



**Πολυτεχνείο Κρήτης**  
**Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων**

**Υπολογιστική μελέτη συνθηκών ροής κατά τη Δευτερογενή  
Ανάκτηση πετρελαίου από ετερογενείς και  
διαστρωματωμένους ταμιευτήρες πετρελαίου**

**Πιάνος Μιχάλης**  
AM: 2013020084

Επιβλέπων Καθηγητής: Γιώτης Ανδρέας

Χανιά 2021

# Ευχαριστίες

*Θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου οι οποίοι με στήριζαν καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου με κάθε δυνατό τρόπο. Επίσης, θα ήθελα να απευθύνω τις ευχαριστίες μου στον καθηγητή του τμήματος κ. Γιώτη Ανδρέα για την καθοδήγηση του και την άριστη συνεργασία κατά την διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας καθώς και στο Εργαστήριο Περιβαλλοντικών Ερευνών του ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος για την ευγενική παραχώρηση της άδειας χρήσης του λογισμικού COMSOL Multiphysics και των υπολογιστικών υποδομών. Ακόμη, ευχαριστώ θερμά την διπλωματούχο μηχανικό Αναστασία Δόλλαρη για την ανιδιοτελή προσφορά της και τον σημαντικό χρόνο που μου αφιέρωσε καθ' όλη τη διάρκεια της συγγραφής. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους μου και όλους όσους με τον δικό τους ξεχωριστό τρόπο συνέβαλαν στην περάτωση της εργασίας αυτής.*

# Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η υπολογιστική μελέτη των συνθηκών ροής κατά τη διεργασία εισαγωγής νερού (waterflooding) σε ετερογενείς και ανισότροπους ταμιευτήρες πετρελαίου με χρήση του υπολογιστικού λογισμικού COMSOL Multiphysics. Πιο συγκεκριμένα, για την εκπόνηση της χρησιμοποιήθηκε υπολογιστικό module του COMSOL για πολυφασική ροή σε πορώδες μέσο. Έγινε προσομοίωση ροής σε σύνθετες διαμορφώσεις ταμιευτήρων με μεταβολή της διαπερατότητας στην έκτασή τους καθώς και συνύπαρξη αρκετών φρεατίων παραγωγής και εισπίεσης νερού. Η εργασία χωρίζεται σε τρία βασικά υπολογιστικά μέρη.

Στο πρώτο μελετάται η πιο απλή εκδοχή του προβλήματος η οποία είναι η δευτερογενής παραγωγή σε έναν τυπικό ομοιογενή σχηματισμό με μεγάλο λόγο μήκους προς πάχος. Στο δεύτερο μέρος το πρόβλημα γίνεται πιο σύνθετο, καθώς ο σχηματισμός αποκτά διαστρωμάτωση στην οποία παρουσιάζεται μεγάλη διαφορά διαπερατότητας μεταξύ του μεσαίου στρώματος και αυτών που βρίσκονται εκατέρωθεν αυτού. Τέλος, επιλύεται ένα αρκετά συνθετότερο πρόβλημα όπου η εκμετάλλευση του ταμιευτήρα γίνεται από τέσσερα πηγάδια παραγωγής και οκτώ εισαγωγής νερού, καθώς και πιο σύνθετη γεωμετρία. Το συγκεκριμένο μοντέλο ονομάζεται egg model και αποτελεί ένα σύγχρονο σενάριο αναφοράς της SPE για τη σύγκριση υπολογιστικών εργαλείων πολυφασικής ροής.

Κλείνοντας, εκτός από την ψηφιακή απεικόνιση κάθε περίπτωσης από το υπολογιστικό πρόγραμμα δημιουργήθηκαν και όλα τα κατάλληλα διαγράμματα για 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

Ευχαριστίες.....	1
Περίληψη .....	2
Περιεχόμενα.....	3
Κεφάλαιο 1.....	5
Εισαγωγή .....	5
1.1 Ταμιευτήρες πετρελαίου και φυσικού αερίου.....	5
1.1.1 Πορώδες.....	5
1.1.2 Διαπερατότητα .....	6
1.1.3 Ανισοτροπία Πορώδους Μέσου.....	7
1.1.4 Κορεσμός σε Ρευστά.....	8
1.2 Μέθοδοι Ανάκτησης Πετρελαίου .....	9
1.2.1 Εισαγωγή (ή Εισπίεση) Νερού (Waterflooding).....	15
Κεφάλαιο 2.....	16
Η πλατφόρμα COMSOL Multiphysics .....	16
2.1 Εισαγωγή .....	16
2.2 Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων .....	18
Κεφάλαιο 3.....	20
Μοντελοποίηση Πολυφασικής Ροής .....	20
3.1 Εισαγωγή .....	20
3.2 Πολυφασική ροή σε πορώδη υλικά .....	20
3.2.1 Εξισώσεις πολυφασικής ροής σε πορώδη υλικά.....	21
3.2.2 Σύνθεση εξισώσεων πίεσης-κορεσμού .....	23
3.3 Εφαρμογή του μοντέλου σε ομοιογενείς ταμιευτήρες.....	25
3.4 Εφαρμογή του μοντέλου σε ετερογενείς ταμιευτήρες με διαστρωμάτωση .....	42
3.5 Συμπεράσματα .....	60
Κεφάλαιο 4.....	61
Το πρότυπο ταμιευτήρα “Egg” .....	61
4.1 Εισαγωγή .....	61
4.2 Εφαρμογή του Egg Model στο COMSOL Multiphysics .....	62
4.3 Συμπεράσματα .....	77
Κεφάλαιο 5.....	78
Συμπεράσματα διπλωματικής εργασίας .....	78

<b>Βιβλιογραφία .....</b>	<b>80</b>
<b>Κατάλογος Εικόνων .....</b>	<b>82</b>
<b>Κατάλογος Πινάκων .....</b>	<b>84</b>

# Κεφάλαιο 1

## Εισαγωγή

### 1.1 Ταμιευτήρες πετρελαίου και φυσικού αερίου

Με τον όρο Ταμιευτήρας πετρελαίου ή/και φυσικού αερίου, χαρακτηρίζεται ένα πορώδες, περατό, ιζηματογενές τμήμα πετρώματος στο οποίο τους πόρους βρίσκονται εγκλωβισμένοι υδρογονάνθρακες (σε υγρή ή/και αέρια κατάσταση) και νερό του σχηματισμού. Τις περισσότερες φορές βρίσκεται σε αρκετά μεγάλο βάθος (1-4km) και καλύπτεται από επάνω από αδιαπέρατο πέτρωμα (cap rock) που λειτουργεί ως δομική παγίδα των ρευστών. Η γραμμή που ορίζει τα σύνορα μεταξύ ενός ταμιευτήρα πετρελαίου και του υδάτινου ορίζοντά του καλείται αρχική επαφή πετρελαίου-νερού (oil-water contact). Η ζώνη των υδρογονανθράκων βρίσκεται πάντοτε πάνω από την επαφή αυτή, διότι η πυκνότητα όλων των φάσεων υδρογονανθράκων, ανεξάρτητα από την σύσταση και της συνθήκες, είναι χαμηλότερη της πυκνότητας του νερού. Στην απλούστερη περίπτωση η μετάβαση από τον υδάτινο ορίζοντα στην πετρελαιοφόρα ζώνη είναι ασυνεχής. Οι ταμιευτήρες έχουν ορισμένες βασικές ιδιότητες που χαρακτηρίζουν τον σχηματισμό.

#### 1.1.1 Πορώδες

Το πορώδες εκφράζει την διαθέσιμη χωρητικότητα ενός ταμιευτήρα για την αποθήκευση ρευστών υδρογονανθράκων. Παρίσταται με  $\varepsilon_p$  και ορίζεται ως ο λόγος του όγκου που καταλαμβάνεται από τις ρευστές φάσεις ενός ταμιευτήρα προς τον ολικό όγκο αυτού. Οι τιμές του στους ταμιευτήρες υδρογονανθράκων κυμαίνονται μεταξύ του 5% και 30% με την πλειοψηφία

τους από 10% έως 20%. Πορώδες κάτω του 5% καθιστά τον ταμιευτήρα μη εκμεταλλεύσιμο, ενώ άνω του 35% συναντάται πολύ σπάνια.

Ανάλογα με το αν συνδέονται ή όχι οι πόροι ενός ταμιευτήρα μεταξύ τους διακρίνεται σε αλληλοσυνδεόμενο (interconnected) και απομονωμένο (isolated). Η ύπαρξη επικοινωνίας μεταξύ των πόρων επιτρέπει την ροή των ρευστών διαμέσου του πορώδους μέσου και κατ' επέκταση την παραγωγή των εγκλωβισμένων υδρογονανθράκων σαν αποτέλεσμα είτε της εκτόνωσης είτε της εκτόπισης τους από το προελαύνον υδάτινο μέτωπο. Στην περίπτωση που το πορώδες συμβάλλει στην παραγωγή πετρελαίου καλείται ενεργό (effective). Σε ταμιευτήρες όπου διάφορα συγκολλητικά υλικά έχουν απομονώσει ένα μεγάλο μέρος των πόρων από το υπόλοιπο, οι υδρογονάνθρακες που έχουν παγιδευτεί εκεί αδυνατούν να παραχθούν και συνεπώς να συμβάλλουν στην παραγωγή. Κατά συνέπεια ως ενεργό πορώδες ορίζεται ο λόγος του όγκου του αλληλοσυνδεόμενου πορώδους προς τον ολικό όγκο του ταμιευτήρα. Η τιμή του ενεργού πορώδους αποτελεί κρίσιμη πληροφορία για την μελέτη και τον χαρακτηρισμό ενός κοιτάσματος. (N.Βαρότσης, 2017)

### **1.1.2 Διαπερατότητα**

Η διαπερατότητα ενός πορώδους πετρώματος σχετίζεται με τη δυνατότητα ενός ή περισσότερων ρευστών να ρέουν διαμέσου αυτού υπό την επίδραση της βαρύτητας ή/και της διαφοράς πίεσης στα άκρα του. Σε ένα ταμιευτήρα, το εύρος τιμών που μπορεί να λάβει η διαπερατότητα είναι μεγάλο και συνήθως ποικίλλει και κατά την οριζόντια και κατά την κατακόρυφη διεύθυνση. Έχουν μελετηθεί περιπτώσεις δείγματος πυρήνα γεωτρήσεων όπου παρότι το δοκίμιο εμφανίζεται απόλυτα ομοιόμορφο, η διαπερατότητα του μεταβάλλεται κατά αρκετές τάξεις μεγέθους σε

απόσταση λίγων μόνο εκατοστών. Γενικά, οι διαπερατότητες που μετρούνται παράλληλα προς τα επίπεδα επικάθησης των ιζηματογενών πετρωμάτων είναι σημαντικά πιο αυξημένες από τις αντίστοιχες κατακόρυφες διαπερατότητες. Η παρουσία σε ένα ταμιευτήρα ενός ή περισσότερων στρωμάτων με σημαντικές διαφορές διαπερατότητας από τα υπόλοιπα στρώματα αποτελεί σύνηθες φαινόμενο και θέτει ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα στον μηχανικό πετρελαίων που θα επιχειρήσει τον σχεδιασμό της παραγωγής. Μια τέτοια περίπτωση διαστρωμάτωσης θα μελετηθεί υπολογιστικά στο κεφάλαιο 3 της παρούσας εργασίας.

### 1.1.3 Ανισοτροπία Πορώδους Μέσου.

Στα περισσότερα ιζηματογενή πορώδη μέσα, η διαπερατότητα έχει αυξημένη τιμή κατά την οριζόντια διεύθυνση και χαμηλότερη κατά την κατακόρυφη. Το ίδιο συμβαίνει και σε ομοιογενείς ψαμμίτες λόγω της κατακόρυφης πίεσης της οφειλόμενης στο βάρος των υπερκειμένων στρωμάτων (τάση υπερκειμένων), δηλαδή της πίεσης που εφαρμόζεται από τα υπερκείμενα πετρώματα πάνω στους κόκκους του ψαμμίτη του σχηματισμού.

Ουσιαστικά είναι, ως επί το πλείστον, αρκετό να εκφραστεί η διαπερατότητα ανισότροπου πετρώματος ταμιευτήρα με τρεις διακριτές τιμές  $k_x$ ,  $k_y$ ,  $k_z$  που αντιστοιχούν στην διαπερατότητα σε κατευθύνσεις παράλληλες προς τους άξονες ενός ορθογωνίου συστήματος συντεταγμένων. Όπως αναφέρθηκε πιο πάνω, σε ένα οριζόντιο ή σχεδόν οριζόντιο στρώμα ( $x$  και  $y$  ορίζουν το επίπεδο επιστρώσεως),  $k_x = k_y$  στην μεγάλη πλειοψηφία των περιπτώσεων.

Μερικές άργιλοι διογκούνται όταν έλθουν σε επαφή με νερό χαμηλής περιεκτικότητας σε άλατα. Επομένως αν φρέσκο νερό διεισδύσει μέσα σε ένα σχηματισμό αργίλων αναμένεται δραστική μείωση της διαπερατότητας του στρώματος, που μπορεί να αγγίζει και το μηδέν. Η περίπτωση

αυτή αποτελεί ένα από τα πιο χαρακτηριστικά παραδείγματα επίδρασης της σύστασης του ρευστού πάνω στο πορώδες μέσο και μπορεί να συμβεί κατά την διάρκεια της γεώτρησης με την επαφή του υδατικού διαλύματος της ιλύος με τις αργίλους. Επίσης η γεωτρητική λάσπη συχνά φράζει τους πόρους του πετρώματος γύρω από το φρεάτιο με αποτέλεσμα την μείωση της διαπερατότητας στη περιοχή (well damage). (N.Βαρότσης, 2017)

### 1.1.4 Κορεσμός σε Ρευστά

Στους περισσότερους σχηματισμούς που περιέχονται υδρογονάνθρακες οι πόροι του ταμιευτήρα πληρούνται με το νερό του σχηματισμού προτού το πετρέλαιο μεταναστεύσει σε αυτούς. Αργότερα, οι μικρότερης πυκνότητας υδρογονάνθρακες εκτοπίζουν ένα μεγάλο μέρος του προϋπάρχοντος νερού από τα υψηλότερα τμήματα της δομής έτσι ώστε οι ταμιευτήρες να περιέχουν υδρογονάνθρακες αλλά και νερό, το οποίο μένει για πάντα εγκλωβισμένο στους ίδιους με το πετρέλαιο ή και σε γειτονικούς πόρους. Για να μπορέσουμε να καθορίσουμε την ποσότητα των υδρογονανθράκων που περικλείονται σε ένα δεδομένο πορώδες μέσο θα πρέπει να καθορίσουμε τον βαθμό κορεσμού του στα τρία ρευστά τα οποία συνυπάρχουν μέσα στους πόρους του δηλαδή σε πετρέλαιο, νερό και αέριο. Ο κορεσμός ενός πορώδους μέσου σε νερό, πετρέλαιο και αέριο ορίζεται σαν το κλάσμα του όγκου των πόρων που καταλαμβάνεται από το κάθε ρευστό προς τον συνολικό διαθέσιμο όγκο για τα ρευστά στο πέτρωμα. Δηλαδή:

$$S_w = \frac{V_w}{V_p} \quad (1.1)$$

$$S_o = \frac{V_o}{V_p} \quad (1.2)$$

$$S_g = \frac{V_g}{V_p} \quad (1.3)$$

$$S_w + S_o + S_g = 1 \quad (1.4)$$

Όπου  $V_w, V_o, V_g, V_v$  είναι οι όγκοι που καταλαμβάνουν το νερό, το πετρέλαιο, το αέριο και οι πόροι (N.Βαρότσης, 2017)

