC}) από συνθήκες ταμιευτήρα, σε (q_w^{SC}) συνθήκες επιφάνειας. Πολλαπλασιάζοντας με τον αντίστοιχο ογκομετρικό συντελεστή της εκάστοτε φάσης ($B_{w,o}$), προκύπτει η εξίσωση (2.18).

$$F_w = \frac{q_w^{RC}}{q_w^{RC} + q_o^{RC}} = \frac{k_w/\mu_w}{k_w/\mu_w + k_o/\mu_o} \quad (2.17)$$

$$F_w = \frac{q_w^{RC}}{q_w^{RC} + q_o^{RC}} = \frac{q_w^{SC} B_w}{q_w^{SC} B_w + q_o^{SC} B_o} = \frac{W_p/\Delta_t \cdot B_w}{W_p/\Delta_t \cdot B_w + N_p/\Delta_t \cdot B_o} = \frac{W_p \cdot B_w}{W_p \cdot B_w + N_p \cdot B_o} \quad (2.18)$$

Γνωρίζοντας τους κορεσμούς κάθε φάσης $S_{o,w}$ από τα δεδομένα κατά τη διάρκεια παραγωγής του ταμιευτήρα, είναι δυνατό να υπολογιστούν οι σχετικές διαπερατότητες ($k_{r(o,w)}$) σύμφωνα με τη μέθοδο του Corey (ενότητα 1.4). Έτσι συνδυάζοντας τις εξισώσεις (2.17) και (2.18), προκύπτει η εξίσωση (2.19) με μοναδικούς αγνώστους τις αθροιστικές μελλοντικές παραγωγές νερού W_p και πετρελαίου N_p .

$$F_w = \frac{k_w/\mu_w}{k_w/\mu_w + k_o/\mu_o} = \frac{W_p \cdot B_w}{W_p \cdot B_w + N_p \cdot B_o} \quad (2.19)$$

Επιλύοντας την παραπάνω εξίσωση (2.19) σε συνδυασμό με την εξίσωση του Material Balance για ταμιευτήρες πετρελαίου, ως σύστημα δύο εξισώσεων με δύο αγνώστους, μπορούν να υπολογιστούν οι μελλοντικές παραγωγές λύνοντας ως προς W_p και ως προς N_p . Τέλος, ο υπολογισμός της αθροιστικής παραγωγής αερίου G_p , πραγματοποιείται μέσω της εξίσωσης (2.20). Ο ογκομετρικός συντελεστής R_s^{Pb} , στο σημείο φυσαλίδας (bubble point), ισούται με το GOR, που είναι ο λόγος παραγόμενου αερίου προς παραγόμενο πετρέλαιο καθώς ο ταμιευτήρας είναι ακόρεστος. Καθώς ο συντελεστής R_s^{Pb} αποτελεί γνωστή PVT τιμή και αφού έχει υπολογιστεί η αθροιστική παραγωγή πετρελαίου N_p με την παραπάνω διαδικασία, υπολογίζεται η αθροιστική παραγωγή αερίου G_p .

$$G_p = N_p * R_s^{Pb} \quad (2.20)$$

2.2.2 Περίπτωση κορεσμένου ταμιευτήρα

Στην περίπτωση κορεσμένου ταμιευτήρα, η πίεση του ταμιευτήρα είναι χαμηλότερη του σημείου φυσαλίδας του ρευστού άρα εντός του ταμιευτήρα υπάρχει πετρέλαιο, ελεύθερο αέριο και νερό. Σε αυτή την περίπτωση το GOR δεν είναι σταθερό και επομένως αντί της εξίσωσης (2.10) πρέπει να εισαχθεί μια νέα εξίσωση που να περιλαμβάνει τον όρο αθροιστικής παραγωγής αερίου G_p .

Για αυτό το σκοπό αξιοποιείται η εξίσωση (1.15) της κλασματικής ροής αερίου F_g . Η εξίσωση (1.15) αποτελεί μια γενίκευση της κλασματικής ροής. Ακολουθώντας την αντίστοιχη μεθοδολογία όπως και για την κλασματική ροή νερού F_w , αρχικά η εξίσωση της κλασματικής ροής αερίου F_g συνδυάζεται με το νόμο του Darcy και προκύπτει η εξίσωση (2.21). Τελικά, η κλασματική ροή αερίου εκφράζεται συναρτήσει των δεδομένων παραγωγής N_p , G_p και W_p , μετατρέποντας την παροχή (q_g^{RC}) από συνθήκες ταμιευτήρα, σε (q_g^{SC}) συνθήκες επιφάνειας. Πολλαπλασιάζοντας με τον αντίστοιχο ογκομετρικό συντελεστή της εκάστοτε φάσης ($B_{o,g,w}$), προκύπτει η εξίσωση (2.22).

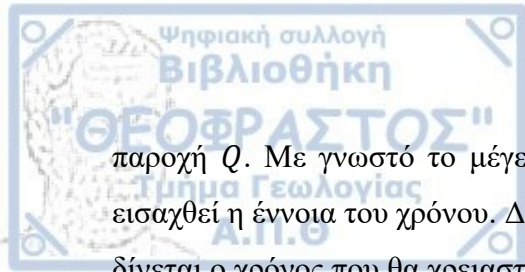
$$F_g = \frac{q_g^{RC}}{q_w^{RC} + q_g^{RC} + q_o^{RC}} = \frac{k_g/\mu_g}{k_w/\mu_w + k_g/\mu_g + k_o/\mu_o} \quad (2.21)$$

$$F_g = \frac{q_g^{RC}}{q_w^{RC} + q_g^{RC} + q_o^{RC}} = \frac{q_g^{SC} \cdot B_g}{q_w^{SC} \cdot B_w + q_g^{SC} \cdot B_g + q_o^{SC} \cdot B_o} = \frac{G_p \cdot B_g}{W_p \cdot B_w + G_p \cdot B_g + N_p \cdot B_o} \quad (2.22)$$

$$\frac{k_g/\mu_g}{k_w/\mu_w + k_g/\mu_g + k_o/\mu_o} = \frac{G_p \cdot B_g}{W_p \cdot B_w + G_p \cdot B_g + N_p \cdot B_o} \quad (2.23)$$

Η εξίσωση (2.23) προκύπτει από τον συνδυασμό των εξισώσεων (2.21 και 2.22) και μαζί με τη MBE για ταμιευτήρες πετρελαίου και την εξίσωση κλασματικής ροής νερού F_w , εξίσωση (2.19), αποτελούν σύστημα εξισώσεων με αγνώστους τις αθροιστικές παραγωγές πετρελαίου N_p , αερίου G_p και νερού W_p και υπολογίζουν τα μεγέθη αυτά για κάθε επόμενη χρονική στιγμή.

Στην πραγματικότητα υπολογίζονται τα παραπάνω μεγέθη N_p , G_p και W_p για κάθε επόμενη πτώση πίεσης. Για την μετατροπή του Βήματος πίεσης σε χρόνο, πρέπει να οριστεί η



παροχή Q . Με γνωστό το μέγεθος της παροχής με την οποία παράγει ο ταμιευτήρας έχει εισαχθεί η έννοια του χρόνου. Διαιρώντας την μελλοντική παραγωγή για ΔP με την παροχή Q δίνεται ο χρόνος που θα χρειαστεί για να πραγματοποιηθεί το ΔP .

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ MBal

Εισαγωγή

Η Petroleum Experts (Petex) έχει αναπτύξει τη σουίτα Integrated Production Modeling (IPM), η οποία μοντελοποιεί το πλήρες σύστημα παραγωγής πετρελαίου και φυσικού αερίου, συμπεριλαμβανομένων των ταμιευτήρων, των γεωτρήσεων και του επιφανειακού δικτύου. Πέραν της μοντελοποίησης δίνει τη δυνατότητα βελτιστοποίησης της παραγωγής, καθώς και την πρόβλεψη της μελλοντικής παραγωγής.

Το MBAL είναι μια εργαλειοθήκη ανάλυσης, για τη μηχανική ταμιευτήρων (Reservoir Engineering), που παρέχει η IPM suite. Δίνει τη δυνατότητα χρήσης αρκετών διαφορετικών εργαλείων, το καθένα από τα οποία εστιάζουν σε διαφορετικές πτυχές της και παρουσιάζονται επιγραμματικά παρακάτω. (Petroleum Experts, 2018)

- Ισοζύγιο Μάζας (Material Balance)
- Κατανομή ταμιευτήρα (Reservoir Allocation)
- Ογκομέτρηση με προσομοίωση Monte Carlo (Monte Carlo volumetrics)
- Ανάλυση Φθίνουσας Παραγωγής (Decline Curve Analysis)
- Ανάλυση Buckley-Leverett 1-D μοντέλου και ανάλυση EOR -D μοντέλου (1-D model (Buckley-Leverett) and 1-D model with EOR)
- Πολλαπλές στρώσεις (εκτίμηση μέσης τιμής σχετικής διαπερατότητας) (Multi-Layer (relative permeability averaging)
- Εργαλεία σχετικά με Έγκλειστο αέριο και πετρέλαιο (Tight Gas Type Curve tool & Tight Oil Type curve tool)
- Ανάλυση μοτίβου ροής (Streamlines)

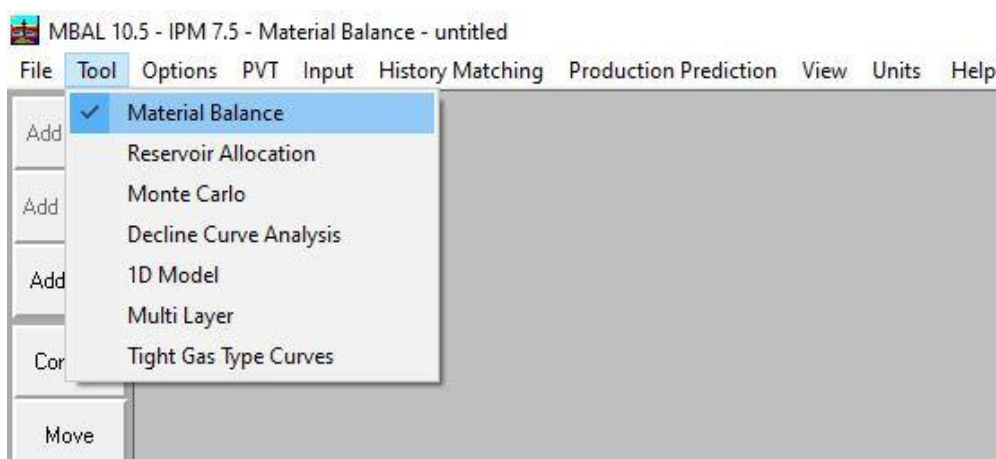
Η παρούσα διπλωματική εργασία, επικεντρώνεται στο εργαλείο Material Balance. Το MBAL έχει επαναπροσδιορίσει τη χρήση της μεθόδου Material Balance στη μηχανική ταμιευτήρων και αποτελεί την πλέον χρησιμοποιούμενη μέθοδο μοντελοποίησης στη βιομηχανία, καθώς παρέχει τη δυνατότητα καλύτερης κατανόησης του ταμιευτήρα και του συστήματος παραγωγής. Βοηθάει στον προσδιορισμό του μηχανισμού παραγωγής καθώς και στον προσδιορισμό των αποθεμάτων των υδρογονανθράκων. Η χρήση του Material Balance στο MBAL δίνει τη δυνατότητα δυο διαδικασιών, αυτών που υλοποιεί και η μέθοδος ισοζυγίου μάζας όπως αναλύθηκε στο κεφάλαιο 2, δηλαδή:

- της εκτίμησης της κατάστασης του ταμιευτήρα, δηλαδή της ύπαρξης ή μη υδροφορέα και αερίου καλύμματος, καθώς και την εκτίμηση των αποθεμάτων,
- την εκτίμηση της μελλοντικής παραγωγής

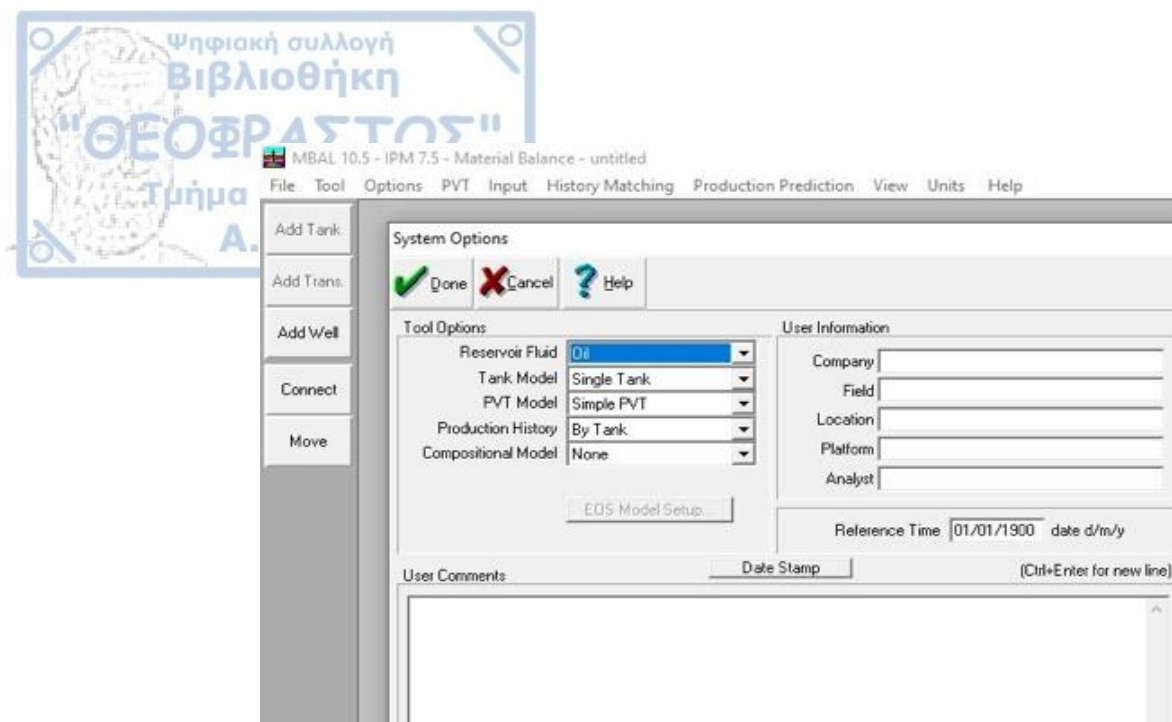
Η χρήση του εργαλείου Material Balance στο MBal χωρίζεται σε τρεις ενότητες. Η πρώτη ενότητα (Input Section) αφορά την εισαγωγή δεδομένων στο λογισμικό. Η δεύτερη ενότητα (History Matching Section) περιλαμβάνει την εφαρμογή γραφικών και αναλυτικών μεθόδων, για την εκτίμηση της κατάστασης του ταμιευτήρα και την αξιοποίηση του ιστορικού παραγωγής του ταμιευτήρα για τη διόρθωση του μοντέλου. Τέλος, η τρίτη ενότητα (Production Prediction Section) είναι αυτή στην οποία το μοντέλο είναι πλέον ρυθμισμένο και μπορεί να πραγματοποιήσει πρόβλεψη της μελλοντικής παραγωγής.

3.1 Ενότητα εισαγωγή δεδομένων (Input section)

Αρχικά, αφού επιλεγεί ως εργαλείο το Material Balance (**Εικόνα 3.1**), εισάγονται παράμετροι που σχετίζονται με τον προσδιορισμό του ταμιευτήρα ως δεξαμενή πετρελαίου, συμπυκνώματος αερίου ή νερού, καθώς και το αν θα γίνει χρήση Compositional model ή Black Oil model (**Εικόνα 3.2**), για την περιγραφή των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων των ρευστών.

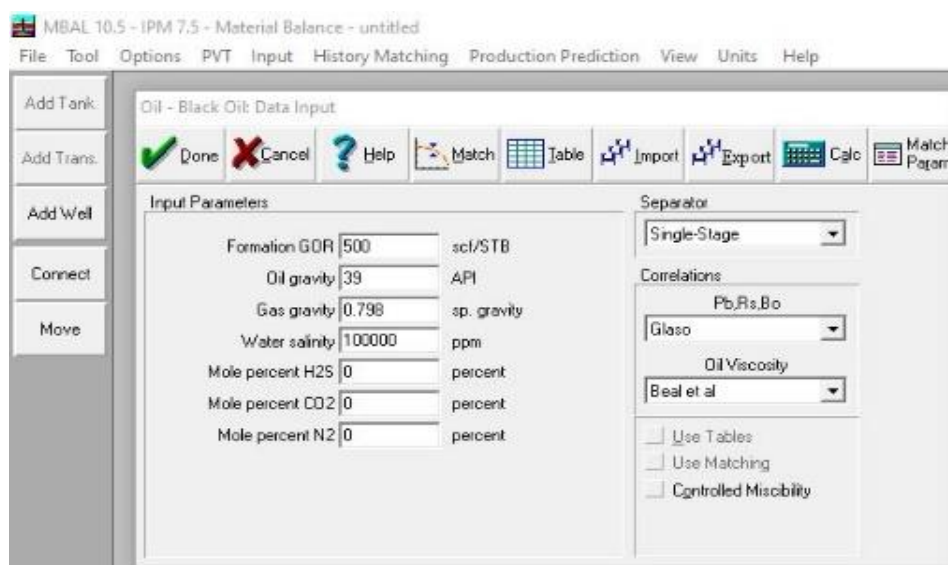


Εικόνα 3.1: Επιλογή εργαλείου Material balance του λογισμικού MBal.



Εικόνα 3.2: Επιλογές συστήματος (είδος ταμειντήρα, μοντέλου ρευστού)

Για την περίπτωση χρήσης μοντέλου μαύρου πετρελαίου, όπως φαίνεται στην (Εικόνα 3.3), εισάγονται δεδομένα που αφορούν τις ιδιότητες του ρευστού, προκειμένου να χρησιμοποιηθούν συσχετίσεις (correlations), για τον υπολογισμό των PVT ιδιοτήτων. Τα δεδομένα αυτά είναι το GOR, η σχετική πυκνότητα πετρελαίου, η σχετική πυκνότητα αερίου, η αλατότητα του νερού και η σύσταση (%moles) στα ανόργανα συστατικά H_2S , CO_2 και N_2 . Ακόμα, όπως φαίνεται στην (Εικόνα 3.4) εισάγεται ό,τι PVT δεδομένο είναι γνωστό, όπως η θερμοκρασία T , η πίεση στο σημείο φυσαλίδας (P_b), οι ογκομετρικοί συντελεστές και τα ιξώδη, δηλαδή τα black oil tables, έτσι ώστε (Εικόνα 3.5) να πραγματοποιηθούν διορθώσεις των τιμών που υπολογίζουν οι συσχετίσεις (correlations) ως προς τις εργαστηριακές τιμές, όπως αναφέρθηκε στο (κεφάλαιο 1).



Εικόνα 3.3: Εισαγωγή δεδομένων που αφορούν τις ιδιότητες του ρευστού.

Oil - Black Oil: Matching

Temperature: 250 deg F Table 1 (T=250)

Bubble Point: 2200 psig

	Pressure psig	Gas Oil Ratio scf/STB	Oil FVF RB/STB	Oil Viscosity centipoise	Gas FVF ft ³ /scf	Gas Viscosity centipoise
1	2200	500	1.32	0.4		
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						
11						
12						
13						

Εικόνα 3.4: Εισαγωγή PVT μετρήσεων για τη ρύθμιση συσχετίσεων.

Oil - Black Oil: Matching

Done Cancel Help Calc Match Param. Plot

Match on: All / None

☒ Bubble Point

☒ Gas Oil Ratio

☒ Oil FVF

Above Bubble Point

☒ Oil Viscosity

☐ Gas FVF

☐ Gas Viscosity

Std. Deviation	Parameter 1	Parameter 2
2.28779e-8	1.00245	5.36238
9.1417e-7	1.01726	-11.5983
0.0104911	1.00732	0.00255593
	1	0
2.64204e-7	1.02708	0.0102754
	1	0
	1	0

Correlations

Pb,Rs,Bo: Glaso

Oil viscosity: Beggs et al

☒ Match All

Εικόνα 3.5: Ρύθμιση συσχετίσεων (correlation matching).

Στη συνέχεια, όπως φαίνεται στην (Εικόνα 3.6), εισάγονται οι παράμετροι που αφορούν στα πετροφυσικά χαρακτηριστικά του ταμιευτήρα και γεωλογικές εκτιμήσεις (θερμοκρασία T , αρχική πίεση P , πορώδες ϕ , κορεσμός σε ενδογενές νερό S_{wc} , λόγος m , όγκος αρχικών αποθεμάτων πετρελαίου N , ημερομηνία έναρξης παραγωγής). Ακόμα εισάγεται (Εικόνα 3.7) το μοντέλο που περιγράφει τον υδροφορέα, εάν υπάρχει. Τέλος, (Εικόνα 3.8) εισάγονται τα δεδομένα που προσδιορίζουν τις σχετικές διαπερατότητες και (Εικόνα 3.9) τα ιστορικά καταγεγραμμένα δεδομένα παραγωγής. Υπενθυμίζεται ότι σε αυτό

το στάδιο εισάγονται οι καλύτερες δυνατές εκτιμήσεις των αβέβαιων παραμέτρων (όπως π.χ. τα αποθέματα) που είναι διαθέσιμες εκείνη τη στιγμή.

Εικόνα 3.6: Εισαγωγή παραμέτρων που αφορούν τα πετροφυσικά χαρακτηριστικά του ταμιευτήρα και γεωλογικές εκτιμήσεις.

Εικόνα 3.7: Εισαγωγή μοντέλου περιγραφής υδροφορέα.

Tank Input Data - Relative Permeabilities

Done Cancel Help Plot Copy Calc

Tank Parameters Water Influx Rock Compress. Rock Compaction Pore Volume vs Depth Relative Permeability Production History

Rel Perm. from Corey Functions
Hysteresis No
Modified No

Water Sweep Eff. 100 percent
Gas Sweep Eff. 100 percent

	Residual Saturation	End Point	Exponent
	fraction	fraction	
Krw	0.15	0.63	0.84
Kro	0.15	0.8	1.5478
Krg	0.02	0.9	1

Normalise End Points

WARNING : Enter saturations relative to total system

<< Prior Next >>

Εικόνα 3.8: Εισαγωγή δεδομένων για τον προσδιορισμό των σχετικών διαπερατοτήτων.

Tank Input Data - Production History

Done Cancel Help Import Plot Report Copy Layout

Tank Parameters Water Influx Rock Compress. Rock Compaction Pore Volume vs Depth Relative Permeability Production History

	Time	Reservoir Pressure	Cum Oil Produced	Cum GOR	Cum Wat. Produced	Cum Gas Injected	Cum Wat. Injected	Regression Weighting	Comment
	date d/m/y	psig	MMSTB	scf/STB	MMSTB	MMscf	MMSTB		
1	01/01/2001	4000	0	0	0			Medium	Edit...
2	01/02/2001	3985.64	0.356222	500	0			Medium	Edit...
3	01/03/2001	3936.75	0.596151	499.999	0			Medium	Edit...
4	01/04/2001	3762.57	0.927019	499.999	0			Medium	Edit...
5	01/05/2001	3705.21	1.24942	499.998	0			Medium	Edit...
6	01/06/2001	3655.34	1.57649	500	0			Medium	Edit...
7	01/07/2001	3707.56	1.57649	500	0			Medium	Edit...
8	01/08/2001	3647.76	1.89402	500.001	0			Medium	Edit...
9	01/09/2001	3602.54	2.20527	499.998	0			Medium	Edit...
10	01/10/2001	3565.38	2.50173	500.002	0			Medium	Edit...
11	01/11/2001	3531.51	2.80395	500.002	0			Medium	Edit...
12	01/12/2001	3502.16	3.09282	500	0			Medium	Edit...
13	01/01/2002	3471.13	3.39831	500.001	0			Medium	Edit...
14	01/02/2002	3442.89	3.70051	499.999	0			Medium	Edit...
15	01/03/2002	3410.26	3.98042	500	0			Medium	Edit...
16	01/04/2002	3393.39	4.27695	499.999	0			Medium	Edit...

Work with GOR Check GOR

<< Prior Next >>

Εικόνα 3.9: Εισαγωγή ιστορικά καταγεγραμμένων δεδομένων παραγωγής.

3.2 Ενότητα History Matching

Η διαδικασία του History matching επιτρέπει την αξιολόγηση των μηχανισμών, που συνέβαλαν στην παραγωγή. Αποτελεί διαδικασία ελέγχου του μοντέλου και ενημέρωσης των παραμέτρων του. Οι αρχικές εκτιμήσεις που δόθηκαν σε παραμέτρους του μοντέλου, αξιοποιούνται συνδυαστικά με τα διαθέσιμα δεδομένα παραγωγής, προκειμένου να προσδιοριστούν οι βέλτιστες τιμές των παραμέτρων αυτών. Σαν αποτέλεσμα της διαδικασίας

του history matching, το μοντέλο μπορεί να περιγράψει με ακρίβεια την κατάσταση του υπό μελέτη ταμιευτήρα και να προβλέψει στη συνέχεια τη μελλοντική παραγωγή.

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζεται η εφαρμογή των γραφικών και αναλυτικών μεθόδων που αναφέρθηκαν στο (**Κεφάλαιο 2**), με σκοπό τον προσδιορισμό της κατάστασης του ταμιευτήρα και της ύπαρξης ή μη υδροφορέα. Ακόμα επιδιώκεται η καλύτερη μαθηματική ταύτιση των προβλέψεων του μοντέλου με τα δεδομένα της ιστορικής παραγωγής, μέσω παλινδρόμησης (Regression), καθώς η διαδικασία της παλινδρόμησης (Regression) επαναυπολογίζει τις λιγότερο αξιόπιστες τιμές και τις αντικαταστεί. Ενώ η υλοποίηση προσομοίωσης για τον υπολογισμό των ιστορικών δεδομένων παραγωγής μέσω του μοντέλου που έχει αναπτύχθηκε βάση των αποτελεσμάτων των παραπάνω τεχνικών, ελέγχεται η εγκυρότητα των αποτελεσμάτων του μοντέλου.

