



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ

**‘ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΡΟΗΣ ΣΕ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΕΣ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ
ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ ΜΑΖΑΣ’**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΛΙΑΚΟΥ ΜΑΡΙΑ

Επιβλέπων : Γαγάνης Βασίλειος, επίκουρος καθηγητής ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ , ΙΟΥΛΙΟΣ 2023



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ

**‘ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΡΟΗΣ ΣΕ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΕΣ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ
ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ ΜΑΖΑΣ’**

Διπλωματική εργασία

ΛΙΑΚΟΥ ΜΑΡΙΑ

Επιβλέπων : Γαγάνης Βασίλειος, επίκουρος καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή

Γαγάνης Βασίλειος, επίκουρος καθηγητής ΕΜΠ

Σταματάκη Σοφία, καθηγήτρια ΕΜΠ

Αποστολόπουλος Γεώργιος, καθηγητής ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2023

Copyright © Ονοματεπώνυμο συγγραφέα, έτος

Με επιφύλαξη κάθε δικαιώματος. All rights reserved.

Περίληψη

Η Μηχανική Ταμιευτήρων αποτελεί τον κλάδο της Μηχανικής Πετρελαίου που μελετά τη ροή των πετρελαϊκών ρευστών στο εσωτερικό ενός υπόγειου πορώδους σχηματισμού δηλαδή του ταμιευτήρα και αποσκοπεί στη βελτιστοποίηση της ανάκτησης υδρογονανθράκων.

Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας, είναι η ανάλυση της Μεθόδου Ισοζυγίου Μάζας σε ταμιευτήρες πετρελαίου και η διαδικασία εφαρμογής της, με τη χρήση του βιομηχανικού λογισμικού Material Balance (Mbal) της IPM suite.

Ειδικότερα, παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των υδρογονανθράκων εντός του ταμιευτήρα αλλά και για τις ιδιότητές του. Ταυτόχρονα, αναπτύσσονται μέθοδοι οι οποίες αφορούν τόσο την εκτίμηση των αβέβαιων παραμέτρων του ταμιευτήρα όσο και την πρόβλεψη της μελλοντικής παραγωγής. Οι μέθοδοι που αναφέρονται είναι δύο. Η πρώτη αφορά την εκτίμηση της κατάστασης του ταμιευτήρα για την οποία χρησιμοποιούνται ιστορικά δεδομένα παραγωγής, δεδομένα PVT και εκτιμήσεις για αποθέματα και ύπαρξη υδροφόρου. Η δεύτερη αφορά την πρόβλεψη μελλοντικής παραγωγής. Για την ανάλυση των προαναφερθέντων χρησιμοποιείται το λογισμικό Mbal. Έχει ιδιαίτερη σημασία να αναφερθεί, ότι παρουσιάζονται λεπτομερώς και αναλύονται δύο μελέτες περιπτώσεις με τη χρήση του λογισμικού Mbal.

Έτσι, είναι δόκιμο να ειπωθεί ότι η Μέθοδος Ισοζυγίου Μάζας είναι μια υπολογιστικά απλή μέθοδος με χαμηλές απαιτήσεις σε όγκο δεδομένων αλλά αρκεί τα δεδομένα να είναι αξιόπιστα. Είναι οικονομική σε σύγκριση με τις υπόλοιπες παρέχοντας ικανοποιητικά αποτελέσματα. Τέλος, εξυπηρετεί στη βελτιστοποίηση της διαχείρισης ενός ταμιευτήρα υδρογονανθράκων στο μέλλον.

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.

The purpose of this thesis is the analysis of the Mass Balance Method in oil reservoirs and the process of applying the method using the Mbal industrial software of the IPM suite.

In particular, the characteristics of the hydrocarbons inside the reservoir and its properties are presented. At the same time, methods are being developed which concern both the estimation of the uncertain parameters of the reservoir and the prediction of future production. There are two methods mentioned. The first concerns the reservoir condition assessment for which historical production data, PVT data and estimates of reserves and aquifer existence are used. The second concerns the forecast of future production. Mbal software is used for the analysis of the aforementioned. It is particularly important to mention that two case studies using the Mbal software are presented and analyzed in detail.

Thus, it is fair to say that the Mass Balance Method is a computationally simple method with low data volume requirements but if the data is reliable. It is economical compared to the rest providing satisfactory results. Finally, it serves to optimize the management of a hydrocarbon reservoir in the future.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1.1 : Ταμιευτήρας υδρογονανθράκων

Εικόνα 1.2 : Ρύθμιση συσχετίσεων

Εικόνα 1.3 : Διάγραμμα σχετικών διαπερατοτήτων πετρελαίου (k_{ro}) και νερού (k_{rw}) προς τους αντίστοιχους κορεσμούς

Εικόνα 2.1 : Διάγραμμα F-E_o, για ακόρεστο ογκομετρικό ταμιευτήρα

Εικόνα 2.2 : Διάγραμμα F/E_o – E_g/E_o για κορεσμένο ογκομετρικό ταμιευτήρα

Εικόνα 2.3 : Διάγραμμα Campbell, επιβεβαιώνει ότι δεν υπάρχει υδροφόρος (ογκομετρικός ταμιευτήρας)

Εικόνα 2.4 : Διάγραμμα Energy Plot, περιγράφει τη συμμετοχή του κάθε μηχανισμού παραγωγής ως προς τον χρόνο

Εικόνα 2.5 : Βοηθητικό διάγραμμα, απεικόνιση του GOR με τον χρόνο

Εικόνα 3.1 : Εισαγωγή επιλογών για το ρευστό του ταμιευτήρα (πετρέλαιο) και χρήσης του Black Oil Model

Εικόνα 3.2 : Εισαγωγή δεδομένων που αφορά τις ιδιότητες του ρευστού

Εικόνα 3.3 : Εισαγωγή δεδομένων που αφορά τις ιδιότητες του ρευστού με χρήση συσχετίσεων

Εικόνα 3.4 : Εισαγωγή δεδομένων που αφορούν τις ιδιότητες του ρευστού

Εικόνα 3.5 : Εισαγωγή δεδομένων που αφορά τις ιδιότητες του ρευστού με χρήση πινάκων

Εικόνα 3.6 : Εισαγωγή παραμέτρων που αφορούν τον ταμιευτήρα

Εικόνα 3.7 : Εισαγωγή μοντέλου υδροφορέα αν υπάρχει

Εικόνα 3.8 : Εισαγωγή σχετικών διαπερατοτήτων

Εικόνα 3.9 : Εισαγωγή ιστορικών δεδομένων παραγωγής

Εικόνα 3.10 : Διάγραμμα Energy Plot

Εικόνα 3.11 : Διάγραμμα Campbell, δείχνει την ύπαρξη υδροφόρου

Εικόνα 3.12 : Αναλυτικό διάγραμμα, πραγματικά ιστορικά δεδομένα παραγωγής και δεδομένα μοντέλου

Εικόνα 3.13 : Διορθωμένο διάγραμμα Energy Plot, ως προς την ύπαρξη υδροφορέα

Εικόνα 3.14 : Διορθωμένο διάγραμμα Campbell, ως προς την ύπαρξη υδροφορέα

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

Εικόνα 3.16 : Διάγραμμα συνάρτησης υδροφορέα με τον χρόνο

Εικόνα 3.17 : Διαδικασία παλινδρόμησης

Εικόνα 3.18 : Διαδικασία παλινδρόμησης – υπολογισμός τιμών

Εικόνα 3.19 : Διαδικασία παλινδρόμησης – αποδοχή τιμών

Εικόνα 3.20 : Διάγραμμα Energy Plot μετά την παλινδρόμηση

Εικόνα 3.21 : Διάγραμμα Campbell μετά την παλινδρόμηση

Εικόνα 3.22 : Αναλυτικό διάγραμμα μετά την παλινδρόμηση

Εικόνα 3.23 : Διάγραμμα πίεσης – χρόνου, απεικόνιση προσομοίωσης

Εικόνα 3.24 : Διάγραμμα κλασματικής ροής και κορεσμού

Εικόνα 3.25 : Τιμές σχετικών διαπερατοτήτων με τη μέθοδο Corey πριν την παλινδρόμηση

Εικόνα 3.26 : Τιμές σχετικών διαπερατοτήτων με τη μέθοδο Corey μετά την παλινδρόμηση

Εικόνα 3.27 : Επιλογή μοντέλου πρόβλεψης και χρονικού διαστήματος

Εικόνα 3.28 : Τιμές μέσου όρου ροής πετρελαίου ανά ημέρα

Εικόνα 3.29 : Τιμές κορεσμού σε νερό και αέριο

Εικόνα 3.30 : Επιλογή συχνότητας πρόβλεψης

Εικόνα 4.1 : Διάγραμμα πίεσης (psi) – χρόνου για τα ιστορικά δεδομένα (date d/m/y)

Εικόνα 4.2 : Διάγραμμα αθροιστικής παραγωγής πετρελαίου (bbl) – χρόνου (date d/m/y)

Εικόνα 4.3 : Διάγραμμα αθροιστικής παραγωγής αερίου (ft³) – χρόνου (date d/m/y)

Εικόνα 4.4 : Διάγραμμα αθροιστικής παραγωγής νερού (bbl) – χρόνος (date d/m/y)

Εικόνα 4.5 : Εισαγωγή επιλογών για το ρευστό του ταμιευτήρα και χρήσης του Μοντέλου Μαύρου Πετρελαίου (Black oil model)

Εικόνα 4.6 : Εισαγωγή δεδομένων που αφορούν τις ιδιότητες του ρευστού

Εικόνα 4.7 : Εισαγωγή δεδομένων που αφορούν τις ιδιότητες του ρευστού

Εικόνα 4.8 : Εισαγωγή δεδομένων που αφορούν τις ιδιότητες του ρευστού

Εικόνα 4.9 : Παράμετροι όλων των διαθέσιμων συσχετίσεων για τις ογκομετρικές ιδιότητες

Εικόνα 4.10 : Παράμετροι όλων των διαθέσιμων συσχετίσεων για το ιξώδες

Εικόνα 4.11 : Εισαγωγή βασικών δεδομένων ταμιευτήρα

Εικόνα 4.12 : Μοντέλο υδροφορέα δεν εισάγεται

Εικόνα 4.13 : Εισαγωγή σχετικών διαπερατοτήτων

Εικόνα 4.14 : Διάγραμμα σχετικής διαπερατότητας - κορεσμού

Εικόνα 4.15 : Εισαγωγή ιστορικών δεδομένων παραγωγής

Εικόνα 4.16 : Εισαγωγή ιστορικών δεδομένων παραγωγής με υπολογισμό του GOR

Εικόνα 4.17 : Βοηθητικό διάγραμμα GOR-t και R_s-t

Εικόνα 4.18 : Τιμές πίεσης μεγαλύτερες της πίεσης κορεσμού που προέκυψαν από το εργαστηριακό πείραμα CCE

- Εικόνα 4.19** : Υπολογισμένες τιμές B_o για $P > 1,331.7$ psi
- Εικόνα 4.20** : Διάγραμμα πίεσης (psi) – ογκομετρικός συντελεστής πετρελαίου (rb/stb) για $P > 1,331.7$ psi
- Εικόνα 4.21** : Εισαγωγή δεδομένων που αφορούν τις ιδιότητες του ρευστού
- Εικόνα 4.22** : Εισαγωγή δεδομένων που αφορούν τις ιδιότητες του ρευστού (συνέχεια της Εικόνας 4.21)
- Εικόνα 4.23** : Βοηθητικό διάγραμμα GOR – t και R-t
- Εικόνα 4.24** : Τιμές B_o και R_s διορθωμένες κατά Dake
- Εικόνα 4.25** : Διάγραμμα πίεσης (psi) – ογκομετρικός συντελεστής πετρελαίου διορθωμένου κατά Dake και μη (rb/stb)
- Εικόνα 4.26** : Διάγραμμα πίεσης (psi) – λόγου αερίου προς πετρέλαιο σε συνθήκες επιφάνειας διορθωμένο κατά Dake και μη (scf/stb)
- Εικόνα 4.27** : Εισαγωγή δεδομένων που αφορούν τις ιδιότητες του ρευστού
- Εικόνα 4.28** : Εισαγωγή δεδομένων που αφορούν τις ιδιότητες του ρευστού (συνέχεια της Εικόνας 4.27)
- Εικόνα 4.29** : Αναλυτικό διάγραμμα
- Εικόνα 4.30** : Διάγραμμα Campbell
- Εικόνα 4.31** : Εισαγωγή μοντέλου που περιγράφει τον υδροφορέα
- Εικόνα 4.32** : Αναλυτικό διάγραμμα με μοντέλο υδροφορέα
- Εικόνα 4.33** : Διόρθωση τιμών με τη διαδικασία της παλινδρόμησης
- Εικόνα 4.34** : Αναλυτικό διάγραμμα μετά τη διαδικασία της παλινδρόμησης
- Εικόνα 4.35** : Τιμές ιδιοτήτων του μοντέλου υδροφορέα μετά την παλινδρόμηση
- Εικόνα 4.36** : Διόρθωση τιμής αρχικών αποθεμάτων κατά τη διαδικασία της παλινδρόμησης
- Εικόνα 4.37** : Αναλυτικό διάγραμμα μετά τη διαδικασία της παλινδρόμησης
- Εικόνα 4.38** : Διάγραμμα Campbell μετά τη διαδικασία της παλινδρόμησης
- Εικόνα 4.39** : Διάγραμμα Energy Plot μετά τη διαδικασία της παλινδρόμησης
- Εικόνα 4.40** : Αναλυτικό διάγραμμα
- Εικόνα 4.41** : Διάγραμμα Campbell
- Εικόνα 4.42** : Τιμή αποθεμάτων πριν τη διαδικασία της παλινδρόμησης
- Εικόνα 4.43** : Διόρθωση τιμών κατά τη διαδικασία της παλινδρόμησης
- Εικόνα 4.44** : Αναλυτικό διάγραμμα μετά τη διαδικασία της παλινδρόμησης
- Εικόνα 4.45** : Διάγραμμα Campbell μετά τη διαδικασία της παλινδρόμησης
- Εικόνα 4.46** : Διάγραμμα Energy Plot

Εικόνα 4.47 : Αναλυτικό διάγραμμα

Εικόνα 4.48 : Διάγραμμα Campbell

Εικόνα 4.49 : Διόρθωση τιμής αποθεμάτων κατά τη διαδικασία της παλινδρόμησης

Εικόνα 4.50 : Αναλυτικό διάγραμμα μετά τη διαδικασία της παλινδρόμησης

Εικόνα 4.51 : Διάγραμμα Campbell μετά την διαδικασία παλινδρόμησης

Εικόνα 4.52 : Energy Plot

Εικόνα 4.53 : Υπολογισμοί B_o για $P > 1317$ psig (1^η περίπτωση – χρήση συσχετίσεων)

Εικόνα 4.54 : Διάγραμμα πίεσης (psig) – ογκομετρικού συντελεστή πετρελαίου (rb/stb)

Εικόνα 4.55 : Πίνακας αποτελεσμάτων των τριών περιπτώσεων

Εικόνα 4.56 : Εισαγωγή τύπου πρόβλεψης, σημείο έναρξης, σημείο τέλους της πρόβλεψης και η συχνότητα αναφοράς

Εικόνα 4.57 : Εισαγωγή ρυθμών παραγωγής

Εικόνα 4.58 : Εισαγωγή συχνότητας πρόβλεψης

Εικόνα 4.59 : Υπολογισμοί μελλοντικής πρόβλεψης

Εικόνα 4.60 : Διάγραμμα αθροιστικών παραγωγών N_p , G_p , W_p ως προς την πίεση

Εικόνα 4.61 : Διάγραμμα αθροιστικών παραγωγών N_p , G_p , W_p ως προς τον χρόνο

Εικόνα 4.62 : Διάγραμμα παροχών πετρελαίου, αερίου, νερού με τον χρόνο

Εικόνα 4.63 : Διάγραμμα πίεσης – χρόνου για τους 12 μήνες της πρόβλεψης

Εικόνα 5.1 : Διάγραμμα πίεσης (psi) – χρόνου για τα ιστορικά δεδομένα (date d/m/y)

Εικόνα 5.2 : Διάγραμμα αθροιστικής παραγωγής πετρελαίου (bbl) – χρόνου (date d/m/y)

Εικόνα 5.3 : Διάγραμμα αθροιστικής παραγωγής αερίου (ft³) – χρόνος (date d/m/y)

Εικόνα 5.4 : Διάγραμμα αθροιστικής παραγωγής νερού (bbl) – χρόνος (date d/m/y)

Εικόνα 5.5 : Διάγραμμα παροχής νερού (bbl/day) - χρόνου (day)

Εικόνα 5.6 : Διάγραμμα παροχής πετρελαίου (bbl/day) – χρόνου (day)

Εικόνα 5.7 : Εισαγωγή δεδομένων που αφορούν τις ιδιότητες του ρευστού

Εικόνα 5.8 : Εισαγωγή PVT μετρήσεων για τη ρύθμιση των συσχετίσεων

Εικόνα 5.9 : Εισαγωγή δεδομένων που αφορούν τις ιδιότητες του ρευστού

Εικόνα 5.10 : Παράμετροι όλων των διαθέσιμων συσχετίσεων για τις ογκομετρικές ιδιότητες

Εικόνα 5.11 : Παράμετροι όλων των διαθέσιμων συσχετίσεων για το ιξώδες

Εικόνα 5.12 : Εισαγωγή βασικών δεδομένων ταμιευτήρα

Εικόνα 5.13 : Εισαγωγή μοντέλου υδροφορέα

- Εικόνα 5.14 :** Εισαγωγή σχετικών διαπερατοτήτων
- Εικόνα 5.15 :** Εισαγωγή ιστορικών δεδομένων παραγωγής
- Εικόνα 5.16 :** Εισαγωγή ιστορικών δεδομένων παραγωγής με υπολογισμό του GOR
- Εικόνα 5.17 :** Βοηθητικό διάγραμμα GOR-t και R_s -t
- Εικόνα 5.18 :** Εισαγωγή δεδομένων που αφορούν τις ιδιότητες του ρευστού
- Εικόνα 5.19 :** Εισαγωγή δεδομένων που αφορούν τις ιδιότητες του ρευστού
- Εικόνα 5.20 :** Εισαγωγή δεδομένων που αφορούν τις ιδιότητες του ρευστού (συνέχεια της Εικόνας 5.19)
- Εικόνα 5.21 :** Αναλυτικό διάγραμμα
- Εικόνα 5.22 :** Διάγραμμα Campbell
- Εικόνα 5.23 :** Διόρθωση τιμών κατά τη διαδικασία της παλινδρόμησης
- Εικόνα 5.24 :** Αναλυτικό διάγραμμα μετά τη διαδικασία της παλινδρόμησης
- Εικόνα 5.25 :** Διάγραμμα Campbell μετά τη διαδικασία της παλινδρόμησης
- Εικόνα 5.26 :** Διάγραμμα Energy Plot μετά τη διαδικασία της παλινδρόμησης
- Εικόνα 5.27 :** Αναλυτικό διάγραμμα
- Εικόνα 5.28 :** Διάγραμμα Campbell
- Εικόνα 5.29 :** Διόρθωση τιμών με τη διαδικασία της παλινδρόμησης
- Εικόνα 5.30 :** Αναλυτικό διάγραμμα μετά την παλινδρόμηση
- Εικόνα 5.31 :** Διάγραμμα Campbell μετά την παλινδρόμηση
- Εικόνα 5.32 :** Διάγραμμα Energy Plot μετά την παλινδρόμηση
- Εικόνα 5.33 :** Πίνακας τιμών αποθεμάτων που προέκυψαν από τις δύο περιπτώσεις
- Εικόνα 5.34 :** Διάγραμμα υπολογισμού των πιέσεων με δεδομένες τις τιμές αθροιστικής παραγωγής
- Εικόνα 5.35 :** Διάγραμμα πίεσης (psig) - χρόνο για ιστορική παραγωγή και προσομοιωτή (date d/m/γ)
- Εικόνα 5.36 :** Καμπύλη κλασματικής ροής μετά την παλινδρόμηση
- Εικόνα 5.37 :** Τιμές της εξίσωσης Corey μετά τη διαδικασία της παλινδρόμησης

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Εισαγωγή

Κεφάλαιο 1 : Ταμιευτήρες πετρελαίου

- 1.1 Γενικά για τους ταμιευτήρες πετρελαίου
- 1.2 Χαρακτηρισμός πετρελαϊκών ρευστών (ανάλυση PVT)
- 1.3 Υπολογιστικά Θερμοδυναμικά Μοντέλα περιγραφής συμπεριφοράς ρευστών (Μοντέλο Μαύρου Πετρελαίου (Black Oil Model) – Μοντέλο Πλήρους Σύστασης (Compositional Model))
- 1.4 Μοντέλα υδροφόρων
- 1.5 Θέματα που άπτονται της ροής των ρευστών μέσα στον ταμιευτήρα

- 1.5.1 Μοντέλα σχετικών διαπερατοτήτων

- 1.5.2 Νόμος Darcy - Κλασματικές ροές

Κεφάλαιο 2 : Μέθοδος Ισοζυγίου Μάζας

- 2.1 Ισοζύγιο μάζας (Material balance) πετρελαίου

- 2.2 Εκτίμηση κατάστασης ταμιευτήρα

- 2.2.1 Γραφικές μέθοδοι ταμιευτήρων πετρελαίου

- 2.2.1.1 Μέθοδος Havlena – Odeh

- 2.2.1.2 Διάγραμμα Campbell

- 2.2.1.3 Διάγραμμα Energy Plot

- 2.2.1.4 Διάγραμμα σύγκρισης GOR με R_s

- 2.2.2 Αναλυτικές μέθοδοι ταμιευτήρων

- 2.3 Πρόβλεψη παραγωγής

Κεφάλαιο 3 : Λογισμικό Mbal

- 3.1 Επεξήγηση προγράμματος – Εισαγωγή δεδομένων

- 3.2 Διαδικασία Ιστορικής Ταύτισης (History matching)

- 3.3 Πρόβλεψη παραγωγής

Κεφάλαιο 4 : Πρώτη μελέτη περίπτωσης

- 4.1 Δεδομένα

- 4.1.1 Εισαγωγή δεδομένων στο λογισμικό Mbal

- 4.1.1.1 1^η περίπτωση – Χρήση συσχετίσεων (correlations)

- 4.1.1.2 2^η περίπτωση – Χρήση πινάκων (tables)

4.1.1.3 3^η περίπτωση – Χρήση πινάκων (tables) με διόρθωση τιμών B_o και R_s

4.2 Διαδικασία Ιστορικής Ταύτισης (History matching)

4.2.1 1^η περίπτωση (PVTs με συσχετίσεις)

4.2.2 2^η περίπτωση (PVTs με πίνακες από τη μελέτη DV)

4.2.3 3^η περίπτωση (PVTs με πίνακες και διορθωμένα B_o και R_s κατά Dake)

4.3 Σενάριο πρόβλεψης μελλοντικής παραγωγής

Κεφάλαιο 5 : Δεύτερη μελέτη περίπτωσης

5.1 Δεδομένα

5.1.1 Εισαγωγή δεδομένων στο λογισμικό Mbal

5.1.1.1 1^η περίπτωση – Χρήση συσχετίσεων (correlations)

5.1.1.2 2^η περίπτωση – Χρήση πινάκων (tables) με διόρθωση τιμών B_o και R_s

5.2 Διαδικασία Ιστορικής Ταύτισης (History matching)

5.2.1 1^η περίπτωση (PVTs με συσχετίσεις)

5.2.2 2^η περίπτωση (PVTs με πίνακες και διορθωμένα B_o και R_s κατά Dake)

5.3 Πρόβλεψη μελλοντικής παραγωγής

Συμπεράσματα

Βιβλιογραφία

Εισαγωγή

Η Μηχανική Ταμιευτήρων είναι ο κλάδος της μηχανικής που ασχολείται με τον σχεδιασμό και τη βελτιστοποίηση της εξόρυξης υδρογονανθράκων από υπόγειους ταμιευτήρες. Ο σχεδιασμός βασίζεται στην παρατηρούμενη παραγωγική συμπεριφορά του ταμιευτήρα από το αναπόφευκτα μικρό δείγμα πληροφοριών που είναι διαθέσιμο, ενώ η βελτιστοποίηση επιτυγχάνεται με τη μελέτη ροής των πετρελαϊκών ρευστών στο εσωτερικό του συστήματος του ταμιευτήρα μέσω της μοντελοποίησής της. Η διαχείριση ενός ταμιευτήρα γίνεται με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να επιτευχθεί βελτιστοποίηση της ανάκτησης των υδρογονανθράκων από έναν ταμιευτήρα με ταυτόχρονη όμως μείωση των κεφαλαιουχικών επενδύσεων και των λειτουργικών εξόδων.

Η παραγωγή του πετρελαίου πραγματοποιείται κατά τη φάση της πρωτογενούς, δευτερογενούς ή και τριτογενούς παραγωγής. Η πρωτογενής παραγωγή βασίζεται στη φυσική ενέργεια του ταμιευτήρα. (Σκετόπουλος Θεόδωρος, 2012) Η ενέργεια λοιπόν που απαιτείται για την παραγωγή, παρέχεται από φυσικούς μηχανισμούς οι οποίοι είναι :

1. Εκτόνωση εναπομείναντος πετρελαίου και του αερίου διαλυμένου σε αυτό

Με την πτώση της πίεσης μέσα στον ταμιευτήρα κατά την παραγωγή, πραγματοποιείται εκτόνωση του υγρού πετρελαίου και του αερίου που ήταν διαλυμένο στο πετρέλαιο, οδηγώντας τα προς τις παραγωγικές γεωτρήσεις.

2. Εκτόνωση ελεύθερου αερίου υπερκείμενης ζώνης αερίου

Σε αυτή την περίπτωση η υπερκείμενη ζώνη αερίου παρέχει επιπλέον ενέργεια από την εκτόνωση του αερίου κατά την πτώση πίεσης μέσα στον ταμιευτήρα.

3. Εκτόνωση υποκείμενου νερού

Η φυσική εισροή νερού από υποκείμενο υδροφόρο ορίζοντα συνεισφέρει δραστικά στην απαιτούμενη ενέργεια για την παραγωγή, η οποία προκαλείται από την εκτόνωση του υποκείμενου νερού (υδροφόρο ορίζοντα) κατά την πτώση πίεσης μέσα στον ταμιευτήρα.

4. Μείωση του όγκου από την εκτόνωση του ενδογενούς νερού και μείωση του όγκου των πόρων (Συμπιεστότητα πετρώματος)

Κατά την παραγωγή ρευστών μειώνεται ο όγκος των πόρων του πετρώματος και εκτονώνεται το ενδογενές νερό. Οι μηχανισμοί αυτοί έχουν πολύ μικρή συνεισφορά στην παραγωγή και γι' αυτό τον λόγο συνήθως εξετάζονται ταυτόχρονα.

Ειδικότερα, οι κύριοι στόχοι της μηχανικής ταμιευτήρων αφορούν στον προσδιορισμό :

- ✓ Του πιθανού σεναρίου εκμετάλλευσης που επιτρέπει τη μεγιστοποίηση της αποληψιμότητας των αποθεμάτων και σε τι βάθος χρόνου
- ✓ Των λόγων για τους οποίους ο ταμιευτήρας δεν ανταποκρίνεται στις προβλέψεις προηγούμενων μελετών
- ✓ Του τμήματος του ταμιευτήρα από το οποίο προέρχεται το μεγαλύτερο μέρος της παραγωγής

Για την εκτίμηση της τρέχουσας κατάστασης ενός ταμιευτήρα αλλά και για την πρόβλεψη των μελλοντικών αποδόσεών του είναι διαδεδομένη η χρήση υπολογιστικών μοντέλων, όπως η Μέθοδος Ισοζυγίου Μάζας (Material Balance), η οποία βασίζεται στην αρχή διατήρησης της

μάζας των ρευστών του ταμιευτήρα κατά την παραγωγική διαδικασία. Παρότι γίνεται αναφορά σε ισοζύγια μάζας, αυτά συνήθως εκφράζονται σε όρους όγκου καθώς αυτό αποτελεί το μετρήσιμο μέγεθος κατά την παραγωγή, καθιστώντας έτσι αναγκαία τη χρήση μιας εξίσωσης όγκων και συγκεκριμένα της εξίσωσης ισοζυγίου μάζας (Dake, L.P., 1978). Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η βασική χρήση της μεθόδου είναι ο καθορισμός των εναπομεινάντων αποθεμάτων πετρελαίου και αερίου και οι μελλοντικές αποδόσεις του ταμιευτήρα (ανάλυση απόδοσης ταμιευτήρα). Επιπλέον, χρησιμοποιείται για την επιβεβαίωση ύπαρξης πιθανού υποκείμενου ή γειτονικού υδροφόρου ορίζοντα και στην ανάλυση της επίδρασης αυτού στην παραγωγή.

Με την Μέθοδο Ισοζυγίου Μάζας (Material Balance), μπορούν να προσδιοριστούν τα ακόλουθα :

- I. Ο συνολικός όγκος αρχικών αποθεμάτων υδρογονανθράκων (πετρελαίου κι αερίου)
- II. Η ύπαρξη ή μη υδροφόρου ορίζοντα και καθορισμός του τύπου και του μεγέθους του
- III. Το βάθος της επαφής του αερίου – πετρελαίου (GOC), του πετρελαίου – νερού (OWC) και του αερίου – νερού (GWC), όπου αυτό υφίσταται
- IV. Η πίεση του ταμιευτήρα για μελλοντικά σενάρια παραγωγής
- V. Η απόδοση του ταμιευτήρα

Με δεδομένο, όπως αναφέρθηκε, ότι στην πετρελαϊκή βιομηχανία μετρήσιμα μεγέθη αποτελούν οι όγκοι και όχι οι μάζες, για τη χρήση της μεθόδου του ισοζυγίου μάζας γίνονται κάποιες παραδοχές και συγκεκριμένα ότι :

1. η θερμοκρασία του ταμιευτήρα είναι σταθερή
2. η πίεση κατανέμεται ομοιόμορφα
3. ο ταμιευτήρας θεωρείται ενιαία δεξαμενή με σταθερό όγκο
4. σε κάθε πτώση πίεσης επιτυγχάνεται θερμοδυναμική ισορροπία

Η μεθοδολογία ακολουθεί τις βασικές αρχές του ισοζυγίου μάζας και συγκεκριμένα πραγματοποιήθηκε σε 2 μέρη. Το 1^ο μέρος σχετίζεται με την εκτίμηση της κατάστασης του ταμιευτήρα, δηλαδή τον υπολογισμό του αρχικού όγκου υδρογονανθράκων του ταμιευτήρα και την ύπαρξη ή μη υδροφορέα. Το 2^ο μέρος αναφέρεται στην πρόβλεψη της μελλοντικής παραγωγής του ταμιευτήρα δηλαδή στην πρόβλεψη τόσο της απόδοσης του ταμιευτήρα όσο και της ανάκτησης των υδρογονανθράκων.

Στο κεφάλαιο 1 της συγκεκριμένης διπλωματικής γίνεται αναφορά στις PVT ιδιότητες, στα μοντέλα περιγραφής συμπεριφοράς ρευστών, στα μοντέλα υδροφορέων και κλασματικών ροών, ενώ στο κεφάλαιο 2 αναφέρεται λεπτομερώς η διαδικασία εκτίμησης της κατάστασης του ταμιευτήρα μέσω διαγραμμάτων αλλά και η διαδικασία πρόβλεψης της μελλοντικής παραγωγής. Στο κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται το λογισμικό Mbal που θα χρησιμοποιηθεί στην παρούσα διπλωματική εργασία. Ενώ, στο κεφάλαιο 4 εφαρμόζεται το Mbal σε πραγματικά δεδομένα εκμετάλλευσης ενός ταμιευτήρα πετρελαίου για την 1^η μελέτη περίπτωση και στο κεφάλαιο 5 για τη 2^η μελέτη περίπτωσης. Τέλος, στο κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται τα συμπεράσματα.

Κεφάλαιο 1 : Ταμιευτήρες πετρελαίου

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται αναφορά στους ταμιευτήρες πετρελαίου αλλά και στα δεδομένα που απαιτούνται να εισαχθούν στο μοντέλο ισοζυγίου μάζας (material balance). Αναλύονται οι PVT ιδιότητες, εισάγονται δηλαδή τα δεδομένα πίεσης – όγκου - θερμοκρασίας προκειμένου να δημιουργηθεί ένα δυναμικό μοντέλο ταμιευτήρα, οι 2 τύποι υπολογιστικών θερμοδυναμικών μοντέλων (τα μοντέλα μαύρου πετρελαίου – Black oil Models τα οποία περιγράφουν τη συμπεριφορά των ρευστών εντός του ταμιευτήρα και οι καταστατικές εξισώσεις- Equations of States), τα μοντέλα περιγραφής των υδροφορέων και οι κλασματικές ροές.

1.1 Γενικά για τους ταμιευτήρες πετρελαίου

Ως ταμιευτήρας ορίζεται μια συγκέντρωση υδρογονανθράκων σε πορώδη, περατά και ιζηματογενή πετρώματα. Περιβάλλεται από αδιαπέρατο πέτρωμα και συνήθως από υδροφόρο ορίζοντα. Η συγκέντρωση των υδρογονανθράκων, η οποία κατά το χρόνο ανακάλυψής της βρίσκεται σε κατάσταση ισορροπίας όσον αφορά την πίεση σε όλο τον διαθέσιμο όγκο πόρων, μερικές φορές αναφέρεται και ως "δεξαμενή". Ένα πετρελαϊκό πεδίο μπορεί να αποτελείται από διάφορους ταμιευτήρες, οι οποίοι βρίσκονται είτε σε διαφορετικές συνθήκες πίεσης, είτε σε διαφορετικούς στρωματογραφικούς ορίζοντες. Το περιβάλλον για τη συγκέντρωση υδρογονανθράκων είναι μια ιζηματογενής λεκάνη η οποία παρέχει τις συνθήκες για τη δημιουργία συγκέντρωσης πετρελαίου, συγκεκριμένα :

- α) την πηγή των υδρογονανθράκων
- β) το σχηματισμό και τη μετανάστευση των υδρογονανθράκων
- γ) το μηχανισμό παγίδευσης των υδρογονανθράκων δηλαδή την ύπαρξη γεωλογικών δομών σε πορώδη ιζηματογενή πετρώματα στο χρόνο αλλά και στο μονοπάτι της μετανάστευσης των υδρογονανθράκων .

Ένα πέτρωμα για να μπορεί να αποτελέσει αποθήκευτρο πέτρωμα (ταμιευτήρας υδρογονανθράκων), πρέπει να χαρακτηρίζεται από τις ακόλουθες ιδιότητες :

- α) Να έχει σοβαρή αποθηκευτική ικανότητα. Η παράμετρος αυτή καθορίζεται από το πορώδες του σχηματισμού.
- β) Να μπορεί το ρευστό να ρέει στους πόρους του πετρώματος. Η λειτουργία αυτή καθορίζεται από τη διαπερατότητα
- γ) Να περιέχει ικανή ποσότητα υδρογονανθράκων με ικανοποιητική συγκέντρωση. Ο διαθέσιμος όγκος του σχηματισμού και ο κορεσμός σε υδρογονάνθρακες καθορίζουν την παράμετρο αυτή.

Πέραν των παραπάνω χαρακτηριστικών ενός ταμιευτήρα πετρελαίου, σημαντικές είναι και οι πληροφορίες που αφορούν στην πίεση αυτού, η οποία είτε αφορά την αρχική του πίεση, είτε μπορεί και να προκύπτει από δεδομένα παραγωγής εφόσον τελεί υπό την παραγωγή.

Επίσης, σημαντική είναι η θερμοκρασία του. Στη μηχανική των ταμιευτήρων γίνεται η λογική υπόθεση της επικράτησης ισοθερμοκρασιακών συνθηκών για όλες τις διεργασίες που λαμβάνουν χώρα μέσα στον ταμιευτήρα λόγω της μεγάλης θερμοχωρητικότητας τόσο των πετρωμάτων του ταμιευτήρα όσο και των υπερκείμενων πετρωμάτων, σε συνδυασμό με τις τεράστιες επιφάνειες για μεταφορά θερμότητας μέσα στον ταμιευτήρα. Τέλος, είναι

σημαντική η γνώση της φύσης των ρευστών εντός του ταμιευτήρα. Οι συγκεντρώσεις υδρογονανθράκων σχετίζονται με την ύπαρξη νερού, είτε με τη μορφή εκτεταμένου υδροφόρου ορίζοντα κάτω από ή παρακείμενο με τους υδρογονάνθρακες ή τη συνύπαρξη με τους υδρογονάνθρακες με τη μορφή «ενδογενούς» νερού. Μέσα σε έναν ταμιευτήρα πετρελαίου δύο ή τρεις φάσεις απαντώνται καθ' όλη τη διάρκεια της παραγωγικής ζωής του (πετρέλαιο, αέριο, νερό).

Στους ταμιευτήρες, μέσω διαφόρων μεθόδων, εξετάζονται οι διαθέσιμες πληροφορίες ώστε αρχικά να εκτιμηθούν οι ιδιότητες του ταμιευτήρα και στη συνέχεια να γίνουν προβλέψεις για την παραγωγή που μπορεί να έχει ο ταμιευτήρας. Τέτοιες ιδιότητες είναι η πίεση, η θερμοκρασία, το πορώδες, η φάση στην οποία βρίσκεται ο ταμιευτήρας αν δηλαδή είναι μονοφασικός (υπάρχει μόνο υγρό) ή διφασικός (υπάρχει υγρό και αέριο), για τις οποίες γίνεται λόγος στη συνέχεια.

Ταυτόχρονα, τα δεδομένα που πρέπει να είναι γνωστά, εκτός αυτών που αναφέρθηκαν παραπάνω και τα οποία θα χρησιμοποιηθούν στο λογισμικό στη συνέχεια, είναι τα ακόλουθα:

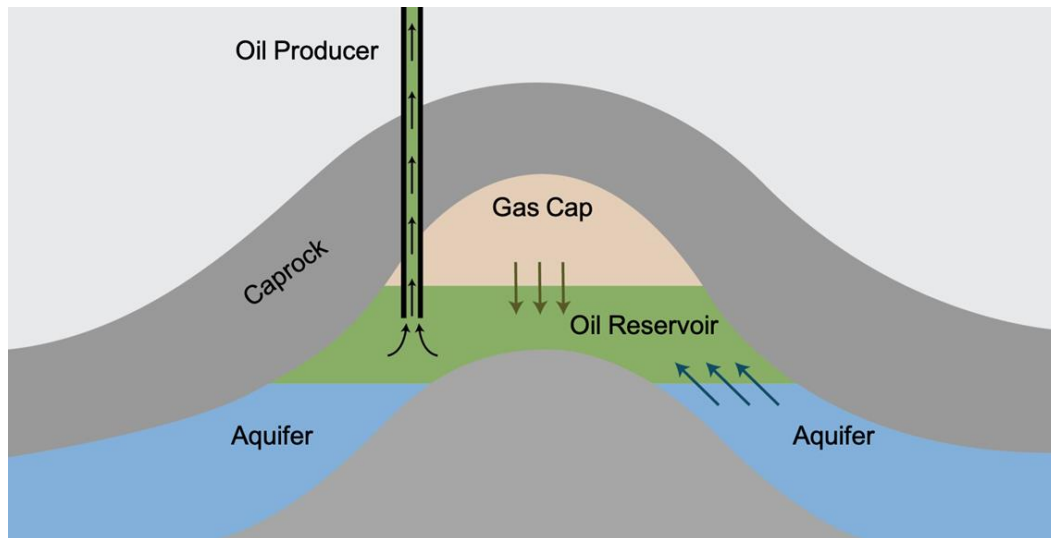
- ❖ Συμπιεστότητες νερού και σχηματισμού (προκύπτουν συναρτήσεις της αλατότητας)
- ❖ Αλατότητα ενδογενούς νερού
- ❖ Αρχική πίεση ταμιευτήρα
- ❖ Καταγεγραμμένη παραγωγή πετρελαίου N_p , αερίου G_p και νερού W_p σε συνθήκες επιφάνειας (sc)

Επίσης, οι εκτιμήσεις που γίνονται συνήθως αφορούν τις ακόλουθες ιδιότητες :

- ❖ Αρχικά αποθέματα πετρελαίου στον ταμιευτήρα (N)

Και εάν υπάρχει υποψία για υδροφορέα, γίνονται και οι ακόλουθες εκτιμήσεις :

- ❖ Ακτίνα ταμιευτήρα υδροφορέα
- ❖ Αναλογία εξωτερικής προς εσωτερική ακτίνα υδροφορέα
- ❖ Γωνία επαφής
- ❖ Κορεσμός σε ενδογενές νερό
- ❖ Πάχος ταμιευτήρα υδροφορέα



Εικόνα 1.1 : Ταμιευτήρας υδρογονανθράκων

1.2 Χαρακτηρισμός πετρελαϊκών ρευστών (ανάλυση PVT)

Τα ρευστά των ταμιευτήρων είναι πολυσυστικά μίγματα ενώσεων που περιέχουν κυρίως υδρογονάνθρακες. Για τη βελτιστοποίηση της παραγωγής υδρογονανθράκων από έναν ταμιευτήρα, τα ακριβή και αξιόπιστα δεδομένα για τις ογκομετρικές ιδιότητες και την ισορροπία των φάσεων του ρευστού είναι απαραίτητα.

Ο χαρακτηρισμός των πετρελαϊκών ρευστών πραγματοποιείται συνήθως μέσω της πειραματικής ανάλυσης PVT, αφού εξασφαλιστεί η αντιπροσωπευτική δειγματοληψία ρευστού είτε στην επιφάνεια (επιφανειακοί διαχωριστές), είτε στην κεφαλή της γεώτρησης, είτε εντός της γεώτρησης παραγωγής. Σκοπός της ανάλυσης αυτής είναι ο προσδιορισμός των ογκομετρικών παραμέτρων αλλά και των θερμοφυσικών ιδιοτήτων του ρευστού για τη βέλτιστη περιγραφή της θερμοδυναμικής και ογκομετρικής συμπεριφοράς του, σε διάφορες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας. Οι συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας μεταβάλλονται διαρκώς λόγω της άντλησης του ρευστού από τον ταμιευτήρα, με αποτέλεσμα να αλλάζει συνεχώς η θερμοδυναμική κατάσταση των ρευστών.

Κατά την πειραματική ανάλυση PVT, οι κύριες εργαστηριακές μελέτες που πραγματοποιούνται είναι :

1. Ανάλυση σύστασης ρευστού (Compositional Analysis), συνήθως με τη χρήση αέριου χρωματογράφου
2. Ισοθερμοκρασιακή εκτόνωση υπό σταθερή σύσταση (Constant Composition Expansion, CCE) → Ο σκοπός της ανάλυσης αυτής είναι ο προσδιορισμός της πίεσης κορεσμού του ρευστού. Στο πείραμα αυτό, το δείγμα τοποθετείται σε κελί το οποίο θερμαίνεται έως ότου η θερμοκρασία του γίνει ίση με τη θερμοκρασία του ταμιευτήρα και συμπιέζεται στην αρχική πίεση του ταμιευτήρα. Η πίεση μειώνεται σταδιακά έως ότου εμφανιστεί η πρώτη φυσαλίδα αερίου, που σηματοδοτεί την πίεση φυσαλίδας ή κορεσμού του ρευστού. Από το σημείο αυτό παρατηρείται σημαντική αύξηση της συμπιεστότητας του συστήματος, ενώ μικρές μεταβολές

πίεσης έχουν ως αποτέλεσμα μεγάλες μεταβολές όγκου του συστήματος. Σε κάθε στάδιο καταγράφεται ο συνολικός όγκος του πετρελαϊκού ρευστού, καθώς και η επικρατούσα πίεση. Το πείραμα συνεχίζεται μέχρι το ρευστό να καταλάβει όλο τον όγκο του πειραματικού κελιού. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι κατά τη διάρκεια του πειράματος, η σύσταση παραμένει σταθερή καθώς δεν υπάρχει απομάκρυνση ρευστού από το κελί. Κατασκευάζεται ένα διάγραμμα P-V και προσδιορίζεται γραφικά η πίεση στο bubble point ή αλλιώς πίεση κορεσμού, η ισοθερμοκρασιακή συμπίεστικότητα του ρευστού και ο σχετικός όγκος αυτού σε σχέση με τον όγκο στην πίεση κορεσμού. Η συμπίεστικότητα του πετρελαίου θα προκύψει έπειτα από υπολογισμούς, καθώς είναι γνωστή η μεταβολή της πίεσης σε σχέση με τον όγκο. Στην περίπτωση αέριων συμπυκνωμάτων η αντίστοιχη ανάλυση στοχεύει στον προσδιορισμό της πίεσης δρόσου που σηματοδοτείται από την εμφάνιση της πρώτης σταγόνας.

3. Διαφορική εκτόνωση (Differential Liberation Expansion, DLE) για ταμειυτήρες πετρελαίου → Κατά τη διαφορική εκτόνωση το δείγμα τοποθετείται σε κελί το οποίο θερμαίνεται έως ότου η θερμοκρασία του γίνει ίση με τη θερμοκρασία του ταμειυτήρα και συμπιέζεται στην πίεση του σημείου φυσαλίδας το οποίο έχει καθοριστεί από τη μελέτη ισοθερμοκρασιακής εκτόνωσης υπό σταθερή σύσταση (CCE) και μειώνεται σταδιακά μέχρι την ατμοσφαιρική πίεση. Σε κάθε βήμα απομακρύνεται υπό σταθερή πίεση ο όγκος αερίου που απελευθερώθηκε (που ήταν διαλυμένος στο πετρέλαιο), σε συνθήκες επιφάνειας όπου επίσης γίνεται ανάλυση της σύστασής του, ενώ καταγράφεται ο όγκος του πετρελαίου που έχει απομείνει. Η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι την ατμοσφαιρική πίεση P_{atm} στο τελευταίο στάδιο, όπου τελικά ψύχεται σε πρότυπη θερμοκρασία $T_{amb} = 60^{\circ}F$.

Σε κάθε πτώση πίεσης υπολογίζεται :

- $B_o \rightarrow$ ο ογκομετρικός συντελεστής πετρελαίου (λόγος όγκου πετρελαίου στον ταμειυτήρα προς τον τελικό όγκο πετρελαίου που έχει απομείνει στο τελευταίο στάδιο της διαδικασίας στην ατμοσφαιρική πίεση)
- $B_g \rightarrow$ ο ογκομετρικός συντελεστής αερίου (λόγος όγκου αερίου σε συνθήκες ταμειυτήρα προς τον όγκο αερίου σε κανονικές συνθήκες μέσω διαφορικής εκτόνωσης)
- $Z \rightarrow$ ο συντελεστής συμπίεστικότητας αερίου ($Z = P * \frac{V}{n * R * T}$)
- $\gamma_g \rightarrow$ το ειδικό βάρος αερίου (λόγος πυκνότητας αερίου προς την πυκνότητα του αέρα σε πρότυπες συνθήκες)
- $\rho_o \rightarrow$ η πυκνότητα του πετρελαίου που έχει απομείνει συναρτήσει της πίεσης. (Tarek, 2016)

Σε αυτό το σημείο είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι το εργαστηριακό πείραμα DLE που υπολογίζει τα B_o και R_s , δε λαμβάνει υπόψη όλο το σύστημα παραγωγής, από τον ταμειυτήρα δηλαδή μέχρι την επιφάνεια. Γι' αυτό τον λόγο χρησιμοποιούνται οι παρακάτω σχέσεις οι οποίες λαμβάνουν υπόψη αυτή τη λεπτομέρεια και μέσω αυτών υπολογίζεται το ακριβές B_o και R_s για κάθε πίεση, διορθώνοντας δηλαδή τα B_o και R_s που πάρθηκαν από το πείραμα DLE. Η διόρθωση αυτή ονομάζεται διόρθωση κατά Dake. (Muhammad A. Al – Marhoun, 2003)

$$B'_{oi} = B_{oi(dv)} * \left(\frac{B_{ob(F)}}{B_{ob(DV)}} \right)$$

$$R'_{si} = R_{sb(F)} - (R_{sb(DV)} - R_{si(DV)}) * \left(\frac{B_{ob(F)}}{B_{ob(DV)}}\right)$$

Οι τιμές $B_{ob(F)}$ και $R_{sb(F)}$ προκύπτουν από το flash πείραμα.

Η βασική διαφορά των πειραμάτων CCE και DLE έγκειται στο ότι κατά τη διαφορική εκτόνωση, το αέριο που απελευθερώνεται μετά το σημείο φυσαλίδας απομακρύνεται από το πειραματικό κελί, με αποτέλεσμα να μεταβάλλεται συνεχώς η σύσταση του εναπομένουτος στο κελί ρευστού. Ο όγκος του υγρού που απομένει σε καθένα από τα δύο κελιά με το πέρας της πειραματικής διαδικασίας είναι διαφορετικός, με τον όγκο που προκύπτει από τη διαφορική εκτόνωση να είναι γενικά μεγαλύτερος. Γενικότερα, η διαφορική εκτόνωση περιγράφει ικανοποιητικά τον τρόπο με τον οποίο το αέριο και το πετρέλαιο διαχωρίζονται στον ταμιευτήρα, καθώς λόγω της διαφορετικής ταχύτητας ροής δεν παραμένουν σε επαφή μετά τον διαχωρισμό τους και μέχρι την παραγωγή τους στις γεωτρήσεις.