## 1.2 Μέθοδοι Ανάκτησης Πετρελαίου

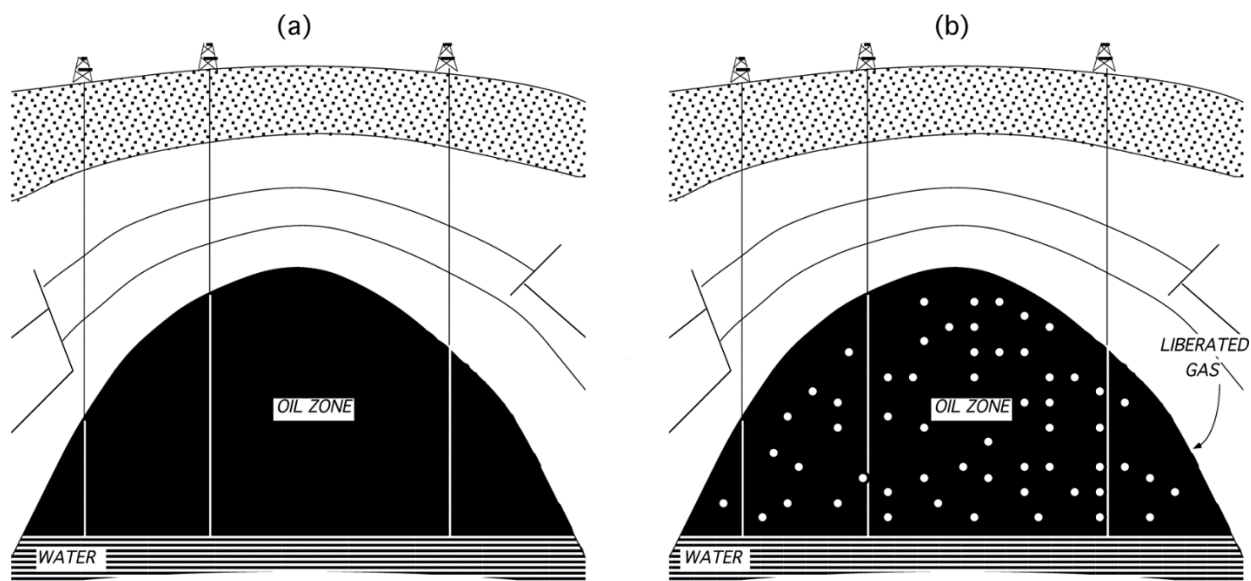
Οι εργασίες ανάκτησης πετρελαίου παραδοσιακά υποδιαιρέθηκαν σε τρία στάδια: πρωτογενή, δευτερογενή και τριτογενή. Ιστορικά, αυτά τα στάδια περιγράφουν την παραγωγή από έναν ταμειυτήρα χρονολογικά αλλά λόγω της δυσκολίας της χρονολογικής κατηγοριοποίησης της παραγωγής πετρελαίου, η ταξινόμηση που γίνεται με βάση την περιγραφή της διαδικασίας είναι πιο χρήσιμη και γενικά πιο αποδεκτή προσέγγιση. Επίσης, ο χαρακτηρισμός της "ενισχυμένης ανάκτησης πετρελαίου (Enhanced Oil Recovery)" αντί "τριτογενής ανάκτηση" (Tertiary recovery) έχει γίνει πιο αποδεκτός. (Green and Willhite, 1998)

Όσον αφορά την ανάκτηση πετρελαίου, κάθε ταμειυτήρας είναι μοναδικός, αλλά συνήθως η πρωτογενής παραγωγή θα είναι περίπου 15-25% του αρχικού πετρελαίου (OOIP), ενώ κατά την δευτερεύουσα το IOR που χρησιμοποιεί συμβατικές τεχνικές θα κυμαίνεται μεταξύ 20-40% του OOIP. Το EOR επιτρέπει άλλο 5% έως 15% του πετρελαίου του ταμειυτήρα να ανακτηθεί. Επιπλέον, οι πρόσφατες εξελίξεις στην τεχνολογία ταμειυτήρων έχουν δείξει τιμές ανάκτησης σε τριτογενή παραγωγή πετρελαίου εκτιμώνται μεταξύ 45-50% του OOIP. Οι τιμές άνω του 60% είναι πολύ σπάνιες, αλλά ορισμένα ώριμα πεδία στη Βόρεια Θάλασσα προβλέπουν ανάκτηση 64% του OOIP με πιθανό 75% χρησιμοποιώντας μία διαδικασία ανάμιξης WAG (Water Alternating Gas).

Η ανάκτηση πετρελαίου με οποιονδήποτε από τους φυσικούς μηχανισμούς κίνησης ονομάζεται πρωτογενής ανάκτηση. Ο όρος αναφέρεται στην παραγωγή υδρογονανθράκων από ένα κοίτασμα χωρίς τη χρήση οποιασδήποτε διαδικασίας (όπως εισαγωγή υγρού) για τη συμπλήρωση της φυσικής ενέργειας του ταμιευτήρα. Καθώς οι μηχανισμοί απελευθέρωσης ενέργειας παρέχονται από τη γεώτρηση και τη λειτουργία των φρεατίων, η πίεση του ταμιευτήρα μειώνεται, τα ρευστά εκτονώνονται, προκαλείται ροή και ξεκινάει η παραγωγή ρευστών. Η μεταβολή όγκου λόγω διαστολής των πετρωμάτων και ρευστών εντός της δεξαμενής οδηγεί σε ίσο όγκο εξωθούμενων ρευστών.

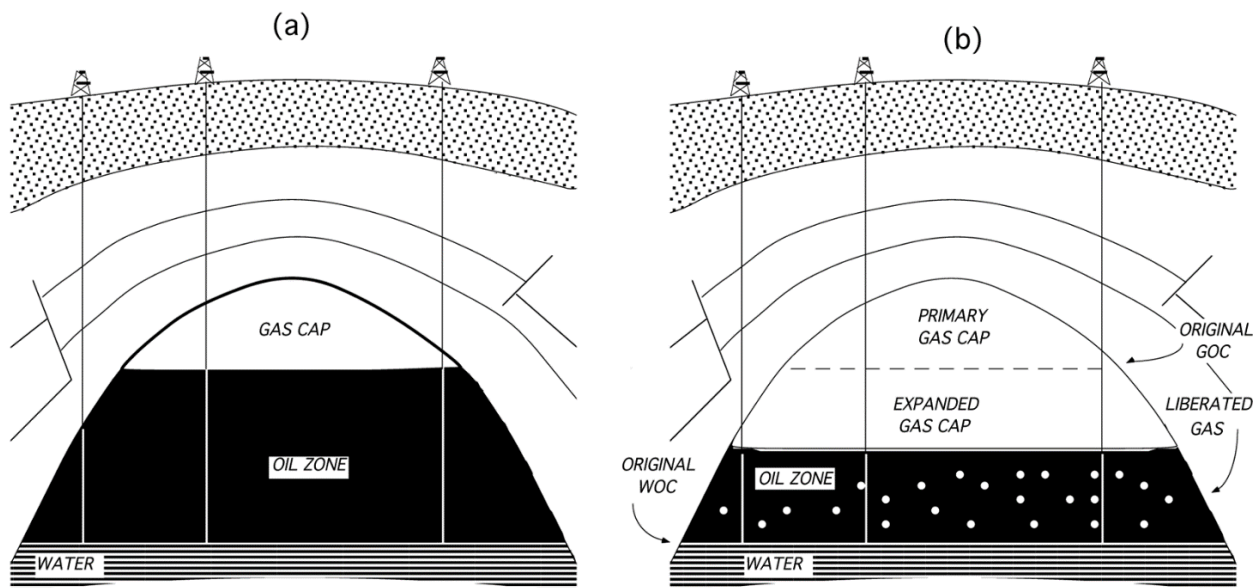
Η συνολική απόδοση των ταμιευτήρων πετρελαίου καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από τη φύση της ενέργειας του, δηλαδή, μηχανισμούς “οδήγησης” (drive) για τη μεταφορά του πετρελαίου στην επιφάνεια. Υπάρχουν βασικά τέσσερις μηχανισμοί οδήγησης: του αερίου εν διαλύσει (solution gas drive), της υπερκείμενης ζώνης αερίου (gas cap drive), της φυσικής εισροής νερού (water drive) και της βαρύτητας που αναγκάζει το πετρέλαιο και το αέριο να διαχωριστούν εντός του ταμιευτήρα.

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 έξω από τους πόρους του πετρώματος και την προώθηση του προς το φρεάτιο παραγωγής την εκτόνωση της φάσης του πετρελαίου, την εκτόνωση του αερίου που είναι διαλελυμένο στο πετρέλαιο, το οποίο εξατμίζεται και καταλαμβάνει μεγαλύτερο όγκο από το αντίστοιχο υγρό με αποτέλεσμα να εκτοπίζει το πετρέλαιο προς το πηγάδι παραγωγής, και την εκτόνωση που προέρχεται σαν αποτέλεσμα της μεταβολής του HCPV (hydrocarbon pore volume). (N.Βαρότσης, 2017)



**Εικόνα 1.1: ταμιευτήρας πετρελαίου με κινητήριο μηχανισμό παραγωγής αυτόν του αερίου εν διαλύσει (solution gas drive) (Πηγή: Petrol wiki)**

Η υπερκείμενη ζώνη αερίου (gas cap) βρίσκεται πάνω από την ζώνη του πετρελαίου. Στους ταμιευτήρες αυτούς το διογκούμενο αέριο της ανώτερης ζώνης είναι υπεύθυνο για την πλειονότητα της διαστολής του αερίου στον σχηματισμό. Στις περιπτώσεις αυτές το αέριο που εκτονώνεται εκτοπίζει το πετρέλαιο προς το φρεάτιο παραγωγής με τον ίδιο τρόπο που δουλεύει ένα πιστόνι.

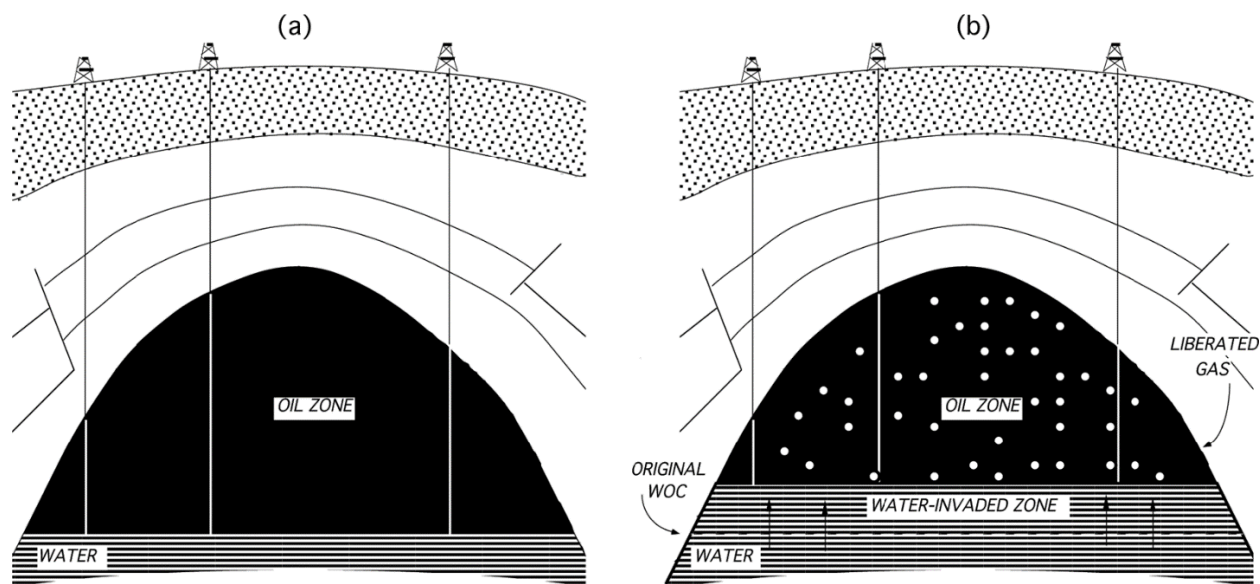


**Εικόνα 1.2: ταμιευτήρας πετρελαίου με κινητήριο μηχανισμό παραγωγής αυτόν της υπερκείμενης ζώνης αερίου (gas cap drive) (Πηγή: Petrol wiki)**

Στην περίπτωση του κινητήριου μηχανισμού υποκείμενου υδατοφόρου ζώνης (water drive) περιλαμβάνεται μόνο η φυσική εισροή νερού από αυτήν στον ταμιευτήρα και όχι η τεχνητή εισαγωγή του. Το νερό αναπληρώνει τους όγκους των ρευστών που παράγονται και έτσι η πίεση στον ταμιευτήρα πέφτει με πολύ χαμηλότερο ρυθμό απ'ότι αν δεν συνέβαινε η παραπάνω διαδικασία. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η παραγωγή να παραμένει σε πρωτογενές στάδιο για αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα.

Επίσης, καθώς η πυκνότητα του νερού είναι μεγαλύτερη από τις αντίστοιχες πυκνότητες των υδρογονανθράκων η βαρύτητα τείνει να συγκρατεί το νερό στο κατώτερο τμήμα του ταμιευτήρα. Ο διαχωρισμός αυτός ειδικά στην περίπτωση ταμιευτήρων με υψηλή κλίση και πολλαπλά στρώματα μπορεί να αποδειχτεί ευεργετικός καθώς τείνει να διατηρεί το μέτωπο του νερού ομοιόμορφο καθώς κινείται προς τα πάνω και ελαχιστοποιεί την κατά προτίμηση διείσδυση του νερού στα στρώματα υψηλής διαπερατότητας. Η επιλογή των θέσεων των παραγωγικών

γεωτρήσεων καθώς και του βάθους των διατρήσεων κάθε μίας εξ αυτών επηρεάζουν έντονα την απόδοση των ταμιευτήρων με κινητήριο μηχανισμό την φυσική εισροή νερού (water drive mechanism). (N.Βαρότσης, 2017)



**Εικόνα 1.3: ταμιευτήρας πετρελαίου με κινητήριο μηχανισμό παραγωγής αυτόν της φυσικής εισροής νερού (water drive) ( Πηγή: Petrol wiki)**

Ο διαχωρισμός των ρευστών του ταμιευτήρα δια της βαρύτητας είναι ένας από τους πλέον αποτελεσματικούς φυσικούς κινητήριους μηχανισμούς παραγωγής υπογείων ταμιευτήρων αν συντρέχουν οι κατάλληλες συνθήκες. Κάτω από την επίδραση του γήινου βαρυτικού πεδίου αέριο, πετρέλαιο και νερό διαχωρίζονται ανάλογα με τις πυκνότητές τους. Ο διαχωρισμός αυτός είναι μία βραδεία διεργασία που τα αποτελέσματα της φαίνονται μετά από ορισμένο χρονικό διάστημα. Αποδίδει καλύτερα σε ταμιευτήρες μεγάλου πάχους με σημαντική επικοινωνία και συνέχεια κατά την κατακόρυφη συνιστώσα καθώς επίσης και σε στρώματα που η διεύθυνσή τους παρουσιάζει γωνία τουλάχιστον 10-15° με την οριζόντια. (N.Βαρότσης, 2017)

Όταν η φυσική ενέργεια του ταμιευτήρα δεν είναι πλέον αρκετή για να διατηρηθεί την παραγωγή πετρελαίου στους επιθυμητούς ρυθμούς, άλλα τεχνητά μέσα διατήρησης-αύξησης ενέργειας εφαρμόζονται στον ταμιευτήρα. Η δευτερογενής ανάκτηση προκύπτει με την διατήρηση της πίεσης του ταμιευτήρα μέσω εισαγωγής νερού(καθαρού ή θαλασσινού) ή αερίου, διαμέσου ειδικά σχεδιασμένων φρεατίων, με σκοπό να εκτοπιστεί το πετρέλαιο προς τα πηγάδια παραγωγής, αν και ο όρος είναι πλέον σχεδόν συνώνυμος με το waterflooding. Εισαγωγή αερίου, στην περίπτωση αυτή, είτε εισάγεται σε θύλακα αερίου για συντήρηση της πίεσης και επέκταση του ή σε oil column wells για να αντικαταστήσει το πετρέλαιο ανάλογα με τη σχετική διαπερατότητα και της ογκομετρικές εκτιμήσεις. (Green and Willhite, 1998)

Η τριτογενής ανάκτηση πετρελαίου (Enhanced Oil Recovery) γίνεται μέσω ορισμένων διαδικασιών, όπως η θερμική ή χημική μείωση του ιξώδους ή/και της διεπιφανειακής τάσης μεταξύ των ρευστών αλλά και του βαθμού διαβροχής του πετρώματος από τη φάση του πετρελαίου. Σε αυτές χρησιμοποιούνται αέρια υδρογονανθράκων, CO<sub>2</sub> , αέρια αζώτου και καυσαερίων. Η εισαγωγή υγρών χημικών όπως πολυμερή, τασιενεργά και διαλύτες υδρογονανθράκων, και / ή χρήση θερμικής ενέργειας συμπεριλαμβάνονται στις διαδικασίες EOR. Οι θερμικές διεργασίες συνήθως συνιστούν την χρήση ατμού ή ζεστού νερό, ή βασίζονται στην επιτόπου παραγωγή θερμικής ενέργειας μέσω της συμπίεσης του πετρελαίου στον βράχο του ταμιευτήρα. (Green and Willhite, 1998) Το EOR εφαρμόζεται συνήθως για την ανάκτηση περισσότερο του εγκλωβισμένου πετρελαίου (residual oil) του ταμιευτήρα όταν η πρωτογενής και η δευτερογενής ανακτήσεις έχουν φτάσει το οικονομικό τους όριο.