Παρακάτω φαίνονται τρία διαγράμματα, το Energy Plot (**Εικόνα 3.10**), το διάγραμμα Campbell για το Graphical Method (**Εικόνα 3.11**) και το αναλυτικό διάγραμμα (πίεσης-αθροιστικής παραγωγής) (**Εικόνα 3.12**) για Analytical Method, που αναλύθηκαν και στις (**ενότητες 2.1.1.3, 2.1.1.2 και 2.1.3**), αντίστοιχα. Το Energy Plot παρουσιάζει τους κυρίαρχους μηχανισμούς παραγωγής και περιγράφει τη σχετική ισχύ, με την οποία ο εκάστοτε μηχανισμός ροής δρα στο μοντέλο. Το διάγραμμα στο Analytical Method απεικονίζει τη πίεση του ταμιευτήρα ως προς την αθροιστική παραγωγή όπως αυτή λαμβάνεται από τα ιστορικά δεδομένα παραγωγής και όπως προσδιορίζεται υπολογιστικά από το μοντέλο. Στην περίπτωση ειδικά του Graphical Method δίνεται η δυνατότητα αξιοποίησης των εξής διαγραμμάτων, τα οποία χρησιμοποιούνται σε ταμιευτήρες πετρελαίου ή ταμιευτήρες αερίου αντίστοιχα και ανάλογα τα διαθέσιμα δεδομένα και το είδος της μελέτης που χρειάζεται να πραγματοποιηθεί στους μηχανισμούς παραγωγής :

Για ταμιευτήρες πετρελαίου:

Havlena-Odeh
F/E προς We/Et
(F-We)/Et προς F (Campbell plot)
F-We προς Et
(F-We)/(Eo+Efw) προς Eg/(Eo+Efw)
F/Et προς F (Campbell plot – No Aquifer)

Για ταμιευτήρες Αερίου/ Αέρια συμπυκνώματα:

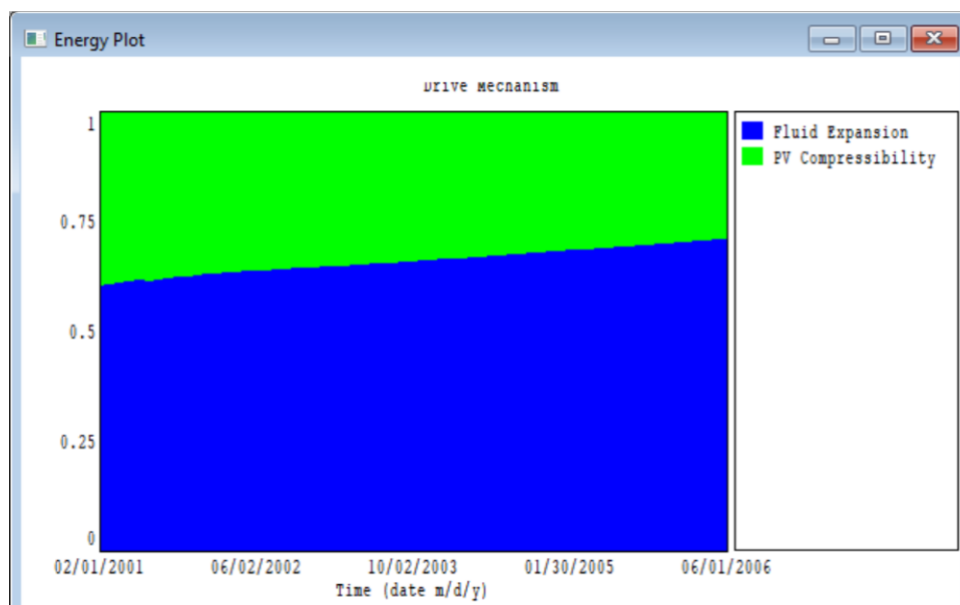
P/Z
P/Z (over pressured)
Havlena-Odeh (over pressured)

Havlena-Odeh (water drive)

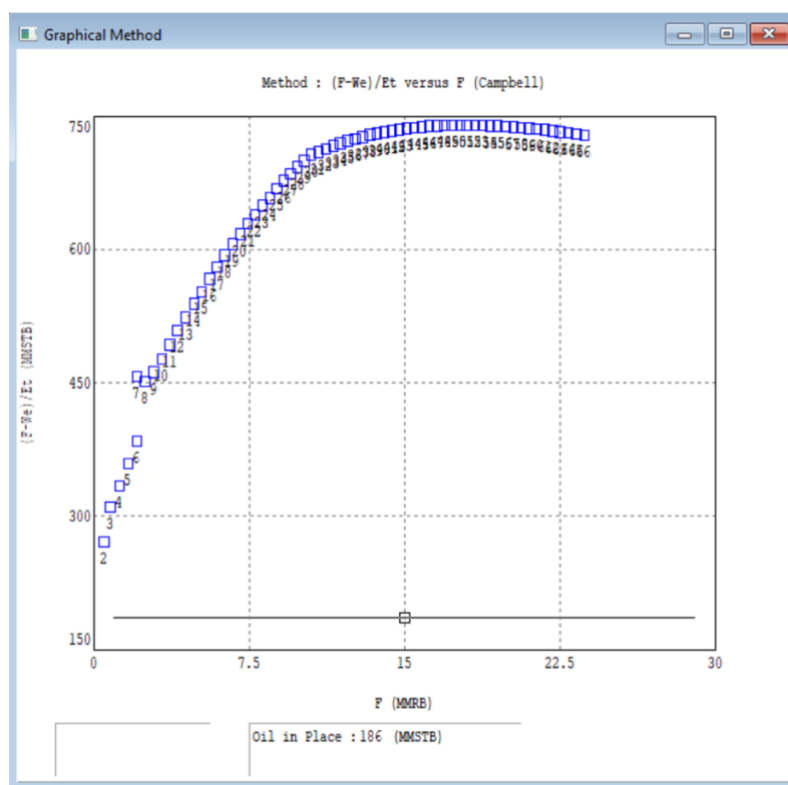
(F-We)/Et (Cole)

Roach (unknown compressibility)

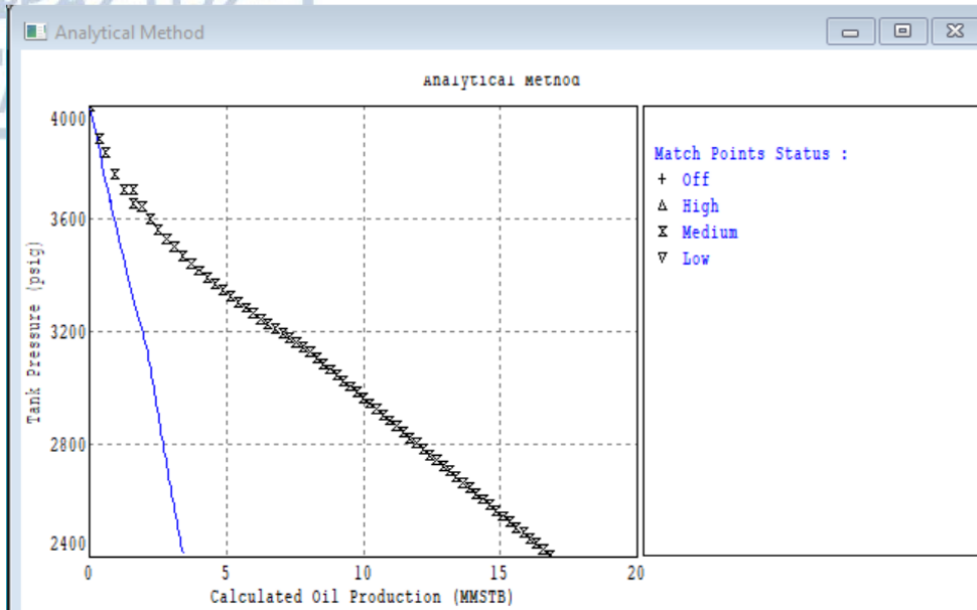
F/Et (Cole – No Aquifer)



Εικόνα 3.10: Διάγραμμα κύριων μηχανισμών παραγωγής (Energy Plot), Graphical Method (Campbell plot) και Analytical Method.



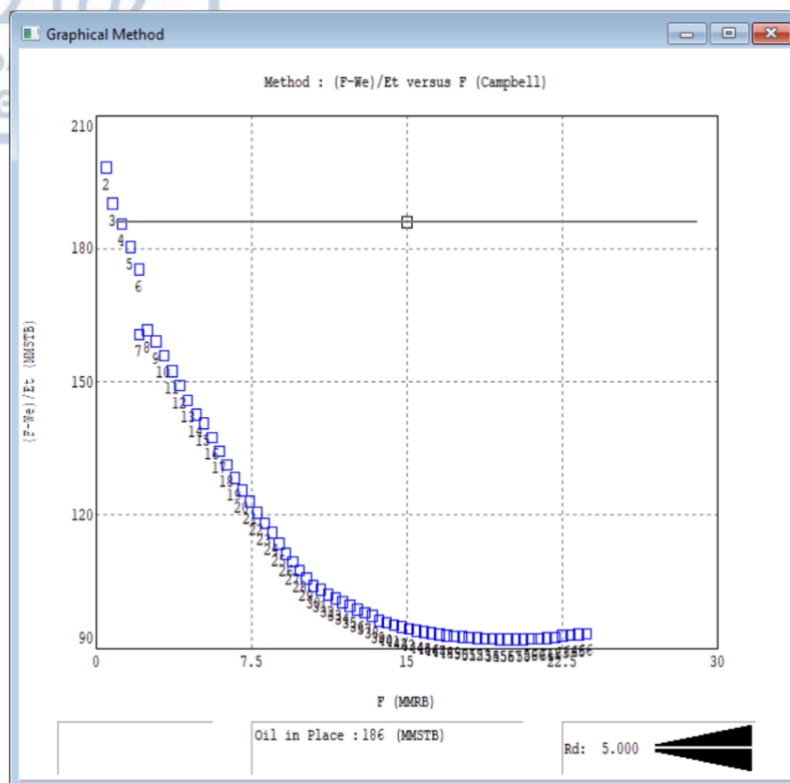
Εικόνα 3.11: Graphical Method (Campbell plot)



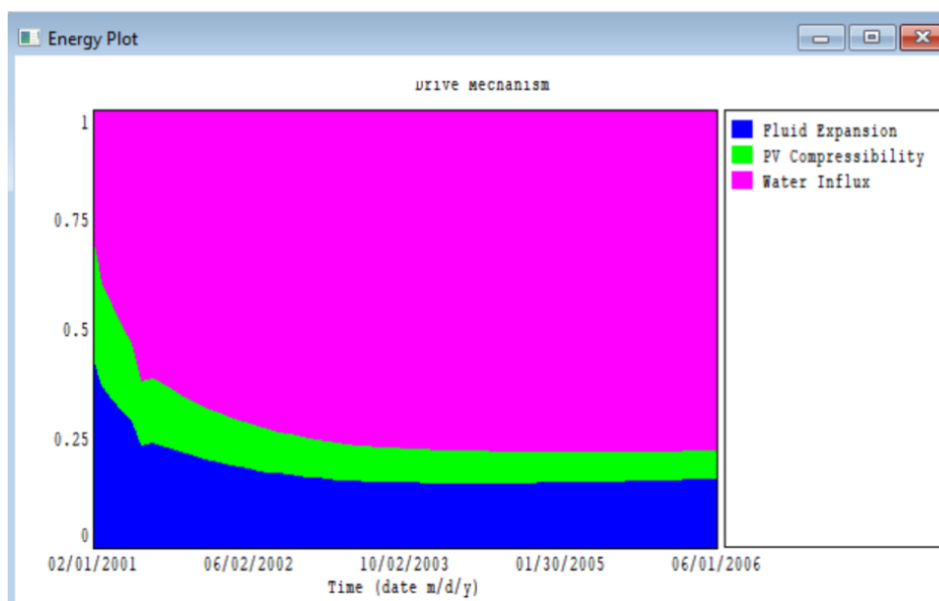
Εικόνα 3.12: Διάγραμμα P - cumulative oil production (Analytical Method).

Επιστρέφοντας στις επιλογές μοντέλου υδροφορέα (Εικόνα 3.7) επιλέγεται το κατάλληλο μοντέλο που περιγράφει τον υδροφορέα.

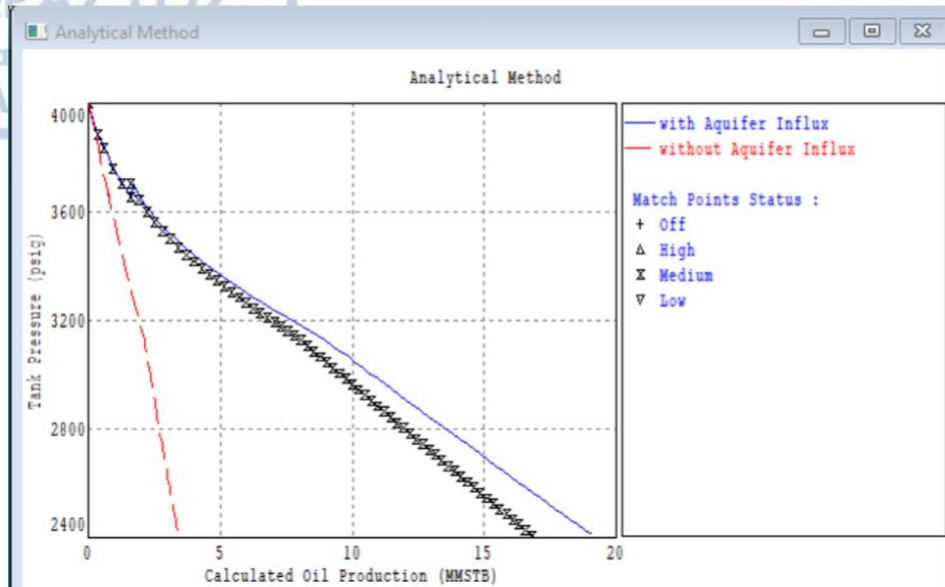
Στην (Εικόνα 3.13) απεικονίζεται το διάγραμμα Campbell του Graphical method, στην (Εικόνα 3.14) το Energy plot και στην (Εικόνα 3.15) το αναλυτικό διάγραμμα του Analytical method, αφού έχουν διορθωθεί ως προς την εκτίμηση για την ύπαρξη υδροφορέα, καθώς από τη μορφή καμπύλης του διαγράμματος Campbell υποδεικνύεται η ύπαρξη αυτού. Στην (Εικόνα 3.16) απεικονίζεται το διάγραμμα WD (function plot) της συνάρτησης του υδροφορέα προς το χρόνο. Επίσης, στο διάγραμμα υποδεικνύονται τα σημεία που προκύπτουν από τα ιστορικά δεδομένα παραγωγής. Ωστόσο, σημειώνεται πως το διάγραμμα αυτό εμφανίζεται μόνο για κάποια από τα μοντέλα υδροφορέα που παρέχει το λογισμικό και όχι για το σύνολο τους.



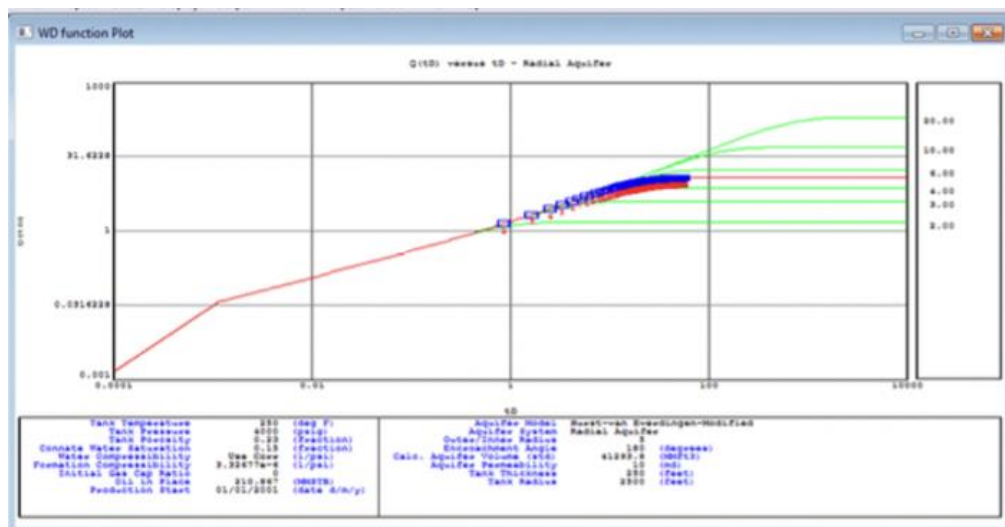
Εικόνα 3.13: Διορθωμένο διάγραμμα Campbell, ως προς την ύπαρξη υδροφορέα (Graphical method).



Εικόνα 3.14: Διορθωμένο Energy plot ως προς την ύπαρξη υδροφορέα.



Εικόνα 3.15: Διορθωμένο αναλυτικό διάγραμμα ως προς την ύπαρξη υδροφορέα.

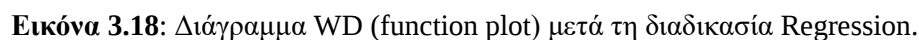


Εικόνα 3.16: Διάγραμμα συνάρτησης υδροφορέα με το χρόνο.

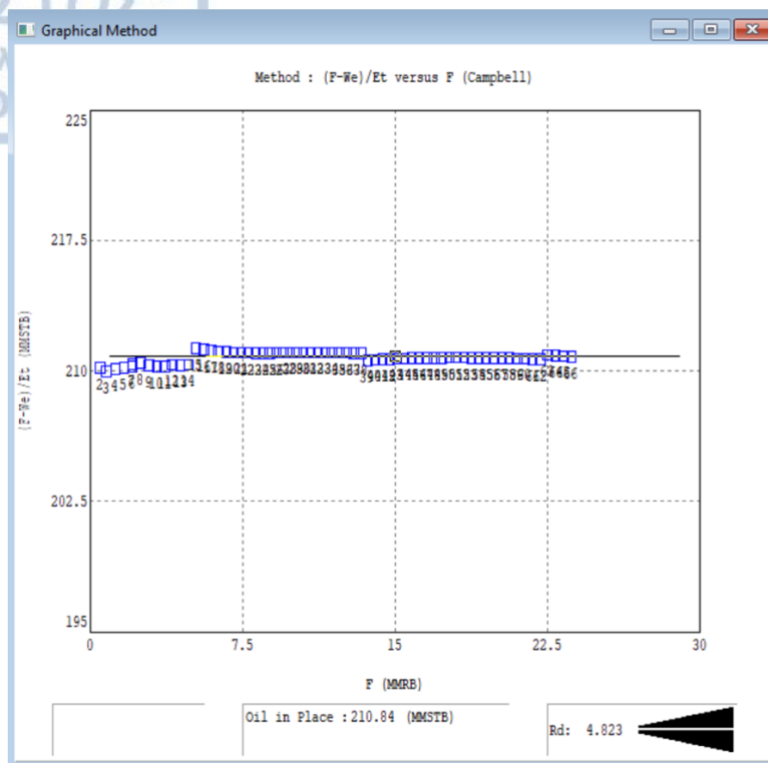
Στην (Εικόνα 3.17) απεικονίζεται η διαδικασία του Regression που πραγματοποιεί λογισμικό. Συγκεκριμένα κατά τη διαδικασία της παλινδρόμησης (regression), εκτελείται ένας αλγόριθμος ο οποίος μεταβάλλει κατάλληλα όποιες αβέβαιες παραμέτρους επιλεχθούν προς διόρθωση. Δηλαδή επανυπολογίζει και αντικαθιστά τιμές όπως τα αρχικά αποθέματα πετρελαίου N , τον λόγο αρχικού ελεύθερου αερίου προς πετρέλαιο m (αν υπάρχει) και τις παραμέτρους του υδροφορέα, έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί στο αναλυτικό διάγραμμα η διαφορά μεταξύ των ιστορικών δεδομένων παραγωγής και των τιμών του μοντέλου για N_p .



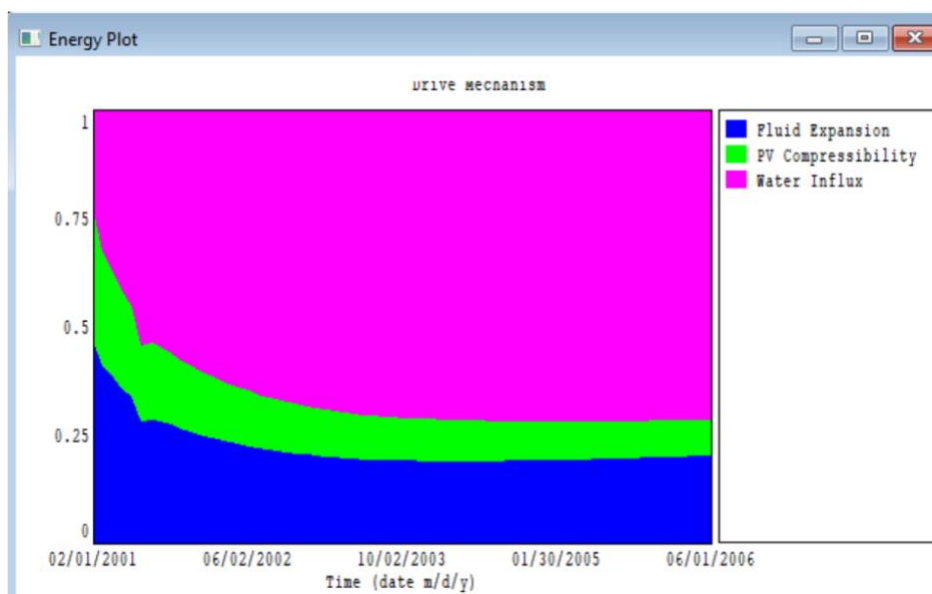
Μετά τη διαδικασία της παλινδρόμησης (regression), τα διαγράμματα που προαναφέρθηκαν τροποποιούνται όπως φαίνεται στις παρακάτω εικόνες. Στην **(Εικόνα 3.18)** απεικονίζεται το διάγραμμα WD (function plot), στην **(Εικόνα 3.19)** το διάγραμμα Campbell, στην **(Εικόνα 3.20)** Energy plot και στην **(Εικόνα 3.21)** το αναλυτικό διάγραμμα, αφού έχουν διορθωθεί οι παράμετροι του ταμιευτήρα όπως αναλύθηκε παραπάνω με τη διαδικασία του Regression.



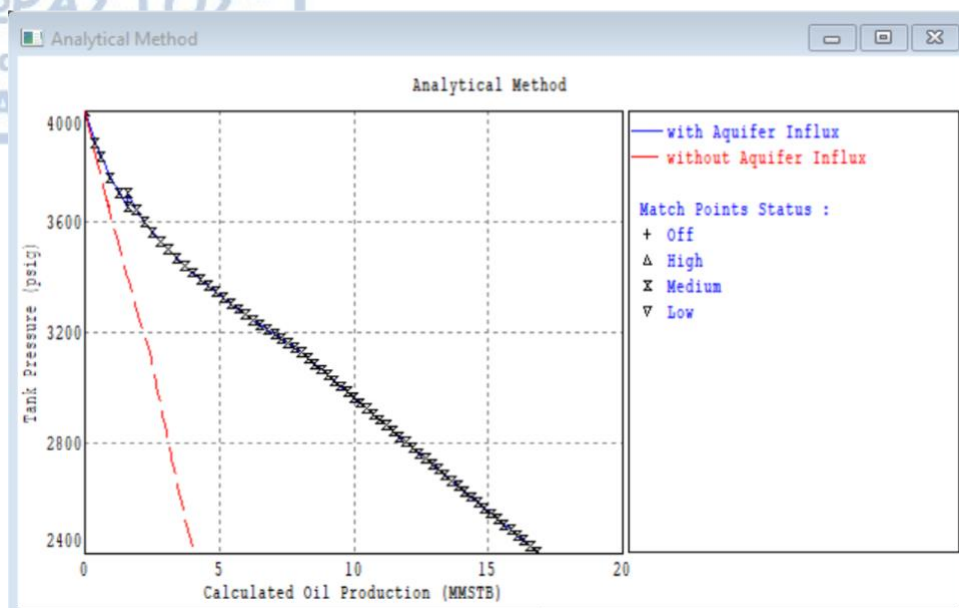
67



Εικόνα 3.19: Διάγραμμα Campbell μετά τη διαδικασία Regression.

