



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΡΕΥΣΤΩΝ ΚΑΙ ΠΥΡΗΝΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Θέμα: «Αποτίμηση παραγωγικού δυναμικού Ταμειυτήρα της Ανατολικής Μεσογείου με τη μέθοδο ισοζυγίου μάζας»

Εξεταστική επιτροπή: Καθ. Βαρότσης Νικόλαος (επιβλέπων)

Αν. Καθ. Πασαδάκης Νικόλαος

Δρ. Γαγάνης Βασίλειος

Συμεωνίδης Αναστάσιος

Χανιά, 2014

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή του τμήματος κ. Βαρότση Νικόλαο τόσο για την εμπιστοσύνη που μου επέδειξε μέσω της ανάληψης της διπλωματικής μου εργασίας όσο και για τις εύστοχες παρατηρήσεις αλλά και την καθοδήγηση του καθ' όλη την διάρκεια εκπόνησης της. Επίσης, ευχαριστώ και τον αναπληρωτή καθηγητή κ. Πασαδάκη Νικόλαο για τη συμμετοχή του στην εξεταστική μου επιτροπή. Την εταιρεία στην οποία εργάζομαι Energean Oil & Gas για την παροχή δεδομένων για τον υπό μελέτη ταμιευτήρα αλλά και του λογισμικού επίσης το οποίο χρησιμοποιήθηκε. Ένα μεγάλο και ανιδιοτελές ευχαριστώ οφείλω στον διδάκτορα της Σχολής κ. Γαγάνη Βασίλειο για όλο το χρόνο που μου διέθεσε τόσο για την περάτωση της εν λόγω εργασίας, αλλά και για την αρτιότερη επαγγελματική μου κατάρτιση. Τέλος, θέλω να δηλώσω την ευγνωμοσύνη μου στην οικογένεια μου η οποία στάθηκε δίπλα μου και με υποστήριξε καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η ανάπτυξη μαθηματικών μοντέλων προσομοίωσης της αναμενόμενης παραγωγής του ταμιευτήρα «Χ» υπό συγκεκριμένα σενάρια εκμετάλλευσης με χρήση της Μεθόδου Ισοζυγίου Μάζας (MIM). Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό MBal της εταιρείας Petroleum Experts ώστε να καταστεί δυνατή η εκτίμηση του δυναμικού του.

Δεδομένου ότι ο συγκεκριμένος ταμιευτήρας αποτελεί καινούρια ανακάλυψη, η διαθέσιμη γνώση για αυτόν περιορίζεται στο στατικό μοντέλο αφού δεν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα παραγωγής. Επομένως, η ανάπτυξη των εν λόγω μαθηματικών μοντέλων απαίτησε ιδιαίτερο χειρισμό σχετικά με τα δεδομένα που εισήχθησαν στο πρόγραμμα, λόγω της αβεβαιότητας των τιμών τους, ούτως ώστε να προσομοιωθεί κατά τον πλέον δυνατό ρεαλιστικό τρόπο η διαδικασία παραγωγής. Τα μοντέλα αναπτύχθηκαν κατά τρόπο ώστε να υλοποιείται το σενάριο παραγωγής με βάση τα επενδυτικά πλάνα που έχει καταστρώσει η διαχειρίστρια εταιρία. Επιπρόσθετα, κάποιες τιμές παραμέτρων, για τις οποίες δεν υπάρχουν επαρκή δεδομένα, επιλέγησαν κατά τρόπο ώστε τα παραγόμενα μοντέλα να ικανοποιούν τα φυσικά κριτήρια τα οποία τέθηκαν.

Όταν το δημιουργούμενο μοντέλο κρίθηκε αξιόπιστο ικανοποιώντας τις προϋποθέσεις που ετέθησαν πραγματοποιήθηκε πρόβλεψη παραγωγής για κάθε ένα από τα σενάρια που εκτιμούνται ως πιθανά να ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα. Πιο συγκεκριμένα, υλοποιήθηκαν τρία σενάρια (P10, P50, P90) με κυρίαρχη διαφορά τους τον αρχικό όγκο του πετρελαίου (STOIIP) που πληροί τους πόρους του ταμιευτήρα, όπως επίσης και τον όγκο του ταμιευτήρα νερού. Τέλος, δημιουργήθηκαν όλα τα κατάλληλα διαγράμματα τα οποία κατέστησαν δυνατή την αξιολόγηση του κάθε σεναρίου παραγωγής, όπως επίσης και τα συγκριτικά διαγράμματα τα οποία είναι απαραίτητα για την κατανόηση της δυναμικής συμπεριφοράς του κοιτάσματος.

Περιεχόμενα

Περίληψη	5
Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή	
1.1 Πετρέλαιο	12
1.2 Είδη κοιτασμάτων υδρογονανθράκων	12
1.3 Αξιολόγηση ταμιευτήρα	13
1.4 Παραγωγή ρευστών ταμιευτήρα	14
1.5 Φυσικοί κινητήριοι μηχανισμοί παραγωγής	16
1.5.1 Κινητήριος Μηχανισμός Αερίου εν Διαλύσει	16
1.5.2 Κινητήριος Μηχανισμός Υπερκείμενης Ζώνης Αερίου	17
1.5.3 Κινητήριος Μηχανισμός Υποκείμενης Υδατοφόρου Ζώνης	18
1.5.4 Κινητήριος Μηχανισμός Συμπιεστότητας Πετρώματος	19
1.5.5 Σύνθετος Κινητήριος Μηχανισμός Παραγωγής	20
1.6 Υπολογιστικά μοντέλα προσομοίωσης ταμιευτήρων	20
1.7 Προσομοίωση ταμιευτήρα	21
1.7.1 Είδη Μοντέλων Προσομοίωσης Ταμιευτήρων	24
1.7.2 Διαστάσεις Μοντέλων Προσομοίωσης	26
1.8 Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας	27

Κεφάλαιο 2 Μέθοδος Ισοζυγίου Μάζας.....

2.1	Εισαγωγή	30
2.2	Ανάπτυξη της Εξίσωσης Ισοζυγίου Μάζας (EIM)	31
2.3	Χρήση της εξίσωσης ισοζυγίου μάζας για την αναγνώριση του μηχανισμού παραγωγής	38
2.3.1	Ταμιευτήρες χωρίς εισροή νερού και χωρίς υπερκείμενη ζώνη αερίου	40
2.3.2	Ταμιευτήρες με κινητήρια δύναμη αυτή της εκτόνωσης του ελεύθερου αερίου, χωρίς εισροή νερού και με γνωστό τον όγκο της υπερκείμενης ζώνης αερίου	41
2.3.3	Διαδικασία εφαρμογής της μεθόδου	42
2.4	Χρήση της εξίσωσης ισοζυγίου μάζας για πρόβλεψη παραγωγής	43
2.4.1	Εξισώσεις που υλοποιούνται κατά την πρόβλεψη παραγωγής.....	44
2.4.2	Αντιστοίχιση πίεσης σε χρόνο	46
2.5	Αριστοποίηση των τιμών των παραμέτρων / «history matching»	47
2.6	Υποκείμενη υδατοφόρος ζώνη	49
2.6.1	Κινητήριος δύναμη εισροής νερού	50
2.6.2	Ταξινόμηση υδροφορέων	51
2.6.2.1	Βαθμός διατήρησης της πίεσης	51
2.6.2.2	Συνθήκες εξωτερικών συνόρων.....	53

2.6.2.3	Γεωμετρία ροής	54
2.7.2.4	Καθεστώς ροής.....	54
2.6.3	Μοντέλα υδροφόρων ταμιευτήρων	55
2.6.4	Μέθοδος του Fetkonitch για την εισροή νερού	55
2.7	Χρήση της Μεθόδου Ισοζυγίου Μάζας στην παρούσα εργασία	60

Κεφάλαιο 3 Ανάπτυξη Μοντέλου Ισοζυγίου Μάζας

3.1	Περιγραφή Λογισμικού MBal	64
3.2	Απαιτούμενες από το MBal παράμετροι και ενδεδειγμένος τρόπος χρήσης του	66
3.3	Εφαρμογή της MIM για τη μελέτη του κοιτάσματος «Χ»	68
3.3.1	Κριτήρια αξιολόγησης μοντέλων του ταμιευτήρα.....	70
3.4	Περιγραφή παραμέτρων που υπεισέρχονται στη δημιουργία του μοντέλου MIM του ταμιευτήρα «Χ» με χρήση του MBal.....	71
3.4.1	PVT δεδομένα – Θερμοδυναμικές ιδιότητες του ρευστού.....	71
3.4.2	Δεδομένα μοντέλου τανκ.....	74
3.4.3	Ιδιότητες υδροφόρου ταμιευτήρα.....	77
3.4.4	Συμπιεστότητα πετρώματος	78
3.4.5	Σχετική διαπερατότητα	78
3.5	Πρόβλεψη παραγωγής.....	84

3.5.1 Περιορισμοί για την πρόβλεψη παραγωγής	84
3.5.2 Χαρακτηριστικά γεωτρήσεων παραγωγής	86

Κεφάλαιο 4 Αποτελέσματα.....

4.1 Εισαγωγή	92
4.2 Επιλογή STOIIP για τη δημιουργία του μοντέλου MIM	92
4.3 Σχετική διαπερατότητα φάσεων	93
4.4 Βελτιστοποίηση παραμέτρων	93
4.5 Προβλέψεις παραγωγής του ταμιευτήρα «Χ»	98
4.5.1 Αποτελέσματα πρόβλεψης παραγωγής για το σενάριο P50.....	99
4.5.2 Αποτελέσματα πρόβλεψης παραγωγής για τα σενάρια P10, P50 και P90.....	105
4.6 Μελέτη ευαισθησίας ως προς το δείκτη παραγωγικότητας της γεώτρησης (PI)	108

Κεφάλαιο 5 Συμπεράσματα.....

5.1 Συμπεράσματα	112
5.2 Προτάσεις για περαιτέρω μελέτη	115

Βιβλιογραφία..... 117

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Πετρέλαιο

Η ιστορία της σύγχρονης βιομηχανικής κοινωνίας είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με το πετρέλαιο. Το πετρέλαιο αποτελεί σήμερα την ευρύτερα χρησιμοποιούμενη ενεργειακή πρώτη ύλη και κατά συνέπεια έχει καταστεί απαραίτητη προϋπόθεση για τη λειτουργία και ανάπτυξη της οικονομίας. Έχει καθιερωθεί ως ο κύριος ενεργειακός πόρος αφενός διότι έχει υψηλό ενεργειακό περιεχόμενο συγκρινόμενο με τα άλλα συμβατικά καύσιμα και αφετέρου βρίσκεται σε υγρή φάση σε συνθήκες περιβάλλοντος, γεγονός που καθιστά εύκολη τη μεταφορά, διακίνηση και αποθήκευση του. Επομένως, οι υδρογονάνθρακες (πετρέλαιο αλλά και φυσικό αέριο) αποτελούν τη βασική ενεργειακή πηγή του σήμερα αλλά και του αύριο, τουλάχιστον για όσο δεν διαφαίνεται στον ορίζοντα επαρκής και αξιόπιστη εναλλακτική πηγή ενέργειας που να διατίθεται σε ανταγωνιστικό κόστος.

Το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο συναντώνται υπό υψηλή πίεση και θερμοκρασία σε υπόγειους σχηματισμούς οι οποίοι ονομάζονται ταμιευτήρες (reservoirs). Οι ταμιευτήρες είναι πορώδη και περατά ιζηματογενή πετρώματα τα οποία περιβάλλονται από αδιαπέρατα πετρώματα (cap-rock) και δημιουργούν συνθήκες παγίδευσης των υδρογονανθράκων. Η παραγωγή τους στην επιφάνεια, δεδομένου ότι βρίσκονται πάντα υπό πίεση και σε μεγάλο βάθος, πραγματοποιείται μέσω γεωτρήσεων.

Ο ρόλος των υπόλοιπων ενεργειακών πηγών, όπως για παράδειγμα είναι η πυρηνική ενέργεια αλλά και οι ανανεώσιμες (γεωθερμία, ηλιακή και αιολική ενέργεια) παραμένει συμπληρωματικός κυρίως για τεχνικούς αλλά και για οικονομικούς – πολιτικούς λόγους.

1.2 Είδη κοιτασμάτων υδρογονανθράκων

Το πετρέλαιο αποτελεί ένα σύνθετο μίγμα κυρίως υδρογονανθράκων και άλλων ενώσεων που, εκτός από άνθρακα και υδρογόνο, περιέχει επιπλέον άζωτο, οξυγόνο, θείο και άτομα μετάλλων, με συνέπεια η σύσταση του να παρουσιάζει έντονες

διαφοροποιήσεις ανάλογα με την προέλευσή του. Από την άλλη, και το φυσικό αέριο παρόλο που είναι πιο απλό από άποψη σύστασης, καθώς αποτελείται κυρίως από μεθάνιο και αιθάνιο, ωστόσο έχει και αυτό την δική του συνθετότητα. Λόγω της τεράστιας ποικιλότητας που παρατηρείται στη σύσταση και κατ' επέκταση στις φυσικές και χημικές ιδιότητες των υδρογονανθράκων, τα κοιτάσματα διαχωρίζονται σε διάφορα είδη αναλόγως με τα χαρακτηριστικά των ρευστών που πληρούν τους πόρους των εκάστοτε ταμιευτήρων τους.

Τα κοιτάσματα υδρογονανθράκων διακρίνονται κατ' αρχάς σε κοιτάσματα ξηρού φυσικού αερίου (dry gas), υγρού φυσικού αερίου (wet gas), αερίου συμπυκνώματος (gas condensate), πτητικού πετρελαίου (volatile oil) και μαύρου πετρελαίου (black oil). Τα κοιτάσματα ξηρού φυσικού αερίου αποτελούν μίγματα ελαφρών υδρογονανθράκων τα οποία κατά τη διάρκεια της παραγωγής δεν αποδίδουν υγρό συμπύκνωμα (πετρέλαιο) είτε στον ταμιευτήρα είτε στην επιφάνεια, σε αντίθεση με τα κοιτάσματα υγρού φυσικού αερίου όπου υγρό συμπύκνωμα συλλέγεται στην επιφάνεια. Στα κοιτάσματα αερίου συμπυκνώματος, τη στιγμή της ανακάλυψης του σχηματισμού καθώς και κατά τα πρώτα στάδια της παραγωγής στους πόρους του κοιτάσματος, εν γένει ρέει μόνο η αέρια φάση. Ωστόσο, όταν η αέρια φάση υποστεί ανάδρομη συμπύκνωση κατά τη διάρκεια της παραγωγής και, καθώς η πίεση πέφτει, δημιουργεί υγρό (συμπύκνωμα) υψηλής πτητικότητας. Τα κοιτάσματα πτητικού πετρελαίου αποτελούν υγρά μίγματα και χαρακτηρίζονται από σημαντική περιεκτικότητα σε ελαφρούς και ενδιάμεσους υδρογονάνθρακες που μπορούν να εξατμιστούν πολύ εύκολα. Τέλος, τα κοιτάσματα μαύρου πετρελαίου είναι φτωχά σε πτητικά συστατικά και αποτελούσαν μέχρι πρόσφατα την πλειοψηφία των κοιτασμάτων του πετρελαίου λόγω του ότι απαντώνται σε μικρότερα βάθη.

1.3 Αξιολόγηση ταμιευτήρα

Μετά την ανακάλυψη ενός κοιτάσματος υδρογονανθράκων (αφού προηγηθεί επιφανειακή, γεωλογική και γεωφυσική έρευνα) απαιτείται η συλλογή όλων των απαραίτητων δεδομένων (μέσω γεωτρήσεων ανάπτυξης και περιχαράκωσης) για τον

χαρακτηρισμό τόσο του ρευστού όσο και του πετρώματος που φιλοξενεί το πρώτο στους πόρους του. Τα αποτελέσματα όλων των παραπάνω ερευνών θα συνεκτιμηθούν και θα αξιολογηθούν για την κατάρτιση ενός όσο το δυνατόν πιο αριστοποιημένου σχεδίου εκμετάλλευσης.

Προτού εγκριθεί η δαπάνη τεράστιων κεφαλαίων για την ανάπτυξη ενός κοιτάσματος^[1], προσδιορίζεται προσεγγιστικά ο όγκος των υδρογονανθράκων που περιέχονται μέσα στο κοίτασμα καθώς επίσης και το ποσοστό εξ αυτών που ελπίζεται τελικά να ανακτηθεί σύμφωνα με το σχέδιο διαχείρισης. Αποφασίζεται ο αριθμός των παραγωγικών γεωτρήσεων, τα σημεία στα οποία θα πραγματοποιηθούν αυτές, καθώς και η βέλτιστη επιλογή των θέσεων των διατρήσεων (perforations) με ένα συνδυασμό που περιλαμβάνει ελαχιστοποίηση του κόστους και μεγιστοποίηση της αποληψιμότητας. Καθορίζονται οι ρυθμοί παραγωγής της κάθε γεώτρησης και ορίζονται οι προδιαγραφές των εγκαταστάσεων επεξεργασίας των παραγόμενων ρευστών στην επιφάνεια. Τέλος, εκπονούνται μαθηματικά μοντέλα τα οποία χρησιμοποιούνται για την πρόβλεψη της παραγωγής και της κίνησης των ρευστών ανά πάσα στιγμή μέσα στο πορώδες μέσο του ταμιευτήρα.

1.4 Παραγωγή ρευστών ταμιευτήρα

Κατά τη διάρκεια της εκμετάλλευσης ενός κοιτάσματος^[2], η παραγωγή παρακολουθείται μέρα με τη μέρα και αναλύεται ανά γεώτρηση και ανά παράγουσα ζώνη με καταγραφή της παροχής των παραγόμενων φάσεων και της πίεσης ροής. Σχεδιάζονται επίσης τεστ για την καταγραφή της εξέλιξης της τιμής της μέσης πίεσης στον ταμιευτήρα. Η μετατόπιση της θέσης των διεπιφανειών αερίου/πετρελαίου και πετρελαίου/νερού καταγράφεται επίσης με τον χρόνο.

Η ανάλυση των στοιχείων παραγωγής επιτρέπει τη διάγνωση του κυρίαρχου φυσικού μηχανισμού με τον οποίο παράγεται το ρευστό. Αυτό θα επιτρέψει την έγκαιρη λήψη μέτρων για τη συνέχιση της παραγωγής υπό αριστοποιημένες συνθήκες και θα βελτιώσει την τελική αποληψιμότητα. Η παραγωγή υδρογονανθράκων από ένα ταμιευτήρα στην επιφάνεια απαιτεί την κατανάλωση

ενέργειας η οποία είτε εμπεριέχεται στο σύστημα και παρέχεται από αυτό είτε προσφέρεται εξωγενώς. Χαρακτηριστικές περιπτώσεις, οι οποίες θα αναλυθούν εκτενέστερα στη συνέχεια, αποτελούν η εκτόνωση των υπό πίεση ρευστών του ταμιευτήρα καθώς και η διατήρηση της πίεσής του μέσω εισπίεσης νερού. Συνεπώς διακρίνουμε τα παρακάτω στάδια παραγωγής ανάλογα με την προέλευση της ενέργειας που δαπανάται για την παραγωγή:

- πρωτογενής παραγωγή (primary production) όπου η ενέργεια προέρχεται αποκλειστικά από το σύστημα ταμιευτήρας-ρευστά ή και από πιθανό υποκείμενο ταμιευτήρα νερού ο οποίος έχει δυνατότητα επικοινωνίας με τον ταμιευτήρα υδρογονανθράκων. Λαμβάνει χώρα κατά τα πρώτα στάδια της παραγωγής και επιδιώκεται η διατήρησή της για όσο το δυνατόν περισσότερο χρονικό διάστημα καθότι η εκμετάλλευση υπό αυτές τις συνθήκες είναι η οικονομικότερη δυνατή.
- δευτερογενής παραγωγή (secondary production) όπου οι παραγόμενες ποσότητες υδρογονανθράκων ανέρχονται στην επιφάνεια με τη δαπάνη ενέργειας η οποία εισάγεται τεχνηέντως στο σύστημα. Οι δύο μέθοδοι δευτερογενούς παραγωγής, είναι αυτή της έγχυσης νερού (waterflooding) και της έγχυσης αερίου (gas injection) με στόχο απλά και μόνο την ώθηση των υδρογονανθράκων προς τα φρεάτια παραγωγής (immiscible flooding) και χωρίς φιλοδοξίες επιβολής φυσικοχημικών διεργασιών μεταξύ του εγχέομένου αερίου και του ρευστού του ταμιευτήρα. Αξίζει να σημειωθεί ότι η δευτερογενής παραγωγή εφαρμόζεται ευρέως σε παγκόσμια κλίμακα καθώς συμβάλει σημαντικά στην τελική αποληψιμότητα με αρκετά οικονομικό τρόπο.
- τριτογενής παραγωγή (tertiary production ή enhanced oil recovery). Ο συγκεκριμένος μηχανισμός παραγωγής στοχεύει στον απεγκλωβισμό με τη βοήθεια φυσικοχημικών διεργασιών όπως η μεταφορά μάζας μέσω έγχυσης αερίου (miscible gas injection), η μείωση της επιφανειακής τάσης μέσω εισπίεσης χημικών (chemical flooding) και CO₂ και η εφαρμογή θερμικών διεργασιών όπως έγχυση υπέρθερμου ατμού και καύση, και άλλες. Κατά αυτό

τον τρόπο, παράγεται επιπρόσθετο μέρος των υδρογονανθράκων οι οποίοι βρίσκονται παγιδευμένοι στο πορώδες μέσο λόγω των τριχοειδών πιέσεων που αναπτύχθηκαν, αρκετές φορές σαν συνέπεια της δευτερογενούς παραγωγής που προηγήθηκε ή λόγω του υψηλού τους ιξώδους.

1.5 Φυσικοί κινητήριοι μηχανισμοί παραγωγής

Υπάρχουν διάφοροι φυσικοί κινητήριοι μηχανισμοί παραγωγής^[3] που συναντώνται στους ταμιευτήρες υδρογονανθράκων, όπως είναι οι παρακάτω:

- Αερίου εν διαλύσει
- Υπερκείμενης ζώνης αερίου
- Φυσικής εισροής νερού
- Συμπιεστότητας πετρώματος

Συνήθως, για τη παραγωγή ενός ταμιευτήρα επενεργούν περισσότεροι του ενός από τους παραπάνω μηχανισμούς.

1.5.1 Κινητήριος Μηχανισμός Αερίου εν Διαλύσει

Ένας ταμιευτήρας πετρελαίου με κινητήριο μηχανισμό παραγωγής αυτόν του αερίου εν διαλύσει (solution gas drive), έχει σαν κύριες πηγές ενέργειας, για την ώθηση του πετρελαίου προς το φρεάτιο παραγωγής, την εκτόνωση της φάσης του πετρελαίου καθώς και την εκτόνωση του αερίου που είναι διαλελυμένο στο πετρέλαιο. Κατά τη διάρκεια της παραγωγής των ταμιευτήρων αυτής της κατηγορίας διακρίνονται δυο στάδια. Κατά τη διάρκεια του πρώτου σταδίου, η πίεση διατηρείται υπεράνω του σημείου κορεσμού του πετρελαίου, $P > P_{sat}$ και δεν υπάρχει ελεύθερη αέρια φάση εντός των πόρων του κοιτάσματος. Σε αυτή την περίπτωση, όλο το αέριο που παράγεται στην επιφάνεια βρίσκεται διαλελυμένο στην υγρή φάση σε συνθήκες ταμιευτήρα. Το δεύτερο στάδιο, αναφέρεται στην περίοδο κατά την οποία η πίεση του σχηματισμού υποχωρεί κάτω από το σημείο κορεσμού του ρευστού, $P < P_{sat}$. Σε

αυτή την περίπτωση, απελευθερώνεται αέριο το οποίο αρχίζει να συνυπάρχει σαν ελεύθερη φάση εντός των πόρων του κοιτάσματος.

Στις περιπτώσεις όπου ο κυρίαρχος μηχανισμός παραγωγής είναι ο μηχανισμός του εν διαλύσει αερίου, κυρίαρχος στόχος του Μηχανικού Ταμιευτήρων είναι η όσο το δυνατόν μικρότερη παραγωγή αερίου, διατηρώντας έτσι μεγαλύτερη ποσότητα διαθέσιμης ενέργειας στο κοίτασμα για την παραγωγή του πετρελαίου, δεδομένου ότι η συμπίεστικότητα του αερίου είναι πολύ μεγαλύτερη της συμπίεστικότητας του υγρού (πετρελαίου και νερού).

Η αποληψιμότητα των ταμιευτήρων που παράγουν με κινητήριο μηχανισμό αερίου εν διαλύσει εξαρτάται κυρίως από τις ιδιότητες PVT του ρευστού. Όταν δεν επενεργούν και άλλοι μηχανισμοί παραγωγής, η τελική αποληψιμότητα του κοιτάσματος δεν ξεπερνάει συνήθως το 30% της αρχικής ποσότητας των υδρογονανθράκων στο πορώδες μέσο, ενώ ο μέσος όρος είναι της τάξεως του 15%. Στις περιπτώσεις όπου το πετρέλαιο που πληροί τους πόρους ενός ταμιευτήρα είναι πολύ βαρύ (black oil) η τελική αποληψιμότητα του κοιτάσματος μπορεί να είναι και χαμηλότερη του 10%.

1.5.2 Κινητήριος Μηχανισμός Υπερκείμενης Ζώνης Αερίου

Σε αυτόν τον μηχανισμό ισχύουν οι ίδιες θεωρητικές αρχές που αναπτύχθηκαν για τον κινητήριο μηχανισμό αερίου εν διαλύσει. Καθώς η πίεση του ταμιευτήρα μειώνεται, λόγω της άντλησης των ρευστών, η υπερκείμενη ζώνη αερίου εμποδίζει το πετρέλαιο του σχηματισμού να εκτονωθεί, προσφέροντας κατ' αυτόν τον τρόπο επιπλέον ενέργεια λόγω της εκτόνωσης του αερίου. Η διεπιφάνεια μεταξύ αερίου και πετρελαίου μετακινείται συνεχώς προς τα κάτω διότι καθώς το ρευστό είναι κορεσμένο δεν μπορεί να διαλύσει επιπλέον ποσότητα αερίου με αποτέλεσμα το ποσοστό της αέριας φάσης συνεχώς να αυξάνεται καθώς η πίεση του σχηματισμού μειώνεται και ποσότητες ρευστών παράγονται στην επιφάνεια. Γενικά, παρατηρείται ότι η υπερκείμενη ζώνη αερίου σε ένα κοίτασμα υδρογονανθράκων συντελεί στη

μείωση του ρυθμού πτώσης της πίεσης του ταμιευτήρα σε σχέση με το μηχανισμό αερίου εν διαλύσει.

Σε τέτοιου είδους ταμιευτήρες απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή από τα πρώτα στάδια της εκμετάλλευσης του σχηματισμού, όσον αφορά την επιλογή των θέσεων των φρεατίων παραγωγής καθώς και των θέσεων των διατρήσεων, δεδομένου ότι ήδη στις αρχικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας του κοιτάσματος υπάρχει δεύτερη (αέρια) φάση. Βασικός στόχος των Μηχανικών Πετρελαίου είναι η σωστή επιλογή των θέσεων των γεωτρήσεων όπως επίσης και των διατρήσεων, ούτως ώστε να επιτευχθεί η μέγιστη δυνατή παραγωγή πετρελαίου στην επιφάνεια. Για να επιτευχθεί ο παραπάνω στόχος, θα πρέπει οι διατρήσεις να βρίσκονται αποκλειστικά στη ζώνη του πετρελαίου.

Τέλος, οι ταμιευτήρες με κινητήριο μηχανισμό παραγωγής υπερκείμενης ζώνης αερίου παρουσιάζουν μεγαλύτερο ποσοστό αποληψιμότητας, κατά 1-10%, σε σύγκριση με τους αντίστοιχους που παράγουν μόνο με μηχανισμό παραγωγής αερίου εν διαλύσει.

1.5.3 Κινητήριος Μηχανισμός Υποκείμενης Υδατοφόρου Ζώνης

Ένας ακόμα φυσικός κινητήριος μηχανισμός παραγωγής είναι αυτός κατά τον οποίο παρατηρείται φυσική εισροή νερού μέσα στον ταμιευτήρα από υποκείμενη υδατοφόρο ζώνη (aquifer influx).

Η συνολική εισροή νερού από μια υδατοφόρο ζώνη προς τον ταμιευτήρα ισούται με:

$$W_e = V_w \cdot c_t \cdot \Delta P \quad (1.1)$$

όπου,

W_e συνολική εισροή νερού (rb)

V_w συνολικός όγκος νερού στην υδατοφόρο ζώνη (rb)

c_t	ολική (total) συμπιεστότητα, όπου $c_t = c_w + c_r$
c_w	συμπιεστότητα νερού
c_r	συμπιεστότητα πετρώματος
ΔP	πτώση πίεσης

Το κατά πόσον η φυσική εισροή νερού σε ένα ταμιευτήρα επηρεάζει ουσιαστικά τη συμπεριφορά του εξαρτάται κυρίως από το μέγεθος του υποκείμενου υδροφόρου ορίζοντα. Παρατηρείται ότι σε ταμιευτήρες οι οποίοι παράγουν με ισχυρό μηχανισμό φυσικής εισροής νερού, η πίεση παραμένει σχεδόν σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια ζωής τους. Ωστόσο, από τη στιγμή που η παραγωγή νερού στην επιφάνεια αρχίσει να αυξάνει επικίνδυνα (water breakthrough) πρέπει να ληφθούν μέτρα για να προστατευθεί η βιωσιμότητα της εκμετάλλευσης. Σε ορισμένες περιπτώσεις η παρουσία μιας σημαντικής στήλης νερού μέσα στο φρεάτιο είναι ικανή να εφαρμόσει υδροστατική πίεση στον σχηματισμό αρκετή ώστε να σταματήσει την παραγωγή.

1.5.4 Κινητήριος Μηχανισμός Συμπιεστότητας Πετρώματος

Ακόμα ένας φυσικός κινητήριος μηχανισμός παραγωγής είναι αυτός που οφείλεται στη συμπιεστότητα τόσο του πορώδους μέσου όσο και του νερού το οποίο βρίσκεται εγκλωβισμένο στους πόρους του. Η παραγωγή ρευστών από τον ταμιευτήρα στην επιφάνεια οδηγεί στη σταδιακή μείωση της επικρατούσας πίεσης του ταμιευτήρα λόγω της εκτόνωσης που λαμβάνει χώρα. Η μείωση της πίεσης, μεταξύ άλλων προκαλεί μεταβολή στον όγκο των πόρων. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τη συρρίκνωση των πόρων του σχηματισμού που φιλοξενούν το ρευστό λόγω της συμπιεστότητας του. Η συρρίκνωση των πόρων του κοιτάσματος, και δεδομένου ότι οι ταμιευτήρες υδρογονανθράκων περιέχουν ποσότητες νερού στους πόρους τους το οποίο δεν μπορεί να απομακρυνθεί, έχει σαν συνέπεια την εκτόνωση του νερού (water expansion) και την αποβολή του πετρελαίου, εκτός των πόρων μέσα στους οποίους βρίσκεται. Αυτός ο μηχανισμός παραγωγής συμβάλλει σε μικρό βαθμό στην

παραγωγή σε σύγκριση με τους παραπάνω όταν η συμπιεστότητα του πετρώματος έχει σημαντικά κατώτερη τιμή από τη συμπιεστότητα των ρευστών.

1.5.5 *Σύνθετος Κινητήριο Μηχανισμός Παραγωγής*

Όταν ένας ταμειυτήρας παράγει κάτω από την επίδραση περισσότερων του ενός κινητήριων μηχανισμών παραγωγής τότε αναφέρεται ότι παράγει με τη βοήθεια σύνθετου μηχανισμού παραγωγής. Σημειωτέον, ότι η συμβολή του κάθε μηχανισμού στην παραγωγή δεν παραμένει σταθερή αλλά μεταβάλλεται με τον χρόνο.

Εάν πολλοί κινητήριοι μηχανισμοί συμβάλλουν συγχρόνως στην παραγωγή, τότε η ολική απόδοση του ταμειυτήρα θα εξαρτηθεί κυρίως από την επιλογή των θέσεων των φρεατίων παραγωγής και του ρυθμού παραγωγής από το καθένα. Συγκεκριμένα, αν ένας ταμειυτήρας παράγει υπό τη συνδυασμένη επίδραση των μηχανισμών υπερκείμενης ζώνης αερίου και υποκείμενου υδροφόρου ταμειυτήρα, τότε εύλογα θα αναμένεται η απόδοση του ταμειυτήρα να είναι σημαντικά διαφορετική αν τα φρεάτια παραγωγής διαπερνούν το σχηματισμό στο κατώτερο τμήμα του ή στο ανώτερο τμήμα του ή και στην ιδανική περίπτωση εάν οι διατρήσεις βρίσκονται μεταξύ των διεπιφανειών νερού/πετρελαίου και αερίου/πετρελαίου. Γενικά, συνιστάται η χρήση μοντέλων προσομοίωσης ταμειυτήρα στις περιπτώσεις σύνθετου κινητήριου μηχανισμού παραγωγής ώστε να μελετηθεί με ακρίβεια η συμπεριφορά του σχηματισμού.