### 1.2.1 Εισαγωγή (ή Εισπίεση) Νερού (Waterflooding)

Με την πάροδο των ετών το waterflooding έχει γίνει η ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος δευτερογενούς ανάκτησης πετρελαίου μετά την εξάντληση της πρωτογενούς ενέργειας του ταμιευτήρα. (Ogbeiwi et al., 2017). Αρχικά το νερό εισάγεται μέσω ενός φρεατίου εισαγωγής (injection well) στον ταμιευτήρα. Στη συνέχεια αυτό ωθείται μέσα από τους πόρους και σαρώνει το κοίτασμα προς ένα άλλο σύνολο γεωτρήσεων γνωστό ως γεωτρήσεις παραγωγής (production wells). Ως αποτέλεσμα, υπάρχει μια αύξηση στη συνολική παραγωγή πετρελαίου από τον ταμιευτήρα. Ωστόσο, το ποσοστό του νερού στο παραγόμενο ρευστό αυξάνεται σταθερά. Κατά μέσο όρο, αυτή η διαδικασία μπορεί να οδηγήσει στην ανάκτηση περίπου του ενός τρίτου του ΟΟΙΡ (Original Oil In Place), αφήνοντας πίσω περίπου τα δύο τρίτα. (Meshioye et al., 2010). Η αποτελεσματικότητα μιας μεθόδου ανάκτησης πετρελαίου καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από τον φυσικό μηχανισμό σε μικροσκοπικό επίπεδο, π.χ. πώς κατανέμονται οι φάσεις πετρελαίου, νερού και φυσικού αερίου στους πόρους του πετρώματος. Η θεωρία «front advance» των Buckley και Leverett (1941) χαρακτηρίζει τον μηχανισμό μακροσκοπικής μετατόπισης σε πορώδη μέσα σε κλίμακα πεδίου αγνοώντας τη σημαντική επίδραση της ετερογένειας του μέσου και των τριχοειδών δυνάμεων που εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την κατανομή μεγέθους των πόρων του σχηματισμού. (Chen, 2000)

# Κεφάλαιο 2

## Η πλατφόρμα COMSOL Multiphysics

### 2.1 Εισαγωγή

Το COMSOL Multiphysics είναι ένα μία σύγχρονη υπολογιστική πλατφόρμα που χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση και αριθμητική επίλυση σύνθετων επιστημονικών και μηχανικών προβλημάτων. Τα συμβατικά μοντέλα για έναν τύπο φυσικής μπορούν να επεκταθούν σε μοντέλα πολλαπλών φυσικών προτύπων που επιλύουν σύνθετα και διασυνδεδεμένα φυσικά φαινόμενα.

Με τα ενσωματωμένα physics interfaces και την προηγμένη υποστήριξη για ιδιότητες υλικών, τα μοντέλα μπορούν να κατασκευαστούν καθορίζοντας τις σχετικές φυσικές ποσότητες (όπως ιδιότητες υλικού, φορτία, περιορισμοί, πηγές και ροές). Αυτές οι μεταβλητές, εκφράσεις ή σταθερές εφαρμόζονται απευθείας σε στερεά και ρευστά πεδία, όρια, άκρα και σημεία ανεξάρτητα από το υπολογιστικό πλέγμα. Στη συνέχεια, το λογισμικό COMSOL Multiphysics καταρτίζει εσωτερικά ένα σύνολο αριθμητικών εξισώσεων που αντιπροσωπεύουν ολόκληρο το μοντέλο.

Χρησιμοποιώντας αυτά τα physics interfaces, διάφοροι τύποι μελετών μπορεί να περιλαμβάνουν:

- Διεργασίες σε μόνιμες συνθήκες (steady state) και μεταβατικές (δυναμικές) συνθήκες εξαρτώμενες από το χρόνο
- Γραμμικές και μη γραμμικές διεργασίες
- Παραμετρικές μελέτες και απόκρισης συχνότητας

Κατά την επίλυση των προτύπων, το λογισμικό COMSOL Multiphysics συγκεντρώνει και επιλύει το πρόβλημα χρησιμοποιώντας ένα σύνολο προηγμένων εργαλείων αριθμητικής ανάλυσης. Το λογισμικό εκτελεί την ανάλυση μαζί με δυναμικά προσαρμοζόμενο πλέγμα και έλεγχο σφαλμάτων χρησιμοποιώντας μια ποικιλία αριθμητικών λύσεων.

Η ισχύς του COMSOL Multiphysics ως αυτόνομο προϊόν είναι πως είναι προσβάσιμο μέσω ενός ευέλικτου γραφικού περιβάλλοντος χρήστη (GUI), σε εφαρμογές που δημιουργούνται χρησιμοποιώντας το Application Builder ή μέσω προγραμματισμού σεναρίων σε Java ή στη γλώσσα MATLAB. Επιπλέον, το λογισμικό δημιουργεί ακολουθίες για την καταγραφή όλων των βημάτων που δημιουργούν τη γεωμετρία, το πλέγμα, τις μελέτες και τις ρυθμίσεις επίλυσης, και την οπτικοποίηση και την παρουσίαση των αποτελεσμάτων. (Comsol, 2015)

Το λογισμικό COMSOL Multiphysics έχει χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση πολυφασικής ροής ρευστού σε πορώδη μέσα σε αρκετές εργασίες της βιβλιογραφίας. Οι Bjornara και Aker (2008) αξιολόγησαν την αριθμητική απόδοση (αριθμητική σταθερότητα και χρόνος επίλυσης) διαφόρων συνθέσεων για τη διφασική ασυμπίεστη αναμίξιμη ροή σε προσομοιώσεις 2D και 1D. Ο Zhang (2011) εφάρμοσε επίσης μια πλήρη δισδιάστατη προσομοίωση της εισαγωγής νερού στο COMSOL μετασχηματίζοντας το πρόβλημα σε μορφή χωρίς διάσταση, για τη μελέτη της αναβάθμισης των δύο φάσεων ροών σε δεξαμενές πετρελαίου. Μια απλουστευμένη εκδοχή του μοντέλου black oil, με την προϋπόθεση ότι τα υγρά είναι ασυμπίεστα εφαρμόστηκε στο COMSOL από τους Diaz-Viera et al. (2008) χρησιμοποιώντας μια προσέγγιση πεπερασμένων στοιχείων για την προσομοίωση ενός πειράματος waterflooding μέσω πυρήνα ψαμμίτη. Το μοντέλο συνδυάστηκε με ένα πολυφασικό, πολυμερές μοντέλο μεταφοράς για τη μελέτη διαδικασιών EOR σε εργαστηριακή κλίμακα.

## 2.2 Μέθοδος Πεπερασμένων Στοιχείων

Για τη συντριπτική πλειονότητα των γεωμετριών και των προβλημάτων, οι μερικές διαφορικές εξισώσεις PDE (Partial Differential Equation) που περιγράφουν φυσικές διεργασίες δεν μπορούν να επιλυθούν με αναλυτικές μεθόδους. Αντ' αυτού, μπορεί να κατασκευαστεί μια προσέγγιση των εξισώσεων, η οποία συνήθως βασίζεται σε διαφορετικούς τύπους διακριτικοποιήσεων. Αυτές οι μέθοδοι διακριτοποίησης προσεγγίζουν τις PDE με αριθμητικές εξισώσεις μοντέλων, οι οποίες μπορούν να επιλυθούν χρησιμοποιώντας αριθμητικές μεθόδους. Η λύση στις αριθμητικές εξισώσεις μοντέλου είναι μια προσέγγιση της πραγματικής λύσης των PDE. Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων (FEM) χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό τέτοιων προσεγγίσεων στο COMSOL Multiphysics.

Η FEM (Finite Element Method) υποδιαιρεί ένα αντικείμενο σε πολύ μικρά αλλά πεπερασμένα μεγέθη στοιχεία. Η φυσική ενός στοιχείου περιγράφεται περίπου από έναν πεπερασμένο αριθμό βαθμών ελευθερίας (DOF). Σε κάθε στοιχείο εκχωρείται ένα σύνολο χαρακτηριστικών εξισώσεων (που περιγράφουν τη φυσική ιδιότητες, οριακές συνθήκες και επιβαλλόμενες δυνάμεις), οι οποίες στη συνέχεια επιλύονται ως σύνολο ταυτόχρονων εξισώσεων για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς του αντικειμένου. (Comsol, 2015) Αυτά τα στοιχεία έχουν τις ίδιες ιδιότητες με τις αρχικές εξισώσεις, αλλά είναι απλούστερα να οριστούν και να μειωθεί ο αριθμός των αγνώστων.

Τα γενικά βήματα της FEM περιγράφονται ως εξής: Το πρώτο βήμα αποτελείται από τη διαίρεση του υπολογιστικού πεδίου σε μικρά στοιχεία. Ο τύπος, το μέγεθος και ο αριθμός των στοιχείων είναι το πεδίο της κρίσης του μηχανικού, αλλά μπορεί να υποστηριχθεί με έρευνα. Το επόμενο βήμα είναι να επιλεχθούν οι συναρτήσεις παρεμβολής. Ορίζεται στο στοιχείο χρησιμοποιώντας τις κομβικές τιμές του. Οι πιο κοινές λειτουργίες είναι γραμμικά, τετραγωνικά και κυβικά πολυώνυμα, γιατί είναι εύκολο να δουλευθούν. Ο βαθμός του πολυωνύμου ποικίλλει ανάλογα τον

αριθμό και τη φύση των κόμβων των στοιχείων και τους αγνώστους σε κάθε κόμβο. Το επόμενο βήμα είναι να ρυθμιστούν οι εξισώσεις μήτρας (matrix equations). Για αυτό, μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορες μέθοδοι. Για να αποκτηθεί η τελική εξίσωση για το σύστημα, το επόμενο βήμα είναι να συλλεχθούν και να συγκεντρωθούν οι εξισώσεις για τις ιδιότητες του στοιχείου. Το σύνολο των αποτελεσμάτων οδηγεί σε μια ομάδα εξισώσεων με άγνωστες κομβικές τιμές και βαθμούς ελευθερίας. Το είδος των εξισώσεων που πρέπει να λυθούν εξαρτάται από τον τύπο του προβλήματος και αν εξαρτάται από το χρόνο ή όχι. Στο τέλος, άλλες παράμετροι εξαρτώμενες από αυτές που υπολογίζονται μπορούν επίσης να υπολογιστούν. Αυτές οι παράμετροι αναφέρονται επίσης ως παράγωγες τιμές και μπορεί να είναι όγκος, επιφανειακοί μέσοι όροι ή ενοποιήσεις ή απλά απλή σημειακή αξιολόγηση ορισμένων ποσοτήτων. (Huebner et al., 2008)

# Κεφάλαιο 3

## Μοντελοποίηση Πολυφασικής Ροής

### 3.1 Εισαγωγή

Το Waterflooding είναι η βασική μέθοδος δευτερογενούς ανάκτησης υδρογονανθράκων και διατήρησης της πίεσης έναν ταμιευτήρα. Το νερό εισάγεται στον ταμιευτήρα διαμέσου φρεατίων εισαγωγής, και εκτοπίζει τους υδρογονάνθρακες προς τα φρεάτια παραγωγής. Αυτή η διαδικασία ενισχύεται σημαντικά από την άνωση (buoyancy) που οδηγεί στη συσσώρευση του εισαγόμενου νερού στο κάτω μέρος του ταμιευτήρα ωθώντας έτσι το ελαφρύτερο πετρέλαιο προς την επιφάνεια. Η μοντελοποίηση πολυφασικής ροής σε πορώδη μέσα όταν μια τέτοια διαδικασία λαμβάνει χώρα μελετάται στον τρέχον κεφάλαιο σε δύο διαφορετικά δομικά πρότυπα του ταμιευτήρα, ένα με διαστρωμάτωση (layering) και ένα χωρίς, καθώς και στο 4<sup>ο</sup> κεφάλαιο. Για την υλοποίηση της γίνεται χρήση του υπολογιστικού περιβάλλοντος του COMSOL Multiphysics για πολυφασική ροή σε πορώδες μέσο. Για την απλοποίηση της αριθμητικής επίλυσης οι ιδιότητες των ρευστών θεωρούνται σταθερές και ανεξάρτητες της πίεσης σε πολλές μελέτες προσομοίωσης ροής, σε αυτή την περίπτωση η ροή χαρακτηρίζεται ασυμπίεστη. Επίσης, σε όλα τα σενάρια λαμβάνεται υπόψη η βαρύτητα.

### 3.2 Πολυφασική ροή σε πορώδη υλικά

Όταν υπάρχουν περισσότερα από ένα ρευστά που ρέουν μέσω του πορώδους μέσου, αυτά αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους και η συνολική ροή τους περιγράφεται από τη σχετική

διαπερατότητα. Αυτή είναι ένα μέτρο της ικανότητας ενός πορώδους μέσου για τη διεξαγωγή ροής ενός δεδομένου ρευστού παρουσία άλλων μη αναμίξιμων ρευστών. Προφανώς η πολυφασική ροή σε πορώδη μέσα είναι πολύπλοκη διαδικασία που εξαρτάται από πολλούς διαφορετικούς παράγοντες. Η σχετική διαπερατότητα είναι συνάρτηση της χωρικής κατανομής των ρευστών, και επηρεάζεται τόσο από τη δομή των πόρων όσο και από την κατανομή του μεγέθους τους. Επίσης, επηρεάζεται από τη διαβρεξιμότητα του σχηματισμού, το ιστορικό κορεσμού, την διεπιφανειακή τάση, τις αναλογίες ιξώδους, τις αναλογίες πυκνότητας και τις ταχύτητες ροής του ρευστού. Λόγω της σύνθετης φύσης του πορώδους μέσου, η προσομοίωση του συνδυασμού όλων αυτών των επιδράσεων καθίσταται αρκετά απαιτητικό εγχείρημα.

### 3.2.1 Εξισώσεις πολυφασικής ροής σε πορώδη υλικά

Τα μοντέλα των εξισώσεων που λύνονται στο Multiphase flow in porous media interface του λογισμικού COMSOL Multiphysics είναι βασισμένα σε ισοζύγια μάζας για την κάθε φάση σε μια εκτεταμένη εκδοχή του νόμου του Darcy. Η εξίσωση του ισοζυγίου μάζας για την κάθε φάση δίνεται από την σχέση:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_p \rho_i s_i) + \nabla \cdot (\rho_i u_i) = Q_i \quad (3.2.1)$$

Όπου:

$\varepsilon_p$  (αδιάστατο): το πορώδες

$u_i$ : η ταχύτητα Darcy της ροής της φάσης  $i$

Οι ταχύτητες της ροής κάθε ρευστού ορίζονται μέσω της γενικευμένης έκφρασης του νόμου του Darcy:

$$u_i = \frac{k_{ri}}{\mu_i} k (\nabla p_i - \rho_i \cdot g) \quad (3.2.2)$$

Όπου:

$k$ : η διαπερατότητα του πορώδους μέσου (SI unit: m<sup>2</sup>)

$g$ : το διάνυσμα επιτάχυνσης της βαρύτητας (SI unit: m/s<sup>2</sup>)

$\mu$ : το δυναμικό ιξώδες (SI unit: Kg/(m·s))

$P_i$ : η πίεση (SI unit: Pa)

$k_{ri}$ : η σχετική διαπερατότητα της φάσης  $i$  (αδιάστατο)

Οι πιέσεις κάθε φάσης  $p_i$  σχετίζονται μέσω των συναρτήσεων των τριχοειδών πιέσεων  $p_{cij}$  ως συνάρτηση του τοπικού κορεσμού κάθε φάσης:

$$p_i - p_j = p_{cij}(s_1, \dots, s_N) \quad i \neq j \quad (3.2.3)$$

Μία πίεση φάσης μπορεί να επιλεγθεί ανεξάρτητα έτσι ώστε N-1 σχέσεις τριχοειδών πιέσεων να χρειάζονται για να καθορίσουν την πίεση στις υπόλοιπες φάσεις.

Επιπλέον, θεωρούμε ότι όλες οι φάσεις μαζί γεμίζουν τον χώρο των πόρων πλήρως, έτσι έχουμε:

$$\sum_{i=1}^N s_i = 1$$

(3.2.4)

Οι παραδοχές που λαμβάνονται υπόψη είναι οι ακόλουθες:

- Η θερμοκρασία του συστήματος είναι σταθερή
- Υπάρχουν δύο ρευστές φάσεις: πετρέλαιο (1) και νερό (2)
- Το πορώδες μέσο και τα ρευστά θεωρούνται ασυμπίεστα
- Οι ιδιότητες των ρευστών (π.χ. πυκνότητα, δυναμικό ιξώδες) θεωρούνται σταθερές και ανεξάρτητες της πίεσης.
- Λαμβάνει χώρα μη αναμίξιμη ροή των δύο ρευστών.

### 3.2.2 Σύνθεση εξισώσεων πίεσης-κορεσμού

Οι αλγεβρικές σχέσεις στην εξίσωση 3.2.3 και στην εξίσωση 3.2.4 επιτρέπουν τη μείωση του αριθμού των εξαρτημένων μεταβλητών. Ένας συχνά χρησιμοποιούμενος τρόπος είναι η εξάλειψη της πίεσης της φάσης  $N - 1$  και ενός από τους κορεσμούς. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την σύνθεση της σχέσης πίεσης-κορεσμού.