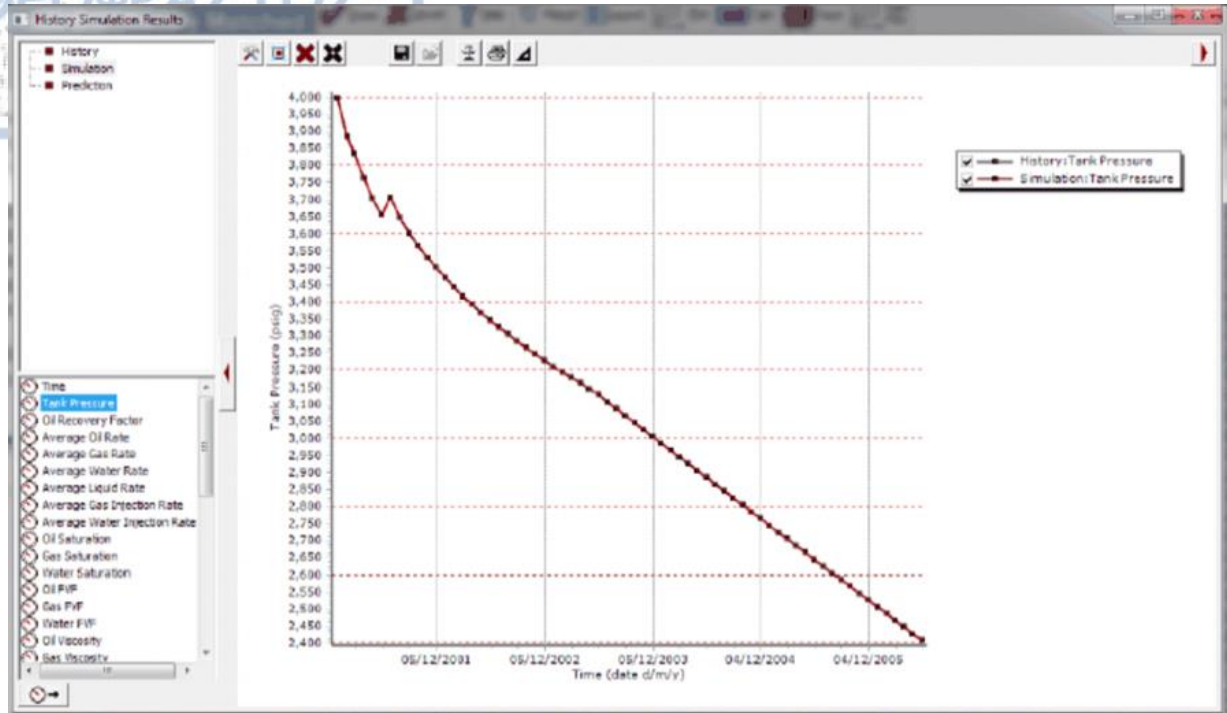


Εικόνα 3.20: Energy plot μετά τη διαδικασία Regression.



Εικόνα 3.21: Αναλυτικό διάγραμμα μετά τη διαδικασία Regression.

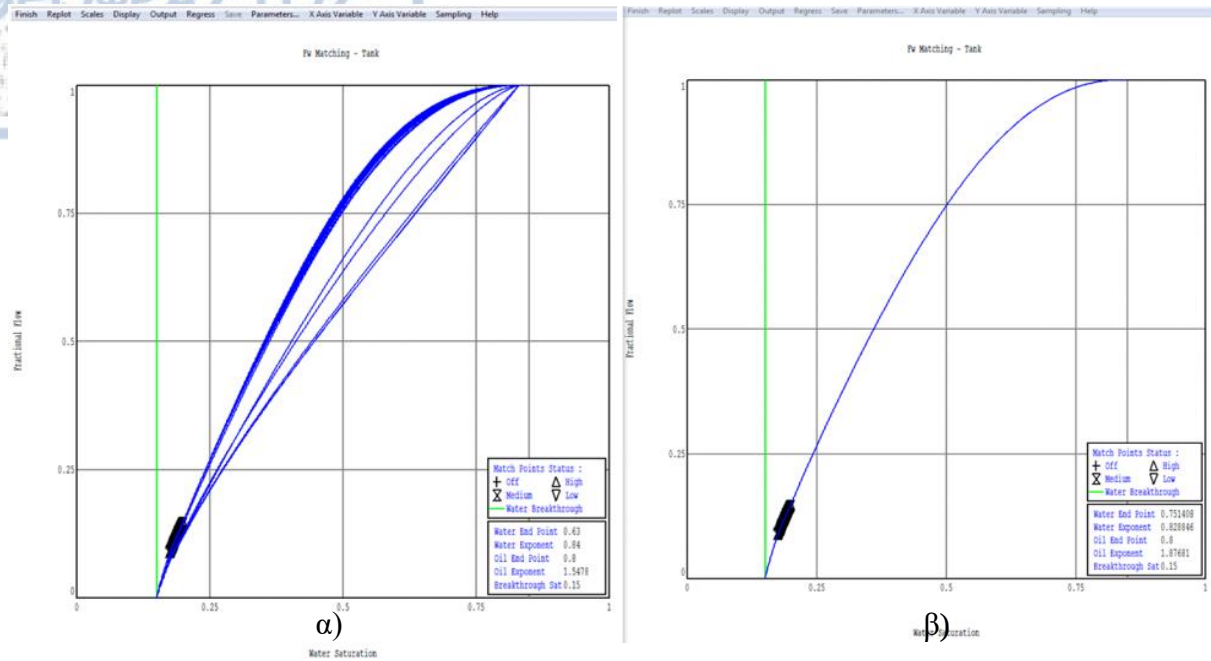
Επόμενο βήμα για τον ποιοτικό έλεγχο στη διαδικασία του history matching που πραγματοποιήθηκε, είναι η διενέργεια μιας προσομοίωσης των ιστορικών δεδομένων παραγωγής. Η προσομοίωση πραγματοποιείται με τη χρήση των διορθωμένων μοντέλων, για τον ταμιευτήρα και τον υδροφορέα, από τις προηγούμενες διαδικασίες. Για να λάβει χώρα η διαδικασία της προσομοίωσης, αξιοποιούνται τα ιστορικά δεδομένα για την παραγωγή και σε κάθε βήμα, δηλαδή για κάθε καταγεγραμμένη παραγωγή, υπολογίζονται οι αντίστοιχες πιέσεις. Πρόκειται επομένως για την ακριβώς αντίθετη διαδικασία σε σχέση με αυτή που πραγματοποιεί το Analytical method. Ιδανικά οι τιμές της πίεσης που υπολογίζονται από αυτή τη διαδικασία θα πρέπει να ταυτίζονται με τις καταγεγραμμένες. Σε κάθε περίπτωση οι τιμές των εκτιμώμενων παραμέτρων του μοντέλου (πχ N , m), θα πρέπει να έχουν ρυθμιστεί κατάλληλα ώστε η διαφορά των υπολογιζόμενων πιέσεων από τις καταγεγραμμένες να ελαχιστοποιείται. Στην (Εικόνα 3.22) φαίνεται η ταύτιση ιστορικών δεδομένων και μοντέλου προσομοίωσης, σε διάγραμμα που απεικονίζει τις πιέσεις ως προς το χρόνο.



Εικόνα 3.22: Διάγραμμα πίεσης προς χρόνο για ιστορική παραγωγή και προσομοιωτή.

Στο τέλος της παρούσας ενότητας, προκειμένου να μπορεί να προβλεφθεί με ακρίβεια η μελλοντική παραγωγή, είναι απαραίτητη η ρύθμιση των σχετικών διαπερατοτήτων, μέσω της διαδικασίας ταύτισης των κλασματικών ροών (F_w και F_g Matching).

Το MBAL μέσω της διαδικασίας ταύτισης κλασματικής ροής (Fractional flow matching), αξιοποιεί τα διαθέσιμα δεδομένα παραγωγής προκειμένου να ταιριάζει την καμπύλη κλασματικής ροής με αυτά. Οι παράμετροι που διορθώνονται με τη διαδικασία του regression, όπως φαίνεται από τους τύπους των κλασματικών ροών νερού και αερίου, εξισώσεις (2.19 και 2.23) αντίστοιχα, είναι οι σχετικές διαπερατότητες (k_r) που είχαν υπολογιστεί με τη βοήθεια της εξίσωσης του Corey. Δηλαδή το λογισμικό δημιουργεί καμπύλες σχετικών διαπερατοτήτων μεταβάλλοντας τις παραμέτρους των μοντέλων Corey, έως ότου η καμπύλη της κλασματικής ροής που προσδιορίζεται ως συνάρτηση των σχετικών διαπερατοτήτων, να ταυτιστεί με την κλασματική ροή που προσδιορίζεται από τα ιστορικά δεδομένα. Κατά τη διαδικασία του regression δημιουργείται ένα σύνολο από καμπύλες που το λογισμικό προσπαθεί να ταιριάζει (Εικόνα 3.23α), ενώ το τελικό αποτέλεσμα δίνει την καμπύλη που προσεγγίζει βέλτιστα αυτή που βασίζεται στα δεδομένα παραγωγής (Εικόνα 3.23β).



Εικόνα 3.23: α) Καμπύλες κλασματικής ροής κατά τη διαδικασία του Regression. β) Καμπύλη κλασματικής ροής που ταυτίζεται με τα δεδομένα.

3.3 Ενότητα πρόβλεψης παραγωγής (Production Prediction Section)

Στο πρώτο βήμα για την πρόβλεψη της μελλοντικής παραγωγής μέσω του λογισμικού ορίζεται ο τύπος της πρόβλεψης που θα πραγματοποιηθεί, οι χρόνοι έναρξης και τέλους της περιόδου πρόβλεψης. Επίσης επιλέγονται παράμετροι όπως η εισπίεση νερού και αερίου και η χρήση μοντέλων κλασματικής ροής για την πρόβλεψη. (Εικόνα 3.24).

Figure 3.24 is a screenshot of the 'Prediction Calculation Setup' dialog box. The 'Predict' dropdown is set to 'Profile from Production Schedule (No Wells)'. The 'With' section includes checkboxes for 'Water Injection', 'Gas Injection', 'SWAG', 'Gas Lift Injection', 'Gas Recycling', 'Water Recycling', 'Voidage Replacement with water', 'Voidage Replacement with gas', 'Gas Cap Production', and 'Water Production'. The 'Options' section has a checked box for 'Use Fractional Flow Model'. The 'Prediction Step Size' is set to 'Automatic (recommended)'. The 'Prediction Start' is set to 'Start of Production' and the 'Prediction End' is set to 'End of Production History'.

Εικόνα 3.24: Εισαγωγή τύπου πρόβλεψης, το σημείο έναρξης και τέλους της πρόβλεψης και η συχνότητα αναφοράς.

Συγκεκριμένα υπάρχουν τρεις διαθέσιμες επιλογές τύπων πρόβλεψης, ανάλογα με τις ειδικές απαιτήσεις του χρήστη για την εκτίμηση της μελλοντικής παραγωγής. Οι παρακάτω επιλογές διατίθενται από το λογισμικό:

- Προφίλ από το πρόγραμμα παραγωγής (Profile from Production Schedule) > ο τρόπος λειτουργίας συνίσταται στην πρόβλεψη της πίεσης του ταμιευτήρα με βάση ένα χρονοδιάγραμμα παραγωγής που έχει καταχωρίσει ο χρήστης
- Προφίλ παραγωγής χρησιμοποιώντας μοντέλα γεωτρήσεων (Production profile using well models) > ο τρόπος λειτουργίας συνίσταται στην πρόβλεψη του προφίλ παραγωγής και της πίεσης της δεξαμενής με βάση την απόδοση της γεώτρησης που έχει εισαχθεί για κάθε γεώτρηση που υπάρχει στο σύστημα
- Υπολογισμός αριθμού γεωτρήσεων για να επιτευχθεί ο στόχος ρυθμού παραγωγής (calculate number of wells to achieve target rate) > αυτό το μοντέλο επιτρέπει τον προσδιορισμό του αριθμού των γεωτρήσεων που απαιτείται προκειμένου να επιτευχθεί ένα συγκεκριμένο χρονοδιάγραμμα παραγωγής

Για το σημείο έναρξης και τερματισμού της πρόβλεψης δίνονται τρεις επιλογές:

Το σημείο έναρξης μπορεί να

- ταυτίζεται είτε με την έναρξη της ιστορικά καταγεγραμμένης παραγωγής, είτε
- ταυτίζεται με το τέλος των καταγεγραμμένων δεδομένων παραγωγής, είτε
- οριστεί αυθαίρετα από τον χρήστη μεταξύ της αρχής και του τέλους της παραγωγής.

Το σημείο τερματισμού της πρόβλεψης μπορεί να

- ταυτίζεται, είτε με το τέλος των καταγεγραμμένων δεδομένων παραγωγής, είτε
- να οριστεί από τον χρήστη, είτε
- να ορίζεται αυτόματα από το λογισμικό όταν ισχύσει ένας από τους παρακάτω λόγους:
 - εάν οι γεωτρήσεις σταματήσουν να παράγουν πετρέλαιο και αέριο,
 - εάν παρέλθουν 80 χρόνια πρόβλεψης ή
 - εάν δεν επαρκεί η μνήμη του υπολογιστή.

Ουσιαστικά, το σημείο έναρξης ορίζει στο λογισμικό τη μετάβαση από την προσομοίωση του ιστορικού της παραγωγής, στην περίοδο πρόβλεψης της παραγωγής.

Στο δεύτερο βήμα, όπως φαίνεται στην **(Εικόνα 3.25)**, εισάγονται ιστορικά καταγεγραμμένα στοιχεία παραγωγής και οι breakthrough κορεσμοί (breakthrough saturations) για νερό και αέριο. Τα ιστορικά δεδομένα παραγωγής μπορούν να είναι τα εξής:

- ο ρυθμός ροής της κύριας φάσης (πχ πετρέλαιο)

- ο μέγιστος ρυθμός ροής υγρής φάσης
- ο μέγιστος ρυθμός ροής υγρής φάσης νερού
- ο μέγιστος ρυθμός ροής υγρής φάσης αερίου

Σε πιο σύνθετες περιπτώσεις μπορεί να είναι δεδομένα ροής εισπιεζόμενων ρευστών (πχ νερού ή αερίων). Ακόμα, το λογισμικό επιτρέπει την καταχώρηση δεδομένων για περισσότερα του ενός τανκ (**Εικόνα 3.26**).

Step	Time	Avg Oil Rate	Max Liquid Rate	Max Water Rate	Max Gas Rate
	date d/m/y	STB/day	STB/day	STB/day	MMscf/day
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					
11					
12					
13					
14					

α)

β)

Εικόνα 3.25: α) παράθυρο εισαγωγής δεδομένων ρυθμών ροής για ένα τανκ και β) εισαγωγής δεδομένων breakthrough water και gas saturations.

Εικόνα 3.26: Παράθυρο εισαγωγής δεδομένων ρυθμών ροής για πολλά τανκ

- [illegible]

Τέλος, λαμβάνει χώρα η διαδικασία της πρόβλεψης. Η πρόβλεψη μπορεί να πραγματοποιηθεί εφόσον εισαχθούν όλες οι απαραίτητες πληροφορίες. Το παράθυρο αποτελεσμάτων των δεδομένων πρόβλεψης παρουσιάζεται στην **(Εικόνα 3.28)**. Τα δεδομένα της προβλέψεως που υπολογίζονται, παρουσιάζονται σε κοινά διαγράμματα με τα δεδομένα παραγωγής και τα δεδομένα προσομοίωσης. Η δυνατότητα αυτή επιτρέπει τη σύγκριση και την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων **(Εικόνα 3.29)**.

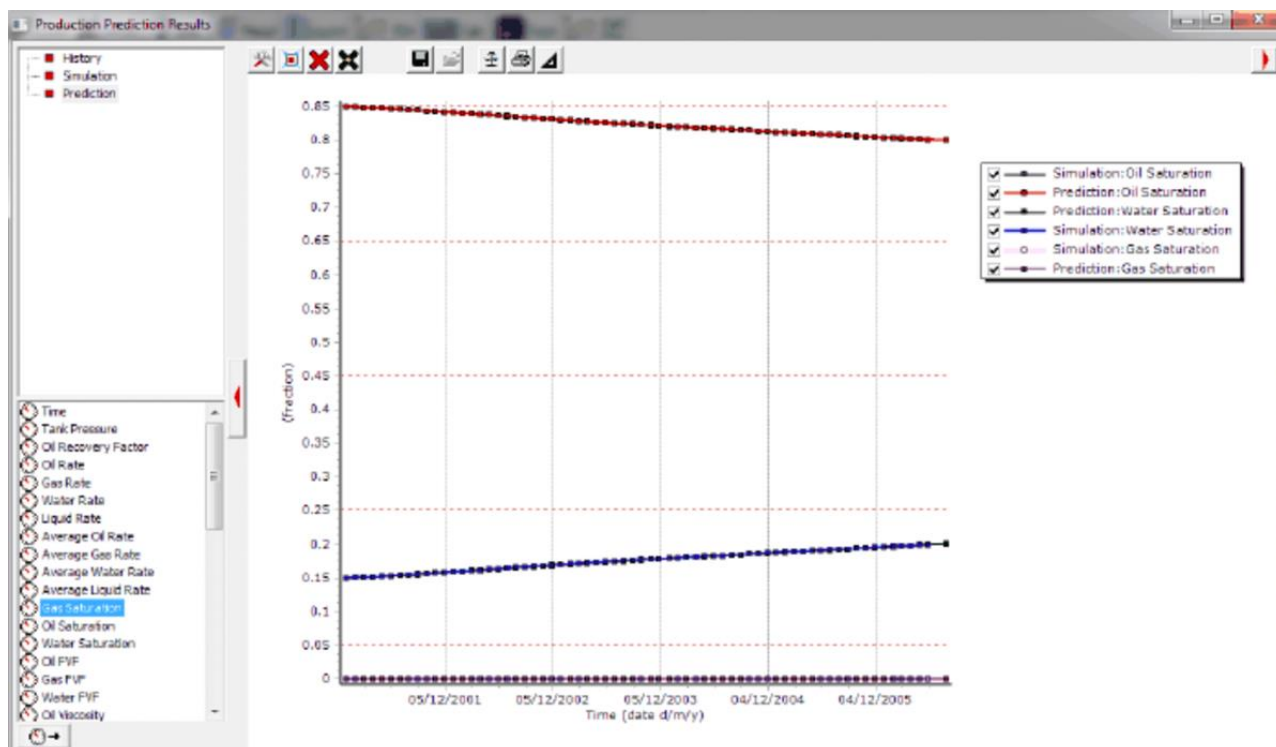
Run Production Prediction

Done Cancel Help Report Layout Plot Calc Save Add Plot

Stream Prediction

Time	Tank Pressure	Oil Recovery Factor	Oil Rate	Gas Rate	Water Rate	Liquid Rate	Avg Oil Rate	Avg Gas Rate	Avg Water Rate	Avg Liquid Rate	Gas Saturation	Oil Saturation	Water Saturation	Man Pres	
date d/m/y	psig	percent	STB/day	MMscf/day	STB/day	STB/day	STB/day	MMscf/day	STB/day	STB/day	fraction	fraction	fraction	psig	
01/01/2001	4000	0	11491	5.74552	0	11491					0	0.05	0.15		Analysis
01/02/2001	3886.72	0.168932	8211.75	4.10585	0	8211.75	11491	5.74552	0	11491	0	0.849553	0.150447		Analysis
01/03/2001	3837.67	0.277972	10995.7	5.49786	0	10995.7	8211.75	4.10585	0	8211.75	0	0.849085	0.150935		Analysis
01/04/2001	3763.63	0.439623	10746.7	5.3733	0	10746.7	10995.7	5.49786	0	10995.7	0	0.848368	0.151632		Analysis
01/05/2001	3706.18	0.592516	10550.6	5.2754	0	10550.6	10746.7	5.3733	0	10746.7	0	0.847604	0.152396		Analysis
01/06/2001	3656.17	0.747623	0	0	0	0	10550.6	5.2754	0	10550.6	0	0.84676	0.15324		Analysis
01/07/2001	3707.44	0.747623	10242.9	5.12151	0	10242.9	0	0	0	0	0	0.846269	0.153731		Analysis
01/08/2001	3648.34	0.898206	10040.3	5.01996	0	10040.3	10242.9	5.12151	0	10242.9	0	0.8459551	0.154449		Analysis
01/09/2001	3603.29	1.04581	9882	4.94131	0	9882	10040.3	5.01996	0	10040.3	0	0.844731	0.155269		Analysis
01/10/2001	3566.13	1.1864	9749.03	4.87454	0	9749.03	9882	4.94131	0	9882	0	0.843899	0.156102		Analysis
01/11/2001	3532.23	1.32972	9629	4.81431	0	9629	9749.03	4.87454	0	9749.03	0	0.843015	0.156966		Analysis
01/12/2001	3502.66	1.46672	9554.52	4.82737	0	9554.52	9629	4.81431	0	9629	0	0.842145	0.157856		Analysis
01/01/2002	3471.71	1.61159	9748.39	4.87396	0	9748.39	9554.52	4.82737	0	9554.52	0	0.841224	0.158776		Analysis
01/02/2002	3443.42	1.7549	9996.79	4.99853	0	9996.79	9748.39	4.87396	0	9748.39	0	0.840293	0.159708		Analysis
01/03/2002	3416.85	1.88764	9565.48	4.7826	0	9565.48	9996.79	4.99853	0	9996.79	0	0.839437	0.160564		Analysis
01/04/2002	3392.48	2.02827	9481	4.74064	0	9481	9565.48	4.7826	0	9565.48	0	0.838432	0.161509		Analysis
01/05/2002	3369.83	2.16315	9334.84	4.66742	0	9334.84	9481	4.74064	0	9481	0	0.83758	0.162421		Analysis
01/06/2002	3347.87	2.30039	9260.33	4.63034	0	9260.33	9334.84	4.66742	0	9334.84	0	0.836642	0.163358		Analysis
01/07/2002	3327.2	2.43213	9189.68	4.59485	0	9189.68	9260.33	4.63034	0	9260.33	0	0.835739	0.164262		Analysis
01/08/2002	3306.37	2.56723	9119.03	4.55934	0	9119.03	9189.68	4.59485	0	9189.68	0	0.83481	0.16519		Analysis
01/09/2002	3286.01	2.7013	9050.33	4.52537	0	9050.33	9119.03	4.55934	0	9119.03	0	0.833887	0.166114		Analysis
01/10/2002	3266.7	2.83005	8984.19	4.4919	0	8984.19	9050.33	4.52537	0	9050.33	0	0.832999	0.167002		Analysis
01/11/2002	3247.09	2.96213	8918.33	4.45938	0	8918.33	8984.19	4.4919	0	8984.19	0	0.832087	0.167914		Analysis
01/12/2002	3228.42	3.08901	8855.48	4.27731	0	8855.48	8918.33	4.45938	0	8918.33	0	0.83121	0.16879		Analysis
01/01/2003	3211.84	3.21479	8495.81	4.24812	0	8495.81	8855.48	4.27731	0	8855.48	0	0.830321	0.16968		Analysis
01/02/2003	3194.97	3.33969	8437.14	4.21857	0	8437.14	8495.81	4.24812	0	8495.81	0	0.829443	0.170557		Analysis
01/03/2003	3179.69	3.45172	8381.29	4.19065	0	8381.29	8437.14	4.21857	0	8437.14	0	0.828558	0.171342		Analysis
01/04/2003	3162.74	3.57494	8321.33	4.16067	0	8321.33	8381.29	4.19065	0	8381.29	0	0.827798	0.172202		Analysis
01/05/2003	3146.39	3.69332	8262.9	4.13119	0	8262.9	8321.33	4.16067	0	8321.33	0	0.826973	0.173027		Analysis
01/06/2003	3129.53	3.8148	8000	3.99999	964.547	8964.55	8262.9	4.13119	0	8262.9	0	0.826129	0.173871		Analysis
01/07/2003	3108.88	3.92861	8000	3.99999	988.684	8988.68	8000	3.99999	964.547	8964.55	0	0.825398	0.174603		Analysis
01/08/2003	3087.91	4.04622	8000	3.99999	1013.37	9013.37	8000	3.99999	988.684	8988.68	0	0.824639	0.175361		Analysis

Εικόνα 3.28: Παράθυρο υπολογισμού των δεδομένων πρόβλεψης.



Εικόνα 3.29: Διάγραμμα που απεικονίζονται με τα δεδομένα παραγωγής και τα δεδομένα προσομοίωσης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ (CASE-STUDY)

Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η εφαρμογή της μεθόδου Material Balance με τη χρήση του λογισμικού MBal στην περίπτωση ενός ταμιευτήρα πετρελαίου, για τον οποίο τίθεται ως αρχική υπόθεση πως δεν υποστηρίζεται από υδροφορέα. Για τον συγκεκριμένο ταμιευτήρα δίνονται δεδομένα παραγωγής για ένα χρονικό διάστημα από 1/1/01 μέχρι 1/6/06.

Κατά την πρώτη διαδικασία που εκτελεί το MBal, η οποία αποτελεί και την πρώτη φάση υλοποίησης του μεθόδου Ισοζυγίου Μάζας, πραγματοποιείται η εκτίμηση της κατάστασης του ταμιευτήρα.

Στην αρχική του πίεση ο συγκεκριμένος ταμιευτήρας είναι ακόρεστος, όπως προκύπτει και από την πίεση φυσαλίδας του πετρελαϊκού ρευστού, η οποία είναι γνωστή. Μάλιστα παραμένει ακόρεστος σε όλο το διαθέσιμο διάστημα των δεδομένων παραγωγής. Με τη δημιουργία του μοντέλου που περιγράφει τη λειτουργία του, η υπόθεση ογκομετρικού ταμιευτήρα που έγινε αρχικά καταρρίπτεται βάση των δεδομένων παραγωγής και προσδιορίζεται το μοντέλο που περιγράφει τον υδροφορέα. Με την ολοκλήρωση του μοντέλου που περιγράφει τα την κατάσταση του ταμιευτήρα, αυτό βελτιστοποιείται ως προς την ικανότητα αναπαραγωγής των καταγεγραμμένων τιμών παραγωγής πετρελαίου και αερίου, μέσω της διαδικασίας της παλινδρόμησης (Regression). Στο τελευταίο στάδιο της πρώτης διαδικασίας, πραγματοποιείται η διαδικασία διόρθωσης των σχετικών διαπερατοτήτων, μέσω ταύτισης των καμπυλών κλασματικής ροής για τα δεδομένα παραγωγής νερού.

Εν συνεχεία, πραγματοποιείται η δεύτερη διαδικασία που εκτελεί το MBal, η οποία αποτελεί και τη δεύτερη φάση υλοποίησης του μεθόδου Ισοζυγίου Μάζας, δηλαδή τη πρόβλεψη της μελλοντικής παραγωγής, με σενάριο παραγωγής (10,000 STB/day).