Στις δύο προαναφερόμενες εργαστηριακές διαδικασίες, πρέπει να ληφθεί υπόψη και ο διαχωριστής που έχει επιλεγεί. Σημειώνεται ότι ο διαχωριστής βρίσκεται στην επιφάνεια και διαχωρίζει το αέριο, το πετρέλαιο και το νερό που φτάνουν στην επιφάνεια από την άντληση του ρευστού.

4. Δοκιμή διαχωρισμού (Separator Test, ST). → Το ρευστό εκτονώνεται από το σημείο κορεσμού στις πρότυπες συνθήκες, ακολουθώντας κάποια ενδιάμεσα στάδια τα οποία αντιστοιχούν σε πιθανές συνθήκες λειτουργίας ενός διαχωριστή ή μιας σειράς διαχωριστών. Το αέριο που απελευθερώνεται σε κάθε στάδιο, απομακρύνεται και μετριέται το ειδικό βάρος, η σύσταση και ο όγκος του σε πρότυπες συνθήκες. Έτσι, υπολογίζεται ο λόγος του όγκου του αερίου που απελευθερώθηκε προς τον όγκο του εναπομένουτος πετρελαίου σε επιφανειακές συνθήκες, από την ακόλουθη σχέση : $GOR = \frac{V_g^{sc}}{V_{o,st}}$, όπου V_g^{sc} : ο συνολικός όγκος αερίου που απομακρύνθηκε μέσω των διαχωριστών, το άθροισμα δηλαδή των GOR του κάθε διαχωριστή.

Ταυτόχρονα υπολογίζεται ο ογκομετρικός συντελεστής του πετρελαίου $B_o = V_{sat}/V_{o,st}$ και η ειδική πυκνότητα του πετρελαίου γ_o . (El-hoshoudy, 2019)

5. Μετρήσεις ιξώδους (Viscosity Study, VS) → Οι μετρήσεις ιξώδους πραγματοποιούνται συνήθως σε συσκευές μέτρησης ιξώδους και σε συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας αντίστοιχες των προηγούμενων πειραμάτων.

Ο προσδιορισμός των PVT ιδιοτήτων μπορεί να γίνει είτε με εργαστηριακά πειράματα σε αντιπροσωπευτικά δείγματα του ρευστού που είναι ο πιο ακριβής τρόπος αλλά ταυτόχρονα και ο πιο δαπανηρός, είτε με τη χρήση δύο διαφορετικών υπολογιστικών θερμοδυναμικών μοντέλων περιγραφής της συμπεριφοράς των ρευστών. Σε αυτό το σημείο πρέπει να

αναφερθεί, ότι με τη χρήση των υπολογιστικών θερμοδυναμικών μοντέλων είναι απαραίτητες οι διαθέσιμες πειραματικά μετρούμενες τιμές.

1.3 Υπολογιστικά Θερμοδυναμικά Μοντέλα περιγραφής συμπεριφοράς ρευστών (Μοντέλο Μαύρου Πετρελαίου (Black Oil Model) – Μοντέλο Πλήρους Σύστασης (Compositional Model))

Στην προηγούμενη ενότητα έγινε αναφορά στον προσδιορισμό των PVT ιδιοτήτων με τη βοήθεια εργαστηριακών διαδικασιών (πειραμάτων), ενώ σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται τα δύο βασικά υπολογιστικά θερμοδυναμικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται συνήθως στις προσομιώσεις που λαμβάνουν χώρα στη μηχανική ταμειυτήρων για την περιγραφή του εκάστοτε ρευστού. Η επιλογή μεταξύ των δύο μοντέλων εξαρτάται τόσο από τη σύσταση του ρευστού του ταμειυτήρα, όσο και από τις διεργασίες που γίνονται κατά την παραγωγή (Ezekwe).

Αρχικά, το 1^ο υπολογιστικό θερμοδυναμικό μοντέλο βασίζεται στην Αρχή του Μαύρου Πετρελαίου (Black oil model), το οποίο χρησιμοποιείται συνήθως σε πετρελαϊκά ρευστά χαμηλής και μέσης πητικότητας. Το συγκεκριμένο μοντέλο έχει ως βασική υπόθεση ότι το ρευστό αποτελείται από δύο ψευδοστατικά μίγματα, το πετρέλαιο ταγκ (tank oil) και το παραγόμενο αέριο (tank gas), το οποίο μπορεί να προέρχεται :

- α) Από το ελεύθερο αέριο που υπάρχει εντός του ταμειυτήρα
- β) Από το αέριο που βρίσκεται διαλυμένο στο πετρέλαιο σε πιέσεις μεγαλύτερες του σημείου φυσαλίδας
- γ) Και από τα δύο παραπάνω

Ειδικότερα, το Μοντέλο Μαύρου Πετρελαίου (Black Oil Model) επιλύει το ζήτημα της ισορροπίας των φάσεων με τη χρήση συσχετίσεων (correlations), οι οποίες υπολογίζουν μαθηματικά τις PVT ιδιότητες. Οι συσχετίσεις αυτές είναι εμπειρικοί μαθηματικοί τύποι οι οποίοι έχουν αναπτυχθεί με συγκεκριμένο εύρος εφαρμογής και προσδιορίζουν :

- i. Την πίεση φυσαλίδας ή bubble point (P_b)
- ii. Τον λόγο διαλυμένου αερίου προερχόμενο από το πετρέλαιο προς πετρέλαιο (R_s)
- iii. Τους ογκομετρικούς συντελεστές ($B_{o,g,w}$)
- iv. Το ιξώδες (μ) (Danesh,1998)

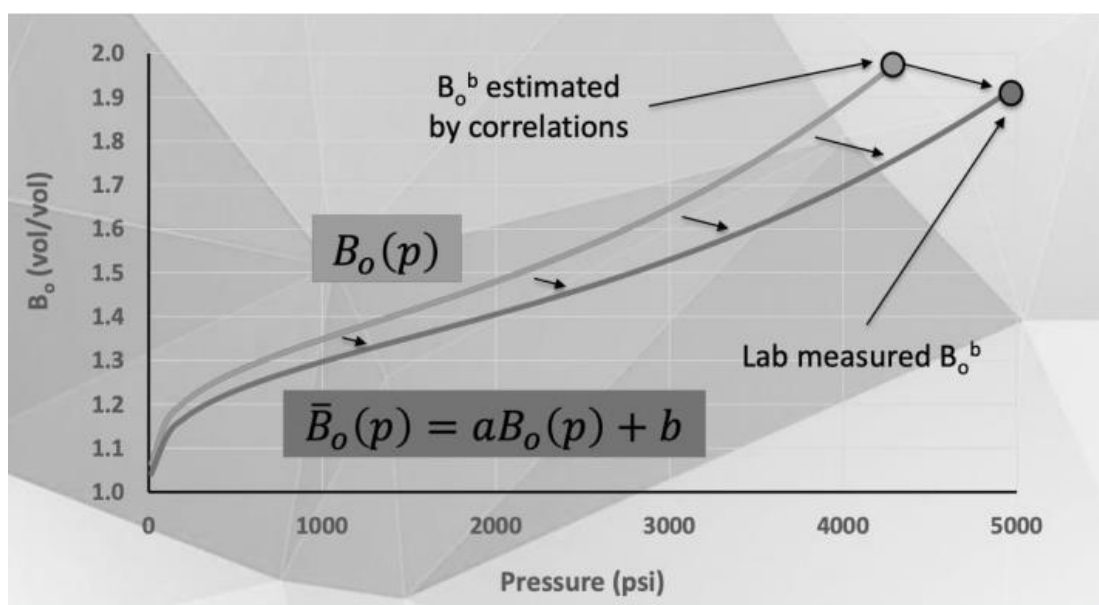
Για τους παραπάνω υπολογισμούς των συσχετίσεων τα δεδομένα που χρειάζονται είναι μετρήσεις πεδίου και συγκεκριμένα :

- i. Πυκνότητα πετρελαίου API

Το API προκύπτει από την ειδική πυκνότητα του πετρελαίου ρ_{STO} . Στα μοντέλα μαύρου πετρελαίου (black oil model), γίνεται χρήση δύο αριθμών, των πυκνοτήτων ρ_{STO} και ρ_{STG} , όπου οι δείκτες STO και STG αναφέρονται σε πετρέλαιο και αέριο αντίστοιχα, σε συνθήκες επιφάνειας (standard conditions : 60°F, 14.7psia).

- ii. Ειδικό βάρος αερίου γ_g
- iii. Λόγος παραγόμενου αερίου προς παραγόμενο πετρέλαιο GOR

Για τη βελτίωση της εκτίμησης των PVT ιδιοτήτων σε κάθε πίεση, πρέπει να γίνει μια διαδικασία ρύθμισης (tuning) χρησιμοποιώντας τις διαθέσιμες πειραματικά μετρούμενες τιμές, ώστε να γίνει επιβεβαίωση ότι οι τιμές που προέκυψαν από τις συσχετίσεις είναι παρόμοιες με αυτές που προέκυψαν από τις πειραματικές τιμές. Η διαδικασία ρύθμισης λοιπόν, μεταβάλλει τις τιμές των συσχετίσεων όπως φαίνεται και στην Εικόνα 1.2, για να προσεγγίζουν όσο το δυνατόν περισσότερο τις πειραματικές τιμές. Αναλυτικότερα, οι υπολογιζόμενες τιμές των συσχετίσεων πρέπει να διορθωθούν, ώστε να μετασχηματιστούν οι συσχετίσεις σύμφωνα με την εξίσωση $\gamma = ax + b$, όπου $x \rightarrow$ η υπολογιζόμενη τιμή από τις συσχετίσεις και $\gamma \rightarrow$ η πειραματική τιμή. Η διόρθωση αυτή θα προκύψει από τον προσδιορισμό των παραμέτρων a και b . Σύμφωνα με τη μορφή της εξίσωσης, η παράμετρος a λειτουργεί πολλαπλασιαστικά, ενώ η παράμετρος b προσθετικά στη διόρθωση. Κατά συνέπεια, όσο η τιμή της παραμέτρου a είναι πιο κοντά στη μονάδα και της b πιο κοντά στο μηδέν τόσο μικρότερη θα είναι η διαφορά της υπολογιζόμενης τιμής από τη συσχέτιση από την πειραματική τιμή, από το οποίο συνεπάγεται μικρότερη διόρθωση της υπολογιζόμενης τιμής της συσχέτισης.



Εικόνα 1.2 : Ρύθμιση (tuning) συσχετίσεων

Οι πιο γνωστές συσχετίσεις (correlations) εκτίμησης των ιδιοτήτων του ρευστού του ταμειυτήρα είναι οι συσχετίσεις που αναπτύχθηκαν από τον Standing. Άλλες συσχετίσεις (correlations) που χρησιμοποιούνται και στο λογισμικό Mbal είναι αυτές των :

1. Lasater
2. Vazquez and Beggs
3. Glaso
4. Al – Marhoun
5. Petrosky
6. De Ghetto

(Elsharkawy, et al., 1995)

Το 2^ο υπολογιστικό θερμοδυναμικό μοντέλο είναι το Μοντέλο Ρευστού Πλήρους Σύστασης (Compositional Model). Η βασική υπόθεση είναι ότι τα συστατικά κατανέμονται τόσο στην υγρή όσο και στην αέρια φάση του ταμιευτήρα. Το συγκεκριμένο μοντέλο χρησιμοποιείται κυρίως :

1. Για ρευστά υψηλής πτητικότητας, όπως πολύ πτητικά πετρέλαια και αέρια συμπυκνώματα
2. Σε περιπτώσεις τριτογενούς παραγωγής, όπως σε ταμιευτήρα αερίου συμπυκνώματος που πραγματοποιείται η διαδικασία της ανακύκλωσης του ξηρού αερίου (δηλαδή του ξηρού μέρους του παραγόμενου αερίου)

Για τη μελέτη του ρευστού είναι αναγκαίο να γνωρίζουμε κάθε στιγμή τη σύστασή του.

Τα συγκεκριμένα μοντέλα βασίζονται στη χρήση καταστατικών εξισώσεων. Οι καταστατικές εξισώσεις είναι αναλυτικές εκφράσεις που συσχετίζουν την πίεση P και την θερμοκρασία T , με τον όγκο V . Χρησιμοποιούνται για τη μοντελοποίηση και την πρόβλεψη της θερμοδυναμικής κατάστασης του συστήματος. 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.

1.4 Μοντέλα υδροφόρων

Κατά την παραγωγή από έναν ταμιευτήρα πετρελαίου, πολύ σημαντικό ρόλο παίζει η ύπαρξη ή μη υδροφόρου ορίζοντα κοντά σε αυτόν. Ένας ταμιευτήρας ο οποίος δεν υφίσταται εισροή νερού ονομάζεται ογκομετρικός.

Οι περισσότεροι ταμιευτήρες πετρελαίου περικλείονται από πετρώματα που έχουν νερό και ονομάζονται υδροφορείς. Γενικότερα, η ύπαρξη νερού επηρεάζει σημαντικά τόσο τον ταμιευτήρα όσο και τις ιδιότητές του. Η διαφορά πίεσης μεταξύ ενός ταμιευτήρα υπό παραγωγή και του υδροφορέα δύναται να προκαλέσει εισροή νερού. (Tarek, 2018)

Σε ορισμένες περιπτώσεις, οι επιπτώσεις της εισροής νερού στον ταμιευτήρα μπορούν να αγνοηθούν. Τέτοια περίπτωση είναι όταν ο όγκος των πόρων του υδροφορέα είναι παρόμοιος με αυτόν του ταμιευτήρα, δηλαδή όταν η εισροή νερού είναι πολύ μικρή σε σύγκριση με την παραγωγή ρευστών. Ακόμη, κάτι αντίστοιχο μπορεί να συμβεί όταν η διαπερατότητα του υδροφορέα είναι πολύ χαμηλή ώστε να απαιτείται πολύ μεγάλη διαφορά πίεσης προτού διεισδύσει σημαντική ποσότητα νερού στον ταμιευτήρα υδρογονανθράκων. (Tarek, 2018)

Ένα πολύ σημαντικό θέμα προκύπτει όταν δεν είναι γνωστό αν σε ένα ταμιευτήρα υπάρχει ή όχι υποκείμενος ή γειτονικός υδροφορέας. Στο στάδιο της έρευνας, ανάλογες πληροφορίες από κοντινές γεωτρήσεις μπορούν να αποτελέσουν σοβαρές ενδείξεις. Κατά το στάδιο της παραγωγής το θέμα αυτό συνήθως αντιμετωπίζεται με γραφικές και αναλυτικές μεθόδους οι οποίες κάνουν χρήση υπαρχόντων δεδομένων αθροιστικής παραγωγής στην επιφάνεια πετρελαίου, αερίου και νερού σε δεδομένες πτώσεις πίεσης. Οι μέθοδοι αυτοί θα αναλυθούν στο κεφάλαιο 2. Τα χαρακτηριστικά ωστόσο ενός υδροφόρου προσδιορίζονται με τη χρήση διαφόρων μοντέλων υδροφόρων που είναι διαθέσιμα, όπως τα ακόλουθα (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

1.5 Θέματα που άπτονται της ροής των ρευστών μέσα στον ταμιευτήρα

1.5.1 Μοντέλα σχετικών διαπερατοτήτων

Η διαπερατότητα, το πόσο εύκολα κινείται δηλαδή το ρευστό εντός του ταμιευτήρα, έχει καθοριστικό ρόλο στην παραγωγή πετρελαίου και είναι ένα από τα βασικά πετροφυσικά δεδομένα που πρέπει να είναι γνωστά.

Όταν το πέτρωμα είναι πληρωμένο 100% από ένα ρευστό, τότε η διαπερατότητα χαρακτηρίζεται ως απόλυτη διαπερατότητα k . (Dandekar 2010) Στην περίπτωση όμως που υπάρχουν δύο ή και περισσότερα ρευστά, όπως νερό και πετρέλαιο, το κάθε ρευστό έχει τη δική του ενεργό διαπερατότητα $k_{e(o,w,g)}$. Οι σχετικές διαπερατότητες νερού και πετρελαίου k_{rw} και k_{ro} αντίστοιχα, ορίζονται ως ο λόγος της ενεργούς διαπερατότητας κάθε φάσης προς την απόλυτη. Σε αυτό το σημείο να αναφερθεί ότι η παρουσία ενός ρευστού δυσχεραίνει τη ροή του άλλου ρευστού.

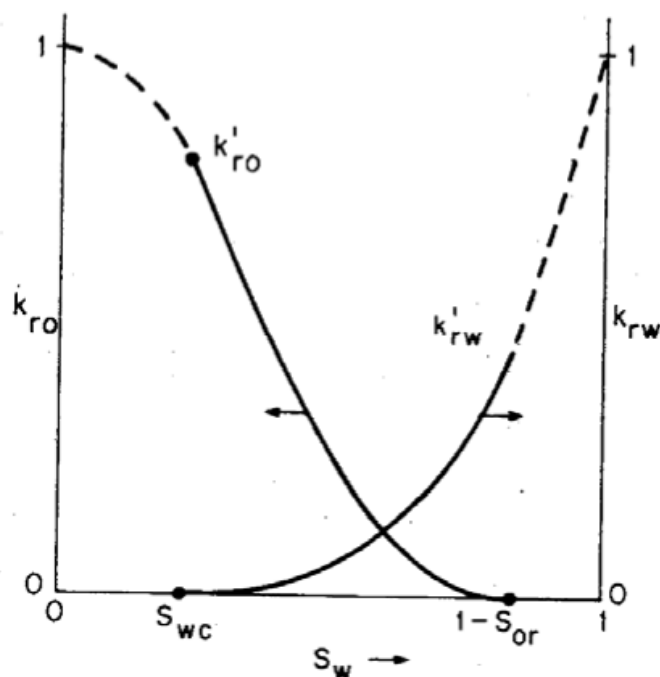
Έτσι, οι σχετικές διαπερατότητες είναι εξίσου σημαντικά δεδομένα διότι καθορίζουν την ογκομετρική παροχή των επιμέρους φάσεων. Οι σχετικές διαπερατότητες μετρούνται στο εργαστήριο μέσω εργαστηριακών πειραμάτων. Σε ορισμένες περιπτώσεις όμως, τα δεδομένα σχετικής διαπερατότητας είναι πιθανό να μην υπάρχουν οπότε οι τιμές της πρέπει να προσδιοριστούν με άλλο τρόπο. Τέτοιοι τρόποι είναι μαθηματικές συσχετίσεις που συνδέουν τον κορεσμό (σε αέριο, πετρέλαιο, νερό) με τη σχετική διαπερατότητα, όπως για παράδειγμα το μοντέλο των Brooks and Corey. (Corey, 1954)

Η γενική μορφή του μοντέλου Corey είναι (Petroleum Experts, 2018): $k_{rx} = E_x * \left(\frac{S_x - S_{rx}}{S_{mx} - S_{rx}}\right)^{n_x}$
όπου :

- E_x : το τελικό σημείο για τη φάση x
- n_x : 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

Ο κορεσμός ουσιαστικά εκφράζει το ποσοστό του όγκου των πόρων, ο οποίος καταλαμβάνεται από ένα συγκεκριμένο ρευστό το οποίο μπορεί να είναι νερό, πετρέλαιο ή αέριο. Πρακτικά όμως αποτελεί το πηλίκιο του ολικού όγκου των ρευστών ως προς τον όγκο των πόρων. (Ξανθοπούλου Παρασκευή, 2021)

Στο διάγραμμα της Εικόνας 1.3 απεικονίζεται ποιοτικά η σχέση του κορεσμού με τη σχετική διαπερατότητα στο σύστημα πετρελαίου - νερού.



Εικόνα 1.3 : Διάγραμμα σχετικών διαπερατοτήτων πετρελαίου (k_{ro}) και νερού (k_{rw}) προς τους αντίστοιχους κορεσμούς

Το σημείο S_{wc} αντιστοιχεί στον ελάχιστο βαθμό κορεσμού σε νερό, δηλαδή όταν το νερό είναι μόνο το ενδογενές και τότε μόνο η πετρελαϊκή φάση ρέει εντός του πορώδους μέσου. Στο σημείο αυτό, ο μέγιστος βαθμός κορεσμού σε πετρέλαιο ισούται με $(1 - S_{wc})$. Ειδικότερα, στο σημείο αυτό, 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 $1 - S_{or}$. 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.

1.5.2 Νόμος Darcy - Κλασματικές ροές

Ο νόμος του Darcy περιγράφει τη ροή ρευστών σε πορώδη μέσα. Η ροή των ρευστών του ταμειυτήρα από μια κυλινδρική ζώνη αποστράγγισης προς μια γεώτρηση χαρακτηρίζεται από το σύστημα ακτινικής ροής. Η ακτινωτή ροή χωρίζεται σε δύο κατηγορίες και ανάλογα με το αν υπάρχει ή όχι υδροφορέας χαρακτηρίζεται ως σταθερής και ψευδοσταθερής ροής. Σε αυτή την περίπτωση, η εξίσωση του Darcy περιγράφει μονοφασική ροή και έτσι η διαπερατότητα χαρακτηρίζεται ως απόλυτη διαπερατότητα. (Ahmed, 2009)

Στην περίπτωση πολυφασικής ροής, η έννοια της απόλυτης διαπερατότητας αλλάζει καθώς τώρα υπάρχουν περισσότερα από ένα ρευστά στον ταμιευτήρα και αντικαθίσταται από την ενεργό διαπερατότητα η οποία προσδιορίζεται από τις σχέσεις των σχετικών διαπερατοτήτων.

Οι κλασματικές ροές εκφράζουν το ποσοστό ενός ρευστού, από το σύνολο των ρευστών που ρέουν εντός του ταμιευτήρα.

Η κλασματική ροή του νερού (F_w) δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση :

$$F_w = \frac{q_w^{RC}}{q_w^{RC} + q_o^{RC}}$$

Η κλασματική ροή ουσιαστικά είναι ο διαχωρισμός ενός μείγματος στα συστατικά του ή σε κλάσματα και στη συγκεκριμένη περίπτωση η κλασματική ροή του νερού είναι ο διαχωρισμός του νερού από το πετρέλαιο σε συνθήκες επιφάνειας.

Αντίστοιχα, η κλασματική ροή του αερίου συμβολίζεται F_g , είναι ο διαχωρισμός του αερίου από το νερό και το πετρέλαιο και δίνεται από την ακόλουθη εξίσωση :

$$F_g = \frac{q_g^{RC}}{q_w^{RC} + q_g^{RC} + q_o^{RC}}$$

Κεφάλαιο 2 : Μέθοδος Ισοζυγίου Μάζας (Material Balance)

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται η Μέθοδος Ισοζυγίου Μάζας (Material Balance) συνοδευόμενο από την γενική μορφή της εξίσωσής του. Αρχικά, αναπτύσσεται η χρήση της μεθόδου για την εκτίμηση της κατάστασης του ταμειυτήρα αν δηλαδή είναι κορεσμένος ή μη και αν υπάρχει ή όχι υδροφορέας. Για το σκοπό αυτό έχουν αναπτυχθεί διάφορες γραφικές και αναλυτικές μέθοδοι οι οποίες παρουσιάζονται. Στη συνέχεια, αναπτύσσεται η χρήση της Μεθόδου Ισοζυγίου Μάζας για την πρόβλεψη της μελλοντικής παραγωγής από έναν ταμειυτήρα πετρελαίου καθώς αποτελεί μια από τις πιο χρήσιμες εφαρμογές της μεθόδου αυτής.

2.1 Ισοζύγιο Μάζας (Material Balance) πετρελαίου

Η απλούστερη προσέγγιση της προσομοίωσης και της εκτίμησης της απόδοσης ταμειυτήρων επιτυγχάνεται με τη Μέθοδο Ισοζυγίου Μάζας (Material Balance). Η μέθοδος αυτή λαμβάνει υπόψη όλα τα δεδομένα παραγωγής που έχουν συλλεχθεί κατά τη διάρκεια μιας χρονικής περιόδου, κατά την οποία το κοίτασμα παρήγαγε, αλλά και τα δεδομένα των ιδιοτήτων των ρευστών που υπάρχουν μέσα στον ταμειυτήρα.

Η εξίσωση του ισοζυγίου μάζας αποτελεί την έκφραση της διατήρησης της μάζας των φάσεων (υγρό, νερό, αέριο) που συνυπάρχουν σε ένα κοίτασμα. Έτσι, η ποσότητα του ρευστού που παραμένει στον ταμειυτήρα, μετά από ένα χρονικό διάστημα παραγωγής, ισούται με την ποσότητα του ρευστού που αρχικά υπήρχε σε αυτόν μείον την ποσότητα που αφαιρέθηκε από τον ταμειυτήρα λόγω της παραγωγής και την ποσότητα του ρευστού που προστίθεται λόγω έγχυσης αερίου ή φυσικής εισροής νερού στο κοίτασμα.

Επίσης, η εξίσωση ισοζυγίου μάζας παρουσιάζεται με τη μορφή ογκομετρικού ισοζυγίου, καθώς οι ποσότητες εκφράζονται σε όγκους και όχι σε μάζες.

Όπως έχει αναφερθεί, με την παραγωγή ρευστού στην επιφάνεια, η πίεση μειώνεται. Στην πραγματικότητα, η πτώση πίεσης πραγματοποιείται λόγω μεταφοράς μάζας, ωστόσο περιγράφεται ισοδύναμα μέσω της θεωρητικής αύξησης του όγκου του ταμειυτήρα.

Η θεωρητική αύξηση του όγκου οφείλεται στα εξής φαινόμενα:

- I. Oil expansion → αποτελεί τον επιπλέον όγκο που καταλαμβάνει το πετρέλαιο λόγω εκτόνωσης, μαζί με το διαλυμένο σε αυτό αέριο.
- II. Gas expansion → αντιπροσωπεύει τον επιπρόσθετο όγκο της ζώνης αερίου που δημιουργείται λόγω εκτόνωσης του αερίου.
- III. Water expansion + Incoming water → αποτελούν τους επιπρόσθετους όγκους του υδροφορέα λόγω εκτόνωσης και εισροής επιπρόσθετου νερού από υδροφορέα.

Έτσι, το ογκομετρικό ισοζύγιο μπορεί να εκφραστεί σε συνθήκες ταμειυτήρα ως εξής :
Αντλούμενος όγκος = συνολική εκτόνωση + φυσική εισροή νερού (Dake, 1978)

Η γενική μορφή της εξίσωσης ισοζυγίου μάζας (Material Balance) είναι η ακόλουθη (Σταματάκη, 2004):

$$N_p * (B_o + (R_p - R_s) * B_g) + W_p * B_w \\ = N * B_{oi} * \left(\frac{(B_o - B_{oi}) + (R_{si} - R_s) * B_g}{B_{oi}} + m * \left(\left(\frac{B_g}{B_{gi}} \right) - 1 \right) + (1 + m) \right) \\ * \left(\frac{c_w * S_{wc} + c_f}{(1 - S_{wc})} \right) * \Delta p) + W_e * B_w$$

όπου :

N_p : Αθροιστική παραγωγή πετρελαίου στην επιφάνεια

B_o : Ογκομετρικός συντελεστής πετρελαίου

B_g : Ογκομετρικός συντελεστής αερίου

B_w : Ογκομετρικός συντελεστής νερού

R_p : Αθροιστικός λόγος παραγόμενου αερίου προς παραγόμενο πετρέλαιο

R_s : Λόγος διαλυμένου αερίου προς πετρέλαιο

N : Όγκος αρχικών επί τόπου αποθεμάτων πετρελαίου

W_p : Αθροιστική παραγωγή νερού στην επιφάνεια

W_e : Φυσική εισροή νερού από τον υδροφόρο ορίζοντα για πτώση πίεσης ΔP

m : Λόγος αερίου/ πετρελαίου αρχικά στον ταμιευτήρα

c_w : Συμπιεστότητα νερού

c_f : Συμπιεστότητα πόρων πετρώματος

S_{wc} : Κορεσμός σε ενδογενές νερό

Η ισοδύναμη συμπαγής μορφή της εξίσωσης ισοζυγίου μάζας είναι η ακόλουθη (Havlena & Odeh, 1963) :

$$F = N * (E_o + m * E_g + (1 + m) * E_{fw}) + W_e = N * E_t + W_e$$

όπου :

F : όγκος παραγωγής στην επιφάνεια σε συνθήκες ταμιευτήρα

N : ο όγκος των αποθεμάτων πετρελαίου σε συνθήκες επιφάνειας

m : ο λόγος του όγκου αερίου προς τον όγκο πετρελαίου αρχικά στον ταμιευτήρα

E_o : ο όρος εκτόνωσης του πετρελαίου και του διαλυμένου αερίου σε αυτό

E_g : ο όρος εκτόνωσης του ελεύθερου αερίου

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

W_e : το νερό που εισέρχεται στον ταμειυτήρα από εξωτερική πηγή

Σύμφωνα λοιπόν με την ισοδύναμη συμπαγή μορφή της εξίσωσης του ισοζυγίου μάζας, ισχύει ότι :

$$\left(N * \frac{E_o}{F}\right) + \left(N * m * \frac{E_g}{F}\right) + \left(N * (1 + m) * \frac{E_{fw}}{F}\right) + \left(\frac{W_e}{F}\right) = 1$$

Οι μηχανισμοί παραγωγής (δείκτες) όπως φαίνεται και από την παραπάνω εξίσωση είναι τέσσερις και το άθροισμά τους (η μονάδα) εκφράζει το 100% των μηχανισμών που συμμετέχουν στην εκάστοτε παραγωγή. Αυτοί πιο συγκεκριμένα είναι :

1. $DDI = N * E_o / F \rightarrow$ Εκτόνωση πετρελαίου και διαλυμένου αερίου (DDI : Depletion Drive Index)
2. $SDI = N * m * E_g / F \rightarrow$ Εκτόνωση υπερκείμενης ζώνης αερίου (SDI : Segregation Drive Index)
3. $CDI = N * (1 + m) * E_{fw} / F \rightarrow$ Εκτόνωση ενδογενούς νερού και μείωση του όγκου των πόρων του σχηματισμού (CDI : Formation and Connate Water Compressibility Index)
4. $WDI = W_e / F \rightarrow$ Συμμετοχή υδροφορέα (WDI : Water Drive Index)

2.2 Εκτίμηση της κατάστασης του ταμειυτήρα

Η εκτίμηση της κατάστασης του ταμειυτήρα είναι 1η φάση εφαρμογής του ισοζυγίου μάζας, όπου υπολογίζεται ο αρχικός όγκος υδρογονανθράκων στον ταμειυτήρα, διαπιστώνεται η ύπαρξη ή μη του υδροφορέα, αν υπάρχει, υπολογίζεται η εισροή νερού και αν είναι κορεσμένος ή μη.

Σε αυτή τη φάση λοιπόν, για να προσδιοριστούν τα προαναφερθέντα, χρησιμοποιούνται κάποιες γραφικές και αναλυτικές μεθόδους. Πιο συγκεκριμένα, μέσω των γραφικών προσδιορίζονται οι επιμέρους όροι της εξίσωσης ισοζυγίου μάζας (Material Balance) και εξαγονται συμπεράσματα για την κατάσταση του ταμειυτήρα. Η αναλυτική μέθοδος από την άλλη, χρησιμοποιεί τα ιστορικά δεδομένα της παραγωγής, ώστε να ελέγξει και αν τυχόν χρειαστεί, να διορθώσει τις αρχικές υποθέσεις για την κατάσταση του ταμειυτήρα.

2.2.1 Γραφικές μέθοδοι για ταμειυτήρες πετρελαίου

Οι γραφικές μέθοδοι για ταμειυτήρες πετρελαίου όπως αναφέρθηκε, προσδιορίζουν επιμέρους όρους της εξίσωσης δηλαδή προσδιορίζουν τους μηχανισμούς παραγωγής που επικρατούν στον ταμειυτήρα. Οι γραφικές μέθοδοι χρησιμοποιούν τα διαγράμματα που έχουν αναπτυχθεί από διάφορες μεθοδολογίες που έχουν εφαρμοστεί όπως (Petroleum Experts, 2018) :

- ✓ Havlena – Odeh
- ✓ Διάγραμμα Campbell
- ✓ Διάγραμμα Energy plot
- ✓ Βοηθητικό διάγραμμα - Διάγραμμα σύγκρισης GOR με Solution GOR (ή Rs)

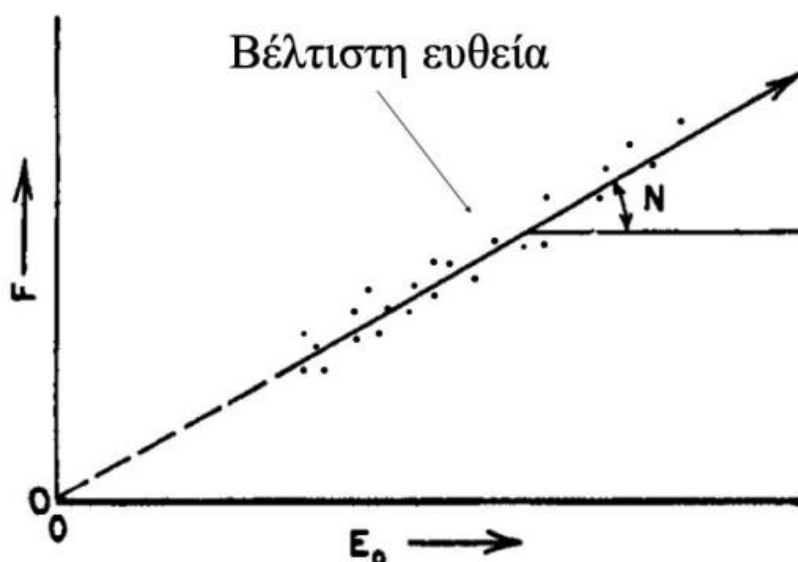
Τα οποία παρουσιάζονται στη συνέχεια.

2.2.1.1 Μέθοδος Havlena Odeh

Η μέθοδος **Havlena – Odeh** ερμηνεύει γραφικά την εξίσωση ισοζυγίου μάζας (material balance) ως ευθεία γραμμή. Εφαρμόζεται για διαδοχικά διαστήματα πτώσης πίεσης με αφετηρία πάντα την αρχική πίεση των ιστορικών δεδομένων παραγωγής και κάθε επόμενη πίεση. Παρακάτω παρουσιάζονται οι περιπτώσεις για ακόρεστο – ογκομετρικό ταμιευτήρα και για κορεσμένο – ογκομετρικό ταμιευτήρα.

❖ Για ταμιευτήρα ογκομετρικό και ακόρεστο :

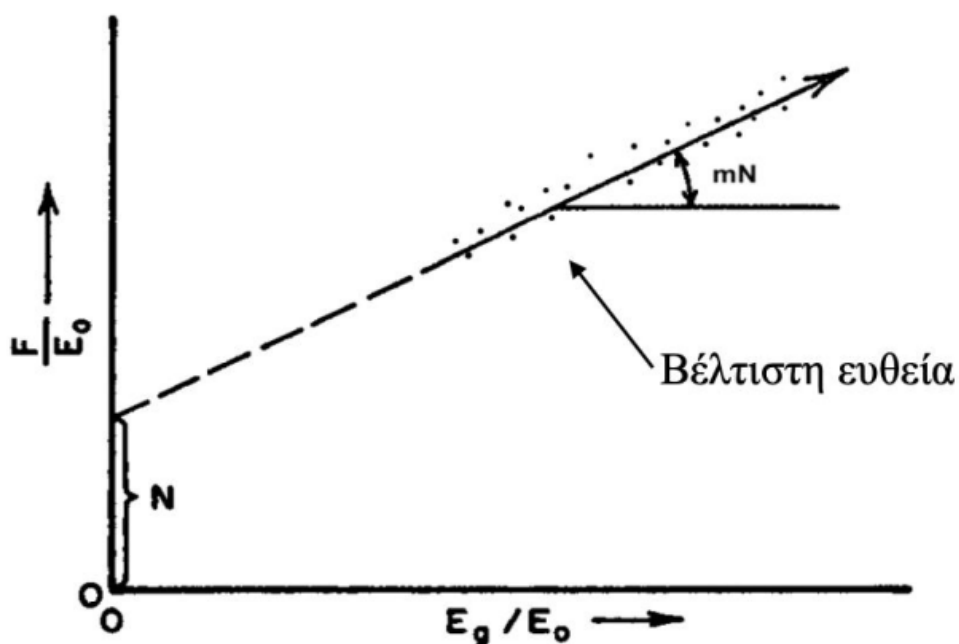
Ο όρος ακόρεστος ταμιευτήρας σημαίνει ότι $P > P_{bp}$, δηλαδή δεν υπάρχει ελεύθερο αέριο στον ταμιευτήρα, ενώ με τον όρο ογκομετρικό θεωρείται ότι δεν υπάρχει εισροή νερού από υδροφορέα. Συνεπώς, $m = W_e = 0$ οπότε η ισοδύναμη συμπαγής μορφή της εξίσωσης ισοζυγίου μάζας διαμορφώνεται ως εξής : $F = N * E_t = N * E_o$, η οποία είναι εξίσωση της μορφής $y = ax$. Η κλίση της ευθείας που θα διέρχεται από τα σημεία ισούται με τα αποθέματα N , όπως μπορεί να διαπιστωθεί στο διάγραμμα της Εικόνας 2.1.



Εικόνα 2.1 : Διάγραμμα F-E_o, για ακόρεστο ογκομετρικό ταμιευτήρα

❖ Για ταμιευτήρα ογκομετρικό και κορεσμένο :

Ο όρος κορεσμένος ταμιευτήρας σημαίνει ότι $P < P_{bp}$, δηλαδή υπάρχει ελεύθερο αέριο στον ταμιευτήρα, ενώ ο ογκομετρικός ότι δεν υπάρχει εισροή νερού από υδροφορέα. Συνεπώς, $W_e = 0$ οπότε η ισοδύναμη συμπαγής μορφή της εξίσωσης ισοζυγίου μάζας διαμορφώνεται ως εξής : $F = N * E_t = N * (E_o + m * E_g) \Rightarrow \frac{F}{E_o} = N + m * N * \left(\frac{E_g}{E_o}\right)$, η οποία είναι εξίσωση της μορφής $y = ax + b$. Η κλίση της ευθείας που θα διέρχεται από τα σημεία ισούται με τα αποθέματα $m * N$, όπως φαίνεται στο διάγραμμα της Εικόνας 2.2.

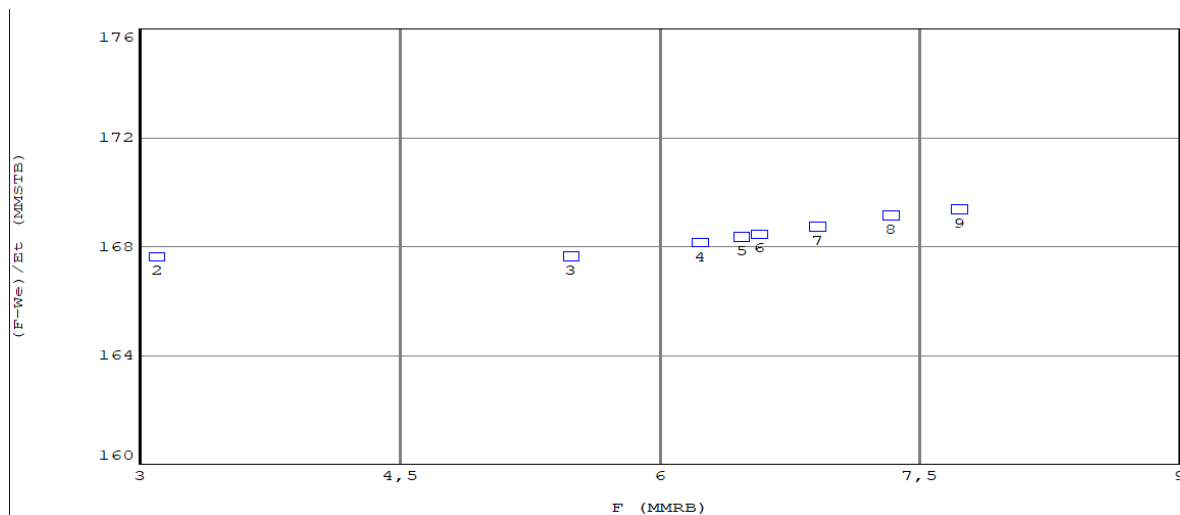


Εικόνα 2.2 : Διάγραμμα $F/E_0 - E_g/E_0$ για κορεσμένο ογκομετρικό ταμιευτήρα

2.2.1.2 Διάγραμμα Campbell

Μέσω του διαγράμματος **Campbell** που αναφέρθηκε, διαπιστώνεται η ύπαρξη ή μη υδροφορέα, ο οποίος είναι πιθανό να επηρεάζει τον ταμιευτήρα. Στο διάγραμμα του Campbell απεικονίζονται στον άξονα X ο όγκος προϊόντων επιφανείας (F) σε συνθήκες ταμιευτήρα και στον άξονα γ ο λόγος (F/E_t) του όγκου των προϊόντων επιφανείας, σε συνθήκες ταμιευτήρα, ως προς τον δείκτη ολικής εκτόνωσης (Εικόνα 2.3). Στην αρχή γίνεται η υπόθεση ότι δεν υπάρχει υδροφορέας ($W_e = 0$). Αν λοιπόν, στο διάγραμμα προκύψει μια οριζόντια γραμμή τότε πράγματι η υπόθεση ήταν σωστή δηλαδή ότι ο ταμιευτήρας είναι ογκομετρικός, αν όμως προκύψει κάτι διαφορετικό, τότε υπάρχει μια μη υπολογισμένη πηγή ενέργειας η οποία θα προέρχεται από την επίδραση υδροφορέα. Εκτός όμως από τη διαπίστωση ύπαρξης ή μη υδροφορέα μέσω του διαγράμματος Campbell, στην περίπτωση που υπάρχει υδροφορέας μπορεί να καθοριστεί και η ισχύς του.

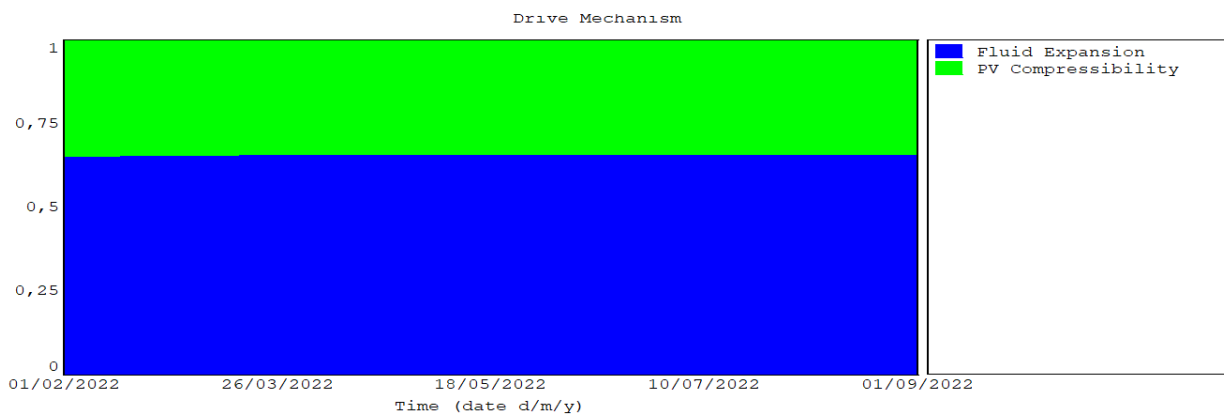
Ένα τυπικό παράδειγμα ογκομετρικού ταμιευτήρα είναι της Εικόνας 2.3.



Εικόνα 2.3 : Διάγραμμα Campbell, επιβεβαιώνει ότι δεν υπάρχει υδροφόρος (ογκομετρικός ταμιευτήρας)

2.2.1.3 Διάγραμμα Energy Plot

Το **Energy Plot** είναι ένα διάγραμμα που απεικονίζει το βαθμό συμμετοχής του κάθε μηχανισμού παραγωγής. Οι δείκτες συμμετοχής του κάθε μηχανισμού στην παραγωγική διαδικασία, όπως παρουσιάστηκαν στην ενότητα 2.1, απεικονίζονται στο διάγραμμα αυτό ως stacked plots ως προς τον χρόνο ή την πίεση όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.4 όπου συγκεκριμένα παρουσιάζεται ένα τυπικό παράδειγμα Energy Plot χωρίς υδροφορέα.



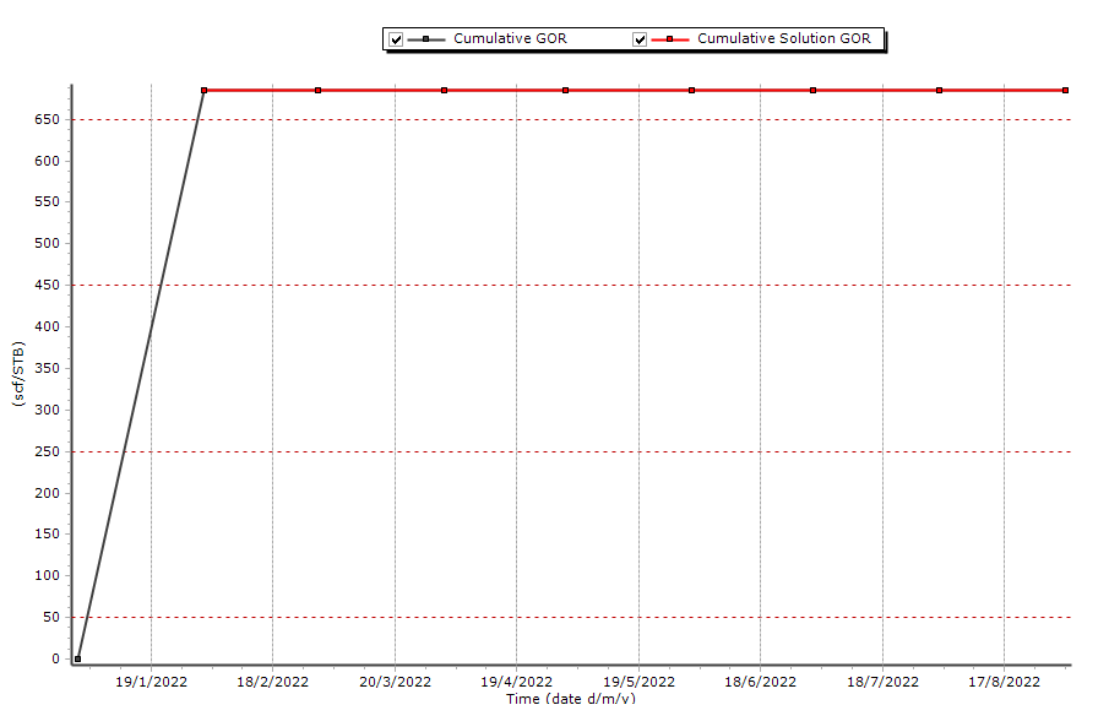
Εικόνα 2.4 : Διάγραμμα Energy Plot, περιγράφει τη συμμετοχή του κάθε μηχανισμού παραγωγής ως προς τον χρόνο

2.2.1.4 Διάγραμμα σύγκρισης GOR με R_s

Το **διάγραμμα σύγκρισης GOR με Solution GOR (ή R_s)** είναι ένα βοηθητικό διάγραμμα το οποίο επιβεβαιώνει αν η αρχική υπόθεση να είναι ακόρεστος ή κορεσμένος ο ταμιευτήρας είναι σωστή ή όχι. Με τη χρήση ιστορικών δεδομένων παραγωγής είναι διαθέσιμο το GOR σε σχέση με τον χρόνο, ενώ από πειραματικές μετρήσεις είναι διαθέσιμη η ογκομετρική παράμετρος R_s του πετρελαϊκού ρευστού. Έτσι, αν $GOR = R_s$ τότε η αρχική υπόθεση ότι ο

ταμειυτήρας είναι ακόρεστος είναι σωστή. Αν όμως αποκλίνουν και το R_s μειώνεται, τότε ο ταμειυτήρας είναι κορεσμένος και άρα $P < P_{bp}$.

Ένα τυπικό παράδειγμα ακόρεστου ταμειυτήρα αποτυπώνεται στην Εικόνα 2.5.