1.6 **Υπολογιστικά μοντέλα προσομοίωσης ταμειυτήρων**

Για να πραγματοποιηθεί μια πλήρης μελέτη ενός κοιτάσματος υδρογονανθράκων, έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι προσομοίωσης ταμειυτήρων. Ως προσομοίωση ταμειυτήρων πετρελαίου ορίζεται η διαδικασία που συνδυάζει τη φυσική, τα μαθηματικά, τη μηχανική ταμειυτήρων και τις γεωεπιστήμες με σκοπό την ανάπτυξη μοντέλων πρόβλεψης της ροής και της συμπεριφοράς φάσεων των ρευστών. Η βιομηχανία πετρελαίου τα τελευταία χρόνια χρησιμοποιεί

υπολογιστικά μοντέλα προσομοίωσης προκειμένου να καταστήσει όσο το δυνατό πιο αποδοτική την εκμετάλλευση των υπόγειων ταμιευτήρων υδρογονανθράκων ελέγχοντας διάφορα σενάρια παραγωγής. Απώτερος στόχος της προσομοίωσης ταμιευτήρα είναι ο προσδιορισμός όλων των απαραίτητων μεγεθών τα οποία επιτρέπουν τον υπολογισμό των αποθεμάτων καθώς και την αξιολόγηση του καθώς και των μηχανισμών με τον οποίο παράγει ένας ταμιευτήρας.

Η πιο διαδεδομένη ίσως προσέγγιση της προσομοίωσης και της εκτίμησης της απόδοσης ταμιευτήρων αλλά και η ευχερέστερη δοκιμή διαφορετικών σεναρίων παραγωγής, επιτυγχάνεται με τη μέθοδο που χρησιμοποιεί τα ισοζύγια μάζας (material balance equation). Όπως θα αναλυθεί και στο επόμενο κεφάλαιο η συγκεκριμένη μέθοδος αποτελεί τη βάση της Μηχανικής Ταμιευτήρων και μορφές αυτής εμπεριέχονται σχεδόν σε όλους τους τομείς της. Η μέθοδος αυτή αποτελεί το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, και για αυτό τον λόγο θα αναλυθεί λεπτομερώς στη συνέχεια. Τέλος, παρακάτω γίνεται μια ανάλυση της μεθόδου προσομοίωσης ταμιευτήρων (reservoir simulation) καθώς σε συνδυασμό με την ΜΙΜ αποτελούν τα πιο βασικά εργαλεία της Μηχανικής ταμιευτήρων.

1.7 Προσομοίωση ταμιευτήρα

Τα μοντέλα προσομοίωσης αποτελούν την πλέον πολύπλοκη αλλά ολοκληρωμένη προσέγγιση για την περιγραφή των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα στο εσωτερικό του ταμιευτήρα καθώς και τον προσδιορισμό των παραγόμενων προϊόντων κατά τη διάρκεια της εκμετάλλευσής του.

Αρχικά, για την προσομοίωση ενός ταμιευτήρα^[4] απαιτείται η συλλογή ενός μεγάλου αριθμού δεδομένων από τις διάφορες φάσεις έρευνας, περιχάραξης (delineation) και ανάπτυξης (development) του κοιτάσματος υδρογονανθράκων προκειμένου να αναπτυχθεί το φυσικό μοντέλο του ταμιευτήρα. Συνεργάζονται επομένως Γεωλόγοι, Γεωφυσικοί, Γεωστατιστικοί, Μηχανικοί Πετρελαίου αλλά και άλλες ειδικότητες για να προσδιορίσουν τις ιδιότητες και τις ιδιομορφίες του σχηματισμού, και πιο συγκεκριμένα τις ιδιότητες των ρευστών και του πορώδους

μέσου. Μέσω αυτής της διαδικασίας θα προκύψουν σημαντικές πληροφορίες σχετικά με τις φυσικές ιδιότητες που χαρακτηρίζουν τα πετρελαιοφόρα στρώματα όπως το πορώδες, η διαπερατότητα και ο βαθμός κορεσμού σε υδρογονάνθρακες. Επιπλέον, θα προσδιοριστεί η γεωμετρία και η λιθολογική σύσταση του ταμιευτήρα καθώς και η σύσταση του ρευστού. Για την πληρέστερη μελέτη της δομής των υπόγειων σχηματισμών και της σύστασης του ρευστού, εκτός από τις σημειακές τιμές των παραπάνω μεγεθών, προσδιορίζονται και οι κατανομές τους στον χώρο. Εφόσον προσδιοριστούν τα μεγέθη αυτά και αναπτυχθεί το φυσικό μοντέλο, στη συνέχεια διατυπώνεται με εξισώσεις το μαθηματικό μοντέλο και μοντελοποιούνται η ροή και οι φυσικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα. Επίσης, τα δεδομένα παραγωγής του ταμιευτήρα υδρογονανθράκων, που συλλέγονται σε κάθε στάδιο της εκμετάλλευσης του, θα χρησιμοποιηθούν για την υποστήριξη μεταγενέστερων υπολογισμών και διόρθωση προηγούμενων. Γενικά, για την ανάπτυξη ενός μοντέλου προσομοίωσης συνδυάζονται όλα τα αρχικά διαθέσιμα δεδομένα τα οποία στη συνέχεια ενημερώνονται κατά τη διάρκεια της εκμετάλλευσης προκειμένου το μοντέλο, και επομένως οι προβλέψεις του, να βελτιωθούν.

Οι θεμελιώδεις αρχές που διέπουν τη διαδικασία παραγωγής^[5] είναι η αρχή διατήρησης της μάζας και της ενέργειας καθώς και η αρχή διατήρησης της ορμής η οποία εκφράζεται μέσα από το νόμο που διέπει τη ροή ρευστών μέσα σε πορώδες μέσο (Νόμος του Darcy). Επιπρόσθετα, λόγω του γεγονότος ότι οι φάσεις του ρευστού ενός ταμιευτήρα βρίσκονται πάντοτε σε θερμοδυναμική ισορροπία, ικανοποιείται και η ισορροπία φάσεων η οποία εισάγεται στους υπολογισμούς μέσω της χρήσης των ογκομετρικών συντελεστών σχηματισμού των ρευστών του ταμιευτήρα (B_o , B_g , B_w). Σημειώνεται ότι η αρχή διατήρησης της ενέργειας βρίσκει εφαρμογή μόνο όταν κατά τη διάρκεια της εκμετάλλευσης λαμβάνουν χώρα θερμικά φαινόμενα. Επίσης, συνήθως λόγω του αργού ρυθμού μετακίνησης των ρευστών μέσα στον ταμιευτήρα, θεωρείται ότι σε κάθε σημείο και κάθε χρονική στιγμή επικρατούν συνθήκες θερμοδυναμικής ισορροπίας. Η αρχή διατήρησης της μάζας και της ενέργειας, όπως και ο νόμος του Darcy, διέπονται από ισχυρά μη γραμμικές διαφορικές εξισώσεις ενώ

και η θερμοδυναμική ισορροπία διέπεται από ισχυρά συστήματα μη γραμμικών αλγεβρικών εξισώσεων.

Στόχος της προσομοίωσης ταμιευτήρων είναι η επίλυση των παραπάνω εξισώσεων και ο προσδιορισμός της πίεσης, του κορεσμού και των συστάσεων των φάσεων σε κάθε σημείο του ταμιευτήρα και σε κάθε χρονική στιγμή κατά τη διάρκεια της παραγωγής. Ωστόσο, η αναλυτική προσέγγιση ενός τέτοιου προβλήματος, η επίλυση δηλαδή των διαφορικών εξισώσεων και των συστημάτων μη γραμμικών εξισώσεων, μπορεί να επιτευχθεί μόνο υπό αυστηρές προϋποθέσεις (π.χ. ασυμπίεστο, ισοθερμοκρασιακό και μονοφασικό ρευστό). Επομένως, η δυσκολία επίλυσης τόσο σύνθετων μαθηματικών προβλημάτων καθιστούν την προσομοίωση ταμιευτήρων ως μια εξαιρετικά δύσκολη και επίπονη διαδικασία η οποία μπορεί να αντιμετωπιστεί μόνο με τη χρήση αριθμητικών μεθόδων. Αναπτύχθηκαν διάφορα εργαλεία προσέγγισης των ζητούμενων τιμών, όπου η βασική αρχή πάνω στην οποία στηρίζεται κάθε τέτοια προσέγγιση είναι η διακριτοποίηση^[6] του συνεχούς του ταμιευτήρα σε στοιχειώδη τμήματα (σύνολα διακεκριμένων τιμών) τα οποία ονομάζονται κελιά (cells ή grid blocks). Η διακριτοποίηση αναφέρεται τόσο ως προς το χώρο όσο και ως προς το χρόνο. Κατά αυτό τον τρόπο προσδιορίζονται οι σημειακές τιμές των μεγεθών σε κάθε σημείο χώρου και χρόνου. Ο ταμιευτήρας διαχωρίζεται σε ένα μεγάλο αριθμό κελιών, ή διαφορετικά σε ένα μεγάλο αριθμό τμημάτων χώρου και χρόνου, όπου κάθε κελί του ταμιευτήρα συμπεριφέρεται σαν μια δεξαμενή (tank model) με ενιαία πίεση και θερμοκρασία ρευστών καθώς και σύσταση των επιμέρους φάσεων για κάθε συγκεκριμένη χρονική στιγμή και κατά την ροή του ρευστού επικοινωνεί με όλα τα γειτονικά κελιά μεταφέροντας μάζα και ενέργεια. Υπό αυτή την προϋπόθεση, η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών επιτρέπει τη μετατροπή των διαφορικών εξισώσεων, που διέπουν ένα συνεχές πρόβλημα, σε αλγεβρικές καθιστώντας έτσι δυνατή την αντιμετώπιση ενός συνεχούς ταμιευτήρα σαν διακριτό.

Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να ορίσει ίδιες ή διαφορετικές διαστάσεις σε κάθε στοιχειώδες τμήμα – κελί, υποδηλώνοντας επομένως έμμεσα τις περιοχές του ταμιευτήρα τις οποίες επιθυμεί να μελετήσει λιγότερο ή περισσότερο. Γενικά, η

ακρίβεια της προσεγγιστικής λύσης εξαρτάται από τα μεγέθη του βήματος τόσο στο χώρο όσο και στο χρόνο. Επίσης, μπορεί ο χρήστης να ορίσει και τη γεωμετρία την οποία επιθυμεί να έχει το κάθε κελί. Με τη χρήση του μοντέλου προσομοίωσης μπορεί να προβλεφθεί η απόδοση του ταμιευτήρα κάτω από διαφορετικά σενάρια παραγωγής προκειμένου να επιλεγεί το βέλτιστο. Τα σενάρια τα οποία ελέγχονται μέσω της προσομοίωσης μπορεί να περιλαμβάνουν διαφορετικές θέσεις διατρήσεων (perforations) και γεωτρήσεων, έλεγχο του ρυθμού παραγωγής καθώς και εφαρμογή μηχανισμών δευτερογενούς ή τριτογενούς παραγωγής. Υπάρχουν σήμερα διάφοροι τύποι προσομοίωσης ταμιευτήρων που εφαρμόζονται στο χώρο του πετρελαίου και οι οποίοι διακρίνονται ως προς τις παραδοχές που ο καθένας δέχεται (Black Oil, Compositional, Thermal models) καθώς και ως προς τις διαστάσεις υπό τις οποίες πραγματοποιείται η μοντελοποίηση (μονοδιάστατη, δισδιάστατη, τρισδιάστατη).

1.7.1 *Είδη Μοντέλων Προσομοίωσης Ταμιευτήρων*

Όταν το περιεχόμενο ρευστό του ταμιευτήρα είναι πετρέλαιο χαμηλής ή μέσης πτητικότητας, το πρόβλημα της ισορροπίας φάσεων δεν επιλύεται αριθμητικά αλλά συχνά χρησιμοποιούνται τα λεγόμενα Black Oil Tables. Τα Black Oil Tables περιέχουν τις τιμές του Ογκομετρικού Συντελεστή Σχηματισμού Υγρής Φάσης (Oil Formation Volume Factor, B_o), του λόγου αερίου εν διαλύσει/πετρελαίου (solution Gas-Oil ratio, R_s) και του Ογκομετρικού Συντελεστή Σχηματισμού Αέριας Φάσης (Gas Formation Volume Factor, B_g) από πίνακες, συναρτήσεως της πίεσης. Η προσομοίωση αυτή δεν λαμβάνει υπ' όψει την ολοένα μεταβαλλόμενη σύσταση κάθε φάσης σε κάθε στοιχειώδες τμήμα (κελί) του ταμιευτήρα αλλά τις τιμές των ογκομετρικών συντελεστών σχηματισμού σε αυτό για κάθε τιμή της πίεσης οι οποίοι έχουν υπολογιστεί είτε πειραματικά (PVT) είτε με την χρήση EoS μοντέλων του ρευστού. Επίσης, σε αυτή την κατηγορία μοντέλων προσομοίωσης θεωρείται ότι το ρευστό του ταμιευτήρα αποτελείται από δύο μόνο ψευδοσυστατικά (pseudo-components) εκ των οποίων το ένα είναι το πετρέλαιο του τανκ και το άλλο το αέριο που παράγεται στην επιφάνεια. Τέλος, η διαδικασία αυτή είναι γνωστή και ως προσομοίωση ισορροπίας φάσεων 'look-up table'.

Σε πολλές περιπτώσεις πετρελαίων με χαμηλό σημείο φυσαλίδας, P_b , είναι αποδεκτό να υποθέσουμε ότι η διαλυτότητα του αερίου στο υγρό εξαρτάται μόνο από την πίεση του σχηματισμού. Ωστόσο, όταν η πίεση του ταμιευτήρα είναι χαμηλότερη από την πίεση φυσαλίδας του εκάστοτε ρευστού, απαιτείται μια πληρέστερη περιγραφή του ρευστού η οποία περιλαμβάνει ένα μεγαλύτερο αριθμό συστατικών και κατάλληλες καταστατικές εξισώσεις (Equations of State, EoS), δεδομένου ότι σε πολλές περιπτώσεις τέτοιων κοιτασμάτων υδρογονανθράκων η μαθηματική ανάμειξη των δυο ψευδοσυστατικών προκαλεί μεγάλες αποκλίσεις από τη πραγματική σύσταση του ρευστού στις συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας του ταμιευτήρα. Χρησιμοποιούνται επομένως μοντέλα σύστασης (compositional models), τα οποία λαμβάνουν υπ' όψη την πιθανή αλλαγή φάσης και σύστασης κάθε ρευστού κατά τη διάρκεια της εκμετάλλευσης του ταμιευτήρα. Τα μοντέλα σύστασης χρησιμοποιούνται κυρίως σε υψηλής πτητικότητας ταμιευτήρες, διότι παρόλο που χρειάζονται περισσότερο χρόνο στην ανάπτυξη τους και αποτελούν σύνθετα μοντέλα, ωστόσο τα αποτελέσματα που δίνουν είναι αξιόπιστα καθώς υπολογίζουν όχι μόνο τις τιμές των ιδιοτήτων του ρευστού αλλά και εκ νέου την σύσταση του ρευστού καθ' όλη την διάρκεια της προσομοίωσης.

Όταν το πετρέλαιο του σχηματισμού είναι βαρύ (heavy oil) και η άντληση του στην επιφάνεια αποτελεί δύσκολη διαδικασία, πραγματοποιείται συχνά θέρμανση του ρευστού (π.χ εισπίεση ατμού) έτσι ώστε να βελτιωθούν οι ρεολογικές ιδιότητες του. Παρόλο που στις περισσότερες περιπτώσεις η θερμοκρασία του ταμιευτήρα καθ' όλη τη διάρκεια της εκμετάλλευσης θεωρείται σταθερή, ωστόσο πολλές φορές λόγω της μεγάλης θερμοχωρητικότητας τόσο των πετρωμάτων του ταμιευτήρα όσο και των υπερκείμενων πετρωμάτων, είναι δυνατόν η θερμοκρασία του σχηματισμού, και κατ' επέκταση του ρευστού, να μεταβληθεί. Επομένως, χρησιμοποιούνται μοντέλα προσομοίωσης, τα οποία ονομάζονται θερμικά μοντέλα (thermal models), τα οποία εισαγάγουν εξισώσεις ενέργειας στους υπολογισμούς της προσομοίωσης και τη θερμοκρασία σαν μεταβλητή στις εξισώσεις που διέπουν τη συμπεριφορά των ρευστών και του πορώδους μέσου κατά τη διάρκεια της εκμετάλλευσης για να

μοντελοποιηθούν οι επιδράσεις που προκαλούνται στον ταμιευτήρα εξαιτίας της αύξησης της θερμοκρασίας του.

1.7.2 Διαστάσεις Μοντέλων Προσομοίωσης

Υπάρχουν μονοδιάστατα (1-D), δισδιάστατά (2-D) και τρισδιάστατα (3-D) μοντέλα προσομοίωσης καθένα από τα οποία εφαρμόζεται σύμφωνα με το πρόβλημα που επιθυμείται να μοντελοποιηθεί. Γενικά, τα μονοδιάστατα και δισδιάστατα μοντέλα εφαρμόζονται σε ειδικές μόνο περιπτώσεις ενώ τα τρισδιάστατα μοντέλα εφαρμόζονται όταν επιθυμείται μία πλήρης και ολοκληρωμένη μοντελοποίηση της διαδικασίας παραγωγής ενός ταμιευτήρα υδρογονανθράκων.

Συγκεκριμένα, όταν ο χρήστης θεωρεί πως η γραμμική ροή του ρευστού διαμέσω του πορώδους μέσου, η οποία πραγματοποιείται ως προς μία μόνο κατεύθυνση είναι το κυρίαρχο είδος της ροής που λαμβάνει χώρα, τότε μπορεί να μοντελοποιηθεί ως μονοδιάστατη (1-D). Για παράδειγμα, μονοδιάστατα μοντέλα προσομοίωσης χρησιμοποιούνται για την εύρεση της ελάχιστης πίεσης αναμειξιμότητας του πετρελαίου και του διοξειδίου του άνθρακα, δεδομένου ότι συχνά πραγματοποιείται εισπίεση διοξειδίου του άνθρακα σε ταμιευτήρες υδρογονανθράκων.

Αν ο χρήστης θεωρεί ότι η κυρίαρχη ροή ρευστού είναι στο οριζόντιο και κατακόρυφο επίπεδο, σε αυτή την περίπτωση η ροή του ρευστού μπορεί να μοντελοποιηθεί ως δισδιάστατη (2-D) (cross sectional simulation). Για παράδειγμα, δισδιάστατα μοντέλα προσομοίωσης χρησιμοποιούνται όταν επιθυμείται να προσδιοριστεί η διαπερατότητα του σχηματισμού μεταξύ δύο γεωτρήσεων κατά μήκος μιας συγκεκριμένης διεύθυνσης ενώ συγχρόνως η δεύτερη συνιστώσα της διαπερατότητας δεν μπορεί να αγνοηθεί. Παρόλα αυτά η τρίτη συνιστώσα, δηλαδή η κατακόρυφη διαπερατότητα δεν λαμβάνεται υπ' όψιν με αποτέλεσμα να μην είναι δυνατόν να ληφθούν υπ' όψιν φαινόμενα όπως αυτό του διαχωρισμού των φάσεων λόγω της βαρύτητας (gravity segregation).

Ωστόσο, όταν ο χρήστης επιθυμεί τη μοντελοποίηση της διαδικασίας παραγωγής ενός ταμιευτήρα σε πλήρη κλίμακα τότε η ροή πρέπει να μοντελοποιηθεί ως τρισδιάστατη (3-D), δηλαδή να ληφθεί υπόψη η ροή και ως προς τις τρεις συνιστώσες (x-οριζόντια, z-κατακόρυφη, y-οριζόντια).

1.8 Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η εφαρμογή μαθηματικών μοντέλων προσομοίωσης του ταμιευτήρα 'X' με τη μεθόδου ισοζυγίου μάζας (MIM) με τη χρήση του προγράμματος MBAL της εταιρίας Petroleum Experts (PetEx). Σκοπός των συγκεκριμένων μοντέλων είναι η αξιολόγηση της αποδοτικότητας ενός κοιτάσματος πετρελαίου της Ανατολικής Μεσογείου, η πρόβλεψη δηλαδή της παραγωγής του σε ρευστά για διάφορα σενάρια παραγωγής, προκειμένου να γίνει μια πρώτη προσέγγιση του δυναμικού του. Σημειωτέον ότι ο συγκεκριμένος ταμιευτήρας αποτελεί μια καινούρια ανακάλυψη και ούτε έχει ολοκληρωθεί η έρευνα ούτε έχουν ακόμα αναπτυχθεί τα σχέδια εκμετάλλευσης του. Για τον παραπάνω λόγο θα μελετηθούν διάφορα σενάρια παραγωγής, ούτως ώστε να αξιολογηθεί το δυναμικό του τόσο για τη δυσμενέστερη όσο και για την πιο ελπιδοφόρα περίπτωση.

Αναλυτικότερα, υλοποιούνται τρία σενάρια με κυρίαρχη διαφορά τον αρχικό όγκο του πετρελαίου (STOIIP) που υπολογίζεται πως πληροί τους πόρους του ταμιευτήρα. Την τιμή του συγκεκριμένου μεγέθους τη λαμβάνουμε από γεωλογικές και γεωφυσικές μελέτες. Στη συνέχεια, σε κάθε ένα σενάριο εισάγεται ένα μοντέλο υδροφορέα και γίνεται μια ανάλυση ευαισθησίας ως προς τον πιθανολογούμενο όγκο του δεύτερου. Πιο συγκεκριμένα, εξετάζεται το κατά πόσο επηρεάζεται η παραγωγικότητα του ταμιευτήρα στην περίπτωση που ο όγκος του υδροφόρου είναι 10 φορές μεγαλύτερος από αυτόν του ταμιευτήρα υδρογονανθράκων και στην περίπτωση που ο όγκος του πρώτου είναι 100 φορές μεγαλύτερος από αυτόν του δεύτερου. Τέλος, μια ακόμα παράμετρος της οποίας η επίδραση πρόκειται να

υπολογιστεί είναι αυτή του συντελεστή παραγωγικότητας των γεωτρήσεων, της ικανότητας τους δηλαδή να άγουν τα ρευστά από τον ταμειευτήρα στην επιφάνεια.

Κεφάλαιο 2

Μέθοδος Ισοζυγίου Μάζας

2.1 Εισαγωγή

Η προσομοίωση ταμιευτήρων πετρελαίου αποσκοπεί στον προσδιορισμό όλων των απαραίτητων μεγεθών τα οποία επιτρέπουν την αξιολόγηση της παραγωγής ενός ταμιευτήρα καθώς και την πρόβλεψη της μελλοντικής του απόδοσης. Συγκεκριμένα, μεταξύ άλλων, θα πρέπει να προσδιοριστεί η μεταβολή της πίεσης με το χρόνο και ο αριθμός και ο κορεσμός των φάσεων σε κάθε σημείο του ταμιευτήρα για κάθε χρονική στιγμή. Επίσης, σε ό,τι αφορά την επιφάνεια, θα πρέπει να προσδιοριστεί η παροχή και η πυκνότητα κάθε φάσης (υγρή, αέρια και νερό) που παράγεται, κλπ.

Τη σημερινή εποχή, λόγω της ραγδαίας εξέλιξης των υπολογιστικών συστημάτων είναι ολοένα και πιο σύνηθες να γίνεται μοντελοποίηση των κοιτασμάτων με τη χρήση πολύπλοκων προγραμμάτων όπως είναι οι προσομοιωτές ταμιευτήρων (numerical simulation modelling). Παρόλα αυτά, η χρήση προσομοιωτών κρίνεται ως επισφαλής, ιδιαίτερα στα πρώτα χρόνια εκμετάλλευσης των κοιτασμάτων, καθώς για να δημιουργηθεί ένα αξιόπιστο μοντέλο το οποίο θα είναι σε θέση να περιγράψει επαρκώς ένα σύστημα υδρογονανθράκων-πορώδους μέσου με τη χρήση των συγκεκριμένων λογισμικών, ο όγκος των δεδομένων που απαιτείται να έχουν συλλεχθεί είναι ιδιαίτερα μεγάλος. Επιπλέον, επειδή οι μαθηματικές σχέσεις που χρησιμοποιούνται σε αυτού του είδους τα προγράμματα είναι σύνθετες, οι οποίες εμπεριέχουν πληθώρα παραμέτρων για τις τιμές των οποίων υπάρχουν μόνο αβέβαιες εκτιμήσεις στα πρώτα στάδια μιας εκμετάλλευσης. Ακόμη, αποτελεί συνήθη τακτική οι χρήστες του λογισμικού να δίνουν τιμές στις παραμέτρους εκτός των φυσιολογικά αναμενομένων ορίων προκειμένου να πάρουν τα επιθυμητά αποτελέσματα. Τέλος, τα συγκεκριμένα προγράμματα δεν είναι σε θέση να προβλέψουν τα αποθέματα όπως η μέθοδος ισοζυγίου μάζας (MIM).

Σε αντίθεση με τα παραπάνω, η Μέθοδος Ισοζυγίου Μάζας (MIM), αν και αποτελεί ένα πολύ απλό εργαλείο προσομοίωσης^[7], αποτελεί μία μέθοδο μέσω της οποίας είναι δυνατός ο προσδιορισμός του μηχανισμού παραγωγής του κοιτάσματος όπως επίσης και του όγκου των υδρογονανθράκων (STOIIP) που πληρούν τους πόρους του ταμιευτήρα με σημαντική ακρίβεια. Η Μέθοδος Ισοζυγίου Μάζας βασίζεται στην Εξίσωση Ισοζυγίου Μάζας (EIM) η οποία εκφράζει απλά την αρχή

διατήρησης μάζας κατά τη διάρκεια της ζωής ενός ταμειευτήρα. Η απλότητα της MIM έγκειται στο γεγονός ότι για την εφαρμογή της ο όγκος των δεδομένων που απαιτούνται είναι σαφώς μικρότερος από αυτόν που χρειάζονται οι προσομοιωτές, όπως επίσης και στο γεγονός ότι αποτελεί, όπως θα αναπτυχθεί και στη συνέχεια του κεφαλαίου, μια απλή, όχι όμως υπερ-απλουστευμένη θεώρηση του συστήματος το οποίο καλείται να περιγράψει. Σημειώνεται, ότι με την πάροδο των ετών η MIM έχει πλέον εξελιχθεί έτσι ώστε πέρα των παραπάνω «αναγνωριστικών» στόχων να μπορεί να προβλέψει τη μελλοντική παραγωγή του ταμειευτήρα. Επομένως, σε αντίθεση με την κλασική εφαρμογή της όπου τα δεδομένα παραγωγής χρησιμοποιούνται προκειμένου να αναγνωρισθεί ο μηχανισμός παραγωγής, η MIM μπορεί να συνδυάσει την EIM με το νόμο ροής σε πορώδες μέσο του Darcy προκειμένου να προβλέψει την παραγωγή των τριών φάσεων ως συνάρτηση των παραμέτρων του συστήματος. Τέλος, η ακρίβεια των προβλέψεων της μπορεί να βελτιωθεί εφόσον αυτές συνδυαστούν με τη δυνατότητα ρύθμισης-αριστοποίησης των τιμών των εμπλεκόμενων παραμέτρων, μια διαδικασία γνωστή ως «history matching».

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι, όπως αναφέρεται και από τον L. Dake, “δεν πρέπει να υπάρχει ανταγωνισμός μεταξύ της MIM και των προσομοιωτών, αντιθέτως θα πρέπει η μια μέθοδος να υποστηρίζει την άλλη, η MIM δηλαδή να αναγνωρίζει τους μηχανισμούς του συστήματος και τα αποτελέσματα αυτής να είναι τα δεδομένα εισόδου των προσομοιωτών”^[8].

Στις επόμενες παραγράφους θα παρουσιαστεί η ανάπτυξη της Εξίσωσης Ισοζυγίου Μάζας και θα περιγραφούν οι τρεις επιμέρους τρόποι εφαρμογής της στη μέθοδο MIM, αυτός της αναγνώρισης του μηχανισμού παραγωγής, της πρόβλεψης της μελλοντικής παραγωγής καθώς και της ρύθμισης των παραμέτρων της εξίσωσης.

2.2 Ανάπτυξη της Εξίσωσης Ισοζυγίου Μάζας (EIM)

Η Εξίσωση Ισοζυγίου Μάζας λαμβάνει υπ’ όψιν τα δεδομένα παραγωγής που έχουν συλλεγεί κατά τη διάρκεια κάποιας προγενέστερης χρονικής περιόδου κατά την οποία το κοίτασμα παρήγαγε, ορισμένες ιδιότητες του πορώδους μέσου καθώς

και τις θερμοδυναμικές (PVT) ιδιότητες των ρευστών που φιλοξενούνται στο κοίτασμα. Με χρήση των παραπάνω στοιχείων, η μέθοδος είναι σε θέση να:

- προσδιορίσει τους περιεχόμενους υδρογονάνθρακες στον ταμιευτήρα στις συνθήκες που επικρατούν σε αυτόν (Original Oil in Place, OOIP),
- προσδιορίσει τον ή τους μηχανισμό παραγωγής ο οποίος λαμβάνει χώρα στον ταμιευτήρα και
- να προβλέψει το προφίλ παραγωγής, δηλαδή τις παραγόμενες ποσότητες ρευστών συναρτήσει της φθίνουσας πίεσης ή του χρόνου για διαφορετικά σενάρια παραγωγής

Για την ανάπτυξη της εξίσωσης ισοζυγίου μάζας ο ταμιευτήρας αντιμετωπίζεται σαν μία δεξαμενή (tank model) και κατά συνέπεια δεν πραγματοποιείται διακριτοποίηση του χώρου καθώς αυτός αντιμετωπίζεται ως ένα σημείο. Εφόσον ο ταμιευτήρας εννοείται σαν μια μοναδική διακριτή χωρική μονάδα μηδενικής διάστασης, γίνεται η θεώρηση ότι η πίεση σε όλη την έκταση του, κάθε χρονική στιγμή, είναι ίση με τη μέση πίεση που επικρατεί την ίδια στιγμή στον ταμιευτήρα. Σημειώνεται, πως η υπόθεση αυτή δεν είναι απόλυτα ρεαλιστική, καθώς είναι γεγονός πως η παραγωγή και η ροή ρευστού είναι αποτέλεσμα διαφορών πίεσης ανάμεσα στις διάφορες περιοχές του ταμιευτήρα. Ωστόσο, έχει αποδειχθεί στην πράξη πως αν τα καταγεγραμμένα δεδομένα των μέσων πιέσεων και των παραχθέντων όγκων είναι ακριβή, η παραπάνω μέθοδος, παρά την απλουστευτική αυτή θεώρηση, μπορεί να προβλέψει με σχετικά καλή ακρίβεια τη συμπεριφορά του ταμιευτήρα και να διαγνώσει τον κυρίαρχο μηχανισμό παραγωγής.

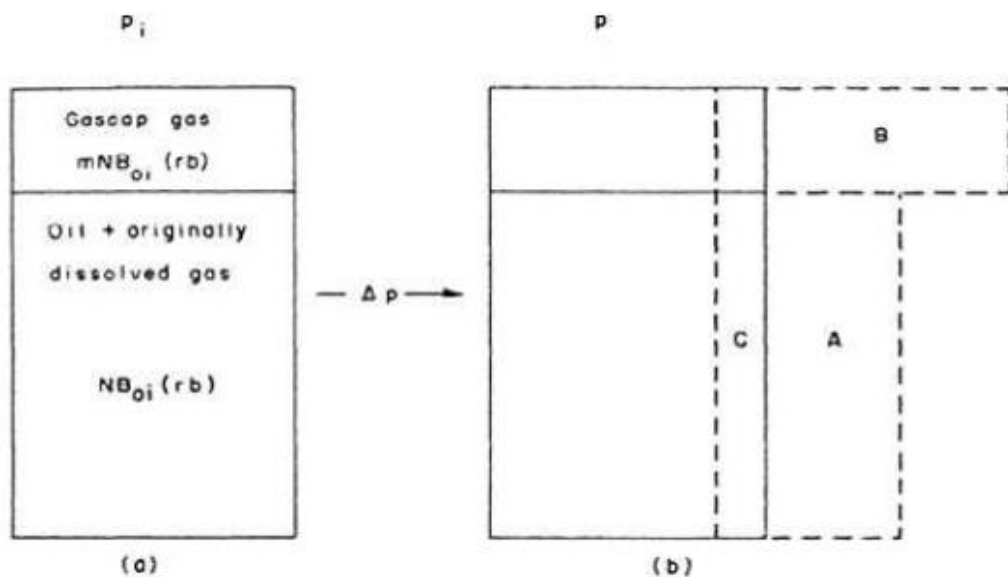
Η εξίσωση του ισοζυγίου μάζας αποτελεί μαθηματική έκφραση της αρχής διατήρησης της μάζας των τριών φάσεων (αερίου, πετρελαίου και νερού) που συνυπάρχουν, στην πλέον σύνθετη περίπτωση, σε ένα κοίτασμα. Παρουσιάζεται υπό μορφή ογκομετρικού ισοζυγίου καθώς τα μετρούμενα μεγέθη στην πράξη είναι όγκοι ρευστών. Στη γενική του περίπτωση το ισοζύγιο πρέπει να μπορεί να καλύπτει όλες τις φάσεις ρευστών και της κατανομής τους ανά πάσα χρονική στιγμή και πιο συγκεκριμένα το ελεύθερο αέριο (gas cap), το πετρέλαιο και το νερό στη ζώνη του

πετρελαίου και νερό στη ζώνη του νερού (aquifer). Συγκεκριμένα, όταν παράγονται ρευστά (πετρέλαιο, αέριο και νερό) από έναν ταμιευτήρα πετρελαίου, ο οποίος μπορεί να διαθέτει ή όχι υπερκείμενη ζώνη αερίου και με ή χωρίς την ύπαρξη εισροής νερού από έναν υποκείμενο υδροφόρο, η πίεση του ταμιευτήρα θα φθίνει. Σαν αποτέλεσμα της πτώσης της πίεσης, μια σειρά φαινομένων συμβαίνουν στον ταμιευτήρα, όπως για παράδειγμα:

- το πετρέλαιο θα εκτονωθεί
- η μάζα του πετρελαίου, εάν αυτό είναι ήδη κορεσμένο, θα ελαττωθεί λόγω του ότι όλο και περισσότερο αέριο θα απελευθερώνεται από αυτό
- το ελεύθερο αέριο, εάν υπάρχει, θα εκτονωθεί
- το νερό, το οποίο πληροί τους πόρους του ταμιευτήρα, λόγω της συμπιεστότητάς του θα διογκωθεί με αποτέλεσμα να απομακρύνει (εκτοπίσει) το πετρέλαιο
- νερό από τον υποκείμενο υδροφόρο ορίζοντα νερού (εάν υπάρχει), μπορεί να ξεκινήσει να ρέει μέσα στον ταμιευτήρα υδρογονανθράκων, εκτοπίζοντας το πετρέλαιο και δημιουργώντας ενδεχομένως το φαινόμενο του κώνου (water coning effect)
- ο όγκος των πόρων του να μειωθεί λόγω της συμπιεστότητας του πετρώματος

Η εξίσωση του ισοζυγίου μάζας λαμβάνει υπόψιν όλα τα παραπάνω ενδεχόμενα προκειμένου να εκφράσει την αρχή διατήρησης της μάζας των φάσεων (υγρό, αέριο και νερό) που συνυπάρχουν σε ένα κοίτασμα. Συγκεκριμένα, η εξίσωση υπαγορεύει ότι η ποσότητα ρευστών που παραμένουν στον ταμιευτήρα, μετά από την πτώση της πίεσης κατά ΔP , ισούται με τη συνολική ποσότητα ρευστών που υπήρχαν σε αυτόν τη στιγμή της έναρξης, όπως και επίσης εκείνων που εισήλθαν στο κοίτασμα λόγω έγχυσης ή φυσικής εισροής νερού ή λόγω έγχυσης αερίου αφαιρουμένων των παραγόμενων στην επιφάνεια ρευστών. Δεδομένου ότι οι ποσότητες αυτές μετρούνται στην πράξη με όγκους και όχι με μάζες, η εξίσωση ισοζυγίου μάζας παρουσιάζεται συνήθως υπό μορφή ογκομετρικού ισοζυγίου.