Αρχικά ελέγχονται οι διορθωμένες τιμές σχετικών διαπερατοτήτων που προέκυψαν από την πρώτη διαδικασία μέσω της σύγκρισης των τιμών του κορεσμού που υπολογίζονται από την προσομοίωση των ιστορικών δεδομένων παραγωγής και από την πρόβλεψη για το διάστημα ιστορικής παραγωγής. Μετά τον έλεγχο αυτό το μοντέλο είναι έτοιμο ώστε χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη μελλοντικής παραγωγής, επιλέγοντας το χρονικό διάστημα της πρόβλεψης, μετά το πέρας των ιστορικών δεδομένων παραγωγής και μέχρι το σημείο που εκτιμάται ότι δεν υπάρχει επαρκής φυσική ενέργεια στον ταμιευτήρα ώστε να υπάρχει παραγωγή πετρελαίου και εκτελείται η πρόβλεψη.

Οι παραπάνω διαδικασίες περιγράφονται πιο αναλυτικά στις ενότητες που ακολουθούν.

4.1 Εισαγωγή δεδομένων και διαμόρφωση βασικού μοντέλου ταμιευτήρα

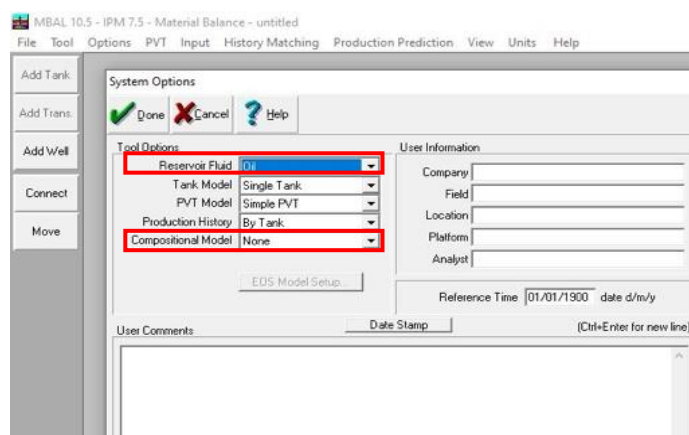
Για τον ταμιευτήρα πετρελαίου υπό μελέτη, υπάρχουν διαθέσιμα τα ακόλουθα δεδομένα όπου συμπεριλαμβάνονται και PVT δεδομένα για το ρευστό του :

Reservoir Temperature: $T = 250$ deg F
Bubble point: $P_b = 2200$ psig
Solution GOR ή $R_s = 500$ SCF/STB
FVF ή $B_o @ P_b = 1.32$ RB/STB
Oil Visc @ $P_b = 0.4$ cP
Oil gravity = 39 API
Gas gravity = 0.798
Water salinity = 100,000 PPM

Διαθέσιμα δεδομένα παραγωγής: δίνονται σε μορφή αρχείου Excel (Παράρτημα Ι)

4.1.1 Εισαγωγή δεδομένων και ρύθμιση μοντέλου πετρελαικού ρευστού

Αφού επιλεγθεί Material Balance εργαλείο στο λογισμικό MBal, επιλέγοντας το Options, όπως φαίνεται στην (Εικόνα 4.1), εισάγονται οι βασικές παράμετροι που χαρακτηρίζουν το σύστημα. Ο ταμιευτήρας χαρακτηρίζεται ως ταμιευτήρας πετρελαίου, ενώ το μοντέλο ρευστού (fluid model) που επιλέγεται για να χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια κατά την προσομοίωση της θερμοδυναμικής και ογκομετρικής συμπεριφοράς των ρευστών του ταμιευτήρα, είναι το Black Oil Model. Στο (κεφάλαιο 1.2.2) αναλύεται εκτενώς το Black Oil Model και οι θεωρήσεις που αυτό θέτει.



Εικόνα 4.1: Εισαγωγή επιλογών για το ρευστό του ταμιευτήρα (πετρέλαιο) και χρήσης του Black oil model.

Στη συνέχεια από το Black oil Input data εισάγονται τα διαθέσιμα PVT δεδομένα, που αποτελούν μετρήσεις πεδίου προκειμένου να χρησιμοποιηθούν στις συσχετίσεις που διαθέτει το λογισμικό για την εκτίμηση των PVT παραμέτρων του ρευστού. Όπως φαίνεται στην (Εικόνα 4.2), εισάγονται:

- ο λόγος αερίου-πετρελαίου (GOR=500 scf/stb)
- η ειδική πυκνότητα πετρελαίου (Oil gravity = 39 API)
- η ειδική πυκνότητα αερίου (Gas gravity = 0.798)
- η αλατότητα νερού (Water salinity = 100,000 PPM)
- η σύσταση επί τοις εκατό για τα ανόργανα συστατικά ($H_2S=0$, $CO_2=0$, $N_2=0$ %)

Υπενθυμίζεται ότι σύμφωνα με το Black Oil model, το ρευστό του ταμιευτήρα αποτελεί μίγμα από το παραγόμενο πετρέλαιο (stock tank oil – STO) και το παραγόμενο αέριο (stock tank gas – STG) στην επιφάνεια (κεφάλαιο 1.2.2).



Εικόνα 4.2: Εισαγωγή δεδομένων που αφορούν τις ιδιότητες του ρευστού.

Ακόμα, προκειμένου να γίνει η κατάλληλη επιλογή συσχετίσεων (correlations), οι οποίες αναφέρονται στο (κεφάλαιο 1.2.2), εισάγονται τα εργαστηριακά μετρημένα δεδομένα για:

- την πίεση στο σημείο φυσαλίδας ($P_b=2,200$ psig)
- το λόγο διαλυμένου αερίου ($R_s=500$ scf/stb)
- τον ογκομετρικό συντελεστή πετρελαίου B_o στο p_b ($B_o=1.32$ rb/stb)
- το ιξώδες ($\mu_o=0.4$ cp)

Οι εργαστηριακά μετρούμενες τιμές αξιοποιούνται προκειμένου να πραγματοποιηθεί ρύθμιση των συσχετίσεων. Εφόσον οι διαθέσιμες συσχετίσεις ρυθμιστούν ως προς τις δύο παραμέτρους τους (πολλαπλασιαστική και μεταθετική), όπως αναλύθηκε στο (κεφάλαιο 1.2.2), ώστε να προσαρμοστούν στα πειραματικά PVT δεδομένα, επιλέγονται αυτές του Glaso και του Beggs, καθώς αποτελούν τις συσχετίσεις όπου η πολλαπλασιαστική (παράμετρος 1) είναι κατά το δυνατόν πιο κοντά στη τιμή της μονάδας (1) και η μεταθετική (παράμετρος 2) είναι κοντά στο μηδέν (0), όπως φαίνεται στην (Εικόνα 4.3).

Oil - Black Oil: Correlations - Oil

	Glaso	Standing	Lasater	Vazquez-Beggs	Petrosky	Al-Marhoun
Bubble Point	1.00244	1.03461	1.1534	0.943352	0.980151	0.969717
Parameter 1	5.38041	71.6351	253.976	-141.487	-45.7779	-71.3922
Std Dev.	2.68873e-7	1.81899e-11	6.50289e-11	3.50155e-11	1.18234e-11	1.81899e-11

	Glaso	Standing	Lasater	Vazquez-Beggs	Petrosky	Al-Marhoun
Solution GOR	1.01726	0.957465	0.871995	1.15828	1.44029	1.09305
Parameter 2	-11.5983	-18.3938	-58.6959	-2.10916	-189.538	-0.799262
Std Dev.	2.35987e-7	1.80826e-11	6.05402e-11	7.17321e-7	2.86042e-9	0.00237294

	Glaso	Standing	Lasater	Vazquez-Beggs	Petrosky	Al-Marhoun
Oil FVF	1.05629	0.896566	0.896566	0.896088	0.921443	0.758469
Parameter 2	-0.0614991	0.107496	0.107496	0.103912	0.0673603	0.282821
Parameter 3	1	1	1	1	1	1
Parameter 4	0	0	0	0	0	0
Std Dev.	3.49104e-9	2.85505e-9	2.85506e-9	2.87976e-9	2.46453e-9	2.59381e-9

Oil - Black Oil: Correlations - Viscosities, Bg

	Beal et al	Beggs et al	Petrosky et al	Egboh et al	Bergman-Sutton
Oil Viscosity	1.13251	1.02708	0.993239	0.632494	1.62682
Parameter 1	0.041899	0.0102754	-0.0177516	-0.554808	0.111254
Std Dev.	2.0938e-9	5.13483e-10	8.87092e-10	2.77251e-8	

Εικόνα 4.3: Παράμετροι όλων των διαθέσιμων συσχετίσεων.

4.1.2 Εισαγωγή δεδομένων και ρύθμιση μοντέλου ταμιευτήρα

Αφού ολοκληρωθεί ο προσδιορισμός των PVT ιδιοτήτων του ρευστού, από το *Input>>Tank Data*, εισάγονται τα διαθέσιμα αρχικά δεδομένα για το μοντέλο ταμιευτήρα (Εικόνα 4.4), ουσιαστικά οι καλύτερες δυνατές εκτιμήσεις ως προς την κατάσταση του και την ύπαρξη ή μη υδροφορέα.

Αρχικά στο *Tank Data>>Tank Parameters* εισάγονται (Εικόνα 4.4α) :

- η θερμοκρασία ($T = 250$ deg F)
- η αρχική πίεση (*initial pressure* = 4,000 psig) που αντιστοιχεί στην καταγεγραμμένη πίεση την πρώτη ημέρα παραγωγής

- το πορώδες του σχηματισμού ($\phi = 0.23$)
- ο κορεσμός σε ενδογενές νερό (*connate water saturation* = 0.15)
- ο όγκος του αρχικού καλύμματος αερίου προς αρχικό όγκο πετρελαίου ($m = 0$)
- τα αρχικά αποθέματα πετρελαίου (*Original Oil in Place* = 186 MMSTB) που προέρχονται από γεωλογική μελέτη και η τιμή αυτή αποτελεί την καλύτερη δυνατή προσέγγιση
- τέλος εισάγεται η ημερομηνία πρώτης καταγραφής.

α)

β)

γ)

Time	Reservoir Pressure (psig)	Cum Oil Produced (MMSTB)	Cum GOR	Cum Wt Produced (MMSTB)	Cum Gas Injected (MMSTB)	Cum Wt Injected (MMSTB)	Regression weighting	Comment
01/01/2001	4300	0	0	0	0	0	Medium	Edt.
01/02/2001	3995.64	0.366232	500	0	0	0	Medium	Edt.
01/03/2001	3906.75	0.560151	499.999	0	0	0	Medium	Edt.
01/04/2001	3762.67	0.927319	499.999	0	0	0	Medium	Edt.
01/05/2001	3705.21	1.24942	499.999	0	0	0	Medium	Edt.
01/06/2001	3695.34	1.57649	500	0	0	0	Medium	Edt.
01/07/2001	3707.56	1.88430	500	0	0	0	Medium	Edt.
01/08/2001	3647.76	1.88430	500.001	0	0	0	Medium	Edt.
01/09/2001	3602.54	2.28537	499.998	0	0	0	Medium	Edt.
01/10/2001	3585.38	2.56173	500.002	0	0	0	Medium	Edt.
01/11/2001	3611.51	2.86396	500.002	0	0	0	Medium	Edt.
01/12/2001	3582.16	3.07632	500	0	0	0	Medium	Edt.
01/01/2002	3471.13	3.39831	500.001	0	0	0	Medium	Edt.
01/02/2002	3442.89	3.70021	499.999	0	0	0	Medium	Edt.
01/03/2002	3410.26	3.98042	500	0	0	0	Medium	Edt.
01/04/2002	3393.39	4.27036	499.999	0	0	0	Medium	Edt.

δ)

Εικόνα 4.4: Εισαγωγή PVT δεδομένων, μοντέλου υδροφορέα, σχετικές διαπερατότητες, ιστορικά δεδομένα παραγωγής.

Στο *Tank Data >> Water Influx* (Εικόνα 4.4β), εισάγονται πληροφορίες για τον υπάρχοντα υδροφορέα. Στο (κεφάλαιο 1.3) παρουσιάστηκαν μοντέλα υδροφορέων και η συμβολή τους στη παραγωγή υδρογονανθράκων. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, καθώς δεν υπάρχουν ενδείξεις για την ύπαρξη υδροφορέα, γίνεται η υπόθεση ότι ο ταμιευτήρας δεν

υποστηρίζεται από υδροφορέα (None). Η υπόθεση αυτή θα ελεγχθεί μέσω των γραφικών μεθόδων που θα ακολουθήσουν.

Στο *Tank Data*>>*Relative Permeability* (Εικόνα 4.4γ), επιλέγεται η χρήση της εξίσωσης Corey, που αναλύεται στη (ενότητα 1.4), για τον υπολογισμό των σχετικών διαπερατοτήτων. Έτσι εισάγονται οι πιο συνήθεις τιμές για την περιγραφή της σχετικής διαπερατότητας πετρελαίου, αερίου και νερού:

➤ ο υπολειπόμενος κορεσμός (residual saturation) κάθε φάσης (S_{rx}):

- $S_{rw} = 0.15$
- $S_{ro} = 0.15$
- $S_{rx} = 0.02$

➤ ο μέγιστος βαθμός κορεσμού της κάθε φάσης (S_x):

- $S_w = 0.63$
- $S_o = 0.8$
- $S_g = 0.9$

➤ ο εκθέτης Corey κάθε φάσης (n_x):

- $n_w = 0.84$
- $n_o = 1.5478$
- $n_g = 1$

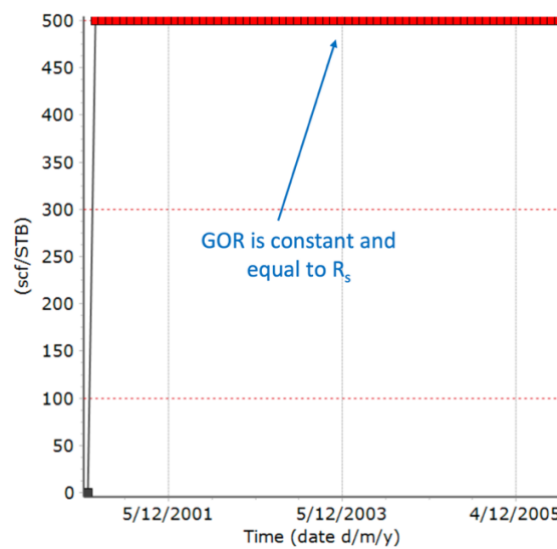
Τέλος στο *Tank Data*>>*Production History* (Εικόνα 4.4δ), εισάγονται τα διαθέσιμα δεδομένα παραγωγής, τα οποία δίνονται σε αρχείο Excel με τίτλο “MBAL - Example 1 - Production data” και παρουσιάζονται στο Παράρτημα Ι. Τα δεδομένα που περιέχει το αρχείο είναι:

- Ημερομηνία καταγραφής (Time - d/m/y)
- Μέση πίεση ταμιευτήρα (Reservoir pressure - psig)
- Αθροιστική παραγωγή πετρελαίου (Cum Oil - MMSTB)
- Αθροιστική παραγωγή αερίου (Cum Gas - MMSTB)
- Αθροιστική παραγωγή νερού (Cum Wat. - MMSTB)

Επιλέγοντας το “**work with GOR**” (Εικόνα 4.4δ), η στήλη αθροιστική παραγωγή αερίου μετατρέπεται αυτόματα στο λόγο GOR για κάθε καταγραφή, μέσω της διαίρεσης με τις καταγραφές ιστορικών δεδομένων παραγωγής πετρελαίου (N_p) για κάθε καταγραφή αντίστοιχα. Μετά την εισαγωγή των δεδομένων παραγωγής, μπορεί να πραγματοποιηθεί η απεικόνιση όλων των μεγεθών συναρτήσει του χρόνου, δίνεται η δυνατότητα απεικόνισης του

GOR προς το χρόνο. Η επιλογή αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη στο MBal, καθώς δίνει πληροφορίες για την ισορροπία φάσεων του ταμιευτήρα.

Ακόμα σε αυτό το βήμα ελέγχεται αν τα ιστορικά δεδομένα παραγωγής και τα PVT δεδομένα επιβεβαιώνονται μεταξύ τους, και εν προκειμένω αν το GOR που προκύπτει από τις καταγραφές και το R_s που προκύπτει από τις συσχετίσεις ταυτίζονται υποδεικνύοντας ότι ο ταμιευτήρας είναι ακόρεστος, όπως έχει αναγνωριστεί αρχικά. Το GOR παραμένει σταθερό και ο ταμιευτήρας μονοφασικός και το GOR ισούται με το R_s όπως αναφέρθηκε στην (Εικόνα 4.5).

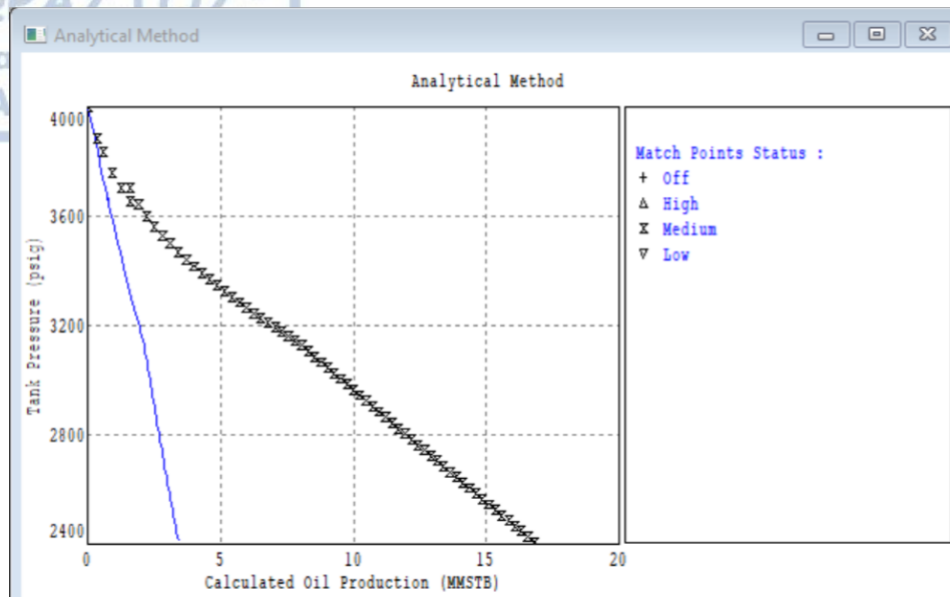


Εικόνα 4.5: Απεικόνιση του GOR με τον χρόνο.

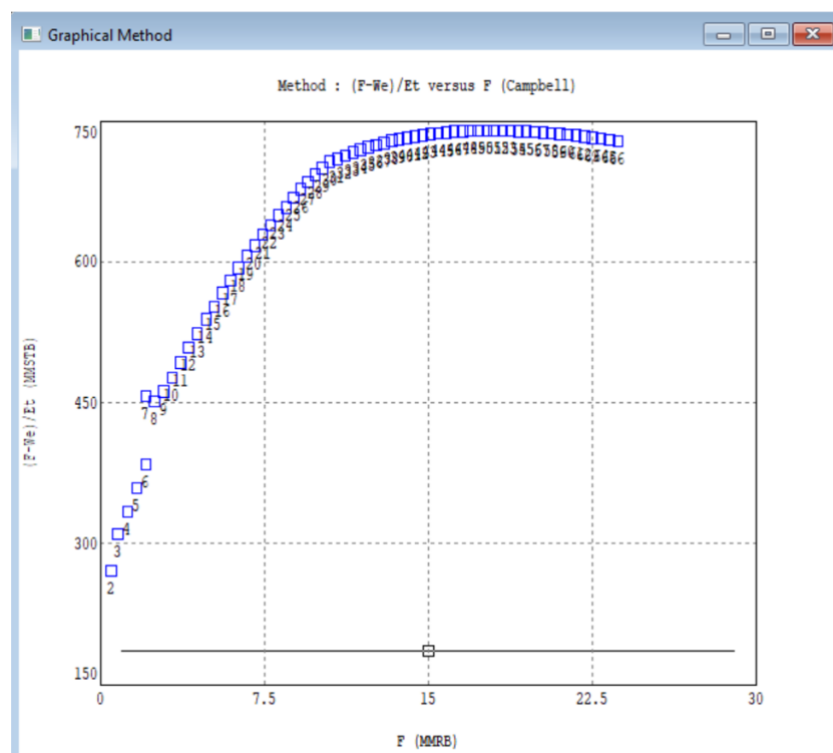
4.2 History matching μοντέλου

Κατά το History matching επιλύεται η Material Balance Equation μέσω αναλυτικών μεθόδων ως προς την παραγωγή πετρελαίου N_p και απεικονίζονται σε διαγράμματα οι επιμέρους όροι της Material Balance Equation μέσω γραφικών μεθόδων, όπως αναφέρθηκε στις (ενότητες 2.2 και 2.1) αντίστοιχα. Σκοπός αυτής της διαδικασίας είναι η διόρθωση των παραμέτρων του βασικού μοντέλου που έχει κατασκευαστεί, μέσω της αναγνώρισης της κατάστασης και των μηχανισμών που συμμετέχουν στην παραγωγή από τον ταμιευτήρα.

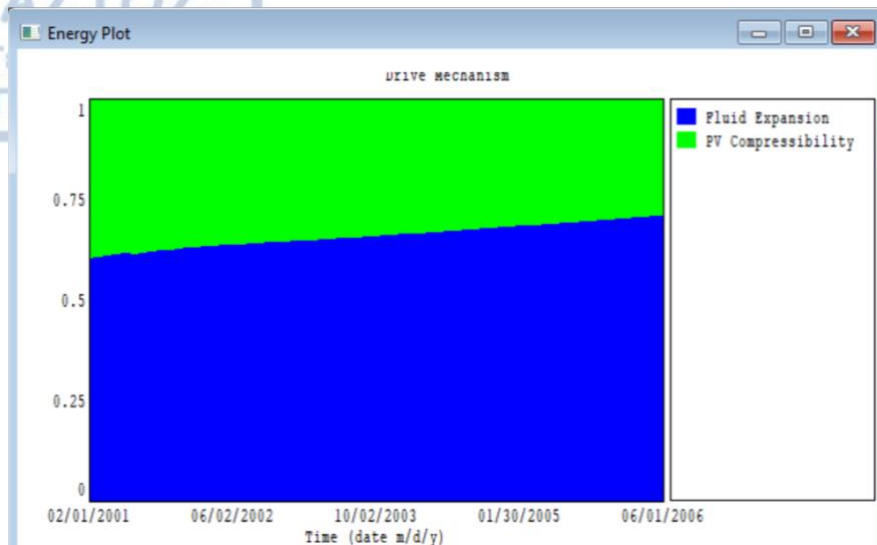
Επιλέγοντας *History Hatching>>All*, εμφανίζονται το αναλυτικό διάγραμμα (**Error! Reference source not found.**), το διάγραμμα Campbell για της γραφικές μεθόδους (Εικόνα 4.7) και το διάγραμμα ενέργειας (Energy plot) (Εικόνα 4.8).



Εικόνα 4.6: Αναλυτικό διάγραμμα (P-cumulative oil production).

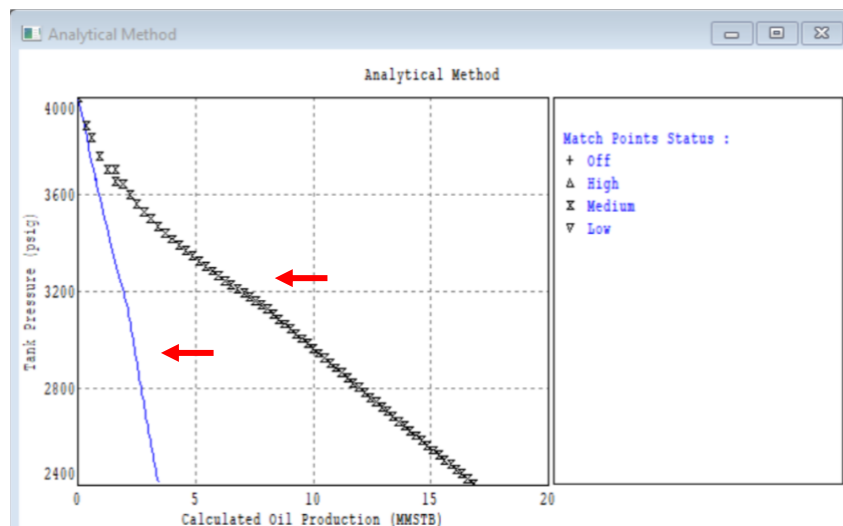


Εικόνα 4.7: Διάγραμμα Campbell.