Εικόνα 2.5 : Βοηθητικό διάγραμμα σύγκρισης GOR και R_s σε σχέση με τον χρόνο

2.2.2 Αναλυτικές μέθοδοι

Οι αναλυτικές, σε αντίθεση με τις γραφικές επιλύουν την εξίσωση του ισοζυγίου μάζας. Συγκεκριμένα επιλύει το ισοζύγιο μάζας ως προς την παραγωγή πετρελαίου N_p θεωρώντας δεδομένες, επομένως και σωστές, τις εκτιμήσεις όλων των μεγεθών, δηλαδή των χαρακτηριστικών του ταμειυτήρα (N , m , W_e) και των δεδομένων παραγωγής (G_p , W_p , P). Έτσι, αν γίνει σύγκριση του N_p που υπολογίστηκε και του N_p από τα ιστορικά δεδομένα και είναι ίσα τότε όλες οι υποθέσεις των παραμέτρων του μοντέλου είναι σωστές, αν όμως υπάρχει διαφορά τότε κάποιες από τις παραμέτρους είναι λανθασμένες. Οι παράμετροι οι οποίες είναι πιο πιθανό να είναι λανθασμένες είναι η εκτίμηση για τον υδροφορέα (W_e), το αέριο κάλυμμα του ταμειυτήρα (m) και τα αποθέματα (N). Για να προσδιοριστούν οι άγνωστες παράμετροι χρησιμοποιείται η μέθοδος παλινδρόμησης, η οποία περιγράφεται στο κεφάλαιο 3.

2.3 Πρόβλεψη μελλοντικής παραγωγής

Η πρόβλεψη της μελλοντικής παραγωγής αποτελεί μια από τις πιο χρήσιμες εφαρμογές της μεθόδου ισοζυγίου μάζας. Η μέθοδος υπολογισμού της μελλοντικής παραγωγής απαιτεί την ταυτόχρονη χρήση της εξίσωσης ισοζυγίου μάζας και της εξίσωσης ροής Darcy, κυρίως μέσω της έννοιας της κλασματικής ροής όπως παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 1. Ο συνδυασμός των

δύο εξισώσεων επιτρέπει την πρόβλεψη της μελλοντικής παραγωγής του ταμειυτήρα σε συνάρτηση με τον χρόνο. Χωρίς την εισαγωγή της έννοιας της ροής του ρευστού, μέσω του νόμου του Darcy, η μέθοδος παρέχει απλώς την παραγωγή συναρτήσει της μέσης πίεσης του ταμειυτήρα, όχι του χρόνου. Σε αυτό το στάδιο οι παραγωγές πετρελαίου, αερίου και νερού N_p , G_p , W_p , αντίστοιχα, είναι τα ζητούμενα, σε σχέση με την πρώτη φάση χρήσης του ισοζυγίου μάζας για την εκτίμηση της κατάστασης του ταμειυτήρα και των χαρακτηριστικών, όπου τα μεγέθη αυτά ήταν δεδομένα από τα ιστορικά δεδομένα παραγωγής.

Τα γενικά βήματα είναι ότι χαρακτηρίζεται μια τιμή πίεσης ως τρέχουσα και μια άλλη τιμή ως μελλοντικό βήμα πίεσης. Για τις πιέσεις αυτές το υπολογιστικό θερμοδυναμικό μοντέλο που χρησιμοποιείται υπολογίζει τις PVT ιδιότητες του ρευστού και με τη χρήση των εξισώσεων του ισοζυγίου μάζας και του νόμου του Darcy υπολογίζονται οι μελλοντικές τιμές N_p , G_p και W_p στην πίεση που καθορίστηκε. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται για κάθε επόμενο βήμα πίεσης.

➤ Για ακόρεστο ταμειυτήρα :

Σε αυτή την περίπτωση υπάρχει μόνο υγρή φάση (πετρέλαιο, νερό) στον ταμειυτήρα οπότε πρέπει να υπολογιστούν οι τιμές των N_p , G_p και W_p . Θα χρησιμοποιηθεί η εξίσωση της κλασματικής ροής του νερού που αναφέρθηκε στην ενότητα 1.6 και μέσω αυτής θα προκύψουν τα μεγέθη N_p και W_p τα οποία αυτά ενδιαφέρουν.

$$F_w = \frac{q_{w(RC)}}{q_{w(RC)} + q_{o(RC)}} = (k_w/\mu_w) / \left(\left(\frac{k_w}{\mu_w} \right) + \left(\frac{k_o}{\mu_o} \right) \right)$$

$$F_w = \frac{q_{w(RC)}}{q_{w(RC)} + q_{o(RC)}} = q_w * \frac{B_w}{((q_w * B_w) + (q_o * B_o))} = \frac{\left(\frac{W_p W_p}{\Delta t} \right) * B_w}{\left(\left(\frac{W_p}{\Delta t} * B_w \right) + \frac{N_p}{\Delta t} * B_o \right)} = W_p * \frac{B_w}{(W_p * B_w) + (N_p * B_o)}$$

Σύμφωνα με τη μέθοδο του Corey, που αναπτύχθηκε στο κεφάλαιο 1, εφόσον είναι γνωστοί οι κορεσμοί $S_{o,w}$ από τα δεδομένα κατά τη διάρκεια της παραγωγής, μπορούν να υπολογιστούν οι σχετικές διαπερατότητες $k_{r(o,w)}$. Έτσι, από τις παραπάνω εξισώσεις οι μόνοι άγνωστοι είναι τα ζητούμενα N_p και W_p .

Τέλος, για τον υπολογισμό του G_p χρησιμοποιείται η εξίσωση : $G_p = N_p * R_s$, όπου επειδή ο ταμειυτήρας όπως αναφέρθηκε είναι ακόρεστος ισχύει ότι $R_s = GOR$, όπου το R_s αποτελεί γνωστή τιμή από τις PVT ιδιότητες και το N_p υπολογίζεται από τις παραπάνω εξισώσεις.

➤ Για κορεσμένο ταμειυτήρα :

Σε αυτή την περίπτωση υπάρχει πετρέλαιο, αέριο και νερό στον ταμειυτήρα οπότε πρέπει να υπολογιστούν οι τιμές των N_p , G_p και W_p . Τώρα, εκτός από την εξίσωση κλασματικής ροής του νερού που χρησιμοποιήθηκε προηγουμένως, θα χρησιμοποιηθεί και η εξίσωση της κλασματικής ροής του αερίου. Πιο συγκεκριμένα,

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

$$F_g = \frac{q_g^{RC}}{q_w^{RC} + q_g^{RC} + q_o^{RC}} = q_g * \frac{B_g}{q_w * B_w + q_g * B_g + q_o * B_o}$$

$$= G_p * \frac{B_g}{(W_p * B_g + G_p * B_g + N_p * B_o)}$$

Έτσι, υπολογίζονται οι τιμές των N_p , G_p και W_p .

Κεφάλαιο 3 : Λογισμικό Mbal

Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται αναλυτική παρουσίαση του λογισμικού Mbal και εφαρμόζεται τόσο η γραφική όσο και η αναλυτική μέθοδος σε ταμειυτήρα πετρελαίου. Επίσης, γίνεται αναφορά στα δεδομένα που πρέπει να οριστούν για να γίνει η πρόβλεψη μελλοντικής παραγωγής.

3.1 Επεξήγηση προγράμματος - Εισαγωγή δεδομένων

Οι Petroleum Experts ανέπτυξαν το λογισμικό Integrated Production Modeling Software (IPM). Το συγκεκριμένο λογισμικό μοντελοποιεί το σύστημα παραγωγής πετρελαίου και φυσικού αερίου περιλαμβάνοντας τις δεξαμενές και το επιφανειακό δίκτυο.

Τα εργαλεία τα οποία βοηθούν στη μοντελοποίηση είναι πολλά και ένα από αυτά είναι το Mbal για το οποίο γίνεται λόγος στην παρούσα διπλωματική. Έτσι, μέσω αυτών των εργαλείων δίνεται η δυνατότητα στον μηχανικό να σχεδιάσει ολοκληρωμένα μοντέλα πεδίου. Η IPM εκτός από την μοντελοποίηση, βελτιστοποιεί κιόλας την παραγωγή και το σύστημα έγχυσης νερού ή αερίου. Συνοψίζοντας, η IPM είναι η μοναδική προσέγγιση παγκόσμιας βελτιστοποίησης μέσω της οποίας, ο μηχανικός μπορεί να καθορίσει τη βέλτιστη ρύθμιση για τη μέγιστη παραγωγή και τα έσοδα, έχοντας υπόψιν όλους τους περιορισμούς που υπάρχουν στο σύστημα. (Χριστίδη Βασιλική Λουίζα, 2022)

Όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενα κεφάλαια, στην παρούσα διπλωματική γίνεται λόγος για το εργαλείο MBAL. Ειδικότερα, το MBAL είναι η μέθοδος μοντελοποίησης η οποία χρησιμοποιείται περισσότερο από όλες στην βιομηχανία. Οι δύο βασικοί λόγοι είναι ότι εκτιμάει την κατάσταση του ταμειυτήρα προσδιορίζοντας την ύπαρξη ή μη του υδροφορέα, αερίου καλύμματος και ότι προβλέπει την μελλοντική παραγωγή. Όπως θα εξηγηθεί και στη συνέχεια, το λογισμικό λειτουργεί σε τρία στάδια :

1. Εισαγωγή δεδομένων
2. Ταύτιση ιστορικών δεδομένων με το μοντέλο που δημιουργείται
3. Πρόβλεψη μελλοντικής παραγωγής

Αρχικά, όπως σε κάθε λογισμικό έτσι και στο MBAL πρέπει να εισαχθούν τα δεδομένα. Το 1^ο βήμα λοιπόν, είναι η επιλογή του Material balance ως εργαλείο.

Στη συνέχεια, από τα options γίνεται η προετοιμασία του επιθυμητού θερμοδυναμικού μοντέλου, αν δηλαδή θα είναι το Μοντέλο Μαύρου Πετρελαίου (Black Oil Model) ή το Μοντέλο Πλήρους Σύστασης (Compositional Model).

The image shows a software dialog box titled "System Options". At the top, there are three buttons: "Done" (with a green checkmark), "Cancel" (with a red X), and "Help" (with a question mark). Below this, the dialog is divided into two main sections: "Tool Options" and "User Information".

Tool Options:

- Reservoir Fluid: Oil (selected in a dropdown menu)
- Tank Model: Single Tank (selected in a dropdown menu)
- PVT Model: Simple PVT (selected in a dropdown menu)
- Production History: By Tank (selected in a dropdown menu)
- Compositional Model: None (selected in a dropdown menu)

Below these options is a button labeled "EOS Model Setup...".

User Information:

This section contains five text input fields: "Company", "Field", "Location", "Platform", and "Analyst".

Below the input fields is a "Reference Time" field with the value "01/01/1900" and the label "date d/m/y".

At the bottom of the dialog, there is a "User Comments" area with a "Date Stamp" button and the instruction "(Ctrl+Enter for new line)".

Εικόνα 3.1 : Εισαγωγή επιλογών για το ρευστό του ταμιευτήρα (πετρέλαιο) και χρήσης του Black Oil Model

Επιλέγοντας το Μοντέλο Μαύρου Πετρελαίου (Black oil model), το επόμενο βήμα είναι η εισαγωγή των δεδομένων σχετικά τις ιδιότητες του ρευστού. Πιο συγκεκριμένα, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3.2 εισάγονται οι τιμές για :

- GOR
- Σχετική πυκνότητα πετρελαίου
- Σχετική πυκνότητα αερίου
- Αλατότητα νερού
- Σύσταση (% moles) στα συστατικά H_2S , CO_2 , N_2

Oil - Black Oil: Data Input

Done
 Cancel
 Help
 Match
 Table
 Import
 Export
 Calc
 Match Param.

Input Parameters

Formation GOR: 500 scf/STB
 Oil gravity: 39 API
 Gas gravity: 0,798 sp. gravity
 Water salinity: 100 ppm
 Mole percent H2S: 0 percent
 Mole percent CO2: 0 percent
 Mole percent N2: 0 percent

Separator

Single-Stage

Correlations

Pb,Rs,Bo

Glaso

Oil Viscosity

Beal et al

Use Tables
 Use Matching
 Controlled Miscibility

Εικόνα 3.2 : Εισαγωγή δεδομένων που αφορά τις ιδιότητες του ρευστού

Στη συνέχεια, ακολουθεί η αντιστοίχιση των διαθέσιμων δεδομένων από την παραγωγική μονάδα με τα δεδομένα που λαμβάνονται από το εργαστήριο PVT. Αρχικά, τα δεδομένα του εργαστηρίου PVT εισήχθησαν, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.3.

- Θερμοκρασία
- Πίεση στο σημείο κορεσμού (bubble point)
- Ογκομετρικός συντελεστής πετρελαίου
- Ιξώδες

Oil - Black Oil: Matching

Done
 Cancel
 Help
 Match
 Reset
 Import
 Export
 Plot
 Copy

Temperature: 250 deg F

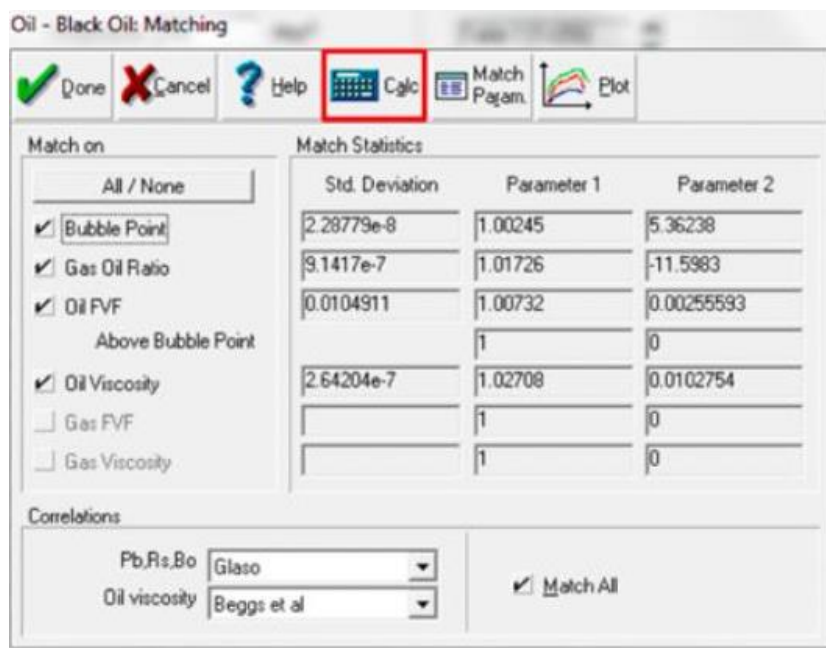
Bubble Point: 2200 psig

Table 1 (T=250)

	Pressure	Gas Oil Ratio	Oil FVF	Oil Viscosity	Gas FVF	Gas Viscosity
	psig	scf/STB	RB/STB	centipoise	ft3/scf	centipoise
1	2200	500	1,32	0,4		
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						
11						
12						

Εικόνα 3.3 : Εισαγωγή δεδομένων που αφορά τις ιδιότητες του ρευστού με χρήση συσχετίσεων

Στη συνέχεια, επιλέγονται οι τιμές των ιδιοτήτων που θεωρούνται αξιόπιστες. Σε αυτή την περίπτωση επιλέγεται το Bubble Point, το GOR, το Oil FVF και το Oil Viscosity όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3.4. Έτσι, πραγματοποιούνται διορθώσεις των τιμών, μέσω των παραμέτρων, οι οποίες έχουν υπολογιστεί από τις συσχετίσεις, γνωρίζοντας τις εργαστηριακές τιμές.



Εικόνα 3.4 : Εισαγωγή δεδομένων που αφορούν τις ιδιότητες του ρευστού

Οι συσχετίσεις ρυθμίζονται ως προς τις δύο παραμέτρους (πολλαπλασιαστική και μεταθετική) για να προσαρμοστούν στα διαθέσιμα PVT δεδομένα. Έτσι, επιλέγονται οι συσχετίσεις των Glaser και Beggs, καθώς γι' αυτές η πολλαπλασιαστική είναι πιο κοντά στη μονάδα και η μεταθετική πιο κοντά στο μηδέν αντίστοιχα.

Σε περίπτωση που υπάρχουν περισσότερα διαθέσιμα PVT δεδομένα αντί για τις συσχετίσεις, μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι πίνακες (tables) όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.5.

Oil - Flash PVT Table

Done
 Cancel
 Help
 Reset
 Import
 Export
 Plot
 Copy

Temperature deg F
 Table 1 (T=245)

Bubble Point psig

	Pressure	Gas Oil Ratio	Oil FVF	Oil Viscosity	Gas FVF	Gas Viscosity	Water FVF
	psig	scf/STB	RB/STB	centipoise	ft ³ /scf	centipoise	RB/STB
1	5735	685	1,4255	0,55			
2	5000	685	1,43447	0,55			
3	4000	685	1,44707	0,55			
4	2970	685	1,46081	0,55			
5	2045	685	1,47423	0,55			
6	1490	685	1,48345	0,55			
7	1317	685	1,487	0,55			
8	1100	583,065	1,43424	0,57			
9	855	465,035	1,37523	0,69			
10	607	328,227	1,30548	0,72			
11	350	152,076	1,2116	0,98			
12	152	-16,9212	1,11056	1,26			

Interpolate Bg as 1/B

Εικόνα 3.5 : Εισαγωγή δεδομένων που αφορά τις ιδιότητες του ρευστού με χρήση πινάκων

Έχοντας ολοκληρώσει την εισαγωγή δεδομένων για τις ιδιότητες του ρευστού, το επόμενο βήμα είναι η εισαγωγή των παραμέτρων του ταμειυτήρα.

Αναλυτικότερα, τα χαρακτηριστικά που εισάγονται είναι τα ακόλουθα :

- Θερμοκρασία
- Αρχική πίεση
- Πορώδες
- Κορεσμός ενδογενούς νερού
- Λόγος m
- Όγκος αρχικών αποθεμάτων πετρελαίου N
- Ημερομηνία έναρξης παραγωγής

Tank Input Data - Tank Parameters

Done Cancel Help Import

Tank Parameters	Water Influx	Rock Compress.	Rock Compaction	Pore Volume vs Depth	Relative Permeability	Production History
Tank Type: Oil Name: Tank01 Temperature: 250 deg F Initial Pressure: 4000 psig Porosity: 0,23 fraction Connate Water Saturation: 0,15 fraction Water Compressibility: Use Corr 1/psi Gas Cap (downhole ratio): 0 Original Oil In Place: 186 MMSTB Start of Production: 01/01/2001 date d/m/y	<input type="checkbox"/> Monitor Contacts <input type="checkbox"/> Gas Coning <input type="checkbox"/> Water Coning <input type="checkbox"/> Use Fractional Flow Table (instead of rel perms) <input type="checkbox"/> Enter Gas Cap as Surface Volume	<input type="button" value="Calculate Pb..."/>				

Εικόνα 3.6 : Εισαγωγή παραμέτρων που αφορούν τα πετροφυσικά χαρακτηριστικά του ταμειυτήρα και τις γεωλογικές εκτιμήσεις

Στην Εικόνα 3.7 γίνεται η επιλογή του μοντέλου υδροφορέα, αν υπάρχει.

Δεδομένου ότι δεν είναι γνωστό εάν υπάρχει υδροφορέας, η υπόθεση που γίνεται είναι ότι δεν υπάρχει κίνηση νερού.

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: None					

Εικόνα 3.7 : Εισαγωγή μοντέλου υδροφορέα αν υπάρχει

Υστερα, γίνεται μετάβαση στις σχετικές διαπερατότητες, οι οποίες υπολογίζονται χρησιμοποιώντας συναρτήσεις Corey όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.8.

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 fraction	End Point fraction	Exponent
K _{rw}	0,15	0,63	0,84
K _{ro}	0,15	0,8	1,5478
K _{rg}	0,2	0,9	1

Normalise End Points

WARNING : Enter saturations relative to total system

Εικόνα 3.8 : Εισαγωγή σχετικών διαπερατοτήτων

Τέλος, εισάγονται τα ιστορικά δεδομένα της παραγωγής.

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	2000	0	0	0			Medium	Edit..
2	01/02/2001	1980	0,356222	500	0			Medium	Edit..
3	01/03/2001	1950	0,586151	499,999	0			Medium	Edit..
4	01/04/2001	1800	0,927019	499,999	0			Medium	Edit..
5	01/05/2001	1750	1,24942	499,998	0			Medium	Edit..
6	01/06/2001	1720	1,57649	500	0			Medium	Edit..
7	01/07/2001	1700	1,57649	500	0			Medium	Edit..
8	01/08/2001	1690	1,89402	500,001	0			Medium	Edit..
9	01/09/2001	1680	2,20527	499,998	0			Medium	Edit..
10	01/10/2001	1670	2,50173	500,002	0			Medium	Edit..
11	01/11/2001	1660	2,80395	500,002	0			Medium	Edit..
12	01/12/2001	1650	3,09282	500	0			Medium	Edit..
13	01/01/2002	1649	3,39831	500,001	0			Medium	Edit..
14	01/02/2002	1648	3,70051	499,999	0			Medium	Edit..
15	01/03/2002	1647	3,98042	500	0			Medium	Edit..
16	01/04/2002	1645	4,27695	499,999	0			Medium	Edit..

Work with GOR Check GOR

Εικόνα 3.9 : Εισαγωγή ιστορικών δεδομένων παραγωγής

3.2 Διαδικασία Ιστορικής Ταύτισης (History Matching)

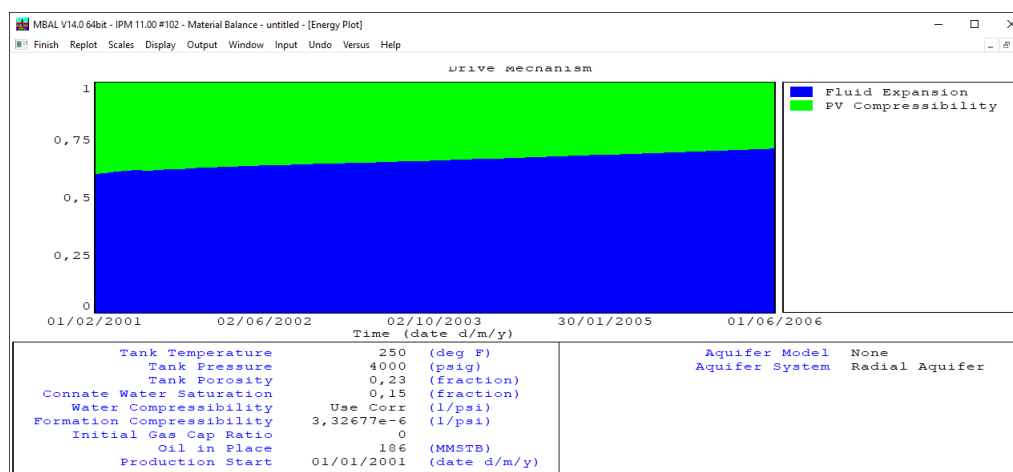
Προκειμένου να είναι αξιόπιστο το Mbal μοντέλο, πρέπει αυτό να μπορεί να αναπαράγει με ακρίβεια τα ιστορικά δεδομένα πιέσεων, παραγωγής πετρελαίου. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί μέσω της διαδικασίας του history matching. Έτσι, ελέγχονται οι αρχικές εκτιμήσεις που έγιναν τόσο στον ταμειυτήρα όσο και στο ρευστό, έχοντας ως βάση τα διαθέσιμα ιστορικά δεδομένα. Ο έλεγχος αυτός γίνεται με τη βοήθεια των γραφικών και αναλυτικών μεθόδων που αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 2 για την βέλτιστη περιγραφή του ταμειυτήρα. Για την πλήρη ταύτιση λοιπόν, των παραμέτρων του μοντέλου με τα ιστορικά δεδομένα, χρησιμοποιείται η διαδικασία της παλινδρόμησης, η οποία προσδιορίζει τις τιμές που διαφέρουν περισσότερο και τις αντικαθιστά.

Τα τρία διαγράμματα για τα οποία έγινε λόγος στο κεφάλαιο 2 και μέσω αυτών εξάγονται συμπεράσματα για το αν τελικά οι υποθέσεις που έγιναν ήταν πράγματι σωστές, είναι τα εξής:

- I. Διάγραμμα Energy Plot
- II. Διάγραμμα Campbell
- III. Αναλυτικό διάγραμμα

Παρουσιάζονται στις Εικόνες 3.10, 3.11, 3.12.

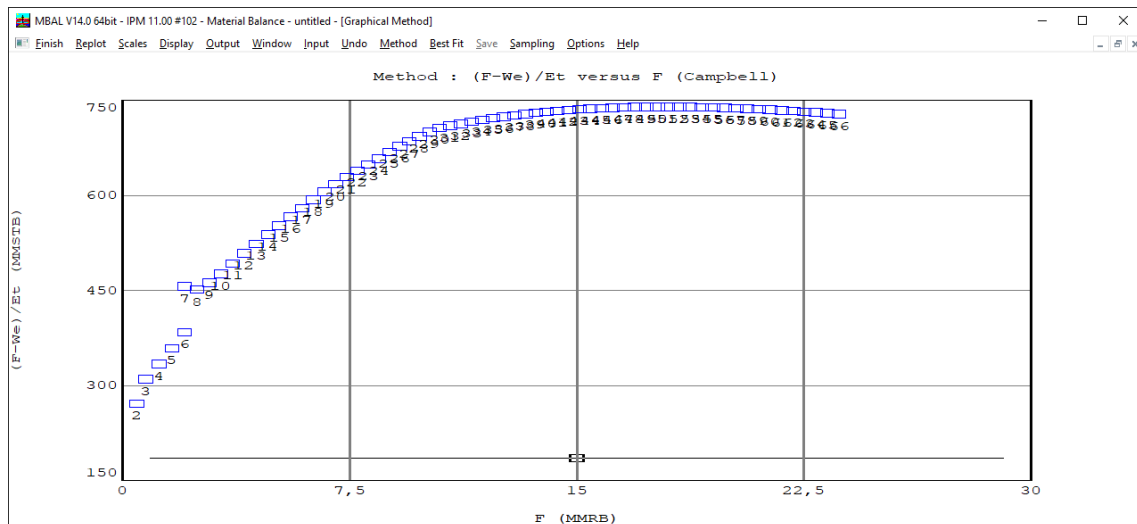
Energy Plot:



Εικόνα 3.10 : Διάγραμμα Energy Plot

Campbell – Graphical Method:

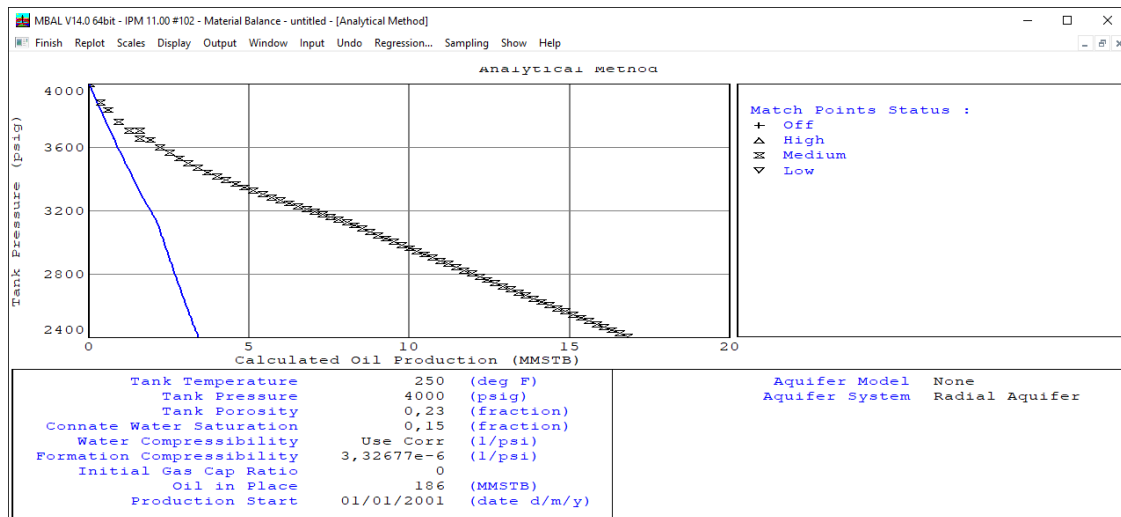
Στο διάγραμμα Campbell για να ισχύει η υπόθεση ότι ο ταμειυτήρας είναι ογκομετρικός, θα πρέπει να σχηματίζεται ευθεία οριζόντια γραμμή κάτι το οποίο δεν ισχύει. Συνεπώς, υπάρχει μια πηγή ενέργειας η οποία λογικά σηματοδοτεί την ύπαρξη υδροφορέα.



Εικόνα 3.11 : Διάγραμμα Campbell, δείχνει την ύπαρξη υδροφόρου

Analytical Method:

Το σχήμα της Εικόνας 3.12 απεικονίζει τη γραφική παράσταση που λαμβάνεται μέσω της αναλυτικής μεθόδου. Η μπλε γραμμή αντιπροσωπεύει το μοντέλο, ενώ η άλλη καμπύλη αντιπροσωπεύει τα διαθέσιμα δεδομένα ιστορικού παραγωγής. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.12, οι γραμμές δεν συμπίπτουν, πράγμα που σημαίνει ότι το μοντέλο της μπλε γραμμής δεν είναι ακριβές.

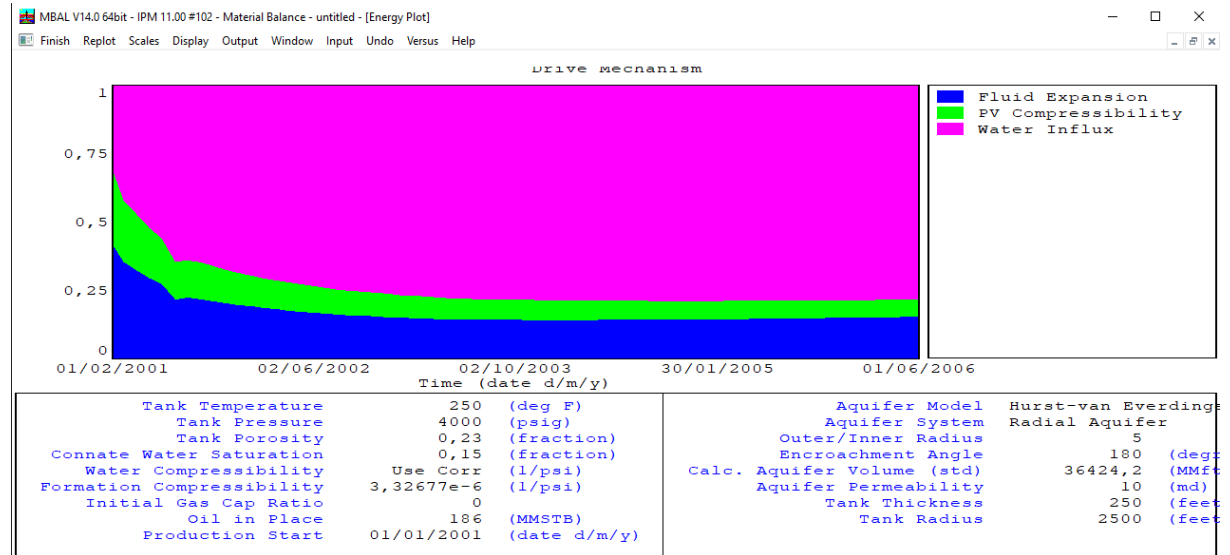


Εικόνα 3.12 : Αναλυτικό διάγραμμα, πραγματικά ιστορικά δεδομένα παραγωγής και δεδομένα μοντέλου

Όπως φαίνεται λοιπόν από τα διαγράμματα των Εικόνων 3.10, 3.11 και 3.12, η αντιστοίχιση μεταξύ του μοντέλου χωρίς υδροφορέα και των δεδομένων πίεσης από το πεδίο, δεν μπορεί να θεωρηθεί ως τέλεια αντιστοιχία, γεγονός που αποτελεί ένδειξη ότι λείπει η κίνηση νερού ή υπάρχει αέριο. Η τελευταία περίπτωση απορρίπτεται επειδή είναι γνωστό από τα δεδομένα ότι δεν υπάρχει αέριο ($m = 0$). Έτσι, επιλέγεται ένα μοντέλο υδροφορέα το Hurst Van

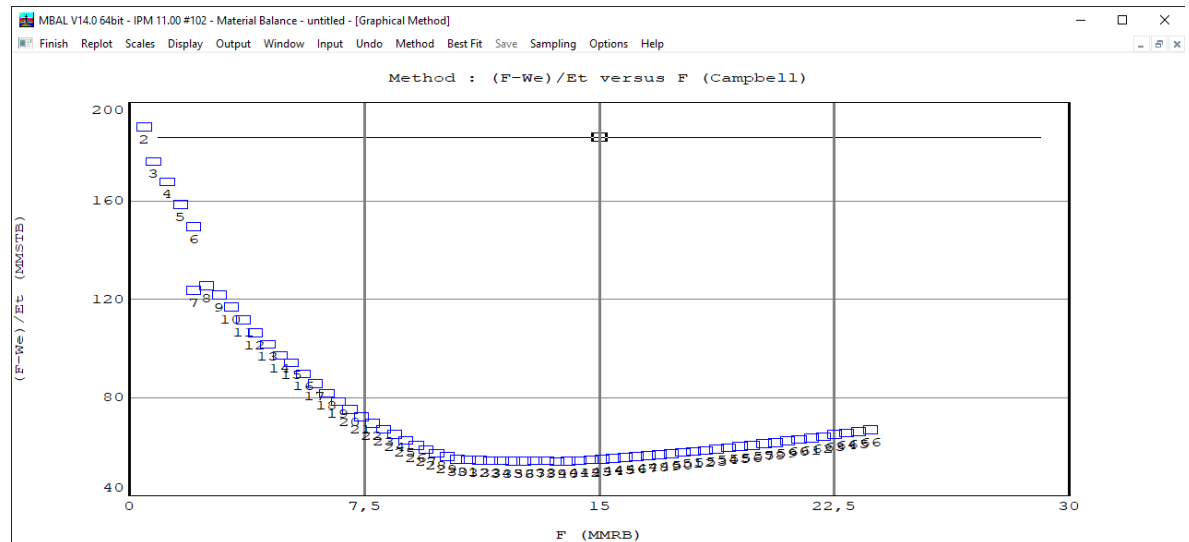
Everdingen- Modified και απεικονίζονται ξανά τα διαγράμματα στις Εικόνες 3.13, 3.14 και 3.15.

Energy Plot:



Εικόνα 3.13 : Διορθωμένο διάγραμμα Energy Plot, ως προς την ύπαρξη υδροφορέα

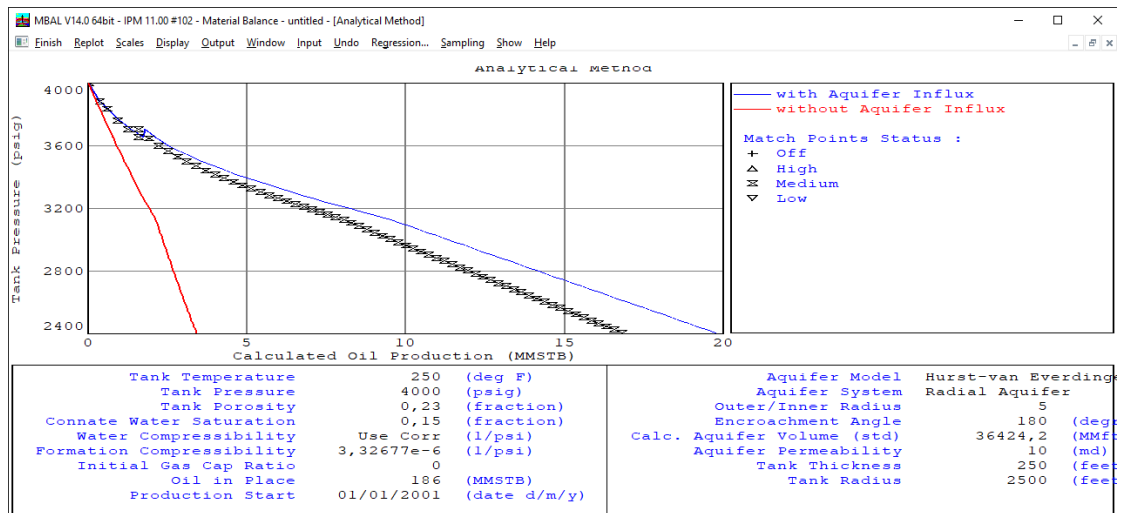
Campbell – Graphical Method:



Εικόνα 3.14 : Διορθωμένο διάγραμμα Campbell, ως προς την ύπαρξη υδροφορέα

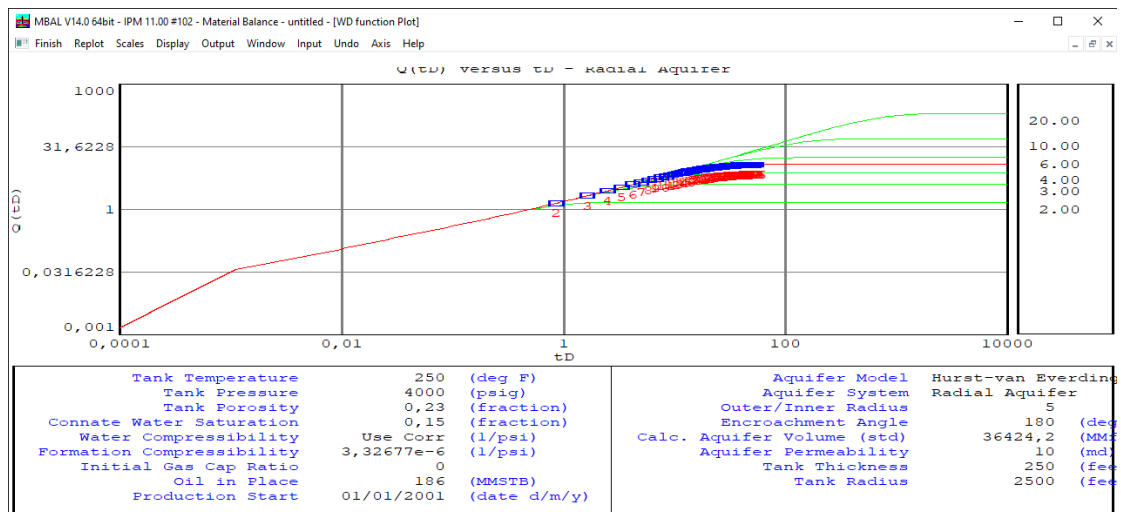
Analytical Method:

Η μπλε γραμμή αντιπροσωπεύει το μοντέλο χωρίς υδροφόρο, ενώ η κόκκινη με υδροφόρο.



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

Έχοντας βάλει μοντέλο υδροφορέα, απεικονίζεται ένα καινούργιο διάγραμμα WD συνάρτησης υδροφορέα με χρόνο. Σε αυτό το διάγραμμα, υποδεικνύονται τα σημεία που προκύπτουν από τα ιστορικά δεδομένα παραγωγής.



Εικόνα 3.16 : Διάγραμμα συνάρτησης υδροφορέα με τον χρόνο

Όπως φαίνεται από τα διαγράμματα, έχοντας βάλει μοντέλο υδροφορέα, το αναλυτικό διάγραμμα της Εικόνας 3.15 είναι καλύτερο από πριν, χωρίς όμως να είναι ακόμη πλήρως ταυτισμένο το μοντέλο με τα ιστορικά δεδομένα.

Για την απόκτηση λοιπόν ενός ακριβούς μοντέλου, το επόμενο βήμα είναι η διαδικασία της παλινδρόμησης, η οποία θα μεταβάλλει και θα διορθώσει τις αβέβαιες παραμέτρους.

Διαδικασία παλινδρόμησης (regression):

Όπως φαίνεται και στις Εικόνες 3.17, 3.18 και 3.19, οι τιμές που επαναπροσδιορίζονται με τη διαδικασία της παλινδρόμησης είναι τα αρχικά αποθέματα πετρελαίου, η αναλογία

εξωτερικής προς εσωτερική ακτίνα υδροφορέα, η γωνία επαφής υδροφορέα και η διαπερατότητα του υδροφορέα.

Regression

Done
 Cancel
 Help
 Calc
 Reset
 Accept All Fits

Regress on	Start	Best Fit	Minimum	Maximum	
<input checked="" type="checkbox"/> Oil in Place	186				MMSTB
<input checked="" type="checkbox"/> Outer/Inner Radius	5				
<input type="checkbox"/> Reservoir Radius	2500				feet
<input checked="" type="checkbox"/> Encroachment Angle	180				degrees
<input type="checkbox"/> Reservoir Thickness	250				feet
<input type="checkbox"/> Porosity	0.23				fraction
<input checked="" type="checkbox"/> Aquifer Permeability	10				md
<input type="checkbox"/> Formation Compressibility					1/psi

Iteration No Standard Deviation

Εικόνα 3.17 : Διαδικασία παλινδρόμησης

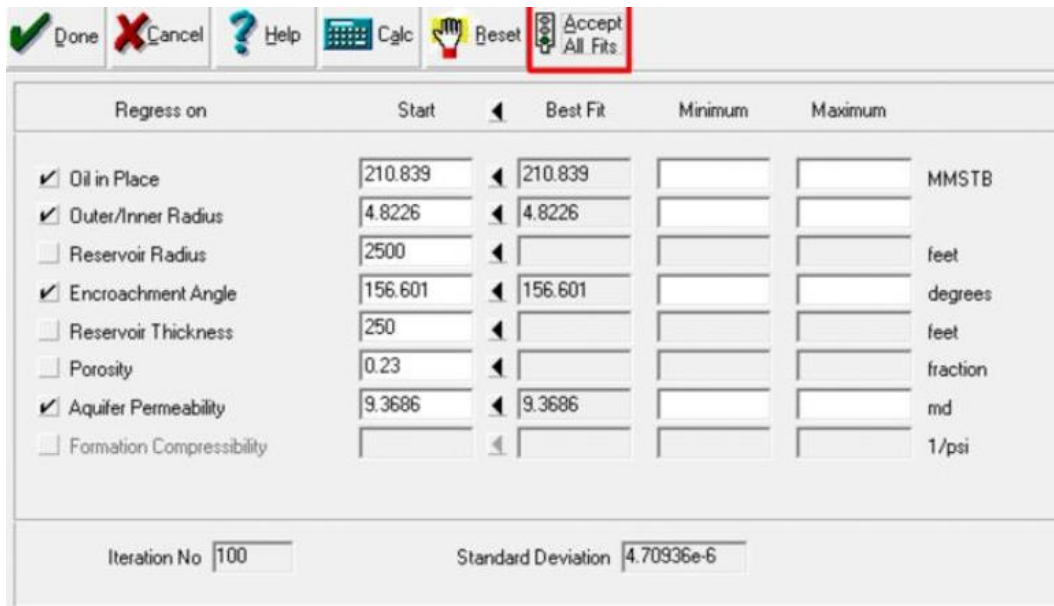
Regression

Done
 Cancel
 Help
 Calc
 Reset
 Accept All Fits

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

Iteration No Standard Deviation

Εικόνα 3.18 : Διαδικασία παλινδρόμησης – υπολογισμός τιμών

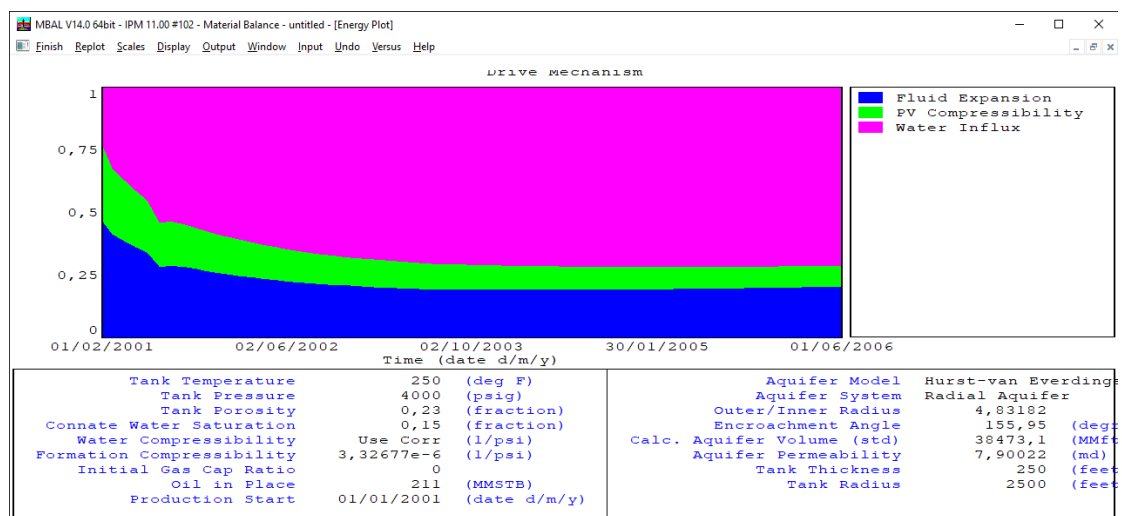


Εικόνα 3.19 : Διαδικασία παλινδρόμησης – αποδοχή τιμών

Όπως φαίνεται η τιμή των αρχικών αποθεμάτων αυξήθηκε, ενώ οι τιμές της ακτίνας, της γωνίας επαφής και της διαπερατότητας του υδροφορέα μειώθηκαν. Συνεπώς, παρατηρώντας τα επόμενα διαγράμματα τα οποία δημιουργήθηκαν μετά τη διαδικασία της παλινδρόμησης, φαίνεται ότι πλέον η μπλε γραμμή του μοντέλου ταυτίζεται με την καμπύλη των ιστορικών δεδομένων παραγωγής, κάτι το οποίο σημαίνει ότι το μοντέλο περιγράφει με ακρίβεια τον ταμειυτήρα.