Πιο συγκεκριμένα, η γενική αρχή στην οποία στηρίζεται η ΕΙΜ παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.1. Έστω, στη γενικότερη περίπτωση, ένας ταμιευτήρας πετρελαίου με υπερκείμενη ζώνη αερίου και υποκείμενο υδροφόρο ορίζοντα. Το Σχήμα 2.1 δίνει μια σχηματική παράσταση ενός τέτοιου ταμιευτήρα στις αρχικές συνθήκες πίεσης P_1 (Σχ.2.1α) καθώς και αφότου η πίεση του έχει υποστεί μείωση κατά ΔP σαν συνέπεια της παραγωγής φτάνοντας στην τιμή $P_2 = P_1 - \Delta P$ (Σχ.2.1β). Το σχήμα (β) αναπαριστά το αποτέλεσμα που θα επέλθει αν θεωρητικά επιτρεπόταν στην αρχική ποσότητα του ρευστού να εκτονωθεί στην πίεση P_2 , πέραν των ορίων του κοιτάσματος και στο μέτρο που επιβάλουν οι ογκομετρικοί συντελεστές του.



Σχήμα 2.1: Μεταβολές όγκων ταμιευτήρα καθώς η πίεση μεταβάλλεται^[9]

Ο όγκος A αντιστοιχεί στον επιπρόσθετο όγκο που καταλαμβάνει η υγρή φάση μαζί με το διαλελυμένο σε αυτή αέριο λόγω της εκτόνωσής της, ενώ ο όγκος B αντιστοιχεί στον επιπρόσθετο όγκο της αρχικής υπερκείμενης ζώνης αερίου που δημιουργείται με την εκτόνωσή της. Ο όγκος C εκφράζει τη μείωση του όγκου του πορώδους μέσου που διατίθεται για τους υδρογονάνθρακες (hydrocarbon pore volume, HCPV) λόγω της συνδυασμένης επίδρασης αφ' ενός μεν της εκτόνωσης του υφιστάμενου μη απομακρύνσιμου νερού (connate water) και αφετέρου της μείωσης

του διατιθέμενου όγκου του πορώδους (HCPV) για τους υδρογονάνθρακες λόγω της συμπιεστότητας του πετρώματος.

Αν οι μετρηθέντες όγκοι των ρευστών που παρήχθησαν στην επιφάνεια μεταξύ των πιέσεων P_1 και P_2 μετατραπούν, με τη χρήση των ογκομετρικών συντελεστών σχηματισμού τους, σε όγκους σε συνθήκες ταμιευτήρα στη χαμηλότερη πίεση P_2 τότε θα πρέπει να καταλαμβάνουν τον όγκο $A+B+C$. Επομένως, οι όγκοι A , B και C αντιστοιχούν στον όγκο των παραχθέντων ρευστών σε συνθήκες ταμιευτήρα. Αν δε εκφράσουμε το ισοζύγιο σε βαρέλια σε συνθήκες ταμιευτήρα (rb) τότε προκύπτει ότι:

$$S = \Delta V_o + \Delta V_{dg} + \Delta V_{fg} + \Delta(HCPV) + W_e B_w^{(2)} \quad (2.1)$$

όπου

S	Παραγόμενα προϊόντα στην επιφάνεια σε συνθήκες ταμιευτήρα (rb)
ΔV_o	Αύξηση όγκου του πετρελαίου του ταμιευτήρα (rb)
ΔV_{dg}	Όγκος αερίου που αρχικά βρισκόταν διαλελυμένο στην υγρή φάση και εν συνεχεία απελευθερώθηκε (rb)
ΔV_{fg}	Αύξηση όγκου της υπερκείμενης ζώνης αερίου (rb)
$\Delta(HCPV)$	Μείωση του HCPV οφειλόμενη στην εκτόνωση του μη απομακρύνσιμου νερού και της μείωσης του διατιθέμενου όγκου των πόρων λόγω μείωσης της επικρατούσας πίεσης (rb)
W_e	Καθαρή εισροή νερού στη ζώνη των υδρογονανθράκων (STB)
B_w	Ογκομετρικός συντελεστής σχηματισμού της υδάτινης φάσης

Σε ό,τι αφορά την εκτόνωση της υγρής φάσης ΔV_o , έστω N ο αρχικός όγκος του πετρελαίου που πληρούσε τους πόρους του ταμιευτήρα, μετρημένος σε συνθήκες επιφανείας. Τα N μετρημένα σε βαρέλια σε συνθήκες επιφανείας (STB) καταλαμβάνουν ένα χώρο $V_o^{(1)} = N \cdot B_o^{(1)}$ (rb) στον ταμιευτήρα υπό την αρχική πίεση

P_1 και έναν όγκο $V_o^{(2)} = N \cdot B_o^{(2)} (rb)$ στη χαμηλότερη πίεση P_2 , υποθέτοντας ότι η αρχική ποσότητα πετρελαίου δεν απομακρύνθηκε από τον ταμιευτήρα (λόγω παραγωγής) αλλά εκτονώθηκε. Επομένως, ο επιπρόσθετος όγκος της υγρής φάσης ισούται με:

$$\Delta V_o = V_o^{(2)} - V_o^{(1)} = N \cdot (B_o^{(2)} - B_o^{(1)}) (rb) \quad (2.2)$$

Εάν ο ταμιευτήρας είναι κορεσμένος, το πετρέλαιο είναι σε θερμοδυναμική ισορροπία με το υπερκείμενο αέριο (gas cap) και άρα κάθε μείωση της πίεσης θα προκαλέσει απελευθέρωση αερίου. Ο συνολικός όγκος αερίου που βρίσκεται διαλυμένο στην υγρή φάση στην αρχική πίεση P_1 είναι $V_{dg}^{(1)} = N \cdot R_s^{(1)} (scf)$ ενώ ο όγκος που παραμένει ακόμα εν διαλύσει μετά από τη μείωση της πίεσης σε P_2 είναι $V_{dg}^{(2)} = N \cdot R_s^{(2)} (scf)$. Επομένως, η διαφορά τους αποτελεί τον όγκο του αερίου που θα απελευθερωθεί, καθώς η πίεση μειώνεται από P_1 σε P_2 :

$$\Delta V_{dg} = V_{dg}^{(1)} - V_{dg}^{(2)} = N \cdot (R_s^{(1)} - R_s^{(2)}) \cdot B_g^{(2)} (rb) \quad (2.3)$$

Σε ό,τι αφορά την εκτόνωση της υπερκείμενης ζώνης αερίου, έστω m ο λόγος του αρχικού όγκου των πόρων που καταλαμβάνει το αέριο προς τον αρχικό όγκο των πόρων που καταλαμβάνει το πετρέλαιο σε συνθήκες ταμιευτήρα. Το m θεωρείται σταθερά καθώς ορίζεται στις αρχικές συνθήκες. Για την περίπτωση μονοφασικού ταμιευτήρα πετρελαίου $m = 0$. Ο ολικός αρχικός όγκος του αερίου που πληροί την υπερκείμενη του πετρελαίου ζώνη αερίου είναι $V_g^{(1)} = m \cdot N \cdot B_o^{(1)} (rb)$. Διορθώνοντας με το B_g , ο αρχικός όγκος του αερίου στον ταμιευτήρα $G^{(1)}$ μπορεί να εκφραστεί σε βαρέλια σε συνθήκες ταμιευτήρα (rb):

$$G^{(1)} = \frac{m \cdot N \cdot B_o^{(1)}}{B_g^{(1)}} (rb) \quad (2.4)$$

Στη νέα πίεση P_2 , η ποσότητα του αερίου θα καταλαμβάνει έναν όγκο σε συνθήκες ταμειυτήρα ίσο με $G^{(2)} = m \cdot N \cdot B_o^{(1)} \cdot B_g^{(2)} / B_g^{(1)} (rb)$. Επομένως, η διαφορά τους αποτελεί τη διόγκωση της υπερκείμενης ζώνης αερίου και υπολογίζεται από την:

$$\Delta V_{fg} = G^{(2)} - G^{(1)} = m \cdot N \cdot B_o^{(1)} \cdot \left(\frac{B_g^{(2)}}{B_g^{(1)}} - 1 \right) (rb) \quad (2.5)$$

Επιπρόσθετα, λαμβάνεται υπόψιν η πιθανή αλλαγή του όγκου των πόρων που καταλαμβάνεται από υδρογονάνθρακες στη νέα πίεση P_2 . Αυτή προκύπτει από το συνδυασμό δύο μεταβολών αντιθέτου φοράς. Αφ' ενός μίας αύξησης του όγκου του μη απομακρύνσιμου νερού λόγω της εκτόνωσης του και αφ' ετέρου μιας μείωσης του διατιθέμενου όγκου των πόρων για τους υδρογονάνθρακες λόγω της συστολής του πετρώματος ένεκα της συμπίεστότητάς του. Επομένως έχουμε:

$$\Delta(HCPV) = \Delta V_w + \Delta V_f \quad (2.6)$$

όπου V_f είναι ο ολικός όγκος των πόρων $V_f = HCPV / (1 - S_{wc})$, V_w είναι ο όγκος του μη απομακρύνσιμου νερού $V_w = V_f \cdot S_{wc}$, με S_{wc} τον υπολειμματικό βαθμό κορεσμού του ταμειυτήρα σε νερό. Η ολική μεταβολή επομένως του $HCPV$ δίδεται από τη σχέση:

$$\Delta(HCPV) = (c_w \cdot V_w + c_f \cdot V_f) \cdot \Delta P \quad (2.7)$$

Ο ολικός $HCPV$ συμπεριλαμβανομένης και της ζώνης αερίου ισούται με:

$$HCPV = (1 + m) \cdot N \cdot B_o^{(1)} (rb) \quad (2.8)$$

άρα η μείωσή του εκφράζεται ως:

$$-\Delta(HCPV) = (1 + m) \cdot N \cdot B_o^{(1)} \cdot \left(\frac{c_w \cdot S_{wc} + c_f}{1 - S_{wc}} \right) \cdot \Delta P \quad (2.9)$$

Σε ότι αφορά τη συμπιεστότητα του πετρώματος c_f , αυτή είναι συνάρτηση του πορώδους του και του κατά πόσον είναι συμπαγές. Έχει βρεθεί να κυμαίνεται μεταξύ $3 \cdot 10^{-6}$ έως και $10 \cdot 10^{-6} \text{ psi}^{-1}$. Η συμπιεστότητα του νερού c_w κυμαίνεται μέσα σε πιο στενά όρια μεταβολής και πιο συγκεκριμένα μεταξύ $3 \cdot 10^{-6}$ και $6 \cdot 10^{-6} \text{ psi}^{-1}$.

Τέλος, σε ότι αφορά τον όγκο των παραγόμενων προϊόντων, αυτός σε συνθήκες επιφανείας εκφράζεται ως:

$$S^{surface} = N_p + G_p + W_p \quad (2.10)$$

Ο όγκος των ίδιων προϊόντων σε συνθήκες ταμιευτήρα υπολογίζεται από την παραπάνω εξίσωση με χρήση των σχετικών ογκομετρικών συντελεστών

$$S = N_p \cdot B_o^{(2)} + G_p \cdot B_g^{(2)} + W_p \cdot B_w^{(2)} \quad (2.11)$$

Τέλος, εφόσον οι παραπάνω όροι αντικατασταθούν στη «λεκτική» της έκφραση, όπως αυτή αναπτύχθηκε προηγουμένως, προκύπτει η γενική μορφή της M.I.M, όπως αναλύεται παρακάτω και που συνδέει τα αποθέματα με τους παραχθέντες όγκους των ρευστών, με τις θερμοδυναμικές τους ιδιότητες και τις ιδιότητες του πετρώματος.

$$N = \frac{N_p \cdot B_o^{(2)} + B_g^{(2)} \cdot (G_p - N_p \cdot R_s^{(2)}) - G \cdot (B_g^{(2)} - B_g^{(1)}) - (W_e - W_p) \cdot B_w^{(2)}}{B_o^{(2)} - B_o^{(1)} + (R_s^{(1)} - R_s^{(2)}) \cdot B_g^{(2)} + (c_f + c_w S_{wc}) \cdot P \cdot \frac{B_o^{(1)}}{1 - S_{wc}}} \quad (2.12)$$

2.3 Χρήση της εξίσωσης ισοζυγίου μάζας για την αναγνώριση του μηχανισμού παραγωγής

Παραπάνω περιγράφηκε η γενική μορφή της εξίσωσης ισοζυγίου μάζας, όπως επίσης αναλύθηκαν και οι όροι οι οποίοι εμπεριέχονται σε αυτήν. Στην παρούσα παράγραφο θα παρουσιαστεί η χρήση της σαν εργαλείο προσομοίωσης προκειμένου να αναγνωριστεί ο μηχανισμός παραγωγής ενός ταμιευτήρα. Αναλυτικότερα, το 1963 οι Havlena και Odeh ^[10] παρουσίασαν μια μέθοδο της οποίας το αποτέλεσμα είναι η

αναγνώριση του ή των μηχανισμών παραγωγής που επενεργούν στο σύστημα ενός ταμειυτήρα. Όπως θα αναλυθεί και στη συνέχεια, η μέθοδος τους αποτελεί μια επαναδιατύπωση της εξίσωσης ισοζυγίου μάζας κατά τέτοιο τρόπο ώστε ο μηχανισμός παραγωγής του ταμειυτήρα να μπορεί να ανιχνευτεί από το σχήμα της γραφικής παράστασης μεγεθών τα οποία αποτελούν συνάρτηση των δεδομένων παραγωγής.

Πιο συγκεκριμένα, οι όροι οι οποίοι δημιουργήθηκαν από την επαναδιατύπωση της Εξίσωσης Ισοζυγίου Μάζας και από τους οποίους αποτελείται η νέα ισοδύναμη εξίσωση των Havlena και Odeh είναι οι ακόλουθοι:

Αρχικά, οι όροι της παραγωγής σε όγκους σε συνθήκες ταμειυτήρα συμβολίζονται με F και είναι ίσοι με:

$$F = N_p \cdot [B_o + B_g \cdot (R_p - R_s)] + W_p (rb) \quad (2.13)$$

Αντίστοιχα, οι όροι του δεξιού μέλους της εξίσωσης ισοζυγίου μάζας απλοποιούνται στους παρακάτω:

1. Στην εκτόνωση του πετρελαίου και του διαλελυμένου στη μάζα του αερίου,

E_o , όπου:

$$E_o = B_o^{(2)} - B_o^{(1)} + (R_s^{(1)} - R_s^{(2)}) \cdot B_g^{(2)} \quad rb/STB \quad (2.14)$$

2. Στην εκτόνωση των πόρων του πετρώματος και του συνδεδεμένου νερού,

E_{fw} , όπου:

$$E_{fw} = (1+m) \cdot \frac{B_o^{(1)}}{1-S_w} \cdot (c_f + S_w \cdot c_w) \cdot \Delta P \quad rb/STB \quad (2.15)$$

3. Τέλος, στην εκτόνωση του ελεύθερου αερίου E_g , όπου:

$$E_g = B_o^{(1)} \cdot \left(\frac{B_g^{(2)}}{B_g^{(1)}} - 1 \right) rb/STB \quad (2.16)$$

Αντικαθιστώντας τους παραπάνω όρους στην εξίσωση ισοζυγίου μάζας, λαμβάνεται η ακόλουθη μορφή:

$$F = N \cdot E_o + N \cdot m \cdot E_g + N \cdot E_{fw} + W_e \quad (2.17)$$

Σημειώνεται ότι η εξίσωση που παρουσιάζεται παραπάνω, όπως άλλωστε και η πρωτότυπη εξίσωση ισοζυγίου μάζας, δεν λαμβάνει υπ' όψιν την πιθανή εισπίεση νερού ή αερίου.

Με τους παραπάνω μετασχηματισμούς, η εξίσωση (2.17) έχει γραφεί σε μια ισοδύναμη μορφή η οποία επιτρέπει την εύκολη ανίχνευση του τύπου ταμιευτήρα και του δρώντος μηχανισμού παραγωγής, όπως ακόρεστος ταμιευτήρας, με ή χωρίς είσοδο νερού, κορεσμένος με υπερκείμενη ζώνη αερίου, Παρακάτω παρουσιάζονται δυο παραδείγματα εφαρμογής της μεθόδου των Havlena και Odeh, και στη συνέχεια αναλύονται τα γενικά βήματα τα οποία πραγματοποιούνται κατά την υλοποίηση της.

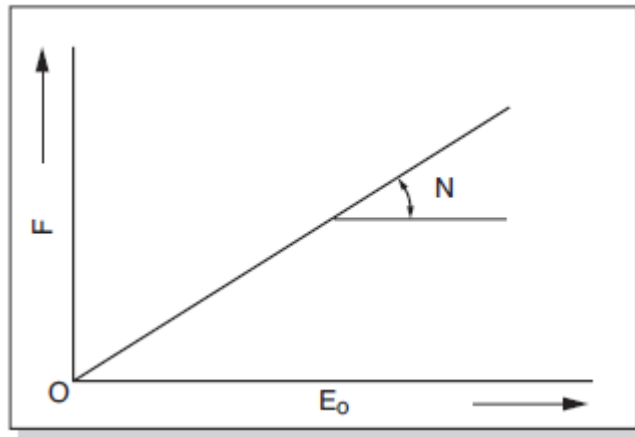
2.3.1 Ταμιευτήρες χωρίς εισροή νερού και χωρίς υπερκείμενη ζώνη αερίου

Ο μηχανισμός παραγωγής αυτών των ταμιευτήρων είναι ίσως ο πιο απλός στην αναγνώριση του καθώς $W_e = 0$ και $N \cdot m = 0$, οπότε απαλείφοντας αυτούς τους όρους από την εξίσωση 2.17, η τελευταία καταλήγει να είναι ίση με:

$$F = N \cdot E_o \quad (2.18)$$

Επομένως, εάν ο υπό μελέτη ταμιευτήρας είναι ακόρεστος, χωρίς ελεύθερο αέριο και χωρίς εισροή νερού, οι τιμές των μεγεθών F και E_o σε κάθε πίεση (όπως αυτές προκύπτουν από τα δεδομένα παραγωγής και τις εξισώσεις 2.13, 2.14 και 2.17) θα πρέπει να ικανοποιούν τη σχέση 2.18. Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα 2.1, στην

περίπτωση αυτή, η γραφική παράσταση της συνολικής παραγωγής (F) ως προς την εκτόνωση του πετρελαίου και του διαλελυμένου στη μάζα του αερίου (E_o) είναι μια ευθεία γραμμή, η οποία διέρχεται από την αρχή των αξόνων. Τέλος, η κλίση της ευθείας είναι ίση με τον συνολικό όγκο των υδρογονανθράκων που πληρούν τους πόρους του ταμιευτήρα (N).



Διάγραμμα 2.1: Παραγωγή ως προς εκτόνωση του πετρελαίου ^[11]

Για την εφαρμογή της μεθόδου των Havlena και Odeh, λαμβάνονται τα δεδομένα παραγωγής και υπολογίζονται οι τιμές των F και E_o για κάθε τιμή πίεσης. Τα F και E_o προβάλλονται σε διάγραμμα και ελέγχεται το κατά πόσον ανήκουν σε ευθεία γραμμή. Εάν ναι, τότε ο ταμιευτήρας είναι ακόρεστος χωρίς είσοδο νερού. Στην περίπτωση αυτή, δημιουργείται η βέλτιστη ευθεία που περνά ανάμεσα στα ζεύγη τιμών F και E_o καθώς και από την αρχή των αξόνων. Τα αποθέματα προσδιορίζονται από την αντίστροφη εφαπτομένη της βέλτιστης ευθείας.

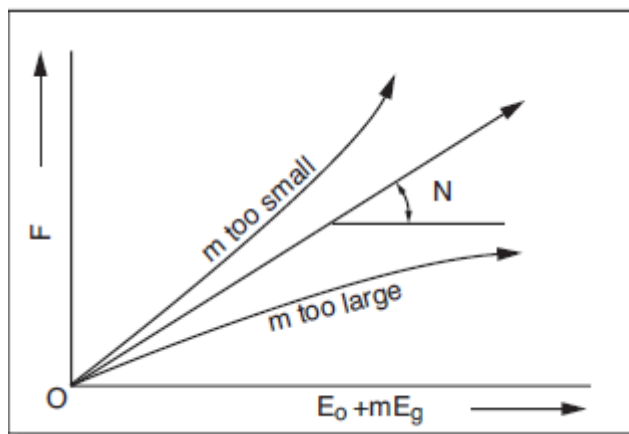
2.3.2 Ταμιευτήρες με κινητήρια δύναμη αυτή της εκτόνωσης του ελεύθερου αερίου, χωρίς εισροή νερού και με γνωστό τον όγκο της υπερκείμενης ζώνης αερίου

Σε αυτή την περίπτωση ταμιευτήρων, ο όρος ο οποίος σχετίζεται με την εισροή νερού είναι $W_e = 0$, καθώς δεν υπάρχει υποκείμενος υδροφόρος ορίζοντας στον

ταμιευτήρα υδρογονανθράκων. Ωστόσο, υπάρχει υπερκείμενη ζώνη αερίου της οποίας ο όγκος δίνεται από τη μεταβλητή m . Λόγω των δυο παραπάνω περιπτώσεων η εξίσωση 2.17 θα έχει την ακόλουθη μορφή:

$$F = N \cdot (E_o + m \cdot E_g) \quad (2.19)$$

Η γραφική παράσταση λοιπόν της συνολικής παραγωγής (F) ως προς το άθροισμα των όρων της εκτόνωσης του πετρελαίου και του διαλελυμένου στη μάζα του αερίου, όπως επίσης και του ελεύθερου αερίου εντός του ταμιευτήρα ($E_o + m \cdot E_g$) θα είναι μια ευθεία γραμμή η οποία διέρχεται από την αρχή των αξόνων, της οποίας η κλίση είναι ίση με τον συνολικό όγκο των υδρογονανθράκων που πληρούσαν αρχικά τους πόρους του ταμιευτήρα (N). Τέλος, στην περίπτωση που δεν είναι γνωστή η τιμή της παραμέτρου m , τότε κάνοντας διάφορες υποθέσεις για την τιμή της, δημιουργείται μια σειρά διαγραμμάτων εκ των οποίων εκείνο του οποίου η μορφή είναι ευθεία γραμμή εμπεριέχει τη σωστή τιμή του m , όπως φαίνεται και στο παρακάτω διάγραμμα.



Διάγραμμα 2.2: Μηχανισμός παραγωγής με εκτόνωση ελεύθερου αερίου

2.3.3 Διαδικασία εφαρμογής της μεθόδου

Γενικότερα, προκειμένου να μπορεί να προσδιοριστεί ο μηχανισμός παραγωγής με χρήση της μεθόδου των Havlena και Odeh χρειάζονται δεδομένα παραγωγής

(καταγραφές παροχών ρευστών και πιέσεων), όπως επίσης και θερμοδυναμικές μελέτες (PVT) των ρευστών που φιλοξενούνται στους πόρους του υπό μελέτη ταμιευτήρα προκειμένου να είναι γνωστές οι ιδιότητες τους. Εφόσον, τα παραπάνω δεδομένα είναι διαθέσιμα, το πρώτο βήμα είναι ο υπολογισμός των όρων που αποτελούν την εξίσωση 2.17 (F, E_o, E_{fw}, E_g). Στην συνέχεια, γίνεται μια υπόθεση σχετικά με τον μηχανισμό ο οποίος μπορεί να επενεργεί στον ταμιευτήρα και δημιουργείται η γραφική παράσταση των μεγεθών που εμπεριέχονται στην εξίσωση, όπως αναλύθηκε και στα δυο παραπάνω παραδείγματα. Στην περίπτωση που η μορφή του κατασκευασμένου διαγράμματος δεν εμφανίζει κάποια ομοιότητα με αυτήν των διαγραμμάτων που υποδηλώνει η συγκεκριμένη μέθοδος, τότε οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι η αρχική υπόθεση που έγινε σχετικά με τον μηχανισμό παραγωγής είναι λανθασμένη. Επόμενο βήμα λοιπόν, είναι η υιοθέτηση άλλης υπόθεσης για τον μηχανισμό παραγωγής και ακολουθείται ακριβώς η ίδια διαδικασία έως ότου η γραφική παράσταση του υποτιθέμενου μηχανισμού παραγωγής να εμφανίζει την μορφή που η μέθοδος των Havlena και Odeh υποδεικνύει.

2.4 Χρήση της εξίσωσης ισοζυγίου μάζας για πρόβλεψη παραγωγής

Σύμφωνα με τα παραπάνω, η Μέθοδος Ισοζυγίου Μάζας αποτελεί το πιο αξιόπιστο εργαλείο προκειμένου να αναγνωριστεί ο πρωτογενής μηχανισμός παραγωγής του ταμιευτήρα, όπως επίσης και να υπολογιστεί ο αρχικός όγκος των υδρογονανθράκων που πληρούν τους πόρους του. Για την επιτυχή εφαρμογή της μεθόδου απαιτείται η ύπαρξη επάρκειας ποιοτικών δεδομένων παραγωγής.

Ο δεύτερος τρόπος εφαρμογής της MIM είναι ο προσδιορισμός της παραγωγής, δηλαδή των μεγεθών N_p, G_p, W_p καθώς και του εισερχόμενου νερού W_e ως συναρτήσεις της επικρατούσας πίεσης και του χρόνου. Επομένως, τα δεδομένα παραγωγής τα οποία μέχρι πρότινος ήταν γνωστά αποτελούν πλέον τις άγνωστες ζητούμενες ποσότητες. Αντίστροφα, τα αποθέματα και ο όγκος (εάν υπάρχει) της υπερκείμενης ζώνης αερίου θεωρούνται ως δεδομένα.

2.4.1 Εξισώσεις που υλοποιούνται κατά την πρόβλεψη παραγωγής

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, κατά την πρόβλεψη παραγωγής πρέπει για κάθε τιμή της πίεσης να υπολογιστεί η τιμή των παρακάτω παραμέτρων που υπεισέρχονται στην ΕΙΜ:

- Παραγωγή πετρελαίου, N_p
- Παραγωγή αερίου, G_p
- Παραγωγή νερού, W_p , και τέλος
- Η ποσότητα του νερού που εισήλθε στον ταμιευτήρα από τον ταμιευτήρα νερού, W_e

Η Εξίσωση Ισοζυγίου Μάζας αποτελεί μια εξίσωση η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό των παραπάνω μεγεθών. Για την εισροή νερού W_e , όπως θα αναλυθεί και σε επόμενη ενότητα, υπάρχουν διαθέσιμες διάφορες μέθοδοι με τη χρήση των οποίων μπορεί να υπολογιστεί η εισροή νερού για κάθε τιμή της πίεσης, για διάφορα μοντέλα υδροφορέων. Για τη δημιουργία λοιπόν των υπόλοιπων εξισώσεων προκειμένου να προσδιοριστούν οι περισσότεροι του ενός άγνωστοι γίνεται χρήση της διαφορικής εξίσωσης του Darcy^[12] για την κάθε φάση που πληροί τους πόρους του ταμιευτήρα και η οποία στη γενική της μορφή είναι η παρακάτω:

$$Q = -\frac{k}{\mu} \cdot A \cdot \frac{dP}{dL} \quad (2.20)$$

όπου,

Q η παροχή της κάθε φάσης (πετρέλαιο, αέριο, νερό)
 $k/\mu = \lambda$ η κινητικότητα της κάθε φάσης (mobility), η οποία πρακτικά υποδηλώνει την ευκολία της φάσης να κινείται εντός των πόρων του ταμιευτήρα,

A η διατομή της ροής, και
 dP/dL η βαθμίδα μεταβολής της πίεσης.

Προκύπτουν επομένως οι ακόλουθες εξισώσεις για την κάθε φάση.

- Για τη πετρελαϊκή φάση,

$$Q_o = -\frac{k_o}{\mu_o} \cdot A \cdot \frac{dP}{dL} \quad (2.21)$$

- Για την αέρια φάση,

$$Q_g = -\frac{k_g}{\mu_g} \cdot A \cdot \frac{dP}{dL} \quad (2.22)$$

- Για την υδάτινη φάση,

$$Q_w = -\frac{k_w}{\mu_w} \cdot A \cdot \frac{dP}{dL} \quad (2.23)$$

Είναι εμφανές ότι οι παραπάνω εξισώσεις εμπεριέχουν άγνωστα μεγέθη σχετικά με τη γεωμετρία του ταμιευτήρα, ωστόσο, εάν διαιρεθούν μεταξύ τους κατά μέλη οι όροι απλοποιούνται. Για παράδειγμα, εάν διαιρεθεί η εξίσωση 2.21 με τις εξισώσεις 2.22 και 2.23 και οι παροχές εκφραστούν ως συνάρτηση της παραγωγής, $Q_o = N_p / \Delta t$, προκύπτουν τα παρακάτω:

$$\frac{N_p}{G_p} = \frac{k_o / \mu_o}{k_g / \mu_g} \quad (2.24)$$

$$\frac{N_p}{W_p} = \frac{k_o / \mu_o}{k_w / \mu_w} \quad (2.25)$$

Σημειώνεται ότι η τιμή του ιξώδους μ της κάθε φάσης για κάθε τιμή της πίεσης υπολογίζεται από τις θερμοδυναμικές ιδιότητες (PVT) του ρευστού. Επιπρόσθετα, η

τιμή του κορεσμού είναι και αυτή γνωστή για κάθε φάση καθώς είναι γνωστός ο αρχικός της όγκος εντός του ταμιευτήρα.

Συνοψίζοντας, για πτώση της πίεσης από P_1 σε P_2 , με τη χρήση των εξισώσεων 2.24 και 2.25, την εξίσωση ισοζυγίου μάζας όπως επίσης και τη μέθοδο η οποία χρησιμοποιείται προκειμένου να υπολογιστεί η εισροή νερού W_e (Fetkovich method) εντός του ταμιευτήρα υπολογίζονται οι παραγόμενοι όγκοι (N_p, G_p, W_p). Στη συνέχεια, οι εναπομείναντες όγκοι κάθε φάσης στη νέα πίεση P_2 θα είναι ίσοι με τον αρχικό όγκο της εκάστοτε φάσης αφαιρουμένης της παραγόμενης ποσότητας. Δηλαδή, ο όγκος του πετρελαίου στην πίεση P_2 θα είναι ίσος με:

$$N^{(P_2)} = N^{(P_1)} - N_p \quad (2.26)$$

Αντίστοιχα, ο κορεσμός του πετρελαίου στη νέα πίεση P_2 υπολογίζεται όπως παρακάτω:

$$S_o^{(P_2)} = \frac{N^{(P_2)}}{N^{(P_2)} + G^{(P_2)} + W^{(P_2)}} \quad (2.27)$$

Η παραπάνω διαδικασία εκτελείται επαναληπτικά καθ' όλη τη διάρκεια πρόβλεψης της παραγωγής έως ότου ο ταμιευτήρας φτάσει στις συνθήκες εγκατάλειψης του.

2.4.2 Αντιστοίχιση πίεσης σε χρόνο

Δεδομένου ότι ο προσδιορισμός της παραγωγής ως συνάρτηση της φθίνουσας πίεσης δεν έχει ιδιαίτερο πρακτικό ενδιαφέρον, γίνεται σαφές ότι με κάποιο τρόπο πρέπει να εισαχθεί η έννοια του χρόνου στους υπολογισμούς της. Για να γίνει κάτι τέτοιο είναι απαραίτητος ο συνδυασμός της μεθόδου με επιπρόσθετα μεγέθη τα

οποία εμπεριέχουν την έννοια του χρόνου, όπως είναι ο συντελεστής παραγωγικότητας της γεώτρησης (PI)^[13].