Εικόνα 4.8: Energy plot

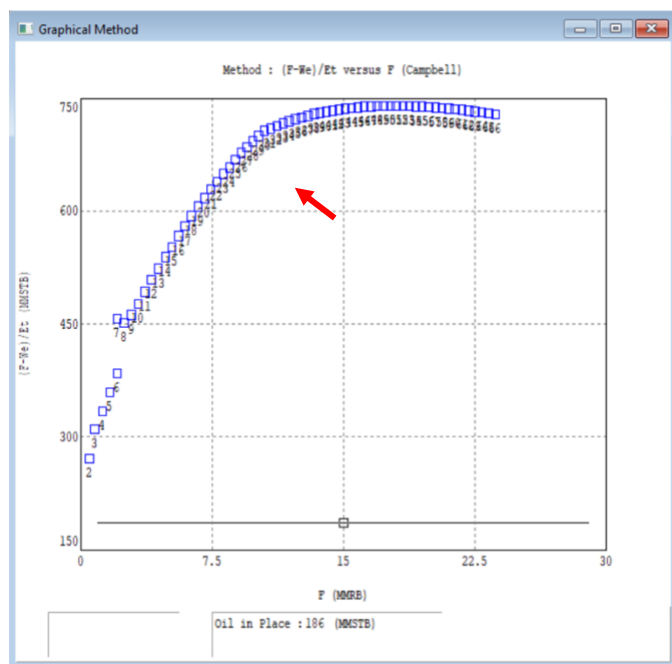
Εξετάζεται αρχικά το διάγραμμα το οποίο κατασκευάζεται σύμφωνα με την αναλυτική μέθοδο (ενότητα 2.1.3) και απεικονίζει την πίεση (P) προς την αθροιστική παραγωγή (N_p) που προκύπτει από τα ιστορικά δεδομένα και από το βασικό μοντέλο που ρυθμίστηκε στο πρόγραμμα σύμφωνα με τα παραπάνω (ενότητα 4.1). Όπως φαίνεται στην (Εικόνα 4.9) η γραμμή που προκύπτει από τα ιστορικά δεδομένα παραγωγής, με αυτή που προκύπτει από το μοντέλο, αποκλίνουν. Η απόκλιση αυτή υποδεικνύει ότι το υφιστάμενο μοντέλο δεν περιγράφει ορθά τη συμπεριφορά του ταμιευτήρα.



Εικόνα 4.9: Αναλυτικό διάγραμμα, πραγματικά ιστορικά δεδομένα παραγωγής και δεδομένα μοντέλου.

Στο επόμενο διάγραμμα Campbell, των γραφικών μεθόδων, εξετάζεται αν επαληθεύεται η υπόθεση ότι δεν υπάρχει υδροφορέας. Το διάγραμμα Campbell (Εικόνα 4.10), το οποίο αναλύθηκε εκτενώς στο (ενότητα 2.1.1.2), απέχει σημαντικά από τη μορφή

οριζόντιας ευθείας γραμμής. Αφού η αρχική θεώρηση ήταν πως το σύστημα δεν υποστηρίζεται από την ύπαρξη υδροφορέα, η καμπύλη που δημιουργείται στο διάγραμμα υποδηλώνει την ύπαρξη αυτού.



Εικόνα 4.10: Διάγραμμα Campbell για τις γραφικές μεθόδους, δείχνει την ύπαρξη υδροφορέα.

Επομένως επιστρέφοντας στο *Tank Data >> Water Influx*, επιλέγεται αναγκάστικα το μοντέλο που περιγράφει καλύτερα τον υδροφορέα με βάση τις καλύτερες διαθέσιμες πληροφορίες που αναζητήθηκαν εν τω μεταξύ από τους γεωλόγους (**Εικόνα 4.11**).

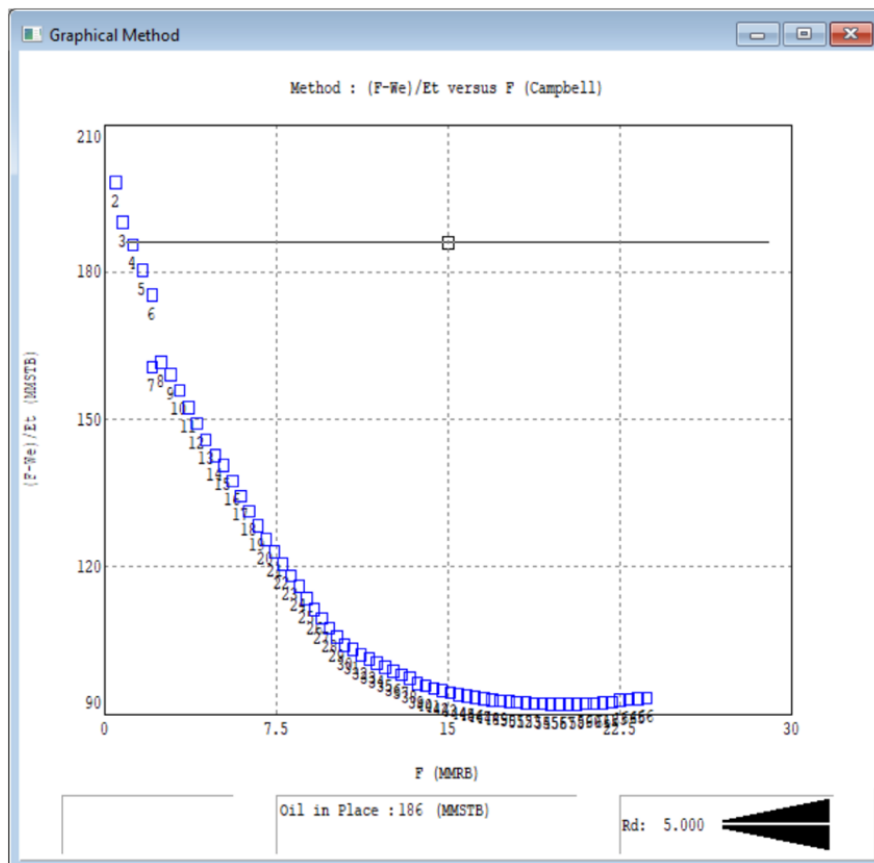
Tank Input Data - Water Influx

Done Cancel Help

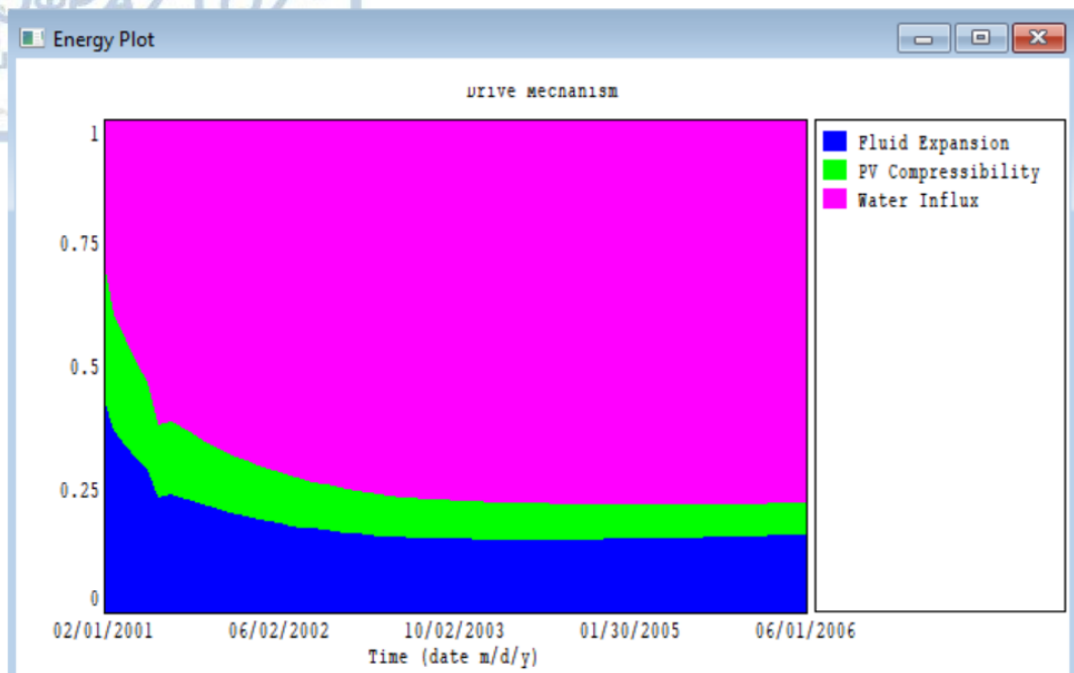
Tank Parameters	Water Influx	Rock Compress.	Rock Compaction	Pore Volume vs Depth	Relative Permeability	Production History
Model: Hurst-van Everdingen-Modified System: Radial Aquifer Reservoir Thickness: 250 feet Reservoir Radius: 2500 feet Outer/Inner Radius ratio: 5 Encroachment Angle: 180 degrees Aquifer Permeability: 10 md						

Εικόνα 4.11: Εισαγωγή μοντέλου που περιγράφει τον υδροφορέα.

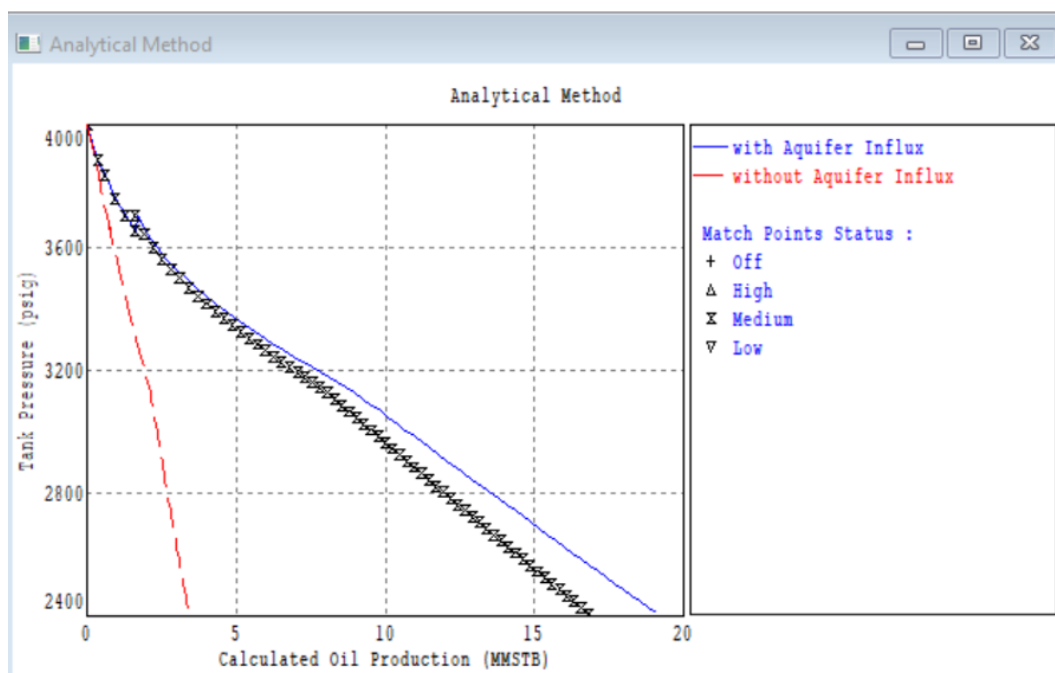
Μετά την εισαγωγή μοντέλου για τον υδροφορέα, εξετάζονται εκ νέου τα Campbell plot, Energy plot και αναλυτικό διάγραμμα. Η νέα απεικόνιση των διαγραμμάτων φαίνεται παρακάτω. Αν και εμφανώς βελτιωμένα, ούτε το διάγραμμα του Campbell (**Εικόνα 4.12**) στις γραφικές μεθόδους, ούτε το αναλυτικό διάγραμμα (**Εικόνα 4.14**) έχουν πάρει την επιθυμητή μορφή. Συγκεκριμένα στο αναλυτικό διάγραμμα, με την κόκκινη γραμμή απεικονίζονται τα αποτελέσματα του μοντέλου πριν την εισαγωγή μοντέλου υδροφορέα και με τη μπλε τα αποτελέσματα μετά. Παρόλα αυτά, πλέον η απόκλιση μοντέλου και πραγματικών δεδομένων έχει αμβλυνθεί. Ακόμα στο Energy plot (**Εικόνα 4.13**) αποτυπώνεται, με το ροζ χρώμα, ο βαθμός συμμετοχής του υδροφορέα ως μηχανισμός παραγωγής. Επιπλέον στο βήμα αυτό απεικονίζεται το διάγραμμα WD (function plot) (**Εικόνα 4.15**) της συνάρτησης του υδροφορέα προς το χρόνο.



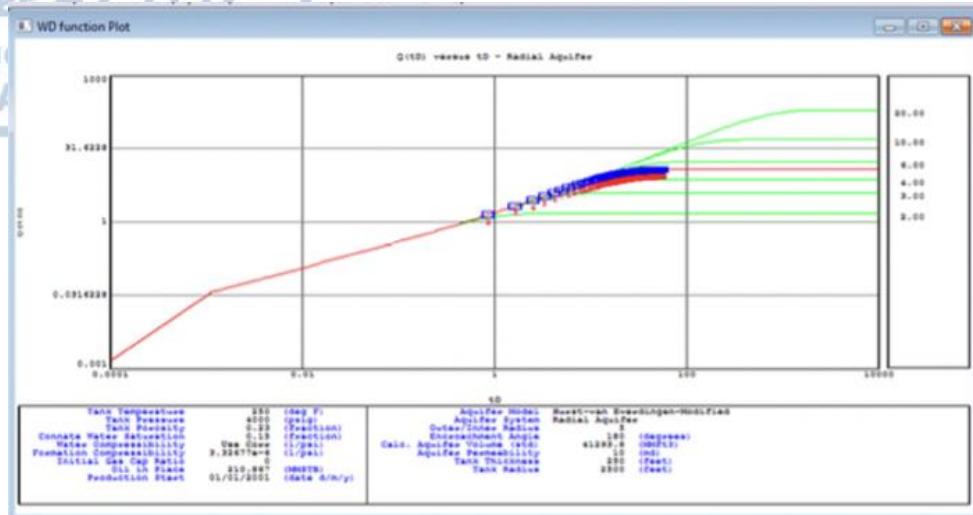
Εικόνα 4.12: Διορθωμένο διάγραμμα Campbell, ως προς την ύπαρξη υδροφορέα (Graphical method).



Εικόνα 4.13: Διορθωμένο Energy plot ως προς την ύπαρξη υδροφορέα.



Εικόνα 4.14: Διορθωμένο αναλυτικό διάγραμμα ως προς την ύπαρξη υδροφορέα.



Εικόνα 4.15: Διάγραμμα συνάρτησης υδροφορέα με το χρόνο.

Προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η απόκλιση της πρόβλεψης του μοντέλου από τα ιστορικά δεδομένα παραγωγής, όπως αναφέρθηκε στο (κεφάλαιο 3) πραγματοποιείται **ρύθμιση του μοντέλου με τη διαδικασία της παλινδρόμησης (Regression) (Εικόνα 4.16)**. Η διαδικασία αυτή επαναπροσδιορίζει τις τιμές που εισήχθησαν για τον προσδιορισμό του μοντέλου υδροφορέα καθώς και την εκτίμηση των αποθεμάτων του ταμιευτήρα.

Η διόρθωση αυτών των τιμών από το λογισμικό επιφέρει την πλήρη ταύτιση μοντέλου και πραγματικών δεδομένων στο αναλυτικό διάγραμμα (Εικόνα 4.19), καθώς ακόμα το διάγραμμα Campbell παίρνει τη μορφή ευθείας γραμμής, (Εικόνα 4.17). Όπως φαίνεται στην (Εικόνα 4.16), οι τιμές που επαναπροσδιορίζονται με τη διαδικασία της παλινδρόμησης είναι τα αρχικά αποθέματα πετρελαίου (oil in place), η αναλογία εξωτερικής προς εσωτερική ακτίνα υδροφορέα (Outer/Inner Radius Ratio), η γωνία επαφής υδροφορέα (Encroachment Angle) και η διαπερατότητα του υδροφορέα. Συγκεκριμένα, η τιμή των αρχικών αποθεμάτων αυξήθηκε (από 186 MMSTB σε 210.839 MMSTB), γεγονός που είναι λογικό καθώς μειώνεται η τιμή της διαπερατότητας (από 10 md σε 9.3686 md), της γωνίας επαφής του υδροφορέα (από 180 degrees σε 156.601 degrees) και του λόγου εξωτερικής προς εσωτερικής ακτίνας υδροφόρου (από 5 σε 4.8226) αδυνατίζοντας τον υδροφορέα. Στο νέο αναλυτικό διάγραμμα που προκύπτει, η μπλε γραμμή που αντιστοιχεί στις τιμές που δίνει το μοντέλο, πλέον ταυτίζονται με τις ιστορικά καταγεγραμμένες τιμές που απεικονίζονται στο διάγραμμα.

Regression

Done Cancel Help Calc Reset Accept All Fits

Regress on	Start	Best Fit	Minimum	Maximum	
☒ Oil in Place	186	210.839			MMSTB
☒ Outer/Inner Radius	5	4.8226			
☐ Reservoir Radius	2500				feet
☒ Encroachment Angle	180	156.601			degrees
☐ Reservoir Thickness	250				feet
☐ Porosity	0.23				fraction
☒ Aquifer Permeability	10	9.3686			md
☐ Formation Compressibility					1/psi

Iteration No 100 Standard Deviation 4.70936e-6

α)

Regression

Done Cancel Help Calc Reset Accept All Fits

Regress on	Start	Best Fit	Minimum	Maximum	
☒ Oil in Place	210.839	210.839			MMSTB
☒ Outer/Inner Radius	4.8226	4.8226			
☐ Reservoir Radius	2500				feet
☒ Encroachment Angle	156.601	156.601			degrees
☐ Reservoir Thickness	250				feet
☐ Porosity	0.23				fraction
☒ Aquifer Permeability	9.3686	9.3686			md
☐ Formation Compressibility					1/psi

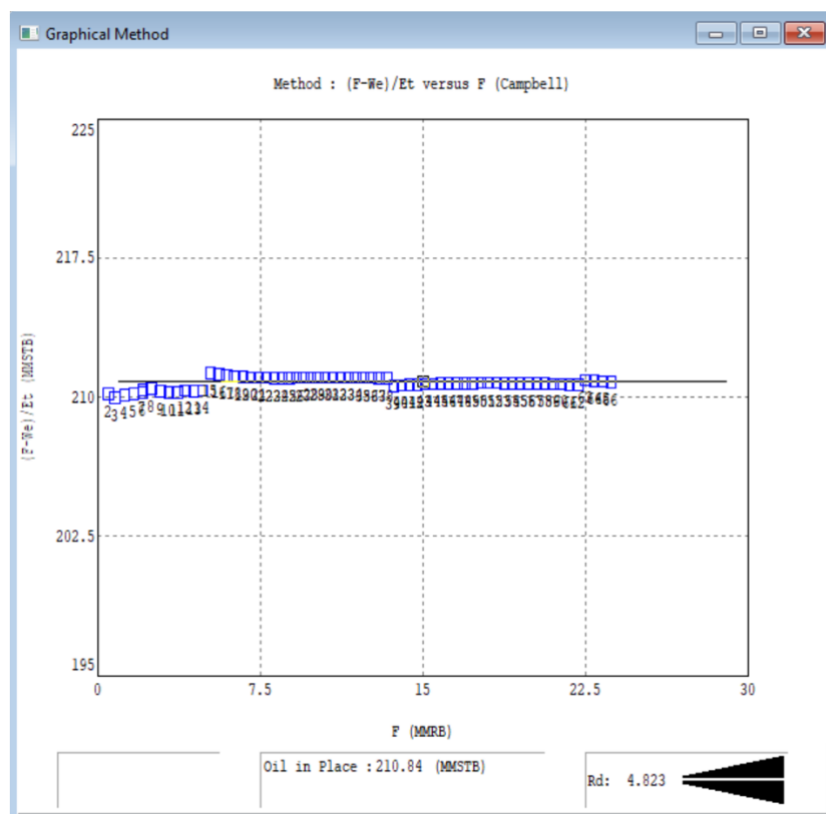
Iteration No 100 Standard Deviation 4.70936e-6

β)

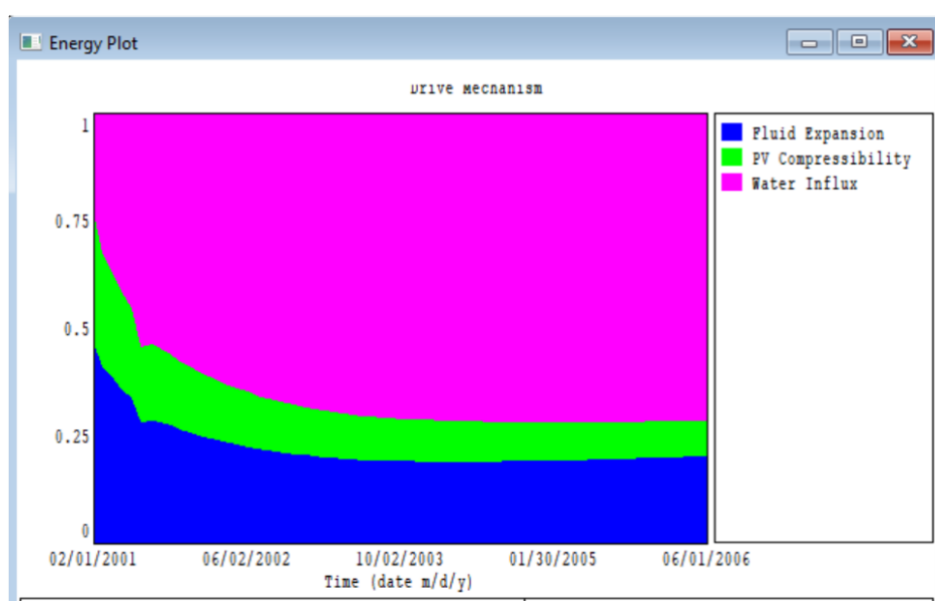
Εικόνα 4.16 : Διαδικασία παλινδρόμησης (regression) α) υπολογισμός τιμών, β) αποδοχή τιμών.

Επιπρόσθετα, στις (Εικόνα 4.8, Εικόνα 4.13 και Εικόνα 4.17) παρατηρούνται οι μεταβολές στο διάγραμμα ενέργειας με την προσθήκη υδροφορέα, αλλά και με τις αλλαγές στις παραμέτρους του υδροφορέα. Το διάγραμμα ενέργειας και στις τρεις εικόνες, παρουσιάζει τη χρονική μεταβολή των δεικτών, κατά τη διάρκεια της περιόδου παραγωγής, οι οποίοι περιγράφουν την ισχύ με την οποία επιδρά ο κάθε μηχανισμός ροής στο σύστημα του

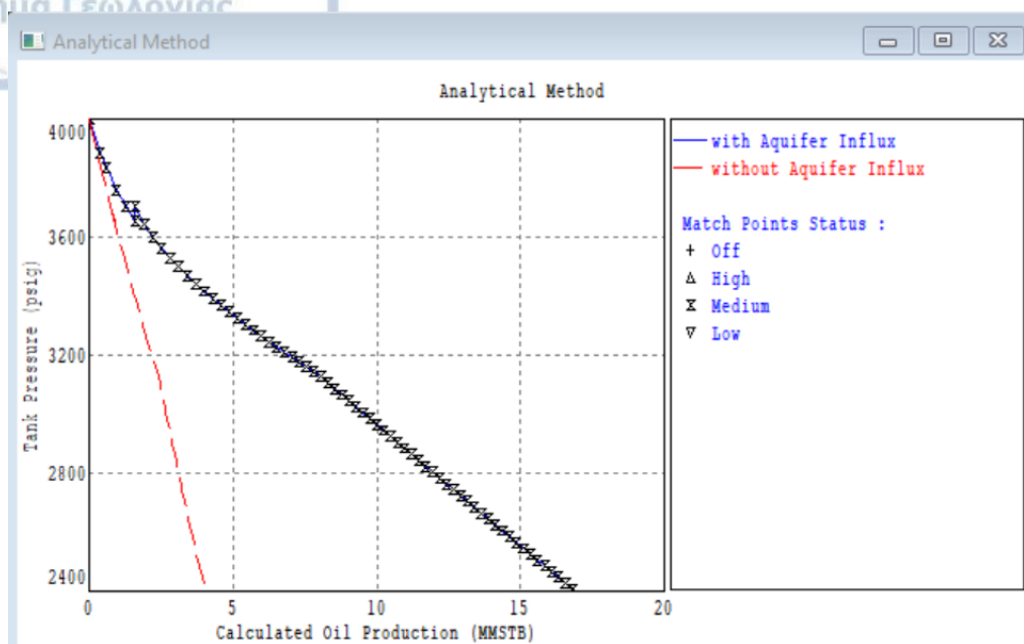
ταμιευτήρα. Οι δείκτες, όπως αναλύθηκε στο (κεφάλαιο 2.1.1.3), προκύπτουν από την εξίσωση Material balance. Συγκεκριμένα, το διάγραμμα ενέργειας από την (Εικόνα 4.8) στην (Εικόνα 4.13) αλλάζει λόγω της προσθήκης υδροφορέα, η ενέργεια του οποίου απεικονίζεται με ροζ χρώμα, ενώ από το διάγραμμα της (Εικόνα 4.13) σε αυτό της (Εικόνα 4.18) αυξάνεται λίγο η ισχύς του δείκτη εκτόνωση του ίδιου του πετρελαίου (DDI).



Εικόνα 4.17: Διάγραμμα Campbell μετά τη διαδικασία Regression.



Εικόνα 4.18: Energy plot μετά τη διαδικασία Regression.



Εικόνα 4.19: Αναλυτικό διάγραμμα μετά τη διαδικασία Regression.