Κατά τη διαδικασία επίλυσης στο Multiphase Flow in Porous Media interface επιλέγεται αρχικά μια από τις φάσεις, ας θεωρήσουμε την φάση  $i_c$ , στη συνέχεια εκφράζεται ο κορεσμός,  $s_{i_c}$ , αυτής της φάσης ως προς τους κορεσμούς των υπολοίπων. Επίσης χρησιμοποιείται η πίεση,  $p_i$ , αυτής της φάσης για να οριστούν οι πιέσεις των υπολοίπων:

$$s_{i_c} = 1 - \left( \sum_{i=1, i \neq i_c}^N s_i \right)$$

(3.2.5)

$$p_i = p_{i_c} + p_{c_{ij}}(s_1, \dots, s_N) \quad \text{για } i \neq i_c \quad (3.2.6)$$

Οι εξισώσεις για τα κλάσματα όγκου  $s_i$ , ( $i \neq i_c$ ) δίνονται από τις εξισώσεις (3.2.1) και (3.2.2). Για να καταλήξουμε σε μία εξίσωση για την πίεση  $p_i$ , οι εξισώσεις διατήρησης για όλες τις φάσεις συνοψίζονται και καταλήγουν στην εξής:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \varepsilon_p \sum_{i=1}^N p_i \cdot s_i \right) + \nabla \cdot \left( \sum_{i=1}^N p_i \cdot u_i \right) = Q_{tot}$$

(3.2.7)

Όπου η συνολική ογκομετρική παροχή  $Q_{tot}$  δίνεται από τη σχέση:

$$Q_{tot} = \sum_{i=1}^N Q_i$$

(3.2.8)

Οι εξισώσεις για τους κορεσμούς  $s_i$  λύνονται στο Phase Transport in Porous Media interface (εξισώσεις (3.2.1) και (3.2.2)). Η εξίσωση (3.2.7) για το πεδίο πίεσης  $p_i$ , λύνεται στο Darcy's Law interface. Το Multiphase Flow in Porous Media multiphysics coupling interface αντικαθιστά την εξίσωση:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon_p p_{i_c}) + \nabla \cdot (p_{i_c} u_d) \quad \text{όπου} \quad u_d = -\frac{1}{\mu_{i_c}} \kappa (\nabla p_{i_c} - \rho_{i_c} \cdot g) \quad (3.2.9)$$

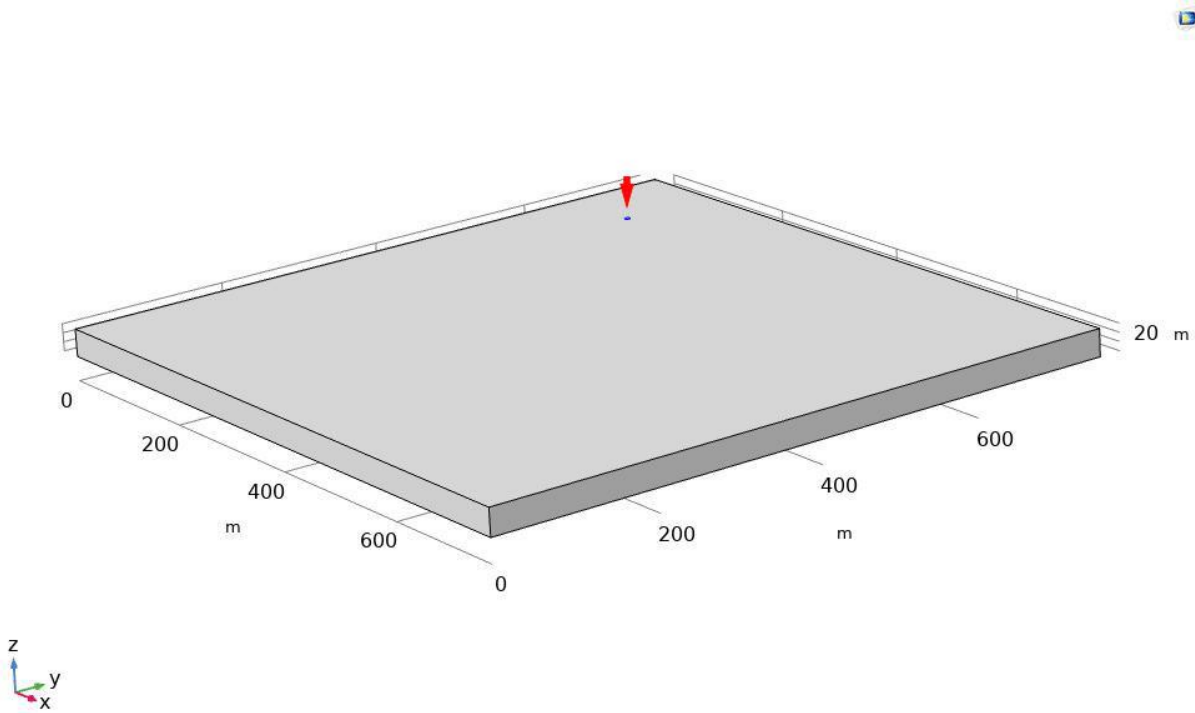
Η οποία αρχικά εφαρμόζεται στο Darcy's Law interface μαζί με την (3.2.7) προσθέτοντας τους ακόλουθους όρους στο αριστερό μέλος της εξίσωσης (3.2.9) και ορίζοντας στο δεξί  $Q_m = Q_{tot}$ .

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \varepsilon_p \sum_{i=1}^N \rho_i s_i - \varepsilon_p \rho_{i_c} \right) + \nabla \cdot \left( \sum_{i=1}^N \rho_i u_i - (\rho_{i_c} u_d) \right)$$

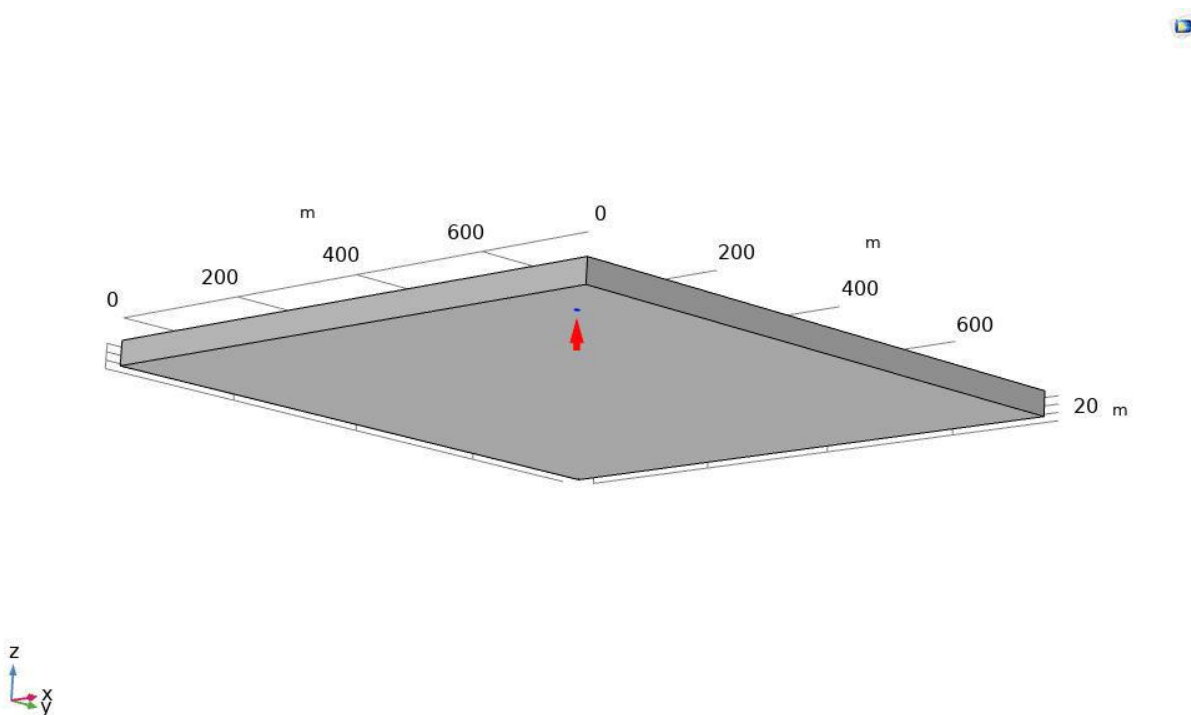
(3.2.10)

### 3.3 Εφαρμογή του μοντέλου σε ομοιογενείς ταμιευτήρες

Η συμπεριφορά της πολυφασικής ασυμπίεστης ροής ρευστού προσομοιώνεται σε έναν τρισδιάστατο ορθογώνιο ταμιευτήρα διαστάσεων 762m x762m x30.5m, όπως φαίνεται στην εικόνα 3.1. Το ανώτερο όριο του βρίσκεται σε βάθος 2800m, εκεί καταλήγει ένα φρεάτιο παραγωγής (producer) με ακτίνα 3m και στο κάτω μέρος του βρίσκεται ένα πηγάδι εισαγωγής νερού (injector) ίδιων διαστάσεων. Τα φρεάτια έχουν τις διαστάσεις αυτές για την καλύτερη αριθμητική επίλυση του προβλήματος. Η πίεση (bottomhole) στο πηγάδι εισαγωγής ορίζεται σταθερή στα 31.0 MPa ενώ ο αρχικός ρυθμός παραγωγής του πηγαδιού παραγωγής ορίζεται σε  $0.2\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ .



Εικόνα 3.1: Γεωμετρία ταμιευτήρα, πηγάδι παραγωγής (μοντέλο χωρίς διαστρωμάτωση)



**Εικόνα 3.2:** Γεωμετρία ταμιευτήρα, πηγάδι εισαγωγής νερού (μοντέλο χωρίς διαστρωμάτωση)

Η απόλυτη διαπερατότητα και στις τρεις κατευθύνσεις φαίνεται στον παρακάτω πίνακα. Οι τιμές αυτές εισάγονται ως παράμετροι στο λογισμικό COMSOL.

Διαπερατότητα (mD)		
Οριζόντια		Κατακόρυφα
X άξονας ( $k_x$ )	Y άξονας ( $k_y$ )	Z άξονας ( $k_z$ )
250	200	25

**Πίνακας 3.1:** Διαπερατότητα του σχηματισμού στους άξονες x, y, z για μοντέλο ασυμπίεστης πολυφασικής ροής χωρίς διαστρωμάτωση.

Η σχετική διαπερατότητα της κάθε φάσης δίνεται σαν συνάρτηση του κορεσμού της. Δηλαδή,  $k_{r_{oil}} = S_{oil}^2$  και  $k_{r_{water}} = S_{water}^2$ . Οι υπόλοιπες παράμετροι του μοντέλου χωρίς διαστρωμάτωση παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα.

Παράμετροι	Μονάδες	Τιμές
Πορώδες, $\varepsilon_p$	-	0.2
Πυκνότητα νερού, $\rho_w$	kg/m <sup>3</sup>	1000
Πυκνότητα πετρελαίου, $\rho_o$	kg/m <sup>3</sup>	800
Δυναμικό ιξώδες νερού, $\mu_w$	cP	0.92
Δυναμικό ιξώδες πετρελαίου, $\mu_o$	cP	1
Παροχή στην έξοδο, $Q_{out}$	kg/(m <sup>2</sup> · s)	0.2

**Πίνακας 3.2:** Παράμετροι για το μοντέλο ασυμπίεστης πολυφασικής ροής χωρίς διαστρωμάτωση

Η αρχική πίεση του ταμιευτήρα καθώς και η πίεση bottomhole στο φρεάτιο εισαγωγής νερού εισάγονται σαν μεταβλητές στο COMSOL model builder.

Μεταβλητές	Μονάδες	Τιμή
Αρχική πίεση $p_{initial}$	MPa	28,65
Πίεση στο injector $p_{in}$	MPa	31,0

**Πίνακας 3.3:** Πίεση για το μοντέλο ασυμπίεστης πολυφασικής ροής χωρίς διαστρωμάτωση

## Πλέγμα και επίλυση

Εφαρμόζεται ένα ελεύθερο τετραεδρικό πλέγμα με μέγιστο μέγεθος στοιχείου 114m και ελάχιστο στα 21.3m. Το πλέγμα κατά τη διεύθυνση z του διανύσματος της βαρύτητας επιλέγεται ώστε να έχει διπλάσια πυκνότητα. Ακόμη, γίνεται χρήση μίας επίλυσης με μεταβλητό χρονικό βήμα (adaptive time step) όπου οι καθορισμένες οριακές συνθήκες λύνονται στο παραπάνω υπολογιστικό μοντέλο σε ένα εύρος των (0,5,10000) ημερών. Η επίλυση αυτή υπολογίζει τις εξαρτημένες μεταβλητές  $p$  και  $S_w$ .

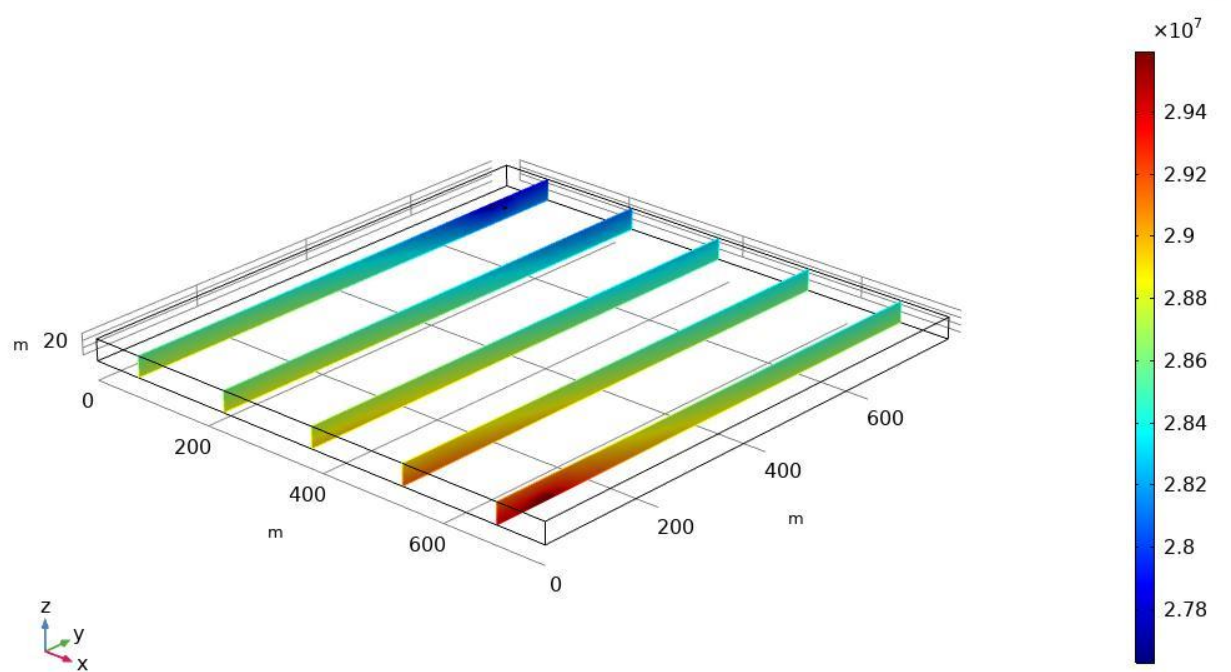
## Αποτελέσματα

Η πίεση και ο κορεσμός της διαβρέχουσας φάσης υπολογίζονται σε κάθε χρονικό βήμα από την παραπάνω αριθμητική ανάλυση ως εξαρτημένες μεταβλητές. Τρισδιάστατες απεικονίσεις που αναπαριστούν αυτές τις ποσότητες παρουσιάζονται για τα δύο μοντέλα που εφαρμόζονται στο COMSOL Multiphysics. Ακόμη, αναπαρίστανται τα διανύσματα των ταχυτήτων των ρευστών και αυτά σε τρισδιάστατη απεικόνιση.

Τα αποτελέσματα του μοντέλου με διαστρωμάτωση παρουσιάζονται στην επόμενη υποενότητα ενώ αυτά του μοντέλου χωρίς διαστρωμάτωση παρακάτω.