Πιο αναλυτικά, ο συντελεστής παραγωγικότητας μιας γεώτρησης (PI) είναι ίσος με:

$$PI = \frac{Q_o}{P_e - P_w} = \frac{N_p / \Delta t}{\Delta P} \quad STB/day/psi \quad (2.28)$$

όπου,

N_p	η παραγόμενη ποσότητα πετρελαίου για πτώση πίεσης ίση με ΔP σε STB ,
ΔP	η πτώση της πίεσης, $psia$
Δt	ο χρόνος κατά τον οποίον παρήχθη η συγκεκριμένη ποσότητα πετρελαίου, $days$

Αν λοιπόν η παραπάνω εξίσωση λυθεί ως προς το χρόνο (Δt) προκύπτει:

$$\Delta t = \frac{N_p}{PI} \cdot \frac{1}{\Delta P} \quad (2.29)$$

Από την παραπάνω εξίσωση λοιπόν, είναι εμφανές ότι για δεδομένη παροχή ρευστού αλλά και τιμή του συντελεστή παραγωγικότητας, η κάθε τιμή της πτώσης της πίεσης (ΔP) μπορεί πολύ εύκολα να αντιστοιχηθεί σε ισοδύναμη χρονική μεταβολή (Δt).

2.5 Αριστοποίηση των τιμών των παραμέτρων / «history matching»

Είναι σαφές ότι η ακρίβεια της προβλεπόμενης μελλοντικής παραγωγής εξαρτάται από την ποιότητα των εκτιμήσεων των τιμών των παραμέτρων που υπεισέρχονται στους παραπάνω υπολογισμούς. Η ακρίβεια των εκτιμήσεων μπορεί να ελεγχθεί καλώντας τη μέθοδο MIM να προβλέψει την παραγωγή για ένα διάστημα

για το οποίο υπάρχουν ήδη δεδομένα (history matching). Εάν οι εκτιμήσεις είναι ικανοποιητικά ακριβείς, τότε το μοντέλο του ταμιευτήρα θα πρέπει να μπορεί να προβλέψει με ακρίβεια την ήδη καταγεγραμμένη παραγωγή. Αντιθέτως, εάν η πρόβλεψη του μοντέλου για διάστημα για το οποίο υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα παραγωγής δίνει εντελώς διαφορετικά αποτελέσματα τότε η αξία του για την πρόβλεψη της μελλοντικής παραγωγής κρίνεται αμφίβολη. Στην περίπτωση αυτή, θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί η τεχνική της ρύθμισης των παραμέτρων, μια διαδικασία γνωστή και ως «history matching». Η ιδέα έγκειται στον προσδιορισμό των βέλτιστων τιμών των παραμέτρων έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί η διαφορά μεταξύ της καταγεγραμμένης και της προβλεπόμενης από το μοντέλο παραγωγής.

Πιο συγκεκριμένα, οι παράμετροι οι οποίες εμφανίζουν αβεβαιότητα και των οποίων τη βέλτιστη τιμή καλείται να προσδιορίσει η συγκεκριμένη μέθοδος είναι οι ακόλουθες:

- ο αρχικός όγκος υδρογονανθράκων που έχει εισαχθεί στο μοντέλο (STOIIP),
- τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του υδροφόρου ταμιευτήρα, όπως επίσης χαρακτηριστικές παραμέτρους του όπως είναι το πορώδες και η διαπερατότητα του, στην περίπτωση όπου υπάρχει τέτοιος
- η βέλτιστη τιμή του m στην περίπτωση διφασικού ταμιευτήρα

Σημειωτέον ότι κατά τη διαδικασία ρύθμισης ενός μοντέλου MIM δεν μεταβάλλονται καθόλου οι τιμές των παραμέτρων που χαρακτηρίζουν το ρευστό του ταμιευτήρα (PVT). Αυτό οφείλεται στο ότι οι PVT ιδιότητες έχουν προκύψει από τυποποιημένες μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί σε εξιδεικευμένα εργαστήρια στα οποία έχει σταλεί δείγμα του πετρελαϊκού ρευστού προς ανάλυση, κι επομένως οι τιμές αυτές δεν επιδέχονται αμφισβήτηση.

Ο αλγόριθμος αριστοποίησης μεταβάλλει την τιμή μιας ή και περισσότερων από τις προαναφερθείσες παραμέτρους ούτως ώστε μόλις το μοντέλο κληθεί να προβλέψει την παραγωγή για μια δεδομένη χρονική περίοδο, το σφάλμα που εμφανίζεται μεταξύ των υπολογιζόμενων παραγόμενων ποσοτήτων αλλά και τιμών των πιέσεων καθ' όλη την διάρκεια της προσομοίωσης και των καταγεγραμμένων

δεδομένων παραγωγής να λαμβάνει όσο το δυνατόν μικρότερες τιμές. Τέλος, μόλις επιτευχθεί ικανοποιητική ταύτιση μεταξύ των αποτελεσμάτων του μοντέλου και της πραγματικότητας, τότε το μοντέλο θεωρείται αξιόπιστο και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη της παραγωγής μιας μεταγενέστερης περιόδου.

2.6 Υποκείμενη υδατοφόρος ζώνη

Στις προηγούμενες παραγράφους παρουσιάστηκε η χρήση της μεθόδου MIM για την ανίχνευση του μηχανισμού παραγωγής ενός ταμιευτήρα, για τον προσδιορισμό των αποθεμάτων και για την πρόβλεψη της παραγωγής. Σε κάθε μία από αυτές τις περιπτώσεις έχει γίνει η υπόθεση ότι υπάρχει ξεχωριστό μοντέλο το οποίο περιγράφει την εισροή νερού από τον υποκείμενο υδροφόρο ταμιευτήρα προς τον ταμιευτήρα υδρογονανθράκων ως συνάρτηση της επικρατούσας πίεσης. Κατ' αυτό τον τρόπο παρέχεται η δυνατότητα προσδιορισμού του μεγέθους W_e . Στην παρούσα παράγραφο αναλύονται τα πλέον γνωστά μοντέλα που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του όγκου του εισρέοντος νερού, όπως επίσης γίνεται μια εμπεριστατωμένη ανάλυση στη μέθοδο του Fetkovich η οποία χρησιμοποιήθηκε στην συγκεκριμένη εργασία.

Η πλειοψηφία των ταμιευτήρων σε παγκόσμια κλίμακα είναι συνδεδεμένοι με έναν ενεργό υποκείμενο υδροφόρο ορίζοντα, ο οποίος ανάλογα με τον ρυθμό παραγωγής υδρογονανθράκων μπορεί να τροφοδοτεί το σύστημα με σημαντικές ποσότητες ενέργειας υποβοηθώντας έτσι την παραγωγή ρευστών και να αναπληρεί τους όγκους των παραγόμενων ρευστών. Η γενική ιδέα είναι ότι αρχικά οι πόροι του ταμιευτήρα υδρογονανθράκων πληρούνταν μόνο με νερό και ότι σε μεταγενέστερο χρόνο οι υδρογονάνθρακες μετανάστευσαν σε αυτούς εκτοπίζοντας μέρος του πρώτου. Ωστόσο, τόσο ο ταμιευτήρας υδρογονανθράκων αλλά όσο και του νερού αποτελούν μέρη του ίδιου συστήματος και για αυτό τον λόγο αντιδρούν και οι δυο στις διάφορες μεταβολές της πίεσης που προκαλούνται σαν αποτέλεσμα της παραγωγής ρευστών από το σύστημα. Η ύπαρξη ενός ενεργού υδροφόρου ορίζοντα είναι κατά γενική ομολογία ο πιο αποδοτικός μηχανισμός παραγωγής. Τα πιο

σημαντικά χαρακτηριστικά ενός συστήματος υδρογονανθράκων που βρίσκεται σε επικοινωνία με έναν ενεργό ταμιευτήρα νερού είναι τα ακόλουθα:

- η πίεση σε όλη τη διάρκεια της παραγωγής μεταβάλλεται ομαλά,
- αυξημένη παραγωγή νερού εμφανίζεται στις γεωτρήσεις οι οποίες βρίσκονται πολύ κοντά στη διεπιφάνεια νερού-πετρελαίου,
- η αναλογία του παραγόμενου αερίου ως προς το πετρέλαιο (gas oil ratio) συνήθως παραμένει σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του κοιτάσματος,
- τέλος, η αποληψιμότητα σε υδρογονάνθρακες είναι αρκετά υψηλή.

2.6.1 Κινητήριος δύναμη εισροής νερού

Η κινητήριος δύναμη για την εισροή νερού από τον υδροφόρο ταμιευτήρα στον ταμιευτήρα υδρογονανθράκων προέρχεται από την απόκριση του πρώτου στην πτώση της πίεσης λόγω της παραγωγής, και καθώς ο ταμιευτήρας νερού αποτελεί μέρος του συστήματος αντιδρά εκτονούμενος σε αυτή τη μεταβολή της πίεσης. Όπως έχει αναφερθεί και στην ενότητα της Μεθόδου Ισοζυγίου Μάζας, η παραγωγή υδρογονανθράκων οφείλεται κατά ένα μέρος στη συμπιεστότητα των ρευστών που φιλοξενούνται στον ταμιευτήρα. Το ίδιο ισχύει και στην περίπτωση των ταμιευτήρων νερού. Το σύστημα του πορώδους μέσου τόσο του ταμιευτήρα υδρογονανθράκων αλλά και του νερού είναι συμπίεσιμο. Πιο συγκεκριμένα, όλα τα στοιχεία του συστήματος (υδρογονάνθρακες, νερό και πέτρωμα) εκτονώνονται (ο όγκος τους τείνει να αυξηθεί) όσο η πίεση μειώνεται. Όπως γίνεται κατανοητό από τα παραπάνω, η διείδυση του νερού οφείλεται κυρίως στη συμπιεστότητα του συστήματος.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το νερό εισχωρεί εντός του ταμιευτήρα υδρογονανθράκων λόγω της πτώσης της πίεσης εξαιτίας της παραγωγής. Αυτή η πτώση της πίεσης προκαλεί:

- εκτόνωση του νερού λόγω της πτώσης της πίεσης που γίνεται αισθητή εντός του υδροφόρου ταμιευτήρα,

- εκτόνωση των υδρογονανθράκων στην περίπτωση που υπάρχουν στον υδροφορέα,
- εκτόνωση του πετρώματος, γεγονός που μειώνει το πορώδες.

Καθίσταται σαφές ότι το μέγεθος εκτόνωσης ή της εισχώρησης νερού είναι ανάλογο των παρακάτω παραγόντων:

- του μεγέθους του υδροφόρου ορίζοντα,
- της διαπερατότητας του πετρώματος αυτού,
- και του ρυθμού επανατροφοδοσίας του υδροφορέα από νερό το οποίο προέρχεται από την επιφάνεια.

2.6.2 Ταξινόμηση υδροφορέων

Σε πολλούς ταμιευτήρες υδρογονανθράκων που επικοινωνούν με έναν ταμιευτήρα νερού, ο μηχανισμός παραγωγής καλείται φυσική εισροή νερού. Αξίζει να σημειωθεί ότι αυτός ο μηχανισμός παραγωγής είναι διαφορετικός από αυτόν της τεχνητής εισροής νερού, ο οποίος περιλαμβάνει την εισπίεση νερού από τον παραγωγό μέσα στο σύστημα.

Τα συστήματα ταμιευτήρων-υδρογονανθράκων, συχνά ταξινομούνται με βάση:

- Το βαθμό διατήρησης της πίεσης τους σαν συνάρτηση της παραγωγής
- Τις συνθήκες που επικρατούν στο εξωτερικό όριο τους
- Τη γεωμετρία της ροής
- Το καθεστώς ροής

2.6.2.1 Βαθμός διατήρησης της πίεσης

Σύμφωνα με τον τρόπο μεταβολής της πίεσης, το πόσο γρήγορα ή όχι δηλαδή μειώνεται η πίεση του ταμιευτήρα υδρογονανθράκων ο οποίος βρίσκεται σε επαφή με υδροφόρο, ο τελευταίος μπορεί να χαρακτηριστεί ως ακολούθως:

- Ενεργός ταμιευτήρας νερού
- Μερικώς ενεργός ταμιευτήρας νερού
- Περιορισμένος ταμιευτήρας νερού

Ο όρος ενεργός ταμιευτήρας νερού αναφέρεται στον μηχανισμό εισχώρησης νερού σύμφωνα με τον οποίο η υδραυλική σύνδεση του πρώτου με το κοίτασμα είναι ικανή και όπου η συνολική παραγωγή υδρογονανθράκων από τον ταμιευτήρα ισούται με τον όγκο του εισρέοντος νερού σε αυτόν από τον υδροφόρο ταμιευτήρα. Ταμιευτήρες με κινητήρια δύναμη παραγωγής αυτή της εισχώρησης νερού από ενεργό υποκείμενο υδροφόρο ορίζονται συνήθως χαρακτηρίζονται από σταδιακή και αργή πτώση της πίεσης τους.

Η παροχή του εισρέοντος νερού σε αυτή την περίπτωση υδροφόρων ταμιευτήρων δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$e_w = Q_o \cdot B_o + Q_g \cdot B_g + Q_w \cdot B_w \quad (2.30)$$

όπου,

e_w	εισροή νερού, rb/day ,
Q_o	παροχή πετρελαίου, STB/day ,
B_o	ογκομετρικός συντελεστής σχηματισμού υγρής φάσης, rb/STB ,
Q_g	παροχή ελεύθερου αερίου, scf/day ,
B_g	ογκομετρικός συντελεστής σχηματισμού αέριας φάσης, rb/scf ,
Q_w	παροχή νερού, STB/day ,
B_w	ογκομετρικός συντελεστής σχηματισμού υδάτινης φάσης, rb/STB .

Ωστόσο η παραπάνω εξίσωση, μπορεί να εκφραστεί και με όρους αθροιστικής παραγωγής εισάγοντας τις παρακάτω παραγώγους όπου το σύμβολο της τελείας εκφράζει την παράγωγο της μεταβλητής ως προς το χρόνο:

$$e_w = \frac{dW_e}{dt} = \dot{W}_e = B_o \cdot \dot{N}_p + (GOR - R_s) \dot{N}_p \cdot B_g + \dot{W}_p \cdot B_w \quad (2.31)$$

όπου,

W_e	συνολική εισροή νερού, rb ,
t	χρόνος, $days$,
N_p	συνολική παραγωγή πετρελαίου, STB ,
GOR	λόγος υγρού και αερίου εν διαλύσει, scf/STB ,
R_s	διαλυτότητα του αερίου, scf/STB ,
B_g	ογκομετρικός συντελεστής αέριας φάσης, rb/scf ,
W_p	συνολική παραγωγή νερού, STB ,
\dot{N}_p	ημερήσια παροχή πετρελαίου Q_o , STB/day ,
\dot{W}_p	ημερήσια παροχή νερού Q_w , STB/day ,
\dot{W}_e	ημερήσια εισροή νερού e_w , rb/day ,
$(GOR - R_s) \cdot dN_p/dt$	ημερήσια παροχή ελεύθερου αερίου, scf/day .

Στην περίπτωση όπου η κινητήριος δύναμη οφείλεται μερικώς στον υδροφόρο ορίζοντα, η ενέργεια που παρέχεται στον ταμειευτήρα υδρογονανθράκων δεν επαρκεί για την παραγωγή υδρογονανθράκων. Τέλος, στην περίπτωση ταμειυτήρων νερού περιορισμένης δράσης η ενέργεια που τροφοδοτείται από αυτούς για την παραγωγή ρευστών, θεωρείται αμελητέα.

2.6.2.2 Συνθήκες εξωτερικών συνόρων

Ένας υδροφόρος ορίζοντας μπορεί να χαρακτηριστεί είτε σαν άπειρης, είτε σαν πεπερασμένης δράσης. Γεωλογικά, όλοι οι σχηματισμοί θεωρούνται πεπερασμένοι, αλλά πρακτικά μπορεί να θεωρηθεί ότι έχουν άπειρη δράση εάν οι αλλαγές της πίεσης στη διεπιφάνεια νερού – πετρελαίου δεν γίνουν αισθητές λόγω της μεγάλης τους έκτασης στο εξωτερικό σύνορο τους. Μερικοί υδροφορείς

επανατροφοδοτούνται με νερό από την επιφάνεια γεγονός που συμβάλει στο να θεωρούνται συστήματα άπειρης δράσης. Γενικά, η μεταβολή της πίεσης στο εξωτερικό σύνορο του υδροφόρου είναι αυτή καθορίζει τη συμπεριφορά του, και προκύπτει ότι:

- Συστήματα που έχουν άπειρη δράση υποδηλώνουν ότι η επίδραση της αλλαγής της πίεσης στη διεπιφάνεια πετρελαίου/νερού μπορεί να μην γίνει ποτέ αισθητή στο εξωτερικό σύνορο του υδροφόρου ταμιευτήρα.
- Ενώ, πεπερασμένα συστήματα υποδηλώνουν ότι η πίεση στο εξωτερικό όριο του υδροφόρου επηρεάζεται από την εισροή νερού μέσα στην ζώνη του πετρελαίου και ότι η πίεση σε εκείνο το σημείο μειώνεται συνεχώς.

2.6.2.3 Γεωμετρία ροής

Τα συστήματα ταμιευτήρων-υδροφορέων μπορούν να ταξινομηθούν σύμφωνα με τη γεωμετρία της ροής σαν:

- Μηχανισμός παραγωγής άκρου
- Μηχανισμός παραγωγής πυθμένα
- Γραμμικός μηχανισμός παραγωγής

Η κάθε περίπτωση αναφέρεται στον τρόπο με τον οποίο το νερό εισέρχεται μέσα στον ταμιευτήρα.

2.6.2.4 Καθεστώς ροής

Στην περίπτωση όπου ο υδροφόρος ορίζοντας που υπόκειται του ταμιευτήρα υδρογονανθράκων έχει πολύ ισχυρή δράση, τότε θεωρείται ότι ο δεύτερος έχει ένα ανοιχτό για ροή εξωτερικό σύνορο και ότι παράγει υπό καθεστώς σταθερής κατάστασης. Από την άλλη, όταν η εισροή του υδροφορέα δεν μπορεί να αναπληρώσει τους παραγόμενους όγκους ρευστών, τότε το καθεστώς της ροής χαρακτηρίζεται σαν μη σταθερής κατάστασης.

2.6.3 Μοντέλα υδροφόρων ταμιευτήρων

Μέχρι σήμερα έχουν αναπτυχθεί πολλά μοντέλα με σκοπό να περιγράψουν τον υδροφόρο ο οποίος επενεργεί στον ταμιευτήρα και να υπολογίσουν την ποσότητα του εισρέοντος νερού W_e , τα οποία βασίζονται σε υποθέσεις που υποδεικνύουν τα χαρακτηριστικά τους. Λόγω της μεγάλης αβεβαιότητας που εμφανίζεται για την περιγραφή των χαρακτηριστικών τους, όλα τα προτεινόμενα μοντέλα απαιτούν δεδομένα παραγωγής προκειμένου να αξιολογηθούν οι σταθερές που αντιπροσωπεύουν τις ιδιότητες του υδροφορέα. Τα μαθηματικά μοντέλα που χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο στην πετρελαϊκή βιομηχανία είναι τα ακόλουθα:

- Small Pot aquifer
- Schilthuis' steady-state
- Hurst's modified steady-state
- The Van Everdingen-Hurst unsteady-state
- The Carter-Tracy unsteady-state
- Fetkovich's method

Παρακάτω παρουσιάζεται η μέθοδος του Fetkovich η οποία χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία. Ο λόγος χρήσης αυτής της μεθόδου έγκειται στο γεγονός ότι τα δεδομένα που απαιτεί για τον χαρακτηρισμό του υδροφόρου ταμιευτήρα είναι λιγότερα σε σχέση με τις υπόλοιπες, με αποτέλεσμα να μειώνεται η αβεβαιότητα για τυχόν αμφίβολες τιμές παραμέτρων.

2.6.4 Μέθοδος του Fetkovitch για την εισροή νερού

Παρόλο που όλες οι μέθοδοι βρίσκουν εφαρμογή στην πράξη, ωστόσο η μέθοδος των Hurst και van Everdingen και του Fetkovitch^[14] είναι από τις πλέον καθιερωμένες μεθόδους για τον υπολογισμό της εισροής νερού. Ωστόσο, η πρώτη μέθοδος είναι δύσκολο να εφαρμοστεί λόγω της υπέρθεσης των λύσεων για κάθε

βήμα χρόνου και του σφάλματος που παρουσιάζει στη διαδικασία της ταύτισης με τα δεδομένα παραγωγής (history matching) όπως επίσης και στην πρόβλεψη της μελλοντικής απόδοσης (production prediction) του ταμιευτήρα. Το 1971, ο Fetkovich παρουσίασε μια μέθοδο για την περιγραφή των υδροφορέων που έχουν άπειρη δράση. Η συγκεκριμένη μέθοδος προσομοιώνει τη ροή στον υδροφόρο ακριβώς όπως αυτή στους ταμιευτήρες υδρογονανθράκων. Η βασική ιδέα πίσω από τη μέθοδο του Fetkovich είναι ότι η προσέγγιση του συντελεστή παραγωγικότητας J μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να περιγράψει την εισροή νερού από έναν υδροφόρα στον ταμιευτήρα υδρογονανθράκων.

Η εξίσωση της ροής που χρησιμοποιείται στη συγκεκριμένη μέθοδο είναι η εξής:

$$q_w = \frac{dW_e}{dt} = J(P_a - P) \quad (2.32)$$

όπου,

q_w	η παροχή του εισρέοντος νερού, STB / day ,
J	ο συντελεστής παραγωγικότητας του υδροφόρου, $STB/day/psi$,
P	η πίεση του ταμιευτήρα (στη διεπιφάνεια πετρελαίου ή αερίου με το νερό), $psia$,
P_a	μέση πίεση του υδροφόρου, $psia$,
W_e	συνολικός όγκος του εισρέοντος νερού, STB .

Ωστόσο, για έναν υδροφόρα πεπερασμένης δράσης, η συνολική εισροή του νερού για μια δεδομένη πτώση πίεσης είναι:

$$W_e = cW^{(1)}(P^{(1)} - P_a) \quad (2.33)$$

όπου,

$P^{(1)}$	αρχική πίεση του ταμιευτήρα νερού, $psia$,
$W^{(1)}$	αρχικός όγκος νερού που πληρούσε τους πόρους τόσο του ταμιευτήρα υδρογονανθράκων αλλά όσο και του υδροφόρου ορίζοντα, STB ,
c	συνολική συμπιεστότητα του υδροφόρου $= c_w + c_f$.

Στη συνέχεια,

$$\bar{P}_a = P_n \left(1 - \frac{W_e}{W_{en}} \right) \quad (2.34)$$

όπου, $W_{en} = cW_nP_n$ είναι η μέγιστη δυνατή εκτόνωση του ρευστού του υδροφορέα που προκαλείται λόγω μιας δεδομένης πτώσης πίεσης P_n .

Ολοκληρώνοντας την παραπάνω εξίσωση ως προς το χρόνο προκύπτει:

$$\frac{dW_e}{dt} = -\frac{W_{en}}{P_n} \frac{dP_a}{dt} \quad (2.35)$$

η οποία εάν αντικατασταθεί στην 2.32 δίνεται η παρακάτω εξίσωση:

$$\frac{d\bar{P}_a}{\bar{P}_a - P} = -\frac{JP_n}{W_{en}} dt \quad (2.36)$$

Ολοκληρώνοντας την παραπάνω εξίσωση με αρχικές συνθήκες $t=0$ ($W_{en}=0, P_a=P_n$) για μια δεδομένη πτώση πίεσης $\Delta P = P_n - P$ η οποία λαμβάνει χώρα στα εξωτερικά σύνορα του ταμιευτήρα υδρογονανθράκων και με την υπόθεση ότι η πίεση στα εξωτερικά σύνορα του υδροφόρου ταμιευτήρα παραμένει σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια της περιόδου που μας ενδιαφέρει, έχουμε:

$$\ln(\bar{P}_a - P) = -\frac{JP_n t}{W_{en}} + C \quad (2.37)$$

όπου C είναι σταθερά ολοκλήρωσης που προσδιορίζεται να είναι ίση με $\ln(P_n - P)$ και ως εκ τούτου:

$$(\bar{P}_a - P) = (P_n - P) \exp\left(-\frac{JP_n t}{W_{en}}\right) \quad (2.38),$$

και η αντικατάσταση της οποίας στην εξίσωση 2.32 δίνει σαν αποτέλεσμα,

$$\frac{dW_e}{dt} = J(P_n - P) \exp\left(-\frac{JP_n t}{W_{en}}\right) \quad (2.39)$$

Τέλος, με την ολοκλήρωση της παραπάνω εξίσωσης προκύπτει η:

$$W_e = \frac{W_{en}}{P_n} (P_n - P) \left(1 - \exp\left(-\frac{JP_n t}{W_{en}}\right)\right) \quad (2.40)$$

Όσο ο χρόνος τείνει στο άπειρο τότε:

$$W_e = \frac{W_{en}}{P_n} (P_n - P) = cW_n (P_n - P) \quad (2.41)$$

όπου, εδώ W_e είναι η μέγιστη ποσότητα εισροής νερού η οποία μπορεί να προκύψει μόλις η πτώση της πίεσης γίνει αντιληπτή εντός του υδροφόρου ταμιευτήρα.

Μέχρι στιγμής για όλες τις εξισώσεις που έχουν αναπτυχθεί έχει γίνει η θεώρηση ότι η επικρατούσα πίεση στα εσωτερικά όρια του ταμιευτήρα είναι σταθερή. Στην περίπτωση όμως όπου ληφθεί υπόψιν ότι η πίεση μειώνεται όσο πλησιάζουμε τη γεώτρηση προκύπτει ότι, η εισροή νερού για μια δεδομένη χρονική περίοδο Δt_1 θα είναι:

$$\Delta W_{e1} = \frac{W_{en}}{P_n} (P_n - \bar{P}_1) \left(1 - \exp\left(-\frac{JP_n \Delta t_1}{W_{en}}\right)\right) \quad (2.42)$$

όπου P_1 είναι η μέση πίεση που επικρατεί στα όρια του ταμιευτήρα κατά τη διάρκεια της χρονικής περιόδου Δt_1 . Ομοίως, η ίδια διαδικασία πρέπει να ακολουθηθεί για μια χρονική περίοδο Δt_2 .

Η γενική εξίσωση για το ν-οστό βήμα χρόνου είναι η ακόλουθη:

$$\Delta W_{ev} = \frac{W_{ei}}{P_n} (\bar{P}_{a_{v-1}} - \bar{P}_v) \left(1 - \exp \left(- \frac{JP_n \Delta t_v}{W_{en}} \right) \right) \quad (2.43)$$

όπου,

$$\bar{P}_{a_{(v-1)}} = P_n \left(1 - \frac{\sum_{j=1}^{v-1} \Delta W_{ej}}{W_{en}} \right) \quad (2.44)$$

Τέλος, οι τιμές που μπορεί να λάβει ο συντελεστής παραγωγικότητας J , ανάλογα με τις συνθήκες ροής και τη γεωμετρία του υδροφόρου ταμιευτήρα παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα:

Συνθήκες ροής	Ακτινικοί ταμιευτήρες J (cc/sec/atm)	Γραμμικοί ταμιευτήρες J (cc/sec/atm)
Καθεστώς ημισταθερής κατάστασης	$\frac{2\pi fkh}{\mu \left(\ln \frac{r_e}{r_o} - \frac{3}{4} \right)}$	$3 \frac{khw}{\mu L}$
Καθεστώς σταθερής κατάστασης	$\frac{2\pi fkh}{\mu \ln \frac{r_e}{r_o}}$	$\frac{khw}{\mu L}$
Συντελεστής Πεδίου	$7.08 \cdot 10^{-3}$	$1.127 \cdot 10^{-3}$

Πίνακας 2.1: Τιμές του συντελεστή παραγωγικότητας για τους ταμιευτήρες νερού ανάλογα με τα χαρακτηριστικά τους

2.7 Χρήση της Μεθόδου Ισοζυγίου Μάζας στην παρούσα εργασία

Στις παραπάνω ενότητες αναλύθηκαν οι επιμέρους τρόποι εφαρμογής της μεθόδου MIM. Ωστόσο, λόγω του γεγονότος ότι ο υπό μελέτη ταμιευτήρας της παρούσας εργασίας αποτελεί μια καινούρια ανακάλυψη δεν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα παραγωγής αυτού. Εξαιτίας της έλλειψης των παραπάνω δεδομένων και με βάση τα όσα αναλύθηκαν στις παραπάνω ενότητες καθίσταται σαφές ότι η MIM δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί προκειμένου να αναγνωριστεί ο μηχανισμός παραγωγής του ή να αριστοποιηθούν οι τιμές των παραμέτρων του. Αντιθέτως, στην παρούσα διπλωματική εργασία η μέθοδος εφαρμόζεται μόνο για πρόβλεψη παραγωγής προκειμένου να κριθεί το κατά πόσο είναι βιώσιμη η εκμετάλλευσή του για διάφορα σενάρια παραγωγής υποθέτοντας πως η παραγόμενη φάση θα είναι αυτή του πετρελαίου. Σημειώνεται ότι πολλές από τις παραμέτρους του ταμιευτήρα είναι άγνωστες και για αυτό γίνονται υποθέσεις για τις τιμές τους, όπως για παράδειγμα, η αρχική ποσότητα των υδρογονανθράκων που πληρούν τους πόρους του η οποία λαμβάνεται από γεωλογικές εκτιμήσεις, και για τις τιμές παραμέτρων του όπως το πορώδες, οι βαθμοί κορεσμού των ρευστών που φιλοξενεί ακόμα και τον μηχανισμό παραγωγής γίνονται λογικοφανείς υποθέσεις και λαμβάνονται τιμές

από ανάλογα κοιτάσματα. Τέλος, για κάθε διαφορετικό σενάριο που εξετάζεται, αναπτύσσεται το αντίστοιχο μοντέλο MIM και στη συνέχεια υπολογίζεται η πρόβλεψη παραγωγής, η επικρατούσα πίεση και η μεταβολή των κορεσμών των φάσεων ως προς χρόνο.

Κεφάλαιο 3

Ανάπτυξη Μοντέλου

Ισοζυγίου Μάζας

Στα προηγούμενα κεφάλαια έγινε αναφορά στην ανάγκη προσομοίωσης των κοιτασμάτων υδρογονανθράκων, όπως επίσης αναφέρθηκαν και τα εργαλεία με τα οποία μπορεί να πραγματοποιηθεί η παραπάνω διαδικασία (reservoir simulation, material balance method). Πιο συγκεκριμένα, έγινε μια λεπτομερής περιγραφή της μεθόδου ισοζυγίου μάζας (MIM), όπως είναι για παράδειγμα οι εφαρμογές της και οι βασικές αρχές που την διέπουν καθώς είναι η μέθοδος η οποία χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία. Αναλυτικότερα, όπως θα αναλυθεί και στη συνέχεια του κεφαλαίου ο υπό μελέτη ταμιευτήρας μοντελοποιήθηκε με τη χρήση του λογισμικού **MBal** το οποίο εμπεριέχει τη MIM σε συνδυασμό με άλλες μεθόδους της μηχανικής πετρελαίου.

3.1 Περιγραφή Λογισμικού MBal

Για την ανάπτυξη του μοντέλου προσομοίωσης του ταμιευτήρα “X” χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό **MBal** της σουίτας IPM (Integrated Production Modelling) της εταιρίας Petroleum Experts (PetEx). Η συγκεκριμένη σουίτα περιλαμβάνει διάφορα εργαλεία προσομοίωσης (**MBal**, GAP, PROSPER, PVTP, REVEAL και RESOLVE) ο συνδυασμός των οποίων επιτρέπει στο μηχανικό να σχεδιάζει εξ ολοκλήρου την εκμετάλλευση ενός κοιτάσματος, δηλαδή να μοντελοποιεί τόσο τον ταμιευτήρα όσο και τις διεργασίες που λαμβάνουν χώρα έξω από αυτόν όπως η πορεία των ρευστών μέσα από τις γεωτρήσεις παραγωγής, ο διαχωρισμός και η επεξεργασία τους στην επιφάνεια. Ειδικότερα, το λογισμικό **MBal**, το οποίο έχει χρησιμοποιηθεί στην παρούσα διπλωματική εργασία, αποτελεί εφαρμογή της Μεθόδου Ισοζυγίου Μάζας κι επομένως μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο για τον προσδιορισμό του μηχανισμού παραγωγής (με χρήση της μεθόδου Havlena-Odeh) όσο και για την πρόβλεψη της μελλοντικής παραγωγής. Σε κάθε περίπτωση, είναι απαραίτητο ο χρήστης να εισάγει όσο το δυνατόν ακριβέστερες πληροφορίες σχετικά με το πέτρωμα και τα ρευστά, ούτως ώστε τα μοντέλα τα οποία θα δημιουργηθούν να προσομοιώνουν με τη μεγαλύτερη δυνατή ακρίβεια το πραγματικό σύστημα του ταμιευτήρα υδρογονανθράκων.

Πιο αναλυτικά το συγκεκριμένο πρόγραμμα είναι χωρισμένο σε τρεις βασικούς τομείς^[15]. Στον τομέα εισαγωγής δεδομένων (input section), στον τομέα ελαχιστοποίησης του σφάλματος (history matching section) και τέλος στον τομέα της πρόβλεψης παραγωγής (production prediction section). Παρακάτω παρουσιάζονται επιγραμματικά οι λειτουργίες του καθενός.