Έχοντας ολοκληρώσει το history matching, το επόμενο βήμα είναι η πραγματοποίηση της προσομοίωσης, *History matching >> Run simulation*, η οποία αποτελεί επιπρόσθετο έλεγχο για τον αν το μοντέλο περιγράφει σωστά το σύστημα του ταμιευτήρα. Η προσομοίωση, όπως και η αναλυτική μέθοδος, επιλύουν τη Material Balance equation, με τη διαφορά πως η προσομοίωση εκτελεί ακριβώς αντίστροφα τον υπολογισμό. Δηλαδή υπολογίζονται οι πιέσεις p και θεωρούνται δεδομένες οι τιμές αθροιστικής παραγωγής N_p και αποθεμάτων N , τη στιγμή που για την κατασκευή του αναλυτικού διαγράμματος προσδιορίζεται το N_p θεωρώντας γνωστή της πίεση p . Αυτή η διαδικασία, που αποτελεί επιπλέον έλεγχο του μοντέλου, αν αναπαραγάγει ορθά τις τιμές πίεσης για κάθε χρονική στιγμή, επιβεβαιώνει ότι το μοντέλο και οι παράμετροι του υδροφορέα έχουν εκτιμηθεί σωστά. Σε αντίθετη περίπτωση το μοντέλο και οι παράμετροι του υδροφορέα πρέπει να επανεκτιμηθούν. Στην (Εικόνα 4.21) φαίνεται το διάγραμμα πίεσης σε σχέση με το χρόνο, όπως προκύπτει από τα ιστορικά δεδομένα παραγωγής και από την προσομοίωση επιλύοντας τη MBE. Το διάγραμμα δείχνει την εξαιρετική ταύτιση των τιμών.

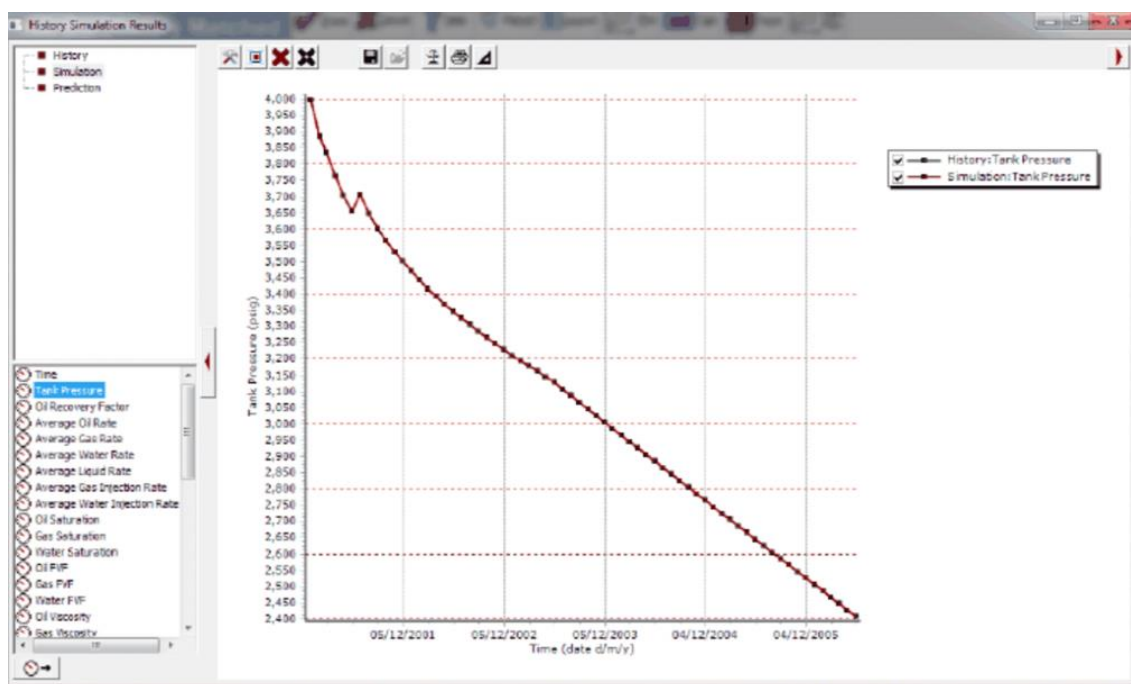
Run History Simulation

Done Cancel Help Report Layout Plot Calc Save

Stream Simulation

Time	Tank Pressure	Oil Recovery Factor	Avg Oil Rate	Avg Gas Rate	Avg Water Rate	Avg Liq Rate	Avg Gas Inj Rate	Avg Water Inj Rate	Oil Saturation	Gas Saturation	Water Saturation	Oil FVF
date d/m/y	psig	percent	STB/day	MMscf/day	STB/day	STB/day	MMscf/day	STB/day	fraction	fraction	fraction	RB/STB
01/01/2001	4000	0							0.85	0	0.15	1.29122
01/02/2001	3896.71	0.16886	11491	5.74552	0	11491	0	0	0.849554	0	0.150446	1.29223
01/03/2001	3837.64	0.277853	8211.75	4.10585	0	8211.75	0	0	0.849066	0	0.150934	1.29269
01/04/2001	3763.59	0.439435	10995.7	5.49786	0	10995.7	0	0	0.84837	0	0.15163	1.29341
01/05/2001	3706.13	0.592263	10746.7	5.3733	0	10746.7	0	0	0.847607	0	0.152393	1.29399
01/06/2001	3656.12	0.747304	10550.6	5.2754	0	10550.6	0	0	0.846763	0	0.153237	1.2945
01/07/2001	3707.4	0.747304	0	0	0	0	0	0	0.846273	0	0.153728	1.29397
01/08/2001	3648.31	0.897823	10242.9	5.12151	0	10242.9	0	0	0.845554	0	0.154446	1.29458
01/09/2001	3603.27	1.04536	10040.3	5.01996	0	10040.3	0	0	0.844735	0	0.155265	1.29506
01/10/2001	3566.11	1.1859	9882	4.94131	0	9882	0	0	0.843903	0	0.156098	1.29547
01/11/2001	3532.21	1.32916	9749.03	4.87454	0	9749.03	0	0	0.84302	0	0.156981	1.29585
01/12/2001	3502.64	1.46609	9629	4.81431	0	9629	0	0	0.84215	0	0.15785	1.29618
01/01/2002	3471.69	1.6109	9554.52	4.72737	0	9554.52	0	0	0.841231	0	0.15877	1.29654
01/02/2002	3443.41	1.75415	9748.39	4.87396	0	9748.39	0	0	0.8403	0	0.159701	1.29687
01/03/2002	3416.84	1.88684	9996.79	4.99653	0	9996.79	0	0	0.839444	0	0.160557	1.29718
01/04/2002	3392.48	2.0274	9565.48	4.7826	0	9565.48	0	0	0.838499	0	0.161501	1.29748
01/05/2002	3369.83	2.16223	9481	4.74064	0	9481	0	0	0.837588	0	0.162413	1.29776
01/06/2002	3347.86	2.29941	9334.84	4.66742	0	9334.84	0	0	0.83665	0	0.16335	1.29803
01/07/2002	3327.2	2.4311	9260.33	4.63033	0	9260.33	0	0	0.835748	0	0.164253	1.29829
01/08/2002	3306.37	2.56614	9189.68	4.59484	0	9189.68	0	0	0.834819	0	0.165181	1.29855
01/09/2002	3286.01	2.70014	9119.03	4.55935	0	9119.03	0	0	0.833897	0	0.166104	1.29882
01/10/2002	3266.71	2.82885	9050.33	4.52533	0	9050.33	0	0	0.833009	0	0.166992	1.29907
01/11/2002	3247.1	2.96087	8984.19	4.49194	0	8984.19	0	0	0.832097	0	0.167903	1.29933
01/12/2002	3228.43	3.0877	8918.33	4.45933	0	8918.33	0	0	0.831221	0	0.168779	1.29958
01/01/2003	3211.84	3.21342	8555.48	4.27742	0	8555.48	0	0	0.830332	0	0.169668	1.2998

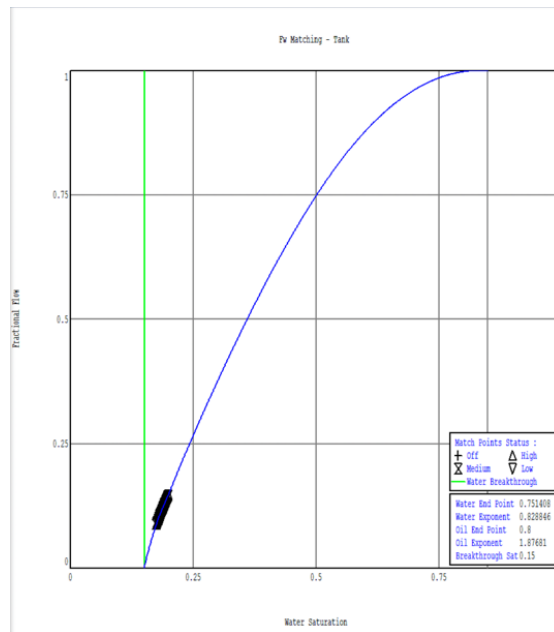
Εικόνα 4.20: Υπολογισμοί προσομοίωσης (run simulation).



Εικόνα 4.21: Απεικόνιση προσομοίωσης.

Τέλος, πραγματοποιείται ταύτιση τις κλασματικές ροές με την εντολή History matching>>Fw matching>>Regression. Η διαδικασία αυτή προσδιορίζει τα χαρακτηριστικά των καμπυλών Corey που περιγράφουν τις σχετικές διαπερατότητες κάθε φάσης για τους υπολογισμούς πρόβλεψης, δεδομένου ότι στην εισαγωγή δεδομένων είχαν δοθεί τυπικές τιμές που συναντώνται για πετρέλαιο, αέριο και νερό.. Από τη διαδικασία της παλινδρόμησης (regression) θα προκύψει ένα σύνολο παραμέτρων της συνάρτησης Corey, που αναλύεται στην

(ενότητα 1.4), ώστε να ταυτίζονται η κλασματική ροή νερού που υπολογίζεται από τα ιστορικά δεδομένα παραγωγής εξίσωση (2.22) και που υπολογίζεται από το νόμο ροής του Darcy, ο οποίος εμπεριέχει την κινητικότητα κάθε φάσης, επομένως εμπεριέχει τη σχετική διαπερατότητα κάθε φάσης, εξίσωση (2.18). Το διάγραμμα που εμφανίζεται (Εικόνα 4.22) αποτυπώνει την αντιστοίχιση της κλασματικής ροής (fractional flow) και του κορεσμού σε νερό (water saturation).

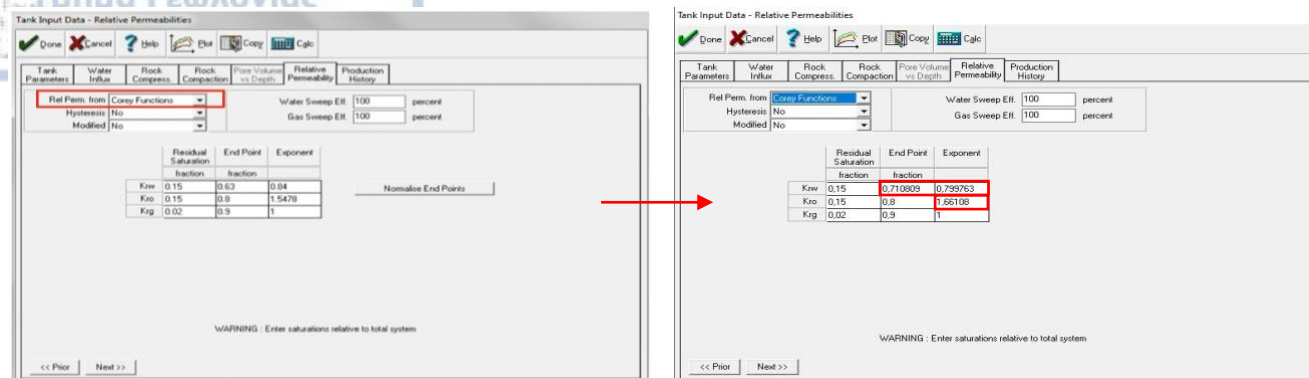


Εικόνα 4.22: Διάγραμμα κλασματικής ροής και κορεσμού.

Οι τιμές της εξίσωσης του Corey, για την περιγραφή της σχετικής διαπερατότητας πετρελαίου, αερίου και νερού, που τροποποιούνται με τη διαδικασία της παλινδρόμησης κατά το F_w matching, είναι τα S_w , n_w και n_o , όπως φαίνεται παρακάτω στην (Εικόνα 4.23).

- ο υπολειπόμενος κορεσμός (residual saturation) κάθε φάσης (S_{rx}):
 - $S_{rw} = 0.15$
 - $S_{ro} = 0.15$
 - $S_{rx} = 0.02$
- ο βαθμός κορεσμού της φάσης (S_x):
 - $S_w = 0.63$
 - $S_o = 0.710809$
 - $S_g = 0.9$
- ο εκθέτης Corey (n_x):
 - $n_w = 0.799763$
 - $n_o = 1.66108$

$$n_g = 1$$



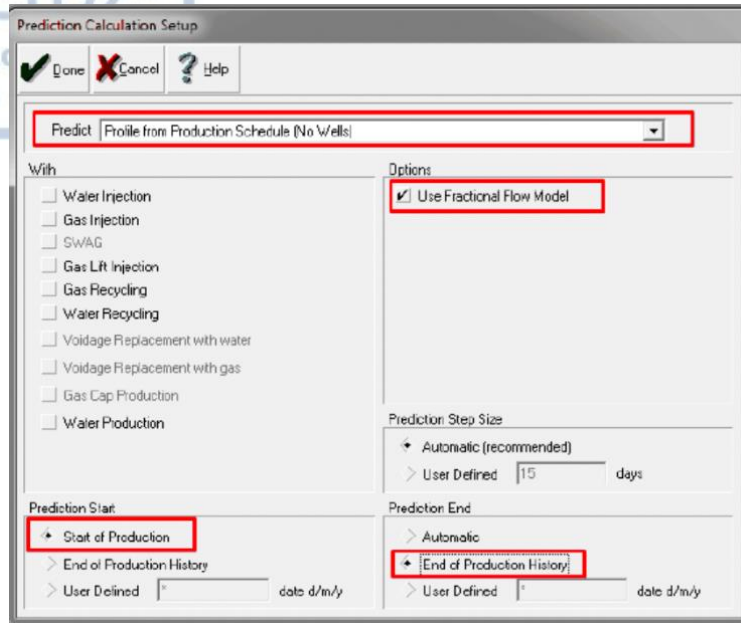
Εικόνα 4.23: Διόρθωση τιμών των παραμέτρων της εξίσωσης Corey, λόγω της διαδικασίας ταύτισης της καμπύλης κλασματικής ροής του νερού (Fw History matching).

Η διόρθωση των παραπάνω τιμών είναι σημαντική για τη διαδικασία της πρόβλεψης όπως αναλύθηκε στην (ενότητα 2.2), όπου οι τιμές των σχετικών διαπερατοτήτων k_r που υπολογίζονται από την εξίσωση του Corey, σε οποιαδήποτε πίεση, εμπεριέχονται στις εξισώσεις των κλασματικών ροών (2.19 και 2.23) που αξιοποιούνται για την πρόβλεψη της μελλοντικής απόδοσης του ταμιευτήρα (ενότητες 2.2.1 και 2.2.2).

4.3 Πρόβλεψη μελλοντικής παραγωγής

Πριν την υλοποίηση της πρόβλεψης της μελλοντικής παραγωγής για χρονικό διάστημα που ορίζει ο χρήστης, πραγματοποιείται ένα πρώτο στάδιο πρόβλεψης μελλοντικής παραγωγής για χρονικό διάστημα ίσο με την ιστορική παραγωγή. Το στάδιο αυτό είναι απαραίτητο προκειμένου να γίνει επαλήθευση των σχετικών διαπερατοτήτων που έχουν υπολογιστεί στην προηγούμενη φάση. Επομένως, χρησιμοποιείται η περίοδος για την οποία διατίθενται ιστορικά δεδομένα παραγωγής ως «μελλοντική» και ζητείται από το MBal να προβλέψει τη συμπεριφορά του ταμιευτήρα. Αν όλες οι σχετικές διαπερατότητες έχουν ρυθμιστεί σωστά, τότε η προβλεπόμενη παραγωγή θα πρέπει να ταυτίζεται με την καταγεγραμμένη.

Για να υλοποιηθεί το στάδιο αυτό επιλέγεται το *Production prediction>>Production setup>>Profile from production schedule (no wells)* προκειμένου να προσδιοριστεί το μοντέλο πρόβλεψης και το χρονικό διάστημα για το οποίο θα πραγματοποιηθεί πρόβλεψη μελλοντικής παραγωγής (Εικόνα 4.24). Για να επιτευχθεί επομένως αναπαραγωγή της παρελθούσας περιόδου, προσποριούμενη ότι αυτή είναι άγνωστη, επιλέγεται χρονική περίοδος “Start of Production” έως “End of production History”.



Εικόνα 4.24: Επιλογή μοντέλου πρόβλεψης και χρονικού διαστήματος.

Ακόμα το λογισμικό παρέχει τη δυνατότητα ανάλυσης της προβλεπόμενης παραγωγής ανά γεώτρηση εφόσον υπάρχουν τα κατάλληλα δεδομένα (πχ πόσες γεωτρήσεις υπάρχουν, πόσο παράγει η κάθε μια, ποιες είναι ανοιχτές, κ.α.). Στη συγκεκριμένη περίπτωση, που δεν υπάρχουν διαθέσιμα αυτά τα δεδομένα, με την επιλογή **“Profile from production schedule (no wells)”**, υποδεικνύεται στο λογισμικό ότι η παραγωγή πραγματοποιείται μέσω μιας γεώτρησης η οποία είναι πλήρως ελεύθερη.

Στη συνέχεια, με την επιλογή *Production prediction>>Production and Constraints>>Copy*, συμπληρώνεται αυτόματα ο πίνακας που φαίνεται στην (Εικόνα 4.25) και δίνει τον μέσο όρο παραγωγής ανά ημέρα, δηλαδή την παροχή. Η παροχή Q , εισάγει την έννοια του χρόνου στην ογκομετρική μέθοδο πρόβλεψης Material Balance. Δηλαδή, ενώ η μέθοδος ισοζυγίου μάζας προσδιορίζει τον όγκο που θα παραχθεί για συγκεκριμένη πτώση πίεσης (όχι για χρονικό διάστημα), ο ρυθμός παραγωγής (η παροχή) δίνει το χρόνο που θα χρειαστεί για να συμβεί αυτή η πτώση πίεσης, μέσω της διαίρεσης των δύο μεγεθών. Στη συγκεκριμένη περίπτωση οι παροχές προκύπτουν από τα ιστορικά δεδομένα παραγωγής και εισάγονται αυτόματα από το λογισμικό με την επιλογή **“copy”**. Όπως θα αναλυθεί παρακάτω, για διάστημα πρόβλεψης μελλοντικής παραγωγής δίνεται η δυνατότητα εισαγωγής αυθαίρετου ρυθμού παραγωγής από το χρήστη.

Tank Prediction Data - Production and constraints

Done Cancel Help Import Plot Report Reset Copy

Production Constraints Break-throughs

Step Step Step Step

	Time	Avg Oil Rate	Max Liquid Rate	Max Water Rate	Max Gas Rate				
	date d/m/y	STB/day	STB/day	STB/day	MMscf/day				
1	01/01/2001	11491							
2	01/02/2001	8211.75							
3	01/03/2001	10995.7							
4	01/04/2001	10746.7							
5	01/05/2001	10550.6							
6	01/06/2001	0							
7	01/07/2001	10242.9							
8	01/08/2001	10040.3							
9	01/09/2001	9882							
10	01/10/2001	9749.03							
11	01/11/2001	9629							
12	01/12/2001	9854.52							
13	01/01/2002	9748.39							
14	01/02/2002	9996.79							

Prediction from 01/01/2001 date d/m/y

Εικόνα 4.25: Τιμές μέσου όρου ροής πετρελαίου ανά ημέρα.

Επιλέγοντας *Production prediction>>Reporting schedule>>Automatic* ορίζεται η αυτόματη συχνότητα πρόβλεψης. Επομένως σε αυτή τη περίπτωση ορίζεται αυτόματα από το λογισμικό το βήμα πρόβλεψης, όμως υπάρχει η δυνατότητα ορισμού του βήματος από το χρήστη, όπως αναλύθηκε στη 3^ο κεφάλαιο. Με το *Production prediction>>Run Prediction>>Calc*, πραγματοποιούνται οι υπολογισμοί πρόβλεψης οι οποίοι παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα της (Εικόνα 4.26).

Run Production Prediction

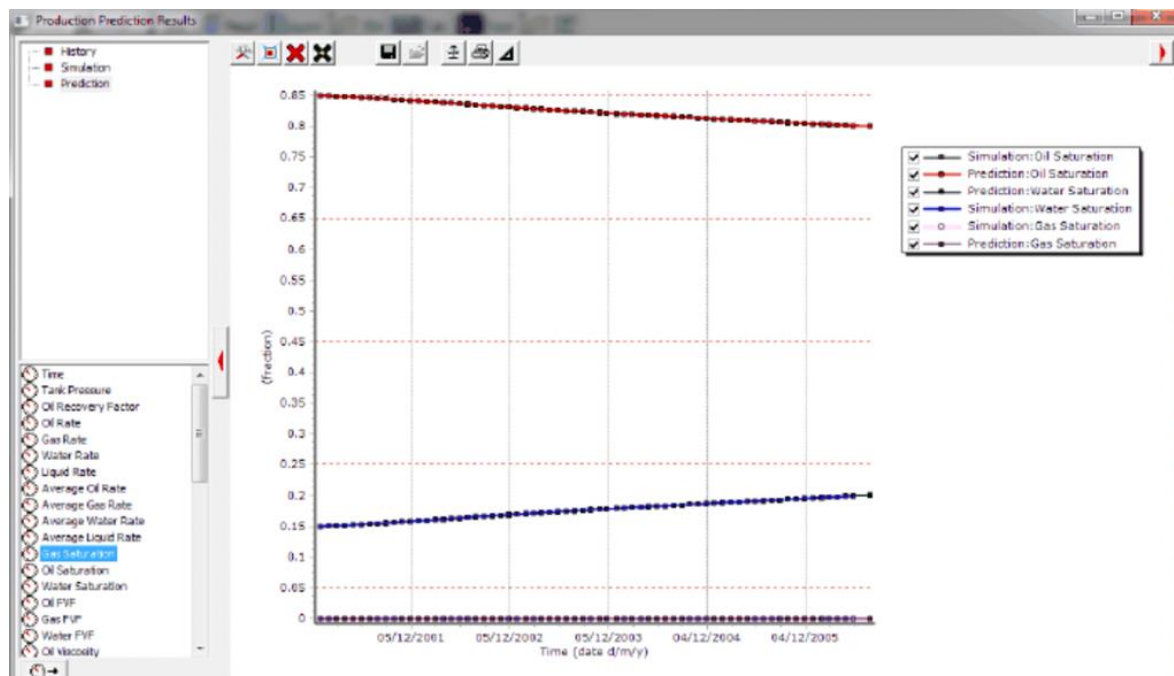
Done Cancel Help Report Layout Plot Calc Save Add Plot

Stream Prediction

Time	Tank Pressure	Oil Recovery Factor	Oil Rate	Gas Rate	Water Rate	Liquid Rate	Avg Oil Rate	Avg Gas Rate	Avg Water Rate	Avg Liquid Rate	Gas Saturation	Oil Saturation	Water Saturation	Oil FVF	
date d/m/y	psig	percent	STB/day	MMscf/day	STB/day	STB/day	STB/day	MMscf/day	STB/day	STB/day	fraction	fraction	fraction	RB/STB	
01/01/2001	4000	0	11491	5.7455	0	11491	5.7455	12.2828	11503.3	0	0.05	0.15	1.29122	Analysis	
01/02/2001	3886.62	0.168932	8211.75	4.10588	36.9249	8248.67	11491	5.7455	12.2828	11503.3	0	0.049554	0.150446	1.29224	Analysis
01/03/2001	3837.26	0.277971	10995.7	5.49795	90.5472	11086.2	8211.75	4.10588	44.7095	8256.46	0	0.049069	0.150931	1.29227	Analysis
01/04/2001	3762.52	0.439622	10746.7	5.37335	139.21	10885.9	10995.7	5.49795	103.219	11088.9	0	0.048378	0.151622	1.29342	Analysis
01/05/2001	3704.18	0.592515	10550.6	5.2753	186.69	10737.3	10746.7	5.37335	151.9	10898.6	0	0.047623	0.152377	1.29401	Analysis
01/06/2001	3653.08	0.747621	0	0	0	0	10550.6	5.2753	199.658	10750.3	0	0.04679	0.15321	1.29454	Analysis
01/07/2001	3704.84	0.747621	10242.9	5.12145	262.89	10505.9	0	0	0	0	0	0.046294	0.153707	1.294	Analysis
01/08/2001	3644.12	0.898204	10040.3	5.02015	295.946	10336.2	10242.9	5.12145	272.002	10514.9	0	0.045592	0.154408	1.29463	Analysis
01/09/2001	3597.54	1.04591	9882	4.941	333.599	10215.6	10040.3	5.02015	306.577	10346.9	0	0.044788	0.155212	1.29513	Analysis
01/10/2001	3558.67	1.1864	9749.03	4.87451	370.493	10119.5	9882	4.941	344.057	10226.1	0	0.043971	0.15603	1.29555	Analysis
01/11/2001	3523.36	1.32972	9629	4.8145	408.301	10037.3	9749.03	4.87451	381.221	10130.3	0	0.043105	0.156896	1.29595	Analysis
01/12/2001	3492.19	1.46671	9854.52	4.92726	459.672	10314.2	9629	4.8145	418.525	10047.5	0	0.042252	0.157749	1.2963	Analysis
01/01/2002	3459.44	1.61159	9748.39	4.87419	497.454	10245.8	9854.52	4.92726	470.469	10325	0	0.041352	0.158649	1.29668	Analysis
01/02/2002	3429.3	1.7549	9996.79	4.99839	553.741	10550.6	9748.39	4.87419	508.108	10256.5	0	0.040441	0.15956	1.29704	Analysis
01/03/2002	3400.92	1.88764	9555.48	4.78274	567.431	10132.9	9996.79	4.99839	563.558	10560.3	0	0.039605	0.160395	1.29738	Analysis
01/04/2002	3374.65	2.02827	9481	4.7405	603.233	10084.2	9555.48	4.78274	577.775	10143.3	0	0.038683	0.161208	1.2977	Analysis
01/05/2002	3350.11	2.16315	9334.84	4.66742	632.187	9967.03	9481	4.7405	612.983	10094	0	0.037793	0.162108	1.298	Analysis
01/06/2002	3326.19	2.30039	9280.33	4.63017	665.729	9926.06	9334.84	4.66742	641.956	9976.79	0	0.036878	0.163122	1.2983	Analysis
01/07/2002	3303.58	2.43213	9189.68	4.59484	697.096	9886.77	9280.33	4.63017	674.949	9935.28	0	0.035998	0.164002	1.29859	Analysis
01/08/2002	3280.71	2.56723	9119.03	4.55952	728.515	9847.55	9189.68	4.59484	706.401	9896.08	0	0.035095	0.164906	1.29889	Analysis
01/09/2002	3258.29	2.70129	9050.33	4.52517	758.944	9809.28	9119.03	4.55952	737.6	9856.63	0	0.034197	0.165804	1.29918	Analysis
01/10/2002	3236.95	2.83005	8984.19	4.4921	787.363	9771.56	9050.33	4.52517	767.533	9817.87	0	0.033334	0.166666	1.29946	Analysis
01/11/2002	3215.22	2.96213	8918.33	4.45917	815.894	9734.23	8984.19	4.4921	796.038	9780.23	0	0.032449	0.167551	1.29976	Analysis
01/12/2002	3194.48	3.09801	8855.48	4.27774	844.056	9695.54	8918.33	4.45917	824.099	9742.43	0	0.0316	0.168401	1.30004	Analysis
01/01/2003	3175.9	3.21479	8495.81	4.2479	840.025	9335.83	8855.48	4.27774	822.077	9377.56	0	0.030736	0.169264	1.3003	Analysis
01/02/2003	3157	3.33693	8437.14	4.21857	864.93	9302.07	8495.81	4.2479	847.794	9343.6	0	0.029895	0.170115	1.30056	Analysis
01/03/2003	3139.84	3.45172	8381.29	4.19065	886.247	9267.54	8437.14	4.21857	871.765	9308.91	0	0.029125	0.170875	1.30081	Analysis
01/04/2003	3120.79	3.57493	8321.33	4.16067	909.128	9230.46	8381.29	4.19065	893.638	9274.93	0	0.028294	0.171707	1.30108	Analysis
01/05/2003	3102.38	3.69332	8262.9	4.13145	930.354	9193.26	8321.33	4.16067	916.108	9237.44	0	0.027497	0.172503	1.30135	Analysis
01/06/2003	3083.39	3.8148	8000	4	927.931	9227.93	8262.9	4.13145	937.401	9200.3	0	0.026683	0.173318	1.30162	Analysis
01/07/2003	3065.78	3.93961	8000	4	953.843	8953.84	8000	4	934.448	8934.45	0	0.025907	0.174093	1.30187	Analysis
01/08/2003	3048.84	4.04622	8000	4	980.052	8980.05	8000	4	960.424	8960.42	0	0.025116	0.174884	1.30214	Analysis

Εικόνα 4.26: Υπολογισμοί πρόβλεψης για το χρονικό διάστημα ιστορικής παραγωγής.