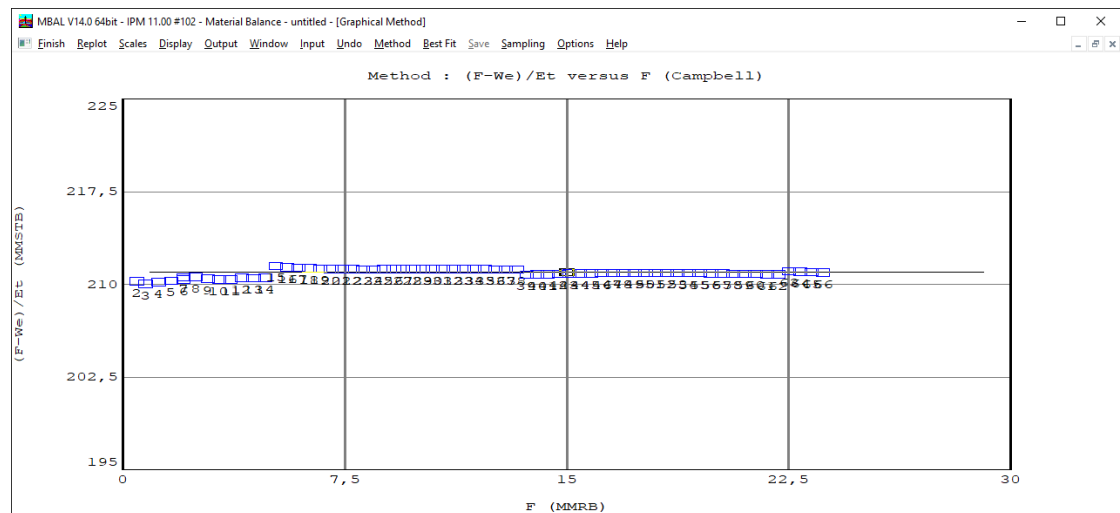
Αποτελέσματα παλινδρόμησης:

Energy Plot:



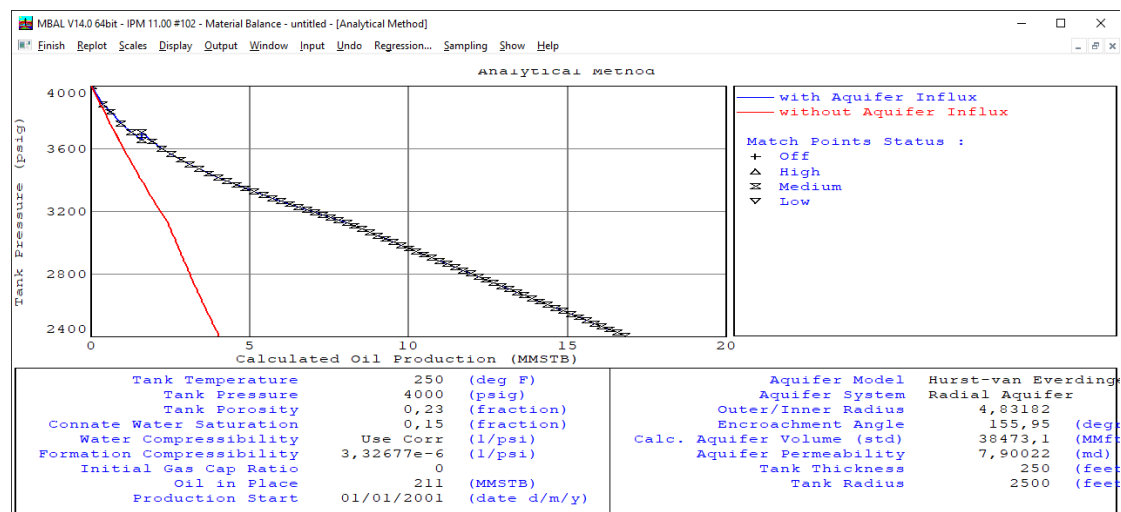
Εικόνα 3.20 : Διάγραμμα Energy Plot μετά την παλινδρόμηση

Campbell – Graphical Method:



Εικόνα 3.21 : Διάγραμμα Campbell μετά την παλινδρόμηση

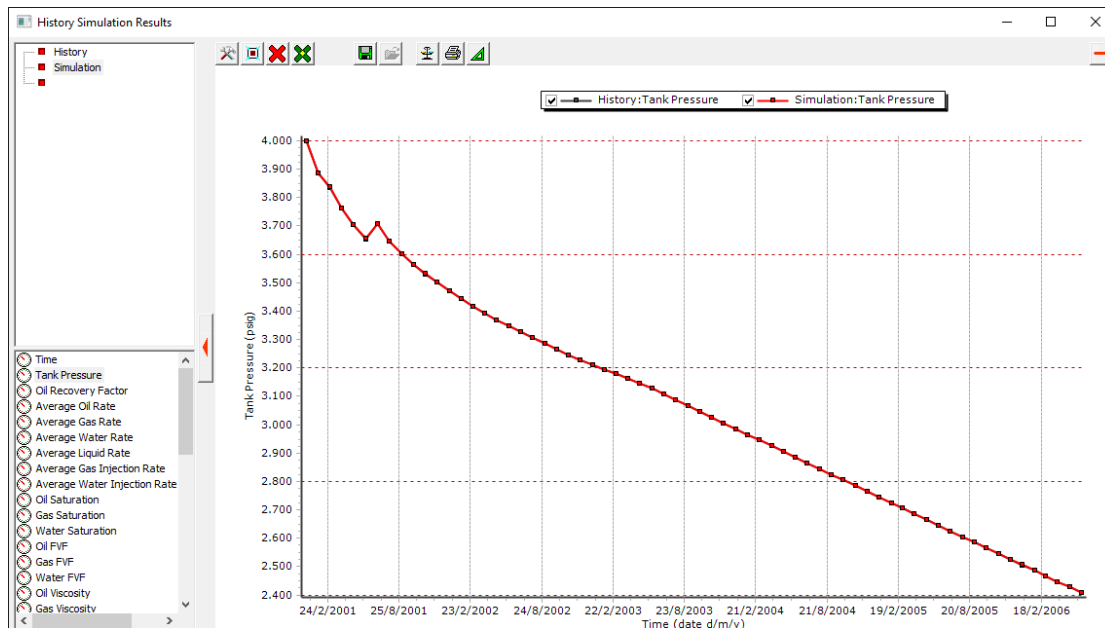
Analytical Method:



Εικόνα 3.22 : Αναλυτικό διάγραμμα μετά την παλινδρόμηση

Το επόμενο βήμα είναι η διαδικασία της προσομοίωσης των ιστορικών δεδομένων παραγωγής κατά την οποία αξιοποιούνται τα ιστορικά δεδομένα για την παραγωγή και για κάθε παραγωγή υπολογίζονται οι πιέσεις. Αν όλα όσα έχουν γίνει μέχρι αυτό το σημείο είναι σωστά, θα πρέπει οι πιέσεις που θα υπολογιστούν να ταυτίζονται με τις καταγεγραμμένες.

Όπως λοιπόν παρουσιάζεται στο διάγραμμα της Εικόνας 3.23, πράγματι οι πιέσεις της διαδικασίας προσομοίωσης και οι ιστορικά καταγεγραμμένες πιέσεις ταυτίζονται.



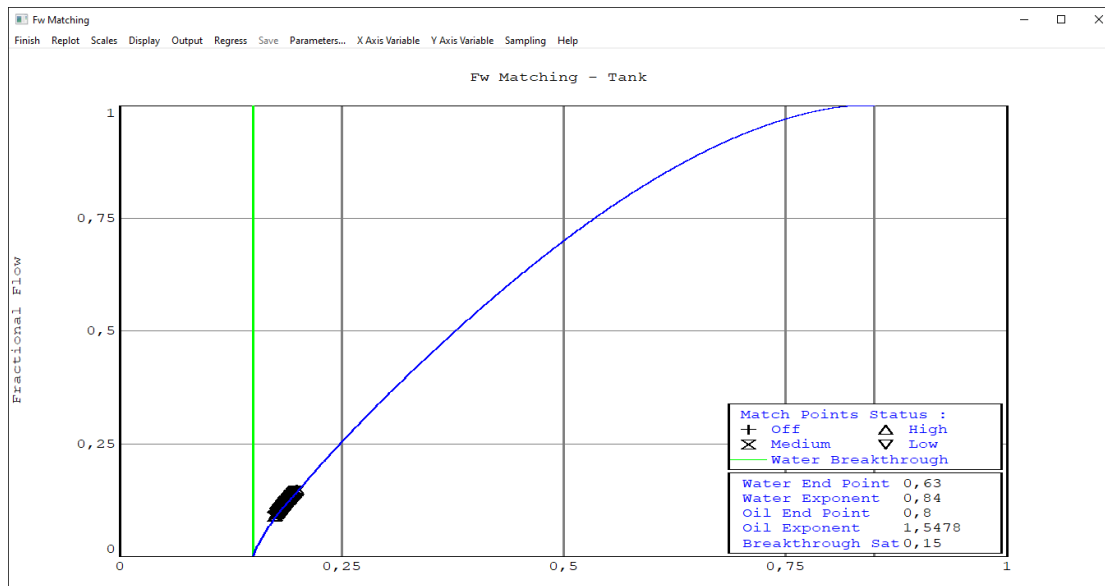
Εικόνα 3.23 : Διάγραμμα πίεσης – χρόνου, απεικόνιση προσομοίωσης

Το τελευταίο βήμα αυτής της ενότητας είναι ο έλεγχος των τιμών των σχετικών διαπερατοτήτων, οι κλίσεις των καμπυλών των σχετικών διαπερατοτήτων καθώς και τα τελικά σημεία. Τα τελικά σημεία στις καμπύλες αυτές είναι ιδιαίτερα σημαντικά μιας και καθορίζουν το ελάχιστο ποσοστό κορεσμού σε νερό και τις σχετικές διαπερατότητες των ρευστών σε αυτά τα σημεία, ορίζοντας εν τέλει τους όγκους των ρευστών κατά την διάρκεια του ορισμού της αρχικής κατάστασης του μοντέλου. Επιπρόσθετα, οι κλίσεις έχουν εξίσου σημαντική επίδραση στη συμπεριφορά του μοντέλου καθώς καθορίζουν την κινητικότητα των ρευστών στον ταμειυτήρα.

Πιο συγκεκριμένα, η διαδικασία που θα κάνει αυτό τον έλεγχο είναι η διαδικασία ταύτισης των κλασματικών ροών. Θα ταιριάξει λοιπόν την καμπύλη κλασματικής ροής με τα δεδομένα παραγωγής. Γι' αυτό τον λόγο, το λογισμικό θα δημιουργήσει καμπύλες σχετικών διαπερατοτήτων, ώστε η καμπύλη κλασματικής ροής που προσδιορίζεται ως συνάρτηση των σχετικών διαπερατοτήτων να ταυτιστεί με την καμπύλη κλασματικής ροής των ιστορικών δεδομένων.

- ❖ F_g matching στη συγκεκριμένη περίπτωση δε γίνεται διότι ο ταμειυτήρας θεωρείται ακόρεστος. Συνεπώς, η παραπάνω διαδικασία για την οποία έγινε περιγραφή, θα γίνει μόνο για F_w matching.

Το λογισμικό δίνει την Εικόνα 3.24.



Εικόνα 3.24 : Διάγραμμα κλασματικής ροής και κορεσμού

Επιλέγοντας την εντολή regress on default variables, μεταβάλλονται οι τιμές των σχετικών διαπερατοτήτων που είχαν υπολογιστεί με τη μέθοδο Corey.

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	
K _{rw}	0,15	0,63	0,84
K _{ro}	0,15	0,8	1,5478
K _{rg}	0,02	0,9	1

Normalise End Points

WARNING : Enter saturations relative to total system

Εικόνα 3.25 : Τιμές σχετικών διαπερατοτήτων με τη μέθοδο Corey πριν την παλινδρόμηση

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	
K _{rw}	0,15	0,630483	0,828699
K _{ro}	0,15	0,8	1,88074
K _{rg}	0,02	0,9	1

Normalise End Points

WARNING : Enter saturations relative to total system

Εικόνα 3.26 : Τιμές σχετικών διαπερατοτήτων με τη μέθοδο Corey μετά την παλινδρόμηση

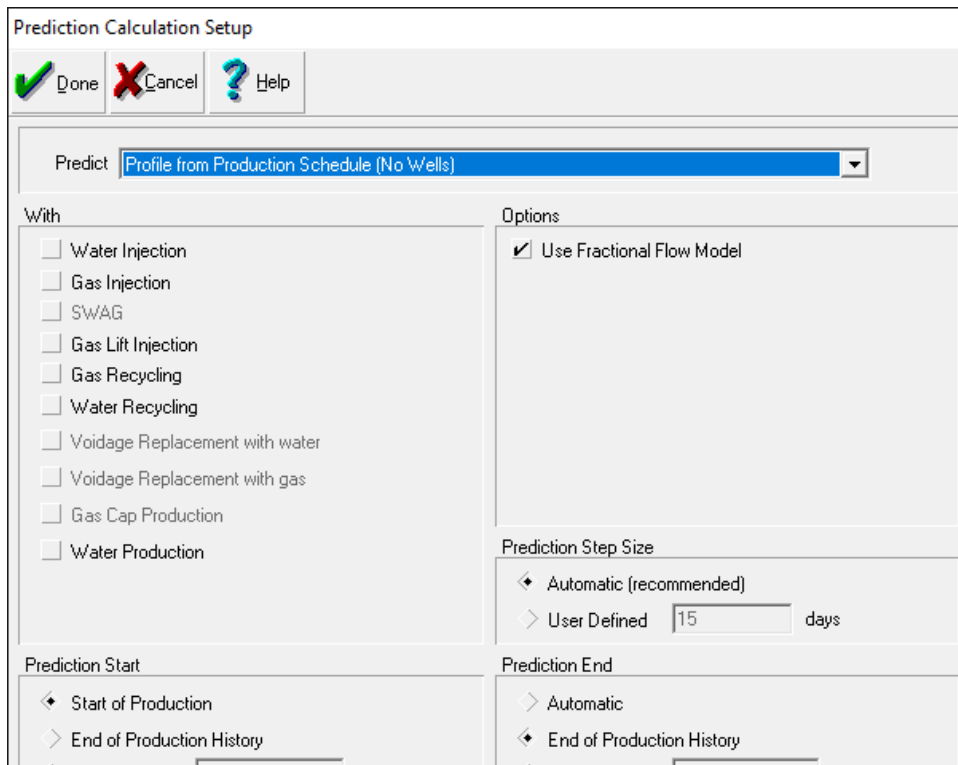
3.3 Πρόβλεψη παραγωγής

Εφόσον προηγήθηκε η διαδικασία της ιστορικής ταύτισης, πλέον το μοντέλο θεωρείται ακριβές και έμπιστο για την πρόβλεψη της μελλοντικής παραγωγής. Ειδικότερα, όπως φαίνεται και στην παρακάτω εικόνα πρέπει να οριστούν στο πρόγραμμα τα εξής :

- Τύπος πρόβλεψης
- Χρόνος έναρξης πρόβλεψης
- Χρόνος λήξης πρόβλεψης

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι πριν ξεκινήσει η διαδικασία της πρόβλεψης της μελλοντικής παραγωγής, πρώτα θα γίνει το στάδιο πρόβλεψης παραγωγής για χρονικό διάστημα ίσο με την ιστορική παραγωγή. Αυτό συμβαίνει διότι απαιτείται η επαλήθευση των σχετικών διαπερατοτήτων που υπολογίστηκαν. Αν οι σχετικές διαπερατότητες είναι σωστές τότε θα υπάρχει ταύτιση της προβλεπόμενης παραγωγής με την καταγεγραμμένη. Στην Εικόνα 3.27 επιλέγεται ως Prediction Start το Start of Production και ως Prediction End το End of Production History.

Όπως θα φανεί και στη συνέχεια, όταν θα ξεκινήσει η πρόβλεψη της μελλοντικής παραγωγής στο Prediction Start θα οριστεί το End of Production History, ενώ στο Prediction End το Automatic.



Εικόνα 3.27 : Επιλογή μοντέλου πρόβλεψης και χρονικού διαστήματος

Ειδικότερα, οι κύριοι τύποι πρόβλεψης είναι :

- Προφίλ από το πρόγραμμα παραγωγής (σχετίζεται κυρίως με την πρόβλεψη της πίεσης του ταμιευτήρα)
- Προφίλ παραγωγής με χρήση μοντέλων γεωτρήσεων (βασίζεται στην απόδοση της γεώτρησης)
- Προσδιορισμός αριθμού γεωτρήσεων (για την επίτευξη του ρυθμού παραγωγής)

Στη συνέχεια, οι επιλογές που δίνει το πρόγραμμα για τον χρόνο έναρξης της πρόβλεψης είναι οι ακόλουθες :

- Έναρξη της ιστορικά καταγεγραμμένης παραγωγής
- Τέλος της ιστορικά καταγεγραμμένης παραγωγής
- Αυθαίρετο στάδιο οριζόμενο από τον χρήστη

Τέλος, οι επιλογές για τον χρόνο λήξης της πρόβλεψης είναι οι εξής :

- Τέλος της ιστορικά καταγεγραμμένης παραγωγής
- Αυθαίρετο στάδιο οριζόμενο από τον χρήστη
- Οριζόμενο αυτόματα από το πρόγραμμα

Όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.28, εισάγονται τα καταγεγραμμένα στοιχεία παραγωγής.

Tank Prediction Data - Production and constraints

Done
 Cancel
 Help
 Import
 Plot
 Report
 Reset
 Copy

Production Constraints
 Break-throughs

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								

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

Εικόνα 3.28 : Τιμές μέσου όρου ροής πετρελαίου ανά ημέρα

Όπως και οι κορεσμοί σε νερό και αέριο.

Tank Prediction Data - Breakthroughs

Done
 Cancel
 Help

Production Constraints
 Break-throughs

Breakthroughs

Water Saturation fraction

Gas Saturation fraction

Shift Relative Permeability to Breakthrough

Εικόνα 3.29 : Τιμές κορεσμού σε νερό και αέριο

Κεφάλαιο 4 : Πρώτη μελέτη περίπτωσης

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται η πρώτη μελέτη περίπτωσης της εργασίας που αφορά στη χρήση της μεθόδου Ισοζυγίου Μάζας για την εκτίμηση της κατάστασης ενός ταμιευτήρα πετρελαίου. Για τον συγκεκριμένο ταμιευτήρα πετρελαίου είναι γνωστά τα δεδομένα παραγωγής για ένα χρονικό διάστημα και κάποια χαρακτηριστικά αυτού. Για τη μελέτη αυτή χρησιμοποιείται το λογισμικό Mbal που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο.

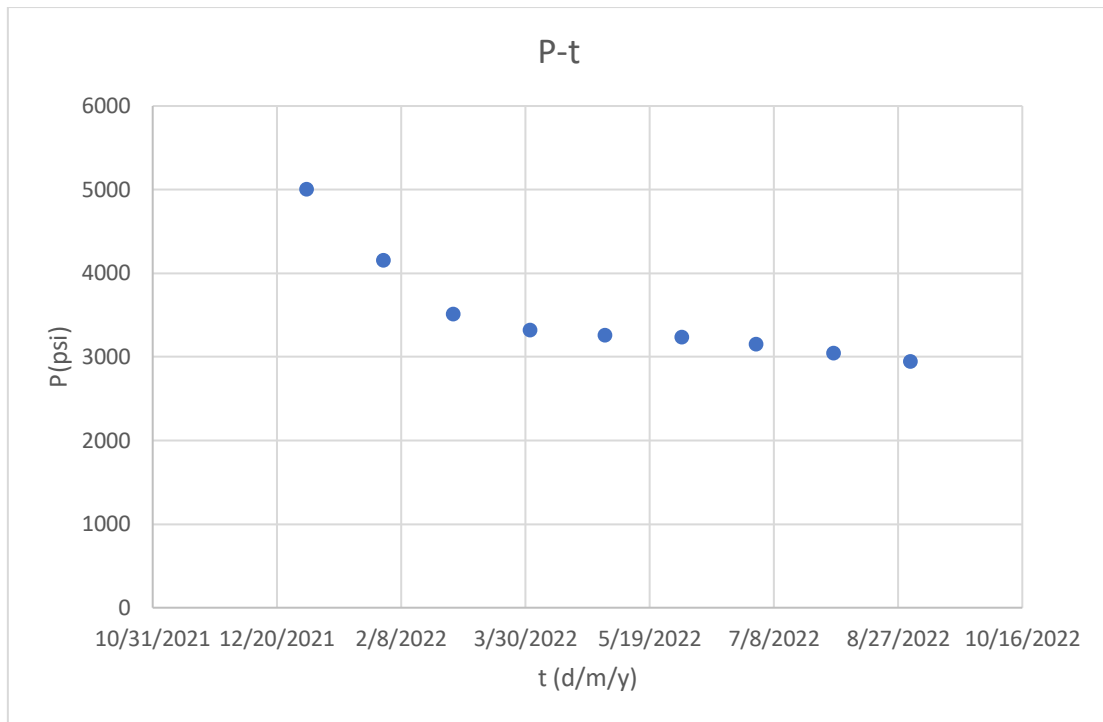
Η μελέτη βασίζεται στην αρχική υπόθεση που γίνεται ότι ο ταμιευτήρας είναι ογκομετρικός δηλαδή δεν υπάρχει υδροφορέας και ταυτόχρονα ότι είναι ακόρεστος. Με τη χρήση των δεδομένων που υπάρχουν και τη μέθοδο του Ισοζυγίου Μάζας (Material Balance), θα διαπιστωθεί κατά πόσον η αρχική αυτή υπόθεση είναι αληθής, προκειμένου να γίνει η εκτίμηση της κατάστασης του ταμιευτήρα.

Τέλος, με βάση τα αποτελέσματα της μελέτης για την εκτίμηση της κατάστασης του ταμιευτήρα πετρελαίου, αξιοποιείται η 2^η φάση της μεθόδου του Ισοζυγίου Μάζας στην υλοποίηση ενός σεναρίου μελλοντικής παραγωγής από τον ταμιευτήρα πετρελαίου.

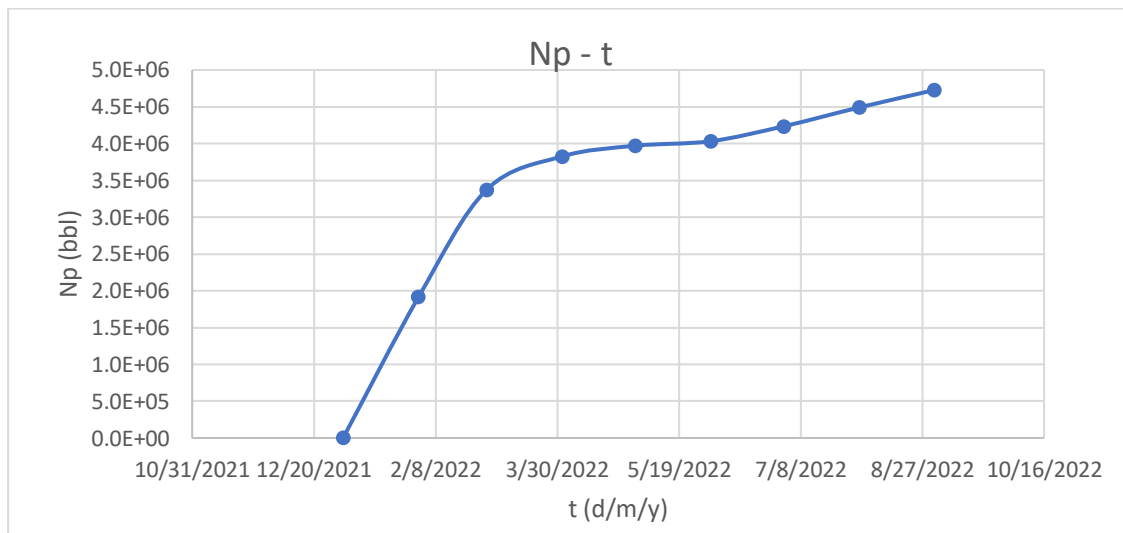
4.1 Δεδομένα

Όπως προαναφέρθηκε, τα δεδομένα που είναι διαθέσιμα για τον ταμιευτήρα πετρελαίου που μελετάται είναι δεδομένα παραγωγής από αυτόν αλλά και χαρακτηριστικά του ταμιευτήρα και του πετρελαϊκού ρευστού.

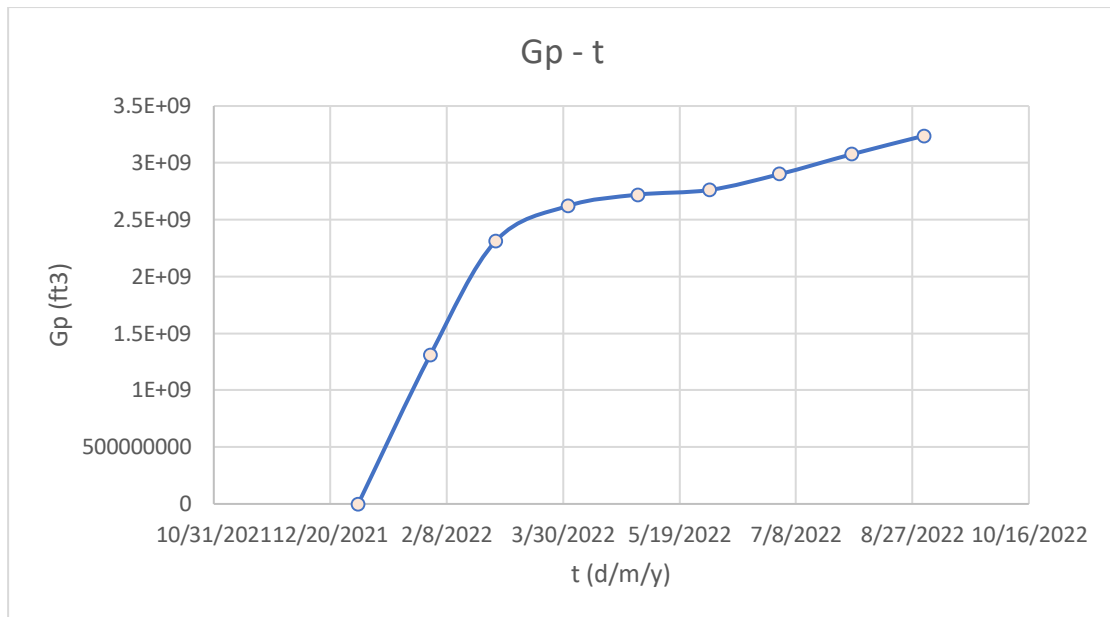
Τα δεδομένα παραγωγής απεικονίζονται στα διαγράμματα των Εικόνων 4.1 – 4.4. Αφορούν σε διαγράμματα πίεσης ταμιευτήρα σε σχέση με τον χρόνο (Εικόνα 4.1), αθροιστικής παραγωγής πετρελαίου σε σχέση με τον χρόνο (Εικόνα 4.2), αθροιστικής παραγωγής αερίου σε σχέση με τον χρόνο (Εικόνα 4.3) και αθροιστικής παραγωγής νερού σε σχέση με τον χρόνο (Εικόνα 4.4). Βάσει των διαγραμμάτων αυτών παρατηρείται η πτώση της πίεσης του ταμιευτήρα με τον χρόνο που οφείλεται στην παραγωγή, ενώ η αθροιστική παραγωγή πετρελαίου, αερίου και νερού αντίστοιχα αυξάνει.



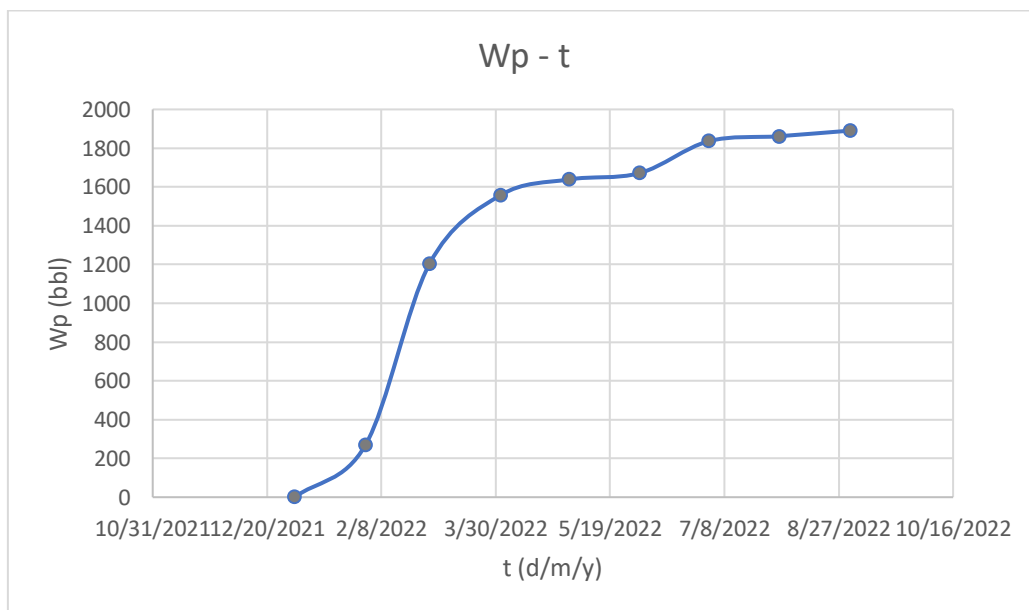
Εικόνα 4.1 : Διάγραμμα πίεσης (psi) – χρόνου για τα ιστορικά δεδομένα (date d/m/y)



Εικόνα 4.2 : Διάγραμμα αθροιστικής παραγωγής πετρελαίου (bbl) – χρόνου (date d/m/y)



Εικόνα 4.3 : Διάγραμμα αθροιστικής παραγωγής αερίου (ft³) – χρόνου (date d/m/y)



Εικόνα 4.4 : Διάγραμμα αθροιστικής παραγωγής νερού (bbl) – χρόνος (date d/m/y)

Τα δεδομένα τα οποία είναι πλέον διαθέσιμα για τον ταμειυτήρα αλλά και το πετρελαιικό ρευστό είναι τα εξής :

- ❖ Αρχικά αποθέματα πετρελαίου : $N = 120 \text{ MMstb}$ (εκτιμήθηκαν με την ογκομετρική μέθοδο εκτίμησης αποθεμάτων)
- ❖ Αρχική πίεση : $P = 5,000 \text{ psi}$
- ❖ Θερμοκρασία ταμειυτήρα : $T = 245 \text{ F}$
- ❖ Πορώδες σχηματισμού : $\varphi = 0.2$
- ❖ Κορεσμός σε ενδογενές νερό : $S_{wc} = 0.15$

- ❖ Λόγος $m = 0$
- ❖ Πίεση κορεσμού πετρελαίου: $P_{bp} = 1,317 \text{ psig}$
- ❖ Ογκομετρικός συντελεστής πετρελαίου : $B_o = 1.03 \text{ rb/stb}$
- ❖ Ιξώδες πετρελαίου : $\mu_o = 0.55 \text{ cp}$
- ❖ Ειδική πυκνότητα πετρελαίου : 38.5 API
- ❖ Ειδική πυκνότητα αερίου : 1.1881
- ❖ Αλατότητα νερού : 70,000 ppm
- ❖ Περιεκτικότητα σε ανόργανα συστατικά $\rightarrow \text{H}_2\text{S} = 17\%, \text{CO}_2 = 3\%, \text{N}_2 = 0\%$
- ❖ Αρχική πίεση : $P = 5,000 \text{ psig}$
- ❖ Ημερομηνία 1^{ης} καταγραφής παραγωγής : 01/01/2022

Πρέπει να αναφερθεί ότι πέραν των παραπάνω παραμέτρων για το πετρελαϊκό ρευστό που καταγράφηκαν, υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα ανάλυσης PVT και συγκεκριμένα από τα εργαστηριακά πειράματα εκτόνωσης υπό σταθερή σύσταση (CCE) και διαφορικής εκτόνωσης (DV).

Για τον λόγο αυτό η ανάπτυξη του Μοντέλου Μαύρου Πετρελαίου που χρησιμοποιήθηκε για την περιγραφή της συμπεριφοράς του πετρελαϊκού ρευστού εξετάζεται ως προς την πρόβλεψη ογκομετρικών παραμέτρων με τη χρήση :

- Διαθέσιμων συσχετίσεων
- Πινάκων BOT που προκύπτουν από το πείραμα DV
- Πινάκων BOT που προκύπτουν από το πείραμα DV κατόπιν διόρθωσης των παραμέτρων κατά Dake (κεφάλαιο 1), προκειμένου να λαμβάνει υπόψιν την παραγωγή στην επιφάνεια (συνθήκες επιφάνειας)

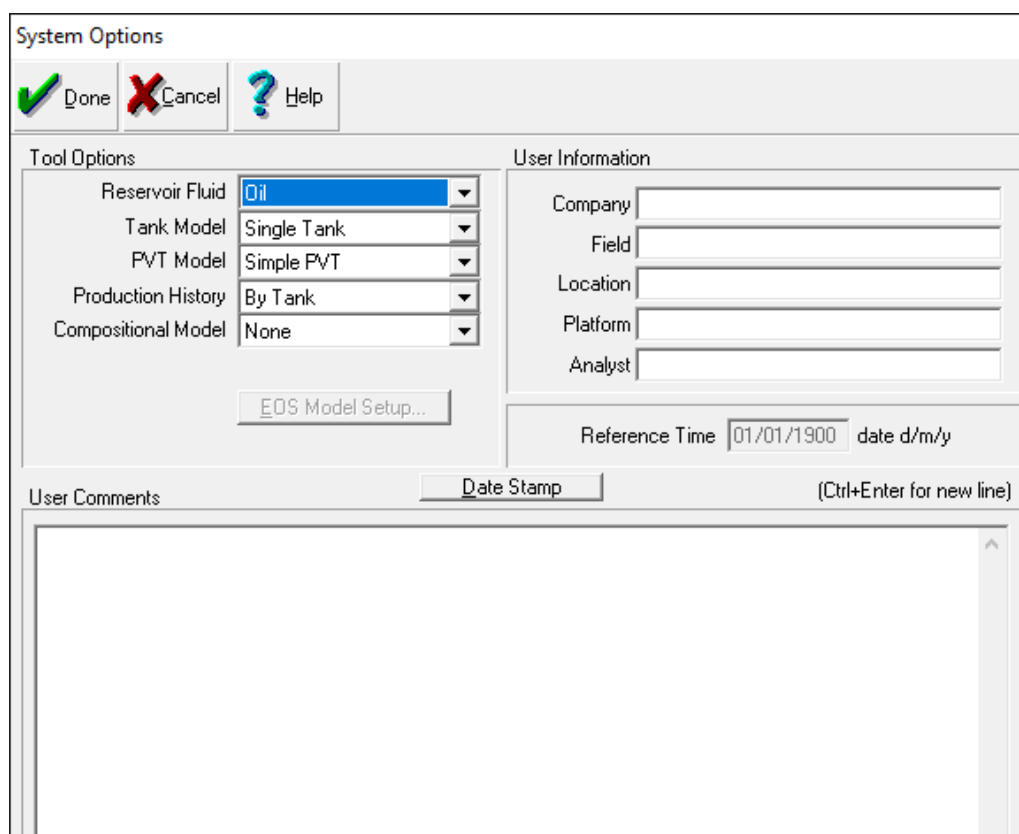
Η εξέταση των παραπάνω περιπτώσεων είναι ουσιαστικά προσπάθεια προσομοίωσης μιας ρεαλιστικής περίπτωσης με σφάλματα στη διαχείριση των PVT δεδομένων. Έτσι, προσδιορίζονται σε τρεις διαφορετικές περιπτώσεις. Πιο συγκεκριμένα, στην 1η περίπτωση έγινε χρήση συσχετίσεων (correlations) δηλαδή εισήχθησαν μόνο τα επιφανειακά δεδομένα που ήταν διαθέσιμα και με βάση τις διορθώσεις των τιμών με τη βοήθεια των συσχετίσεων θα πρέπει να ταυτιστούν με τις εργαστηριακά μετρημένες τιμές, όπως ακριβώς αναλύθηκε στο κεφάλαιο 1. Στη 2η περίπτωση έγινε χρήση των πινάκων (tables), καθώς διατέθηκαν περισσότερα PVTs δεδομένα από το εργαστηριακό πείραμα DV οπότε θα χρησιμοποιηθούν. Τέλος, στην 3η περίπτωση έγινε πάλι χρήση των πινάκων (tables) με τη διαφορά ότι οι τιμές των B_o και R_s διορθώθηκαν κατά Dake όπου θα γίνει λόγος στη συνέχεια, ώστε να υπάρχει μεγαλύτερη ακρίβεια των τιμών καθώς τώρα δόθηκαν οι flash τιμές. Σε αυτό το σημείο να αναφερθεί ότι το πείραμα flash δίνει μοναδική τιμή B_o και R_s , καθώς εκτονώνει κατευθείαν το πετρέλαιο από τον ταμιευτήρα προς την επιφάνεια.

Στην επόμενη ενότητα παρουσιάζεται η εισαγωγή των δεδομένων στο λογισμικό Mbal καθώς και η περιγραφή των διαφορετικών περιπτώσεων που αναφέρθηκαν παραπάνω σχετικά με τα PVT δεδομένα που αξιοποιούνται.

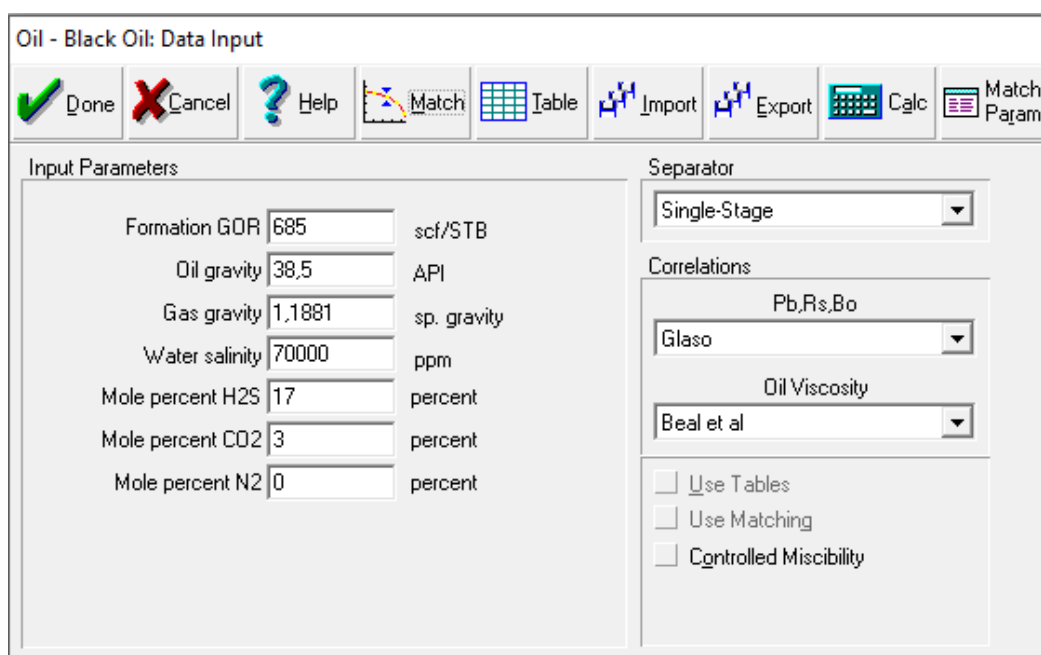
4.1.1 Εισαγωγή δεδομένων στο λογισμικό Mbal

Τα αρχικά βήματα είναι ακριβώς ίδια με αυτά που αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 3 και παρατίθενται εν συντομία στις παρακάτω εικόνες. Ο ταμιευτήρας είναι ταμιευτήρας

πετρελαίου και το μοντέλο ρευστού που επιλέγεται για την περιγραφή της συμπεριφοράς του είναι το Μοντέλο Μαύρου Πετρελαίου (Black Oil Model).



Εικόνα 4.5 : Εισαγωγή επιλογών για το ρευστό του ταμειυτήρα και χρήσης του Μοντέλου Μαύρου Πετρελαίου (Black oil model)



Εικόνα 4.6 : Εισαγωγή δεδομένων που αφορούν τις ιδιότητες του ρευστού

4.1.1.1 : 1^η περίπτωση - Χρήση συσχετίσεων (correlations)

Σε αυτή την περίπτωση θεωρείται ότι δεν υπάρχουν επαρκή διαθέσιμα δεδομένα PVTs για το απαιτούμενο εύρος πιέσεων οπότε χρησιμοποιούνται οι συσχετίσεις.

Προκειμένου λοιπόν να γίνει η κατάλληλη επιλογή των συσχετίσεων (correlations), εισάγονται τα ακόλουθα επιφανειακά δεδομένα τα οποία φαίνονται και στην Εικόνα 4.7.

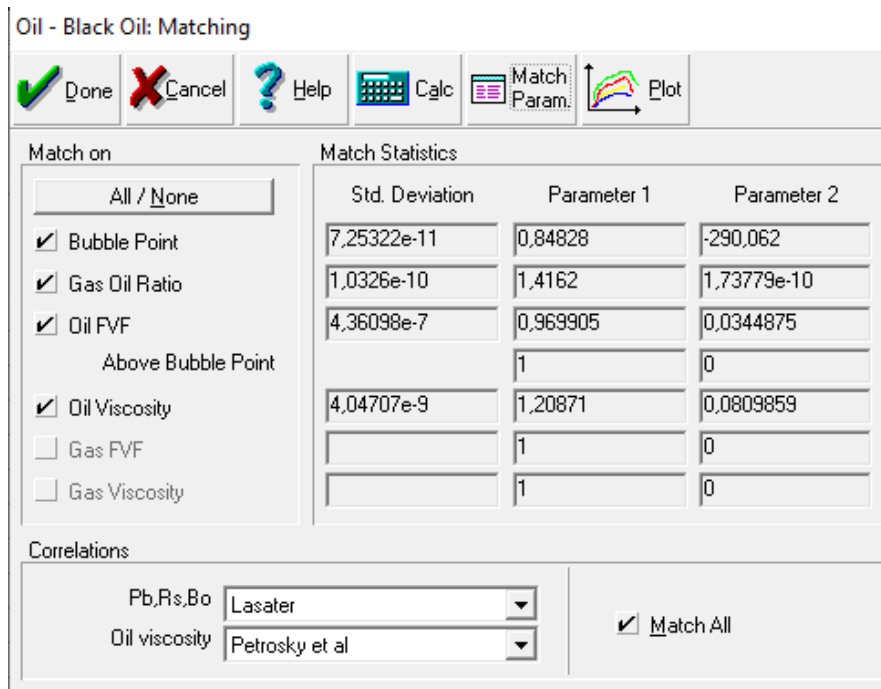
- ❖ Πίεση στο bubble point, $P_b = 1,331.7 \text{ psi} = 1,317 \text{ psig}$
- ❖ Λόγος διαλυμένου αερίου, $GOR = 685 \text{ scf/stb}$
- ❖ Ογκομετρικός συντελεστής πετρελαίου, $B_o = 1.487 \text{ rb/stb}$
- ❖ Ιξώδες, $\mu_o = 0.55 \text{ cp}$

	Pressure	Gas Oil Ratio	Oil FVF	Oil Viscosity	Gas FVF	Gas Viscosity
	psig	scf/STB	RB/STB	centipoise	ft3/scf	centipoise
1	1317	685	1.487	0.55		
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						
11						
12						

Εικόνα 4.7 : Εισαγωγή δεδομένων που αφορούν τις ιδιότητες του ρευστού

Στη συνέχεια πραγματοποιείται η ρύθμιση των συσχετίσεων όπως παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 1, ώστε να υπάρξει ταίριασμα (matching) των εργαστηριακά μετρημένων τιμών με τις τιμές που υπολογίζονται με τις συσχετίσεις. Οι παράμετροι που εξετάζονται όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4.8 είναι :

- Το σημείο κορεσμού (Bubble Point),
- Ο λόγος του όγκου του αερίου προς τον όγκο του πετρελαίου (GOR),
- Ο ογκομετρικός συντελεστής του πετρελαίου (Oil FVF) και
- Το ιξώδες του πετρελαίου (Oil Viscosity)



Εικόνα 4.8 : Εισαγωγή δεδομένων που αφορούν τις ιδιότητες του ρευστού

Οι συσχετίσεις (correlations) λοιπόν, ρυθμίζονται ως προς τις δύο παραμέτρους (πολλαπλασιαστική και μεταθετική), ώστε να ταιριάζουν στα πειραματικά PVT δεδομένα. Όπως έχει αναφερθεί, η πολλαπλασιαστική (παράμετρος 1) είναι επιθυμητό να τείνει στη μονάδα, ενώ η μεταθετική (παράμετρος 2) να τείνει στο μηδέν, γι' αυτό λοιπόν τον λόγο επιλέγονται οι συσχετίσεις του Lasater και του Petrosky et al, όπως φαίνεται στις Εικόνες 5.9 και 5.10 αντίστοιχα. Ειδικότερα, να σημειωθεί ότι για τις ογκομετρικές ιδιότητες, που επιλέχθηκε η συσχέτιση του Lasater, η τιμή a της εξίσωσης $y = ax + b$, παίρνει την τιμή 0.852124, ενώ η τιμή $b = -282.712$ psi. Τέλος, για το ιξώδες που επιλέχθηκε η συσχέτιση του Petrosky et al, οι τιμές των παραμέτρων είναι $a = 1.20871$ και $b = 0.0809859$ psi. Επίσης, εκτός των τιμών των παραμέτρων στο bubble point, λαμβάνονται υπόψη και οι τιμές των παραμέτρων στο oil FVF (B_o). Έτσι, παρατηρώντας και αυτές τις τιμές συμπεραίνεται ότι σωστά επιλέχθηκαν οι συσχετίσεις των Lasater και Petrosky et al.

Oil - Black Oil: Correlations - Oil

Done Cancel Help Reset Plot

Pb,Rs,Bo Uo,Ug,Bg

Bubble Point	Glaso	Standing	Lasater	Vazquez-Beggs	Petrosky	Al-Marhoun	De Ghetto
Parameter 1	0.780095	0,800371	0,852124	0,748797	0,79416	0,848349	0,796225
Parameter 2	-528,532	-447,413	-282,712	-679,706	-471,075	-293,07	-463,096
Std Dev.	1,32331e-10	1,1164e-10	7,04858e-11	1,69393e-10	1,1778e-10	7,34417e-11	1,15506e-10

Solution GOR	Glaso	Standing	Lasater	Vazquez-Beggs	Petrosky	Al-Marhoun	De Ghetto
Parameter 1	1,96791	1,87391	1,39841	2,30709	2,97061	1,66239	1,89311
Parameter 2	-27,6806	-15,8911	1,68468e-10	-5,15402	-534,174	-1,98022	-4,8488
Std Dev.	2,67352e-10	2,11432e-10	1,00157e-10	2,18605e-10	7,00909e-8	0,117381	1,79537e-10

Oil FVF	Glaso	Standing	Lasater	Vazquez-Beggs	Petrosky	Al-Marhoun	De Ghetto
Parameter 1	1,08036	0,969905	0,969905	1,16915	0,948377	0,92016	1,16915
Parameter 2	-0,0856782	0,0344875	0,0344875	-0,169149	0,040096	0,129327	-0,169149
Parameter 3	1	1	1	1	1	1	1
Parameter 4	0	0	0	0	0	0	0
Std Dev.	8,36948e-10	4,36098e-7	4,36098e-7	2,36543e-9	6,39753e-7	9,81977e-7	2,36544e-9

Pb,Rs,Bo Correlation: Glaso

Εικόνα 4.9 : Παράμετροι όλων των διαθέσιμων συσχετίσεων για τις ογκομετρικές ιδιότητες

Oil - Black Oil: Correlations - Viscosities, Bg

Done Cancel Help Reset Plot

Pb,Rs,Bo Uo,Ug,Bg

Oil Viscosity	Beal et al	Beggs et al	Petrosky et al	Egbogah et al	Bergman-Sutton	De Ghetto et al	De Ghetto Mod
Parameter 1	1,47757	1,29991	1,20871	0,726411	2,32981	4,15804	0,58625
Parameter 2	0,134346	0,103105	0.0809859	-0,332304	0,199856	0,237412	-1,3192
Std Dev.	6,71359e-9	5,15241e-9	4,04707e-9	1,66061e-8	9,98729e-9	1,18641e-8	6,5924e-8

Gas FVF

Parameter 1: 1
Parameter 2: 0
Std Dev.

Gas Viscosity

Parameter 1: 1
Parameter 2: 0
Std Dev.

Oil Viscosity Correlation: Petrosky et al

Εικόνα 4.10 : Παράμετροι όλων των διαθέσιμων συσχετίσεων για το ιξώδες

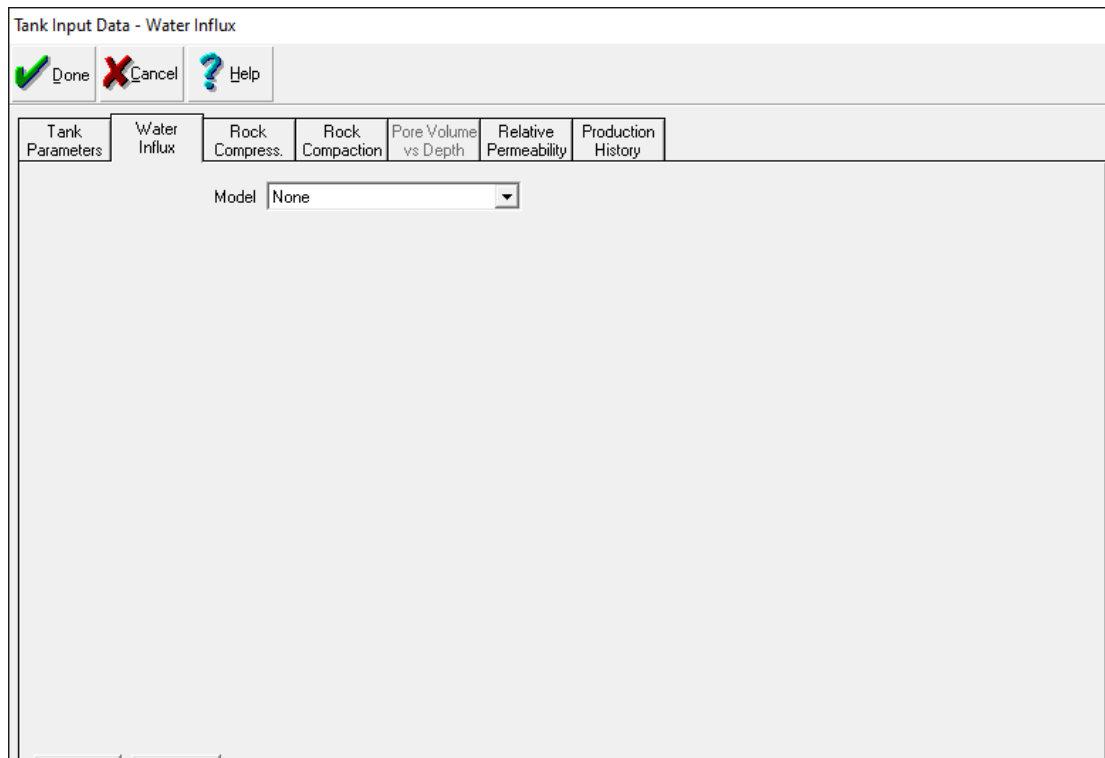
Στη συνέχεια, απαιτούνται και εισάγονται τα βασικά δεδομένα για τον ταμιευτήρα, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.11.