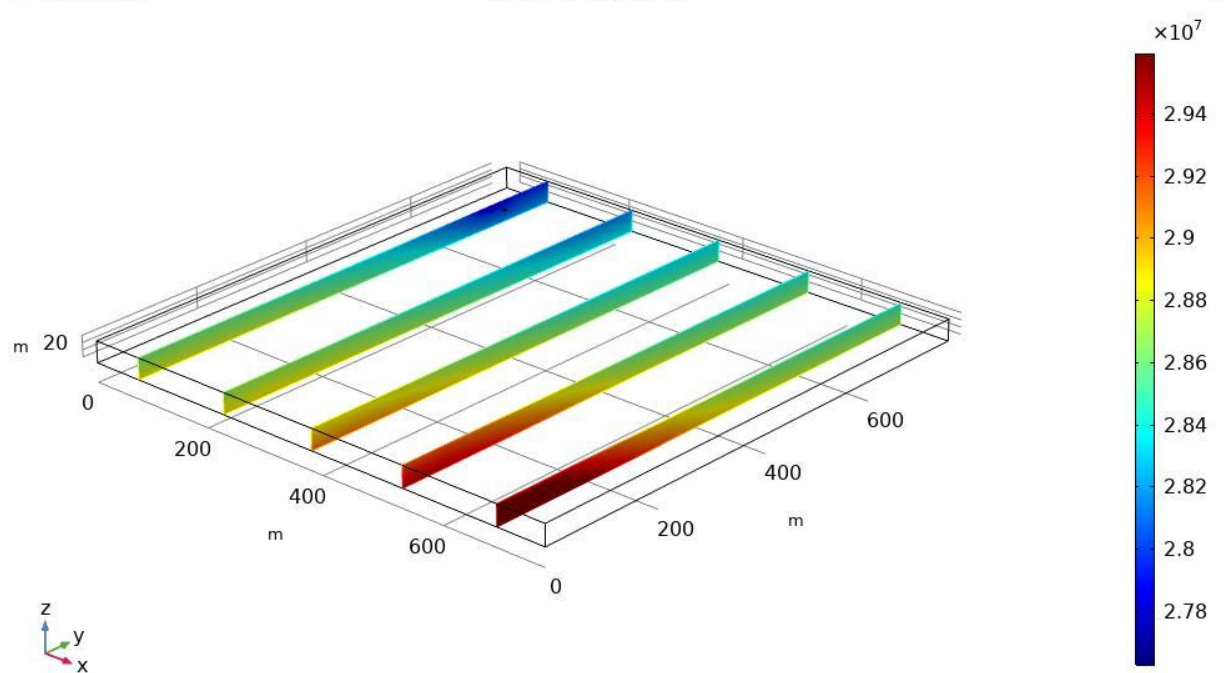
Time=0 d

Slice: Pressure (Pa)



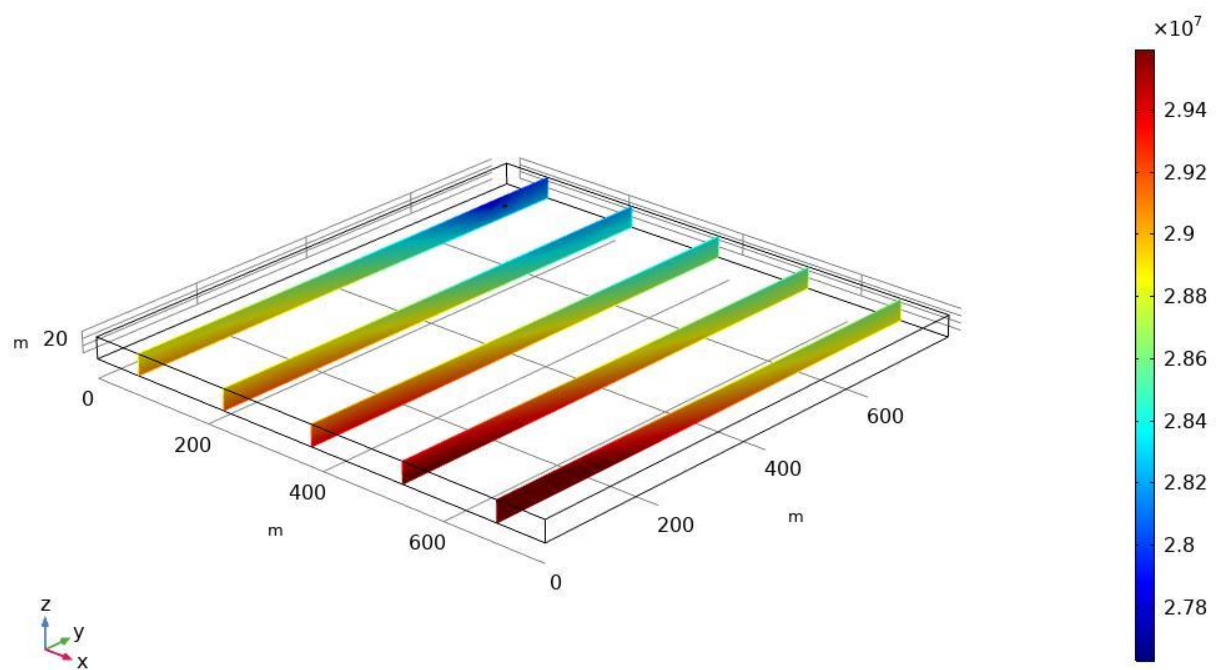
Time=1425 d

Slice: Pressure (Pa)



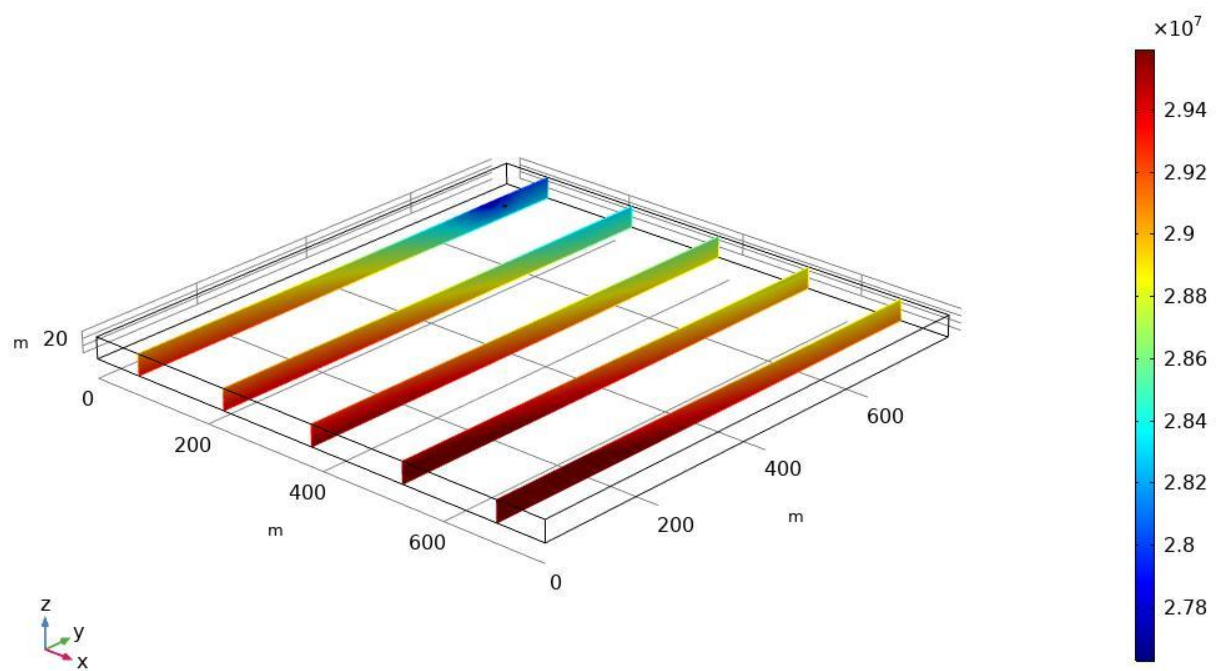
Time=4080 d

Slice: Pressure (Pa)



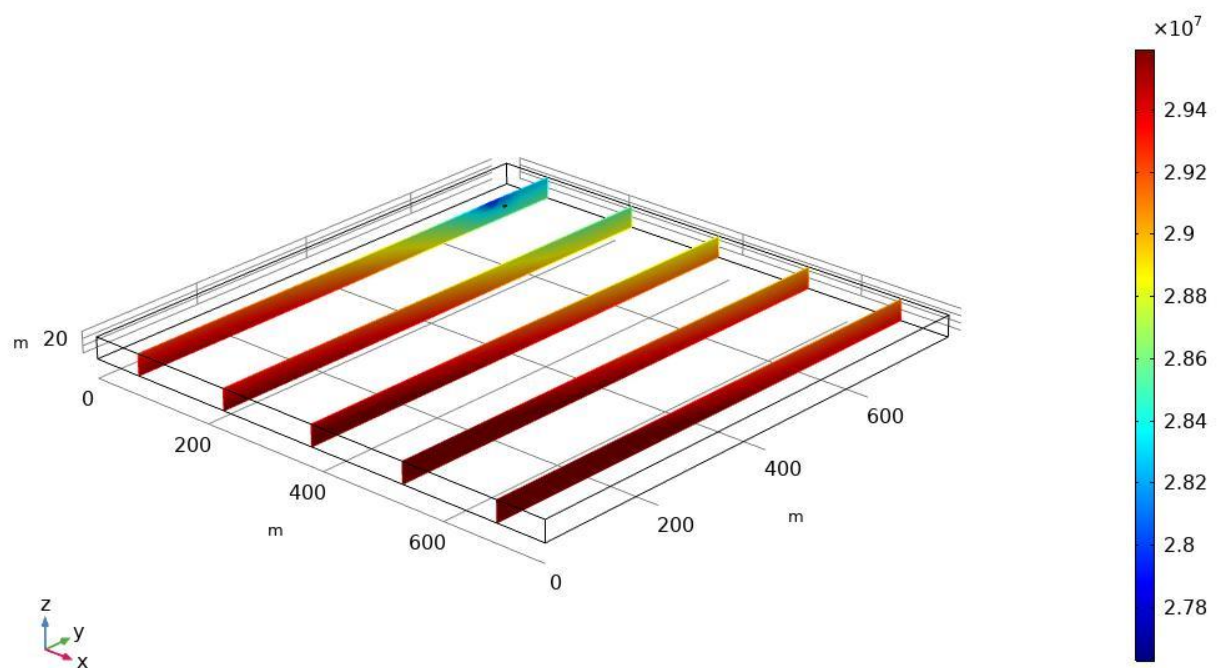
Time=5510 d

Slice: Pressure (Pa)



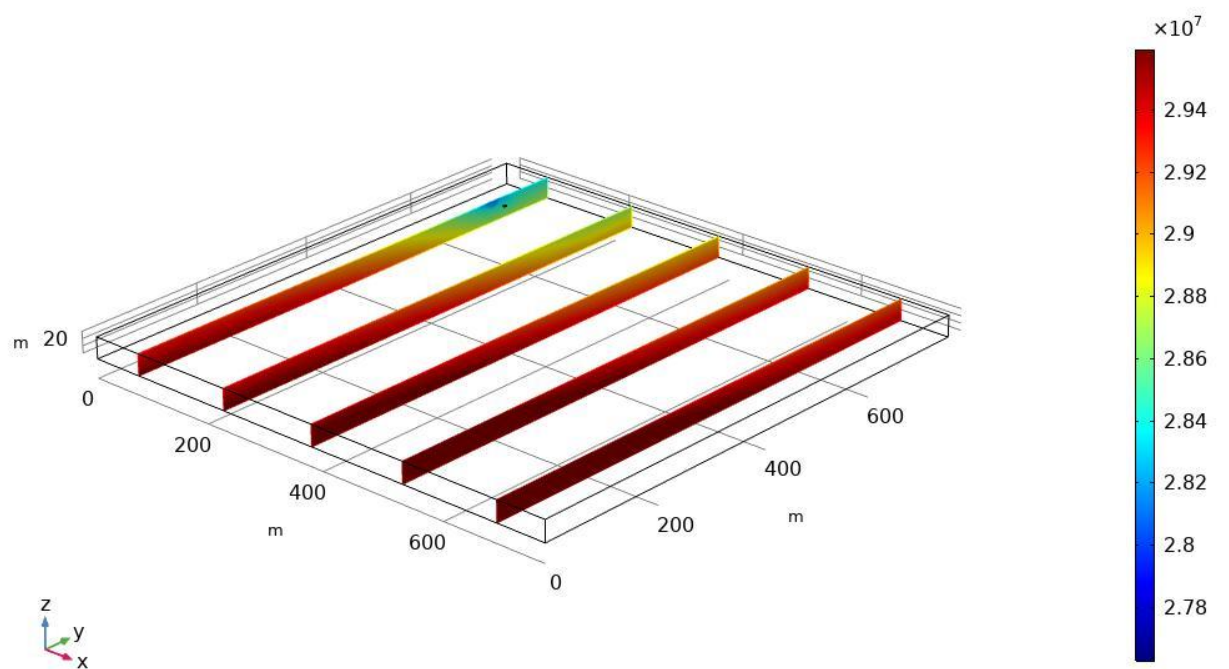
Time=7550 d

Slice: Pressure (Pa)



Time=10000 d

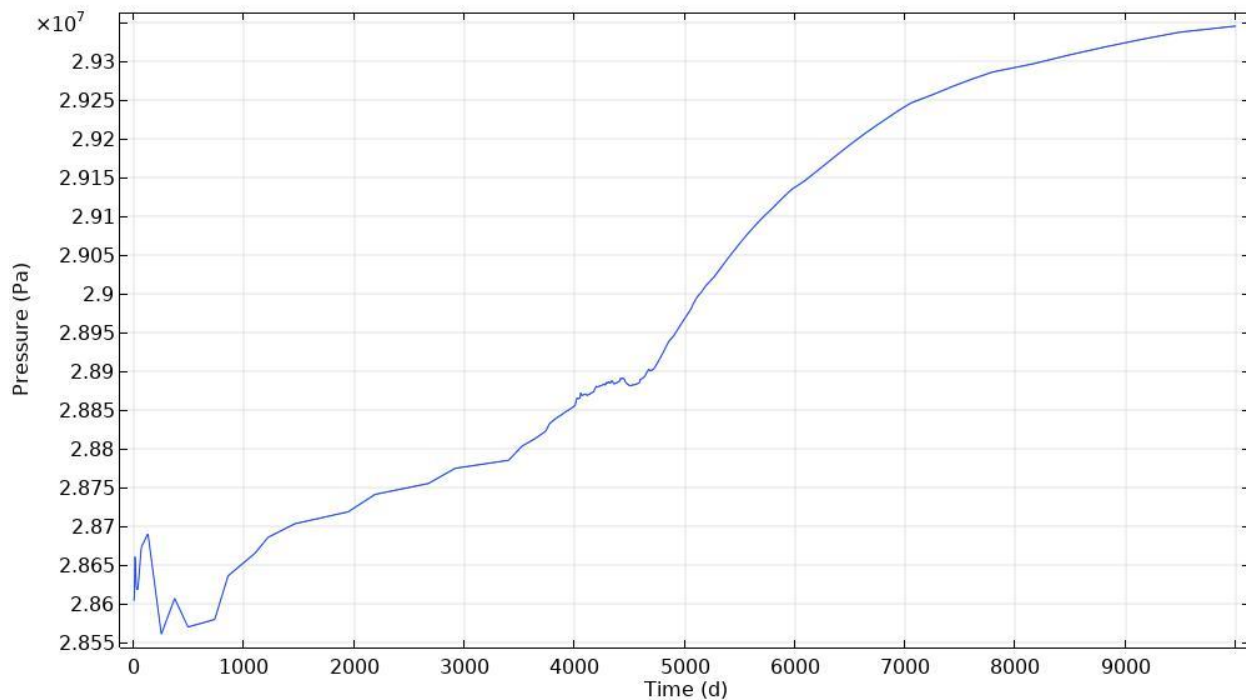
Slice: Pressure (Pa)



Εικόνες 3.3: Πεδίο πίεσης, απεικονίσεις σε “φέτες” (μοντέλο χωρίς διαστρωμάτωση)

Η αρχική πίεση παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.3 κατά τη χρονική στιγμή  $t = 0$  days. Η πίεση αυξάνεται με το βάθος εμφανίζοντας τη μέγιστη τιμή της στο κάτω μέρος του ταμιευτήρα λόγω υδροστατικής βαθμίδας. Οι μεταβολές της στους άξονες  $x$ ,  $y$  αρχίζουν να γίνονται αισθητές όσο προχωράει η διαδικασία εισαγωγής νερού. Αυτή η διαδικασία προκαλεί μεταβολή της πίεσης σε όλους τους άξονες γεγονός το οποίο μπορεί να επαληθευτεί και οπτικά μέσω της παράθεσης των Σχημάτων 3.3. Μετά την έναρξη της εισπίεσης το πεδίο πίεσης δεν αλλάζει σημαντικά, είναι εμφανές όμως ότι οι περιοχές κοντά στα πηγάδια παρουσιάζουν τις μεγαλύτερες τιμές πίεσης συναρτήσει του χρόνου.

Επίσης υπολογίζεται η μέση πίεση του ταμιευτήρα και αναπαρίσταται στο παρακάτω γράφημα. Βέβαια, ενώ η μορφή αυτών των γραφημάτων θεωρητικά είναι ακριβής αναπαράσταση των διακυμάνσεων πίεσης στην πραγματικότητα υπάρχουν κάποιες παραπάνω, ειδικά στο αρχικό στάδιο της διαδικασίας, οι οποίες οφείλονται στην πυκνότητα, το πλέγμα και την αριθμητική ευαισθησία της επίλυσης του μοντέλου.

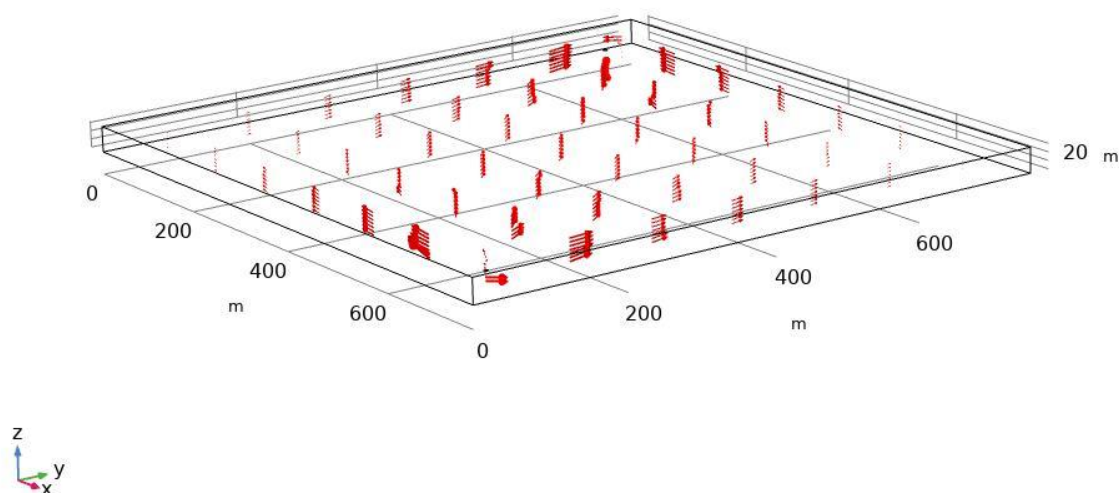


**Εικόνα 3.4: Μέση πίεση ταμιευτήρα (μοντέλο χωρίς διαστρωμάτωση)**

Όπως φαίνεται από το Διάγραμμα 3.4 η μέση πίεση του σχηματισμού συναρτήσει του χρόνου ακολουθεί ανοδική πορεία λόγω της αύξησης κορεσμού σε νερό που έχει μεγαλύτερη πυκνότητα από το προϋπάρχον πετρέλαιο. Επίσης είναι εμφανής η σχετικά μικρή κλίση της καμπύλης στο αρχικό στάδιο παραγωγής πετρελαίου καθώς και το γεγονός ότι μεγαλώνει όσο προχωρά η διαδικασία και ειδικά όταν το νερό φτάσει στο πηγάδι παραγωγής. Ακόμη παρατηρείται μια εξομάλυνση της καμπύλης στο τελικό πλέον στάδιο της παραγωγής. Καθ' όλη τη διαδικασία η μέση πίεση παραμένει χαμηλότερη από αυτήν στο φρεάτιο εισαγωγής νερού και η ροή πηγαίνει από την υψηλότερη προς την χαμηλότερη γεγονός τα οποία επαληθεύουν ότι το μοντέλο είναι λογικό. Σε γενικές γραμμές η μέση πίεση διατηρείται σε υψηλό επίπεδο μέχρι το τέλος της δευτερεύουσας ανάκτησης.