Συγκρίνοντας τους κορεσμούς από την προσομοίωση και την πρόβλεψη, πραγματοποιείται ο έλεγχος ακρίβειας του μοντέλου πρόβλεψης, δηλαδή ελέγχεται αν η διόρθωση των παραμέτρων της εξίσωσης του Corey, που πραγματοποιήθηκε με τη διαδικασία ταύτισης της καμπύλης κλασματικών ροών F_w , είναι ορθή και επομένως υπολογίζονται σωστά οι σχετικές διαπερατότητες. Καθώς οι σχετικές διαπερατότητες συνδέονται άμεσα με τον κορεσμό, εάν ο υπολογισμός αυτών είναι σωστός, τότε οι τιμές κορεσμού της προσομοίωσης και της πρόβλεψης θα ταυτίζονται. Όπως φαίνεται στην (Εικόνα 4.27), το μοντέλο είναι έτοιμο για πρόβλεψη, αφού υπάρχει ταύτιση των παραπάνω τιμών, επομένως οι τιμές σχετικής διαπερατότητας που υπολογίζονται από την εξίσωση Corey είναι ακριβείς.

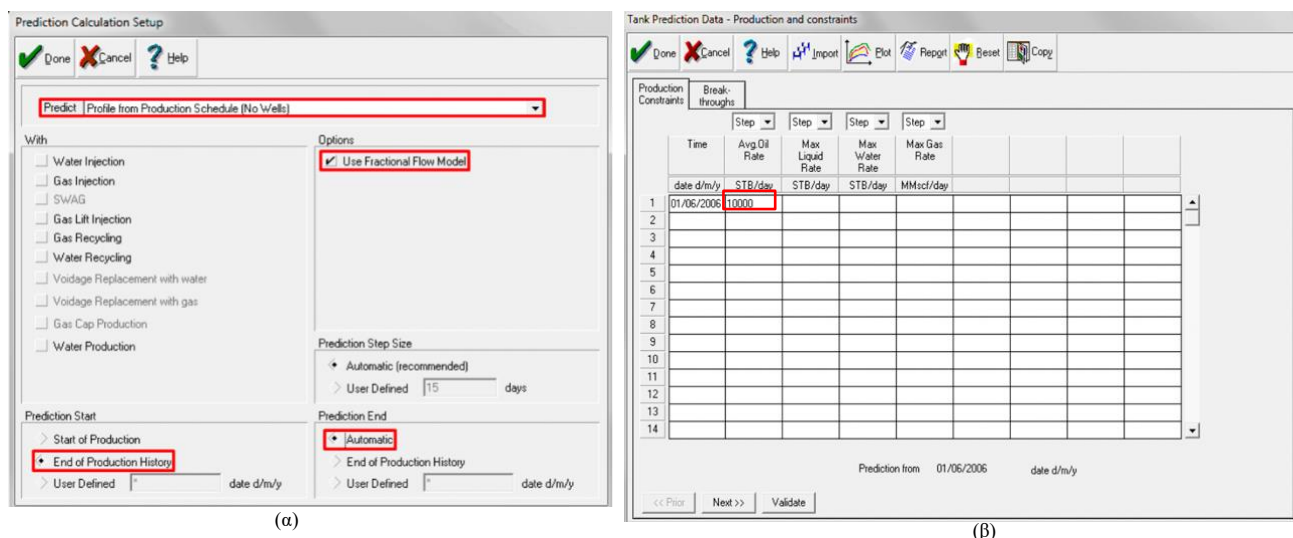


Εικόνα 4.27: Διάγραμμα κορεσμών από προσομοίωση και από πρόβλεψη.

4.3.1 Πρόβλεψη μελλοντικής παραγωγής (χωρίς μοντέλο γεώτρησης)

Στην παρούσα φάση πραγματοποιείται η πρόβλεψη της μελλοντικής παραγωγής που αποτελεί εξαρχής το ζητούμενο από την εφαρμογή της μεθόδου Ισοζυγίου μάζας. Για το λόγο αυτό επιλέγεται εκ νέου το *Production prediction>>Production setup>>Profile from production schedule (no well)*, το οποίο δεν περιλαμβάνει μοντέλο γεώτρησης, δηλαδή η παραγωγή γίνεται από μία μόνο γεώτρηση, όπως προαναφέρθηκε. Ορίζοντας στο λογισμικό τις επιλογές “End of production history” και “Automatic”, επιβάλλεται ως χρονικό διάστημα πρόβλεψης από το τέλος της περιόδου για την οποία υπάρχουν ιστορικά δεδομένα παραγωγής, μέχρι μια μελλοντική στιγμή που ορίζεται αυτόματα από το λογισμικό (Εικόνα 4.28α), ή

μπορεί να επιλεγεί από το χρήστη οποιαδήποτε ημερομηνία για τη λήξη της πρόβλεψης. Επιπλέον ο χρήστης μπορεί να ορίζει το ρυθμό παραγωγής βάσει του οποίου θα γίνει η προβλεψη της μελλοντικής παραγωγής, όπως φαίνεται στην (Εικόνα 4.28β). Δηλαδή ο χρήστης σε αυτό το σημείο μπορεί να ορίσει οποιοδήποτε πλάνο παραγωγής θεωρεί ότι μπορεί να υλοποιηθεί στο πεδίο.



Εικόνα 4.28: (α) Επιλογή μοντέλου και χρόνου πρόβλεψης, (β) εισαγωγή μέσου όρου παραγωγής ανά ημέρα.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, με το *Production prediction>>Reporting schedule>>Automatic*, ορίζεται αυτόματα το βήμα πρόβλεψης και αναφοράς από το λογισμικό ενώ και ο ίδιος ο χρήστης μπορεί να εισάγει τον επιθυμητό βηματισμό πρόβλεψης και αναφοράς. Τέλος επιλέγοντας *Production prediction>>Run Prediction>>Calc*, πραγματοποιούνται οι υπολογισμοί πρόβλεψης, οι οποίοι παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα της (Εικόνα 4.29). Από τη διαδικασία πρόβλεψης προκύπτει πως ο ταμειευτήρας μπορεί να υποστηρίξει την παραγωγή αυτή (10,000 STB/day), μόνο για μερικά χρόνια, δηλαδή έως το 2017. Στην (Εικόνα 4.29) φαίνονται τα αποτελέσματα μέχρι τις 20/2/14, ωστόσο μετακινώντας την μπάρα στα δεξιά κατά τη χρήση του λογισμικού, διαπιστώνεται πως η πρόβλεψη πραγματοποιείται έως 16/9/17 όπου η τιμή πίεσης του ταμειευτήρα που καταγράφεται είναι $P = 5 \text{ psig}$.

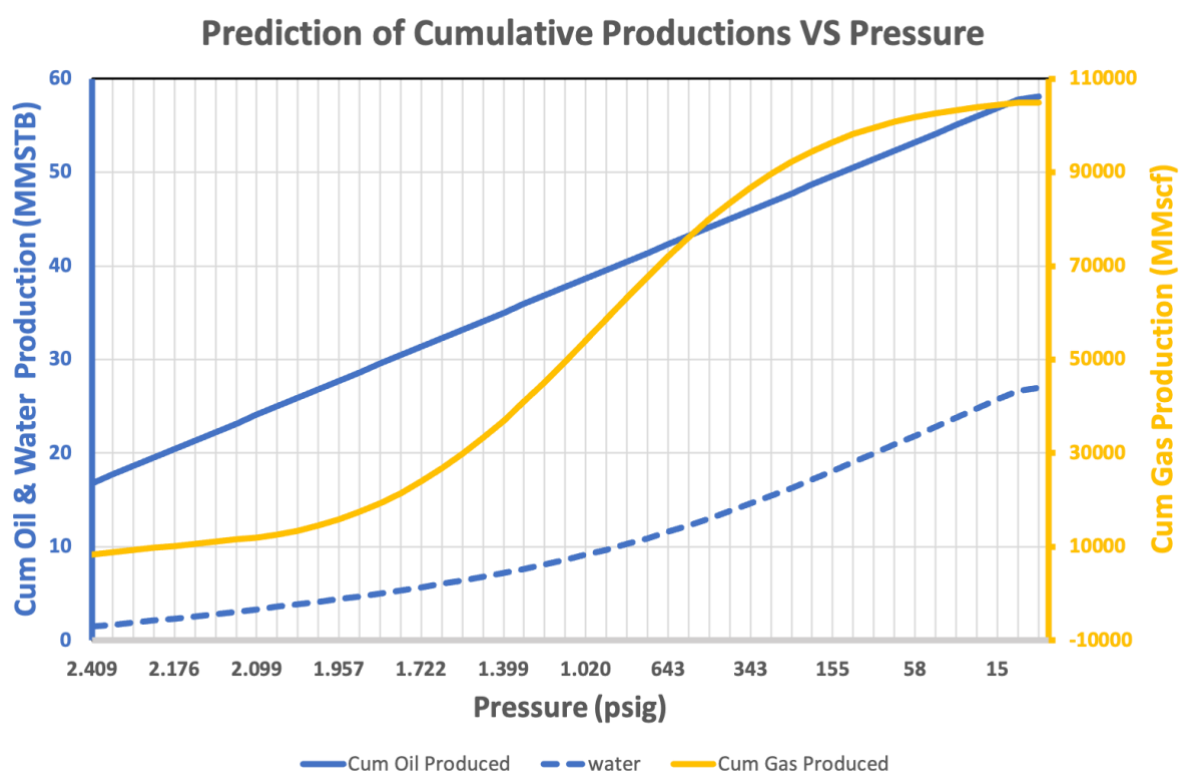
Εικόνα 4.29: Υπολογισμοί μελλοντικής πρόβλεψης στη βάση της παραγωγής των 10,000 stb/day.

4.3.1.1 Αποτελέσματα πρόβλεψης μελλοντικής παραγωγής

Στα διαγράμματα που προέκυψαν από την εφαρμογή της Material Balance Method με τη χρήση του λογισμικού MBal τα οποία παρουσιάζονται σε αυτή την ενότητα, απεικονίζονται τα εκτιμώμενα από την πρόβλεψη μεγέθη ως προς το χρόνο. Συγκεκριμένα ζητήθηκε από το λογισμικό να πραγματοποιήσει πρόβλεψη της μελλοντικής παραγωγής από την ημερομηνία 1/6/06 με αυτόματο τερματισμό από το λογισμικό (ο οποίος έγινε για την ημερομηνία 16/9/17). Ακόμα ζητήθηκε από το λογισμικό να πραγματοποιήσει πρόβλεψη της μελλοντικής παραγωγής, από τον ταμιευτήρα πετρελαίου, με μία γεώτρηση διατηρώντας ένα ρυθμό παραγωγής πετρελαίου 10,000 stb/day. Στην αρχή της συγκεκριμένης παραγωγής ο ταμιευτήρας παραμένει ακόρεστος σε πίεση περίπου 2,400 psig.

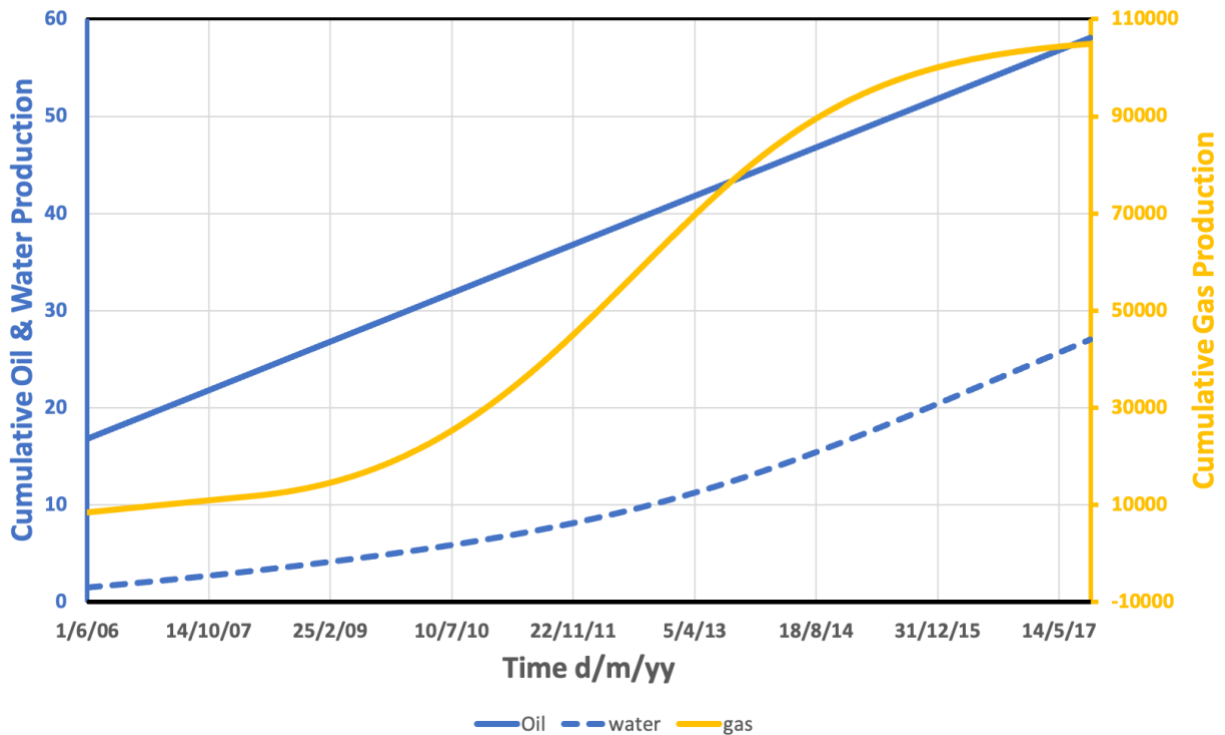
Η μέθοδος είναι ογκομετρική και η πρόβλεψη της μελλοντικής παραγωγής δίνει όγκους για διαστήματα πτώσης πίεσης. Η έννοια του χρόνου εισάγεται ορίζοντας την παροχή q , έτσι υπολογίζεται το χρονικό διάστημα που θα χρειαστεί για την πτώση πίεσης. Στο (Διάγραμμα 4-1) απεικονίζονται οι αθροιστικές παραγωγές κάθε φάσης ως προς την πίεση, ενώ στο (Διάγραμμα 4-2) απεικονίζονται οι προβλέψεις αθροιστικής παραγωγής για πετρέλαιο, αέριο και νερό (N_p , G_p , W_p), ως προς το χρόνο. Στο διάγραμμα φαίνεται πως υπάρχει μία απότομη

αύξηση του αθροιστικά παραγόμενου αερίου που υποδεικνύει πως ο ταμιευτήρας ξεκινάει να παράγει το ελεύθερο αέριο που έχει δημιουργηθεί στο εσωτερικό του καθώς η πίεση υποχώρησε κάτω από την πίεση κορεσμού (2,200psig). Ακόμα στο διάγραμμα φαίνεται πως η αθροιστική παραγωγή πετρελαίου έχει σταθερή κλίση, κάτι που είναι λογικό καθώς ο ρυθμός παραγωγής που ορίστηκε για την πρόβλεψη ήταν σταθερός (10,000 STB/day). Η βασική πληροφορία που πηγάζει από το παρόν διάγραμμα είναι οι όγκοι G_p και W_p , καθώς την παραγωγή πετρελαίου την έχει ορίσει ο χρήστης. Οι όγκοι αυτοί είναι χρήσιμη πληροφορία ώστε να μπορέσει να σχεδιαστεί η διαχείρισή τους.



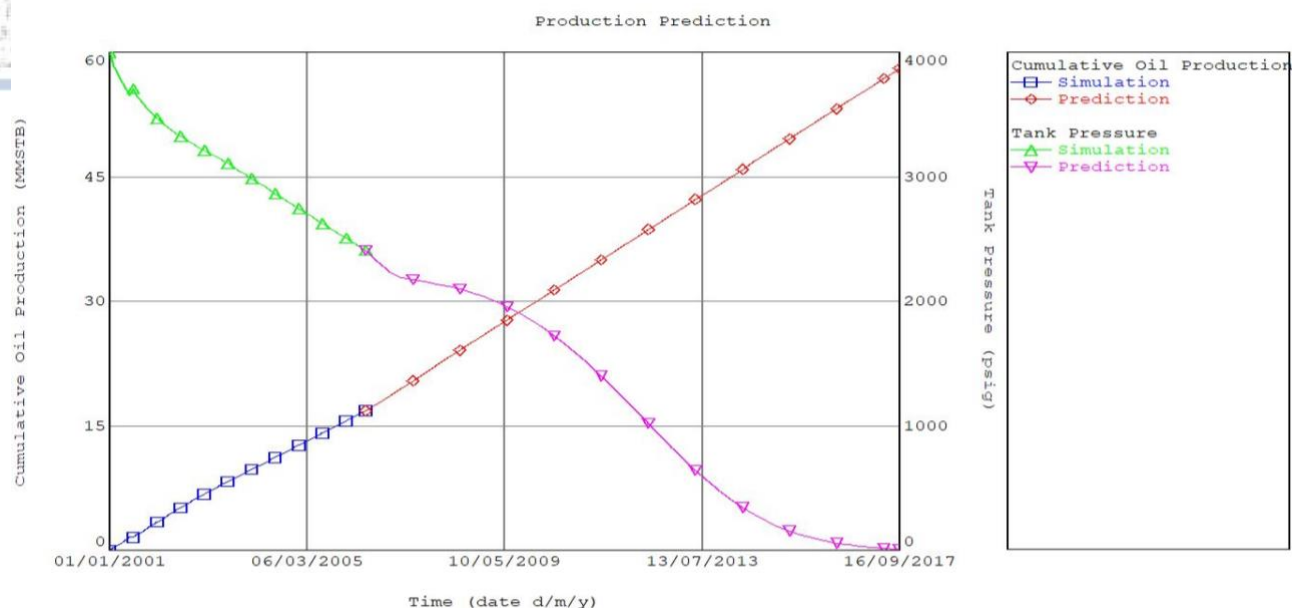
Διάγραμμα 4-1: Αθροιστικής παραγωγής N_p , G_p , και W_p ως προς το πίεση.

Prediction of Cumulative Productions VS Time



Διάγραμμα 4-2: Αθροιστικής παραγωγής N_p , G_p , και W_p ως προς το χρόνο.

Στο επόμενο (Διάγραμμα 4-3) απεικονίζεται η αθροιστική παραγωγή πετρελαίου σε σχέση με το χρόνο, καθώς και η πίεση σε σχέση με το χρόνο. Το συγκεκριμένο διάγραμμα έχει κατασκευαστεί με τη χρήση του λογισμικού MBal και απεικονίζει τα ιστορικά δεδομένα παραγωγής που υπολογίζονται από την προσομοίωση και τα δεδομένα μελλοντικής παραγωγής που υπολογίζονται από την πρόβλεψη. Το πρώτο τμήμα δεδομένων της πίεσης, που προκύπτουν από την προσομοίωση, είναι αυτά που χρησιμοποιήθηκαν για το history matching του μοντέλου και αντιστοιχεί σε πιέσεις πάνω από το σημείο φυσαλίδας (bubble point). Η προσομοίωση τερματίζεται λίγο πριν από το σημείο bubble point και αμέσως μετά ξεκινάει η πρόβλεψη. Έτσι το δεύτερο τμήμα δεδομένων της πίεσης, που προέρχεται από την πρόβλεψη, θα πέσει πολύ σύντομα κάτω από την πίεση του σημείου φυσαλίδας (bubble point pressure), όπου για λίγο μειώνεται ο ρυθμός πτώσης. Αυτό οφείλεται στο ελεύθερο αέριο που δημιουργείται στο εσωτερικό του ταμιευτήρα. Το ελεύθερο αέριο προκειμένου να αρχίσει να κινείται και να παράγεται, πρέπει να ξεπεράσει τον κρίσιμο κορεσμό του (2%), έτσι μέχρι εκείνη τη στιγμή το αέριο συσσωρεύεται με αποτέλεσμα να αντισταθμίζει την πτώση της πίεσης.

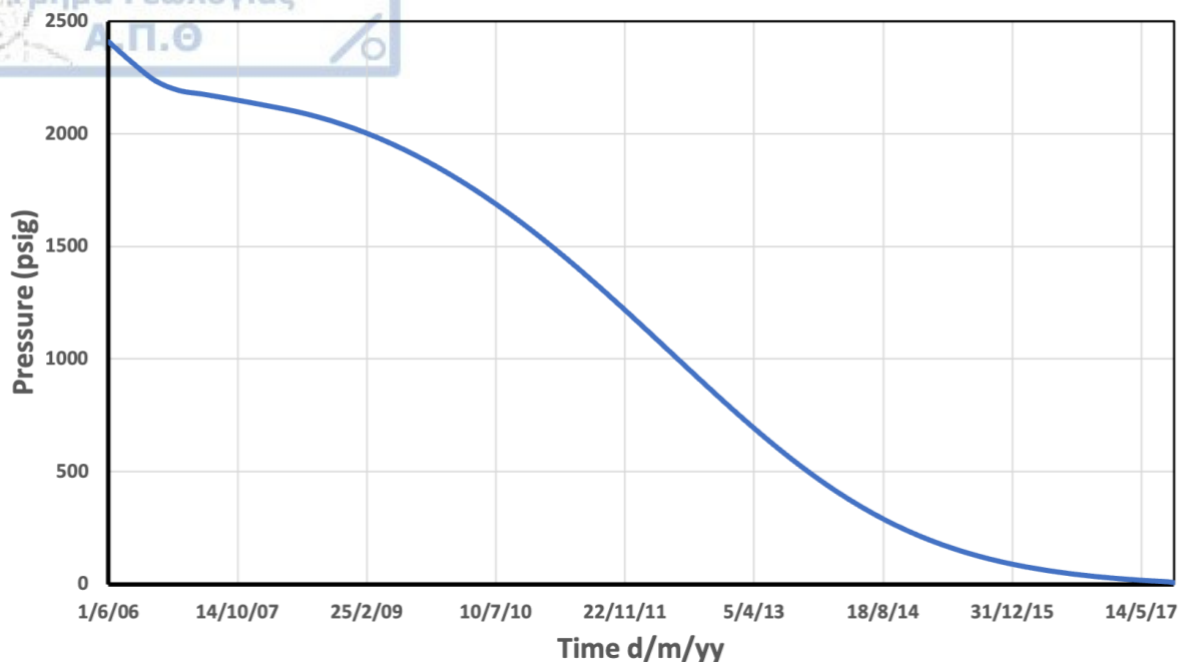


Διάγραμμα 4-3: Αθροιστικής παραγωγής N_p και πίεσης P ως προς το χρόνο, από τα δεδομένα προσομοίωσης και πρόβλεψης.