- ❖ Θερμοκρασία, $T = 245 F$
- ❖ Αρχική πίεση ταμιευτήρα, $P = 5,000 \text{ psig}$

- ❖ Πορώδες σχηματισμού, $\varphi = 0.2$
- ❖ Κορεσμός σε ενδογενές νερό, $S_{wc} = 0.15$
- ❖ Όγκος αρχικού καλύμματος αερίου προς αρχικό όγκο πετρελαίου, $m=0$ (υπόθεση, θα ελεγχθεί στη συνέχεια)
- ❖ Αρχικά αποθέματα πετρελαίου, $N = 120 \text{ MMSTB}$ (εκτιμήθηκαν με την ογκομετρική μέθοδο)
- ❖ Ημερομηνία πρώτης καταγραφής, 01/01/2022

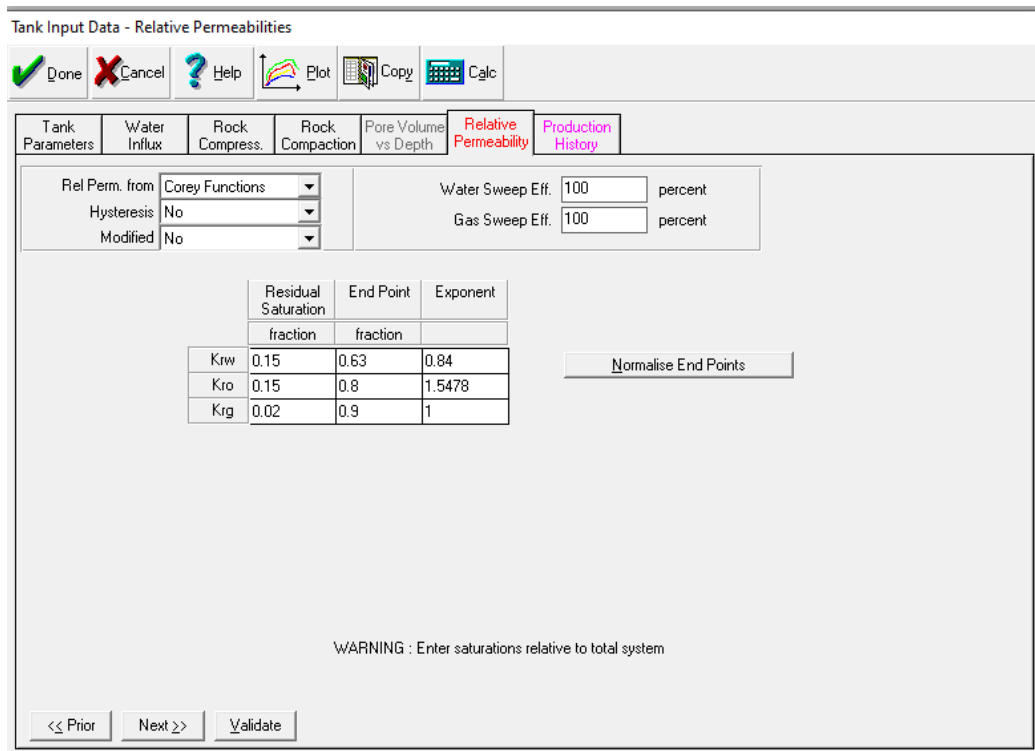
Εικόνα 4.11 : Εισαγωγή βασικών δεδομένων ταμειυτήρα

Στη συνέχεια, απαιτούνται πληροφορίες για πιθανό υδροφορέα. Δεν υπάρχουν σχετικές πληροφορίες οπότε γίνεται η υπόθεση ότι δεν υπάρχει υδροφορέας.



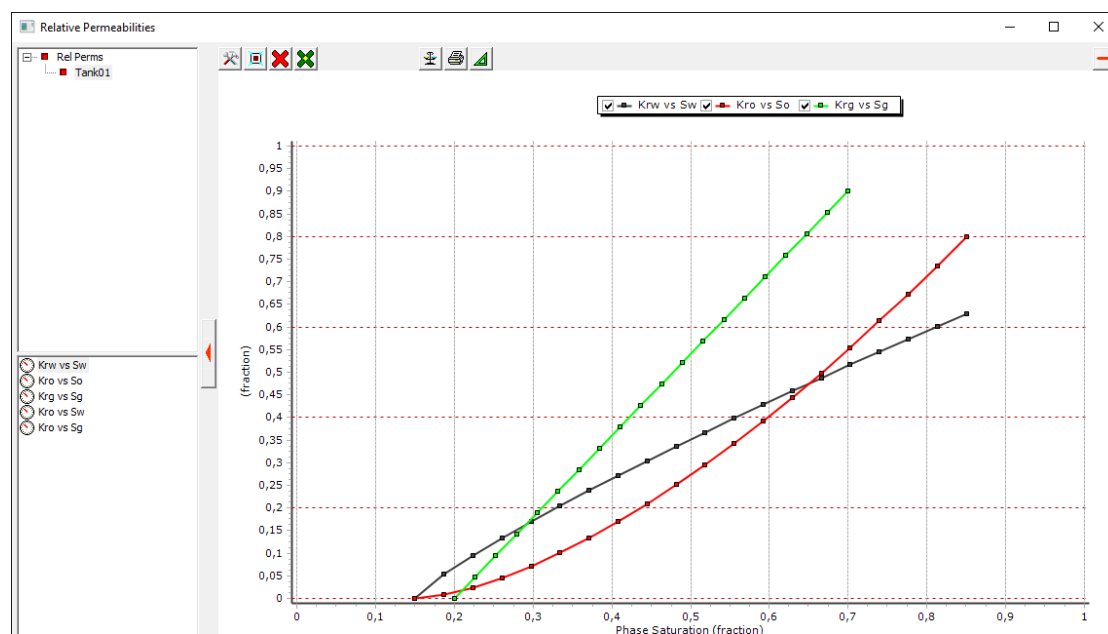
Εικόνα 4.12 : Μοντέλο υδροφορέα δεν εισάγεται

Στη συνέχεια απαιτούνται οι σχετικές διαπερατότητες οπότε στον πίνακα σχετικών διαπερατοτήτων της Εικόνας 4.13, επιλέγεται η χρήση της εξίσωσης Corey και εισάγονται οι πιο τυποποιημένες τιμές σχετικών διαπερατοτήτων για ψαμμιτικούς ταμειυτήρες.



Εικόνα 4.13 : Εισαγωγή σχετικών διαπερατοτήτων

Στο διάγραμμα της Εικόνας 4.14, παριστάνονται οι παράμετροι της εξίσωσης Corey και συγκεκριμένα απεικονίζονται οι σχετικές διαπερατότητες συναρτήσει των κορεσμών.



Εικόνα 4.14 : Διάγραμμα σχετικής διαπερατότητας - κορεσμού

Τέλος, εισάγονται τα διαθέσιμα δεδομένα παραγωγής (Εικόνα 4.15), για τα οποία απαιτούνται να είναι γνωστά τα ακόλουθα :

- ❖ Ημερομηνία καταγραφής
- ❖ Μέση πίεση ταμιευτήρα
- ❖ Αθροιστική παραγωγή πετρελαίου
- ❖ Αθροιστική παραγωγή αερίου
- ❖ Αθροιστική παραγωγή νερού

Tank Input Data - Production History

Done Cancel Help Import Plot Reprt 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 Gas Produced	Cum Wat. Produced	Cum Gas Injected	Cum Wat. Injected	Regression Weighting	Comment
	date d/m/y	psig	MMSTB	MMscf	MMSTB	MMscf	MMSTB		
1	01/01/2022	4992,15	0	0	0			Medium	Edit..
2	01/02/2022	4139,98	1,91525	1311,95	0,000268644			Medium	Edit..
3	01/03/2022	3500,73	3,37381	2311,06	0,00120296			Medium	Edit..
4	01/04/2022	3307,61	3,82584	2620,7	0,0015571			Medium	Edit..
5	01/05/2022	3246,41	3,97071	2719,93	0,00163902			Medium	Edit..
6	01/06/2022	3220,58	4,03208	2761,97	0,00167171			Medium	Edit..
7	01/07/2022	3134,73	4,23485	2900,87	0,00183571			Medium	Edit..
8	01/08/2022	3027,6	4,49056	3076,03	0,00186189			Medium	Edit..
9	01/09/2022	2929,13	4,72751	3238,34	0,0018907			Medium	Edit..
10									
11									
12									
13									
14									
15									
16									

Work with GOR

Εικόνα 4.15 : Εισαγωγή ιστορικών δεδομένων παραγωγής

Επιπλέον, όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.16 επιλέγεται το work with GOR, ώστε να υπολογίζεται το GOR και να διαπιστωθεί αν ταυτίζεται το μετρούμενο στο πεδίο GOR με το εργαστηριακά μετρούμενο Rs. Πράγματι όπως φαίνεται από το διάγραμμα της Εικόνας 4.17 ταυτίζονται και συνεπώς, η υπόθεση που έγινε ότι ο ταμειυτήρας είναι ακόρεστος, είναι αληθής. Το αποτέλεσμα αυτό θα μπορούσε να εκτιμηθεί και από την πίεση φυσαλίδας του ρευστού, η οποία στη θερμοκρασία του ταμειυτήρα είναι πολύ χαμηλότερη από τις πιέσεις του ταμειυτήρα στο χρονικό διάστημα της παραγωγής για το οποίο υπάρχουν δεδομένα.

Tank Input Data - Production History

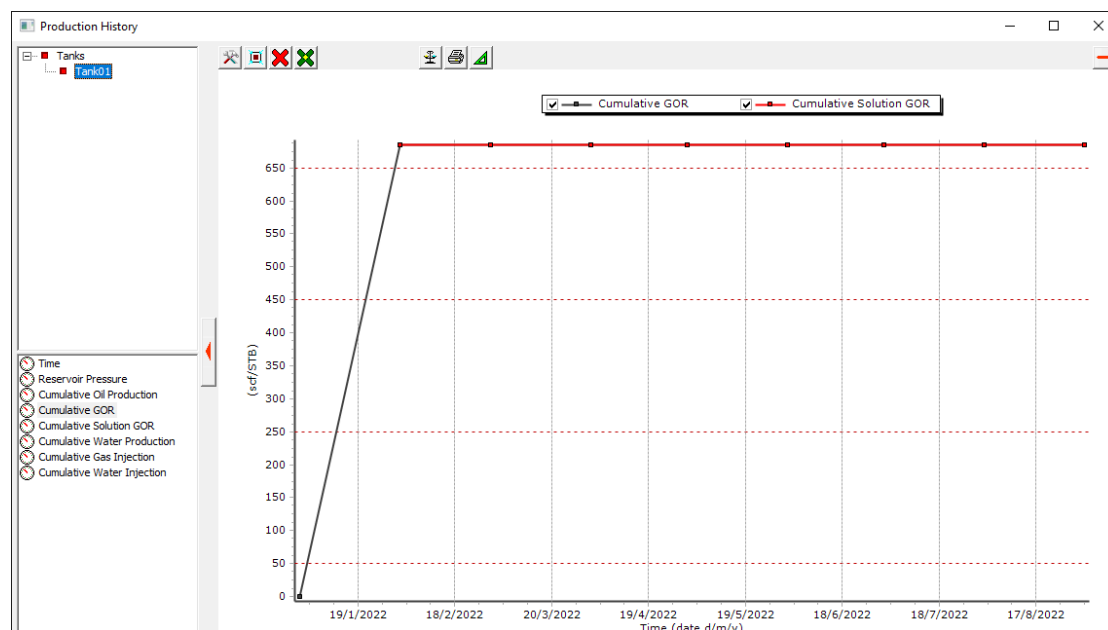
Done Cancel Help Import Plot Report Copy Layout

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	01/01/2022	4992,15	0	0	0			Medium	Edit..
2	01/02/2022	4139,98	1,91525	685,002	0,000268644			Medium	Edit..
3	01/03/2022	3500,73	3,37381	685	0,00120296			Medium	Edit..
4	01/04/2022	3307,61	3,82584	685	0,0015571			Medium	Edit..
5	01/05/2022	3246,41	3,97071	684,998	0,00163902			Medium	Edit..
6	01/06/2022	3220,58	4,03208	684,999	0,00167171			Medium	Edit..
7	01/07/2022	3134,73	4,23485	684,999	0,00183571			Medium	Edit..
8	01/08/2022	3027,6	4,49056	684,999	0,00186189			Medium	Edit..
9	01/09/2022	2929,13	4,72751	684,999	0,0018907			Medium	Edit..
10									
11									
12									
13									
14									
15									
16									

Work with GOR

Εικόνα 4.16 : Εισαγωγή ιστορικών δεδομένων παραγωγής με υπολογισμό του GOR

Στο διάγραμμα της Εικόνας 4.17 αποτυπώνεται το GOR με το R_s . Στην αρχή φαίνεται ότι το GOR ξεκινά από την τιμή μηδέν και φτάνει στην τιμή 685. Ωστόσο, αυτό δεν ισχύει καθώς η πρώτη τιμή του GOR ήταν μηδέν και η διαίρεση μηδέν/μηδέν είναι πρακτικά αδύνατη, οπότε γι' αυτό φαίνεται ότι ξεκινά από την τιμή μηδέν.



Εικόνα 4.17 : Βοηθητικό διάγραμμα GOR-t και R_s -t

4.1.1.2 : 2^η περίπτωση - Χρήση πινάκων (tables)

Σε αυτό το στάδιο θεωρείται ότι περισσότερα δεδομένα PVTs είναι γνωστά οπότε θα χρησιμοποιηθούν. Τα συγκεκριμένα δεδομένα προκύπτουν από διαθέσιμο πείραμα DV για το ρευστό όπως αναλύθηκε στο κεφάλαιο 1. Με βάση το πείραμα αυτό είναι διαθέσιμες οι τιμές παραμέτρων για πιέσεις από την αρχική πίεση του ταμειυτήρα μέχρι και την πίεση των 1,331.7 psi (πίεση κορεσμού), ώστε να δημιουργηθούν οι απαραίτητοι πίνακες (tables) δεδομένων που περιλαμβάνουν τις εξής παραμέτρους :

- ❖ Πίεση (P)
- ❖ Λόγος διαλυμένου αερίου (R_s)
- ❖ Ογκομετρικός συντελεστής πετρελαίου (B_o)
- ❖ Ιξώδες (μ)

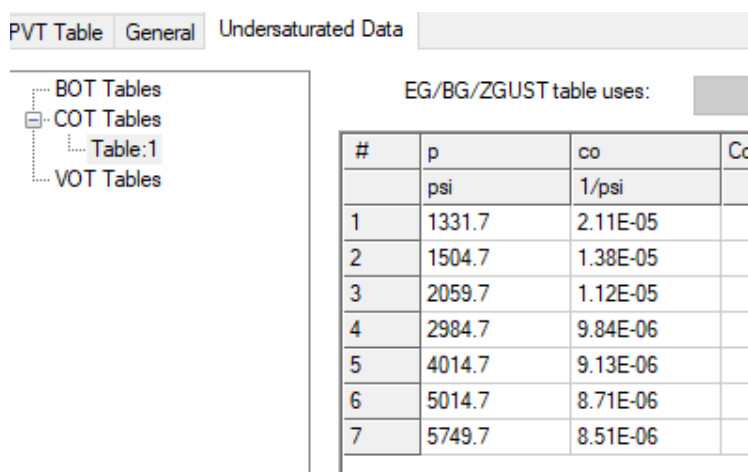
Ωστόσο, για πιέσεις μεγαλύτερες του 1,331.7 psi (πίεση κορεσμού) δεν περιλαμβάνονται τιμές το B_o , το οποίο τελικά υπολογίζεται σε κάθε πίεση από την παρακάτω εξίσωση.

$$B_{oi+1} = B_{oi}(1 - c_o(P_{oi+1} - P_o))$$

όπου B_{o+1} και B_{oi} : οι τιμές του B_o στην αρχική πίεση P_o και P_{o+1} αντίστοιχα και c_o : ο συντελεστής συμπίεσότητας του πετρελαίου

Η παραπάνω εξίσωση προκύπτει από την εξίσωση ορισμού του συντελεστή συμπίεσότητας του πετρελαίου : $C = \frac{1}{B_o} * \frac{dB_o}{dp}$

Ο συντελεστής συμπίεσότητας C της εξίσωσης δίνεται από το πείραμα CCE για κάθε πίεση πάνω από την πίεση φυσαλίδας όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.18.



PVT Table General Undersaturated Data

EG/BG/ZGUST table uses:

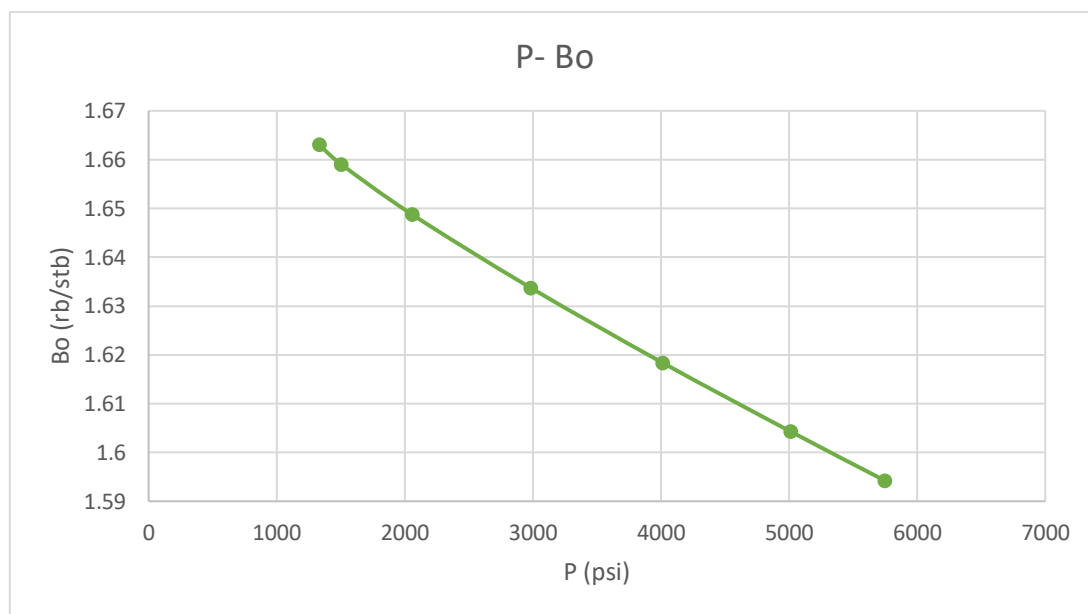
#	p	c _o	C _c
	psi	1/psi	
1	1331.7	2.11E-05	
2	1504.7	1.38E-05	
3	2059.7	1.12E-05	
4	2984.7	9.84E-06	
5	4014.7	9.13E-06	
6	5014.7	8.71E-06	
7	5749.7	8.51E-06	

Εικόνα 4.18 : Πίνακας συντελεστή συμπίεσότητας πετρελαίου σε διάφορες πιέσεις μεγαλύτερες της πίεσης κορεσμού από το εργαστηριακό πείραμα CCE

Οι υπολογισμένες τιμές της παραμέτρου B_o για κάθε πίεση πάνω από το σημείο φυσαλίδας δίνονται στον πίνακα της Εικόνας 4.19, ενώ αποτυπώνονται σε διάγραμμα στην Εικόνα 4.20.

P (psi)	c_o (1/psi)	B_o ($\frac{rb}{stb}$)
1331,7	2,11E-05	1,663
1504,7	1,38E-05	1,659
2059,7	1,12E-05	1,648
2984,7	9,84E-06	1,633
4014,7	9,13E-06	1,618
5014,7	8,71E-06	1,604
5749,7	8,51E-06	1,594

Εικόνα 4.19 : Υπολογισμένες τιμές B_o για $P > 1,331.7$ psi (σημείο κορεσμού)



Εικόνα 4.20 : Διάγραμμα πίεσης (psi) – ογκομετρικός συντελεστής πετρελαίου (rb/stb) για $P > 1,331.7$ psi

Ταυτόχρονα, πρέπει να αναφερθεί ότι οι τιμές του ιξώδους για πίεση μεγαλύτερη της πίεσης κορεσμού αλλάζουν αλλά επειδή η μέθοδος ισοζυγίου μάζας διαχειρίζεται όγκους, οι διαφορές των τιμών μπορούν να θεωρηθούν ασήμαντες και γι' αυτό στο λογισμικό λαμβάνονται ως σταθερές.

Έτσι, συμπληρώθηκε ο πίνακας της Εικόνας 4.21.

Oil - Flash PVT Table

Done Cancel Help Reset Import Export Plot Copy

Temperature 245 deg F Table 1 (T=245)

Bubble Point 1317 psig

	Pressure	Gas Oil Ratio	Oil FVF	Oil Viscosity	Gas FVF	Gas Viscosity	Water FVF
	psig	scf/STB	RB/STB	centipoise	ft3/scf	centipoise	RB/STB
1	5735	972	1,59422	0,55			
2	5000	972	1,60425	0,55			
3	4000	972	1,61835	0,55			
4	2970	972	1,63371	0,55			
5	2045	972	1,64872	0,55			
6	1490	972	1,65903	0,55			
7	1317	972	1,663	0,55			
8	1100	858	1,604	0,57			
9	855	726	1,538	0,69			
10	607	573	1,46	0,72			
11	350	376	1,355	0,98			
12	152	187	1,242	1,26			

Interpolate Bg as 1/B

Εικόνα 4.21 : Εισαγωγή δεδομένων που αφορούν τις ιδιότητες του ρευστού

Oil - Flash PVT Table

Done Cancel Help Reset Import Export Plot Copy

Temperature 245 deg F Table 1 (T=245)

Bubble Point 1317 psig

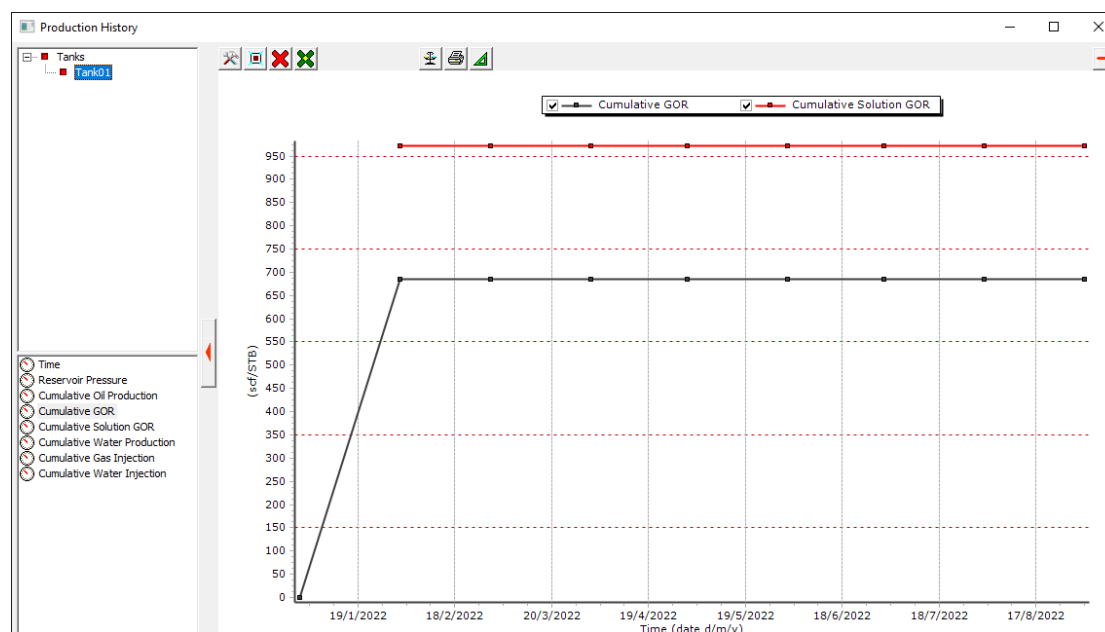
	Pressure	Gas Oil Ratio	Oil FVF	Oil Viscosity	Gas FVF	Gas Viscosity	Water FVF
	psig	scf/STB	RB/STB	centipoise	ft3/scf	centipoise	RB/STB
3	4000	972	1,61835	0,55			
4	2970	972	1,63371	0,55			
5	2045	972	1,64872	0,55			
6	1490	972	1,65903	0,55			
7	1317	972	1,663	0,55			
8	1100	858	1,604	0,57			
9	855	726	1,538	0,69			
10	607	573	1,46	0,72			
11	350	376	1,355	0,98			
12	152	187	1,242	1,26			
13	0	0	1,081	1,67			
14							

Interpolate Bg as 1/B

Εικόνα 4.22 : Εισαγωγή δεδομένων που αφορούν τις ιδιότητες του ρευστού (συνέχεια της Εικόνας 4.21)

Στη συνέχεια, απαιτούνται δεδομένα για τον ταμειυτήρα οπότε και ακολουθήθηκε ακριβώς η ίδια διαδικασία που αναλύθηκε προηγουμένως στην 1^η περίπτωση.

Σε αυτή την περίπτωση ωστόσο, το διάγραμμα που προκύπτει που αποτυπώνει το GOR με το R_s σε σχέση με τον χρόνο παρουσιάζει τη διαφορά μεταξύ αυτών των δύο παραμέτρων όπως είναι λογικό, καθώς εξαρχής εισήχθησαν διαφορετικές τιμές σε αυτές τις δύο ιδιότητες, δεν ταυτίζονται (Εικόνα 4.23).



Εικόνα 4.23 : Βοηθητικό διάγραμμα GOR – t και R-t

Ήταν γνωστή εξαρχής η λανθασμένη προσέγγιση αυτής της περίπτωσης και η οποία επιβεβαιώθηκε με το βοηθητικό διάγραμμα. Παρόλα αυτά, η συγκεκριμένη περίπτωση θα αξιολογηθεί περαιτέρω θεωρώντας ακόρεστο τον ταμιευτήρα, προκειμένου να εκτιμηθεί ποια θα ήταν η επίπτωση ενός τέτοιου σφάλματος στα αποτελέσματα της εφαρμογής της μεθόδου ισοζυγίου μάζας.

4.1.1.3 : 3^η περίπτωση - Χρήση πινάκων (με διόρθωση τιμών B_o και R_s)

Το πείραμα DV μέσω του οποίου μετρήθηκαν οι τιμές των ογκομετρικών παραμέτρων αφορά στις μεταβολές των όγκων μέσα στον ταμιευτήρα. Το ενδιαφέρον όμως έγκειται σε όλο το σύστημα παραγωγής, από τον ταμιευτήρα μέχρι την επιφάνεια. Γι' αυτό λοιπόν τον λόγο είναι σημαντικό να γίνεται διόρθωση των πειραματικών τιμών αυτών λαμβάνοντας υπόψη και τις συνθήκες επιφάνειας. Η διόρθωση αυτή έγινε σύμφωνα με τον Dake (κεφάλαιο 1) οπότε και υπολογίζονται οι νέες τιμές των παραμέτρων B_o και R_s για κάθε πίεση, οι οποίες και εισήχθησαν στο λογισμικό.

Οι σχέσεις που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι ακόλουθες :

$$B'_{oi} = B_{oi(DV)} * \left(\frac{B_{ob(F)}}{B_{ob(DV)}} \right)$$

$$R'_{si} = R_{sb(F)} - (R_{sb(DV)} - R_{si(DV)}) * \left(\frac{B_{ob(F)}}{B_{ob(DV)}} \right)$$

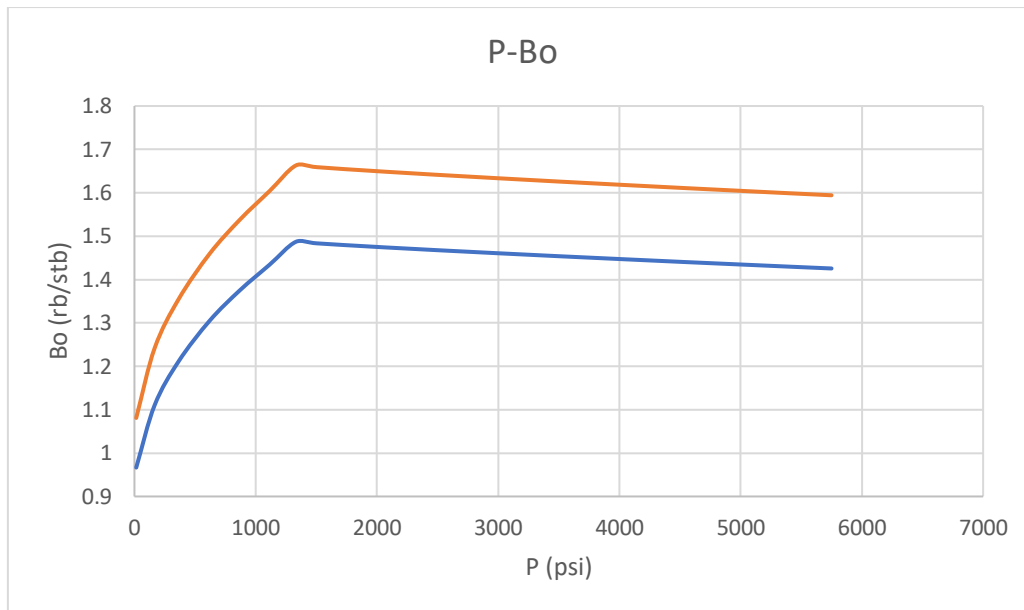
Όπου:

- $B_{ob(F)} = 1.487 \text{rb/stb}$, αυτή η τιμή έχει προκύψει από το πείραμα διαχωρισμού (flash)
- $B_{oi}' = B_o$ προσαρμοσμένο στις συνθήκες του διαχωριστική
- $B_{oi(dv)} = B_o$ που λαμβάνεται από το πείραμα DV
- $R_{sb(F)} = 685 \text{scf/stb}$, αυτή η τιμή έχει προκύψει από το πείραμα διαχωρισμού (flash)
- $R_{sb(F)}$ = σημείο φυσαλίδας GOR που λαμβάνεται από τον διαχωριστή
- $R_{sb(DV)}$ = σημείο φυσαλίδας GOR που λαμβάνεται από το πείραμα DV
- $R_{si(DV)}$ = GOR που λαμβάνεται από το πείραμα DV

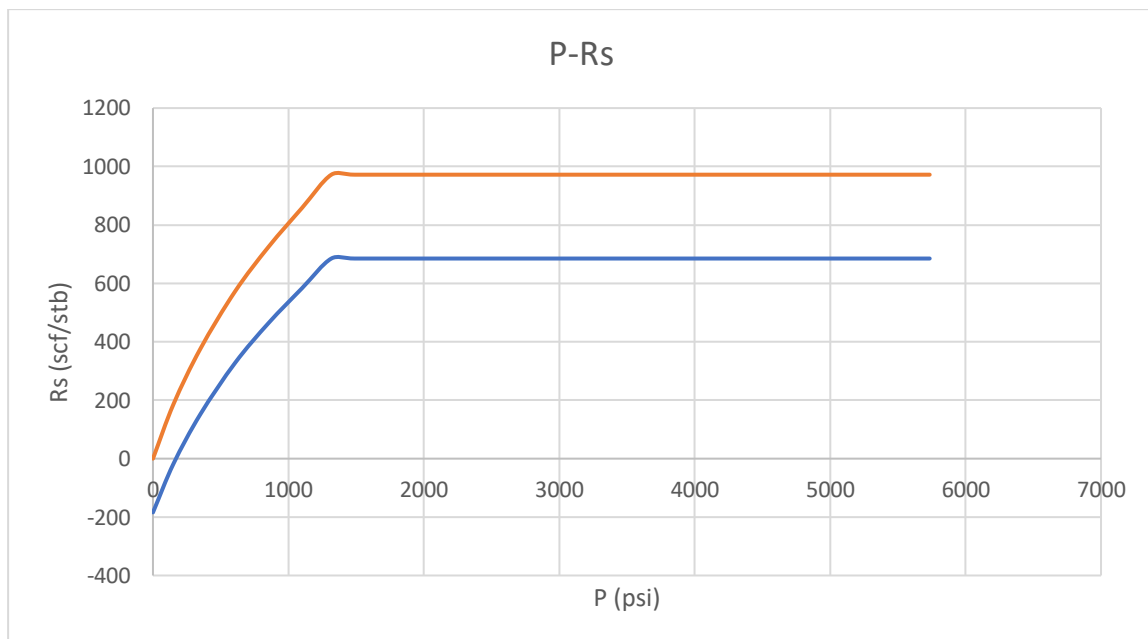
Ακολουθεί ο πίνακας της Εικόνας 4.24 με τις νέες διορθωμένες κατά Dake τιμές των ογκομετρικών παραμέτρων B_o και R_s . Στα διαγράμματα των Εικόνων 4.25 και 4.26 αντίστοιχα, δίνονται οι μη διορθωμένες (πορτοκαλί γραμμή) αλλά και οι διορθωμένες κατά Dake (μπλε γραμμή) καμπύλες των παραμέτρων αυτών.

P (psi)	R_s' (scf/stb)	B_o' (rb/stb)
5,749.7	685	1.425
5,014.7	685	1.434
4,014.7	685	1.447
2,984.7	685	1.461
2,059.7	685	1.474
1,504.7	685	1.483
1,331.7	685	1.487
1,114.7	583	1.43
869.7	465	1.37
621.7	328	1.31
364.7	152	1.21
166.7	-16	1.11
14.7	-184	0.97

Εικόνα 4.24 : Τιμές B_o και R_s διορθωμένες κατά Dake



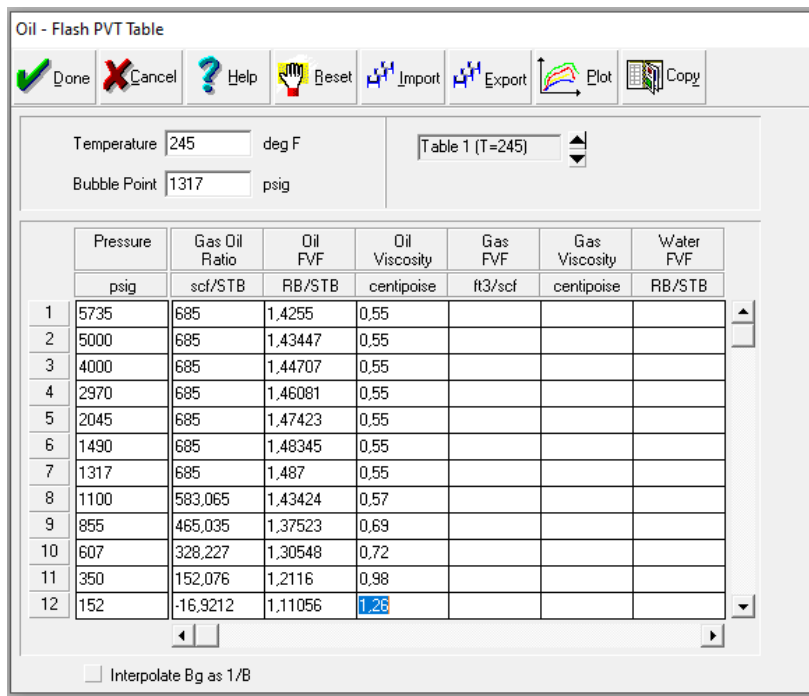
Εικόνα 4.25 : Διάγραμμα πίεσης (psi) – ογκομετρικός συντελεστής πετρελαίου διορθωμένου κατά Dake και μη (rb/stb)



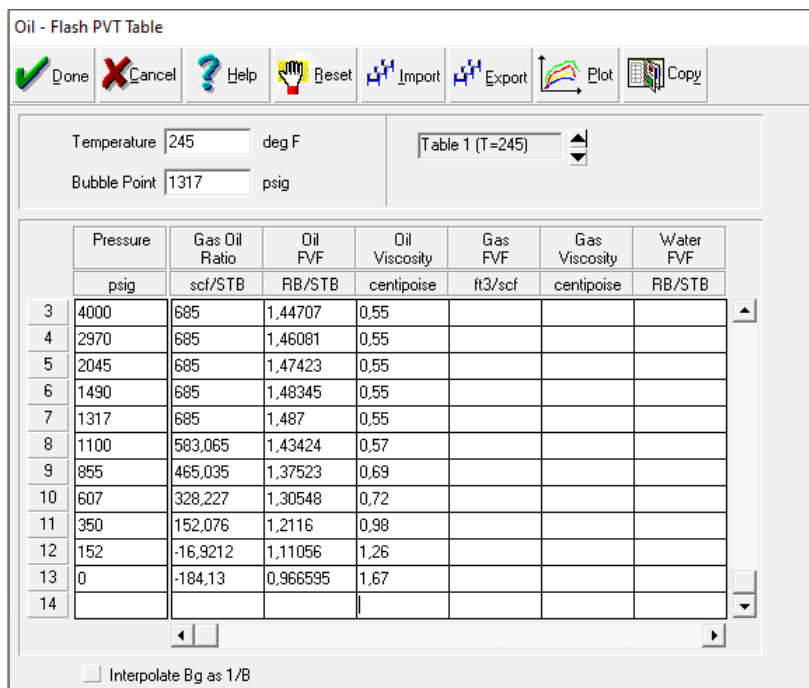
Εικόνα 4.26 : Διάγραμμα πίεσης (psi) – λόγου αερίου προς πετρέλαιο σε συνθήκες επιφάνειας διορθωμένο κατά Dake και μη (scf/stb)

Η συγκεκριμένη μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε έχει ως μειονέκτημα ότι το B_o γίνεται σε κάποιες περιπτώσεις μικρότερο της μονάδας και το R_s αρνητικό. Πρακτικά, είναι γνωστό ότι αυτό είναι αδύνατο. Ωστόσο, αυτό δεν επηρεάζει την περίπτωση του συγκεκριμένου ταμειυτήρα διότι ο ταμειυτήρας δουλεύει σε πιέσεις αρκετά μεγαλύτερες της πίεσης κορεσμού.

Έτσι, συμπληρώνεται ο πίνακας της Εικόνας 4.27.



Εικόνα 4.27 : Εισαγωγή δεδομένων που αφορούν τις ιδιότητες του ρευστού



Εικόνα 4.28 : Εισαγωγή δεδομένων που αφορούν τις ιδιότητες του ρευστού (συνέχεια της Εικόνας 4.27)

Παρατηρώντας τις τιμές του πίνακα των Εικόνων 4.27 και 4.28, διακρίνεται ότι σε κάποιες πιέσεις το B_o είναι μικρότερο της μονάδας και R_s είναι αρνητικό. Αυτά δεν γίνεται να ισχύουν και φαινομενικά είναι λάθος, όμως είναι γνωστό ότι είναι μειονέκτημα της μεθόδου με τις φόρμουλες που χρησιμοποιήθηκαν οπότε γι' αυτό δεν παραξενεύει. Το βασικότερο όμως είναι ότι στη συγκεκριμένη περίπτωση ο ταμιευτήρας δουλεύει σε υψηλές μόνο πιέσεις πάνω

δηλαδή από το bubble point, οπότε αυτές οι τιμές δεν επηρεάζουν τους υπολογισμούς με το ισοζύγιο μάζας.

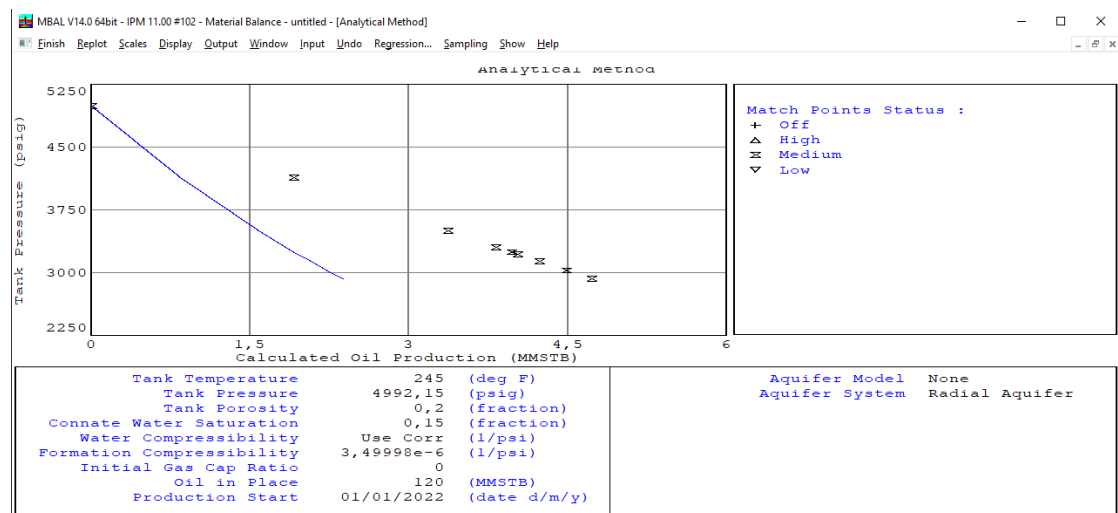
Στη συνέχεια, απαιτούνται τα δεδομένα για να οριστεί ο ταμιευτήρας και έγινε ακριβώς η ίδια διαδικασία που αναλύθηκε στην 1^η περίπτωση.

4.2 Διαδικασία Ιστορικής Ταύτισης (History Matching)

Με τη διαδικασία της ιστορικής ταύτισης, καλείται το μοντέλο που έχει αναπτυχθεί με βάση τις υποθέσεις και τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν παραπάνω, να αναπαράγει τα δεδομένα της παραγωγής, τα οποία είναι διαθέσιμα. Σε αυτή τη διαδικασία θα ελεγχθεί αν η αρχική υπόθεση για την απουσία του υδροφορέα είναι σωστή, μέσω των διαγραμμάτων που αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 2. Πιο συγκεκριμένα, η διαδικασία θα υλοποιηθεί και για τις τρεις περιπτώσεις χρήσης των PVT δεδομένων που αναπτύχθηκαν παραπάνω.

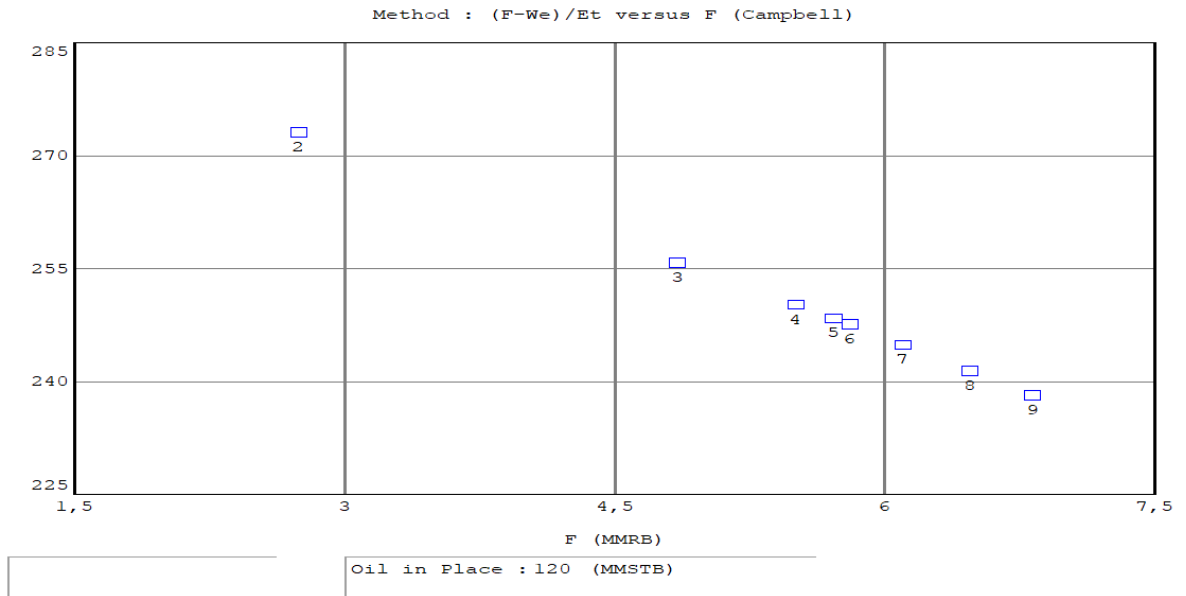
4.2.1 : 1^η περίπτωση (PVTs με συσχετίσεις)

Επιλέγοντας το History Matching → Analytical Method, προκύπτει το ακόλουθο διάγραμμα πίεσης και παραγωγής πετρελαίου που φαίνεται στην Εικόνα 4.29, όπου η μπλε γραμμή αποτελεί την πρόβλεψη του μοντέλου και η οποία αποκλίνει από αυτή των ιστορικών δεδομένων (σημεία). Αυτό σημαίνει ότι το μοντέλο δεν περιγράφει σωστά την παραγωγική συμπεριφορά του ταμιευτήρα.



Εικόνα 4.29 : Αναλυτικό διάγραμμα πίεσης και παραγωγής πετρελαίου

Στη συνέχεια, παριστάνεται το διάγραμμα Campbell (Graphical Method), στην Εικόνα 4.30, το οποίο έχει παρουσιαστεί στο κεφάλαιο 3. Η γραμμή που προκύπτει απέχει από τη μορφή οριζόντιας ευθείας υποδεικνύοντας την ύπαρξη υδροφορέα που επιδρά στην παραγωγική συμπεριφορά του ταμιευτήρα. Θα πρέπει, ωστόσο, να σημειωθεί ότι η απόκλιση της γραμμής Campbell από την οριζόντιο είναι σχετικά μικρή (εύρος τιμών 240 – 270 MMSTB).



Εικόνα 4.30 : Διάγραμμα Campbell

Στο μοντέλο αυτό προστέθηκε η ύπαρξη υδροφορέα.

Συγκεκριμένα, επιλέχθηκε το μοντέλο υδροφορέα Hurst – van Everdingen – Modified, ενώ συμπληρώθηκαν και απαιτούμενα δεδομένα γι' αυτόν όπως παρουσιάζονται στην Εικόνα 4.31. Οι τιμές που δόθηκαν αποτελούν τυπικές τιμές για έναν υδροφορέα με μερική επίδραση στον ταμιευτήρα.

Tank Input Data - Water Influx

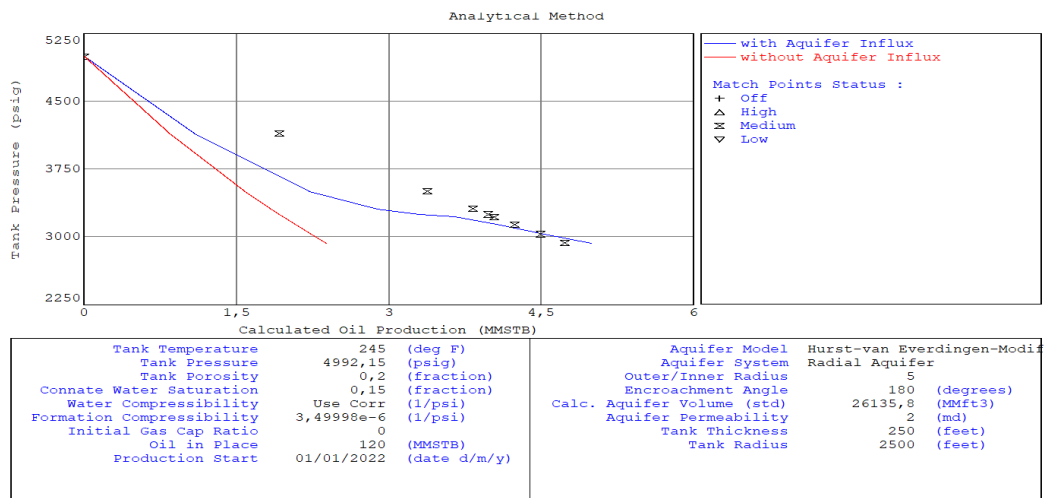
Done Cancel Help

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: 2 md						

<< Prior Next >>

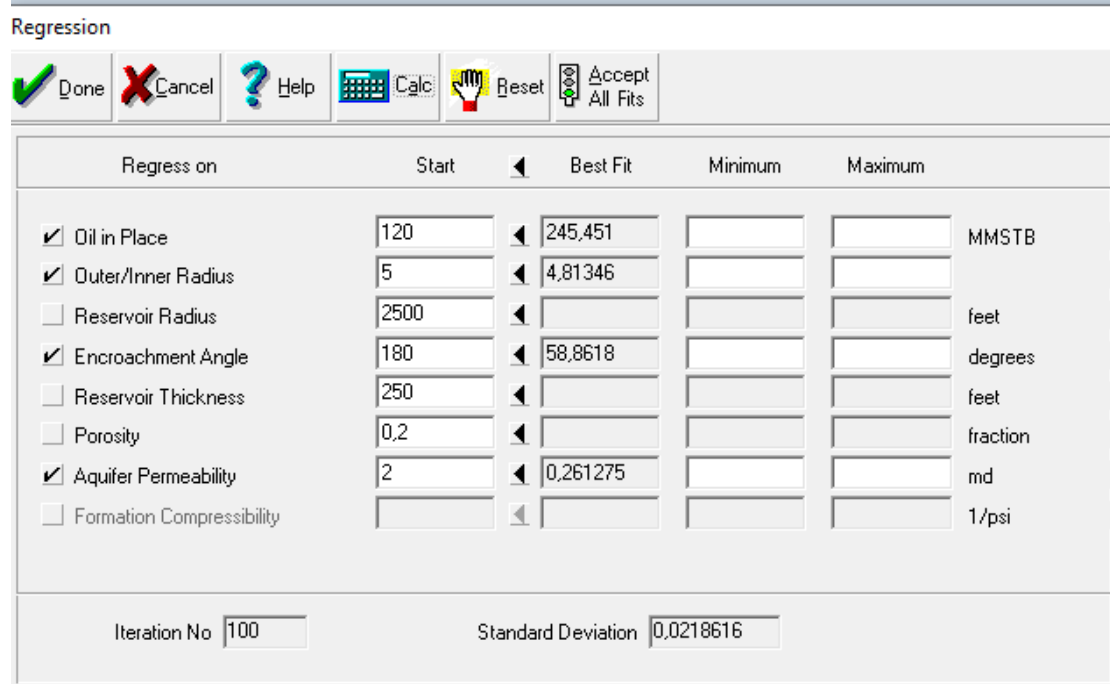
Εικόνα 4.31 : Εισαγωγή μοντέλου που περιγράφει τον υδροφορέα

Το νέο αναλυτικό διάγραμμα που προκύπτει από την εισαγωγή του υδροφορέα παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.32 όπου παρουσιάζεται βελτιωμένη η πρόβλεψη των ιστορικών δεδομένων από το μοντέλο.