Time=10000 d

Arrow Volume: Darcy's velocity field



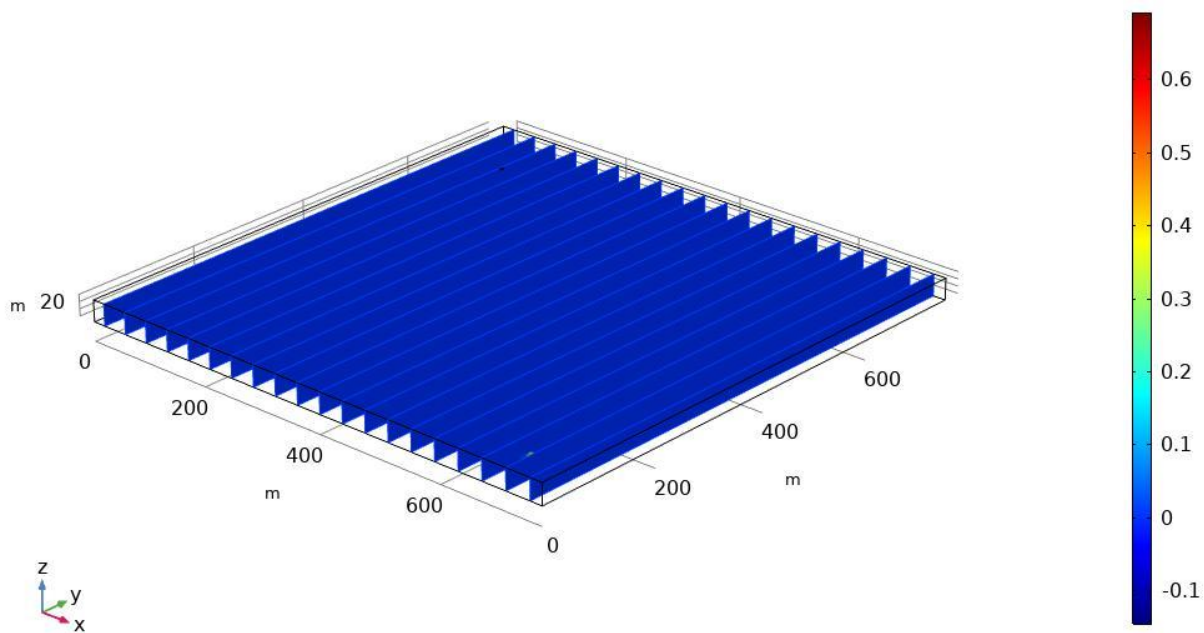
**Εικόνα 3.5: Πεδίο διανυσμάτων ταχυτήτων κατά την 10000<sup>η</sup> μέρα (μοντέλο χωρίς διαστρωμάτωση)**

Τα διανύσματα των ταχυτήτων των ρευστών υπολογίζονται επίσης από την λύση του προβλήματος. Αυτά απεικονίζονται μέσω του γραφήματος με βέλη στην παραπάνω εικόνα. Παρουσιάζει την τελευταία μέρα της παραγωγής και όπως φαίνεται τα βέλη δείχνουν προς την κατεύθυνση του φρέατος παραγωγής.

Η πορεία κορεσμού της διαβρέχουσας φάσης σε διαφορετικές χρονικές στιγμές μετά την έναρξη της διαδικασίας εισαγωγής νερού αναπαρίσταται στις παρακάτω τρισδιάστατες αναπαραστάσεις.

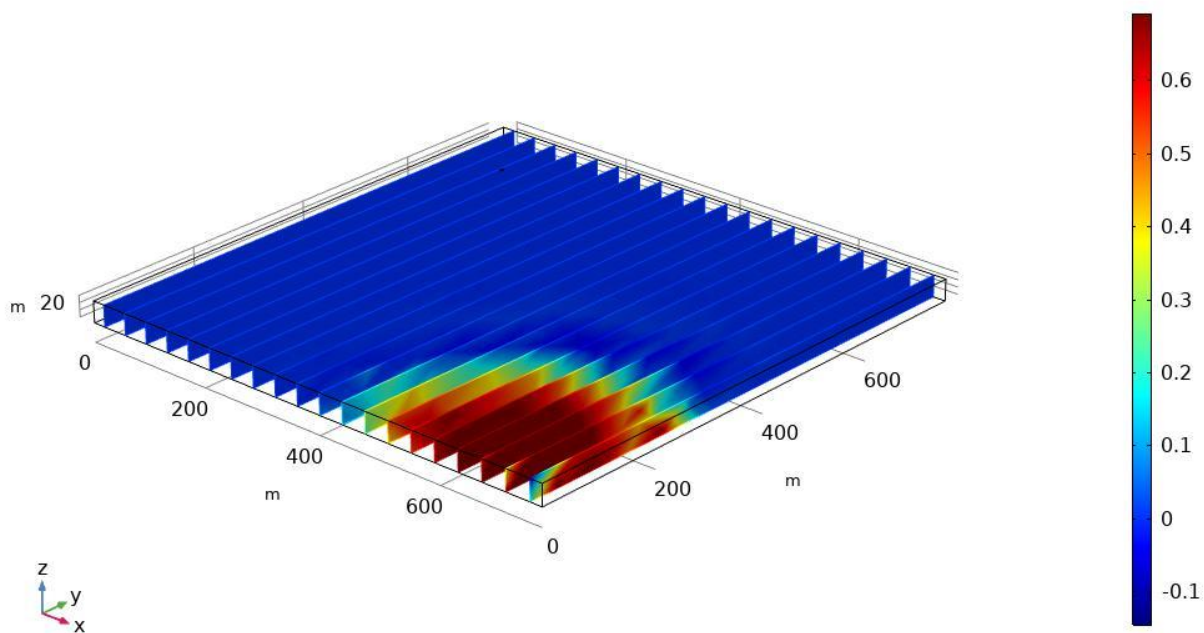
Time=0 d

Slice: Volume fraction (1)



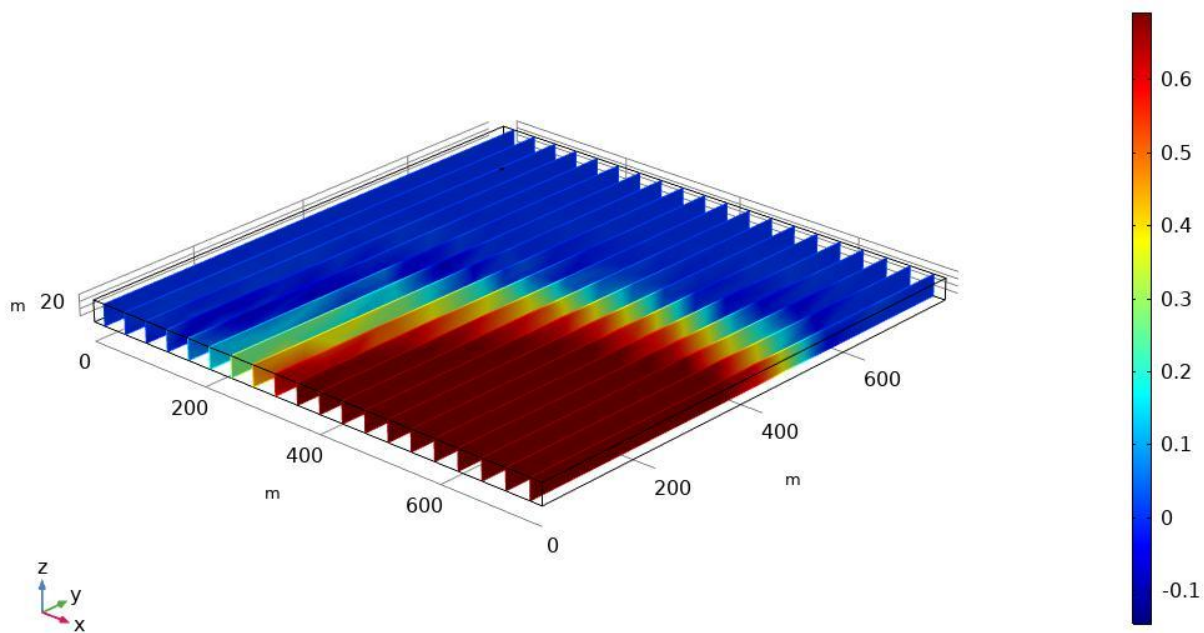
Time=610 d

Slice: Volume fraction (1)



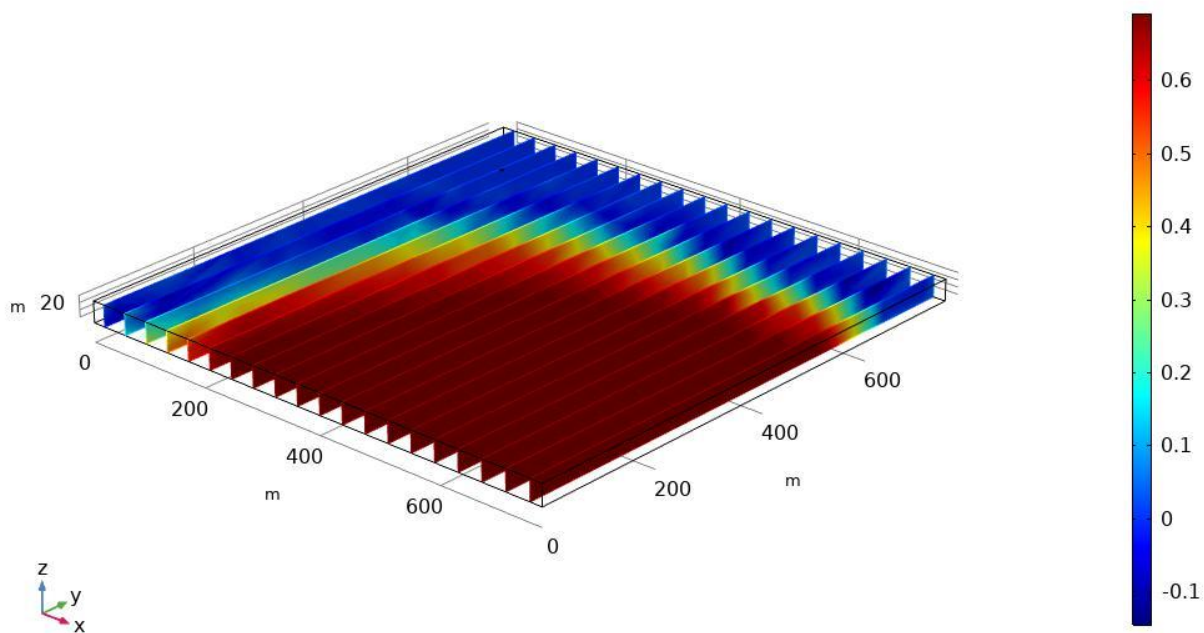
Time=2040 d

Slice: Volume fraction (1)



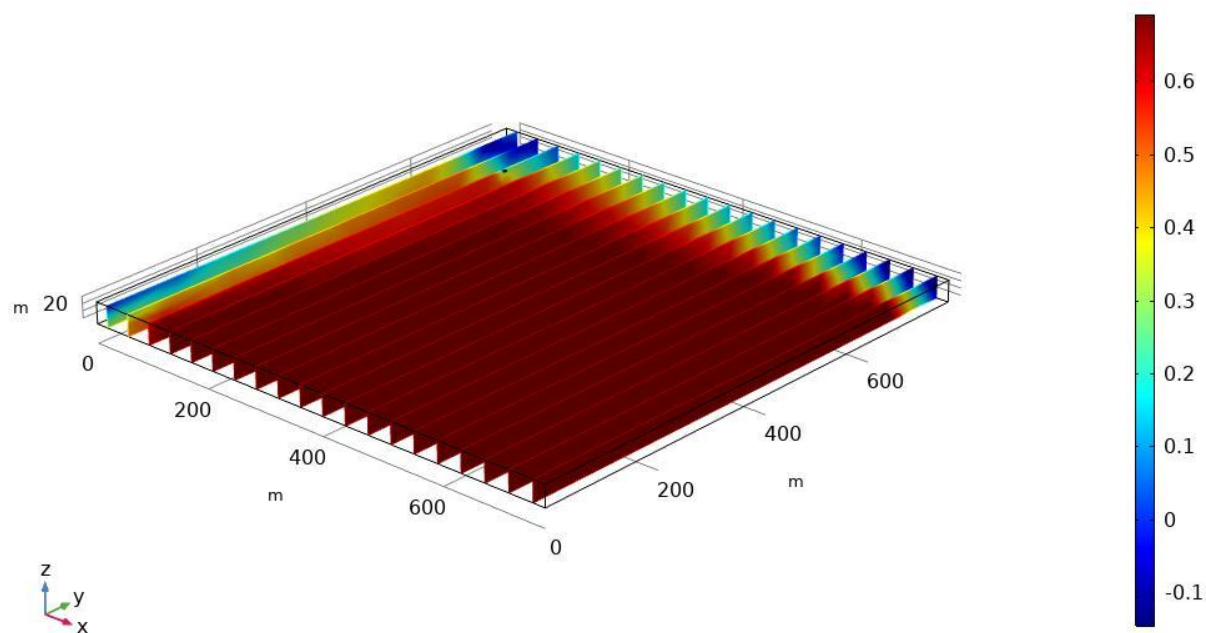
Time=3670 d

Slice: Volume fraction (1)



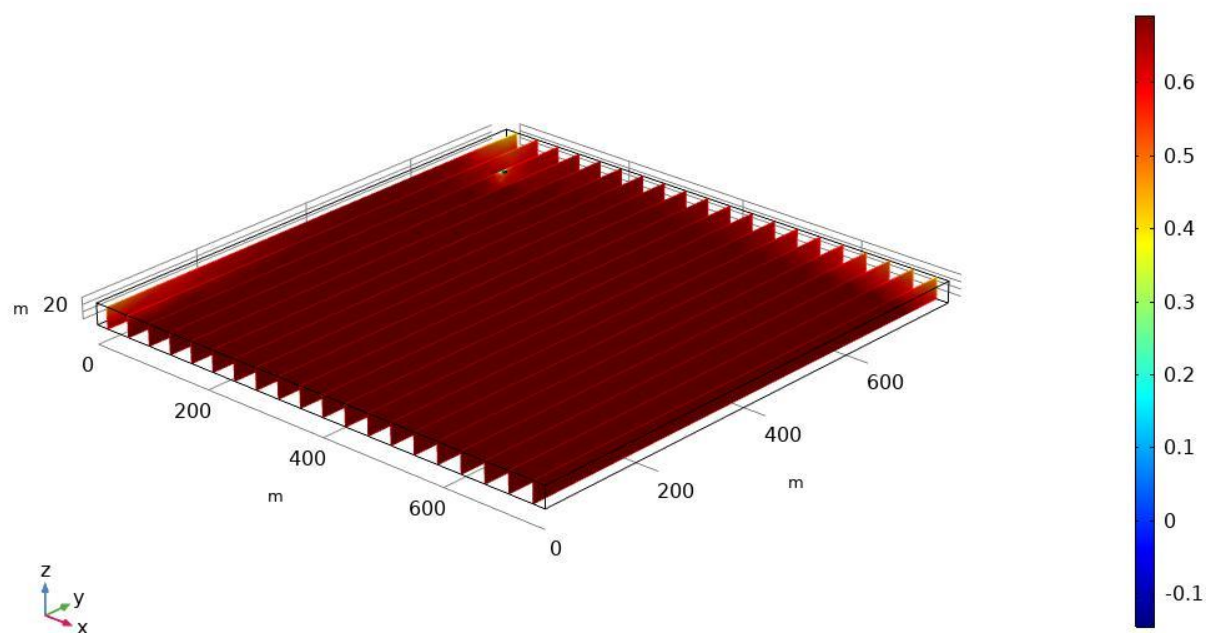
Time=6120 d

Slice: Volume fraction (1)