1. Τομέας εισαγωγής δεδομένων:

όπου οι ακόλουθες πληροφορίες εισάγονται:

- οι γνωστές ή εκτιμώμενες παράμετροι του ταμιευτήρα υδρογονανθράκων,
- ο γνωστός ή εκτιμώμενος τύπος ταμιευτήρα νερού, όπως επίσης και οι ιδιότητες του,
- οι καμπύλες σχετικών διαπερατοτήτων των ρευστών που πληρούν τους πόρους του ταμιευτήρα,
- καταγεγραμμένα δεδομένα παραγωγής και εισπίεσης

2. Τομέας ελαχιστοποίησης σφάλματος:

όπου:

- χρησιμοποιείται μια γραφική μέθοδος (P/Z, Havlena Odeh) προκειμένου να υπολογιστεί η τιμή εκείνων των παραμέτρων του ταμιευτήρα νερού ή υδρογονανθράκων η οποία είναι άγνωστη,
- λαμβάνει χώρα μια επαναληπτική μέθοδος μη γραμμικής παλινδρόμησης ούτως ώστε να υπολογιστεί μαθηματικά η καλύτερη τιμή για ένα δεδομένο μοντέλο,
- πραγματοποιείται προσομοίωση της παραγωγής προκειμένου να ελεγχθεί η εγκυρότητα των αποτελεσμάτων μεταξύ των δύο παραπάνω μεθόδων

3. Τομέας πρόβλεψης παραγωγής:

όπου σε αυτό τον τομέα προσομοιώνεται η απόδοση του ταμιευτήρα κάνοντας τις κατάλληλες υποθέσεις σχετικά με:

- τον προγραμματισμό της παραγωγής και των πιθανών περιορισμών της

- τη μεταβολή της τιμής των σχετικών διαπερατοτήτων του πετρώματος του ταμιευτήρα ανά φάση που πληροί τους πόρους του, τέλος
- το πιθανό πρόγραμμα πραγματοποίησης της γεώτρησης.

3.2 Απαιτούμενες από το MBaI παράμετροι και ενδεδειγμένος τρόπος χρήσης του

Οι πληροφορίες οι οποίες πρέπει να εισαχθούν στο πρόγραμμα ούτως ώστε να είναι σε θέση να αναγνωρίσει τον μηχανισμό παραγωγής και να εκτελέσει πρόβλεψη παραγωγής είναι οι ακόλουθες:

Για την αναγνώριση του μηχανισμού παραγωγής:

- οι ογκομετρικοί συντελεστές (PVT) των ρευστών που φιλοξενούνται στους πόρους του συναρτήσει της πίεσης
- οι καταγραφές πιέσεων και παραγωγής για μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο

Επιπρόσθετα, για την πρόβλεψη της μελλοντικής παραγωγής απαιτούνται:

- οι παράμετροι του ταμιευτήρα, όπως είναι το πορώδες του πετρώματος του, οι αρχικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας που επικρατούν σε αυτόν, ο αρχικός όγκος του πετρελαίου που πληροί τους πόρους του (STOIIP), καθώς και ο όγκος της υπερκείμενης ζώνης αερίου, εάν υπάρχει (μέσω της παραμέτρου m)
- ο αποδεδειγμένος ή εκτιμώμενος τύπος του υδροφορέα (στην περίπτωση που υπάρχει) που επενεργεί στον ταμιευτήρα, όπως επίσης και οι ιδιότητές του,
- οι τιμές των σχετικών διαπερατοτήτων της κάθε φάσης (νερό, πετρέλαιο και αέριο) που καταλαμβάνουν τους πόρους του ταμιευτήρα συναρτήσει των βαθμών κορεσμού τους, και τέλος
- τα χαρακτηριστικά των γεωτρήσεων παραγωγής, όπως είναι για παράδειγμα η τιμή του συντελεστή παραγωγικότητας μιας γεώτρησης (PI).

Τα καταγεγραμμένα δεδομένα παραγωγής και οι PVT ιδιότητες του ρευστού αποτελούν μη αμφισβητούμενες παραμέτρους οι οποίες χρησιμοποιούνται από τη MIM προκειμένου να αναγνωριστεί ο μηχανισμός παραγωγής με χρήση της μεθόδου των Havlena και Odeh, η οποία αναπτύχθηκε στην παράγραφο §2.3 και δεν εμπλέκονται στην παλινδρόμηση (regression). Αντίθετα, ορισμένες από τις παραμέτρους οι οποίες εμφανίζουν αβεβαιότητα ως προς τις τιμές τους στο στάδιο αυτό εμπλέκονται στη διαδικασία αριστοποίησης (history matching). Στην περίπτωση αυτή, η βέλτιστη τιμή τους επαφίεται να προσδιοριστεί μέσω της διαδικασίας του history matching. Το ποιες από τις παραμέτρους αυτές θεωρούνται σταθερές και ποιες ρυθμιζόμενες εξαρτάται από τα διαθέσιμα δεδομένα και τη φύση του συγκεκριμένου ταμιευτήρα. Ως παράδειγμα αναφέρονται τα χαρακτηριστικά του υδροφορέα (π.χ. ακτίνα, διαπερατότητα κλπ.) τα οποία μπορεί να είναι πλήρως, μερικώς ή καθόλου διαθέσιμα από τις γεωλογικές μελέτες.

Τέλος, αφού αναγνωριστεί ο μηχανισμός παραγωγής του ταμιευτήρα και προσδιοριστεί η βέλτιστη τιμή των παραμέτρων που τον περιγράφουν μέσω του history matching, το μοντέλο κρίνεται αξιόπιστο και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη της παραγωγής μιας μεταγενέστερης περιόδου.

Αναλυτικότερα για τον ταμιευτήρα «X» τα μέχρι στιγμής διαθέσιμα δεδομένα είναι οι ιδιότητες PVT του ρευστού του ταμιευτήρα στην πίεση του σημείου φυσαλίδας του από δείγμα του που είχε ανακτηθεί κατά την περίοδο εξερεύνησης του κοιτάσματος, όπως επίσης και ο κορεσμός του πετρώματος του ανά πληρούσα φάση από μελέτες δειγμάτων πυρήνων που είχαν μετρηθεί πειραματικά. Επιπρόσθετα, όσον αφορά το STOIP αλλά και την αναλογία μεταξύ υγρής και της αέριας φάσης εντός του ταμιευτήρα (m) έγινε μια προσέγγιση αυτών από γεωλογικές και γεωφυσικές μελέτες. Το πορώδες και ο κρίσιμος βαθμός του υπολειμματικού νερού του ταμιευτήρα επίσης έχουν υπολογιστεί από τους γεωλόγους και τους γεωφυσικούς. Τέλος, όσον αφορά τις ιδιότητες του υποκείμενου ταμιευτήρα νερού, λόγω του γεγονότος ότι το κοίτασμα βρίσκεται υπό διερεύνηση, θεωρήθηκε σκόπιμο να εισαχθεί μια απλουστευμένη μέθοδος προσομοίωσης του

(Fetkovich method) με τις τιμές των παραμέτρων που εμπεριέχονται σε αυτή να λαμβάνονται με βάση την εμπειρία των μηχανικών και των γεωλόγων της διαχειρίστριας εταιρίας αλλά και την γνώση που προκύπτει από άλλα κοιτάσματα τα οποία θεωρήθηκαν ως ανάλογα.

Στις επόμενες παραγράφους αναλύεται η εφαρμογή της μεθόδου MIM για τη μοντελοποίηση του κοιτάσματος «X», δηλαδή αναγνωρίζονται οι παράμετροι των οποίων οι τιμές συμπεριλαμβάνονται στα διαθέσιμα δεδομένα που περιγράφηκαν παραπάνω καθώς και αυτές των οποίων οι τιμές είναι άγνωστες ή αβέβαιες και των οποίων απαιτείται η βελτιστοποίησή τους. Επίσης, αναλύεται ο τρόπος με τον οποίο κάθε παράμετρος εισάγεται στο περιβάλλον **MBal** καθώς και η επίδραση της κάθε παραμέτρου στην τελική πρόβλεψη παραγωγής. Τέλος, δίνονται οι τιμές των γνωστών παραμέτρων οι οποίες σχετίζονται με τον ταμειυτήρα και με τις γεωτρήσεις παραγωγής.

3.3 Εφαρμογή της MIM για τη μελέτη του κοιτάσματος «X»

Παραπάνω αναφέρθηκαν τα γενικά βήματα τα οποία πραγματοποιούνται προκειμένου να μοντελοποιηθεί ένα σύστημα υδρογονανθράκων με χρήση της Μεθόδου Ισοζυγίου Μάζας. Στην παρούσα διπλωματική, όπως έχει ήδη αναφερθεί, δεν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα παραγωγής καθώς το συγκεκριμένο κοίτασμα «X» αποτελεί μια καινούρια ανακάλυψη. Καθίσταται σαφές λοιπόν ότι η MIM δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί ούτε για να αναγνωρίσει τον μηχανισμό παραγωγής αυτού του ταμειυτήρα αλλά ούτε και για τη βελτιστοποίηση των τιμών των παραμέτρων του. Επομένως, η μόνη λειτουργία της μεθόδου η οποία μπορεί να υλοποιηθεί λόγω των διαθέσιμων δεδομένων είναι η πρόβλεψη μελλοντικής παραγωγής, χωρίς να προηγηθεί history matching στηριζόμενοι σε εύλογες εκτιμήσεις. Η αβεβαιότητα σχετικά με τις τιμές των παραμέτρων που υπεισέρχονται στους υπολογισμούς (π.χ. καμπύλες σχετικών διαπερατοτήτων, αποθέματα κλπ) οδηγεί σε αβεβαιότητα των αποτελεσμάτων της συγκεκριμένης διαδικασίας καθώς, όσο δεν υπάρχουν ακόμη

δεδομένα παραγωγής, δεν μπορεί να ελεγχθεί το κατά πόσο το ανεπτυγμένο μοντέλο προσομοιώνει με ακρίβεια το πετρελαϊκό σύστημα το οποίο κλήθηκε να περιγράψει.

Με βάση τα παραπάνω, κρίνεται απαραίτητη η κατ' εκτίμηση επιλογή των κατάλληλων τιμών των αμφισβητούμενων παραμέτρων του συστήματος με βάση την εμπειρία του μηχανικού ταμιευτήρων και όχι με την διαδικασία ελαχιστοποίησης σφάλματος, όπως το σύνηθες history matching. Επομένως, δίνοντας διαφορετικές τιμές στις «αβέβαιες» μεταβλητές, με τη μέθοδο της δοκιμής και σφάλματος επιλέγονται τελικά αυτές που οδηγούν στη δημιουργία ενός μοντέλου του οποίου οι προβλέψεις παραγωγής είναι λογικές και επιβεβαιώνουν τη φυσική εμπειρία. Ως παράδειγμα αναφέρεται το γεγονός ότι, με βάση το σχεδιασμό της εκμετάλλευσης του κοιτάσματος «Χ», υπολογίζεται ότι οι διατρήσεις θα γίνουν στο ύψος της ζώνης πετρελαίου, μακριά από τις διεπιφάνειες προς το νερό και το υπερκείμενο αέριο. Επομένως, οι τιμές των παραμέτρων που θα κληθούν να περιγράψουν το σύστημα υδρογονανθράκων θα πρέπει να επιλεγούν έτσι ώστε το παραγόμενο *GOR* να είναι ίσο ή ελαφρά μεγαλύτερο από το R_s της πετρελαϊκής φάσης.

Τέλος, προτού γίνει αναφορά τόσο στα κριτήρια τα οποία χρησιμοποιήθηκαν ούτως ώστε τα δημιουργούμενα μοντέλα του ταμιευτήρα να χαρακτηριστούν αξιόπιστα αλλά και γενικότερα στις παραμέτρους που χαρακτηρίζουν τον ταμιευτήρα «Χ», κρίθηκε σκόπιμο να αναφερθούν ονομαστικά τα διαθέσιμα δεδομένα τα οποία θεωρούνται βέβαια αλλά και εκείνα των οποίων η τιμή θεωρείται αβέβαιη.

1 Βέβαια δεδομένα

- PVT δεδομένα – θερμοδυναμικές ιδιότητες του ρευστού
- STOIIP, GIIP, m
- Συμπίεστικότητα του πετρώματος του ταμιευτήρα

2 Αβέβαια δεδομένα

- Σχετική διαπερατότητα του πετρώματος του ταμιευτήρα

- Όγκος ταμιευτήρα νερού

Παρακάτω παρουσιάζονται τα κριτήρια τα οποία δημιουργήθηκαν ούτως ώστε να μπορέσει ο μηχανικός να αξιολογήσει την ορθότητα των αποτελεσμάτων των δημιουργούμενων μοντέλων, αλλά και περιγράφονται αναλυτικά οι τιμές των δεδομένων που εισήχθησαν στο πρόγραμμα.

3.3.1 Κριτήρια αξιολόγησης μοντέλων του ταμιευτήρα

Σε ό,τι αφορά τα κριτήρια, τα οποία επιτρέπουν στις προβλέψεις να χαρακτηριστούν ως «φυσικά λογικές», και τα οποία πρέπει να ικανοποιεί το μοντέλο προκειμένου να προσομοιώνει όσο το δυνατόν ακριβέστερα την πραγματικότητα, αυτά ορίστηκαν από τους μηχανικούς και είναι τα ακόλουθα:

- η τιμή του λόγου του παραγόμενου αερίου ως προς το πετρέλαιο (GOR) στην αρχή της εκμετάλλευσης πρέπει να είναι παραπλήσια με αυτή του διαλελυμένου αερίου στη μάζα του πετρελαίου (R_s)
- η τιμή του παραγόμενου αερίου ως προς το πετρέλαιο (GOR) σε μεταγενέστερα χρόνια της εκμετάλλευσης να μην είναι αφύσικα υψηλή, και τέλος
- όπως προκύπτει από αντίστοιχα κοιτάσματα ανά τον κόσμο^[16], η μέγιστη τιμή του συντελεστή αποληψιμότητας λόγω πρωτογενούς παραγωγής οφειλόμενη στην συνδυασμένη δράση της υπερκείμενης ζώνης αερίου και του υποκείμενου ταμιευτήρα νερού λαμβάνει τιμές μεταξύ 20 και 30 %

3.4 Περιγραφή παραμέτρων που υπεισέρχονται στη δημιουργία του μοντέλου MIM του ταμιευτήρα «X» με χρήση του MBal

Στη παρούσα παράγραφο αναφέρονται όλα τα δεδομένα τα οποία σχετίζονται με τον ταμιευτήρα και τα οποία εισήχθησαν στο πρόγραμμα προκειμένου να δημιουργηθεί το μοντέλο MIM.

3.4.1 PVT δεδομένα – Θερμοδυναμικές ιδιότητες του ρευστού

Καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης, πρέπει να είναι γνωστές οι τιμές των ογκομετρικών συντελεστών (PVT) του ρευστού για κάθε πίεση μεταξύ της αρχικής πίεσης και της πίεσης εγκατάλειψης του ταμιευτήρα, προκειμένου να μπορούν να υπολογιστούν οι μεταβολές των όγκων και κατ' επέκταση ο βαθμός κορεσμού των φάσεων καθ' όλη την διάρκεια της εκμετάλλευσης του κοιτάσματος. Αυτά τα δεδομένα είναι δυνατόν να προκύψουν είτε από τη χρήση μιας καταστατικής εξίσωσης (Equation of State - EoS), εφόσον ένα τέτοιο μοντέλο είναι διαθέσιμο ή με τη μέθοδο που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική, δηλαδή τη χρήση πινάκων τιμών PVT (PVT tables).

Στην πρώτη περίπτωση, ένα EoS μοντέλο παρέχει την δυνατότητα στον χρήστη να προσδιορίσει τον όγκο του υπό μελέτη ρευστού σε οποιοσδήποτε συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας καθώς και τον όγκο των προϊόντων στις επιφανειακές συνθήκες, προσομοιώνοντας απευθείας εκτόνωση (flash) του υπό μελέτη ρευστού. Έτσι, ο ογκομετρικός συντελεστής σχηματισμού της υγρής φάσης, παραδείγματος χάριν, προκύπτει πολύ εύκολα από την διαίρεση των υπολογιζόμενων όγκων της υγρής φάσης σε συνθήκες ταμιευτήρα και σε συνθήκες επιφανείας. Με αντίστοιχες διαδικασίες προσδιορίζονται οι πυκνότητες, το R_s και το B_g σε οποιαδήποτε πίεση και θερμοκρασία. Σημειώνεται ότι στην περίπτωση που υπάρχουν πειραματικά μετρημένες τιμές των PVT ιδιοτήτων, το μοντέλο EoS θα πρέπει να έχει ρυθμιστεί κατάλληλα ως προς αυτές τις τιμές. Κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης παραγωγής, το λογισμικό κάνει παρεμβολή μεταξύ των τιμών που περιέχονται στους πίνακες PVT

προκειμένου να προσδιοριστούν οι τιμές τους σε κάθε τυχαία απαιτούμενη πίεση και θερμοκρασία.

Όταν δεν επιθυμείται ή δεν είναι εφικτή η χρήση μοντέλων EoS, οι τιμές των PVT ιδιοτήτων λαμβάνονται από πίνακες οι οποίοι παρέχουν τις τιμές για ένα πλέγμα πιέσεων και θερμοκρασιών, οι οποίες αναμένεται να απαντηθούν κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Στην περίπτωση που υπάρχουν πειραματικά μετρημένες τιμές των PVT ιδιοτήτων, αυτές έχουν προσδιοριστεί σε συγκεκριμένα βήματα πίεσης. Επομένως, για την κατασκευή των PVT πινάκων θα πρέπει να δημιουργηθούν συναρτήσεις παρεμβολής (interpolation) των πειραματικών δεδομένων ως προς την πίεση, οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν για τον προσδιορισμό της τιμής κάθε ιδιότητας σε οποιαδήποτε επιθυμητή πίεση του πλέγματος. Όταν δεν υπάρχουν διαθέσιμες μετρήσεις, τότε για τη δημιουργία πινάκων PVT των απαιτούμενων ιδιοτήτων χρησιμοποιούνται διάφορες συσχετίσεις οι οποίες καταρχήν προσδιορίζουν τις τιμές των ιδιοτήτων στην πίεση φυσαλίδας και στη συνέχεια τις τροποποιούν για κάθε άλλη πίεση μεταξύ της πίεσης φυσαλίδας και της πίεσης εγκατάλειψης. Για τον προσδιορισμό των τιμών των PVT ιδιοτήτων στην πίεση κορεσμού με χρήση των συσχετίσεων απαιτούνται μετρήσεις των επιφανειακά παραγόμενων ρευστών και των ιδιοτήτων τους όπως είναι η αναλογία της αέριας ως προς την υγρή φάση (formation *GOR*), η πυκνότητα της κάθε φάσης σε κανονικές συνθήκες όπως επίσης και η περιεκτικότητα του ρευστού (πετρέλαιο) σε αέριες ενώσεις μη υδρογονανθράκων. Οι διαθέσιμες συσχετίσεις για τον προσδιορισμό της πίεσης κορεσμού, των ογκομετρικών συντελεστών σχηματισμού των ρευστών του ταμιευτήρα, της ποσότητας του διαλελυμένου στην μάζα του πετρελαίου αερίου και της πυκνότητας στην πίεση βρασμού είναι αυτές των Glaso, Standing, Lasater, Vazquez-Beggs, Petrosky και Al-Marhoun.

Τέλος, όπως συμβαίνει στην παρούσα περίπτωση, πειραματικά μετρημένες τιμές των PVT ιδιοτήτων υπάρχουν αλλά μόνο για την πίεση φυσαλίδας και οι οποίες διαφέρουν ελαφρά από τις εκτιμώμενες τιμές με χρήση των συσχετίσεων. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται η δυνατότητα γραμμικής τροποποίησης των συσχετίσεων (regression) έτσι ώστε να εκμηδενιστούν οι διαφορές μεταξύ πειραματικών και

υπολογιζόμενων τιμών. Σημειώνεται ότι αν και οι περισσότερες συσχετίσεις οδηγούν σε παρόμοιες εκτιμήσεις για τις τιμές των PVT ιδιοτήτων, στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του Glaso^[17].

Για τη χρήση των συσχετίσεων απαιτείται η εισαγωγή των αρχικών συνθηκών θερμοκρασίας και πίεσης του κοιτάσματος οι οποίες έχουν προσδιοριστεί ίσες με $134.6\text{ }^{\circ}\text{F}$ ($57\text{ }^{\circ}\text{C}$) και $3,832\text{ psig}$ (26.4 MPa). Στη συνέχεια εισάγονται η πίεση φυσαλίδας και οι διαθέσιμες πειραματικές μετρήσεις των PVT ιδιοτήτων που περιλαμβάνουν τους ογκομετρικούς συντελεστές σχηματισμού υγρής και αέριας φάσης, το ιξώδες της υγρής φάσης όπως επίσης και την πυκνότητα της κάθε φάσης σε αυτή την πίεση. Τέλος, εισάγονται οι απαιτούμενες μετρήσεις επιφανειακών μεγεθών προκειμένου να μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι συσχετίσεις και να γίνει η παλινδρόμηση (regression).

<i>GOR σχηματισμού</i>	<i>(scf/STB)</i>	<i>650</i>
<i>Πυκνότητα πετρελαίου</i>	<i>(API)</i>	<i>27.6</i>
<i>Πυκνότητα αερίου</i>	<i>(sp. gravity)</i>	<i>0.773</i>
<i>Αλατότητα νερού</i>	<i>(ppm)</i>	<i>100,000</i>
<i>Mole % H₂S</i>		<i>11</i>
<i>Mole % CO₂</i>		<i>7</i>
<i>Mole % N₂</i>		<i>1.5</i>

Πίνακας 3.1: Δεδομένα επιφανειακών μετρήσεων ταμειευτήρα Χ

Οι πειραματικά μετρημένες τιμές των ογκομετρικών συντελεστών των φάσεων (B_o , B_g , B_w), του ιξώδους της πετρελαϊκής φάσης και του λόγου του παραγόμενου αερίου ως προς το υγρό (GOR) στο σημείο φυσαλίδας και οι οποίες

χρησιμοποιήθηκαν από το πρόγραμμα για το υπολογισμό των ιδιοτήτων του ρευστού για όλη την διάρκεια της πρόβλεψης παραγωγής είναι οι παρακάτω:

<i>Pressure</i>	<i>(psig)</i>	<i>3,832</i>
<i>GOR</i>	<i>(scf/STB)</i>	<i>650</i>
<i>Oil FVF</i>	<i>(RB/STB)</i>	<i>1.30205</i>
<i>Oil Viscosity</i>	<i>(centipoise)</i>	<i>1.64</i>
<i>Gas FVF</i>	<i>(ft³/scf)</i>	<i>0.00329</i>

Πίνακας 3.2: Ιδιότητες του πετρελαίου στο σημείο φυσαλίδας ταμιευτήρα Χ

Αφότου έγινε ταύτιση (μετά από regression) μεταξύ των πειραματικών μετρήσεων και των συσχετίσεων στην πίεση φυσαλίδας αποδείχθηκε πως η μέθοδος του Glaso, λόγω του πολύ μικρού σφάλματος που εμφάνισε μεταξύ της πειραματικής και της υπολογιζόμενης από το συσχετισμό τιμής μπορεί να θεωρηθεί πιο αξιόπιστη για τον προσδιορισμό της τιμής του ογκομετρικού συντελεστή της υγρής φάσης (B_o) όπως επίσης και του αερίου εν διαλύσει στη μάζα του πετρελαίου. Τέλος, η συσχέτιση των Beggs & Beal^[18] είναι αυτή που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό του ιξώδους του ρευστού σε κάθε τιμή της πίεσης καθ' όλη την διάρκεια προσομοίωσης της εκμετάλλευσης του κοιτάσματος.

3.4.2 Δεδομένα μοντέλου τανκ

Το επόμενο βήμα είναι η εισαγωγή των παραμέτρων του μοντέλου του τανκ, δηλαδή των χαρακτηριστικών του ταμιευτήρα. Οι τιμές αυτές αφορούν τον όγκο του πετρελαίου που πληροί τους πόρους του (STOIIP), τον όγκο της υπερκείμενης του πετρελαίου ζώνης αερίου, το πορώδες του σχηματισμού και τον υπολειμματικό βαθμός κορεσμού του νερού στους πόρους του ταμιευτήρα.

Σε ό,τι αφορά το STOIIP, όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 1 σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη του μοντέλου MIM του συγκεκριμένου ταμειυτήρα προκειμένου να υπολογιστεί το παραγωγικό δυναμικό του για διάφορα πιθανά σενάρια μεγέθους του ταμειυτήρα. Οι τιμές του STOIIP για κάθε σενάριο έχουν υπολογιστεί από γεωλογικές και γεωφυσικές μελέτες και κυμαίνονται μεταξύ περίπου 9 και 20 MMbbl. Με χρήση της στατιστικής μεθόδου Monte Carlo δημιουργήθηκε από τους γεωλόγους η στατιστική κατανομή^[19] του αναμενόμενου STOIIP και από την οποία λήφθηκαν οι τιμές οι οποίες εμφανίζουν συγκεντρωτική πιθανότητα υλοποίησης 10%, 50% και 90%. Τα αντίστοιχα σενάρια ονομάστηκαν P10, P50 και P90 με το πρώτο να αποτελεί το πιο αισιόδοξο σενάριο, κι επομένως με μικρή πιθανότητα υλοποίησης, ενώ το τελευταίο το πιο συντηρητικό. Σημειώνεται ότι για κάθε σενάριο, εκτός από τον όγκο του πετρελαίου εκτιμήθηκε από τους γεωλόγους της εταιρείας και ο όγκος που καταλαμβάνει η υπερκείμενη του πετρελαίου ζώνη αερίου, το πορώδες και ο υπολειμματικός βαθμός κορεσμού του νερού στους πόρους του ταμειυτήρα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι αυτά τα μεγέθη εξαρτώνται από το STOIIP κι επομένως όσο αυξάνεται η τιμή του τελευταίου τόσο θα αυξάνεται και ο όγκος της αέριας φάσης και αντίστοιχα θα μεταβάλλεται η τιμή και των υπόλοιπων παραμέτρων. Παρακάτω παρουσιάζονται οι τιμές των παραπάνω μεγεθών για κάθε ένα από τα τρία σενάρια που εξετάστηκαν :

	Σενάρια		
	<i>P10</i>	<i>P50</i>	<i>P90</i>
<i>STOIIP (MMbbl)</i>	<i>19.25</i>	<i>13.16</i>	<i>9.25</i>
<i>GIIP (Bcf)</i>	<i>35</i>	<i>23.92</i>	<i>16.81</i>
<i>Porosity (Φ)</i>	<i>0,07</i>	<i>0,03</i>	<i>0,02</i>
<i>Connate water saturation (Swc)</i>	<i>0,05</i>	<i>0,05</i>	<i>0,05</i>

Πίνακας 3.3: Χαρακτηριστικές παράμετροι των σεναρίων

Με βάση τα παραπάνω δεδομένα, η τιμή του λόγου του όγκου του αερίου ως προς τον όγκο του υγρού του ταμιευτήρα m υπολογίζεται να είναι ίση με 0.55 για όλα τα σενάρια.

Προκειμένου το λογισμικό **MBal** να χρησιμοποιήσει τις κατάλληλες συσχετίσεις, χρειάζεται να προσδιοριστεί ο τύπος του ρευστού που περιέχεται στον υπό μελέτη ταμιευτήρα. Στην προκειμένη περίπτωση πρόκειται για πετρέλαιο. Επίσης, απαιτείται η εισαγωγή των συνθηκών που επικρατούν στον ταμιευτήρα στην αρχή της εκμετάλλευσης, όπως φαίνεται στον επόμενο Πίνακα:

Τύπος ρευστού ταμιευτήρα	Πετρέλαιο	
Θερμοκρασία	<i>134.6</i>	<i>deg F</i>
Αρχική Πίεση	<i>3,832</i>	<i>psig</i>
m	<i>0.55</i>	

Πίνακας 3.4: Αρχικές επικρατούσες συνθήκες του ταμιευτήρα X

3.4.3 Ιδιότητες υδροφόρου ταμιευτήρα

Όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο §2.7, για τη μοντελοποίηση του υδροφορέα που επενεργεί στον ταμιευτήρα υδρογονανθράκων επιλέχθηκε η μέθοδος του Fetkovich. Τα δεδομένα που εισήχθησαν στο πρόγραμμα είναι ο όγκος του υδροφορέα, η τιμή του οποίου χρησιμοποιείται στον υπολογισμό της ποσότητας του νερού που θα εισχωρήσει εντός του ταμιευτήρα υδρογονανθράκων (W_e). Ακόμα, απαιτείται η ακτίνα του όπως επίσης και η τιμή της κατακόρυφης διαπερατότητας ούτως ώστε να είναι δυνατόν να υπολογιστεί ο ρυθμός με τον οποίο ο υδροφόρος ορίζοντας είναι ικανός να επανατροφοδοτεί με ρευστό και άρα ενέργεια το σύστημα, όπως φαίνεται και στον ακόλουθο πίνακα:

Μοντέλο		Fetkovich σταθερής κατάστασης
Ακτίνα Ταμιευτήρα	(m)	400
Όγκος υδροφορέα	(MMbbl)	300
Κατακόρυφη διαπερατότητα	(md)	150

Πίνακας 3.5: Εκτιμώμενες τιμές των παραμέτρων του ταμιευτήρα νερού

Όσον αφορά την μελέτη ευαισθησίας που εκτελέστηκε στο σενάριο P50 σχετικά με την επίδραση που ο υδροφόρος ταμιευτήρας μπορεί να έχει στην παραγωγή υδρογονανθράκων χρησιμοποιήθηκαν δύο τιμές σχετικά με τον όγκο του. αξίζει να σημειωθεί ότι, κατά γενική ομολογία, ο όγκος ενός ταμιευτήρα νερού περιορισμένης δράσης θα μπορούσε να θεωρηθεί σαν δεκαπλάσιος του STOIIP του ταμιευτήρα υδρογονανθράκων ($10 \cdot N$), ενώ ενός ισχυρού συστήματος υδροφόρου ταμιευτήρα συνήθως θεωρείται πως είναι έως εκατό φορές μεγαλύτερος του STOIIP ($100 \cdot N$).

	Σενάριο
	P50
Αδύναμος ταμιευτήρας νερού (MMbbl)	150
Ισχυρός ταμιευτήρας νερού (MMbbl)	300

Πίνακας 3.6: Μελέτη ευαισθησίας ως προς τον όγκο του ταμιευτήρα νερού για το σενάριο P50

3.4.4 Συμπιεστότητα πετρώματος

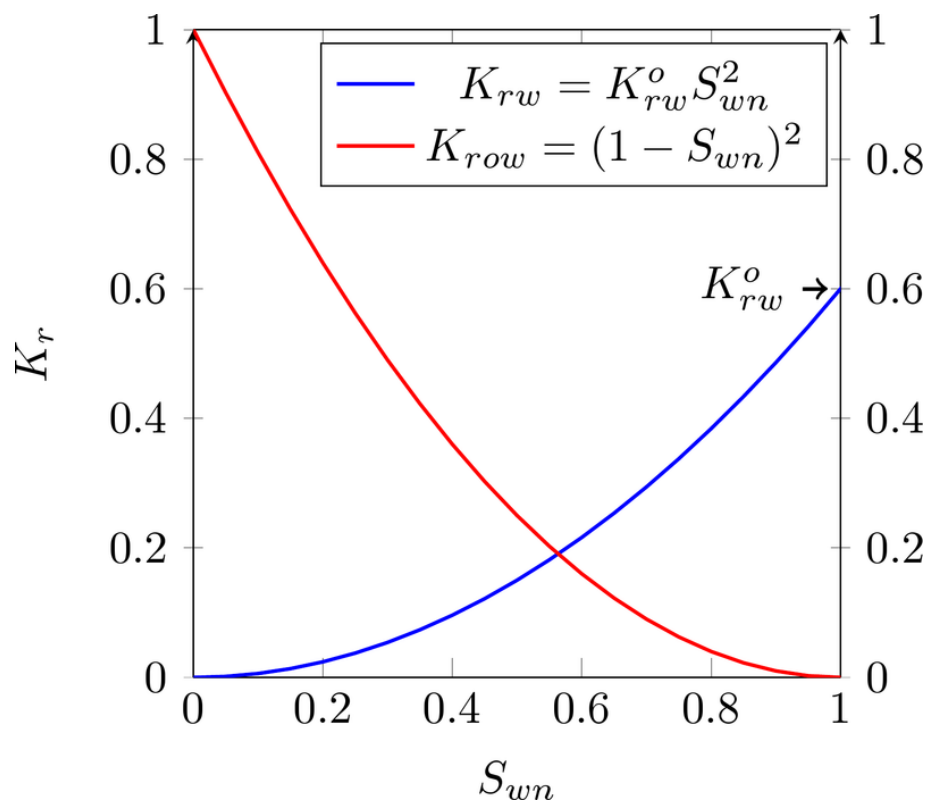
Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η συμπιεστότητα του πετρώματος, ακόμη κι αν λαμβάνει μικρές τιμές, συχνά επιδρά στους υπολογισμούς, κυρίως λόγω του γεγονότος ότι είναι υπεύθυνη για τη μείωση του διατιθέμενου όγκου του πορώδους του. Η συμπιεστότητα για πετρώματα του συγκεκριμένου τύπου έχει βρεθεί να κυμαίνεται από $5 \cdot 10^{-6}$ έως και $50 \cdot 10^{-6} \text{ psi}^{-1}$ [20]. Αναλυτικότερα, η εκτιμώμενη συμπιεστότητα του πετρώματος, όπως προκύπτει από τη βιβλιογραφία αλλά και από άλλα κοιτάσματα με παρόμοια γεωλογικά χαρακτηριστικά τα οποία χρησιμοποιήθηκαν ως ανάλογα κοιτάσματα είναι ίση με $2.56 \cdot 10^{-5} \text{ psi}^{-1}$.

3.4.5 Σχετική διαπερατότητα

Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο 2.4.1, κατά τη διάρκεια προσομοίωσης της παραγωγής η παροχή της κάθε φάσης προσδιορίζεται με τη χρήση των τιμών των σχετικών διαπερατοτήτων. Ο κορεσμός της κάθε φάσης για κάθε στιγμή της προσομοίωσης χρησιμοποιείται προκειμένου να υπολογιστεί η τιμή της σχετικής διαπερατότητας από τα αντίστοιχα διαγράμματα, η τιμή της οποίας με τη σειρά της χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της κινητικότητας (mobility) της φάσης και τέλος για τον υπολογισμό της παραγόμενης ποσότητάς της. Επομένως, οι σχετικές διαπερατότητες είναι πολύ σημαντικά δεδομένα που χρειάζεται να εισαχθούν στο

πρόγραμμα καθώς είναι εκείνες που καθορίζουν την ογκομετρική παροχή για κάθε βήμα πτώσης της πίεσης.