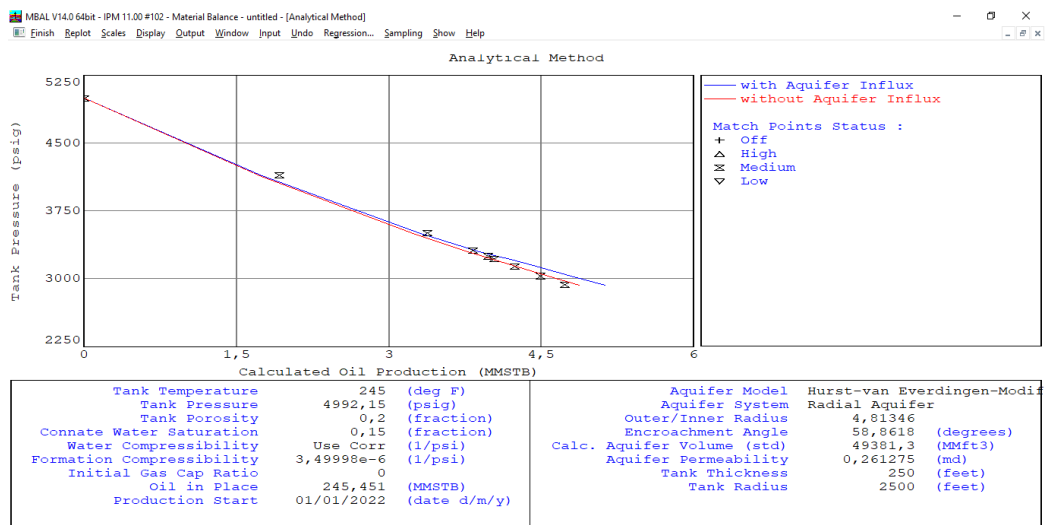
Εικόνα 4.32 : Αναλυτικό διάγραμμα με μοντέλο υδροφορέα

Για να βελτιστοποιηθεί η πρόβλεψη των ιστορικών δεδομένων από το μοντέλο, πραγματοποιείται στη συνέχεια η διαδικασία της παλινδρόμησης. Στην Εικόνα 4.33 παρουσιάζονται οι διορθώσεις που έγιναν μέσω της παλινδρόμησης στις τιμές των παραμέτρων των αρχικών αποθεμάτων πετρελαίου και σε παραμέτρους που αφορούν τον υδροφορέα.



Εικόνα 4.33 : Διόρθωση τιμών με τη διαδικασία της παλινδρόμησης

Όπως προκύπτει μετά την παλινδρόμηση, στο αναλυτικό διάγραμμα της Εικόνας 4.34, φαίνεται ότι ταυτίζεται η καμπύλη του μοντέλου με υδροφορέα με την καμπύλη των ιστορικών δεδομένων παραγωγής και ταυτόχρονα με την καμπύλη του μοντέλου χωρίς υδροφορέα. Αυτό σηματοδοτεί ότι ο υδροφορέας είναι πολύ αδύναμος οπότε επί της ουσίας είναι σαν να μην υπάρχει. Το γεγονός ότι ο υδροφορέας είναι πολύ αδύναμος φαίνεται και στις τιμές των ιδιοτήτων του όπως προέκυψαν μετά την παλινδρόμηση και παρουσιάζονται στην Εικόνα 4.35. Παρατηρείται ότι η διαπερατότητά του είναι πάρα πολύ μικρή, καθώς έχει την τιμή 0.26mD και η γωνία επαφής του υδροφόρου με τον ταμειυτήρα είναι εξίσου πολύ μικρή. Γι' αυτούς τους λόγους συμπεραίνεται ότι η προηγούμενη υπόθεση ύπαρξης υδροφορέα δεν ήταν ορθή και ότι υπήρχε υδροφορέας θα ήταν πολύ αδύναμος, επομένως δεν επηρεάζει τον ταμειυτήρα και συνεπώς δε λαμβάνεται υπόψη.



Εικόνα 4.34 : Αναλυτικό διάγραμμα μετά τη διαδικασία της παλινδρόμησης

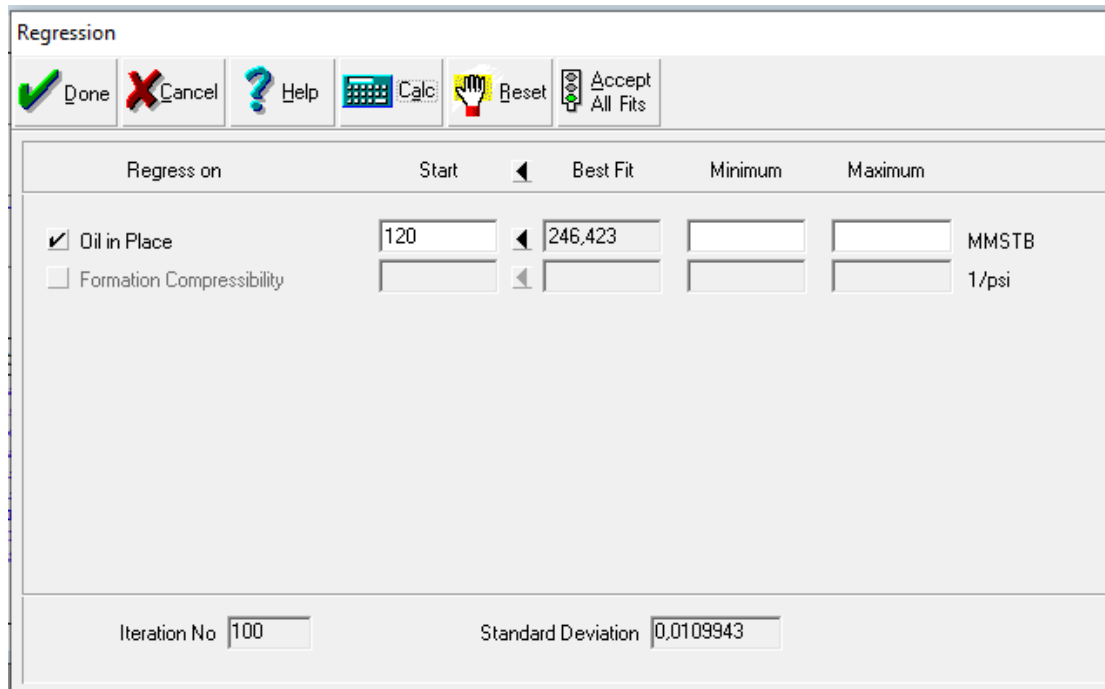
Tank Input Data - Water Influx

Model: Hurst-van Everdingen-Modified
System: Radial Aquifer

Reservoir Thickness: 250 feet
Reservoir Radius: 2500 feet
Outer/Inner Radius ratio: 4,81346
Encroachment Angle: 58,8618 degrees
Aquifer Permeability: 0,261275 md

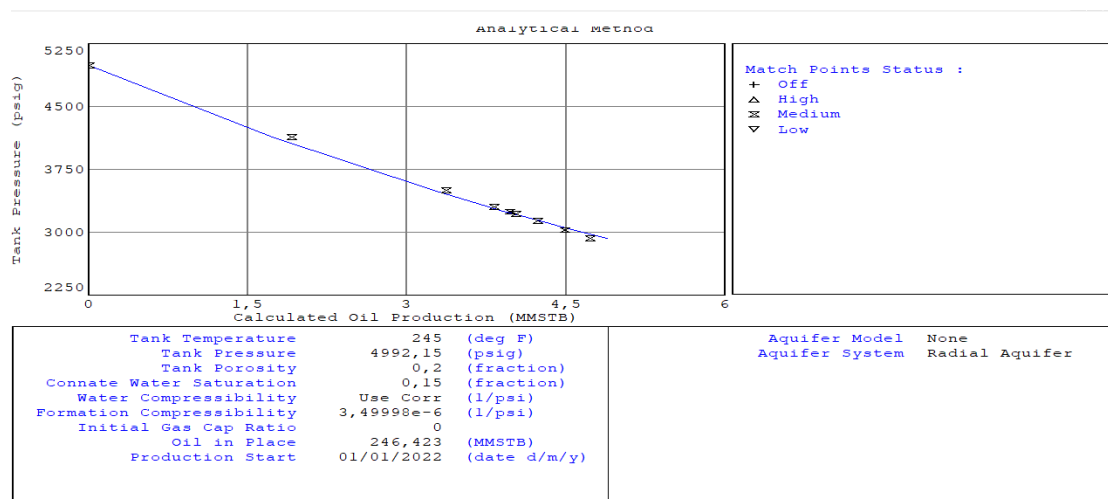
Εικόνα 4.35 : Τιμές ιδιοτήτων του μοντέλου υδροφορέα μετά την παλινδρόμηση

Συνεπώς, η διαδικασία της παλινδρόμησης επαναλαμβάνεται χωρίς ύπαρξη υδροφορέα, το οποίο σημαίνει ότι η παράμετρος επί της οποίας θα πραγματοποιηθεί η παλινδρόμηση είναι τα αρχικά αποθέματα σε πετρέλαιο (Εικόνα 4.36).



Εικόνα 4.36 : Διόρθωση τιμής αρχικών αποθεμάτων πετρελαίου κατά τη διαδικασία της παλινδρόμησης

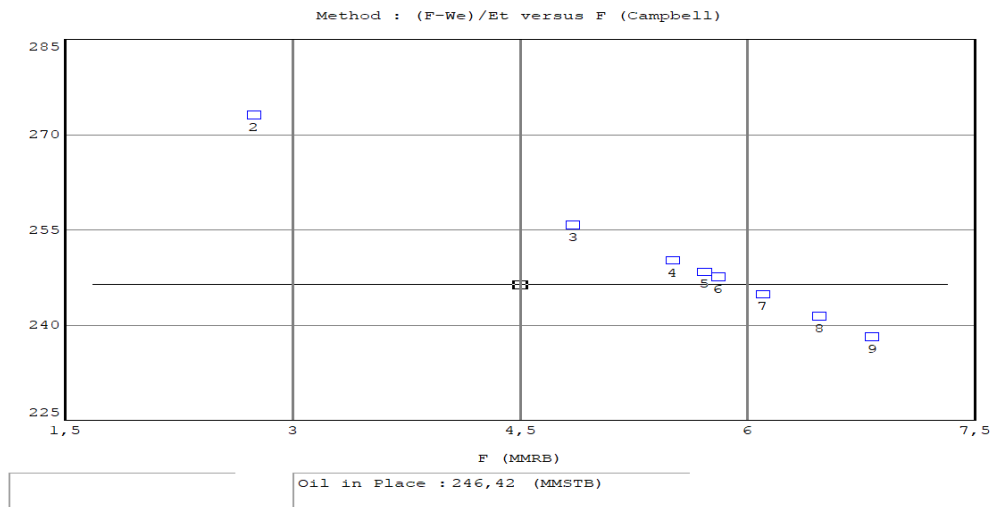
Στην Εικόνα 4.37, παρουσιάζεται το νέο αναλυτικό διάγραμμα όπου φαίνεται ότι η πρόβλεψη του μοντέλου ταυτίζεται με τα ιστορικά δεδομένα παραγωγής.



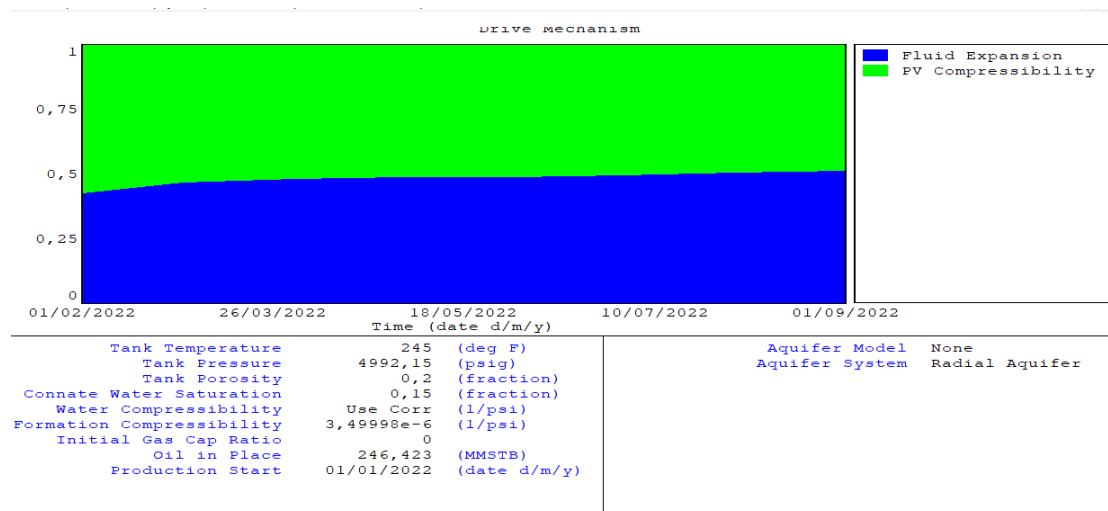
Εικόνα 4.37 : Αναλυτικό διάγραμμα μετά τη διαδικασία της παλινδρόμησης

Το διάγραμμα της εικόνας 4.38 είναι βελτιωμένο σε σχέση με της εικόνας 4.30, ενώ στην εικόνα 4.39 παρουσιάζεται το διάγραμμα Energy Plot το οποίο δείχνει ότι η συμπιεστότητα

των πόρων συνεισφέρει λίγο περισσότερο από το 50% στην παραγωγή και η εξάπλωση του πετρελαίου σε λίγο λιγότερο από το 50%.



Εικόνα 4.38 : Διάγραμμα Campbell μετά τη διαδικασία της παλινδρόμησης

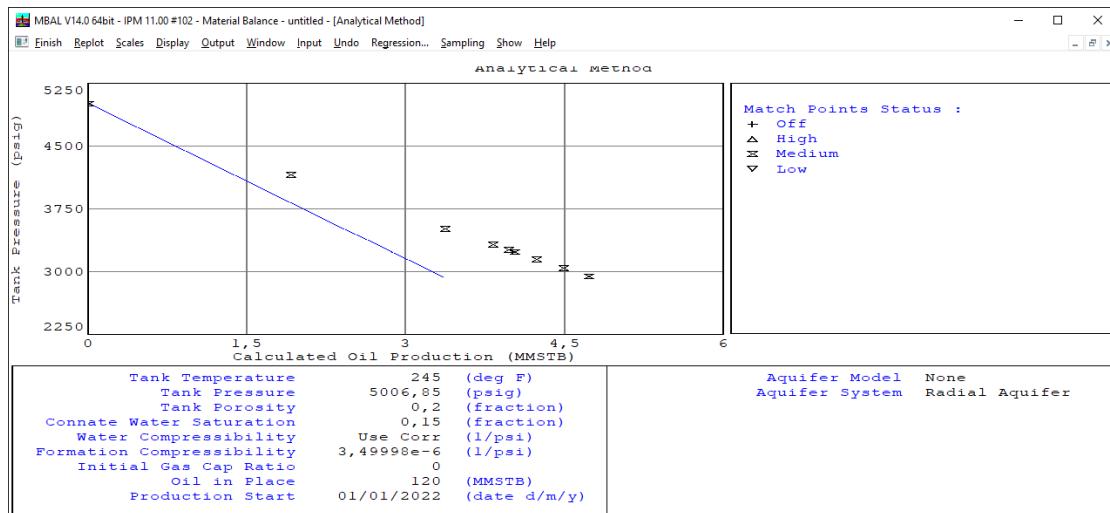


Εικόνα 4.39 : Διάγραμμα Energy Plot μετά τη διαδικασία της παλινδρόμησης

Όπως φάνηκε, η τιμή των αρχικών αποθεμάτων μεταβάλλεται στα 246MM STB.

4.2.2 : 2^η περίπτωση (PVTs με πίνακες από τη μελέτη DV)

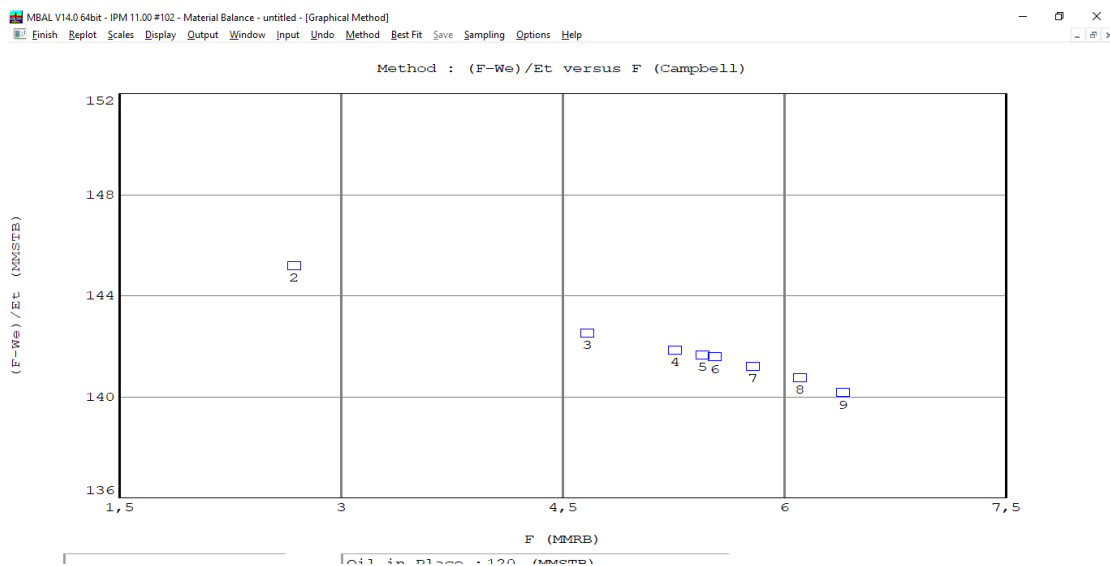
Επιλέγοντας το History Matching → Analytical Method προκύπτει το διάγραμμα πίεσης και παραγωγής πετρελαίου της Εικόνας 4.40, όπου υπάρχει απόκλιση μεταξύ της πρόβλεψης της παραγωγής από το μοντέλο και των σημείων της ιστορικής παραγωγής.



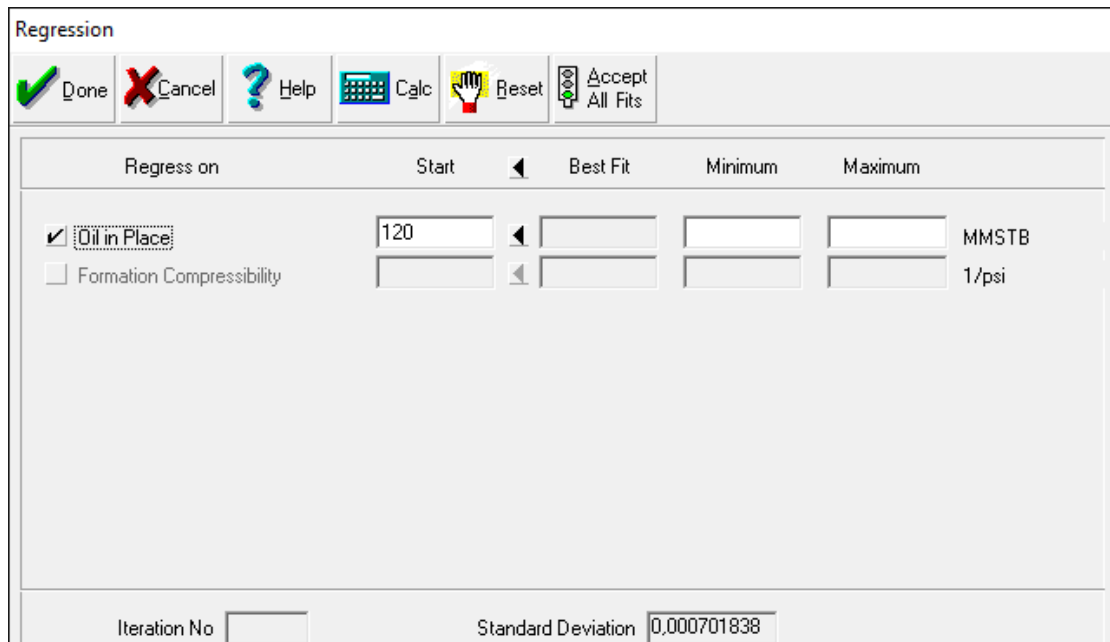
Εικόνα 4.40 : Αναλυτικό διάγραμμα

Το αντίστοιχο διάγραμμα Campbell (Graphical Method) παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.41, όπου η γραμμή που προκύπτει έχει σχεδόν τη μορφή οριζόντιας ευθείας γραμμής, υποδεικνύοντας ότι δεν υπάρχει υδροφορέας.

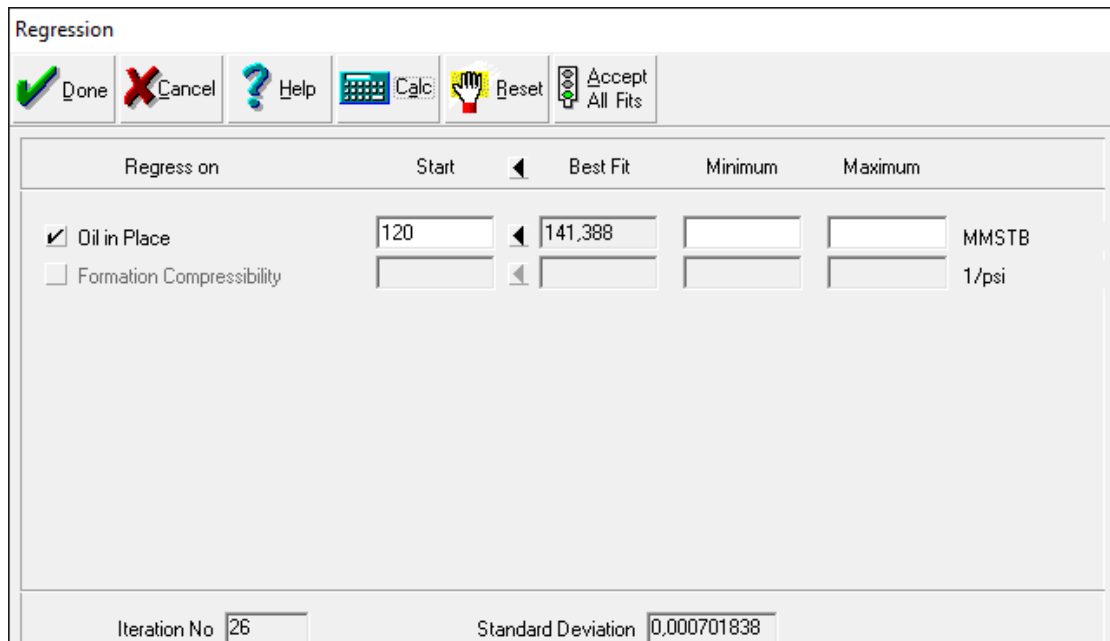
Προκειμένου να επιτευχθεί πλήρης ταύτιση της γραμμής του μοντέλου με αυτή των ιστορικών δεδομένων για το διάγραμμα που προέκυψε από τη Analytical Method και δεδομένου ότι δεν συνυπολογίζεται ύπαρξη υδροφορέα, πραγματοποιείται η διαδικασία της παλινδρόμησης (regression), έχοντας ως μόνη μεταβλητή την εκτίμηση των αποθεμάτων πετρελαίου του ταμειυτήρα.



Εικόνα 4.41 : Διάγραμμα Campbell

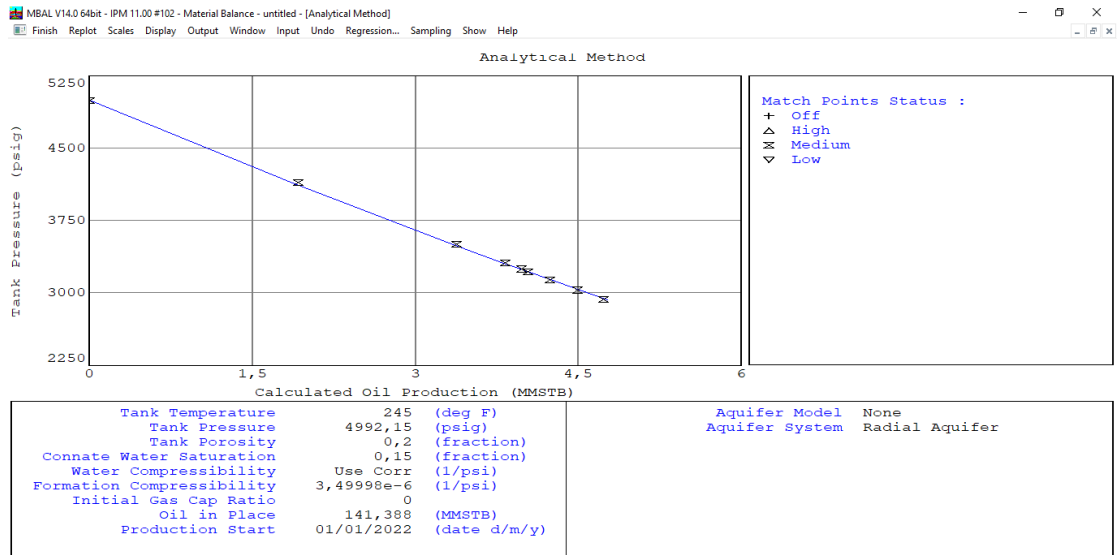


Εικόνα 4.42: Τιμή αποθεμάτων πριν τη διαδικασία της παλινδρόμησης



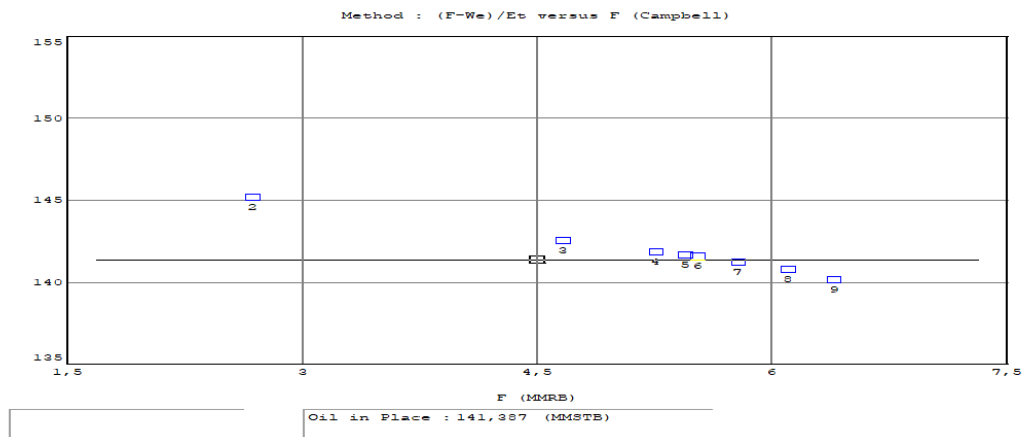
Εικόνα 4.43 : Διόρθωση τιμών κατά τη διαδικασία της παλινδρόμησης

Το αναλυτικό διάγραμμα που προκύπτει μετά τη διαδικασία της παλινδρόμησης παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.44, όπου αποτυπώνεται η ταύτιση της πρόβλεψης του μοντέλου και των σημείων της ιστορικής παραγωγής, ενώ η τιμή των αρχικών αποθεμάτων πετρελαίου μεταβάλλεται στα 142MM STB σε σχέση με την αρχική των 120MM STB.



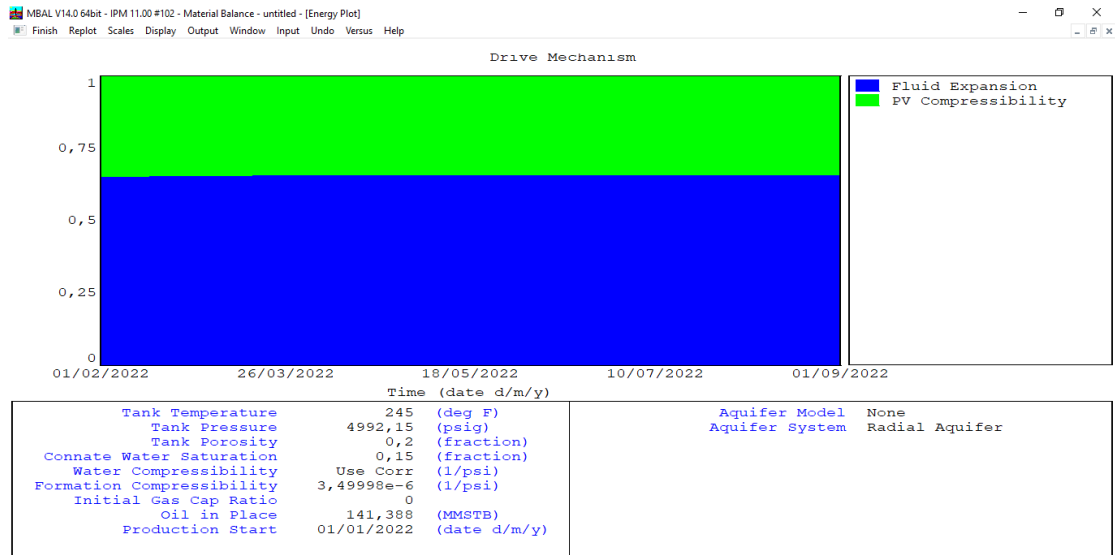
Εικόνα 4.44 : Αναλυτικό διάγραμμα μετά τη διαδικασία της παλινδρόμησης

Στην Εικόνα 4.45, παριστάνεται το διάγραμμα Campbell το οποίο είναι εμφανώς βελτιωμένο και στην Εικόνα 4.46 το Energy Plot το οποίο δείχνει πάλι τους δύο μηχανισμούς που συνεισφέρουν στην παραγωγή με ποσοστό 70% περίπου η εξάπλωση του πετρελαίου και 30% η συμπίεστικότητα των πόρων.



Εικόνα 4.45 : Διάγραμμα Campbell μετά τη διαδικασία της παλινδρόμησης

Τέλος, το διάγραμμα Energy Plot παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.46.



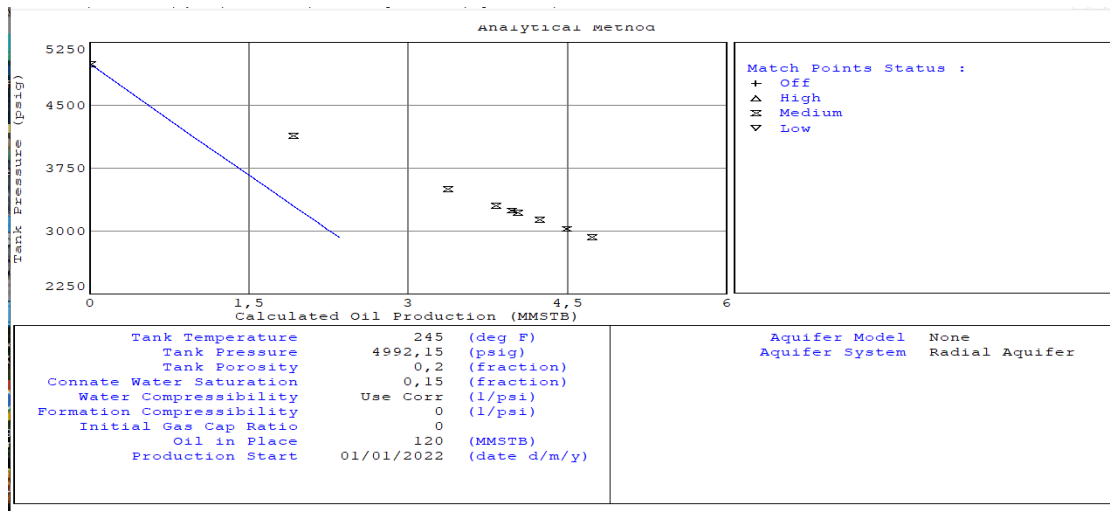
Εικόνα 4.46 : Διάγραμμα Energy Plot

Με βάση τις Εικόνες 4.44, 4.45 και 4.46, τα διαγράμματα φαίνονται ότι είναι σωστά αλλά στην πραγματικότητα αυτό δεν ισχύει διότι τα δεδομένα που αξιοποιήθηκαν για το ρευστό στη 2^η περίπτωση είναι λανθασμένα, δεδομένου ότι δεν συνυπολογίζονται οι συνθήκες επιφάνειας για τον υπολογισμό των ογκομετρικών παραμέτρων, ενώ τα δεδομένα της ιστορικής παραγωγής είναι μετρημένα σε αυτές.

Η τιμή των αρχικών αποθεμάτων μεταβάλλεται στα 142 MM STB, η οποία παρουσιάζει πολύ έχει μεγάλη διαφορά από αυτή της 1^{ης} περίπτωσης, όπου κατόπιν της παλινδρόμησης προέκυψε 246MM STB. Αξίζει να σχολιαστεί είναι αν είναι λογική η μείωση των αποθεμάτων στη 2^η περίπτωση σε σχέση με την αύξηση της 1^{ης} περίπτωσης. Στη 2^η περίπτωση λοιπόν, το B_o αυξάνει και έτσι η συμπιεστότητα είναι μικρότερη. Είναι γνωστό ότι όσο πιο μικρή είναι η συμπιεστότητα τόσο πιο δύσκολη είναι η εκτόνωση δηλαδή η πίεση δεν πέφτει τόσο εύκολα και άρα τα αρχικά αποθέματα είναι λογικό να είναι λιγότερα.

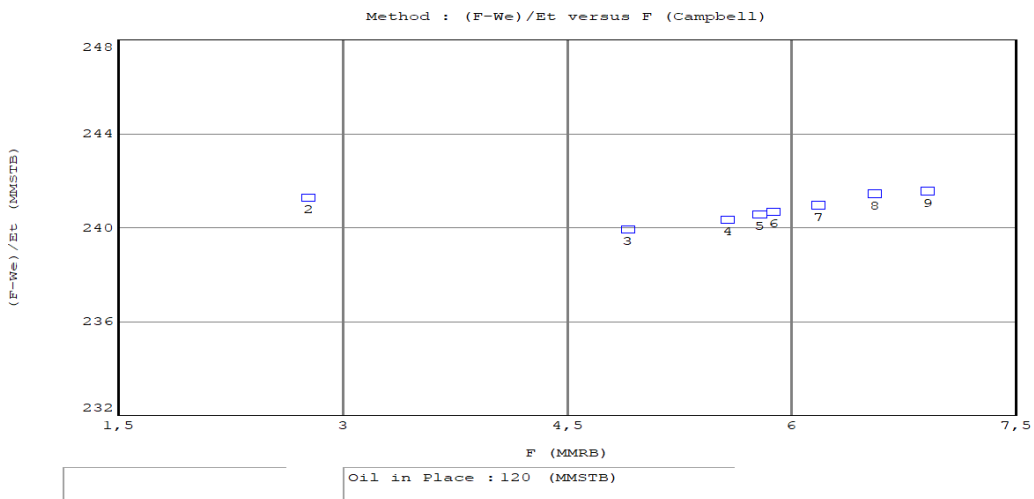
4.2.3 : 3^η περίπτωση (PVTs με πίνακες και διορθωμένα B_o και R_s κατά Dake)

Επιλέγοντας το History Matching → Analytical Method προκύπτει το διάγραμμα πίεσης και παραγωγής πετρελαίου της Εικόνας 4.47, όπου και πάλι υπάρχει απόκλιση μεταξύ της πρόβλεψης του μοντέλου και των σημείων που καθορίζονται από τα δεδομένα της ιστορικής παραγωγής.



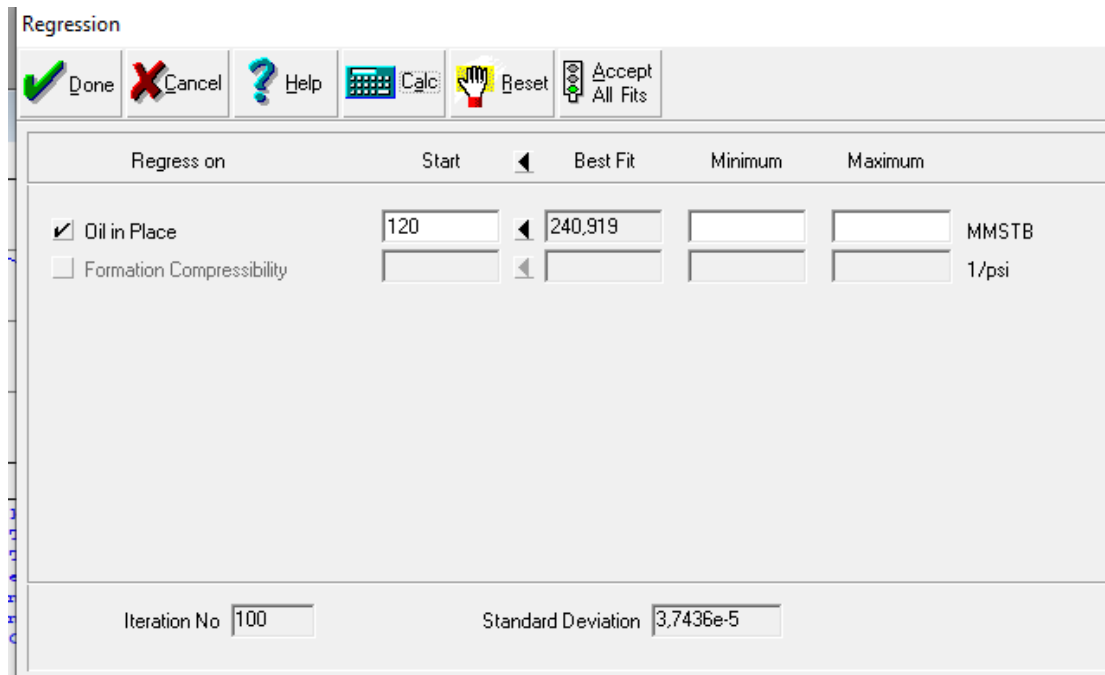
Εικόνα 4.47 : Αναλυτικό διάγραμμα

Από το διάγραμμα Campbell της Εικόνας 4.48, προκύπτει μορφή σχεδόν οριζόντιας ευθείας, υποδεικνύοντας ότι δεν υπάρχει υδροφορέας.



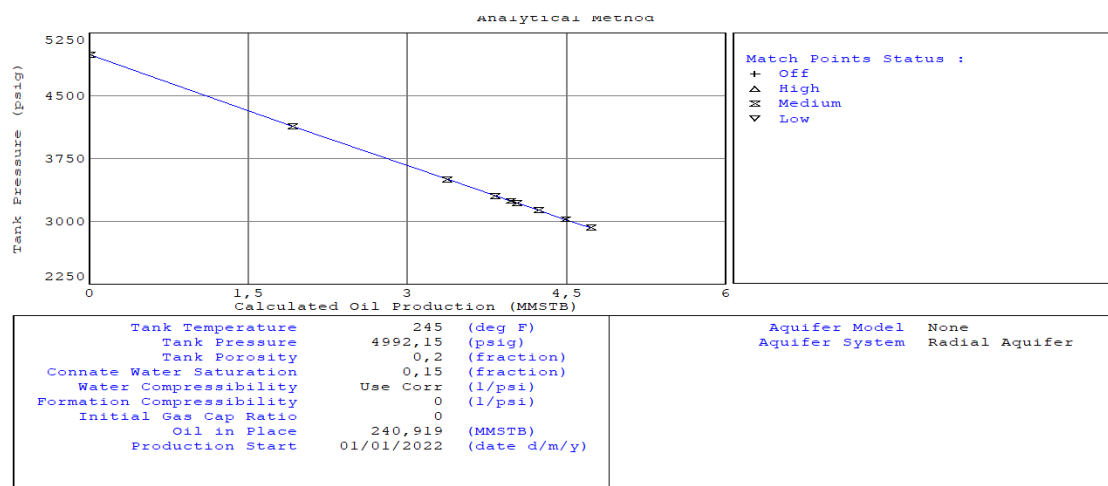
Εικόνα 4.48 : Διάγραμμα Campbell

Στο διάγραμμα που προέκυψε από την Αναλυτική μέθοδο, δεν υπάρχει πλήρης ταύτιση της γραμμής του μοντέλου με αυτή των ιστορικών δεδομένων. Γι' αυτό λοιπόν τον λόγο, θα χρησιμοποιηθεί η διαδικασία της παλινδρόμησης (regression) με μοναδική μεταβλητή την τιμή των αρχικών αποθεμάτων πετρελαίου (Εικόνα 4.49) δεδομένου ότι το διάγραμμα Campbell υποδεικνύει ότι δεν υπάρχει υδροφορέας.



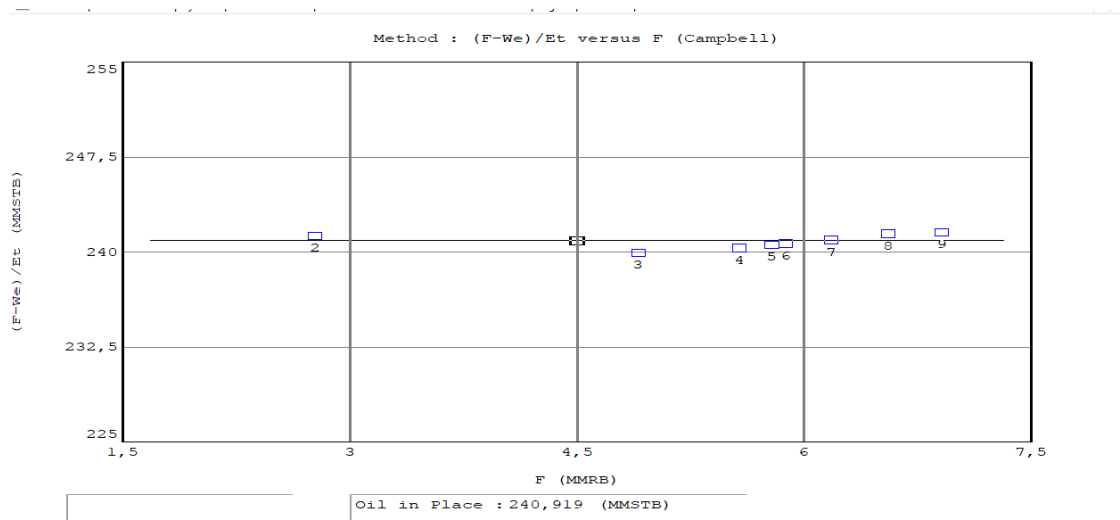
Εικόνα 4.49 : Διόρθωση τιμής αποθεμάτων κατά τη διαδικασία της παλινδρόμησης

Το νέο αναλυτικό διάγραμμα που προκύπτει μετά τη διαδικασία της παλινδρόμησης παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.50 όπου υπάρχει πλήρης ταύτιση της πρόβλεψης του μοντέλου και των ιστορικών δεδομένων παραγωγής, ενώ η τιμή των αρχικών αποθεμάτων μεταβάλλεται στα 240MM STB από την αρχική τιμή των 120MM STB.



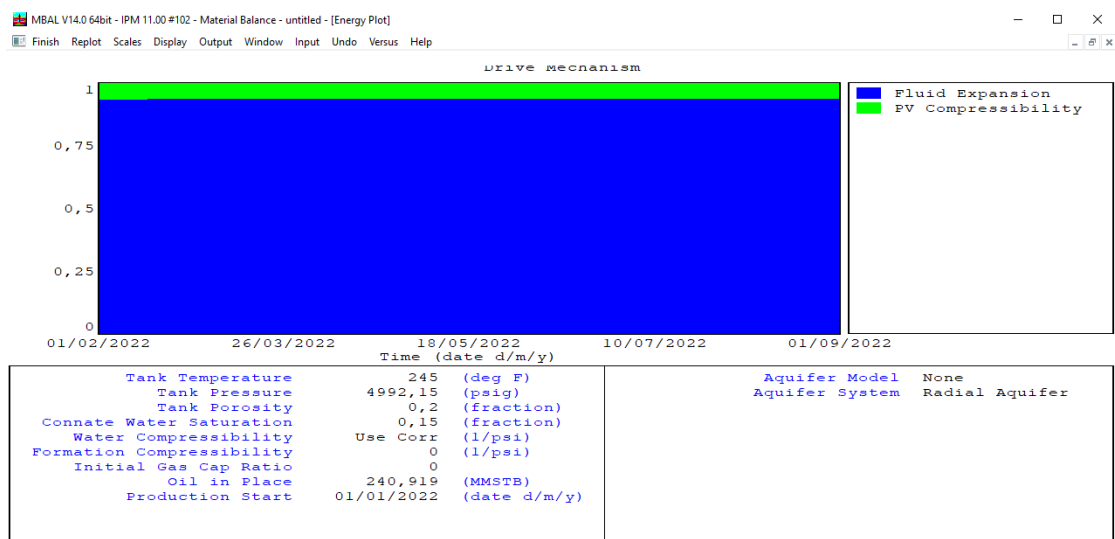
Εικόνα 4.50 : Αναλυτικό διάγραμμα μετά τη διαδικασία της παλινδρόμησης

Στο διάγραμμα της εικόνας 4.51, η μορφή της καμπύλης είναι ευθεία γραμμή, ενώ στο διάγραμμα της εικόνας 4.52, φαίνεται ότι στην παραγωγή συνεισφέρει η εξάπλωση του πετρελαίου σε ποσοστό 90% και η συμπιεστότητα των πόρων σε ποσοστό 10%.



Εικόνα 4.51 : Διάγραμμα Campbell μετά την διαδικασία παλινδρόμησης

Τέλος, το διάγραμμα Energy Plot παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.52.



Εικόνα 4.52 : Energy Plot

Όσον αφορά στην τιμή των αρχικών αποθεμάτων πετρελαίου, η 1^η περίπτωση με την 3^η όπως φάνηκε έχουν πολύ μικρή διαφορά στη νέα υπολογίσιμη τιμή των αρχικών τους αποθεμάτων, καθώς στην 1^η περίπτωση ήταν 246MM STB και στην 3^η 240MM STB. Αυτό θεωρείται λογικό και αναμενόμενο, καθώς αξιοποιούν έγκυρες τιμές στις παραμέτρους που περιγράφουν τη συμπεριφορά του ρευστού.

Η Εικόνα 4.54 απεικονίζει το διάγραμμα $B_o - P$, για τις τιμές B_o που προέκυψαν από τη 1^η, 2^η και 3^η περίπτωση για πιέσεις $P > 1317$ psig (πίεση φυσαλίδας). Οι τιμές του B_o της 1^{ης} περίπτωσης υπολογίστηκαν με τη χρήση συσχετίσεων μέσω του λογισμικού (από το PVT calculations), όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.53, οι τιμές του B_o της 2^{ης} περίπτωσης

Η λανθασμένη προσέγγιση εξαρχής της 2^η περίπτωσης αποτυπώνεται στη μεγάλη διαφορά της τιμής των αρχικών αποθεμάτων πετρελαίου σε σχέση με την 1^η και την 3^η περίπτωση.

Στον πίνακα της ακόλουθης Εικόνας 4.55 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των τριών περιπτώσεων που εξετάστηκαν. Να σημειωθεί ότι και οι τρεις περιπτώσεις ανέδειξαν ότι δεν υπάρχει υδροφορέας και ότι η αρχική υπόθεση ότι ο ταμειυτήρας πετρελαίου είναι ογκομετρικός είναι αληθής.