Time=10000 d

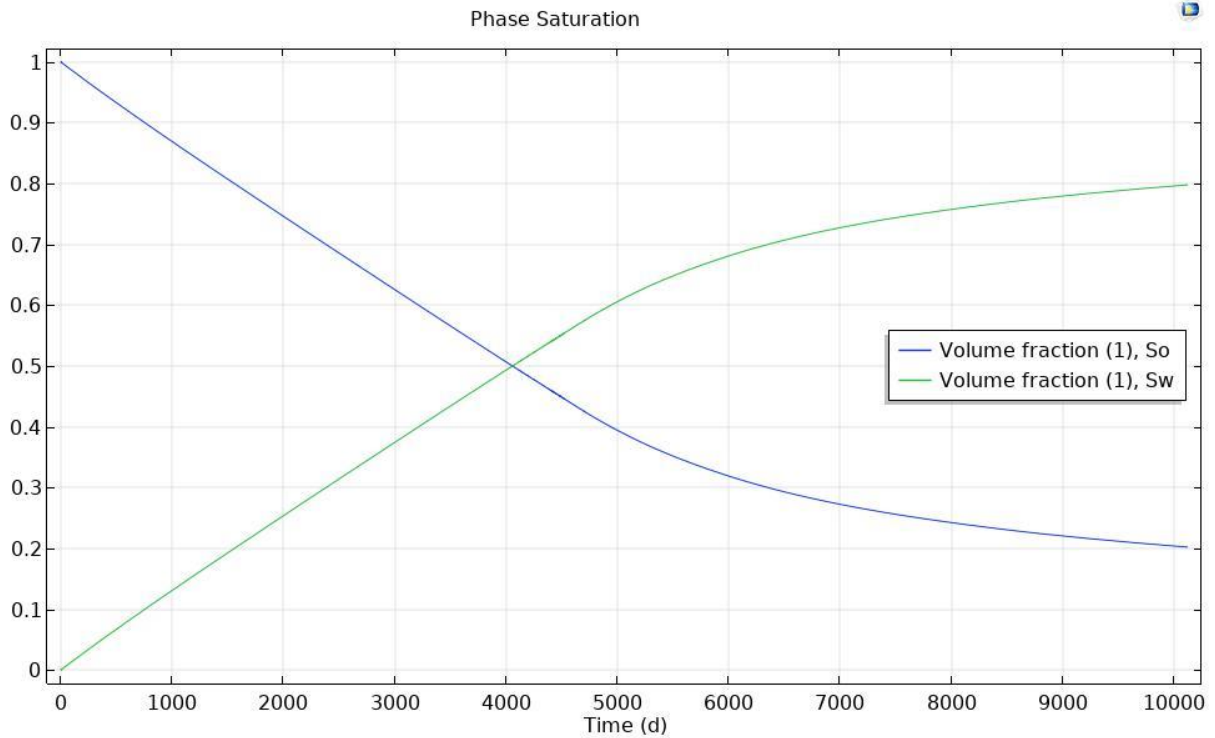
Slice: Volume fraction (1)



Εικόνες 3.6: Εξέλιξη κορεσμού της διαβρέχουσας φάσης (μοντέλο χωρίς διαστρωμάτωση)

Το νερό εισάγεται από το φρεάτιο στην κάτω γωνία με κατεύθυνση το πηγάδι παραγωγής στην απέναντι γωνία. Καθώς όλο και μεγαλύτερος όγκος νερού εισέρχεται στον ταμιευτήρα ο κορεσμός της διαβρέχουσας φάσης αυξάνεται σταδιακά στην περιοχή κοντά στο φρεάτιο εισαγωγής δημιουργώντας ένα μέτωπο σάρωσης με το χρόνο το οποίο βέβαια δεν είναι καθολικά ομοιόμορφο. Επίσης στη δημιουργία αυτού του μετώπου συμβάλει η διαφορά πυκνότητας καθώς και το γεγονός ότι το πετρέλαιο είναι αδιάλυτο στο νερό. Η κίνηση του μετώπου κορεσμού του νερού σε κατακόρυφη κατεύθυνση οδηγεί στο γεγονός ότι μεγαλύτεροι όγκοι από το πετρέλαιο του ταμιευτήρα που βρίσκονται στο κάτω μέρος του έρχονται αρχικά σε επαφή με αυτό σε σχέση με το πετρέλαιο στο πάνω μέρος του. Ουσιαστικά δηλαδή το νερό «σαρώνει» το πετρέλαιο από κάτω όπως φαίνεται και από τις εικόνες 3.6 για  $t = 610d - t = 6120d$ . Όσο η εισαγωγή νερού (waterflooding) συνεχίζεται όλο και περισσότεροι υδρογονάνθρακες εκτοπίζονται από τις περιοχές σάρωσης εξαναγκάζοντας τα ρευστά κοντά στο πηγάδι παραγωγής (επί το πλείστον υδρογονάνθρακες) να παραχθούν. Ο κορεσμός της διαβρέχουσας αυξάνεται συνεχώς σε όλη την έκταση του ταμιευτήρα μέχρι την 10000<sup>η</sup> μέρα όπου η δευτερογενής ανάκτηση τερματίζεται. Σε αυτή την φάση στον ταμιευτήρα υπάρχει κατά κύριο λόγο νερό. Η «σάρωση» σε οριζόντια και κατακόρυφη κατεύθυνση μπορεί να επαληθευτεί οπτικά από τις εικόνες 3.6.

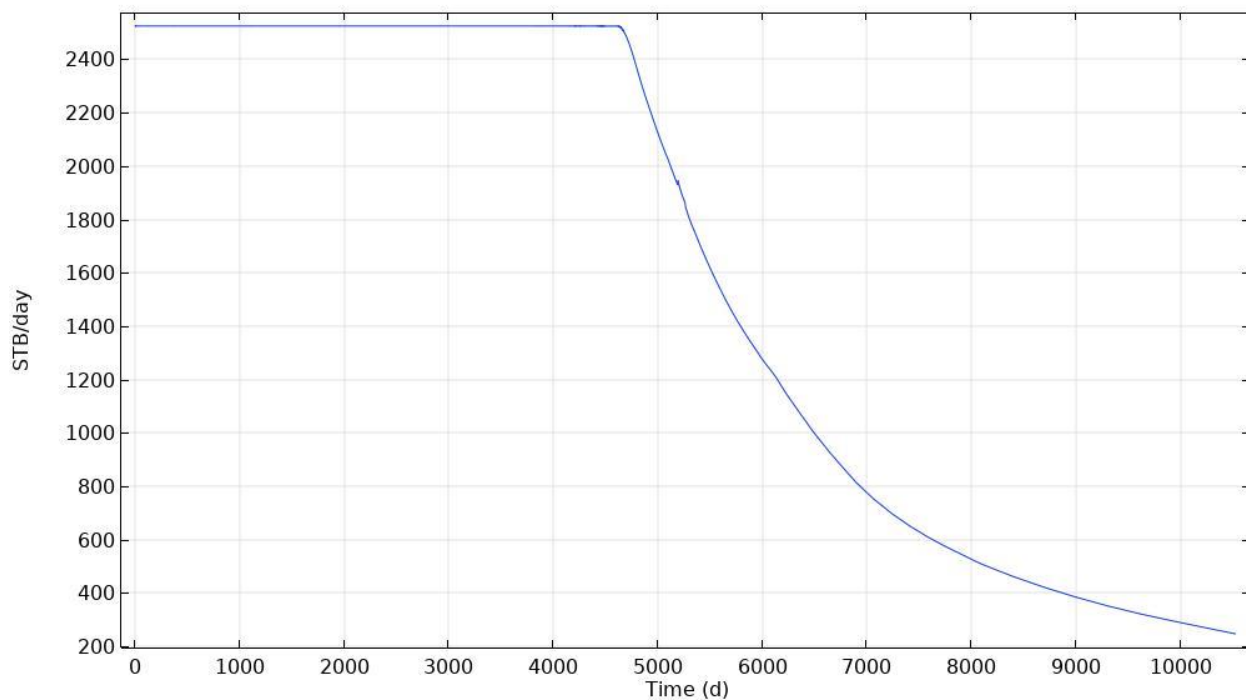
Το παρακάτω διάγραμμα αναπαριστά τον μέσω κορεσμό κάθε φάσης στον ταμιευτήρα κατά την διαδικασία εισαγωγής νερού.



**Εικόνα 3.7: Μέσος κορεσμός φάσεων (μοντέλο χωρίς διαστρωμάτωση)**

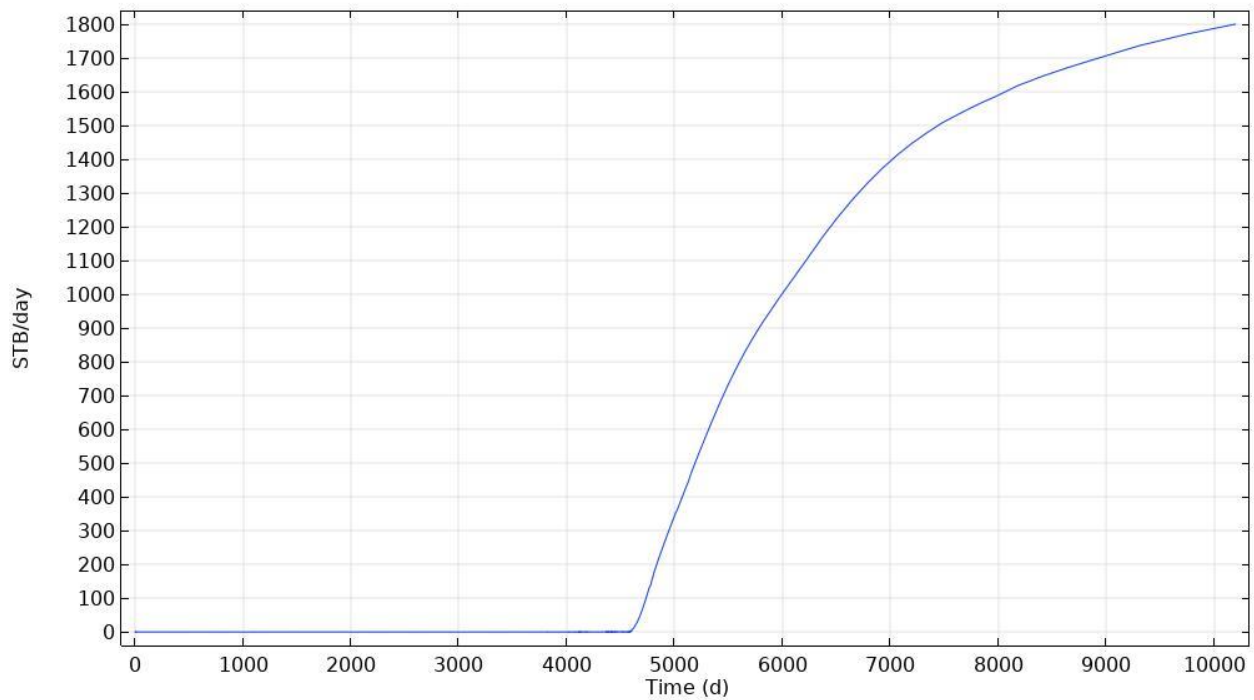
Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας εισαγωγής νερού οι κορεσμοί των δύο φάσεων παρουσιάζουν αντίθετο ρυθμό μεταβολής όπως ήταν αναμενόμενο, καθώς η διαβρέχουσα φάση εκτοπίζει τη μη διαβρέχουσα και την αναγκάζει να παραχθεί. Στο τέλος της προσομοίωσης ο ταμιευτήρας πληρώνεται κατά το μεγαλύτερο ποσοστό με νερό γεγονός το οποίο συμφωνεί πλήρως και με τις προηγούμενες τρισδιάστατες αναπαραστάσεις.

Τελικά, υπολογίζεται η ημερήσια παραγωγή ρευστών σε βαρέλια (stock tank barrels, STB).



**Εικόνα 3.8: Ρυθμός παραγωγής πετρελαίου (μοντέλο χωρίς διαστρωμάτωση)**

Κατά την έναρξη της εισαγωγής νερού παράγονται καθημερινά 2550 βαρέλια (stb) υδρογονανθράκων. Η παραγωγή παραμένει σταθερή περίπου μέχρι και την 4650<sup>η</sup> ημέρα της διαδικασίας και ακολουθείται από μια ομαλή μείωση μέχρι το τέλος της προσομοίωσης. Η αλλαγή αυτή που παρατηρείται είναι αποτέλεσμα του γεγονότος ότι το νερό από το πηγάδι εισαγωγής φτάνει στο φρεάτιο παραγωγής και αρχίζει να παράγεται (water cut). Ο ρυθμός παραγωγής του αυξάνεται συνεχώς με τον χρόνο όπως φαίνεται και στο γράφημα 3.7. Στο τέλος της προσομοίωσης παράγονται περίπου 230 βαρέλια πετρελαίου ανά ημέρα.

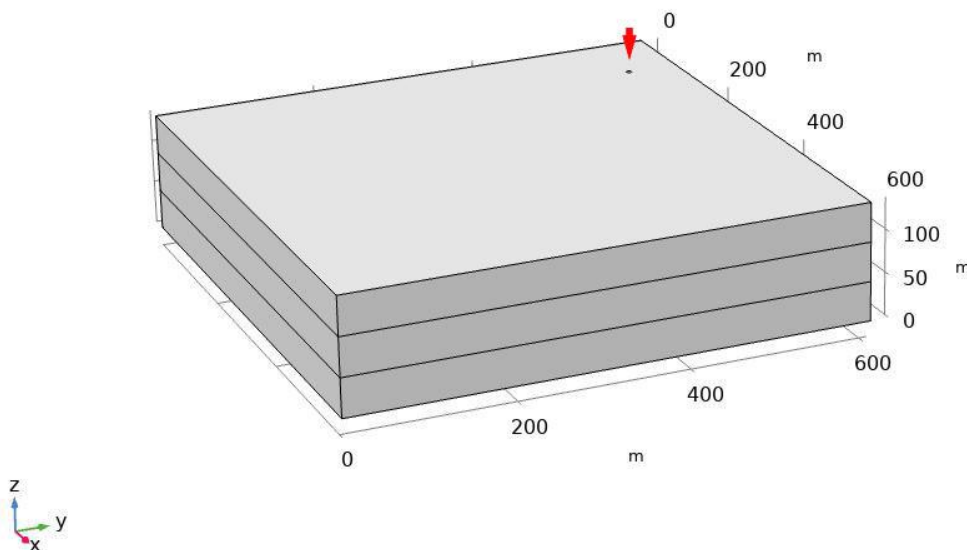


**Εικόνα 3.9: Ρυθμός παραγωγής νερού (μοντέλο χωρίς διαστρωμάτωση)**

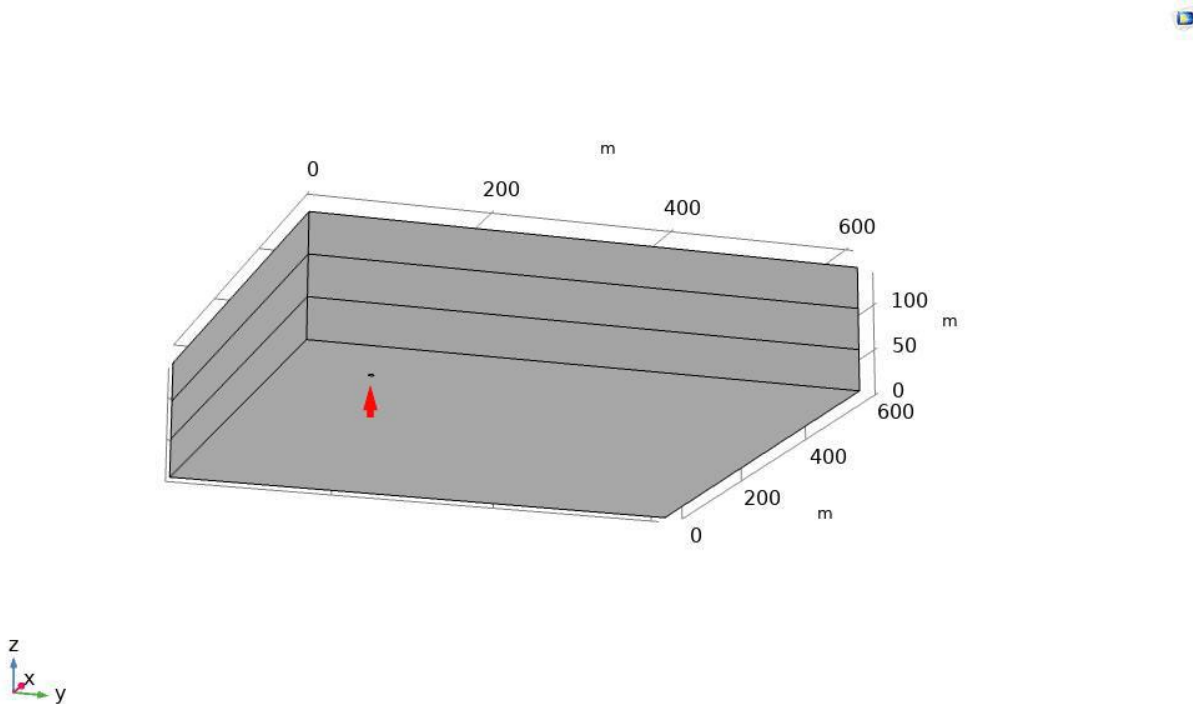
Αρχικά δεν υπάρχει όπως είναι φυσικό παραγωγή νερού. Το νερό φτάνει στο φρεάτιο παραγωγής περίπου στην 4650<sup>η</sup> ημέρα της δευτερογενούς ανάκτησης όπου και αρχίζει να παράγεται. Από τότε και μετά ο ρυθμός αυτός της παραγωγής νερού αυξάνεται μέχρι το τέλος της προσομοίωσης όπου παράγονται ημερησίως 1800 βαρέλια (stb).