Το λογισμικό **MBal** χρησιμοποιεί την μέθοδο του Corey^[21] για τον προσδιορισμό των σχετικών διαπερατοτήτων των φάσεων που πληρούν τους πόρους του ταμιευτήρα. Σύμφωνα με τη συγκεκριμένη μέθοδο, για ένα σύστημα πετρελαίου/νερού εάν S_{wc} και S_{oc} είναι ο υπολειμματικός βαθμός κορεσμού της υδάτινης και της πετρελαϊκής φάσης αντίστοιχα, τότε οι σχετικές διαπερατότητες των ρευστών του ταμιευτήρα μπορούν να προσδιοριστούν από τις εξισώσεις, το σχήμα των οποίων φαίνεται στο ακόλουθο Σχήμα 3.2.



Διάγραμμα 3.1: Καμπύλες σχετικών διαπερατοτήτων νερού-πετρελαίου κατά Corey για εκθέτη ίσο με 2

Για τον υπολογισμό των σχετικών διαπερατοτήτων του πετρελαίου και του νερού από τις συσχετίσεις χρησιμοποιούνται οι δύο ακόλουθες εξισώσεις:

$$k_{row} = (1 - S_{wn})^{N_o} \quad (3.1)$$

$$k_{rw} = k_{row} \cdot S_{wn}^{N_w} \quad (3.2)$$

όπου η κανονικοποιημένη τιμή του βαθμού κορεσμού του νερού S_{wn} δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$S_{wn} = \frac{S_w - S_w^{(1)}}{1 - S_w^{(1)} - S_{oc}} \quad (3.3)$$

όπου,

$S_w^{(1)}$ ο κορεσμός του νερού στις αρχικές συνθήκες του ταμιευτήρα

S_w ο κορεσμός του νερού

S_{oc} ο υπολειμματικός βαθμός κορεσμού πετρελαϊκής φάσης

Οι εκθέτες N_o και N_w αποτελούν εμπειρικές παραμέτρους η τιμή των οποίων μπορεί να προσδιοριστεί είτε από πειραματικές μετρήσεις ενός δείγματος του πετρώματος του ταμιευτήρα είτε με τη χρήση του εργαλείου αριστοποίησης παραμέτρων (history matching) το οποίο αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Στην ουσία η τιμή των παραπάνω παραμέτρων καθορίζει το σχήμα των υπολογιζόμενων καμπυλών (ευθεία γραμμή ή γραμμή με τα κοίλα προς τα πάνω). Ο όρος k_{row} είναι γνωστός ως τελικό σημείο και ουσιαστικά υποδηλώνει τη μέγιστη τιμή που μπορεί να λάβει η σχετική διαπερατότητα του νερού στην συγκεκριμένη περίπτωση. Τέλος, κατά ανάλογο τρόπο με τα παραπάνω υπολογίζεται και η σχετική διαπερατότητα του αερίου-νερού.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα δεδομένα που εισήχθησαν στο πρόγραμμα για τον υπολογισμό των σχετικών διαπερατοτήτων με χρήση των συσχετίσεων κατά Corey. Σημειωτέον, ότι για την τιμή της σχετικής διαπερατότητας

της αέριας φάσης εκτελέστηκε μη αυτοματοποιημένη μελέτη ευαισθησίας της οποίας η ακριβής διαδικασία θα αναλυθεί στο επόμενο κεφάλαιο.

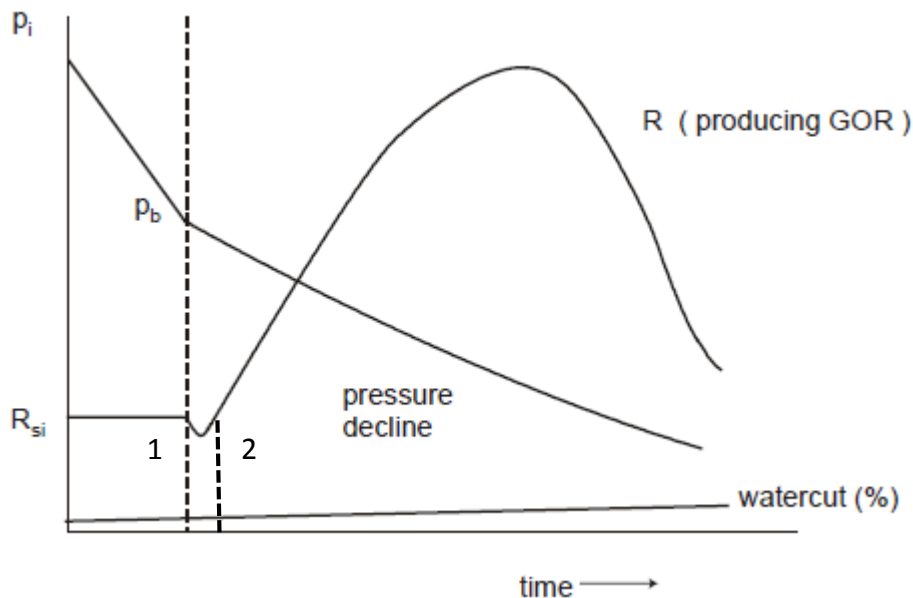
	<i>Residual saturation (fraction)</i>	<i>End point (fraction)</i>	<i>Exponent</i>
k_{rw}	0.05	0.7	2
k_{ro}	0.2	0.01	2

Πίνακας 3.7: Σχετικές διαπερατότητες

Αναλυτικότερα, όσον αφορά την σχετική διαπερατότητα του πετρελαίου και του νερού οι τιμές τους που εισήχθησαν στο πρόγραμμα είναι αυτές που υπολογίστηκαν από τις πειραματικές μελέτες επί δειγμάτων πυρήνων που πάρθηκαν κατά τη φάση των πρώτων μελετών του κοιτάσματος και που εμφανίζονται στον παραπάνω πίνακα.

Σε αντίθεση με τις υγρές φάσεις, η σχετική διαπερατότητα της αέριας φάσης απαιτεί ιδιαίτερο χειρισμό εξαιτίας του γεγονότος ότι, αν και ο υπό μελέτη ταμιευτήρας είναι διφασικός και το επιθυμητό για παραγωγή ρευστό είναι το πετρέλαιο και όχι το αέριο από την υπερκείμενη ζώνη, το λογισμικό **MBal** δεν μπορεί να αντιληφθεί τη θέση των διατρήσεων. Πράγματι, οι διατρήσεις θα γίνουν αποκλειστικά στη ζώνη του πετρελαίου και τα παραγόμενα στην επιφάνεια ρευστά, τουλάχιστον κατά τα πρώτα χρόνια της εκμετάλλευσης, αναμένεται να είναι πετρέλαιο και μικρές ποσότητες αερίου. Καθώς η πίεση του ταμιευτήρα μειώνεται, απελευθερώνεται αέριο μέσα στον ταμιευτήρα το οποίο, παρά την κινητικότητά του, δεν προλαβαίνει να διαχωριστεί από το υγρό και να μετακινηθεί προς την υπερκείμενη ζώνη (segregation) αλλά τμήμα του κατευθύνεται προς τη γεώτρηση παραγωγής και εισέρχεται στις διατρήσεις μαζί με ποσότητες πετρελαίου. Ως αποτέλεσμα, η ποσότητα αερίου που θα παραχθεί στην επιφάνεια να είναι ίση με αυτή που παρέμεινε διαλελυμένη στη μάζα του παραγόμενου υγρού (R_s) αυξημένη κατά ένα ποσοστό λόγω του αερίου του ταμιευτήρα που επίσης εισήλθε στις

διατηρήσεις. Επομένως, η αναμενόμενη τιμή του παραγόμενου GOR θα πρέπει να είναι λίγο μεγαλύτερη από αυτή του R_s .



Διάγραμμα 3.2: Τυπική Μεταβολή του GOR και της πίεσης ως προς τον χρόνο σε ταμιευτήρα πετρελαίου

Το παραπάνω γεγονός επιβεβαιώνεται και από το διάγραμμα 3.2 όπου απεικονίζεται το παραγόμενο GOR (R) ως προς το χρόνο στην περίπτωση ενός ταμιευτήρα ο οποίος στα πρώτα χρόνια της ζωής του είναι μονοφασικός και στη συνέχεια εξελίσσεται σε διφασικό. Όπως απεικονίζεται στα πρώτα χρόνια παραγωγής, μέχρι και τη χρονική στιγμή 1, το παραγόμενο GOR είναι σταθερό και αντιστοιχεί στην ποσότητα του αερίου που είναι αρχικά διαλελυμένη στη μάζα του πετρελαίου (R_{si}). Τη χρονική στιγμή 1 η πίεση του ταμιευτήρα γίνεται ίση με την πίεση κορεσμού του και υπό αυτές τις συνθήκες η τιμή του παραγόμενου GOR σε κάθε πτώση της πίεσης ισούται με την ποσότητα του αερίου το οποίο παραμένει διαλελυμένο στην πετρελαϊκή φάση (R_s). Το R_s , κι επομένως το παραγόμενο GOR , μειώνονται διαρκώς καθώς όλο και περισσότερο αέριο απελευθερώνεται από το ρευστό εντός του ταμιευτήρα αδυνατώντας ωστόσο να παραχθεί λόγω του μειωμένου κορεσμού του ($S_g \leq S_{gc}$). Αυτή η κατάσταση θα συνεχιστεί έως ότου αέριο εντός του ταμιευτήρα φτάσει την τιμή του κρίσιμου βαθμού κορεσμού του με

αποτέλεσμα να αρχίσει να κινείται έχοντας σαν αποτέλεσμα την αύξηση των παραγόμενων ποσοτήτων του. Στην περίπτωση του υπό μελέτη ταμειευτήρα «Χ», ο οποίος στις αρχικές του συνθήκες είναι διφασικός δηλαδή βρίσκεται στη χρονική στιγμή 2 του διαγράμματος το παραγόμενο, GOR τα πρώτα τουλάχιστον χρόνια της εκμετάλλευσης αναμένεται να λαμβάνει τιμές κοντινές του R_{si} .

Εάν τεθούν οι πειραματικά προσδιορισμένες τιμές του κρίσιμου βαθμού και της μέγιστης διαπερατότητας της αέριας φάσης, το MBal δεν μπορεί να μοντελοποιήσει σωστά την παραπάνω συμπεριφορά με αποτέλεσμα η παραγωγή να μην λάβει χώρα μόνο στη ζώνη του πετρελαίου. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το **MBal** δεν αντιλαμβάνεται ότι αέριο από την υπερκείμενη ζώνη δεν μπορεί να εισέλθει στις γεωτρήσεις, λόγω της θέσης των διατρήσεων, με αποτέλεσμα να προσμετρά τον όγκο της υπερκείμενης ζώνης στον προσδιορισμό του βαθμού κορεσμού. Ο υψηλός κορεσμός της αέριας φάσης από την πρώτη κιάλας ημέρα οδηγεί σε εξίσου υψηλές τιμές σχετικής διαπερατότητας και κατά συνέπεια σε απαράδεκτα υψηλές τιμές παραγόμενου αερίου και παραγόμενου GOR (βλέπε εξισώσεις 2.22, 2.24). Κατά συνέπεια, το **MBal** υπολογίζει την παραγόμενη ποσότητα αερίου θεωρώντας ότι ολόκληρο το αέριο που υπάρχει στον ταμειευτήρα, συμπεριλαμβανομένου αυτού της υπερκείμενης ζώνης μπορεί να κινηθεί προς τις διατρήσεις, με αποτέλεσμα να προβλέπεται ιδιαίτερα αυξημένη παραγωγή αερίου από την πρώτη κιάλας ημέρα.

Για να αντιμετωπιστεί το παραπάνω πρόβλημα κρίθηκε απαραίτητο να δοθεί τιμή στον κρίσιμο βαθμό κορεσμού του αερίου ίση με την τιμή του κορεσμού του στις αρχικές συνθήκες του ταμειευτήρα ($S_{gc} = 33\%$), ούτως ώστε στην αρχή της εκμετάλλευσης η αέρια φάση να είναι πρακτικά ακίνητη (να μην παράγεται δηλαδή) και να κινείται μόνο η πετρελαϊκή και υδάτινη φάση. Σε ό,τι αφορά τη μέγιστη τιμή της διαπερατότητας (k_{rg}) της αέριας φάσης, αυτή ρυθμίζει το σχήμα της καμπύλης Corey και τελικά την τιμή του παραγόμενου GOR , όταν το αέριο ξεπεράσει τον υπολειμματικό βαθμό κορεσμού του. Επομένως, απαιτήθηκε ο έλεγχος και η βελτιστοποίησή της έτσι ώστε η κινητικότητα του εντός του ταμειευτήρα να είναι τέτοια που θα αποτρέπει την παραγωγή αφύσικα μεγάλων ποσοτήτων αερίου στην επιφάνεια. Στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζονται αναλυτικά ορισμένοι από τους

ελέγχους που πραγματοποιήθηκαν ούτως ώστε να προσδιοριστεί η τιμή τόσο του κρίσιμου βαθμού κορεσμού του αερίου αλλά και η τιμή της μέγιστης σχετικής διαπερατότητας του στο μέγιστο βαθμό κορεσμού του.

3.5 Πρόβλεψη παραγωγής

Μετά την ανάπτυξη του μοντέλου του ταμιευτήρα, όπως αυτή παρουσιάστηκε στις προηγούμενες παραγράφους, είναι απαραίτητο να εισαχθούν τα δεδομένα της μιας ή των περισσότερων γεωτρήσεων παραγωγής ή και εισπίεσης, ανάλογα με το σχέδιο εκμετάλλευσης του κοιτάσματος που έχει οριστεί από τον διαχειριστή. Για το συγκεκριμένο κοιτάσμα, έχει αποφασιστεί ότι στα πρώτα χρόνια ζωής του κοιτάσματος θα πραγματοποιηθούν δυο παραγωγικές γεωτρήσεις. Οι γεωτρήσεις που έχουν εισαχθεί στο πρόγραμμα με πανομοιότυπα χαρακτηριστικά, συμβολίζονται ως W_1 και W_2 , με τη δεύτερη να ξεκινά παραγωγή δύο μήνες αργότερα από την πρώτη. Και οι δύο θα παράγουν μόνο από τη ζώνη του πετρελαίου και όχι από την υπερκείμενη ζώνη αερίου ή από τον υδροφόρο ταμιευτήρα. Η πρόβλεψη παραγωγής ορίστηκε να ξεκινάει τον Ιούνιο του 2015 και να ολοκληρώνεται τον Ιούνιο του 2035 για τη γεώτρηση W_1 . Αντίστοιχα, τον Αύγουστο του 2015 έχει σχεδιαστεί να μπει σε λειτουργία η άλλη γεώτρηση παραγωγής, W_2 , η οποία και αυτή έχει προγραμματιστεί να σταματήσει να παράγει τον Ιούνιο του 2035 ή νωρίτερα εάν ικανοποιηθούν οι συνθήκες εγκατάλειψης που ο χρήστης έχει καθορίσει.

3.5.1 Περιορισμοί για την πρόβλεψη παραγωγής

Όπως τονίστηκε προηγουμένως κύριος σκοπός όλης της εργασίας είναι να σχηματιστεί μια κατά το δυνατόν ακριβέστερη εκτίμηση σχετικά με το παραγωγικό δυναμικό του συγκεκριμένου κοιτάσματος, δηλαδή τη δυνατή παραγωγή υδρογονανθράκων στην επιφάνεια με βάση τους επιθυμητούς ρυθμούς. Οι ελάχιστοι και μέγιστοι ρυθμοί παραγωγής (παροχές) που τέθηκαν στο σχέδιο εκμετάλλευσης είναι:

Γεώτρηση	Ημερομηνία έναρξης	Ελάχιστη παραγωγή πετρελαίου (STB/day)	Μέγιστη παραγωγή πετρελαίου (STB/day)
W_1	01/06/2015	50	1,000
W_1+W_2	01/08/2015	100	2,000

Πίνακας 3.8: Περιορισμοί για την πρόβλεψη παραγωγής του ταμειυτήρα X

Όπως φαίνεται και από τα παραπάνω, η ελάχιστη ανεκτή παραγωγή σε πετρέλαιο, όταν παράγουν και οι δύο γεωτρήσεις, έχει οριστεί να είναι 100 STB/day . Μικρότερη παραγωγή από την προαναφερθείσα κρίνεται απαγορευτική, καθώς με βάση την τιμή του βαρελιού του αργού πετρελαίου τα ημερήσια έσοδα (συμπεριλαμβανομένων των αποσβέσεων) θα ήταν λιγότερα από τα έξοδα και για αυτόν τον λόγο θα πρέπει να εγκαταλειφθεί το κοίτασμα. Επίσης, σαν μέγιστη παραγωγή έχουν οριστεί τα 2,000 STB/day . Παρά το γεγονός ότι υπάρχουν ενδείξεις ότι ο ταμειυτήρας μπορεί να παραγάγει με μεγαλύτερο ρυθμό, σύμφωνα με τον σχεδιασμό εκμετάλλευσης του κοιτάσματος έχει αποφασιστεί η μέγιστη παροχή να μην ξεπεράσει τα 2,000 STB/day . Με αυτόν τον τρόπο, παρόλο που από τη μια πλευρά θα καθυστερήσει η απόσβεση της επένδυσης, από την άλλη προστατεύεται η μακροχρόνια βιωσιμότητα της, διότι με μεγαλύτερες παροχές αυξάνεται ο κίνδυνος να εμφανιστεί το φαινόμενο του κώνου νερού ή αερίου (water/gas breakthrough) έχοντας σαν αποτέλεσμα τον εγκλωβισμό του πετρελαίου εντός του ταμειυτήρα και την αύξηση παραγωγής των άλλων φάσεων (νερού και αερίου).

3.5.2 Χαρακτηριστικά γεωτρήσεων παραγωγής

Μια παράμετρος καθοριστικής σημασίας είναι η τιμή του δείκτη παραγωγικότητας των γεωτρήσεων (Productivity Index) καθώς αυτός ουσιαστικά υποδεικνύει την δυνατότητα των γεωτρήσεων να άγουν στην επιφάνεια τα παραγόμενα από τον ταμιευτήρα ρευστά και εισάγει την έννοια του χρόνου στους υπολογισμούς όπως αναλύθηκε και στην ενότητα 2.4. Από τα τεστ παραγωγής (DST) που είχαν γίνει κατά την περίοδο εξερεύνησης του συγκεκριμένου κοιτάσματος έχει υπολογιστεί ότι ο δείκτης παραγωγικότητας ήταν 2.88 STB/day/psi . Η συγκεκριμένη τιμή είναι αρκετά χαμηλή συγκρινόμενη με τις συνήθεις τιμές το συγκεκριμένο μέγεθος λαμβάνει ($6-10 \text{ STB/day/psi}$).

Σχετικά με την απόδοση των γεωτρήσεων, την δυνατότητα τους δηλαδή να μεταφέρουν ρευστά από τον ταμιευτήρα στην επιφάνεια, το λογισμικό IPM της PetEx παρέχει στον χρήστη διάφορες επιλογές, οι οποίες προϋποθέτουν τη χρήση επιμέρους προγραμμάτων όπως είναι το Prosper. Με το συγκεκριμένο λογισμικό καθορίζεται λεπτομερώς η σχέση μεταξύ πίεσης φρέατος (bottom hole pressure) και παροχής λαμβάνοντας υπόψιν τις ιδιότητες της σωλήνωσης παραγωγής καθώς και το καθεστώς ροής των ρευστών. Κυρίαρχη παράμετρος η οποία χρησιμοποιείται στους υπολογισμούς της πρόβλεψης παραγωγής είναι η πίεση ροής του ταμιευτήρα στην περιοχή των διατρήσεων κάθε χρονική στιγμή της περιόδου παραγωγής, ούτως ώστε να μπορεί να υπολογιστεί η πτώση πίεσης ΔP , αφαιρώντας από την εκάστοτε μέση πίεση του ταμιευτήρα την πίεση ροής, που είναι και η κινητήριος δύναμη του συστήματος.

Αναλυτικότερα, στην περίπτωση γεωτρήσεων οι οποίες παράγουν μόνο υγρή φάση (πετρέλαιο, νερό) και όχι αέριο, η μέχρι στιγμής εμπειρία έχει δείξει ότι η σχέση μεταξύ της πίεσης ροής του φρέατος και της παροχής των ρευστών (Inflow Performance Relationship) υπό καθεστώς κυλινδρικής ροής είναι γραμμική και περιγράφεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$Q = PI \cdot (\overline{P}_R - P_{wf}) \quad (3.4)$$

όπου:

Q	η παροχή της παραγόμενης φάσης (πετρέλαιο-νερό), STB/day
PI	δείκτης παραγωγικότητας της γεώτρησης, $STB/day/psi$
\overline{P}_R	μέση πίεση του ταμιευτήρα, psi
P_{wf}	πίεση ροής εντός της γεώτρησης, psi

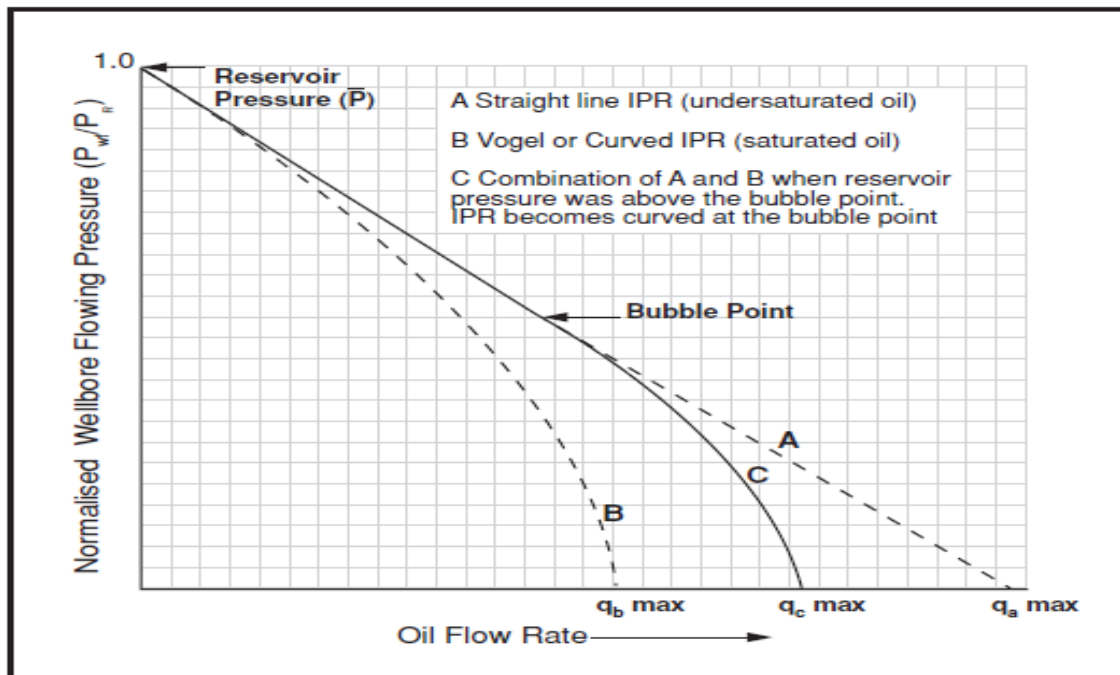
Στην περίπτωση γεωτρήσεων που παράγουν και υγρή αλλά και αέρια φάση (διφασική ροή), δεν εμφανίζεται γραμμικότητα μεταξύ της πίεσης ροής της γεώτρησης και της παροχής των παραγόμενων φάσεων, αλλά τα δύο παραπάνω μεγέθη περιγράφονται από την εξίσωση που διατύπωσε ο Vogel^[22] και η οποία είναι η ακόλουθη:

$$\frac{Q}{Q_{\max}} = 1 - 0.2 \cdot \left(\frac{P_{wf}}{\overline{P}_R} \right) - 0.8 \cdot \left(\frac{P_{wf}}{\overline{P}_R} \right)^2 \quad (3.5)$$

όπου:

Q_{\max}	η μέγιστη παραγωγική ικανότητα της γεώτρησης, STB/day
------------	---

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται η σύγκριση μεταξύ τυπικών προφίλ των παροχών παραγωγής συναρτήσει της πτώσης της πίεσης στην περίπτωση ενός ακόρεστου ταμιευτήρα (γράφημα Α) και στην περίπτωση ενός κορεσμένου ταμιευτήρα υδρογονανθράκων, ο οποίος παράγει και υγρή αλλά και αέρια φάση (γράφημα Β). Εμφανίζεται επίσης και η γραμμή C η οποία αντιπροσωπεύει την κατάσταση κατά την οποία η μέση πίεση του ταμιευτήρα \overline{P}_R είναι μεγαλύτερη από την πίεση του σημείου φουσαλίδας του, αλλά εντός της γεώτρησης η πίεση P_{wf} φτάνει τιμές χαμηλότερες της πίεσης κορεσμού του ρευστού.



Διάγραμμα 3.3: Σχέση απόδοσης γεωτρήσεων

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι προκειμένου να λυθεί το πρόβλημα του «reservoir deliverability», δηλαδή του προσδιορισμού της παροχής ανά φάση που εισέρχεται στη γεώτρηση τόσο στην περίπτωση που παράγεται μόνο υγρή φάση (εξίσωση 3.4) όσο και όταν η παραγωγή είναι διφασική (εξίσωση 3.5), απαιτείται η γνώση της πίεσης P_{wf} . Για να υπολογιστεί η πίεση αυτή, πρέπει να είναι γνωστή η πίεση της κεφαλής της γεώτρησης (wellhead pressure) και σε αυτή να προστεθεί η πτώση πίεσης ΔP της γεώτρησης (λόγω βαρύτητας, τριβών στον αγωγό και ιξώδους συμπεριφοράς των ρευστών). Στην παρούσα διπλωματική εργασία δεν μοντελοποιήθηκε η ροή στις γεωτρήσεις παραγωγής με τη χρήση εξειδικευμένων προγραμμάτων (πχ Prosper) προκειμένου να προσδιοριστεί η απώλεια πίεσης ΔP αλλά, αντίθετα, έγινε χρήση μιας απλούστερης προσέγγισης η οποία βασίζεται στη γνώση των τιμών του δείκτη παραγωγικότητας (PI) και στη χρήση μιας σταθερής τιμής της πίεσης P_{wf} στο βάθος των διατρήσεων καθ' όλη τη διάρκεια της εκμετάλλευσης ίσης με 1,200 psi. Η συγκεκριμένη παραδοχή χρησιμοποιείται συχνά στη μοντελοποίηση απλών φρεάτων παραγωγής και βασίζεται στην παραδοχή ότι η παροχή στην επιφάνεια θα μεταβάλλεται όπως απαιτείται (ανάλογα με το άνοιγμα

του choke) προκειμένου η πίεση στις διατρήσεις να παραμένει σταθερή. Επομένως, οι σχέσεις που συνδέουν την παροχή Q με την πτώση της πίεσης ΔP επαρκούν για τον υπολογισμό της απόδοσης του ταμειευτήρα.

Κεφάλαιο 4

Αποτελέσματα

4.1 Εισαγωγή

Στο προηγούμενο κεφάλαιο έγινε αναφορά στην αναγκαιότητα προσδιορισμού των κατάλληλων τιμών των παραμέτρων που περιγράφουν το μοντέλο ισοζυγίου μάζας του υπό μελέτη ταμιευτήρα «Χ» με το λογισμικό **MBal** προκειμένου η πρόβλεψη παραγωγής να ικανοποιεί διάφορα κριτήρια και φυσικούς περιορισμούς, τα οποία στη συνέχεια περιγράφηκαν και ποσοτικοποιήθηκαν. Επίσης, τεκμηριώθηκε ότι οι παράμετροι που εμφανίζουν αβεβαιότητα ως προς την τιμή τους είναι ο όγκος του περιεχόμενου νερού στον υδροφόρο ταμιευτήρα και ο όγκος των υδρογονανθράκων που πληρούν τους πόρους του ταμιευτήρα υδρογονανθράκων, STOIIP. Τέλος, διευκρινίστηκε ότι η τιμή της σχετικής διαπερατότητας της αέριας φάσης έχει σημαντική επίπτωση στον υπολογισμό των παραγόμενων ποσοτήτων ρευστών και απαιτεί ειδικό χειρισμό. Το παραπάνω γεγονός οφείλεται στην αδυναμία του **MBal** να μοντελοποιήσει τη μέθοδο παραγωγής που έχει σχεδιαστεί, δηλαδή ότι η παραγωγή θα λάβει χώρα μόνο από την ζώνη του πετρελαίου και όχι από την υπερκείμενη ζώνη αερίου. Στο παρόν κεφάλαιο αναλύονται τα σενάρια παραγωγής τα οποία δοκιμάστηκαν, η μεθοδολογία προσδιορισμού της βέλτιστης τιμής των παραπάνω παραμέτρων και τα αποτελέσματα.

4.2 Επιλογή STOIIP για τη δημιουργία του μοντέλου MIM

Από το στατικό μοντέλο του κοιτάσματος «Χ» και την στατιστική κατανομή του STOIIP που προέκυψε από τις γεωλογικές μελέτες (με χρήση της μεθόδου Monte Carlo), όπως έχει ήδη αναφερθεί, επιλέχτηκαν τρεις αντιπροσωπευτικές τιμές του STOIIP του κοιτάσματος (P10, P50, P90) με σκοπό να πραγματοποιηθεί πρόβλεψη παραγωγής για κάθε μια από αυτές ούτως ώστε να εκτιμηθούν τα διάφορα σενάρια που υπάρχει περίπτωση να απαντηθούν στην πραγματικότητα. Σημειωτέον, ότι αν και τα τρία σενάρια του STOIIP εμφανίζουν διαφορετική αθροιστική πιθανότητα υλοποίησης, 10%, 50% και 90% αντίστοιχα, η τιμή του STOIIP η οποία χρησιμοποιήθηκε σε όλους τους ελέγχους που πραγματοποιήθηκαν προκειμένου να δημιουργηθεί το αντιπροσωπευτικό μοντέλο του ταμιευτήρα είναι αυτή του P50

σεναρίου και η οποία είναι ίση με 13.16 MMSTB. Η συγκεκριμένη επιλογή εμφανίζει τη μέγιστη σημειακή πιθανότητα στην καμπύλη της κατανομής, δηλαδή, έχει τις περισσότερες πιθανότητες να απαντηθεί στην πραγματικότητα.

4.3 Σχετική διαπερατότητα φάσεων

Όσον αφορά τον προσδιορισμό των τιμών της σχετικής διαπερατότητας της αέριας φάσης με χρήση των συσχετίσεων Corey αποδόθηκε «αφύσικη» τιμή του υπολειμματικού βαθμού κορεσμού προκειμένου, όπως περιγράφηκε και στην §3.4.5, το δημιουργούμενο μοντέλο να λειτουργεί κατά τον επιθυμητό τρόπο, δηλαδή να παράγει μόνο πετρέλαιο και όχι αέριο από την υπερκείμενη ζώνη. Έτσι, παρόλο που κατά γενική ομολογία η συγκεκριμένη παράμετρος συνήθως λαμβάνει τιμές από 5-10 %, στην παρούσα εργασία εισήχθη τιμή 33%, δηλαδή ίση με την τιμή του κορεσμού του αερίου στις αρχικές συνθήκες του ταμειυτήρα.

Η παραπάνω τροποποίηση έγινε λόγω του γεγονότος ότι στην πραγματικότητα, στην περίπτωση παραγωγής από έναν διφασικό ταμειυτήρα όπως ο ταμειυτήρας «X» με τις διατρήσεις να βρίσκονται αποκλειστικά στην ζώνη του πετρελαίου το παραγόμενο ρευστό κατά τα πρώτα χρόνια της εκμετάλλευσης τουλάχιστον θα είναι μόνο το πετρέλαιο και το διαλελυμένο στην μάζα του αέριο. Εισάγοντας λοιπόν τον υπολειμματικό βαθμό κορεσμού του αερίου ίσο με τον αρχικό κορεσμό του επιτυγχάνεται αυτή η κατάσταση. Ταυτόχρονα, το αέριο δηλαδή της υπερκείμενης ζώνης τον πρώτο καιρό της εκμετάλλευσης δεν παράγεται λόγω του γεγονότος ότι η αέρια φάση παραμένει ακίνητη, μακριά από τις διατρήσεις, με αποτέλεσμα το παραγόμενο αέριο να προέρχεται αποκλειστικά από το διαλελυμένο στην μάζα του πετρελαίου.

4.4 Βελτιστοποίηση παραμέτρων

Όπως αναλύθηκε και στο §3.2.1, οι παράμετροι k_{rg} , V_w μεταβλήθηκαν από το χρήστη προκειμένου τα αποτελέσματα του υλοποιημένου μοντέλου να ικανοποιούν

τα κριτήρια που αναφέρθηκαν στην παράγραφο §3.3. Στη συνέχεια παρουσιάζεται ο πίνακας στον οποίο εμφανίζονται τα αποτελέσματα της πρόβλεψης παραγωγής για τις διάφορες τιμές των υπό ρύθμιση παραμέτρων (V_w και k_{rg}) οι οποίες δοκιμάστηκαν ούτως ώστε να προκύψει το τελικό μοντέλο του ταμιευτήρα.