Περιπτώσεις	Αποθέματα
1η περίπτωση (χρήση συσχετίσεων/correlations)	246 MMStb
2η περίπτωση (πίνακες χωρίς διορθωμένα Bo κ Rs)	142 MMStb
3η περίπτωση (πίνακες με διορθωμένα Bo και Rs)	240 MMStb

Εικόνα 4.55 : Πίνακας αποτελεσμάτων των τριών περιπτώσεων

4.3 Σενάριο πρόβλεψης μελλοντικής παραγωγής

Σε αυτή τη φάση αξιοποιείται το ισοζύγιο μάζας μέσω του μοντέλου που έχει αναπτυχθεί στις προηγούμενες υποενότητες, προκειμένου να γίνει πρόβλεψη μελλοντικής παραγωγής από τον ταμειυτήρα πετρελαίου. Αξιοποιείται το μοντέλο της 3^{ης} περίπτωσης και υλοποιείται ένα σενάριο πρόβλεψης για τους επόμενους 12 μήνες. Η πρόβλεψη λοιπόν, θα γίνει από 1/9/2022 μέχρι 1/9/2023 σε 4 στάδια αναφοράς δηλαδή 3 μήνες το κάθε στάδιο (91 ημέρες) όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4.56. Τέλος, ο ρυθμός παραγωγής σε κάθε στάδιο θα διαφέρει όπως θα φανεί στη συνέχεια.

Prediction Calculation Setup

Done Cancel Help

Predict Profile from Production Schedule (No Wells)

With

- Water Injection
- Gas Injection
- SWAG
- Gas Lift Injection
- Gas Recycling
- Water Recycling
- Voidage Replacement with water
- Voidage Replacement with gas
- Gas Cap Production
- Water Production

Options

- Use Fractional Flow Model

Prediction Step Size

- > Automatic (recommended)
- < User Defined 91 days

Prediction Start

- > Start of Production
- < End of Production History
- > User Defined * date d/m/y

Prediction End

- > Automatic
- > End of Production History
- < User Defined 01/09/2023 date d/m/y

Εικόνα 4.56 : Εισαγωγή τύπου πρόβλεψης, σημείο έναρξης, σημείο τέλους της πρόβλεψης και η συχνότητα αναφοράς

Για την πρόβλεψη αυτή απαιτείται επίσης ο μέσος όρος παραγωγής πετρελαίου ανά ημέρα (ρυθμός παραγωγής), συμπληρώνοντας τον πίνακα της Εικόνας 4.57.

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	01/09/2022	8000							
2	01/12/2022	7000							
3	01/03/2023	6000							
4	01/06/2023	5000							
5									
6									
7									
8									
9									
10									
11									
12									
13									
14									

Prediction from 01/09/2022 to 01/09/2023 date d/m/y

Εικόνα 4.57 : Εισαγωγή ρυθμών παραγωγής

Reporting Schedule

Done Cancel Help

Reporting Frequency

Automatic Keep History

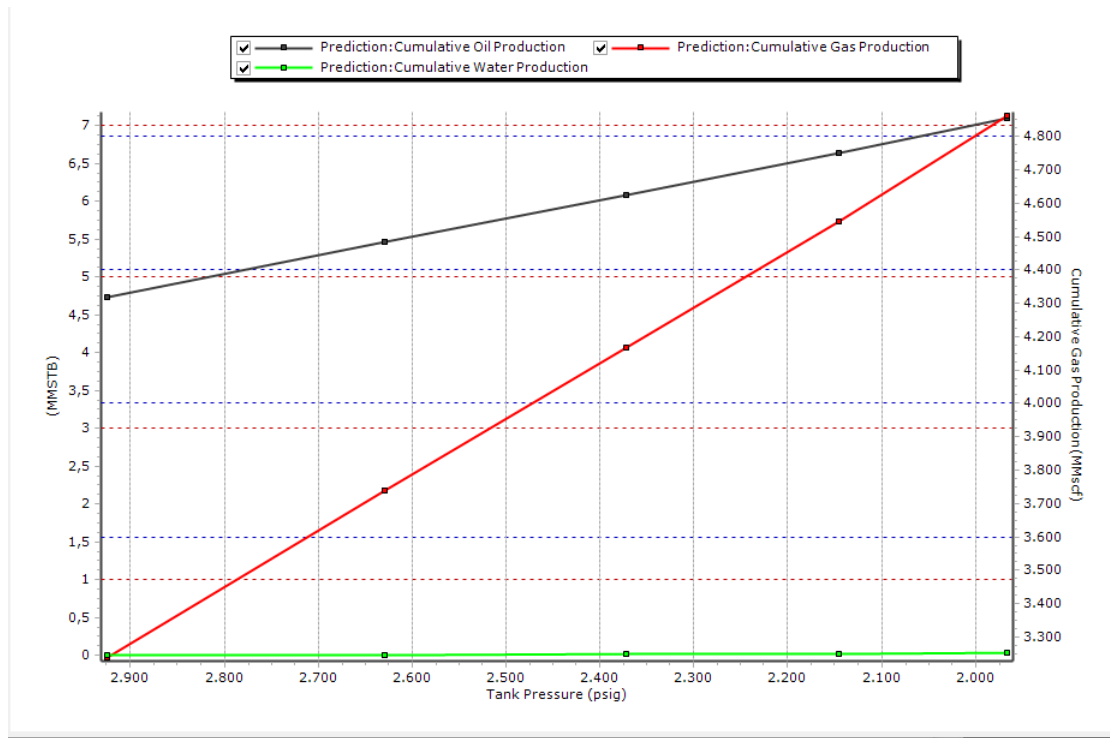
User Defined 3 month

User List

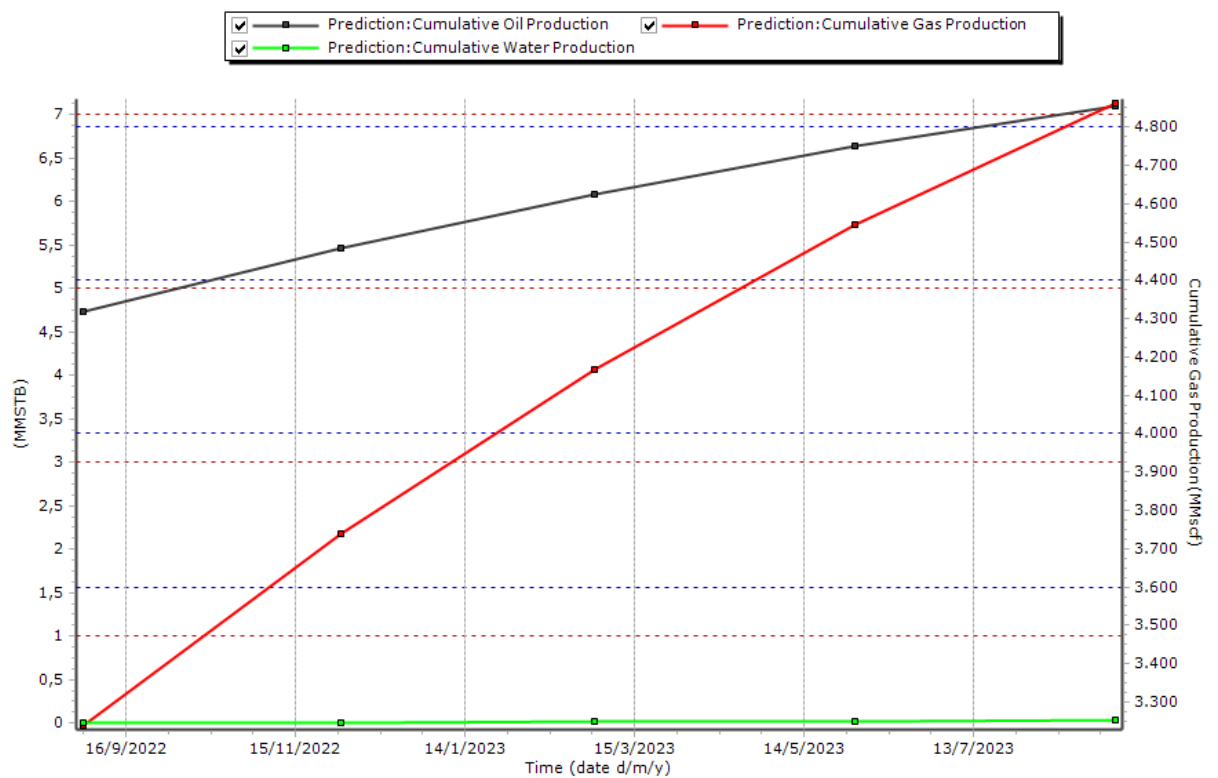
User Date List

date d/m/y				

Εικόνα 4.58 : Εισαγωγή συχνότητας πρόβλεψης

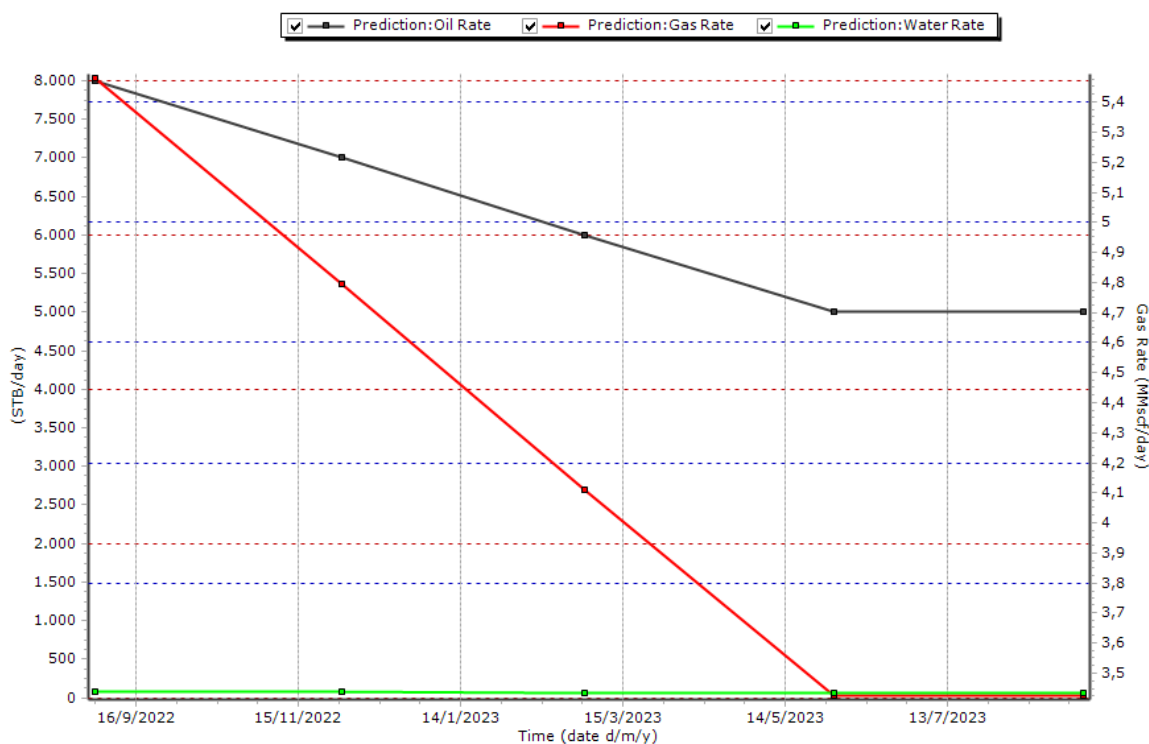


Εικόνα 4.60 : Διάγραμμα αθροιστικών παραγωγών N_p , G_p , W_p ως προς την πίεση



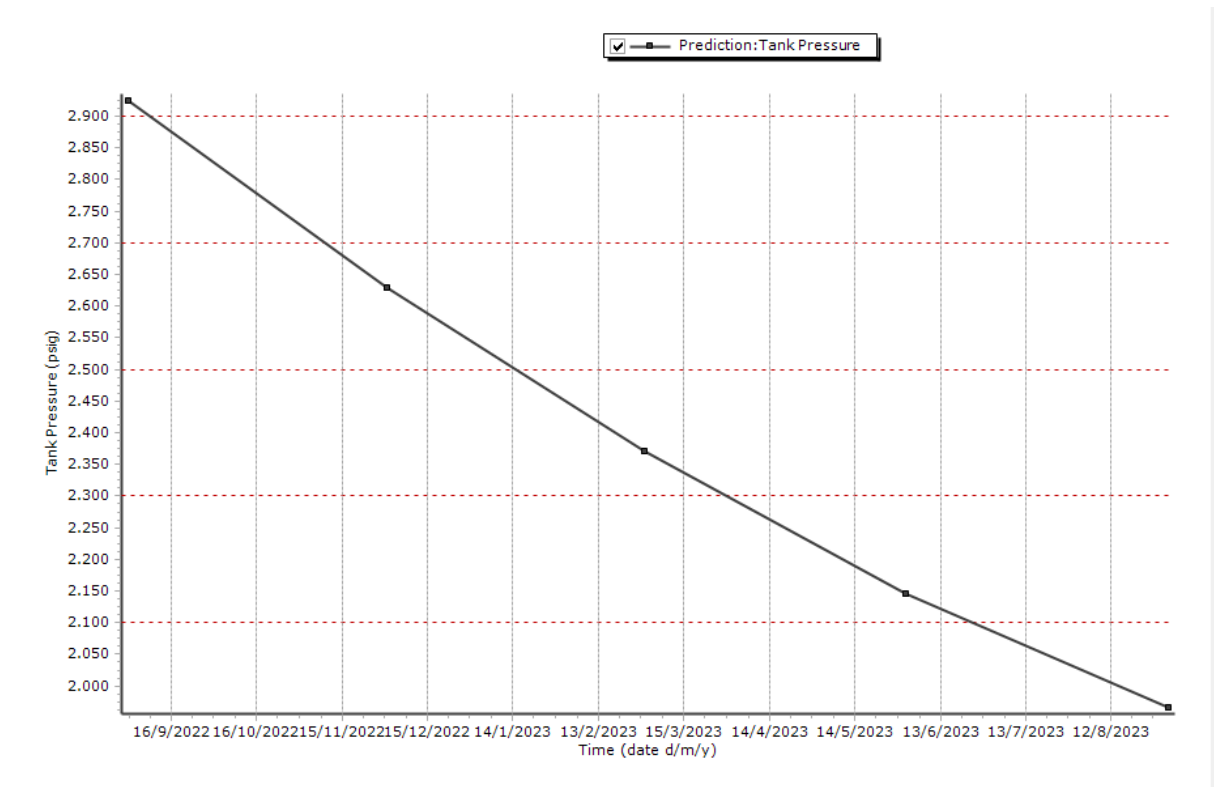
Εικόνα 4.61 : Διάγραμμα αθροιστικών παραγωγών N_p , G_p , W_p ως προς τον χρόνο

Στο διάγραμμα της Εικόνας 4.62, φαίνεται ότι ο ρυθμός παραγωγής πετρελαίου μειώνεται με τη μείωση του ρυθμού παραγωγής για τους 12 μήνες της πρόβλεψης, όπως επίσης και η παροχή αερίου η οποία μηδενίζεται στο τελευταίο 3μηνο της πρόβλεψης.



Εικόνα 4.62 : Διάγραμμα παροχών πετρελαίου, αερίου, νερού με τον χρόνο

Στο διάγραμμα της Εικόνας 4.63, αναπαρίσταται η πίεση του ταμιευτήρα σε σχέση με τον χρόνο για τους 12 μήνες που έγινε η πρόβλεψη όπου παρατηρείται ότι η πίεση μειώνεται με σταθερό ρυθμό.



Εικόνα 4.63 : Διάγραμμα πίεσης – χρόνου για τους 12 μήνες της πρόβλεψης

Κεφάλαιο 5 : Δεύτερη μελέτη περίπτωσης

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται η δεύτερη μελέτη περίπτωσης της εργασίας που αφορά στη χρήση της μεθόδου Ισοζυγίου Μάζας για την εκτίμηση της κατάστασης ενός ταμιευτήρα πετρελαίου. Ο ταμιευτήρας που μελετάται έχει παρόμοια χαρακτηριστικά με αυτόν της πρώτης μελέτης περίπτωσης, με διαφορετικά ιστορικά δεδομένα παραγωγής. Για τη μελέτη αυτή χρησιμοποιείται επίσης το λογισμικό Material Balance.

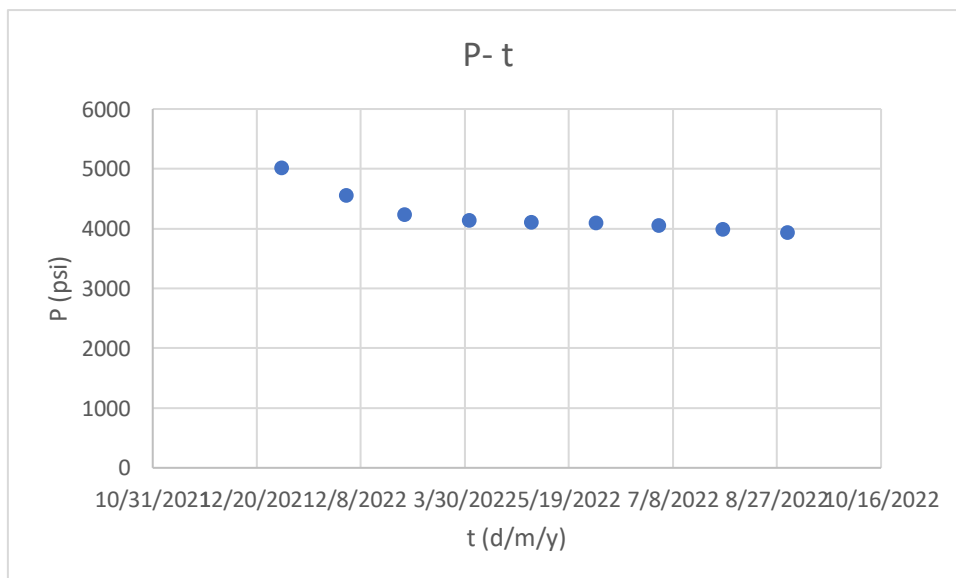
Η μελέτη βασίζεται στην αρχική υπόθεση ότι ο ταμιευτήρας είναι ακόρεστος, αλλά όχι ογκομετρικός. Με τη χρήση των δεδομένων που υπάρχουν και τη μέθοδο του Ισοζυγίου Μάζας, θα διαπιστωθεί κατά πόσον η αρχική αυτή υπόθεση είναι αληθής, προκειμένου να γίνει η εκτίμηση της κατάστασης του ταμιευτήρα.

Τέλος, με βάση τα αποτελέσματα της μελέτης για την εκτίμηση της κατάστασης του ταμιευτήρα πετρελαίου, αξιοποιείται η 2^η φάση της μεθόδου του Ισοζυγίου Μάζας στην υλοποίηση ενός σεναρίου μελλοντικής παραγωγής από τον ταμιευτήρα πετρελαίου.

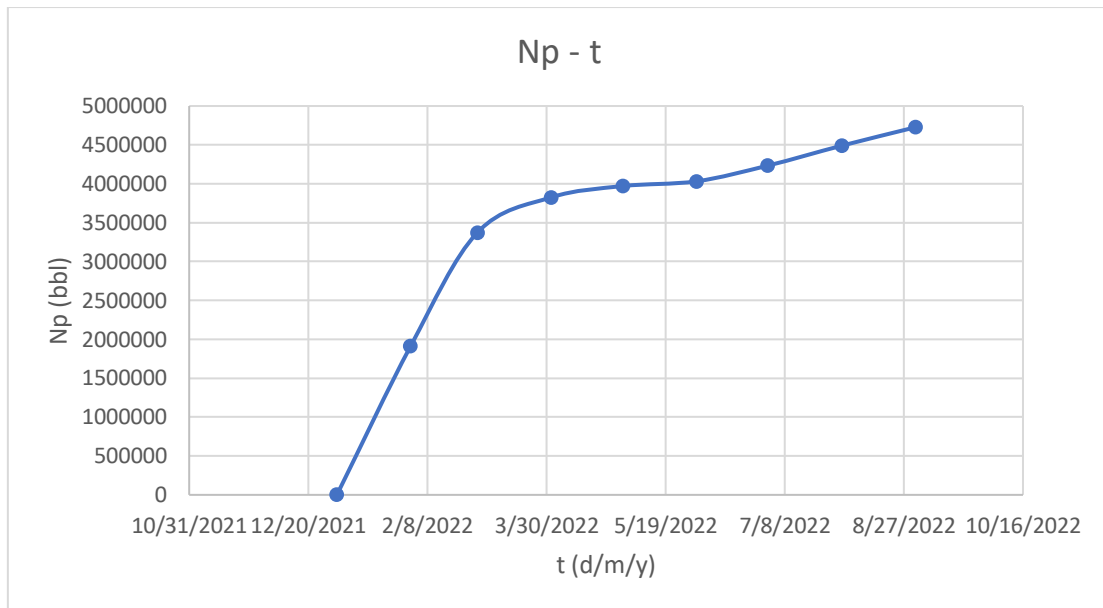
5.1 Δεδομένα

Τα δεδομένα που παρουσιάζονται αρχικά είναι τα ιστορικά δεδομένα παραγωγής σε διαγράμματα τα οποία δείχνουν την εξέλιξη της πίεσης του ταμιευτήρα (μείωση) με τον χρόνο καθώς και με τις αθροιστικές παραγωγές πετρελαίου, αερίου και νερού που αυξάνουν (Εικόνες 5.1 – 5.4). Όπως φαίνεται στην εικόνα 5.4, η πίεση δεν πέφτει τόσο όσο στην προηγούμενη μελέτη περίπτωσης και μάλιστα υπάρχει αυξημένη αθροιστική παραγωγή νερού κάτι το οποίο σηματοδοτεί την ύπαρξη υδροφορέα.

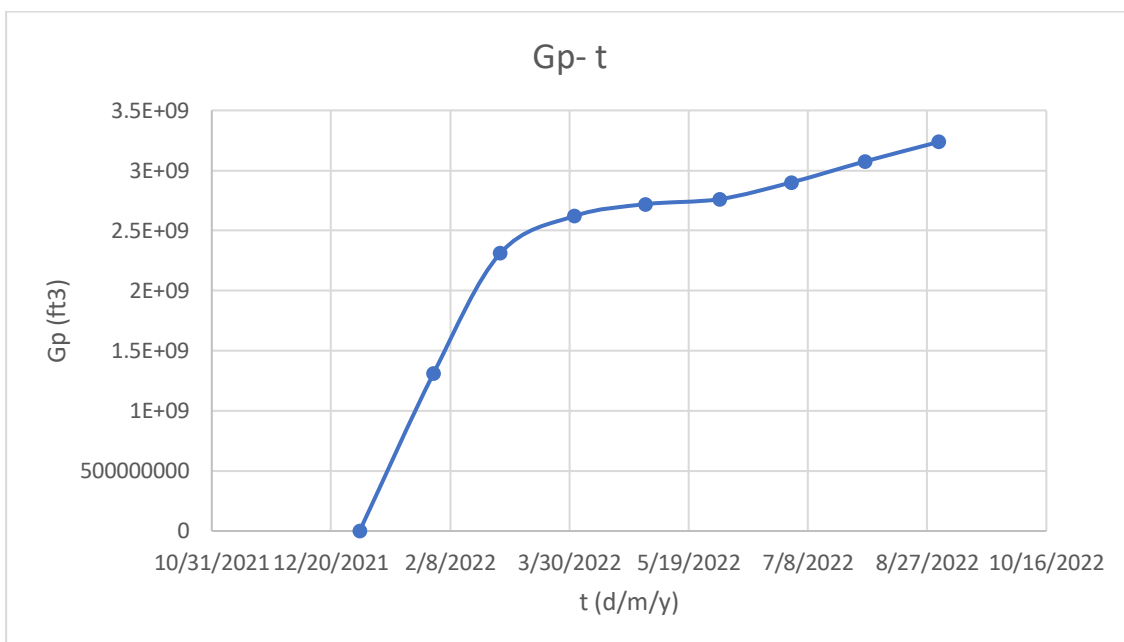
Επίσης, τα διαγράμματα των Εικόνων 5.5 και 5.6, δείχνουν την παροχή του νερού και του πετρελαίου αντίστοιχα συναρτήσει του χρόνου.



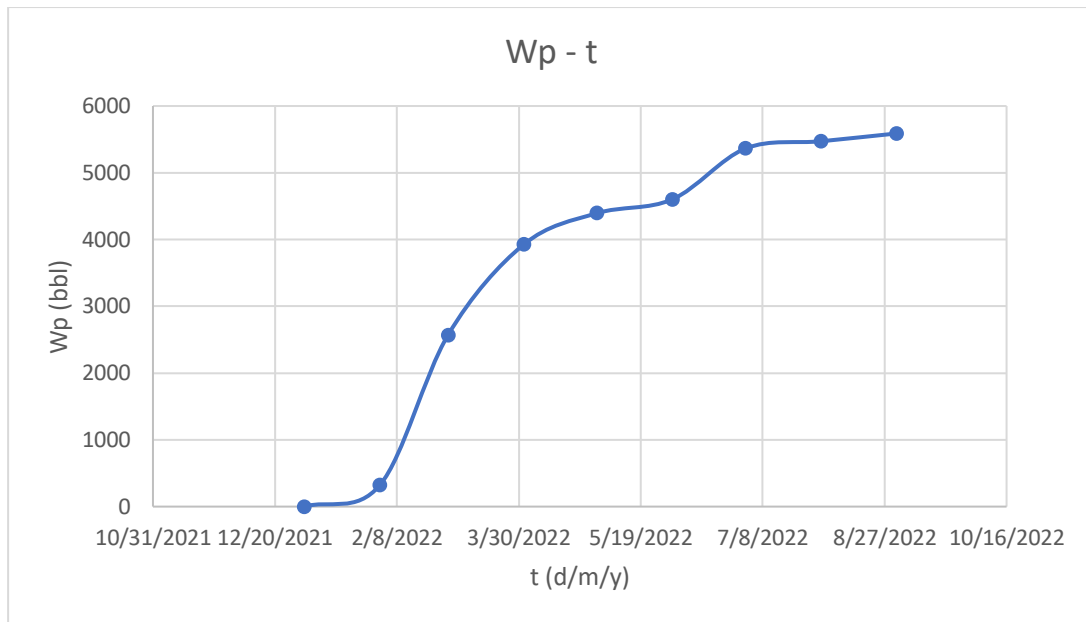
Εικόνα 5.1 : Διάγραμμα πίεσης (psi) – χρόνου για τα ιστορικά δεδομένα (date d/m/y)



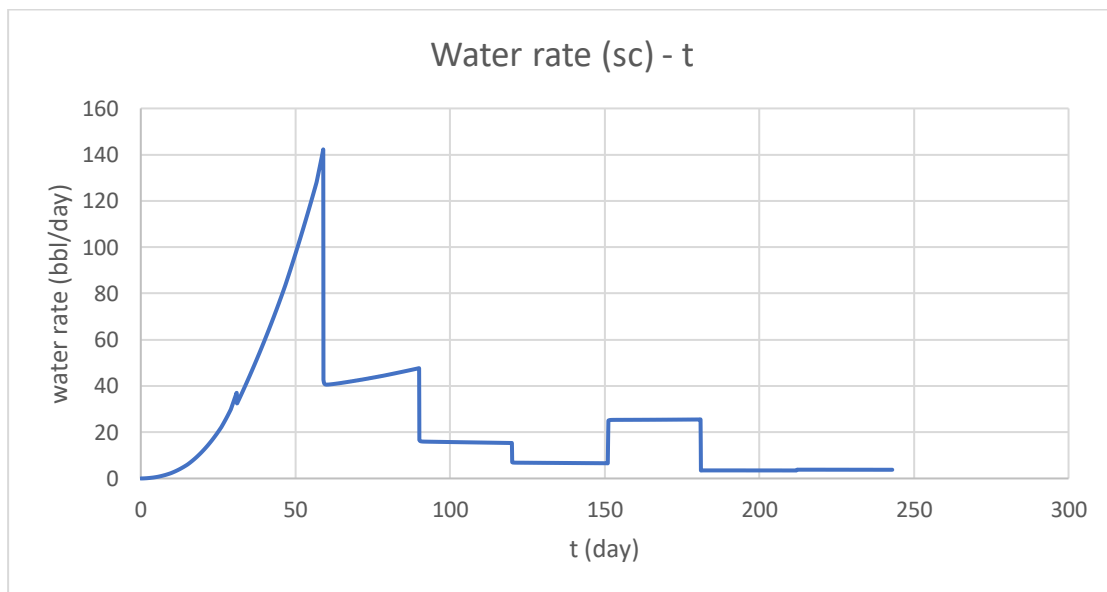
Εικόνα 5.2 : Διάγραμμα αθροιστικής παραγωγής πετρελαίου (bbl) – χρόνου (date d/m/y)



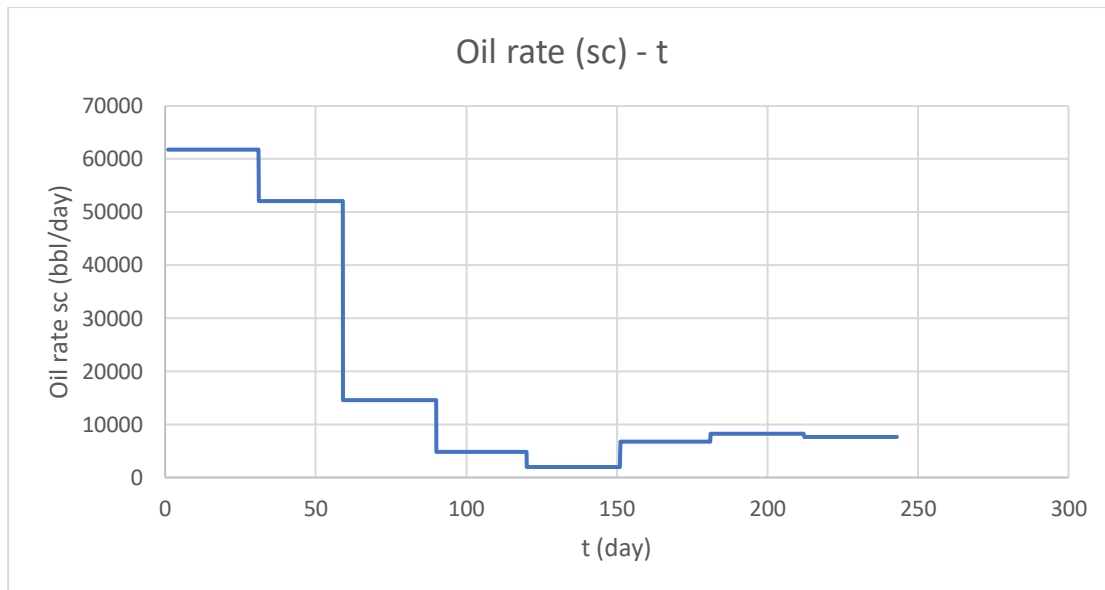
Εικόνα 5.3 : Διάγραμμα αθροιστικής παραγωγής αερίου (ft³) – χρόνος (date d/m/y)



Εικόνα 5.4 : Διάγραμμα αθροιστικής παραγωγής νερού (bbl) – χρόνος (date d/m/y)



Εικόνα 5.5 : Διάγραμμα παροχής νερού (bbl/day) - χρόνου (day)



Εικόνα 5.6 : Διάγραμμα παροχής πετρελαίου (bbl/day) – χρόνου (day)

Συγκρίνοντας λοιπόν, τη 1^η μελέτη περίπτωσης που παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 4 με τη 2^η και παρατηρώντας τα διαγράμματα παραγωγής νερού σε σχέση με το χρόνο, διαπιστώνεται ότι η αθροιστική παραγωγή νερού της 2^{ης} μελέτης περίπτωσης (Εικόνα 5.4) είναι σχεδόν η τριπλάσια από αυτή της 1^{ης} (Εικόνα 4.4), δηλαδή η αθροιστική παραγωγή νερού είναι φανερά αυξημένη. Επίσης, όσον αφορά στην πίεση του ταμιευτήρα φαίνεται ότι η πίεση σε σχέση με τον χρόνο στη 1^η μελέτη περίπτωσης (Εικόνα 4.1) μειώνεται πιο γρήγορα από ότι στη 2^η (Εικόνα 5.1). Αυτό σημαίνει ότι στη 2^η μελέτη περίπτωσης υπάρχει κάποια πηγή ενέργειας η οποία δεν επιτρέπει τη γρήγορη μείωση της πίεσης του ταμιευτήρα. Με βάση τα παραπάνω, υπάρχει σοβαρή ένδειξη ότι υπάρχει υδροφορέας ο οποίος επηρεάζει αρκετά τον ταμιευτήρα.

Οι ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά του ρευστού και του ταμιευτήρα είναι ίδια με την 1^η μελέτη περίπτωσης, με τη διαφορά ότι η αρχική πίεση του ταμιευτήρα είναι : $P = 5,000 \text{ psig}$, ενώ βάσει των ενδείξεων από τα δεδομένα παραγωγής λαμβάνεται εξαρχής υπόψη η ύπαρξη υδροφορέα.

5.1.1 Εισαγωγή δεδομένων στο λογισμικό

Πραγματοποιήθηκε ακριβώς η ίδια διαδικασία όπως στην προηγούμενη μελέτη περίπτωσης, επιλέχθηκε δηλαδή το Ισοζύγιο Μάζας (Material Balance) ως εργαλείο, ο ταμιευτήρας χαρακτηρίστηκε ως ταμιευτήρας πετρελαίου και το μοντέλο για την περιγραφή συμπεριφοράς του ρευστού που επιλέχθηκε είναι το Μοντέλο Μαύρου Πετρελαίου (Black Oil Model).

Όπως και στην πρώτη μελέτη περίπτωσης έτσι και τώρα, έγινε η ίδια προσπάθεια προσομοίωσης μιας ρεαλιστικής περίπτωσης με σφάλματα στη διαχείριση των PVT δεδομένων. Οι περιπτώσεις που εξετάζονται στην τρέχουσα μελέτη περίπτωσης είναι :

- Η χρήση των συσχετίσεων (correlations)

- Η χρήση των πινάκων (tables) καθώς διατέθηκαν περισσότερα δεδομένα PVTs από το εργαστηριακό πείραμα DV και οι τιμές των B_o και R_s διορθώθηκαν κατά Dake, ώστε να υπάρχει μεγαλύτερη ακρίβεια των τιμών καθώς τώρα δόθηκαν και οι flash τιμές.

που αντιστοιχούν πρακτικά στην 1^η και 3^η περίπτωση της πρώτης μελέτης περίπτωσης.

5.1.1.1 : 1^η περίπτωση - Χρήση συσχετίσεων (correlations)

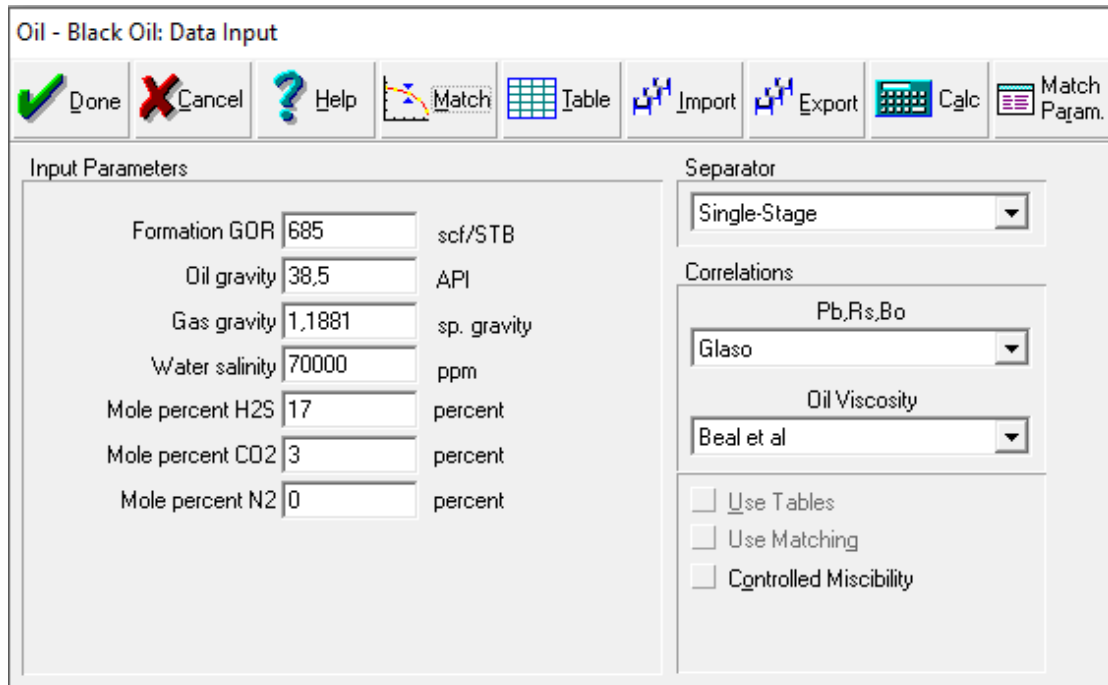
Η διαδικασία είναι ακριβώς ίδια με την 1^η μελέτη περίπτωσης, όπως ακριβώς ίδια είναι και τα PVTs που εισάγονται παρακάτω, απλώς παρουσιάζονται ξανά επειδή η διαδικασία στο λογισμικό πραγματοποιήθηκε εκ νέου.

Αρχικά, εισήχθησαν τα διαθέσιμα PVT δεδομένα προκειμένου να χρησιμοποιηθούν στις συσχετίσεις για την εκτίμηση των PVT παραμέτρων του ρευστού. Όπως φαίνεται και στην ακόλουθη εικόνα, εισήχθησαν οι παρακάτω τιμές :

- Λόγος αερίου – πετρελαίου : $GOR = 685 \text{ scf/stb}$
- Ειδική πυκνότητα πετρελαίου : 38.5 API
- Ειδική πυκνότητα αερίου : 1.1881
- Αλατότητα νερού : $70,000 \text{ ppm}$
- Σύσταση επί τοις εκατό για να ανόργανα συστατικά : $H_2S = 17\%$

$CO_2 = 3\%$

$N_2 = 0\%$



Input Parameters		
Formation GOR	685	scf/STB
Oil gravity	38,5	API
Gas gravity	1,1881	sp. gravity
Water salinity	70000	ppm
Mole percent H2S	17	percent
Mole percent CO2	3	percent
Mole percent N2	0	percent

Separator: Single-Stage

Correlations:

Pb,Rs,Bo: Glaso

Oil Viscosity: Beal et al

Use Tables

Use Matching

Controlled Miscibility

Εικόνα 5.7 : Εισαγωγή δεδομένων που αφορούν τις ιδιότητες του ρευστού

Στη συνέχεια, για να γίνει η κατάλληλη επιλογή των συσχετίσεων, εισάγονται τα ακόλουθα :

- Πίεση στο σημείο φυσαλίδας : $P_{bp} = 1,317 \text{ psig}$
- Λόγος διαλυμένου αερίου : $R_s = 685 \text{ scf/stb}$
- Ογκομετρικός συντελεστής πετρελαίου : $B_o = 1.487 \text{ rb/stb}$
- Ιξώδες : $\mu_o = 0.55 \text{ cp}$

Oil - Black Oil: Matching

Done Cancel Help Match Reset Import Export Plot Copy

Temperature deg F Table 1 (T=245)
 Bubble Point psig

	Pressure	Gas Oil Ratio	Oil FVF	Oil Viscosity	Gas FVF	Gas Viscosity
	psig	scf/STB	RB/STB	centipoise	ft3/scf	centipoise
1	1317	685	1.487	0.55		
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						
11						
12						
13						

Εικόνα 5.8 : Εισαγωγή PVT μετρήσεων για τη ρύθμιση των συσχετίσεων

Οι εργαστηριακά μετρούμενες τιμές αξιοποιούνται προκειμένου να πραγματοποιηθεί ρύθμιση των συσχετίσεων. Όπως έγινε και στην προηγούμενη μελέτη περίπτωσης, οι διαθέσιμες συσχετίσεις ρυθμίζονται ως προς τις δύο παραμέτρους (πολλαπλασιαστική και μεταθετική), ώστε να προσαρμοστούν στα πειραματικά PVT δεδομένα, επιλέγοντας αυτές των Lasater και Petrosky et al (heavy oil) όπως φαίνεται και στις Εικόνες 5.10 και 5.11 αντίστοιχα.

Oil - Black Oil: Matching

Done
 Cancel
 Help
 Calc
 Match Param.
 Plot

Match on		Match Statistics		
All / None		Std. Deviation	Parameter 1	Parameter 2
<input checked="" type="checkbox"/>	Bubble Point	7,25322e-11	0,84828	-290,062
<input checked="" type="checkbox"/>	Gas Oil Ratio	1,0326e-10	1,4162	1,73779e-10
<input checked="" type="checkbox"/>	Oil FVF	4,36098e-7	0,969905	0,0344875
Above Bubble Point			1	0
<input checked="" type="checkbox"/>	Oil Viscosity	4,04707e-9	1,20871	0,0809859
<input type="checkbox"/>	Gas FVF		1	0
<input type="checkbox"/>	Gas Viscosity		1	0

Correlations

Pb,Rs,Bo:

Oil viscosity:

Match All

Εικόνα 5.9 : Εισαγωγή δεδομένων που αφορούν τις ιδιότητες του ρευστού

Oil - Black Oil: Correlations - Oil

Done
 Cancel
 Help
 Reset
 Plot

Pb,Rs,Bo

	Glaso	Standing	Lasater	Vazquez-Beggs	Petrosky	Al-Marhoun	De Ghetto
Parameter 1	0,780095	0,800371	0,852124	0,748797	0,79416	0,848349	0,796225
Parameter 2	-528,532	-447,413	-282,712	-679,706	-471,075	-293,07	-463,096
Std Dev.	1,32331e-10	1,1164e-10	7,04858e-11	1,69393e-10	1,1778e-10	7,34417e-11	1,15506e-10

	Glaso	Standing	Lasater	Vazquez-Beggs	Petrosky	Al-Marhoun	De Ghetto
Parameter 1	1,96791	1,87391	1,39841	2,30709	2,97061	1,66239	1,89311
Parameter 2	-27,6806	-15,8911	1,68468e-10	-5,15402	-534,174	-1,98022	-4,8488
Std Dev.	2,67352e-10	2,11432e-10	1,00157e-10	2,18605e-10	7,00909e-8	0,117381	1,79537e-10

	Glaso	Standing	Lasater	Vazquez-Beggs	Petrosky	Al-Marhoun	De Ghetto
Parameter 1	0,0665517	0,0597477	0,0597477	0,0720215	0,0584215	0,0566832	0,0720216
Parameter 2	0,93312	0,940523	0,940523	0,927978	0,940868	0,946365	0,927978
Parameter 3	1	1	1	1	1	1	1
Parameter 4	0	0	0	0	0	0	0
Std Dev.	9,46568e-9	5,72352e-9	5,72352e-9	1,29771e-8	5,64517e-9	3,60895e-9	1,29772e-8

Pb,Rs,Bo Correlation:

Εικόνα 5.10 : Παράμετροι όλων των διαθέσιμων συσχετίσεων για τις ογκομετρικές ιδιότητες

Oil - Black Oil: Correlations - Viscosities, Bg

Done Cancel Help Reset Plot

Pb,Rs,Bo Uo,Ug,Bg

Oil Viscosity	Beal et al	Beggs et al	Petrosky et al	Egbogah et al	Bergman-Sutton	De Ghetto et al	De Ghetto Mod
Parameter 1	1,47757	1,29991	1,20871	0,726411	2,32981	4,15795	0,58625
Parameter 2	0,134346	0,103105	0,0809859	-0,332304	0,199856	0,237411	-1,3192
Std Dev.	6,71359e-9	5,15241e-9	4,04707e-9	1,66061e-8	9,98729e-9	1,1864e-8	6,5924e-8

Gas FVF

Parameter 1

Parameter 2

Std Dev.

Gas Viscosity

Parameter 1

Parameter 2

Std Dev.

Oil Viscosity Correlation

Εικόνα 5.11 : Παράμετροι όλων των διαθέσιμων συσχετίσεων για το ιξώδες

Το επόμενο βήμα είναι η εισαγωγή των δεδομένων του ταμειυτήρα. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.12, εισάγονται τα ακόλουθα :

- Θερμοκρασία : $T = 245 \text{ degF}$
- Αρχική πίεση : $P = 5,001.8 \text{ psig}$
- Πορώδες σχηματισμού : $\varphi = 0.2$
- Κορεσμός ενδογενούς νερού : $S_{wc} = 0.15$
- Όγκος αρχικού καλύμματος αερίου προς αρχικό όγκο πετρελαίου : $m = 0$
- Αρχικά αποθέματα πετρελαίου : $N = 120 \text{ MMstb}$ (εκτιμήθηκαν με την ογκομετρική μέθοδο για εκτίμηση αποθεμάτων)
- Ημερομηνία πρώτης καταγραφής : 01/01/2022

Tank Input Data - Tank Parameters

Done
 Cancel
 Help
 Import

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

Tank Type: Oil
 Name: Tank01
 Temperature: 245 deg F
 Initial Pressure: 5001.841504 psig
 Porosity: 0.2 fraction
 Connate Water Saturation: 0.15 fraction
 Water Compressibility: Use Corr 1/psi
 Gas Cap (downhole ratio): 0
 Original Oil In Place: 120 MMSTB
 Start of Production: 01/01/2022 date d/m/y

Monitor Contacts
 Gas Coning
 Water Coning
 Use Fractional Flow Table (instead of rel perms)
 Enter Gas Cap as Surface Volume

Calculate Pb...

Εικόνα 5.12 : Εισαγωγή βασικών δεδομένων ταμειυτήρα

Ακολούθως, εισάγεται το μοντέλο του υδροφόρου Small Plot καθώς θεωρείται το πιο απλό μοντέλο.

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: Small Pot

Aquifer Volume: 350 MMft³

Εικόνα 5.13 : Εισαγωγή μοντέλου υδροφορέα

Εισάγονται οι τιμές των σχετικών διαπερατοτήτων, όπως φαίνεται στην εικόνα 5.14.

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	0,85	0,84
Kro	0,15	0,85	1,5478
Krg	0,02	0,7	1

Normalise End Points

WARNING : Enter saturations relative to total system

<< Prior Next >>

Εικόνα 5.14 : Εισαγωγή σχετικών διαπερατοτήτων

Τέλος, εισάγονται τα ιστορικά δεδομένα παραγωγής όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.15.

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 Gas Produced	Cum Wat. Produced	Cum Gas Injected	Cum Wat. Injected	Regression Weighting	Comment
	date d/m/y	psig	MMSTB	MMscf	MMSTB	MMscf	MMSTB		
1	01/01/2022	5001,84	0	0	0			Medium	Edit..
2	01/02/2022	4548,32	1,91525	1311,95	0,000320836			Medium	Edit..
3	01/03/2022	4223,56	3,37381	2311,06	0,00257132			Medium	Edit..
4	01/04/2022	4126,02	3,82584	2620,7	0,00392486			Medium	Edit..
5	01/05/2022	4094,83	3,97071	2719,93	0,00439441			Medium	Edit..
6	01/06/2022	4081,6	4,03208	2761,97	0,00460238			Medium	Edit..
7	01/07/2022	4036,14	4,23485	2900,87	0,00536429			Medium	Edit..
8	01/08/2022	3977,55	4,49056	3076,03	0,00547209			Medium	Edit..
9	01/09/2022	3924,41	4,72751	3238,34	0,0055893			Medium	Edit..
10									
11									
12									
13									
14									
15									
16									

Work with GDR Check GDR

<< Prior Next >> Validate

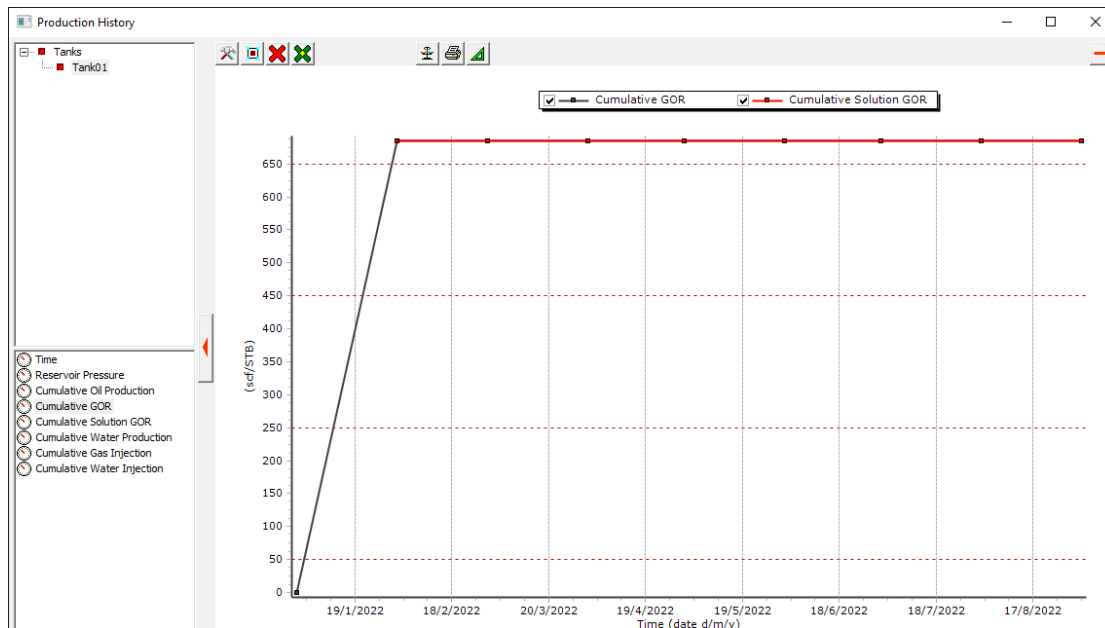
Εικόνα 5.15 : Εισαγωγή ιστορικών δεδομένων παραγωγής

Σε αυτό το σημείο επιλέχθηκε ο υπολογισμός του GOR (μέσω του “work with GOR”), προκειμένου να επιβεβαιωθεί αν το μετρούμενο στο πεδίο GOR ταυτίζεται με το εργαστηριακά μετρούμενο Rs και να διαπιστωθεί τελικά αν είναι ακόρεστος ο ταμειυτήρας (Εικόνα 5.16).