Σημειώνεται πως και στα δύο διαγράμματα, (Διάγραμμα 4-3 και Διάγραμμα 4-4), φαίνεται πως η παραγωγή συνεχίζεται μέχρι η πίεση ταμειυτήρα σχεδόν να μηδενιστεί. Αυτό είναι κάτι που δεν μπορεί να συμβεί στην πραγματικότητα και οφείλεται στην επιλογή **"Automatic"** που έγινε στο λογισμικό, για τη λήξη της περιόδου πρόβλεψης.

Στο (Διάγραμμα 4-4) απεικονίζονται τα δεδομένα πίεσης ως προς το χρόνο, μόνο από τα δεδομένα πρόβλεψης μελλοντικής παραγωγής, όπου παρατηρείται μια μείωση του ρυθμού πτώσης της πίεσης όταν φτάνει στο σημείο φυσαλίδας του ρευστού, όπου απελευθερώνεται αέριο το οποίο δεν κινείται ακόμα.

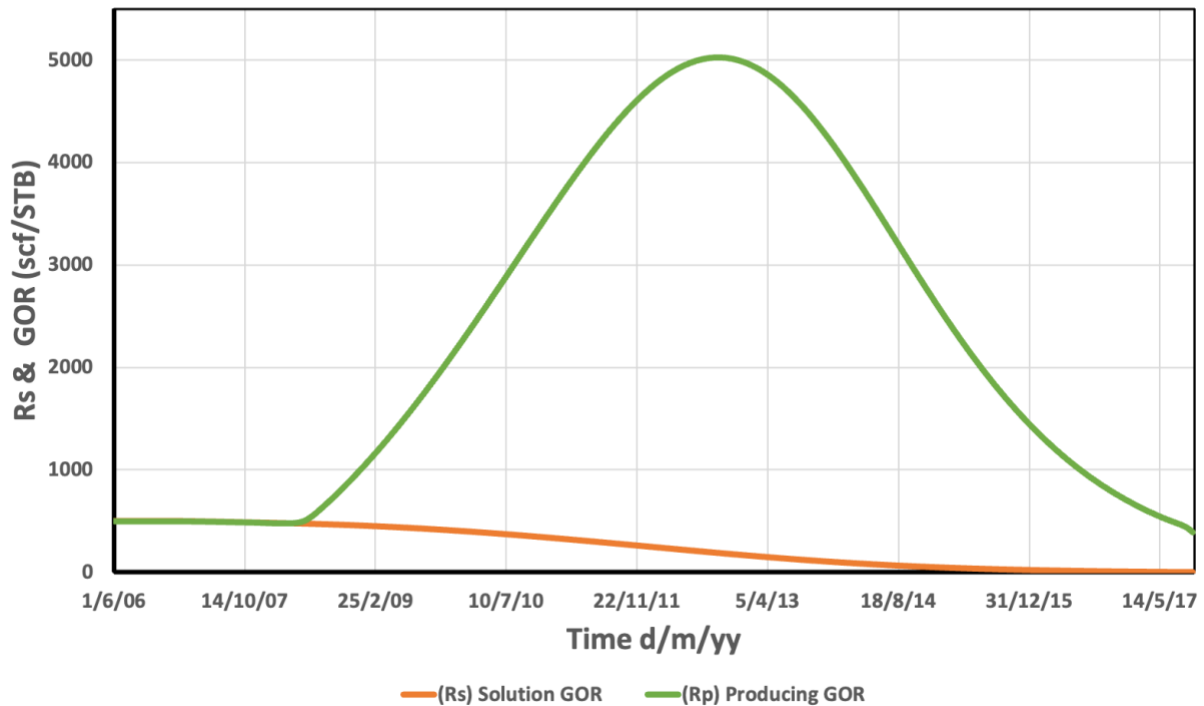
Prediction of Pressure VS Time



Διάγραμμα 4-4: Πίεσης P και χρόνου, από τα δεδομένα πρόβλεψης.

Στην (Διάγραμμα 4-5) απεικονίζεται το solution GOR (αέριο διαλυμένο στο πετρέλαιο) και το παραγόμενο GOR με το χρόνο. Στην προκειμένη περίπτωση οι παράμετροι αυτές ταυτίζονται και μέχρι το σημείο φυσαλίδας ισούνται με 500 scf/stb. Μετά το σημείο φυσαλίδας το GOR αρχικά μειώνεται λίγο, όπως φαίνεται στο σχήμα, ενώ στη συνέχεια αυξάνεται ραγδαία, έως περίπου τα 5,000 scf/stb. Η αύξηση των τιμών οφείλεται στο ότι το ελεύθερο αέριο μέσα στον ταμιευτήρα κάτω από την πίεση φυσαλίδας κινείται ταχύτερα από το πετρέλαιο εντός της γεώτρησης, με αποτέλεσμα αρχικά να παράγονται μεγάλες ποσότητες αερίου. Μετά από αυτό το σημείο το GOR μειώνεται έως ότου πλέον δεν έχει μεγάλη διαφορά με το solution GOR, δηλαδή το R_s , εφόσον παράγεται σχεδόν όλο το αέριο που έχει απελευθερωθεί στον ταμιευτήρα και απομένει μόνο το διαλυμένο στο εναπομείναν πετρέλαιο.

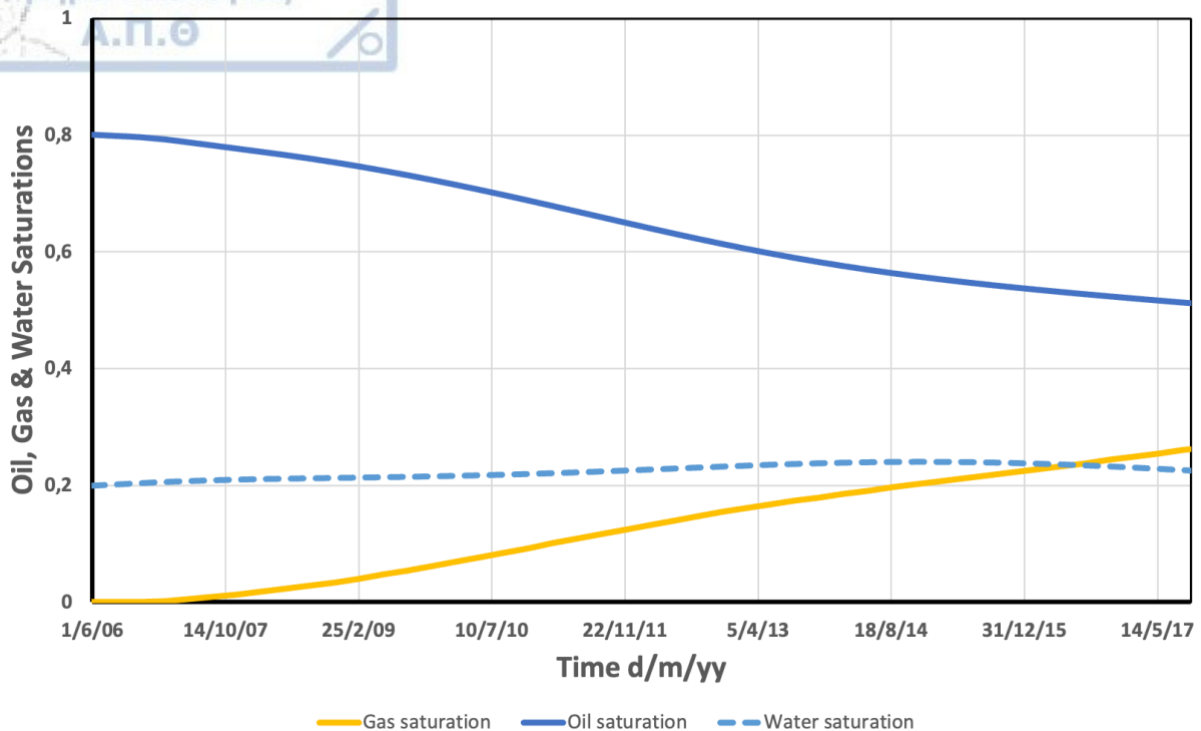
Prediction of Rs & Producing GOR VS Time



Διάγραμμα 4-5: Solution GOR και Produced GOR ως προς το χρόνο.

Στο παρόν (**Διάγραμμα 4-6**), απεικονίζονται οι κορεσμοί κάθε φάσης (πετρελαίου, νερού, αερίου) ως προς το χρόνο. Στο διάγραμμα φαίνεται πως μειώνεται ο κορεσμός σε πετρέλαιο, αυξάνεται ο κορεσμός σε αέριο, ενώ ο κορεσμός σε νερό δεν έχει μεγάλες αυξομειώσεις. Ακόμα το διάγραμμα αυτό επιβεβαιώνει όσα αναφέρθηκαν στα παραπάνω, για το πως επηρεάζει ο κρίσιμος κορεσμός αερίου τα υπόλοιπα μεγέθη.

Prediction of Saturations VS Time



Διάγραμμα 4-6: Κορεσμών πετρελαίου, αερίου και νερού ως προς το χρόνο.

Συγκεκριμένα φαίνεται πως στα μέσα του χρονικού διαστήματος από 1/6/06 ως 14/10/07, ξεκινάει να απελευθερώνεται αέριο, στο ίδιο χρονικό διάστημα σύμφωνα με το (Διάγραμμα 4-5) οι τιμές του διαγράμματος για το Solution GOR και Produced GOR έχουν ελαφρώς πτωτική τάση, ενώ στο (Διάγραμμα 4-4) φαίνεται η αλλαγή στην κλίση της πίεσης που υποδηλώνει το σημείο κορεσμού (bubble point). Ακόμα στο χρονικό διάστημα από 14/10/07 ως 25/2/09 ο κορεσμός αερίου φτάνει στο 2% όπου επιτρέπει στο απελευθερωμένο αέριο να κινηθεί. Για το ίδιο χρονικό διάστημα στο (Διάγραμμα 4-5) οι τιμές για το Solution GOR και Produced GOR ξεκινούν να διαφοροποιούνται, με ραγδαία αύξηση του Produced GOR και σταδιακή μείωση του Solution GOR. Ενώ στο (Διάγραμμα 4-4) φαίνεται πως ο ρυθμός πτώσης πίεσης αρχίζει να αυξάνεται.

Στη παρούσα διπλωματική εργασία αναλύθηκε η Μέθοδος Ισοζυγίου Μάζας (Material balance method) και τα εργαλεία που αυτή αξιοποιεί. Αναπτύχθηκε η μεθοδολογία εφαρμογής της μεθόδου και στο πλαίσιο αυτό πραγματοποιήθηκε μελέτη περίπτωσης εφαρμογής της μεθόδου, για ταμιευτήρα πετρελαίου, με τη χρήση του λογισμικού MBal. Τα βασικά συμπεράσματα που προέκυψαν παρουσιάζονται παρακάτω.

Αρχικά, η μεθοδολογία (workflow) που αναπτύχθηκε, για την εφαρμογή της Μεθόδου Ισοζυγίου Μάζας, μέσω της αρχής δοκιμής και σφάλματος που εφαρμόζεται προκειμένου να πραγματοποιηθεί το history matching του μοντέλου, επιτρέπει την καλύτερη δυνατή εκτίμηση των χαρακτηριστικών του ταμιευτήρα και των υπολογισμό των βέλτιστων τιμών των αρχικών γεωλογικών εκτιμήσεων. Καθώς ακόμα μέσω εφαρμογής της διαδικασίας πρόβλεψης υπό διαφορετικά σενάρια, επιτρέπει την επιλογή του βέλτιστου σεναρίου παραγωγής.

Η μεθοδολογία (workflow) που αναπτύχθηκε, όπως φαίνεται και στη μελέτη περίπτωσης (case-study), εφαρμόστηκε στο λογισμικό MBal για την εκτίμηση και την πρόβλεψη μελλοντικής παραγωγής. Το λογισμικό δίνει τη δυνατότητα μελέτης διάφορων σεναρίων, όπως για παράδειγμα διαφορετικούς ρυθμούς ροής παραγωγής ή παραγωγή από πολλές γεωτρήσεις με βασικό στόχο την βελτιστοποίηση της παραγωγής.

Ως προς την ακρίβεια την μεθόδου, η μέθοδος ισοζυγίου μάζας αποτελεί απλή μέθοδο προσομοίωσης ενός ταμιευτήρα υδρογονανθράκων και πρόβλεψης της μελλοντικής απόδοσης του. Παράλληλα αποτελεί τη μέθοδο με το μικρότερο ρίσκο και τις λιγότερες απαιτήσεις σε λεπτομερή γνώση δεδομένων, καθώς για την εφαρμογή της απαιτούνται μόνο ιστορικά δεδομένα παραγωγής, απλές μετρήσεις πεδίου και εκτιμήσεις από γεωλόγους για τον κορεσμό, τον υδροφορέα και τα αποθέματα. Το γεγονός αυτό καθιστά υπολογιστικά πολύ πιο οικονομική τη Μέθοδο Ισοζυγίου Μάζας (Material balance method), σε σύγκριση με τις υπόλοιπες μεθόδους μελέτης ταμιευτήρων.

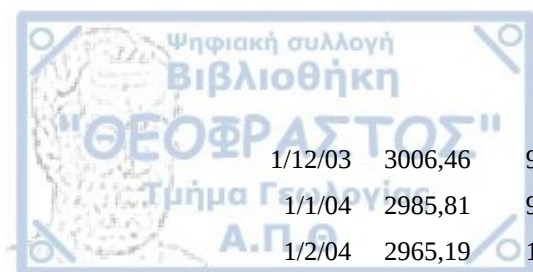
Η εφαρμογή της μεθόδου πραγματοποιείται αξιοποιώντας εργαλεία τα οποία μετατρέπουν τα παραπάνω απλά μεγέθη σε χρήσιμα δεδομένα, ώστε να υλοποιηθούν οι δύο φάσεις εφαρμογής της Μεθόδου Ισοζυγίου Μάζας, δηλαδή η εκτίμηση και η πρόβλεψη. Συνεπώς, η ακρίβεια της Μεθόδου Ισοζυγίου Μάζας εξαρτάται άμεσα από την ποιότητα των δεδομένων, από την ακρίβεια των επιμέρους εργαλείων που αξιοποιούνται, αλλά και από τις παραδοχές που θέτει η μέθοδος για τον ταμιευτήρα (ενιαία δεξαμενή, σταθερή θερμοκρασία, ενιαία πίεση σε όλο το εύρος του, κ.α.), που αποτελούν πηγές σφάλματος.

Ειδικότερα, η ποιότητα των δεδομένων, αφορά τις καταγραφές που γίνονται στο πεδίο όπως η αθροιστική παραγωγή κάθε φάσης, η μέση πίεση του ταμειυτήρα αλλά και άλλα δεδομένα πεδίου όπως η πυκνότητα, το ειδικό βάρος κ.α. Παρόλο που τις περισσότερες φορές οι καταγραφές αθροιστικής παραγωγής μπορούν να θεωρηθούν αρκετά αξιόπιστες, σε περιπτώσεις όπου η παραγωγή πραγματοποιείται από περισσότερα του ενός κοιτάσματα, η ακρίβεια των μετρήσεων είναι επισφαλής. Αυτό συμβαίνει καθώς οι μετρήσεις παραγωγής κάθε φάσης, συνήθως, γίνονται ενιαία για όλα τα κοιτάσματα και εισάγονται σαν ενιαίο μέγεθος στην εξίσωση Ισοζυγίου Μάζας (MBE), κατά την εφαρμογή της μεθόδου. Αντίστοιχα, οι υπόλοιπες μετρήσεις πεδίου, αξιοποιούνται από τις συσχετίσεις (Correlations) για τον υπολογισμό των PVT δεδομένων. Ωστόσο αυτές οι υπολογιστικές μέθοδοι, μπορεί να έχουν αρκετές αποκλίσεις στους υπολογισμούς τους.

Οι παράμετροι που επενεργούν θετικά ως προς την ακρίβεια της μεθόδου, είναι το μεγάλο εύρος για το οποίο υπάρχουν ιστορικά δεδομένα παραγωγής, για περιπτώσεις παραγωγής από ένα κοιτάσμα καθώς και η χρήση ενδεικτικών πειραματικών μετρήσεων των PVT (που έχουν πραγματοποιηθεί σε περιορισμένο εύρος πιέσεων), με σκοπό τη ρύθμιση των συσχετίσεων (Correlations), που υπολογίζουν PVT δεδομένα σε οποιαδήποτε πίεση.

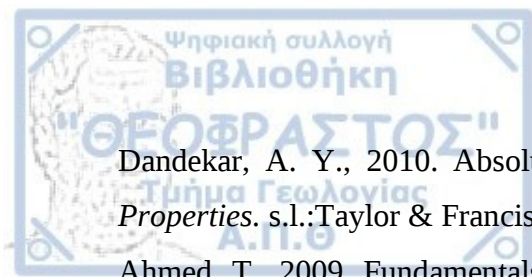
Η πρόοδος της τεχνολογίας έχει δώσει τη δυνατότητα εφαρμογής της μεθόδου μέσω της χρήσης υπολογιστών. Το λογισμικό MBal εφαρμόζει τη Μέθοδο Ισοζυγίου Μάζας για την εκτίμηση της κατάστασης του ταμειυτήρα και για την πρόβλεψη μελλοντικής παραγωγής. Η χρήση του MBal επενεργεί θετικά στην ακρίβεια της μεθόδου, καθώς μέσω της παλινδρόμησης (Regression) που εκτελεί, διορθώνει τις λιγότερο αξιόπιστες τιμές του μοντέλου, που αφορούν τις εκτιμήσεις είτε για τον ταμειυτήρα υδρογονανθράκων, είτε για τον υδροφορέα (εάν υπάρχει). Ενώ η διαδικασία του Regression χωρίς χρήση ηλεκτρονικών υπολογιστών είναι ιδιαίτερα περίπλοκη.

Date	Pressure psig	Cum Oil MMSTB	Cum Gas MMscf	Cum Wat MMSTB
1/1/01	4000	0	0	0
1/2/01	3885,64	0,356222	178,111	0
1/3/01	3836,75	0,586151	293,075	0
1/4/01	3762,57	0,927019	463,509	0
1/5/01	3705,21	1,24942	624,708	0
1/6/01	3655,34	1,57649	788,245	0
1/7/01	3707,56	1,57649	788,245	0
1/8/01	3647,76	1,89402	947,012	0
1/9/01	3602,54	2,20527	1102,63	0
1/10/01	3565,38	2,50173	1250,87	0
1/11/01	3531,51	2,80395	1401,98	0
1/12/01	3502,16	3,09282	1546,41	0
1/1/02	3471,13	3,39831	1699,16	0
1/2/02	3442,89	3,70051	1850,25	0
1/3/02	3418,26	3,98042	1990,21	0
1/4/02	3393,39	4,27695	2138,47	0
1/5/02	3370,5	4,56138	2280,69	0
1/6/02	3348,37	4,85076	2425,38	0
1/7/02	3327,59	5,12857	2564,29	0
1/8/02	3306,68	5,41345	2706,73	0
1/9/02	3286,27	5,69614	2848,07	0
1/10/02	3266,93	5,96765	2983,83	0
1/11/02	3247,3	6,24616	3123,08	0
1/12/02	3228,61	6,51371	3256,86	0
1/1/03	3212,06	6,77893	3389,46	0
1/2/03	3195,21	7,0423	3521,15	0
1/3/03	3179,94	7,27854	3639,27	0
1/4/03	3163	7,53836	3769,18	0
1/5/03	3146,66	7,788	3894	0
1/6/03	3129,82	8,04415	4022,07	0
1/7/03	3109,13	8,28415	4142,07	0,028936
1/8/03	3088,14	8,53215	4266,07	0,059586
1/9/03	3067,3	8,78015	4390,07	0,091
1/10/03	3047,2	9,02015	4510,07	0,122132
1/11/03	3026,48	9,26815	4634,07	0,15504



1/12/03	3006,46	9,50815	4754,07	0,18761
1/1/04	2985,81	9,75615	4878,07	0,221995
1/2/04	2965,19	10,0041	5002,07	0,257123
1/3/04	2946,59	10,2281	5114,07	0,289503
1/4/04	2926,01	10,4761	5238,07	0,326034
1/5/04	2906,12	10,7161	5358,07	0,362088
1/6/04	2885,58	10,9642	5482,07	0,400052
1/7/04	2865,73	11,2042	5602,07	0,437484
1/8/04	2845,24	11,4521	5726,07	0,476864
1/9/04	2824,77	11,7001	5850,07	0,516957
1/10/04	2804,98	11,9401	5970,07	0,556438
1/11/04	2784,55	12,1882	6094,07	0,597924
1/12/04	2764,81	12,4281	6214,07	0,638744
1/1/05	2744,42	12,6761	6338,07	0,681605
1/2/05	2724,07	12,9241	6462,07	0,725159
1/3/05	2705,7	13,1481	6574,07	0,765106
1/4/05	2685,39	13,3961	6698,07	0,809969
1/5/05	2665,76	13,6361	6818,07	0,854039
1/6/05	2645,5	13,8841	6942,07	0,900239
1/7/05	2625,93	14,1242	7062,07	0,945597
1/8/05	2605,73	14,3721	7186,07	0,993121
1/9/05	2585,56	14,6201	7310,07	1,04131
1/10/05	2566,08	14,8601	7430,07	1,08858
1/11/05	2545,98	15,1082	7554,07	1,13808
1/12/05	2526,57	15,3481	7674,07	1,1866
1/1/06	2506,54	15,5961	7798,07	1,23738
1/2/06	2486,55	15,8441	7922,07	1,28881
1/3/06	2467,89	16,0761	8038,07	1,33751
1/4/06	2447,98	16,3241	8162,07	1,39019
1/5/06	2428,75	16,5641	8282,07	1,44177
1/6/06	2408,92	16,8121	8406,07	1,4957

- Ahmed, T. & Meehan, N. D., 2012. Performance of Oil Reservoir. In: *Advanced Reservoir Managment and Engineering*. s.l.:<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385548-0.00004-X>, pp. 433-483.
- Okotie, S. & Ikporo, B., 2018. Material Balance. In: *Reservoir Engineering: Fundamentals and applications*. s.l.:s.n., pp. 173-243.
- Tarek, A., 2016. PVT Properties of Crude Oils. In: *Equations of State and PVT Analysis - Applications for Improved Reservoir Modeling*. s.l.:Gulf Professional Publishing, pp. 239-466.
- Gaganis, V., Kourlianski, E. & Varotsis, N., 2017. An accurate method to generate composite PVT data for black oil simulation. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Volume 157, pp. 1-13.
- El-hoshoudy, A. N., 2019. PVT PROPERTIES OF BLACK CRUDE OIL-A REVIEW. *Petroleum and Coal*.
- Danesh, A., 1998. PVT Tests and Correlations. In: *PVT and Phase Behaviour of Petroleum Reservoir Fluids*. s.l.:Elsevier Science, p. 33–104.
- Elsharkawy, A. M., Elgibaly, A. A. & Alikhan, A. A., 1995. Assessment of the PVT correlations for predicting the properties of Kuwaiti crude oils. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Volume 13, pp. 219-232.
- El-Banbi, A., Alzahabi, A. & El-Maraghi, A., 2018. Intriduction. In: *RVT Proprty Correlations Selection and Estimation*. s.l.:Gulf Profrssional Publishing, pp. 1-11.
- Tarek, A., 2018. Vapor-Liquid Phase Equilibria. In: *Reservoir Engineering Handbook*. s.l.:Elsevier Science, pp. 1109-1222.
- Tarek, A., 2018. Water Influx. In: *Reservoir Engineering Handbook*. s.l.:Elsevier Science, pp. 663-750.
- Petroleum Experts, 2018. *USER MANUAL*. Version 14 ed. Edinburgh: Petroleum Experts Limited.
- Corey, A. T., 1954. The interrelationship between gas and oil relative permeabilities. *Prod. Mon.*, Volume 19, pp. 38-41.
- Dake, L. P., 1978. Material Balance Applied to Oil Reservoirs. In: *Fundamentals of Reservoir Engineering*. s.l.:[doi:10.1016/s0376-7361\(08\)70009-8](https://doi.org/10.1016/s0376-7361(08)70009-8) , pp. 73-102.
- Havlena, D. & Odeh, A., 1963. The material balance as an equation of a straight line. *J. Pet. Technol*, p. 896–900.



Dandekar, A. Y., 2010. Absolute Permeability. In: *Petroleum Reservoir Rock and Fluid Properties*. s.l.:Taylor & Francis Group, pp. 37-66.

Ahmed, T., 2009. Fundamentals of Rock Properties. In: *Working Guide to Reservoir Rock Properties and Fluid Flow*. s.l.:Elsevier Science, pp. 32-115.

Koederitz, L., Honarpour, M. M. & Harvey, A. H., 2018. FACTORS AFFECTING TWO-PHASE RELATIVE PERMEABILITY. In: *Relative Permeability of Petroleum Reservoirs*. s.l.:CRC Press, pp. 45-97.

Ahmed, T., 2019. Gas Reservoirs Chapter 13. In: *Reservoir Engineering Handbook*. s.l.:Gulf Professional Publishing, pp. 855-900.

Ελληνική Βιβλιογραφία

Σταμάτακη, Σ., χ.χ. Κεφάλαιο 8, Ανάλυση Απόδοσης Ταμιευτήρα. Στο: *Σημειώσεις μαθήματος Μηχανικής Πετρελαίων*. Αθήνα: Τμήμα Μεταλλειολόγων Μηχανικών, NTUA, pp. 94-116.

Διαδικτυακές πηγές

Anon., 2020. *IHS Markit*. [Online] Available at:

https://www.ihsenergy.ca/support/documentation_ca/Harmony_Enterprise/2019_3/content/html_files/ref_materials/analysis_method_theory/material_balance_analysis_theory.htm