N_o	V_w	k_{rg}	RF	N_p	G_p	W_p	W_e	t	$R_p^{(1)}$	$R_p^{(5)}$	$R_p^{(10)}$	R_p^{final}
	Input		Output									
1	150	0.2	25	3.4	16.8	0.4	3.6	2021	674	13327	-	15300
2	150	0.0005	67	8.9	13.5	2.6	3.6	2034	612	530	915	11700
3	300	0.0005	68	9	13.1	5.7	7.7	2039	620	539	693	12200
4	300	0.001	63	8.3	13.9	5.2	7.1	2037	646	650	1197	10200
5	300	0.2	34	4.5	17.1	2.1	7.1	2026	635	5000	11400	11700
6	300	0.5	30	4	17.3	1.9	7.1	2025	660	6900	11100	11083

Πίνακας 4.1 Αποτελέσματα μελέτης βελτιστοποίησης παραμέτρων

όπου:

V_w	όγκος του ταμιευτήρα νερού ($MMbbl$)
k_{rg}	μέγιστη τιμή της διαπερατότητας της αέριας φάσης
RF	συντελεστής αποληψιμότητας του κοιτάσματος (%)
N_p	συνολική παραγωγή πετρελαίου ($MMSTB$) τη στιγμή εγκατάλειψης του ταμιευτήρα
G_p	συνολική παραγωγή αερίου ($MMscf$) τη στιγμή εγκατάλειψης του ταμιευτήρα
W_p	συνολική παραγωγή νερού ($MMSTB$) τη στιγμή εγκατάλειψης του ταμιευτήρα

W_e	συνολική εισροή νερού από τον υδροφόρο ταμιευτήρα (<i>MMbbl</i>)τη στιγμή εγκατάλειψης του ταμιευτήρα
t	έτος εγκατάλειψης του ταμιευτήρα
$R_p^{(1)}$	τιμή παραγόμενου GOR ένα χρόνο μετά την έναρξη της παραγωγής (<i>scf/STB</i>)
$R_p^{(5)}$	τιμή παραγόμενου GOR πέντε χρόνια μετά την έναρξη της παραγωγής (<i>scf/STB</i>)
$R_p^{(10)}$	τιμή παραγόμενου GOR δέκα χρόνια μετά την έναρξη της παραγωγής (<i>scf/STB</i>)
R_p^{final}	παραγόμενο GOR τη στιγμή εγκατάλειψης του ταμιευτήρα (<i>scf/STB</i>),

Προτού αναλυθούν τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη μελέτη ευαισθησίας και τα οποία αναφέρονται στον παραπάνω πίνακα, αξίζει να αναφερθεί ότι παρουσιάζονται επιλεκτικά μόνο ορισμένες από τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν ούτως ώστε να υποστηριχθούν τα συμπεράσματα της συγκεκριμένης διαδικασίας. Για τη σχετική διαπερατότητα της αέριας φάσης δοκιμάστηκε πληθώρα τιμών εκ των οποίων επιλέχθηκαν να παρουσιαστούν αυτές του παραπάνω πίνακα και οι οποίες αντιπροσωπεύουν ακραίες καταστάσεις με σκοπό να γίνει κατανοητή η επίδραση που μπορεί να έχει το συγκεκριμένο μέγεθος στους υπολογισμούς.

Όπως φαίνεται και από τον παραπάνω πίνακα, στις πρώτες δύο δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν, τα αποτελέσματα των οποίων παρουσιάζονται αντίστοιχα στις δύο πρώτες γραμμές, η τιμή της μεταβλητής της οποίας η επίδραση στους υπολογισμούς ελέγχθηκε είναι αυτή της σχετικής διαπερατότητας του αερίου (k_{rg}) στο μέγιστο βαθμό κορεσμού του, ενώ ο όγκος του υδροφόρου ταμιευτήρα που εισήχθη είναι και στις δύο περιπτώσεις σταθερός και ίσος με μία μέτριοι μεγέθους τιμή 150 *MMbbl* , όπως αυτή καθορίστηκε στην παράγραφο §3.2.2.

Τα αποτελέσματα στην πρώτη δοκιμή φαίνονται, εν πρώτοις, ικανοποιητικά καθώς το μοντέλο πληροί τα περισσότερα από τα κριτήρια τα οποία τέθηκαν. Πιο αναλυτικά, ο τελικός συντελεστής αποληψιμότητας του κοιτάσματος (25%) είναι εντός του εύρους των αποδεκτών τιμών (20–30%) που έχουν απαντηθεί σε αντίστοιχα κοιτάσματα. Επίσης, το παραγόμενο GOR τον πρώτο χρόνο της παραγωγής είναι αποδεκτό καθώς η τιμή του (674 scf/STB) είναι παραπλήσια με αυτή του R_s (650 scf/STB). Ωστόσο, αμφιβολία για το συγκεκριμένο μοντέλο προκύπτει από το γεγονός ότι ήδη στο πέμπτο έτος παραγωγής η τιμή του παραγόμενου GOR γίνεται ιδιαίτερα υψηλή (13,327 scf/STB), γεγονός που στην πραγματικότητα δεν αναμένεται να λάβει χώρα τόσο σύντομα καθώς οι διατρήσεις θα πραγματοποιηθούν μόνο στην ζώνη του πετρελαίου και η παραγωγή διατηρείται σε σχετικά χαμηλά επίπεδα αποφεύγοντας το φαινόμενο εμφάνισης κώνου αερίου (gas coning).

Στη δεύτερη δοκιμή, το μοντέλο κρίνεται εξαρχής αναξιόπιστο χωρίς ανάγκη περαιτέρω διερεύνησης λόγω του γεγονότος ότι ο υπολογιζόμενος συντελεστής αποληψιμότητας από την πρόβλεψη παραγωγής κατά τη στιγμή της εγκατάλειψης προσδιορίστηκε ίσος με 67% γεγονός που υπερβαίνει κατά πολύ τις αποδεκτές τιμές σύμφωνα με τα φυσικά κριτήρια που έχουν οριστεί.

Γίνεται σαφές ότι τα παραπάνω σενάρια συνδυασμών των τιμών input του μοντέλου δεν είναι ήταν ικανά να προσομοιώσουν ικανοποιητικά τον υπό μελέτη ταμειυτήρα και για αυτό τον λόγο η διαδικασία εύρεσης της βέλτιστης τιμής της σχετικής διαπερατότητας του αερίου συνεχίστηκε. Στις επόμενες δοκιμές, η τιμή του όγκου του υδροφορέα εισήχθη ίση με 300 $MMbbl$, προκειμένου να ενισχυθεί ο ρόλος του εισερχόμενου νερού στη διατήρηση της πίεσης τα ταμειυτήρα και σε κάθε δοκιμή μεταβαλλόταν η τιμή της μέγιστης σχετικής διαπερατότητας του αερίου. Η συγκεκριμένη τιμή, όπως έχει ήδη αναλυθεί για τον όγκο του ταμειυτήρα νερού επιλέχθηκε λόγω του γεγονότος ότι με βάσει τις γεωλογικές εκτιμήσεις η πιθανότητα να απαντηθεί στην πραγματικότητα ένα ανάλογο μέγεθος είναι αρκετά αυξημένες. Επίσης, η τιμή της σχετικής διαπερατότητας της αέριας φάσης στο τρίτο σενάριο δοκιμών δεν μεταβλήθηκε (0.0005) προκειμένου να γίνει κατανοητή η επίδραση που

πιθανόν έχει μόνο η αλλαγή του όγκου του ταμιευτήρα νερού στους υπολογισμούς. Όπως προκύπτει όμως και από αυτό το σενάριο (τρίτη γραμμή του πίνακα), ο συντελεστής αποληψιμότητας που υπολογίζεται εξακολουθεί να λαμβάνει πολύ υψηλές τιμές γεγονός που οδηγεί στην απόρριψή του. Στο τέταρτο σενάριο κρίθηκε σκόπιμο η μέγιστη σχετική διαπερατότητα του αερίου να αυξηθεί και να λάβει την τιμή 0.001 (διπλάσια από την προηγούμενη) προκειμένου να ελεγχθεί κατά πόσο επηρεάζει τους υπολογισμούς και πιο συγκεκριμένα το συντελεστή αποληψιμότητας του οποίου η τιμή επιδιώκεται να μειωθεί. Όντως, το συγκεκριμένο μέγεθος μεταβλήθηκε και η νέα υπολογιζόμενη τιμή του είναι μικρότερη (63%) της προηγούμενης (68%) αλλά παρόλα αυτά, η τελική τιμή του συντελεστή αποληψιμότητας του κοιτάσματος εξακολουθεί να είναι ιδιαίτερα υψηλή έχοντας σαν αποτέλεσμα την απόρριψη και αυτού του σεναρίου.

Η μείωση του συντελεστή αποληψιμότητας οφείλεται στο γεγονός ότι λόγω της υψηλότερης τιμής της σχετικής διαπερατότητας στο μέγιστο βαθμό κορεσμού του, το αέριο έχει μεγαλύτερη κινητικότητα. Η υψηλότερη κινητικότητα του συνεπάγεται μεγαλύτερη παραγωγή αυτού, το οποίο όμως κατά κύριο λόγο τροφοδοτεί με ενέργεια το σύστημα εξαιτίας της αυξημένης συμπίεστικότητας του. Γίνεται εύκολα κατανοητό λοιπόν ότι όσο πιο γρήγορα παράγεται το αέριο τόσο πιο απότομα μειώνεται η πίεση με αποτέλεσμα η παροχή πετρελαίου να εξασθενεί χωρίς να παράγεται η υψηλότερη δυνατή ποσότητα.

Από τον πρώτο έλεγχο των πιθανών σεναρίων τα πιο ικανοποιητικά αποτελέσματα τα έχει δώσει το 1°. Για τον λόγο αυτό, κρίθηκε σκόπιμο να δημιουργηθεί ένα μοντέλο στο οποίο ο όγκος του υδροφορέα θα είναι μεγαλύτερος του πρώτου και ίσος με 300 *MMbbl* και η τιμή της μέγιστης σχετικής διαπερατότητας θα είναι η ίδια (0.2). Τα αποτελέσματα του συγκεκριμένου μοντέλου δείχνουν να ικανοποιούν καλύτερα τα κριτήρια τα οποία τέθηκαν για την αξιολόγηση των υλοποιημένων μοντέλων. Δηλαδή, ο συντελεστής αποληψιμότητας υπολογίζεται στο 34% . Επίσης, το παραγόμενο *GOR* στο 5°, 10° και το χρόνο εγκατάλειψης του κοιτάσματος (2026) λαμβάνει τιμές οι οποίες εμφανίζονται σαν λογικές καθ' όλη την παραγωγική ζωή του κοιτάσματος με την προϋπόθεση ότι το

βάθος των διατρήσεων δεν πρόκειται να μεταβληθεί εφόσον δεν θα γίνει recompletion, καθώς το πάχος της ζώνης απόληψης (payzone) είναι αρκετά μικρό. Η τιμή ωστόσο του παραγόμενου GOR του πρώτου χρόνου παραγωγής χρήζει βελτίωσης καθώς είναι μικρότερη αυτής του αρχικού R_s , γεγονός το οποίο δεν αναμένεται να συμβεί στην πραγματικότητα.

Η αναμενόμενη τιμή του GOR κατά τον πρώτο χρόνο της παραγωγής πρέπει να είναι κοντά στην τιμή του R_s , αυξημένη κατά τι πράγμα που οφείλεται στο απελευθερωμένο αέριο πέριξ της γεώτρησης εντός του ταμιευτήρα. Για τον λόγο αυτό θεωρήθηκε σκόπιμο να αυξηθεί η τιμή της σχετικής διαπερατότητας ούτως ώστε να είναι μεν ικανή η αέρια φάση να κινηθεί με μεγαλύτερη ευκολία αλλά όχι σε τέτοιο βαθμό ώστε η παραγωγή να λαμβάνει χώρα και από την υπερκείμενη ζώνη αερίου. Πράγματι, μεταβλήθηκε η τιμή της σχετικής διαπερατότητας σε 0.5 και τα αποτελέσματα του προσομοιωμένου μοντέλου στη δοκιμή αυτή κρίνονται ως απολύτως ικανοποιητικά, πληρώνοντας όλα τα κριτήρια τα οποία ορίστηκαν εξ' αρχής. Αναλυτικότερα, η τελική τιμή του συντελεστή αποληψιμότητας εκτιμάται σε 30% και επίσης και οι τιμές του παραγόμενου GOR για όλη τη διάρκεια παραγωγής υποδεικνύουν ότι το παραγόμενο ρευστό είναι μόνο πετρέλαιο.

4.5 Προβλέψεις παραγωγής του ταμιευτήρα «X»

Από τα παραπάνω έχει καταστεί σαφές ότι το υλοποιημένο μοντέλο MIM αντιπροσωπεύει ικανοποιητικά το σύστημα του ταμιευτήρα τον οποίο κλήθηκε να περιγράψει σύμφωνα με τα κριτήρια που τέθηκαν εξ αρχής και επομένως θα μπορούσε να θεωρηθεί σαν σχετικά αξιόπιστο και να χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη της μελλοντικής παραγωγής. Αν και εκτελέστηκε πρόβλεψη παραγωγής για όλες τις τιμές αποθεμάτων που λήφθηκαν από την στατιστική κατανομή (P10, P50 και P90), ωστόσο θα παρουσιαστούν και θα αναλυθούν τα αποτελέσματα του σεναρίου P50. Ο λόγος αυτής της επιλογής είναι το γεγονός ότι το συγκεκριμένο σενάριο (P50) εμφανίζει μέγιστη σημειακή πιθανότητα εμφάνισης, και επιπλέον τα αποτελέσματα του θα κυμαίνονται μεταξύ των τιμών των αποτελεσμάτων των άλλων

δύο σεναρίων. Στη συνέχεια, γίνεται μια σύγκριση μεταξύ των τριών σεναρίων ως προς τον συντελεστή αποληψιμότητας και τη συνολική παραγωγή σε πετρέλαιο.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα διαγράμματα των προβλεπόμενων μεγεθών τα οποία εμφανίζουν το μεγαλύτερο ενδιαφέρον για τον διαχειριστή του κοιτάσματος. Συγκεκριμένα, εμφανίζεται το προφίλ της πίεσης για όλη τη διάρκεια παραγωγής του κοιτάσματος, οι αντίστοιχες παροχές σε πετρέλαιο, αέριο και νερό, οι τιμές του παραγόμενου GOR , ο τελικός συντελεστής αποληψιμότητας του κοιτάσματος (RF) και τέλος η συνολική παραγωγή ανά φάση (cumulative production).

4.5.1 Αποτελέσματα πρόβλεψης παραγωγής για το σενάριο P50

Στο διάγραμμα 4.1 παρουσιάζεται η μεταβολή της μέσης πίεσης του ταμιευτήρα ως προς το χρόνο. Η πίεση εκκίνησης που έχει οριστεί από τον χρήστη είναι ίση με την αρχική πίεση του ταμιευτήρα 3,832 $psia$. Η πίεση καθ' όλη τη διάρκεια παραγωγής μειώνεται αρκετά αργά και με σχετικά σταθερό ρυθμό. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι η πτώση της πίεσης ΔP τα δύο πρώτα χρόνια της εκμετάλλευσης είναι ίση με 400 $psia$ γεγονός που επιβεβαιώνει ότι ο μηχανισμός παραγωγής του κοιτάσματος (gas cap expansion) είναι αρκετά ισχυρός ώστε να αποφευχθεί η δραματική μείωση της πίεσης.

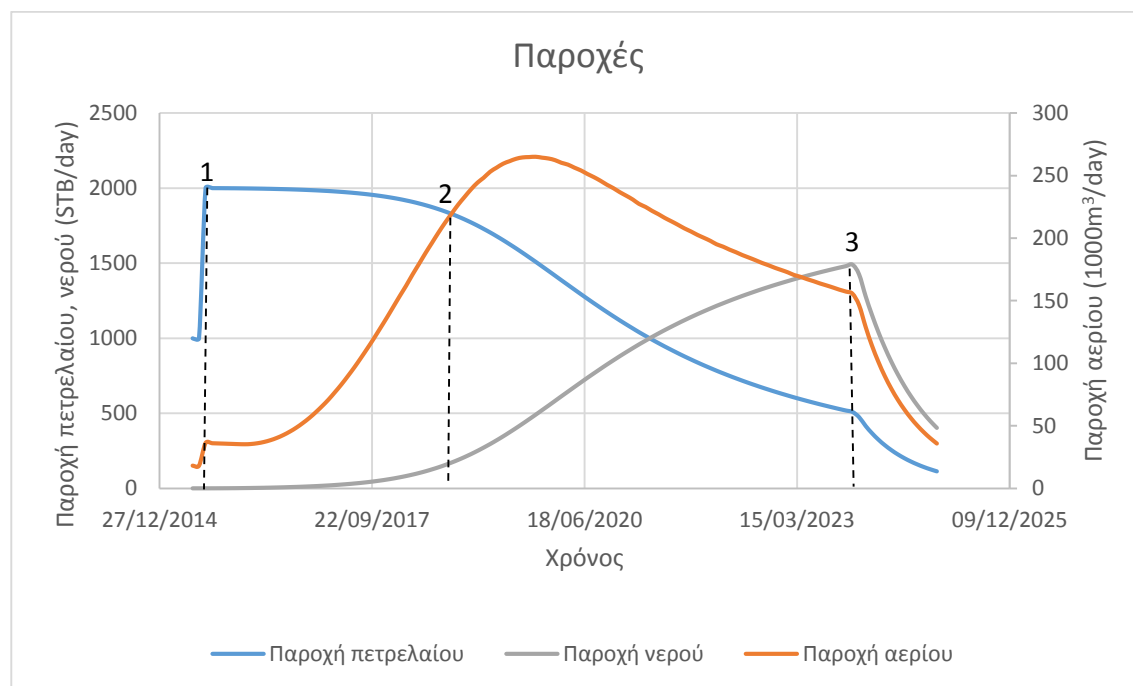


Διάγραμμα 4.1: Πρόβλεψη παραγωγής σεναρίου P50 - Προφίλ της πίεσης ως προς τον χρόνο για τον ταμιευτήρα Χ

Τέλος, μόλις η πίεση του ταμιευτήρα φτάσει τα 1,200 *psia*, γεγονός που εκτιμάται ότι θα συμβεί περί το Φεβρουάριο 2025, η παραγωγή σταματάει. Αυτό οφείλεται στο ότι η μέση πίεση του ταμιευτήρα εξισώνεται με την πίεση ροής πέριξ της γεώτρησης, της οποίας η τιμή έχει εισαχθεί από το χρήστη ίση με 1,200 *psia*, με αποτέλεσμα να μην είναι δυνατό να δημιουργηθεί πτώση πίεσης (ΔP) ικανή για την προώθηση ρευστών από τον ταμιευτήρα προς τις γεωτρήσεις.

Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο Κεφάλαιο προγραμματίζεται από το διαχειριστή να πραγματοποιηθούν δύο παραγωγικές γεωτρήσεις στο υπό μελέτη κοίτασμα, οι W_1 και W_2 αντίστοιχα, με τη δεύτερη να ξεκινά την παραγωγή δύο μήνες μετά την έναρξη της πρώτης. Πράγματι, όπως παρατηρείται και στο διάγραμμα 4.2, από την έναρξη της παραγωγής (Ιούνιος 2015) και μέχρι και τη χρονική στιγμή 1 (Αύγουστος 2015) παράγει μόνο η W_1 γεώτρηση με την παροχή σε πετρέλαιο να ανέρχεται στα 1,000 *STB/day*, όπως έχει οριστεί και από τους περιορισμούς που έχουν εισαχθεί στο πρόγραμμα. Τη χρονική στιγμή 1 την οποία ξεκινά να παράγει και

η δεύτερη γεώτρηση η παροχή του πετρελαίου αυξάνεται απότομα και γίνεται ίση με τη μέγιστη δυνατή, $2,000 \text{ STB/day}$.



Διάγραμμα 4.2: Πρόβλεψη παραγωγής σεναρίου P50 - Παροχές ανά παράγοντα φάση για τον ταμειευτήρα X

Από τη χρονική στιγμή 1 έως και την 2 η παραγωγή πετρελαίου παραμένει σταθερά στα μέγιστα επιτρεπτά όρια ($2,000 \text{ STB/day}$), το κοίτασμα δηλαδή διανύει την περίοδο του πλατώ του. Μεταξύ της χρονικής περιόδου 2 και 3 παρατηρείται πτώση των αντίστοιχων παροχών του πετρελαίου και του αερίου λόγω της αύξησης του παραγόμενου νερού. Σημειωτέον, ότι εξαιτίας του περιορισμού των $2,000 \text{ STB/day}$ συνολικού παραγόμενου υγρού (πετρελαίου και νερού), περιορισμός που προκύπτει λόγω των εγκαταστάσεων διαχωρισμού που πρόκειται να λειτουργούν στο κοίτασμα και που έχει εισαχθεί στο MBal, όσο η ποσότητα του παραγόμενου νερού αυξάνεται τόσο θα μειώνεται η ποσότητα του παραγόμενου πετρελαίου και επομένως και του αερίου (R_s) αντίστοιχα. Τέλος, από τη χρονική στιγμή 3 (Ιανουάριος 2024) και μετά, παρατηρείται πτώση της παραγωγής για όλες

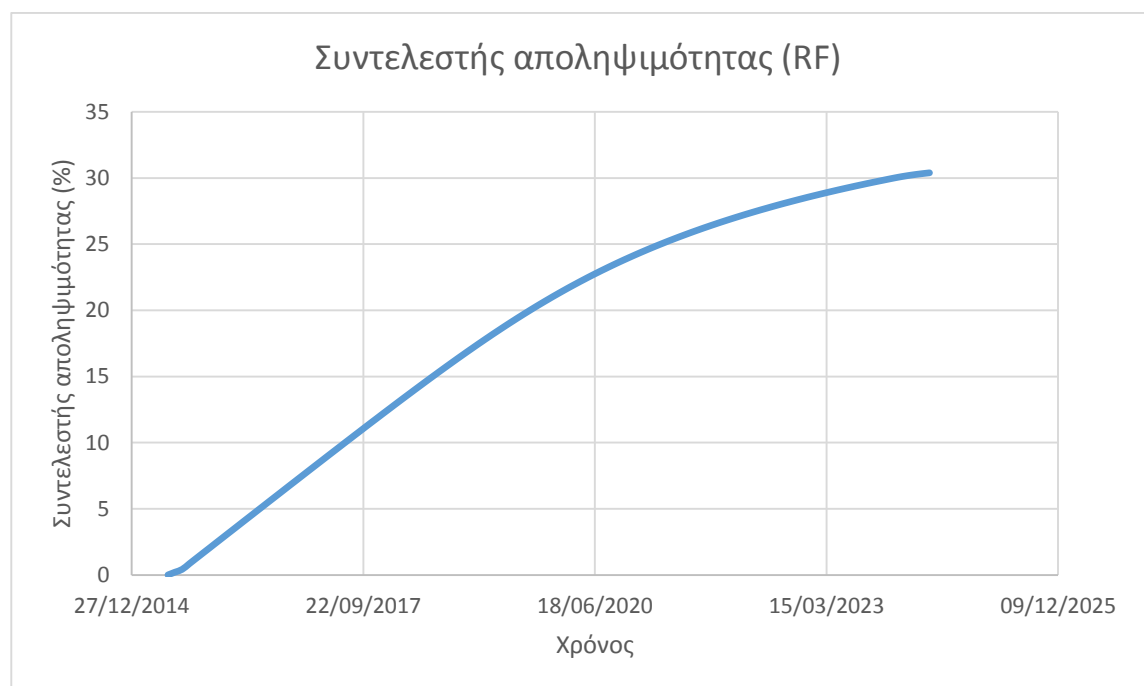
τις φάσεις (πετρέλαιο, αέριο και νερό). Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η πίεση του ταμιευτήρα εκείνη τη χρονική περίοδο λαμβάνει τιμές πολύ κοντά στην πίεση εγκατάλειψης 1,200 *psia* με αποτέλεσμα το σύστημα να μην διαθέτει όλη την απαραίτητη ενέργεια ούτως ώστε να οδηγήσει τα ρευστά από τον ταμιευτήρα στην επιφάνεια.



Διάγραμμα 4.3: Πρόβλεψη παραγωγής σεναρίου P50 - Λόγος παραγόμενου αερίου ως προς το πετρέλαιο για τον ταμιευτήρα X

Στο διάγραμμα 4.3 απεικονίζεται η τιμή του παραγόμενου *GOR* ως προς τον χρόνο. Συγκεκριμένα, τον πρώτο καιρό της εκμετάλλευσης οι τιμές που λαμβάνει κυμαίνονται κοντά στα 650 *scf/STB* γεγονός που επιβεβαιώνει ότι η παραγωγή λαμβάνει χώρα μόνο στη ζώνη του πετρελαίου. Στις αρχές του 2017 η τιμή του αρχίζει να αυξάνεται, γεγονός αναμενόμενο, καθώς η ποσότητα του ελεύθερου αερίου στη ζώνη του πετρελαίου αυξάνεται συνεχώς όσο η πίεση μειώνεται έχοντας σαν αποτέλεσμα την αύξηση της σχετικής διαπερατότητας του, άρα της κινητικότητας του. Αυτή η κατάσταση συνεχίζεται μέχρι και την εγκατάλειψη του κοιτάσματος το 2024, με το παραγόμενο *GOR* να λαμβάνει τη μέγιστη τιμή του (περίπου 11,000 *scf/STB*).

Η μεγιστοποίηση της παραγωγής αερίου προς το τέλος της ζωής του κοιτάσματος είναι αναμενόμενη λόγω του γεγονότος ότι η κινητικότητα του ελεύθερου αερίου της υπερκείμενης ζώνης θα είναι τέτοια που θα του επιτρέπει να κινείται προς την περιοχή των διατρήσεων, εμφανίζοντας αυξημένη παραγωγή. Το παραπάνω γεγονός οφείλεται στο φαινόμενο του κώνου του αερίου (gas coning), κατά το οποίο το αέριο λόγω της αυξημένης κινητικότητας του δημιουργεί διόδους ροής προς την παραγωγική ζώνη εκτοπίζοντας το πετρέλαιο.



Διάγραμμα 4.4: Πρόβλεψη παραγωγής σεναρίου P50 - Συντελεστής αποληψιμότητας (recovery factor) για τον ταμιευτήρα X

Ο συντελεστής αποληψιμότητας εκφράζει τη συνολική ποσότητα του πετρελαίου που παρήχθη από τον ταμιευτήρα σε σχέση με την ποσότητα που πληρούσε εξ' αρχής τους πόρους του ($N_p / STOIIP$). Στο διάγραμμα 4.4 παρατηρείται ότι τα πρώτα χρόνια της παραγωγής η μορφή του διαγράμματος είναι γραμμική. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι κατά το διάστημα αυτό η ημερήσια παροχή είναι σταθερή και ίση με 2,000 STB/day, δηλαδή το N_p αυξάνεται γραμμικά και επομένως ο

λόγος του ως προς το *STOIP* , δηλαδή ο συντελεστής αποληψιμότητας, θα μεταβάλλεται επίσης γραμμικά. Η σταθερή παραγωγή, με τη σειρά της, οφείλεται στο γεγονός ότι σε εκείνη την περίοδο το κοίτασμα διανύει την περίοδο του πλατώ του, δηλαδή παράγει σταθερά τις μέγιστες επιτρεπόμενες ποσότητες που ο παραγωγός έχει ορίσει. Τέλος, η μέγιστη τιμή του μεγέθους αυτού κατά τη φάση της εγκατάλειψης είναι ίση με 30%.



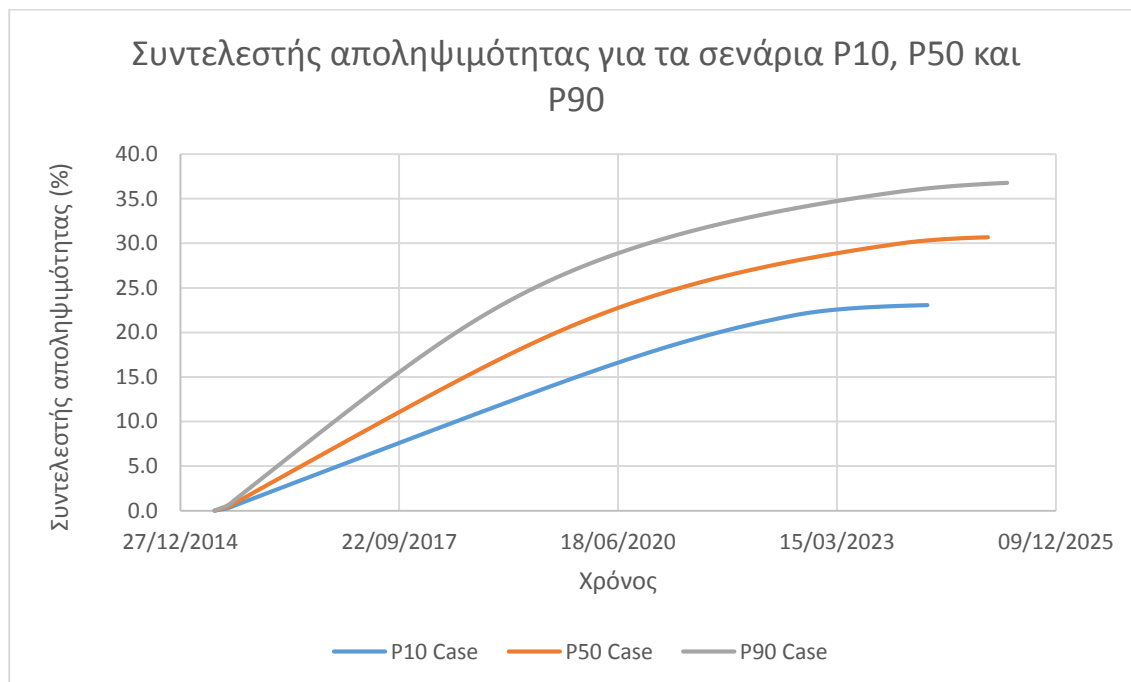
Διάγραμμα 4.5: Πρόβλεψη παραγωγής σεναρίου P50 - Αθροιστική παραγωγή πετρελαίου, νερού και αερίου για τον ταμιευτήρα Χ

Στο διάγραμμα 4.5 απεικονίζεται η συνολική παραγωγή ανά φάση που πληροί τους πόρους του ταμιευτήρα. Ωστόσο, καθώς το ρευστό που ενδιαφέρει οικονομικά την εταιρεία είναι το πετρέλαιο η παραγωγή του παρουσιάζει και το μεγαλύτερο ενδιαφέρον. Αναλυτικότερα, η συνολική του παραγωγή υπολογίζεται να είναι περίπου 4 MMSTB . Αντίστοιχα η παραγωγή του αερίου ακολουθεί όπως είναι επόμενο την τάση του παραγόμενου *GOR* (βλέπε Διάγραμμα 4.3), δηλαδή κατά τα πρώτα χρόνια της εκμετάλλευσης η ποσότητα αερίου που παράγεται είναι μόνο αυτή που βρίσκεται διαλελυμένη στο πετρέλαιο και για αυτό το λόγο έχει χαμηλές τιμές σε

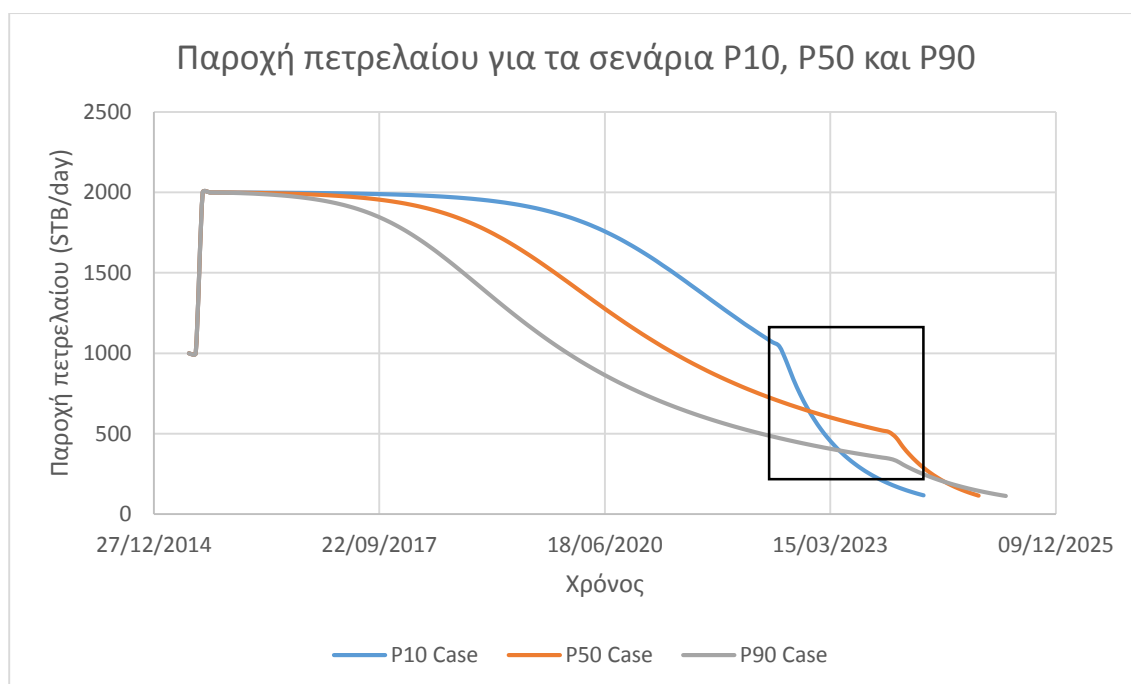
αντίθεση με τα επόμενα χρόνια όπου η παραγωγή αερίου αυξάνεται με ταχύτερους ρυθμούς που υποδηλώνει ότι η κινητικότητα του αερίου είναι αυξημένη και ότι ποσότητα αυτού παράγεται και από την υπερκείμενη ζώνη. Τέλος, όσον αφορά την παραγωγή νερού, αυτή αρχίζει να γίνεται έντονη μετά τον 4^ο χρόνο παραγωγής (το 2019 περίπου) και η οποία με την πάροδο του χρόνου αυξάνεται σχεδόν γραμμικά λαμβάνοντας τη μέγιστη τιμή στα 1.8 MMSTB , υποδηλώνοντας έτσι ότι το εισερχόμενο ρευστό του ταμιευτήρα νερού αρχίζει να παράγεται με σχεδόν σταθερή παροχή.