	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	01/01/2022	5001.84	0	0	0			Medium	Edit..
2	01/02/2022	4548.32	1.91525	685.002	0.000320836			Medium	Edit..
3	01/03/2022	4223.56	3.37381	685	0.00257132			Medium	Edit..
4	01/04/2022	4126.02	3.82584	685	0.00392486			Medium	Edit..
5	01/05/2022	4094.83	3.97071	684.998	0.00439441			Medium	Edit..
6	01/06/2022	4081.6	4.03208	684.999	0.00460238			Medium	Edit..
7	01/07/2022	4036.14	4.23485	684.999	0.00536429			Medium	Edit..
8	01/08/2022	3977.55	4.49056	684.999	0.00547209			Medium	Edit..
9	01/09/2022	3924.41	4.72751	684.999	0.0055893			Medium	Edit..
10									
11									
12									
13									
14									
15									
16									

Εικόνα 5.16 : Εισαγωγή ιστορικών δεδομένων παραγωγής με υπολογισμό του GOR

Στην Εικόνα 5.17, αποτυπώνεται το υπολογιζόμενο GOR και το Rs, φαίνεται ότι το GOR ξεκινά από την τιμή μηδέν και φτάνει στην τιμή 685 scf/stb. Ωστόσο, η τιμή μηδέν δεν ισχύει διότι η διαίρεση μηδέν/μηδέν είναι πρακτικά αδύνατη και γι’ αυτό φαίνεται ότι ξεκινά από την τιμή μηδέν. Έτσι, παρατηρώντας το ακόλουθο βοηθητικό διάγραμμα, γίνεται η επιβεβαίωση της αρχικής υπόθεσης ότι ο ταμειυτήρας είναι πράγματι ακόρεστος.



Εικόνα 5.17 : Βοηθητικό διάγραμμα GOR-t και R_s -t

5.1.1.2 : 2^η περίπτωση - Χρήση πινάκων (tables) με διορθωμένες τιμές B_o και R_s κατά Dake

Εισήχθησαν ακριβώς όπως στην 1^η περίπτωση τα διαθέσιμα PVT δεδομένα για την εκτίμηση των PVT παραμέτρων του ρευστού από το μοντέλο μαύρου πετρελαίου. Όπως φαίνεται και στην ακόλουθη εικόνα εισήχθησαν οι παρακάτω τιμές :

- Λόγος αερίου – πετρελαίου : $GOR = 685 \text{ scf/stb}$
- Ειδική πυκνότητα πετρελαίου : 38.5 API
- Ειδική πυκνότητα αερίου : 1
- Αλατότητα νερού : $70,000 \text{ ppm}$
- Σύσταση επί τοις εκατό για να ανόργανα συστατικά : $H_2S = 17\%$

$$CO_2 = 3\%$$

$$N_2 = 0\%$$

Oil - Black Oil: Data Input

Done Cancel Help Match Table Import Export Calc Match Param.

Input Parameters

Formation GOR scf/STB
 Oil gravity API
 Gas gravity sp. gravity
 Water salinity ppm
 Mole percent H2S percent
 Mole percent CO2 percent
 Mole percent N2 percent

Separator

Correlations

Use Tables
 Use Matching
 Controlled Miscibility

Εικόνα 5.18 : Εισαγωγή δεδομένων που αφορούν τις ιδιότητες του ρευστού

Ακολουθήθηκε ακριβώς η ίδια διαδικασία με την 3^η περίπτωση της πρώτης μελέτης περίπτωσης (κεφάλαιο 4) και έγιναν πάλι οι ίδιες διορθώσεις των B_o και R_s κατά Dake. Οι τιμές των πινάκων είναι ακριβώς ίδιες με αυτές στην 3^η περίπτωση του κεφαλαίου 4.

Oil - Flash PVT Table

Done Cancel Help Reset Import Export Plot Copy

Temperature deg F

Bubble Point psig

	Pressure	Gas Oil Ratio	Oil FVF	Oil Viscosity	Gas FVF	Gas Viscosity	Water FVF
	psig	scf/STB	RB/STB	centipoise	ft3/scf	centipoise	RB/STB
1	5735	685	1,4255	0,55			
2	5000	685	1,43447	0,55			
3	4000	685	1,44707	0,55			
4	2970	685	1,46081	0,55			
5	2045	685	1,47423	0,55			
6	1490	685	1,48345	0,55			
7	1317	685	1,487	0,55			
8	1100	583,065	1,43424	0,57			
9	855	465,035	1,37523	0,69			
10	607	328,227	1,30548	0,72			
11	350	152,076	1,2116	0,98			
12	152	-16,9212	1,11056	1,26			

Interpolate Bg as 1/B

Εικόνα 5.19 : Εισαγωγή δεδομένων που αφορούν τις ιδιότητες του ρευστού

Oil - Flash PVT Table

Done Cancel Help Reset Import Export Plot Copy

Temperature 245 deg F Table 1 (T=245)

Bubble Point 1317 psig

	Pressure	Gas Oil Ratio	Oil FVF	Oil Viscosity	Gas FVF	Gas Viscosity	Water FVF
	psig	scf/STB	RB/STB	centipoise	ft3/scf	centipoise	RB/STB
4	2970	685	1,46081	0,55			
5	2045	685	1,47423	0,55			
6	1490	685	1,48345	0,55			
7	1317	685	1,487	0,55			
8	1100	583,065	1,43424	0,57			
9	855	465,035	1,37523	0,69			
10	607	328,227	1,30548	0,72			
11	350	152,076	1,2116	0,98			
12	152	-16,9212	1,11056	1,26			
13	0	-184,13	0,966595	1,67			
14							
15							

Interpolate Bg as 1/B

Εικόνα 5.20 : Εισαγωγή δεδομένων που αφορούν τις ιδιότητες του ρευστού (συνέχεια της εικόνας 5.19)

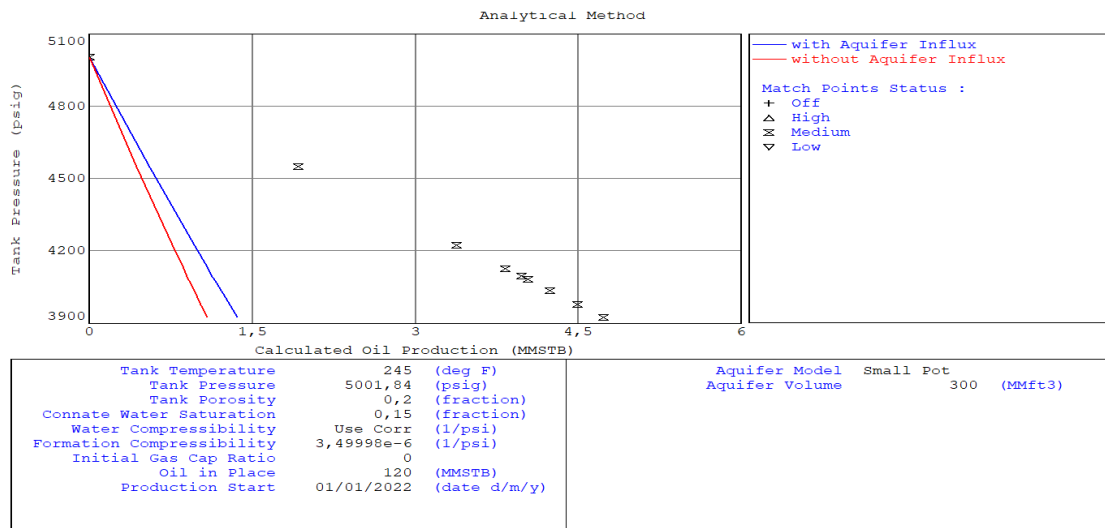
Στη συνέχεια, για να οριστεί ο ταμιευτήρας σύμφωνα με τα διαθέσιμα δεδομένα, ακολουθήθηκε ακριβώς η ίδια διαδικασία που αναλύθηκε στην 1^η περίπτωση.

5.2 Διαδικασία Ιστορικής Ταύτισης (History Matching)

Με τη διαδικασία ιστορικής ταύτισης, καλείται το μοντέλο που έχει αναπτυχθεί με βάση τις υποθέσεις και τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν παραπάνω, να αναπαράγει τα δεδομένα της παραγωγής, τα οποία είναι διαθέσιμα. Για το σκοπό αυτό αξιοποιούνται τα διαγράμματα που αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 3 και για τις δύο περιπτώσεις χρήσης των PVT δεδομένων που αναπτύχθηκαν παραπάνω.

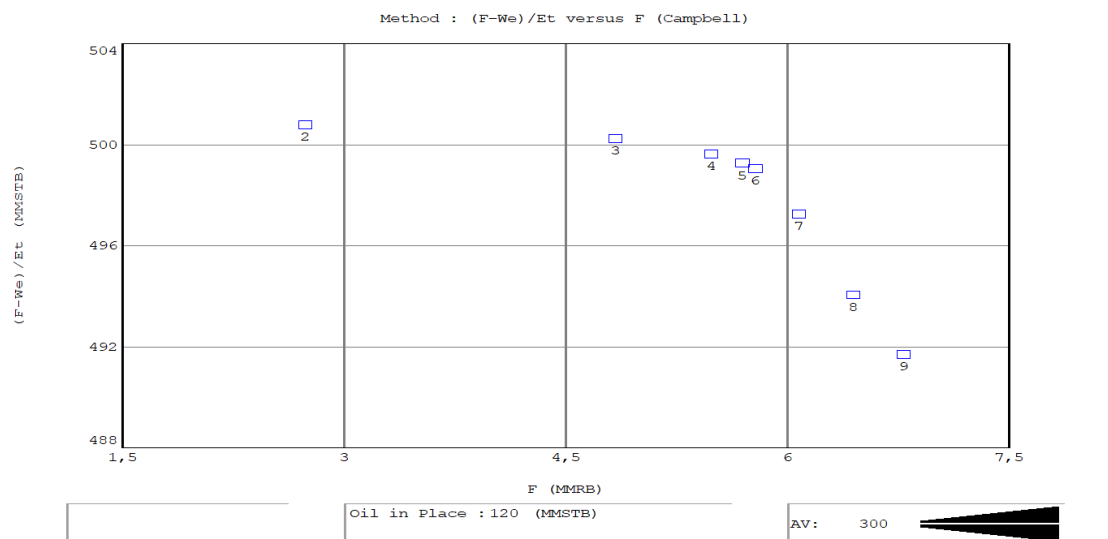
5.2.1 : 1^η περίπτωση – Χρήση συσχετίσεων (correlations)

Το αναλυτικό διάγραμμα (Εικόνα 5.21) που προκύπτει στην περίπτωση αυτή παρουσιάζει απόκλιση της πρόβλεψης του μοντέλου σε σχέση με τα ιστορικά δεδομένα.



Εικόνα 5.21 : Αναλυτικό διάγραμμα

Στο διάγραμμα Campbell της Εικόνας 5.22, τα σημεία που προκύπτουν φαίνεται να σχηματίζουν οριζόντια ευθεία γραμμή διότι η διαφορά των δύο πιο απομακρυσμένων σημείων κυμαίνεται στα 9MMstb.



Εικόνα 5.22 : Διάγραμμα Campbell

Συνεπώς, για την ελαχιστοποίηση των αποκλίσεων των προβλέψεων του μοντέλου από τις καμπύλες που προκύπτουν από τα ιστορικά δεδομένα πρέπει να χρησιμοποιηθεί η διαδικασία παλινδρόμησης θέτοντας ως πιθανές μεταβλητές την τιμή των αρχικών αποθεμάτων πετρελαίου του ταμιευτήρα αλλά και των παραμέτρων που σχετίζονται με το μοντέλο του υδροφορέα.

Η διαδικασία της παλινδρόμησης πραγματοποιήθηκε ρυθμίζοντας τα αρχικά αποθέματα πετρελαίου στον ταμιευτήρα και το μέγεθος του υδροφορέα όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.23.

Το αναλυτικό διάγραμμα, το διάγραμμα Campbell και το Energy Plot που προκύπτουν μετά τη διαδικασία της παλινδρόμησης παρουσιάζονται στις Εικόνες 5.24, 5.25 και 5.26.

Regression

Done
 Cancel
 Help
 Calc
 Reset
 Accept All Fits

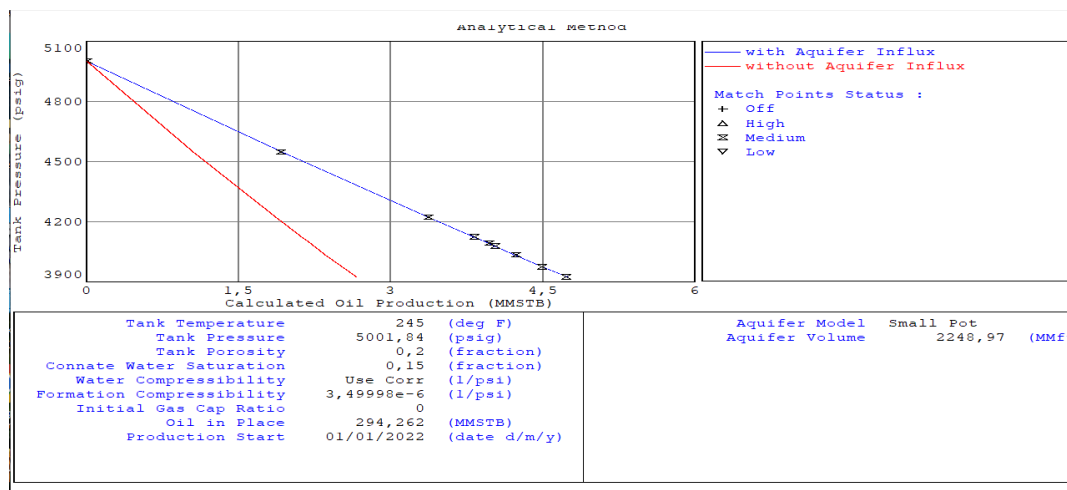
Regress on	Start	Best Fit	Minimum	Maximum	
<input checked="" type="checkbox"/> Oil in Place	120	294,262			MMSTB
<input checked="" type="checkbox"/> Aquifer Volume	350	2248,97			MMft3
<input type="checkbox"/> Porosity	0,2				fraction
<input type="checkbox"/> Formation Compressibility					1/psi

Iteration No Standard Deviation

Εικόνα 5.23 : Διόρθωση τιμών κατά τη διαδικασία της παλινδρόμησης

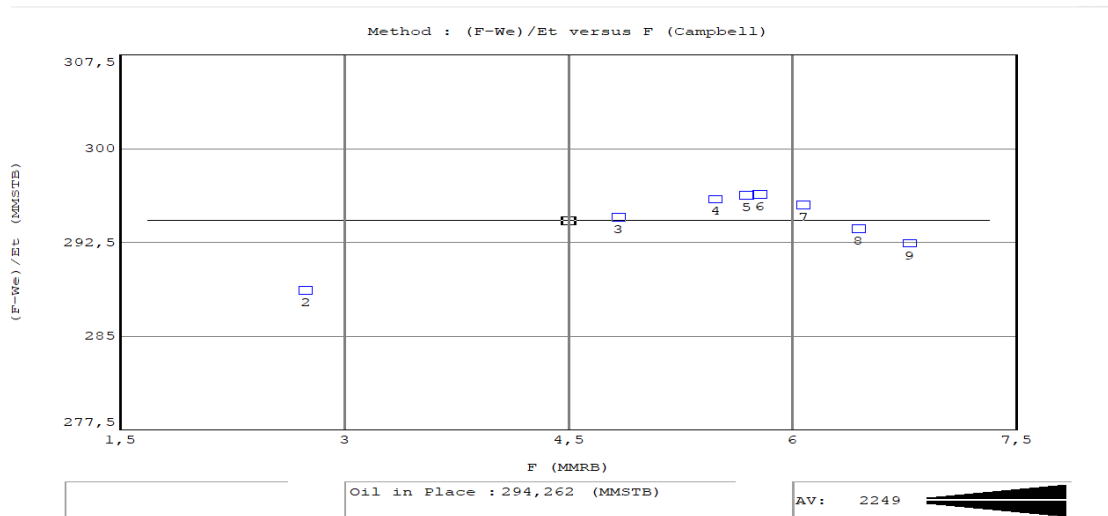
Όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.24, η τιμή των αρχικών αποθεμάτων μεταβλήθηκε στα 294 MM STB από την αρχική στα 120MM STB, ενώ ο όγκος του υδροφορέα μεταβλήθηκε σημαντικά από 350MM ft³ σε 2248.97MM ft³.

Στο διάγραμμα της Εικόνας 5.24, φαίνεται ότι πλέον η πρόβλεψη του μοντέλου με υδροφορέα περνά από τα σημεία των ιστορικών δεδομένων παραγωγής.



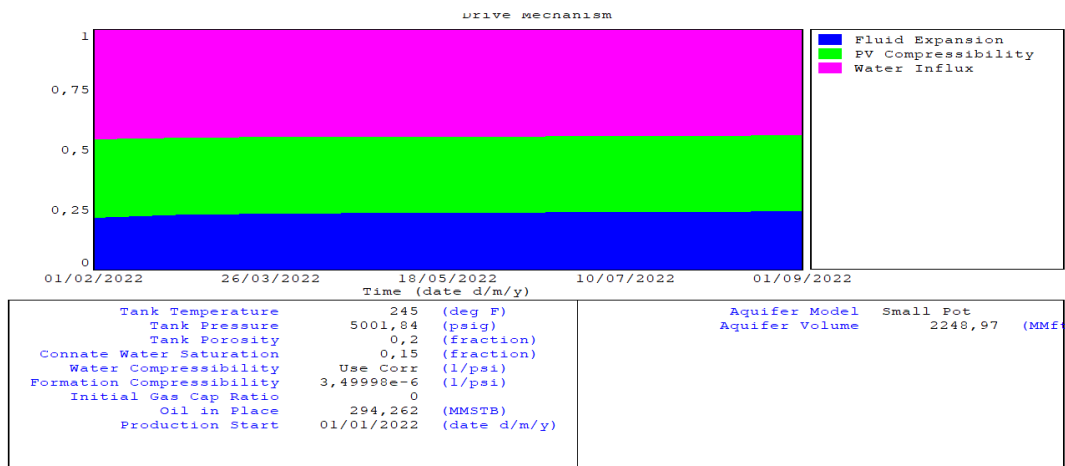
Εικόνα 5.24 : Αναλυτικό διάγραμμα μετά τη διαδικασία της παλινδρόμησης

Το διάγραμμα Campbell της Εικόνας 5.25 παρουσιάζεται βελτιωμένο σε σχέση με το αντίστοιχο της Εικόνας 5.22 πριν τη διαδικασία της παλινδρόμησης. Η βελτίωση και των δύο διαγραμμάτων δείχνει ότι έπρεπε να ρυθμιστεί τόσο η τιμή των αποθεμάτων πετρελαίου όσο και το μέγεθος του υδροφορέα.



Εικόνα 5.25 : Διάγραμμα Campbell μετά τη διαδικασία της παλινδρόμησης

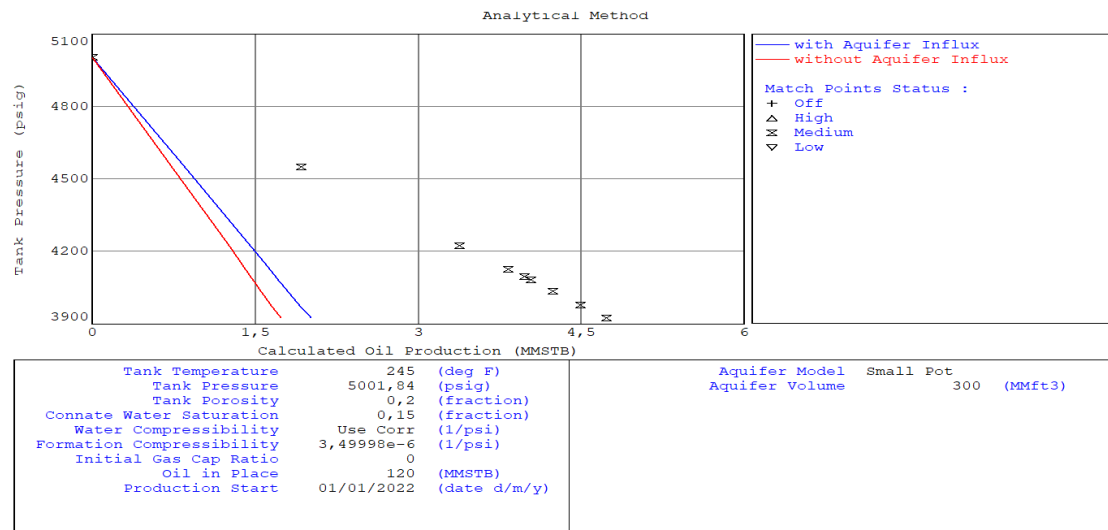
Στο διάγραμμα της Εικόνας 5.26, φαίνεται ότι το νερό ως μηχανισμός παραγωγής είναι σχεδόν σταθερό και συνεισφέρει λίγο λιγότερο από το 50% περίπου, η συμπιεστότητα των πόρων του πετρώματος μεταβάλλεται λίγο και συνεισφέρει λίγο περισσότερο από το 25%, ενώ η εκτόνωση του πετρελαίου αυξάνει λίγο τη συνεισφορά του όσο περνάει ο χρόνος και φτάνει το 25%.



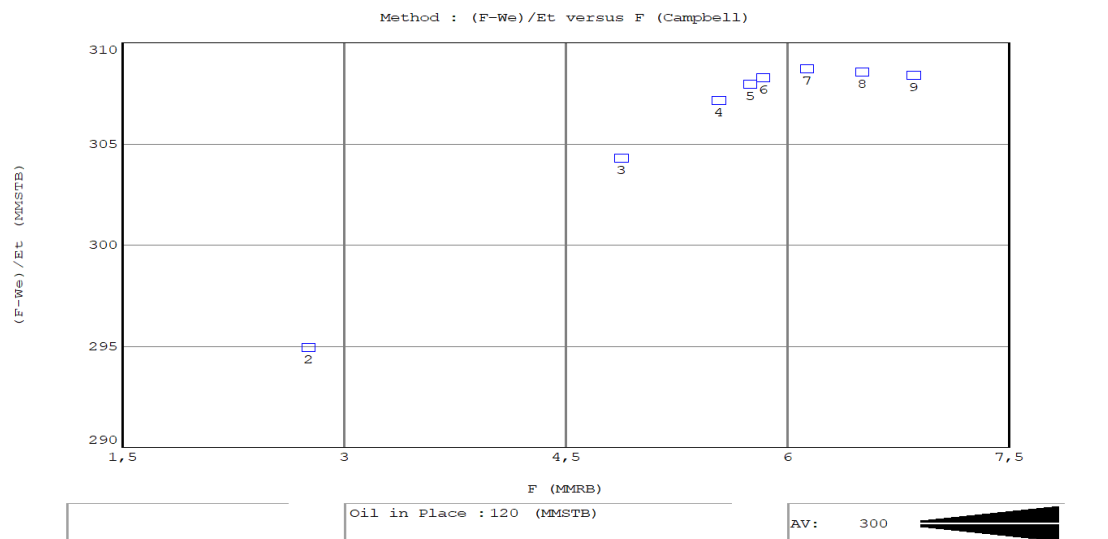
Εικόνα 5.26 : Διάγραμμα Energy Plot μετά τη διαδικασία της παλινδρόμησης

5.2.2 : 2^η περίπτωση – Χρήση πινάκων (tables) με διορθωμένες τιμές B_o και R_s κατά Dake

Το αναλυτικό διάγραμμα (Εικόνα 5.27) που προκύπτει στην περίπτωση αυτή παρουσιάζει απόκλιση της πρόβλεψης του μοντέλου σε σχέση με τα ιστορικά δεδομένα. Από το διάγραμμα Campbell της Εικόνας 5.28, δεν προκύπτει ευθεία οριζόντια καμπύλη. Η περίπτωση να μην είναι ο ταμιευτήρας ακόρεστος απορρίπτεται γιατί έχει επιβεβαιωθεί αυτή η υπόθεση από το βοηθητικό διάγραμμα που παρουσιάστηκε στην Εικόνα 5.17, οπότε η παράμετρος που θα πρέπει να ρυθμιστεί είναι η τιμή των αρχικών αποθεμάτων του ταμιευτήρα.



Εικόνα 5.27 : Αναλυτικό διάγραμμα



Εικόνα 5.28 : Διάγραμμα Campbell

Πραγματοποιείται λοιπόν η διαδικασία παλινδρόμησης, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.29. Τα νέα διαγράμματα παρουσιάζονται στις εικόνας 5.30 – 5.32, όπου αναδεικνύουν την ταύτιση της πρόβλεψης του μοντέλου με τα ιστορικά δεδομένα παραγωγής. Για να επιτευχθεί

αυτό η τιμή των αρχικών αποθεμάτων μεταβλήθηκε στα 275MM STB έναντι των αρχικών 120MM STB, ενώ έγινε και διπλασιασμός του όγκου του υδροφορέα που συμμετέχει.

Regression

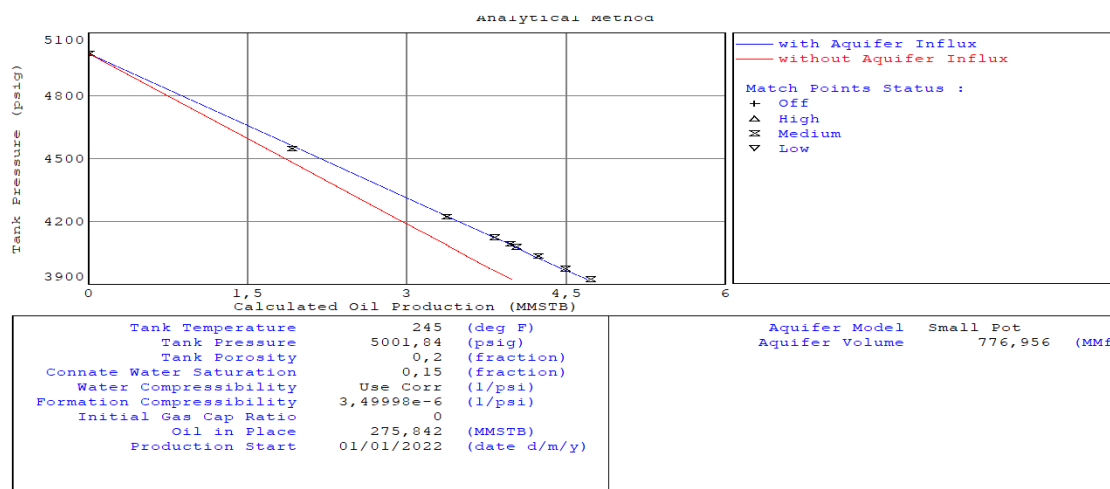
Done
 Cancel
 Help
 Calc
 Reset
 Accept All Fits

Regress on: Start ◀ Best Fit Minimum Maximum

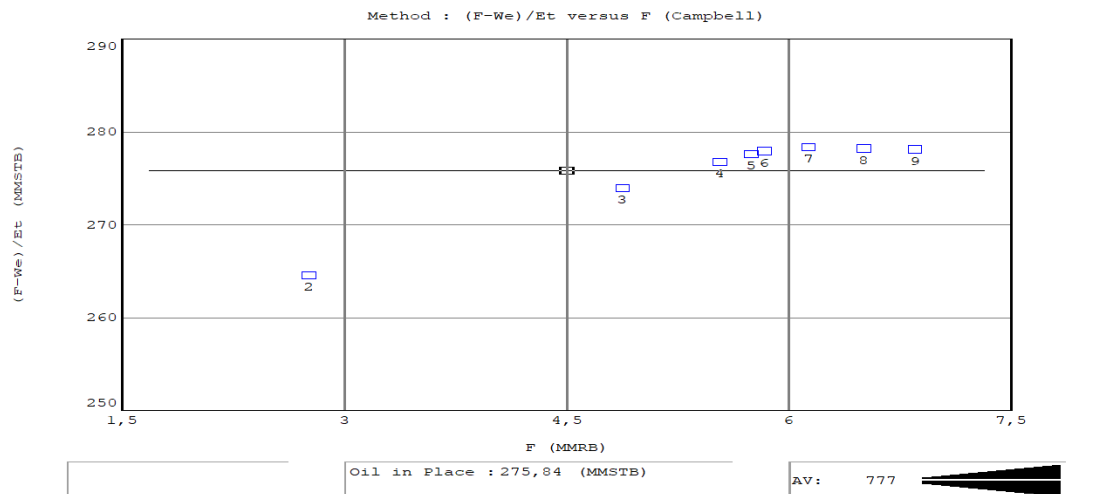
<input checked="" type="checkbox"/> Oil in Place	120	◀	275,842			MMSTB
<input checked="" type="checkbox"/> Aquifer Volume	350	◀	776,956			MMft3
<input type="checkbox"/> Porosity	0,2	◀				fraction
<input type="checkbox"/> Formation Compressibility		◀				1/psi

Iteration No: 100 Standard Deviation: 0,00145151

Εικόνα 5.29 : Διόρθωση τιμών με τη διαδικασία της παλινδρόμησης

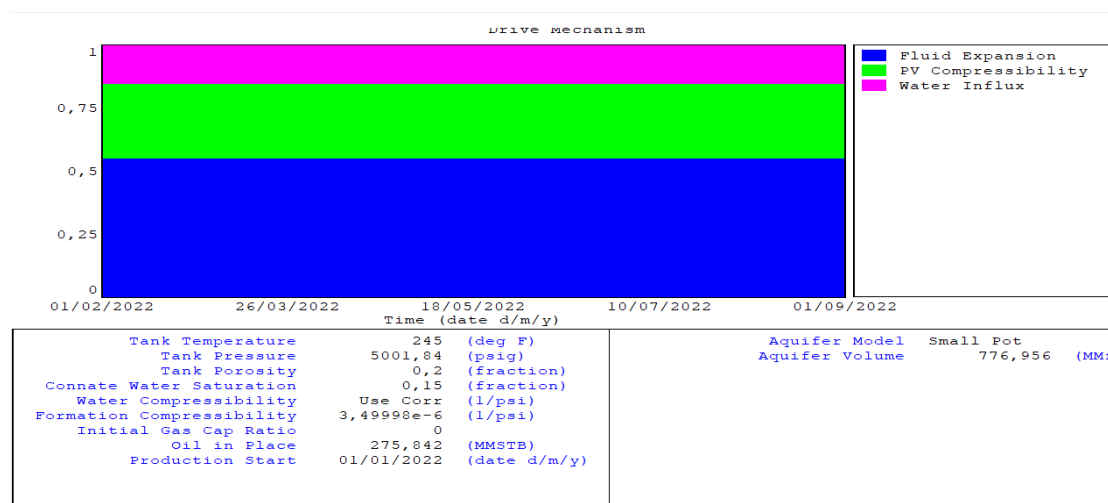


Εικόνα 5.30 : Αναλυτικό διάγραμμα μετά την παλινδρόμηση



Εικόνα 5.31 : Διάγραμμα Campbell μετά την παλινδρόμηση

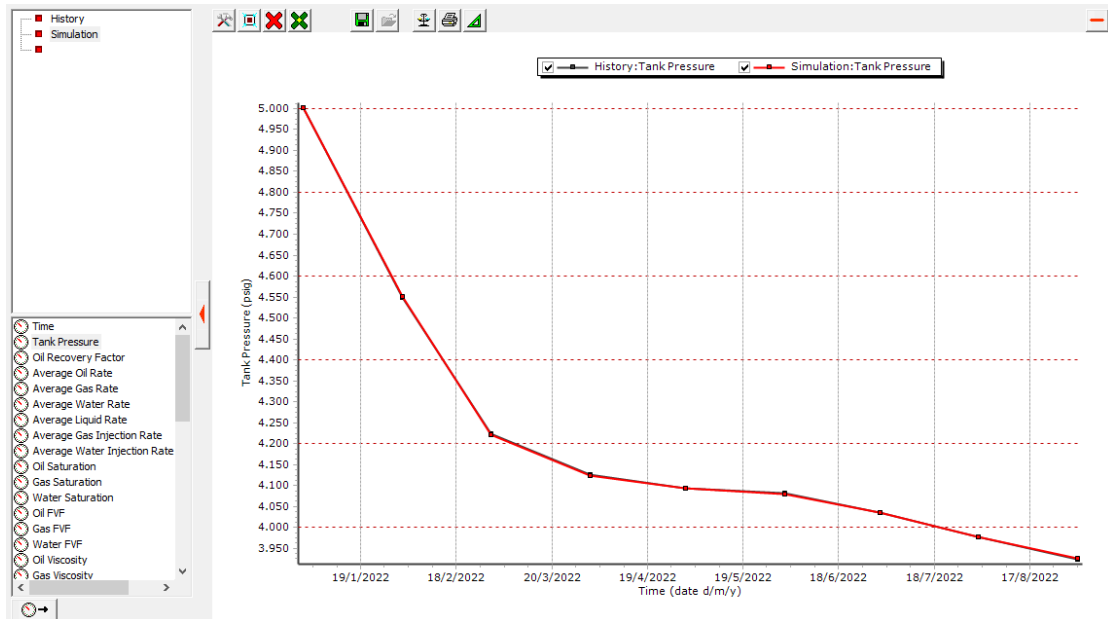
Στην εικόνα 5.32, φαίνεται ότι η εξάπλωση του πετρελαίου συμμετέχει ως μηχανισμός παραγωγής σε ποσοστό λίγο περισσότερο από 50%, η συμπιεστότητα των πόρων συνεισφέρει σε ποσοστό σχεδόν 30%, ενώ το νερό σχεδόν σε 20%.



Εικόνα 5.32 : Διάγραμμα Energy Plot μετά την παλινδρόμηση

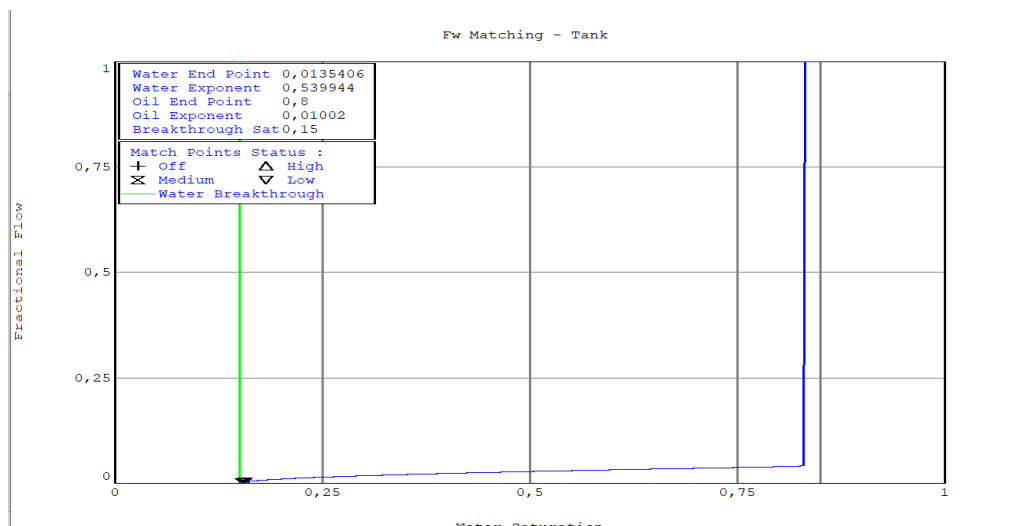
Όπως είναι αναμενόμενο και σε αυτή τη μελέτη περίπτωσης, οι δύο εξεταζόμενες περιπτώσεις δεν έχουν πολύ μεγάλη διαφορά στη νέα υπολογισμένη τιμή των αρχικών τους αποθεμάτων πετρελαίου, το οποίο θεωρείται αναμενόμενο διότι αξιοποιούν έγκυρες τιμές στις παραμέτρους που περιγράφουν τη συμπεριφορά του ρευστού.

Στον πίνακα της Εικόνας 5.33 φαίνονται οι τιμές των αποθεμάτων στις δύο περιπτώσεις που εξετάστηκαν.



Εικόνα 5.35 : Διάγραμμα πρόβλεψης πίεσης (psig) – χρόνου από το μοντέλο (γραμμή) σε σχέση με τα ιστορικά δεδομένα πίεσης (σημεία)

Το τελευταίο στάδιο που πρέπει να ελεγχθεί προτού ξεκινήσει η διαδικασία πρόβλεψης μελλοντικής παραγωγής είναι οι κλασματικές ροές. Ειδικότερα, η κλασματική ροή του νερού που έχει προκύψει από τον νόμο του Darcy θα πρέπει να ταυτίζεται με αυτή που έχει ληφθεί από τα ιστορικά δεδομένα. Η συγκεκριμένη ταύτιση ονομάζεται F_w matching. Έτσι, μέσω της διαδικασίας της παλινδρόμησης, θα προκύψει ένα σύνολο παραμέτρων της εξίσωσης Corey, με σκοπό να γίνει η ταύτιση που αναφέρθηκε προηγουμένως. Το διάγραμμα της Εικόνας 5.36, δείχνει την αντιστοίχιση της κλασματικής ροής και του κορεσμού σε νερό.



Εικόνα 5.36 : Καμπύλη κλασματικής ροής μετά την παλινδρόμηση

Οι τιμές της εξίσωσης Corey που άλλαξαν με τη διαδικασία της παλινδρόμησης κατά το F_w matching φαίνονται στον πίνακα της Εικόνας 5.37.

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	
K _{rw}	0,15	0,0135406	0,539944
K _{ro}	0,15	0,8	0,01002
K _{rg}	0,02	0,7	1

Normalise End Points

WARNING : Enter saturations relative to total system

<< Prior Next >>

Εικόνα 5.37 : Τιμές της εξίσωσης Corey μετά τη διαδικασία της παλινδρόμησης

Τα αποτελέσματα των Εικόνων 5.36 και 5.37 δεν είναι τα επιθυμητά διότι το μοντέλο της εικόνας 5.36, όπως θα αναλυθεί στη συνέχεια, έχει παραμορφωθεί και στην εικόνα 5.37, οι τιμές των παραμέτρων Corey που μεταβλήθηκαν μέσω της διαδικασίας της παλινδρόμησης τείνουν να μηδενιστούν. Τα αποτελέσματα αυτά λοιπόν, οφείλονται στο γεγονός ότι παρότι υπάρχει υδροφορέας, η παραγωγή του νερού είναι πολύ χαμηλή. Ειδικότερα, τα δεδομένα αυτά δεν μπορούν να θεωρηθούν αξιόπιστα σε αυτή τη χρονική περίοδο, καθώς δεν έχει γίνει ακόμη το breakthrough και συνεπώς η ποσότητα του νερού δεν μπορεί να θεωρηθεί αξιόπιστο δεδομένο. Όπως φαίνεται στο διάγραμμα της Εικόνας 5.37, η προσπάθεια ταύτισης των δύο τιμών των κλασματικών ροών (F_w matching), παραμόρφωσε το μοντέλο. Αυτό λοιπόν έχει ως αποτέλεσμα, να μην είναι δυνατή η εξαγωγή συμπερασμάτων για το μοντέλο του νερού με συνέπεια να μη μπορεί να γίνει πρόβλεψη. Εκτός όμως των δεδομένων της παραγωγής που είναι διαθέσιμα για το νερό όπου συμπεραίνεται ότι είναι πολύ χαμηλή η παραγωγή του, μπορεί να προκύψει παρόμοιο συμπέρασμα και από το διάγραμμα παροχής του νερού της Εικόνας 5.5 και ειδικότερα αν συγκριθεί με το διάγραμμα παροχής πετρελαίου της Εικόνας 5.6. Παρατηρώντας και συγκρίνοντας τα διαγράμματα των Εικόνων 5.5 και 5.6, φαίνεται ότι τις ίδιες ημέρες η παροχή του πετρελαίου είναι πολύ μεγαλύτερη από την παροχή του νερού και συνεπώς η παραγωγή του νερού επηρεάζει μηδαμινά.

Συμπεράσματα

Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία παρουσιάστηκε η Μέθοδος Ισοζυγίου Μάζας, αναλύθηκε η μεθοδολογία εφαρμογής της μεθόδου και πραγματοποιήθηκαν δύο μελέτες περίπτωσης εφαρμογής της για ταμειυτήρα πετρελαίου, με τη χρήση του λογισμικού Mbal.

Η μεθοδολογία, μέσω της αρχής δοκιμής και σφάλματος, εκτιμά τα χαρακτηριστικά του ταμειυτήρα, υπολογίζει τις τιμές των αρχικών γεωλογικών εκτιμήσεων και επιλέγει το καλύτερο σενάριο μελλοντικής παραγωγής μέσω της διαδικασίας της πρόβλεψης. Έτσι, η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε και στις 2 μελέτες περίπτωσης, εφαρμόστηκε με λογισμικό Mbal, σκοπεύοντας στην εκτίμηση των χαρακτηριστικών του ταμειυτήρα καθώς και στην πρόβλεψη μελλοντικής παραγωγής.

Για την εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθόδου απαιτούνται ιστορικά δεδομένα παραγωγής, απλές μετρήσεις πεδίου, εκτιμήσεις για τα αποθέματα πετρελαίου και υποθέσεις για τον κορεσμό του ταμειυτήρα και την ύπαρξη ή μη υδροφόρου. Η ακρίβεια της Μεθόδου Ισοζυγίου Μάζας εξαρτάται από την ποιότητα των δεδομένων καθώς και από τις παραδοχές που θέτει η μέθοδος για τον ταμειυτήρα.

Στη 1^η μελέτη περίπτωσης, κατά την 1^η φάση, αξιοποιήθηκαν τα ιστορικά δεδομένα παραγωγής, εκτιμήθηκαν τα χαρακτηριστικά του ταμειυτήρα υποθέτοντας ότι ο ταμειυτήρας είναι ακόρεστος και ότι δεν υπάρχει υδροφορέας. Αποδείχθηκαν οι υποθέσεις ορθές. Ολοκληρώνοντας την 1^η φάση, παρατηρήθηκε ότι η επίδραση των PVT δεδομένων είναι σημαντική καθώς η εισαγωγή λανθασμένων τιμών PVT είχε αντίκτυπο στα χαρακτηριστικά του ταμειυτήρα και συγκεκριμένα στα αρχικά αποθέματα του πετρελαίου. Κατά τη 2^η φάση, πραγματοποιήθηκε το σενάριο πρόβλεψης μελλοντικής παραγωγής για 12 μήνες με πίεση μεγαλύτερη της πίεσης κορεσμού και παρατηρήθηκε ότι το μοντέλο του ταμειυτήρα ανταποκρίθηκε επιτυχώς στην πρόβλεψη.

Στη 2^η μελέτη περίπτωσης, κατά την 1^η φάση έγινε όπως και στη 1^η μελέτη περίπτωσης, η εκτίμηση των χαρακτηριστικών του ταμειυτήρα με την αξιοποίηση των ιστορικών δεδομένων παραγωγής, με την παραδοχή της ύπαρξης υδροφόρου καθώς και με την υπόθεση ότι ο ταμειυτήρας είναι ακόρεστος, η οποία υπόθεση αποδείχθηκε ορθή. Σε αυτή τη μελέτη περίπτωσης παρατηρήθηκε ότι με σωστές PVT τιμές, ο τρόπος εισαγωγής τους, αν δηλαδή θα χρησιμοποιηθούν συσχετίσεις ή πίνακες, δεν επηρεάζει τα χαρακτηριστικά του ταμειυτήρα. Κατά τη 2^η φάση, έγινε προσπάθεια πρόβλεψης μελλοντικής παραγωγής ανεπιτυχώς. Σύμφωνα με τα δεδομένα παραγωγής που ήταν διαθέσιμα, παρότι υπήρχε εισροή νερού στον ταμειυτήρα από υδροφόρο, η παροχή του νερού ήταν τόσο χαμηλή ώστε το νερό να μη φτάνει στην επιφάνεια. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα η πρόβλεψη μελλοντικής παραγωγής να καθίσταται αδύνατη. Το πρώτο συμπέρασμα που προέκυψε λοιπόν από αυτή τη μελέτη περίπτωσης είναι ότι δε μπορεί να πραγματοποιηθεί πρόβλεψη μελλοντικής παραγωγής μέχρι τη χρονική στιγμή που θα φτάσει το νερό στην επιφάνεια. Το δεύτερο συμπέρασμα που προέκυψε, είναι ότι όσο μεγαλύτερος είναι ο χρόνος των ιστορικών δεδομένων παραγωγής, τόσο πιο ρεαλιστικό θα είναι το μοντέλο που δημιουργείται μέσω του λογισμικού Mbal.

Το μεγάλο εύρος των ιστορικών δεδομένων παραγωγής και η χρήση πειραματικών μετρήσεων ανάλυσης PVT, βοηθούν σημαντικά στην ακρίβεια της μεθόδου. Ταυτόχρονα, μέσω της διαδικασίας της παλινδρόμησης που παρέχει το λογισμικό, διορθώνονται οι λιγότερο αξιόπιστες τιμές του μοντέλου, με αποτέλεσμα η ακρίβεια της μεθόδου να γίνεται ολοένα και μεγαλύτερη. Τέλος, η συγκεκριμένη μέθοδος μπορεί να αξιοποιηθεί σε διάφορες

φάσεις παραγωγής του ταμιευτήρα, καθώς με τη συλλογή περισσότερων δεδομένων παραγωγής, η συμπεριφορά του ταμιευτήρα αποτυπώνεται ορθότερα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Ahmed, T., 2009. Fundamentals of Rock Properties. In Working Guide to Reservoir Rock Properties and Fluid Flow
- Corey, A.T., 1954. The interrelationship between gas and oil relative permeabilities
- Dake, L.P., 1978. Material Balance Applied to Oil Reservoirs. In: Fundamentals of Reservoir Engineering
- Dandekar, A.Y., 2010. Absolute Permeability. In: Petroleum Reservoir Rock and Fluid Properties.
- Danesh, A., 1998. PVT Tests and Correlations. In: PVT and Phase Behavior of Petroleum Reservoir Fluids
- El – Hoshoudy, A.N., 2019. PVT- Properties of Black Crude Oil – a review. Petroleum and Coal
- Elsharkawy, A. M., Elgibaly, A. A. & Alikhan, A.A., 1995. Assessment of the PVT correlations for predicting the properties of Kuwaiti crude oils
- Ezekwe, N. (2010). *Petroleum Reservoir Engineering Practice*. Pearson Education.
- Havlena, D. and Odeh, A.S.: “The Material Balance as an Equation of a Straight-Line Part II”, *Journal of Petroleum Technology*, 1964
- Muhammad A. Al – Marhoun, 2003. Adjustment of Differential Liberation Data to Separator Conditions
- Petroleum Experts, 2018. User Manual, Version 14
- Tarek, A., 2016. PVT properties of Crude Oils. In: Equations of State and PVT Analysis
- Tarek, A., 2018. Water Influx. In: Reservoir Engineering Handbook
- Ξανθοπούλου Παρασκευή (2021). Κατάταξη των πετρωμάτων – ταμιευτήρων πετρελαίου και φυσικού αερίου. Εισαγωγή στις βασικές αρχές εκτίμησης των αποθεμάτων.
<http://ikee.lib.auth.gr/record/339741/files/GRI-2022-35389.pdf>
- Σκετόπουλος Θεόδωρος (2012). Μελέτη παραγωγής πετρελαϊκών ρευστών από υπόγειους ταμιευτήρες με χρήση υπολογιστικού μοντέλου τύπου ταγκ.

file:///C:/Users/User/Downloads/Meleti_paragogis_petrelaikon_refston_apo_ypogeious_tamiefires_me_chrisi_ypologistikou_montelou_tyrou_tank.pdf

Σταματάκη (2004). Μηχανική Πετρελαίων

Χριστίδη Βασιλική Λουίζα (2022). Ανάπτυξη διαδικασίας εφαρμογής της μεθόδου ισοζυγίου μάζας σε ταμειυτήρες πετρελαίου