4.5.2 Αποτελέσματα πρόβλεψης παραγωγής για τα σενάρια P10, P50 και P90

Παραπάνω παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα του σεναρίου P50. Τα αποτελέσματα του συγκεκριμένου σεναρίου είναι αναμενόμενο να λαμβάνουν τιμές ενδιάμεσες των αποτελεσμάτων των άλλων δύο καθώς οι τιμές του STOIP προέκυψαν από στατιστική κατανομή με τον όρο m ωστόσο να παραμένει σταθερός σε όλα. Επομένως, εφόσον το m παραμένει σταθερό και το μοντέλο του ταμιευτήρα νερού έχει παραμείνει το ίδιο σε όλα τα σενάρια γίνεται κατανοητό ότι ο μηχανισμός παραγωγής για όλες τις περιπτώσεις θα είναι ανάλογος και θα μεταβάλλονται σχεδόν αναλογικά μόνο οι παροχές των παραγόμενων ρευστών λόγω των διαφορετικών τιμών του STOIP αλλά και του όγκου του ταμιευτήρα νερού. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα διαγράμματα του συντελεστή αποληψιμότητας και της παροχής σε πετρέλαιο όλων των σεναρίων και τα οποία επιβεβαιώνουν την παραπάνω εκτίμηση.



Διάγραμμα 4.6: Συντελεστής αποληψιμότητας όλων των σεναρίων ως προς το χρόνο για τον ταμιευτήρα Χ



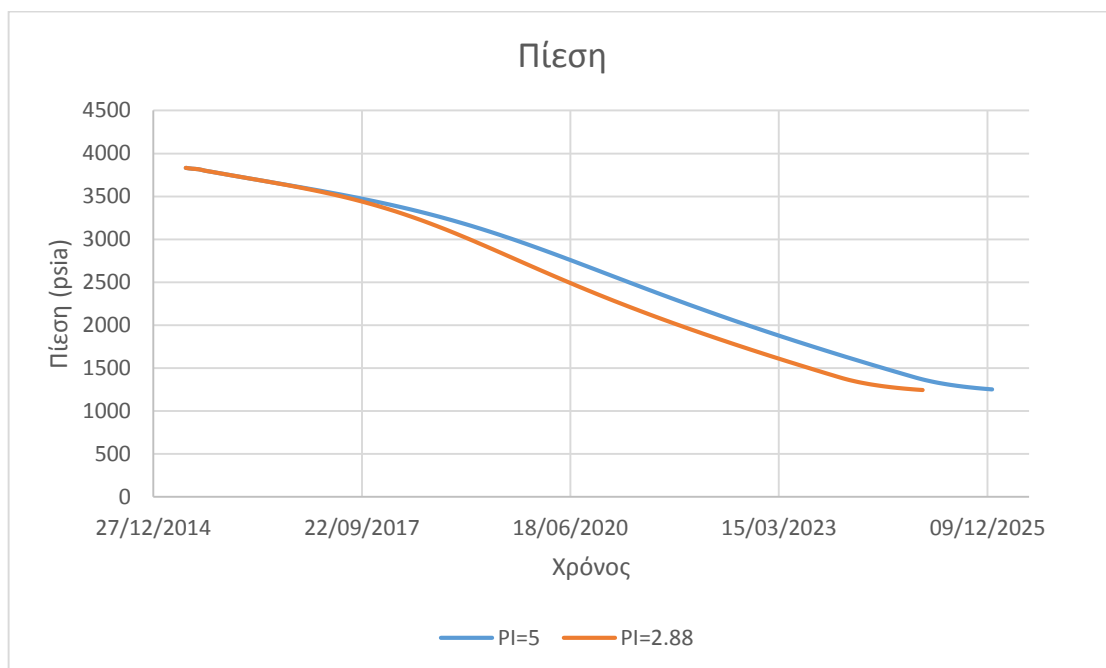
Διάγραμμα 4.7: Παραγωγή πετρελαίου όλων των σεναρίων ως προς το χρόνο για τον ταμιευτήρα Χ

Όπως προκύπτει από το Διάγραμμα 4.6 ο συντελεστής αποληψιμότητας (RF) και των τριών σεναρίων λαμβάνει τιμές που κυμαίνονται από 23–36% με την πιο αισιόδοξη περίπτωση (P10) να αντιστοιχεί σε μικρότερο συντελεστή αποληψιμότητας (23%), την πιο απαισιόδοξη (P90) να αντιστοιχεί σε υψηλότερη τιμή του (36%) ενώ το σενάριο P50 να λαμβάνει τιμή ίση με 30%. Προφανώς, σταθερή τιμή του συντελεστή αποληψιμότητας συνεπάγεται διαφορετικές τιμές συνολικής παραγωγής λόγω των διαφορών εκτιμήσεων του STOIIP. Λογικά κάποιος θα ανέμενε την αντίθετη κατάσταση, ωστόσο πρέπει να ληφθεί υπ' όψη ότι στον ταμειυτήρα επενεργούν τόσο η υπερκείμενη ζώνη ελεύθερου αερίου (gas cap) αλλά και ο υποκείμενος ταμειυτήρας νερού (aquifer influx). Ο πρώτος μηχανισμός παραμένει σταθερός για όλα τα σενάρια ($m = 0.55$) αφού ο όγκος του αερίου που πληροί αρχικά τους πόρους του ταμειυτήρα μεταβάλλεται ανάλογα με τον αντίστοιχο όγκο του πετρελαίου για κάθε σενάριο. Από την άλλη δεν συμβαίνει κάτι αντίστοιχο και για τον υδροφορέα. Δηλαδή, ο όγκος του παραμένει σταθερός και ίσος με 300 MMbbl για όλες τις περιπτώσεις. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα ο μηχανισμός του να είναι πιο ισχυρός σε περιπτώσεις χαμηλών τιμών STOIIP (σενάριο P90) και πιο αδύναμος σε υψηλές τιμές του STOIIP (σενάριο P10) δίνοντας μεγαλύτερη αποληψιμότητα στην πρώτη περίπτωση σε σύγκριση με την δεύτερη.

Στο Διάγραμμα 4.7 παρουσιάζονται οι παροχές ανά σενάριο του STOIIP. Όπως είναι επόμενο, για τις περιπτώσεις υψηλότερου STOIIP (P10 και P50) ο ταμειυτήρας παράγει με αυξημένες παροχές για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Παρόλα αυτά ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η περιοχή εντός του τετραγώνου. Για την ακρίβεια, είναι διακριτή η απότομη μείωση της παροχής πετρελαίου για το σενάριο P10 σε σύγκριση με την περίπτωση των άλλων δύο P50 και P90. Αυτή η κατάσταση εξηγείται από το γεγονός ότι η δράση του υδροφόρου εξασθενεί εκείνη την περίοδο για το συγκεκριμένο σενάριο λόγω των αυξημένων αναγκών του συγκεκριμένου συστήματος σε ενέργεια σε σύγκριση με τα άλλα δύο (P50, P90). Δηλαδή, εάν ο όγκος του υδροφορέα είχε υψηλότερη τιμή, τότε η παροχή του πετρελαίου δεν θα μειωνόταν τόσο απότομα αλλά θα ακολουθούσε τη μορφή των άλλων δυο σεναρίων λόγω του ότι η πίεση θα διατηρούνταν σε υψηλότερες τιμές.

4.6 Μελέτη ευαισθησίας ως προς το δείκτη παραγωγικότητας της γεώτρησης (PI)

Υπενθυμίζεται ότι ο δείκτης παραγωγικότητας των γεωτρήσεων (PI) εκφράζει τη δυνατότητα των γεωτρήσεων να άγουν τα ρευστά του ταμιευτήρα στην επιφάνεια. Η τιμή της συγκεκριμένης παραμέτρου έχει υπολογιστεί για τη διερευνητική γεώτρηση που είχε γίνει στο κοίτασμα να λαμβάνει τιμή ίση προς 2.88 STB/day/psi . Για τον παραπάνω λόγο, οι προηγούμενες δοκιμές πραγματοποιήθηκαν με αυτή τη τιμή για το συγκεκριμένο μέγεθος. Ωστόσο, επειδή το συγκεκριμένο μέγεθος είναι καθοριστικής σημασίας για το σχεδιασμό των γεωτρήσεων κρίθηκε σκόπιμο να ελεγχθεί η επίδρασή του στα αποτελέσματα. Αν και η τιμή του PI που χρησιμοποιήθηκε αφορούσε τη γεώτρηση εξερεύνησης η οποία ήταν κατακόρυφη (vertical well), οι γεωτρήσεις που προγραμματίζεται να πραγματοποιηθούν θα είναι οριζόντιες (horizontal wells) κι επομένως ο δείκτης παραγωγικότητάς τους αναμένεται να είναι μεγαλύτερος λόγω αυξημένης περιοχής απομάστευσης. Για τον παραπάνω λόγο, πραγματοποιήθηκε πρόβλεψη παραγωγής του μοντέλου του ταμιευτήρα για το σενάριο P50 και για τιμή του δείκτη παραγωγικότητας ίση με 5 STB/day/psi προκειμένου να ελεγχθεί το μέγεθος της επίδρασης του στα αποτελέσματα. Στο Διάγραμμα 4.8 παρουσιάζονται τα συγκριτικά διαγράμματα της μεταβολής της πίεσης και αθροιστικής παραγωγής πετρελαίου για τις αντίστοιχες τιμές του PI.



Διάγραμμα 4.8: Προφίλ μεταβολής της πίεσης ως προς το χρόνο για τις διάφορες τιμές του PI για τον ταμιευτήρα X



Διάγραμμα 4.9: Αθροιστική παροχή πετρελαίου για τις διάφορες τιμές του PI για τον ταμιευτήρα X

Από τα παραπάνω διαγράμματα είναι εμφανές ότι η αύξηση της τιμής του δείκτη παραγωγικότητας των γεωτρήσεων επηρεάζει ελαφρά την τελική αποληψιμότητα του κοιτάσματος τόσο από άποψης παραγωγής ρευστών αλλά και πτώσης της πίεσης, όχι όμως κατά τον πρώτο καιρό της εκμετάλλευσης αλλά μεταγενέστερα. Πιο συγκεκριμένα, παρατηρείται ότι τα πρώτα 2 χρόνια της παραγωγής, δηλαδή την περίοδο του πλατώ του κοιτάσματος, τόσο η μεταβολή της πίεσης (Διάγραμμα 4.8) όσο και ο όγκος της παραγόμενης ποσότητας πετρελαίου (Διάγραμμα 4.9) λαμβάνουν τις ίδιες τιμές ανεξαρτήτως της τιμής του δείκτη παραγωγικότητας της γεώτρησης. Αυτό είναι αναμενόμενο καθώς, όπως έχει ήδη αναλυθεί, η μέγιστη επιτρεπόμενη ποσότητα παραγόμενων υγρών ανά γεώτρηση έχει οριστεί στα 1000 *STB/day* με βάση τα επενδυτικά πλάνα της διαχειρίστριας εταιρείας. Επομένως, παρόλο που για υψηλότερη τιμή του δείκτη παραγωγικότητας η παροχή των παραγόμενων ρευστών θα μπορούσε να είναι μεγαλύτερη, λόγω αυτού του περιορισμού δεν είναι εφικτό να υλοποιηθεί.

Η επίδραση του δείκτη παραγωγικότητας στην εκμετάλλευση του κοιτάσματος αρχίζει να διαφαίνεται τα χρόνια μετά την περίοδο του πλατώ του κοιτάσματος (μετά το 2017). Αναλυτικότερα, παρατηρείται πως για υψηλότερη τιμή του δείκτη παραγωγικότητας, μετά τη χρονική περίοδο του πλατώ, η πίεση μειούται με πιο αργό ρυθμό όπως επίσης και η συνολική παραγωγή σε πετρέλαιο είναι πιο υψηλή. Το παραπάνω γεγονός είναι απόλυτα αποδεκτό καθώς ο δείκτης παραγωγικότητας σαν μέγεθος εκφράζει την ικανότητα των γεωτρήσεων να παράγουν ρευστά. Επομένως, υψηλότερη τιμή του συνεπάγεται ταυτόχρονα και μικρότερη πτώση πίεσης για την ίδια παροχή σε ρευστά όπως αναλύθηκε στην §2.4.2.

Κεφάλαιο 5

Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία αναπτύχθηκε ένα μοντέλο προσομοίωσης της διαδικασίας παραγωγής του ταμιευτήρα «Χ» στην Ανατολική Μεσόγειο, με χρήση της μεθόδου ισοζυγίου μάζας (MIM). Ειδικότερα, με χρήση του λογισμικού MBal της εταιρίας Petroleum Experts (PetEx), αναπτύχθηκε το μοντέλο το οποίο μπορεί να πραγματοποιήσει πρόβλεψη της μελλοντικής παραγωγής του ταμιευτήρα για διάφορα σενάρια παραγωγής τα οποία εμφανίζουν αυξημένη πιθανότητα να απαντηθούν στην πραγματικότητα.

Αν και, με βάση το διαθέσιμο στατικό μοντέλο, ο ταμιευτήρας στις αρχικές του συνθήκες είναι διφασικός δηλαδή διαθέτει και υπερκείμενη του πετρελαίου ζώνη αερίου, η εταιρία διαχείρισης του κοιτάσματος έχει αποφασίσει να προχωρήσει σε παραγωγή κατά τέτοιο τρόπο ούτως ώστε το παραγόμενο ρευστό να είναι κατά κύριο λόγο πετρέλαιο και όχι το αέριο της υπερκείμενης ζώνης ή το νερό του υποκείμενου ταμιευτήρα νερού. Προκειμένου το μοντέλο να υλοποιεί τον παραπάνω σχεδιασμό απαιτήθηκε η χειρωνακτική επέμβαση στις παραμέτρους που υπεισέρχονται στους υπολογισμούς. Για τη βελτιστοποίηση των τιμών τους τέθηκαν φυσικά κριτήρια τα οποία θα πρέπει να ικανοποιούνται από τις προβλέψεις του μοντέλου.

Τέλος, μόλις η παραπάνω διαδικασία ολοκληρώθηκε και επιβεβαιώθηκε ότι το δημιουργημένο μοντέλο προσομοιώνει με επιτυχία την κατάσταση την οποία η φυσική εμπειρία επιβάλλει, παρήχθησαν διαγράμματα των πιο σημαντικών μεγεθών ως προς το χρόνο και χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση του συστήματος υδρογονανθράκων.

5.1 Συμπεράσματα

Από τη μελέτη που πραγματοποιήθηκε προέκυψε μια σειρά συμπερασμάτων. Καταρχάς, από τις εκτεταμένες δοκιμές και την εμπειρία που συσσωρεύτηκε στη χρήση του λογισμικού MBal διαπιστώθηκε ότι για την πρόβλεψη της παραγωγής λαμβάνεται υπόψιν η κινητικότητα (mobility) της κάθε φάσης. Για τον υπολογισμό της κινητικότητας λαμβάνεται υπόψιν η σχετική διαπερατότητα και ο κορεσμός της κάθε φάσης ο οποίος, με τη σειρά του, υπολογίζεται επί του συνόλου του τανκ και

όχι με βάση την τιμή που αυτός μπορεί να εμφανίζει στην περιοχή των διατρήσεων (perforations). Κατά συνέπεια, παρόλο που ο υπό μελέτη ταμειευτήρας είναι διφασικός και η παραγωγή σχεδιάζεται να γίνει μόνο από τη ζώνη πετρελαίου, το συγκεκριμένο πρόγραμμα δεν μπορεί να προσομοιώσει αυτή την κατάσταση εφόσον αποδίδει ιδιαίτερη κινητικότητα στην αέρια φάση λόγω του υπερκείμενου στρώματος. Προκειμένου λοιπόν, το λογισμικό MBal να προσομοιώσει τη διαδικασία παραγωγής αποκλειστικά από τη ζώνη πετρελαίου, διαπιστώθηκε ότι η τιμή του κρίσιμου βαθμού κορεσμού του αερίου που θα εισαχθεί στο μοντέλο πρέπει να είναι διαφορετική της πειραματικά υπολογιζόμενης από τα δείγματα πυρήνων. Για τον παραπάνω λόγο η τιμή του κρίσιμου βαθμού κορεσμού του αερίου που εισάγεται κατά την περιγραφή των καμπυλών Corey θα πρέπει να είναι ίση με τον κορεσμό του αερίου στις αρχικές συνθήκες του ταμειευτήρα. Κατά αυτό τον τρόπο, το αέριο εκλαμβάνεται από το MBal ως πρακτικά «ακίνητο» κατά τα πρώτα χρόνια και τα παραγόμενα ρευστά είναι το πετρέλαιο και το διαλελυμένο στη μάζα του αέριο.

Ένα πρόβλημα το οποίο παρατηρήθηκε καθ' όλη τη διάρκεια προσομοίωσης της παραγωγής του κοιτάσματος ήταν ότι όταν στο πρόγραμμα εισαγόταν ως τιμή της μέγιστης σχετικής διαπερατότητας του αερίου η πειραματικά μετρημένη, τότε η τιμή του παραγόμενου *GOR* ήταν ανεπίτρεπτα υψηλή. Το γεγονός αυτό οφείλεται και πάλι στον τρόπο προσδιορισμού του κορεσμού της αέριας φάσης κατά τον οποίο λαμβάνεται υπόψιν ολόκληρη η ζώνη αερίου. Επομένως, όπως και στην περίπτωση του κρίσιμου βαθμού κορεσμού, η τιμή αυτού του μεγέθους θα πρέπει να τίθεται έτσι ούτως ώστε το ποσό του παραγόμενου *GOR* να λαμβάνει τις τιμές που αναμένονται όταν η παραγωγή λαμβάνει χώρα μόνο από την πετρελαϊκή φάση.

Όπως εξηγήθηκε στην §4.6, από τη μελέτη ευαισθησίας για την επίδραση του συντελεστή παραγωγικότητας (productivity index) στους υπολογισμούς, προέκυψε ότι το συγκεκριμένο μέγεθος δεν επηρεάζει σημαντικά τα αποτελέσματα. Το συγκεκριμένο συμπέρασμα ακούγεται παράδοξο, δεδομένου ότι είναι γνωστό πως το reservoir και το production engineering ενδιαφέρονται ιδιαίτερα για τη μεγιστοποίηση του συντελεστή παραγωγικότητας. Στην προκειμένη περίπτωση, αυτό αιτιολογείται από το γεγονός ότι από τον παραγωγό έχει οριστεί η μέγιστη παραγωγή

πετρελαίου να μην ξεπερνά το σχετικά χαμηλό όριο των 2000 *STB/day* . Κατά συνέπεια, κατά το σχεδιασμό των διαδικασιών συμπλήρωσης γεωτρήσεων (well completion) θα πρέπει να εξετάζεται εάν η περαιτέρω βελτίωση του συντελεστή παραγωγικότητας και η συνεπακόλουθη βελτίωση της δυναμικής του ταμιευτήρα, δηλαδή το κοίτασμα θα είναι ικανό να παράξει με αρκετά υψηλότερους ρυθμούς, γίνουν ποτέ αισθητές λόγω πιθανών περιορισμών στην παραγωγή.

Όταν πραγματοποιήθηκε πρόβλεψη παραγωγής για τα σενάρια P10 και P90 παρατηρήθηκε ότι τα αποτελέσματά τους είναι αναλογικά των αποτελεσμάτων του σεναρίου P50. Το παραπάνω γεγονός είναι απόλυτα δικαιολογημένο καθώς παρόλο που τα αποθέματα αυξάνονται, οι μηχανισμοί παραγωγής παραμένουν αναλογικά οι ίδιοι (η τιμή του m είναι η ίδια για όλες τις περιπτώσεις και ο όγκος του ταμιευτήρα νερού μεταβάλλεται ανάλογα με τον όγκο του ταμιευτήρα πετρελαίου). Αποτέλεσμα της παραπάνω συνθήκης είναι οι παραγόμενοι όγκοι μεταξύ των σεναρίων να μεταβάλλονται αναλογικά και η τιμή του συντελεστή αποληψιμότητας (recovery factor) μεταξύ και των τριών περιπτώσεων να είναι η ίδια.

Τέλος, συνδυάζοντας όλα τα παραπάνω, προκύπτει το γενικό συμπέρασμα ότι η συγκεκριμένη εκμετάλλευση εμφανίζει πολύ υψηλές πιθανότητες βιωσιμότητας καθώς ο συντελεστής αποληψιμότητας (RF) μπορεί να λάβει τις συνήθεις τιμές που απαντώνται μετά από πρωτογενή παραγωγή σε παρόμοιους ταμιευτήρες. Ωστόσο, για την αποδοτικότερη εκμετάλλευση του ταμιευτήρα «X» θα πρέπει να πραγματοποιηθεί μια σειρά ενεργειών με τις οποίες η διαχειρίστρια εταιρεία θα μειώσει τα λειτουργικά της έξοδα αλλά παράλληλα θα αυξήσει την αποληψιμότητα του κοιτάσματος. Αρχικά, ιδιαίτερο ενδιαφέρον θα παρουσίαζε η τροποποίηση της διαδικασίας παραγωγής, κι επομένως η υλοποίησή της μέσα από το μοντέλο προσομοίωσης, κατά τρόπο ώστε μόλις η τιμή του παραγόμενου *GOR* γίνει πολύ υψηλή, σε βαθμό που οι μονάδες επεξεργασίας και διαχωρισμού της επιφάνειας να αδυνατούν να το διαχειριστούν, τότε αυτό να επανεισπίζεται μέσω μιας ή και περισσότερων γεωτρήσεων εισπίεσης στο ανώτερο τμήμα της ζώνης του ελεύθερου αερίου (gas cap). Κατά αυτό τον τρόπο το σύστημα θα επανατροφοδοτείται με ενέργεια παρατείνοντας τη ζωή του κοιτάσματος με μεθόδους δευτερογενούς

παραγωγής και βελτιώνοντας την αποληψιμότητα. Ωστόσο, η συγκεκριμένη διαδικασία απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή διότι αναπληρώνοντας συνεχώς τον όγκο της ζώνης του ελεύθερου αερίου μέσω της εισπίεσης και μειώνοντας ταυτόχρονα τον όγκο της ζώνης του πετρελαίου λόγω της συνεχούς παραγωγής της, ο κίνδυνος εμφάνισης του κώνου αερίου (gas coning) είναι αρκετά αυξημένος.

Επιπρόσθετα, λόγω του γεγονότος ότι το κοίτασμα είναι μικρό από άποψη αποθεμάτων (STOIIP), η δημιουργία μιας πλατφόρμας για την εκμετάλλευση του κρίνεται απαγορευτική λόγω των εξόδων που θα δημιουργήσει. Επομένως, για να μειωθεί το κόστος της γεώτρησης και δεδομένου ότι το κοίτασμα είναι μεν θαλάσσιο σε μικρή όμως απόσταση από την πλησιέστερη ξηρά, προτείνεται να πραγματοποιηθεί κεκλιμένη γεώτρηση παραγωγής μεγάλου μήκους (extended reach well) από στεριάς (onshore). Οι ημερήσιες δαπάνες λειτουργίας μια χερσαίας εγκατάστασης θα είναι σαφώς λιγότερες από αυτές μιας αντίστοιχης offshore.

5.2 Προτάσεις για περαιτέρω μελέτη

Προκειμένου να εκφραστεί η παραγωγή ως συνάρτηση του χρόνου και όχι απλά της πίεσης, στα ανεπτυγμένα μοντέλα χρησιμοποιήθηκε η συνήθης μεν, όχι ιδιαίτερα ακριβής δε, παραδοχή της σταθερής πίεσης ροής στις διατρήσεις (constant flowing bottom hole pressure). Αυτό μπορεί να βελτιωθεί μοντελοποιώντας τη συμπεριφορά των γεωτρήσεων με χρήση εξειδικευμένων επιμέρους προγραμμάτων (όπως το Prosper, επίσης της PetEx) προκειμένου να δημιουργηθούν οι VLP (Vertical Lift Performance) καμπύλες τους. Οι συγκεκριμένες καμπύλες λαμβάνουν υπόψιν όλα τα δυναμικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα κατά την άνοδο των παραγόμενων ρευστών από τον ταμιευτήρα μέχρι την κεφαλή της γεώτρησης (wellhead), όπως ο κορεσμός των φάσεων κατά μήκος της σωλήνωσης, το προφίλ ροής και οι απώλειες πίεσης. Οι καμπύλες θα εισαχθούν με τη σειρά τους με τη μορφή πινάκων στο MBal ούτως ώστε το πρόγραμμα, κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, να ανατρέχει στους VLP πίνακες προκειμένου να υπολογίζει την ογκομετρική παροχή της κάθε

παραγόμενης φάσης ως συνάρτηση των όγκων που υπολογίζονται για κάθε βήμα πίεσης ΔP .

Το μοντέλο το οποίο αναπτύχθηκε δίνει πρόβλεψη της μελλοντικής παραγωγής για όλο το χρονικό ορίζοντα από σήμερα έως και το έτος 2035. Ωστόσο, ακριβέστερες προβλέψεις θα μπορούσαν να ληφθούν εάν η πρόβλεψη γινόταν με ορίζοντα ενός έτους και οι εναπομείναντες όγκοι του κάθε έτους να αποτελούσαν τα δεδομένα εκκίνησης για την πρόβλεψη παραγωγής του επόμενου έτους. Μέσω αυτής της διαδικασίας είναι εφικτή η μεταβολή των καμπυλών των σχετικών διαπερατοτήτων όπως αυτές προκύπτουν από τους συσχετισμούς κατά Corey, με σκοπό να επιτευχθούν λογικές τιμές του παραγόμενου *GOR*, σύμφωνα πάντοτε με τα επενδυτικά πλάνα της εταιρείας. Για παράδειγμα, έχει καταστεί σαφές ότι η διαχειρίστρια εταιρία το ρευστό που επιθυμεί να παράξει είναι μόνο το πετρέλαιο και όχι το αέριο από την υπερκείμενη ζώνη. Στην πραγματικότητα αυτό που θα μπορούσε να γίνει μόλις η τιμή του παραγόμενου στην επιφάνεια αερίου είναι πολύ υψηλή είναι «recompletion» της γεώτρησης. Διάτρηση δηλαδή της σωλήνωσης σε μεγαλύτερο βάθος μακριά από την διεπιφάνεια πετρελαίου/αερίου. Επειδή ωστόσο το MBal δεν παρέχει αυτή τη δυνατότητα, η παραπάνω κατάσταση θα μπορούσε να λάβει χώρα μόνο με την αλλαγή τόσο του κρίσιμου βαθμού κορεσμού του αερίου, όσο και με την τιμή της μέγιστης τιμής της σχετικής διαπερατότητας ανά πρόβλεψη παραγωγής.

Δεδομένου ότι δεν έχει υπάρξει παραγωγή από το συγκεκριμένο κοίτασμα, άμεση προτεραιότητα αποτελεί η λεπτομερής καταγραφή δεδομένων παραγωγής κατά τον πρώτο χρόνο παραγωγής του κοιτάσματος. Μόλις, τα διαθέσιμα δεδομένα συλλεγούν θα πρέπει να γίνει ρύθμιση του μοντέλου ισοζυγίου μάζας ταυτόχρονα με χρήση της μεθόδου Decline Curve Analysis, η οποία είναι από τις πλέον διαδεδομένες και απλές στις εφαρμογές τους μεθόδους που χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη της παραγωγής. Τα αποτελέσματα αυτής της μεθόδου λοιπόν, να συγκριθούν με τα αποτελέσματα των ήδη υλοποιημένων με το MBal μοντέλων ούτως ώστε να επιβεβαιωθεί η ορθότητα των τελευταίων.

Βιβλιογραφία

- [1] Βαρότσης Ν. (2013), “Μηχανική ταμειυτήρων”, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
- [2] Βαρότσης Ν. (2012), “Εκμετάλλευση ταμειυτήρων”, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά.
- [3] Odeh A.S. (1986), “Reservoir fluid flow and natural drive mechanisms”, International Human Resources Development Corporation, Boston.
- [4] Islam M.R., Moussavizadegan S.H., Mistafiz S. and Abou Kassem J.M. (2010), “Advanced petroleum reservoir simulation”, J. Wiley & Sons and Scrivener Publishing, Canada.
- [5] Tarek A.H. (2000), “Reservoir Engineering Handbook Second Edition”, Gulf Professional Publishing, USA.
- [6] Aziz K. and Settari A. (1979), “Petroleum reservoir simulation”, Applied Science Publishers Ltd, London.
- [7] Heriot Watt University (2012), “Reservoir Engineering”, Edinburgh.
- [8] L.P. Dake (2001), “The Practice of Reservoir Engineering (Revised Edition)”, Elsevier, Amsterdam.
- [9] L.P. Dake (1978), “Fundamentals of Reservoir Engineering”, Elsevier, Amsterdam.
- [10] Havlena, D. and Odeh, A.S. (August 1963), “The Material Balance as an Equation of Straight-Line”, JPT, 896-900.
- [11] Tarek Ahmed, Paul D. McKinney (2005), “Advanced Reservoir Engineering”, Elsevier, USA.
- [12] J.S. Archer & C. Wall. (1986), “Petroleum Engineering Principles and Practise”, Graham & Trotman, London.
- [13] <http://www.petrocenter.com/reservoir/prod%20index.htm>.
- [14] Fetkovitch M.J. (1971), “A Simplified Approach to Water Influx calculations – Finite Aquifer System”, SPE 2603.
- [15] MBAL complete (2012), Reservoir Engineering Toolkit, Version 8.1.
- [16] Jack Allan and S. Qing Sun, C&C Reservoirs, Inc., “Controls on Recovery Factor in Fractured Reservoirs: Lessons Learned from 100 Fractured Fields”, SPE 84590.
- [17] http://petrowiki.org/Calculating_PVT_properties.
- [18] Pierre Donnez (2007), “Essentials of Reservoir Engineering”, Technip, Paris.

- [19] Nnaemeka Ezekwe (2010), "Petroleum Reservoir Engineering Practice", Prentice Hall, USA.
- [20] R. Gauchet and B. Corre (1996), "Rospo Mare Field: A Unique Experience of Heavy Oil Production with Horizontal Wells in a Karst Reservoir in Presence of a Strong Tilted Hydrodynamism", SPE 36869.
- [21] http://en.wikipedia.org/wiki/Relative_permeability.
- [22] Heriot Watt University (2012), "Production Technology", Edinburgh.

Κατάλογος διαγραμμάτων

Διάγραμμα 2.1	Παραγωγή ως προς εκτόνωση του πετρελαίου ^[11]
Διάγραμμα 2.2	Μηχανισμός παραγωγής με εκτόνωση ελεύθερου αερίου
Διάγραμμα 3.1	Τυπική Μεταβολή του GOR και της πίεσης ως προς τον χρόνο σε ταμιευτήρα πετρελαίου
Διάγραμμα 3.2	Σχέση απόδοσης γεωτρήσεων
Διάγραμμα 4.1	Πρόβλεψη παραγωγής σεναρίου P50 - Προφίλ της πίεσης ως προς τον χρόνο για τον ταμιευτήρα X
Διάγραμμα 4.2	Πρόβλεψη παραγωγής σεναρίου P50 - Παροχές ανά παράγουσα φάση για τον ταμιευτήρα X
Διάγραμμα 4.3	Πρόβλεψη παραγωγής σεναρίου P50 - Λόγος παραγόμενου αερίου ως προς το πετρέλαιο για τον ταμιευτήρα X
Διάγραμμα 4.4	Πρόβλεψη παραγωγής σεναρίου P50 - Συντελεστής αποληψιμότητας (recovery factor) για τον ταμιευτήρα X
Διάγραμμα 4.5	Πρόβλεψη παραγωγής σεναρίου P50 - Αθροιστική παραγωγή πετρελαίου, νερού και αερίου για τον ταμιευτήρα X
Διάγραμμα 4.6	Συντελεστής αποληψιμότητας όλων των σεναρίων ως προς το χρόνο για τον ταμιευτήρα X
Διάγραμμα 4.7	Παραγωγή πετρελαίου όλων των σεναρίων ως προς το χρόνο για τον ταμιευτήρα X
Διάγραμμα 4.8	Προφίλ μεταβολής της πίεσης ως προς το χρόνο για τις διάφορες τιμές του PI για τον ταμιευτήρα X

Διάγραμμα 4.9 Αθροιστική παροχή πετρελαίου για τις διάφορες τιμές του PI
για τον ταμειευτήρα X

Κατάλογος σχημάτων

- Σχήμα 2.1 Μεταβολές όγκων ταμιευτήρα καθώς η πίεση μεταβάλλεται^[9]
- Σχήμα 3.1 Καμπύλες σχετικών διαπερατοτήτων νερού-πετρελαίου κατά Corey για εκθέτη ίσο με 2

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.1	Τιμές του συντελεστή παραγωγικότητας για τους ταμιευτήρες νερού ανάλογα με τα χαρακτηριστικά τους
Πίνακας 3.1	Δεδομένα επιφανειακών μετρήσεων ταμιευτήρα Χ
Πίνακας 3.2	Ιδιότητες του πετρελαίου στο σημείο φυσαλίδας ταμιευτήρα Χ
Πίνακας 3.3	Χαρακτηριστικές παράμετροι των σεναρίων
Πίνακας 3.4	Αρχικές επικρατούσες συνθήκες του ταμιευτήρα Χ
Πίνακας 3.5	Εκτιμώμενες τιμές των παραμέτρων του ταμιευτήρα νερού
Πίνακας 3.6	Μελέτη ευαισθησίας ως προς τον όγκο του ταμιευτήρα νερού για το σενάριο P50
Πίνακας 3.7	Σχετικές διαπερατότητες
Πίνακας 3.8	Περιορισμοί για την πρόβλεψη παραγωγής του ταμιευτήρα Χ
Πίνακας 4.1	Αποτελέσματα μελέτης βελτιστοποίησης παραμέτρων