### 3.4 Εφαρμογή του μοντέλου σε ετερογενείς ταμιευτήρες με διαστρωμάτωση

Η συμπεριφορά της πολυφασικής ασυμπίεστης ροής ρευστού προσομοιώνεται δεύτερη φορά σε έναν επίσης τρισδιάστατο ορθογώνιο ταμιευτήρα διαστάσεων 610m x 610m x 137.1m, όπως φαίνεται στην Σχήμα 3.1. Ο σχηματισμός χωρίζεται σε τρία ισοπαχή στρώματα των 45.7m με διαφορετικές τιμές διαπερατότητας. Το ανώτερο όριο του βρίσκεται σε βάθος 2400m, εκεί υπάρχει ένα φρεάτιο παραγωγής (producer) με ακτίνα 3m και στο κάτω μέρος του βρίσκεται ένα πηγάδι εισαγωγής νερού (injector) ίδιων διαστάσεων. Τα φρεάτια έχουν τις διαστάσεις αυτές για την καλύτερη αριθμητική επίλυση του προβλήματος. Η πίεση στο πηγάδι εισαγωγής είναι 31.0 MPa και παραμένει σταθερή ενώ ο αρχικός ρυθμός παραγωγής του πηγαδιού παραγωγής είναι  $0.3 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ .



Εικόνα 3.10: Γεωμετρία ταμιευτήρα, πηγάδι παραγωγής (μοντέλο με διαστρωμάτωση)



**Εικόνα 3.11: Γεωμετρία ταμιευτήρα, πηγάδι εισαγωγής νερού(μοντέλο με διαστρωμάτωση)**

Η απόλυτη διαπερατότητα και στις τρεις κατευθύνσεις φαίνεται στον παρακάτω πίνακα. Τα διαφορετικά στρώματα παρουσιάζονται από πάνω προς τα κάτω. Οι τιμές αυτές εισάγονται ως παράμετροι στο λογισμικό COMSOL.

Διαπερατότητα (mD)		
Οριζόντια		Κατακόρυφα
X άξονας ( $k_x$ )	Y άξονας ( $k_y$ )	Z άξονας ( $k_z$ )
350	350	30
750	750	50
150	150	25

**Πίνακας 3.4:** Διαπερατότητα του σχηματισμού στους άξονες x, y, z για μοντέλο ασυμπίεστης πολυφασικής ροής με διαστρωμάτωση.

Η σχετική διαπερατότητα της κάθε φάσης δίνεται σαν συνάρτηση του κορεσμού της. Δηλαδή,  $k_{r_{oil}} = S_{oil}^2$  και  $k_{r_{water}} = S_{water}^2$ . Οι υπόλοιπες παράμετροι του μοντέλου με διαστρωμάτωση παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα.

Παράμετροι	Μονάδες	Τιμές
Πορώδες, $\varepsilon_p$	-	0.2
Πυκνότητα νερού, $\rho_w$	kg/m <sup>3</sup>	1000
Πυκνότητα πετρελαίου, $\rho_o$	kg/m <sup>3</sup>	800
Δυναμικό ιξώδες νερού, $\mu_w$	cP	0.92
Δυναμικό ιξώδες πετρελαίου, $\mu_o$	cP	1
Μαζική παροχή στην έξοδο, $Q_{out}$	kg/(m <sup>2</sup> · s)	0.3

**Πίνακας 3.5: Παράμετροι για το μοντέλο ασυμπίεστης πολυφασικής ροής με διαστρωμάτωση**

Η αρχική πίεση του ταμειευτήρα καθώς και η πίεση στο φρεάτιο εισαγωγής νερού εισάγονται σαν μεταβλητές στο COMSOL model builder.

Μεταβλητές	Μονάδες	Τιμή
Αρχική πίεση $p_{initial}$	MPa	25,2
Πίεση στο injector $p_{in}$	MPa	31,0

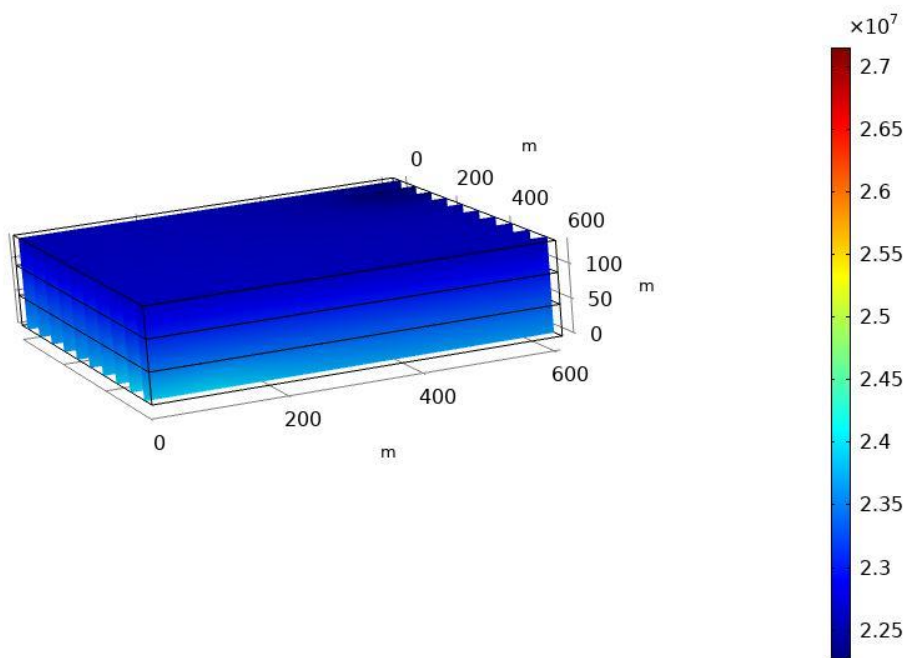
**Πίνακας 3.6: Πίεση για το μοντέλο ασυμπίεστης πολυφασικής ροής με διαστρωμάτωση**

**Πλέγμα και επίλυση**

Έχει εφαρμοστεί ένα ελεύθερο τετραεδρικό πλέγμα με μέγιστο μέγεθος στοιχείου 48.8m και ελάχιστο στα 6.1m. Επίσης η γεωμετρική κλίμακα στον άξονα z όπου λαμβάνει χώρα και η βαρύτητα είναι της τάξεως 2.Ακόμη, γίνεται χρήση μίας χρονικά βασιζόμενης επίλυσης όπου οι καθορισμένες αρχικές και οριακές συνθήκες λύνονται στο παραπάνω υπολογιστικό μοντέλο σε ένα εύρος των (0,5,20000) ημερών. Η επίλυση αυτή υπολογίζει τις εξαρτημένες μεταβλητές  $p$  και  $S_w$ .

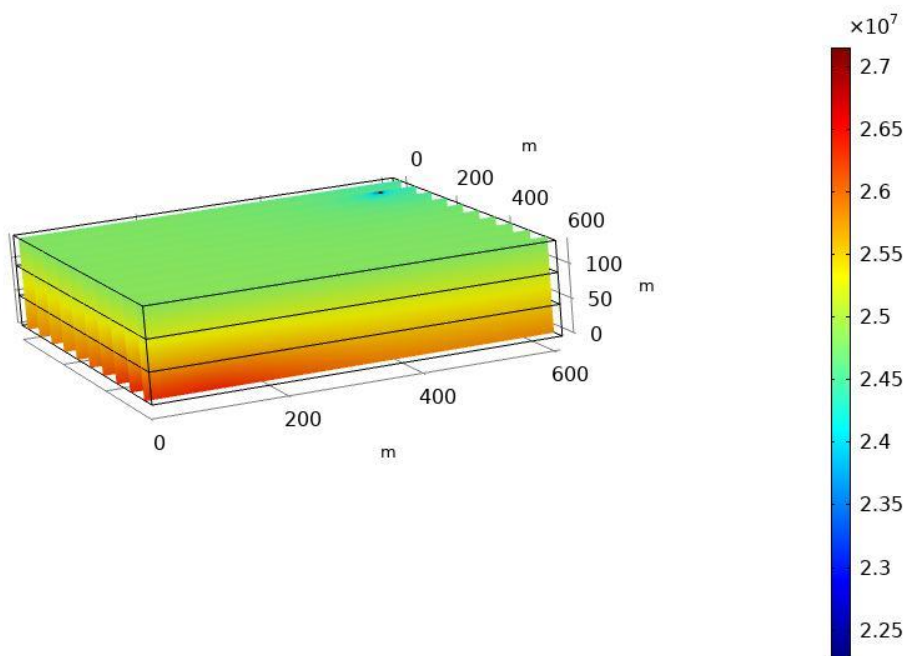
Time=0 d

Slice: Pressure (Pa)



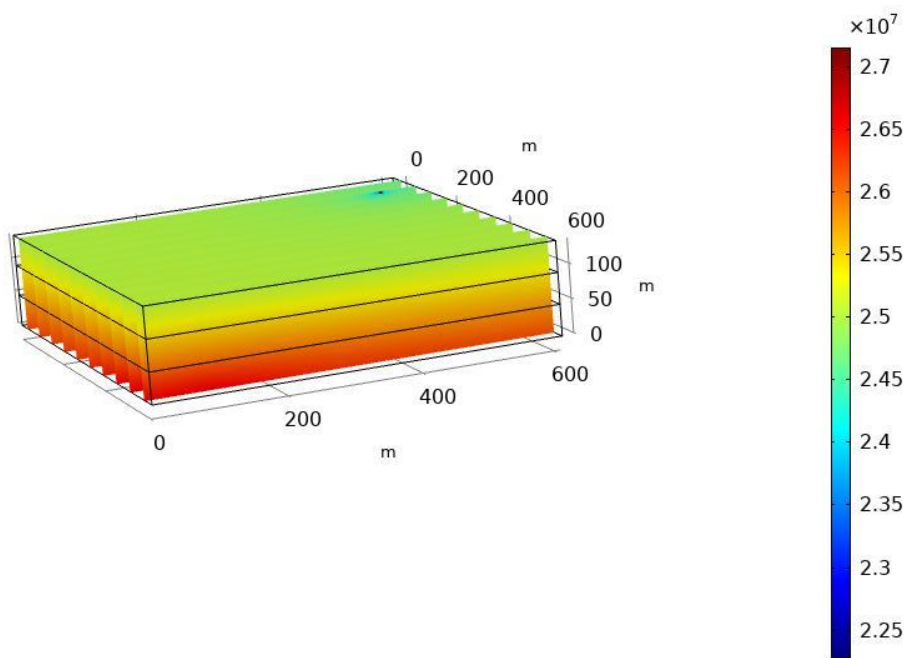
Time=2040 d

Slice: Pressure (Pa)



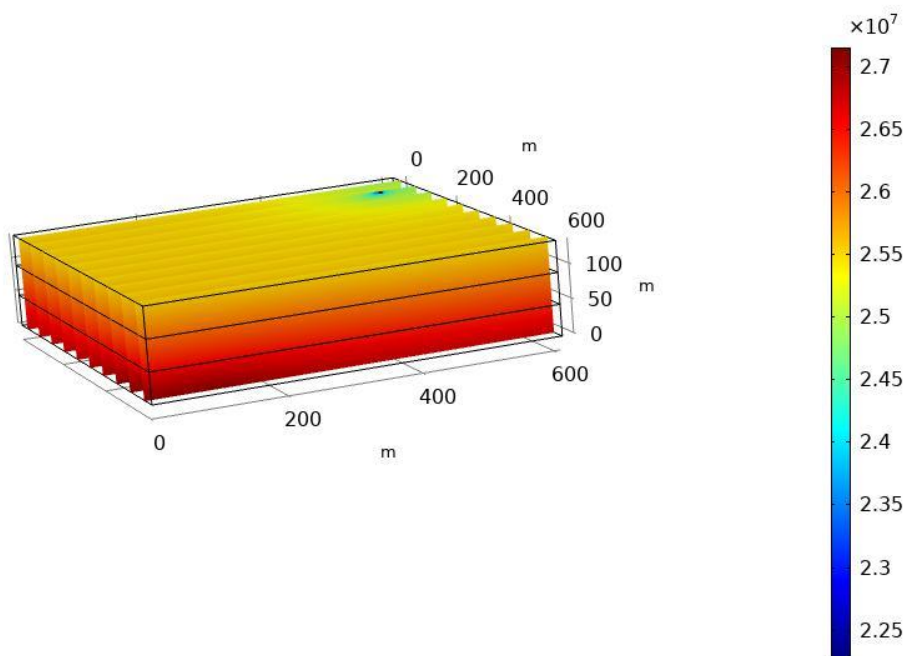
Time=8160 d

Slice: Pressure (Pa)



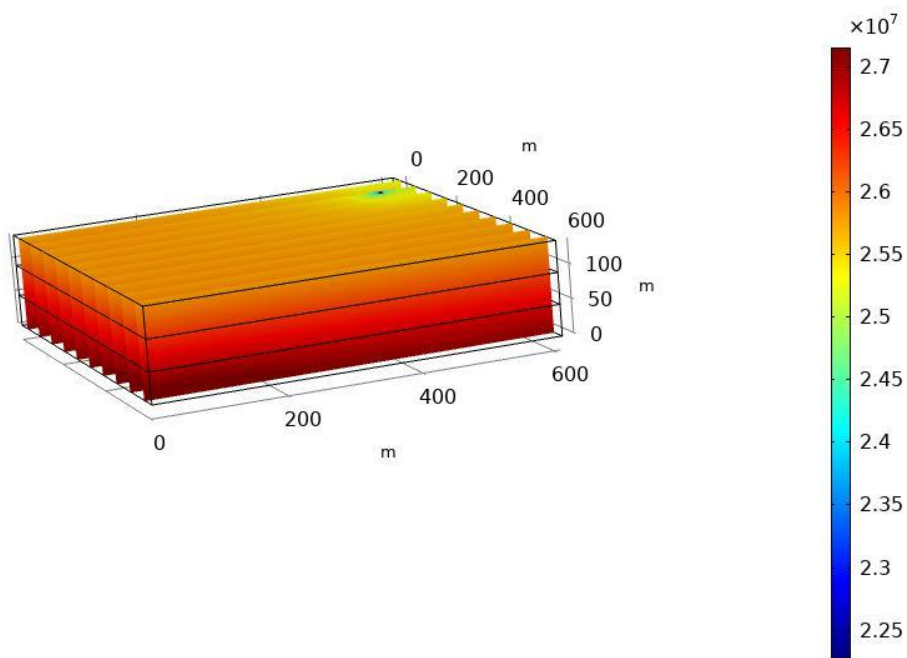
Time=12240 d

Slice: Pressure (Pa)



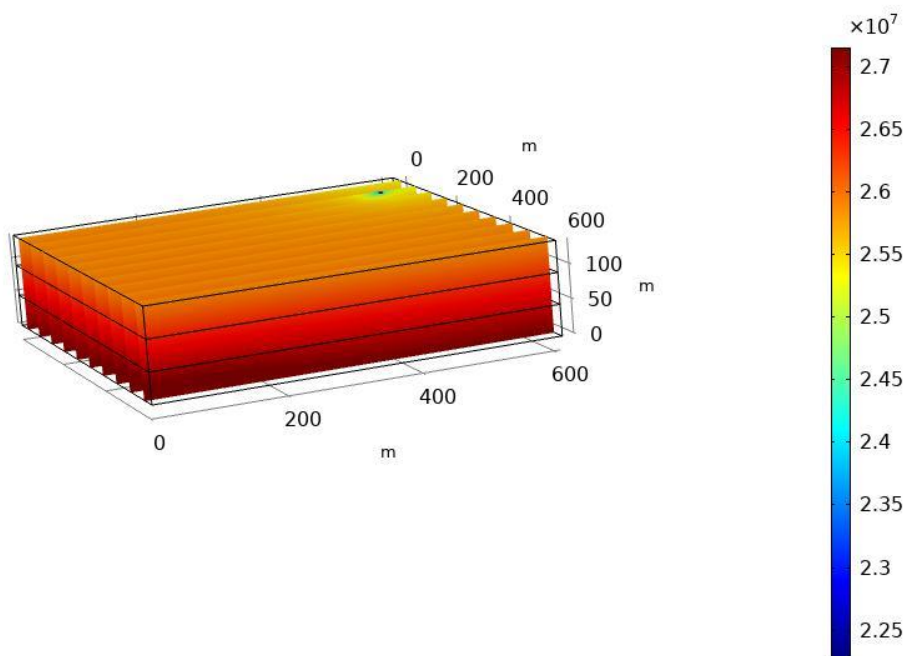
Time=16325 d

Slice: Pressure (Pa)



Time=20000 d

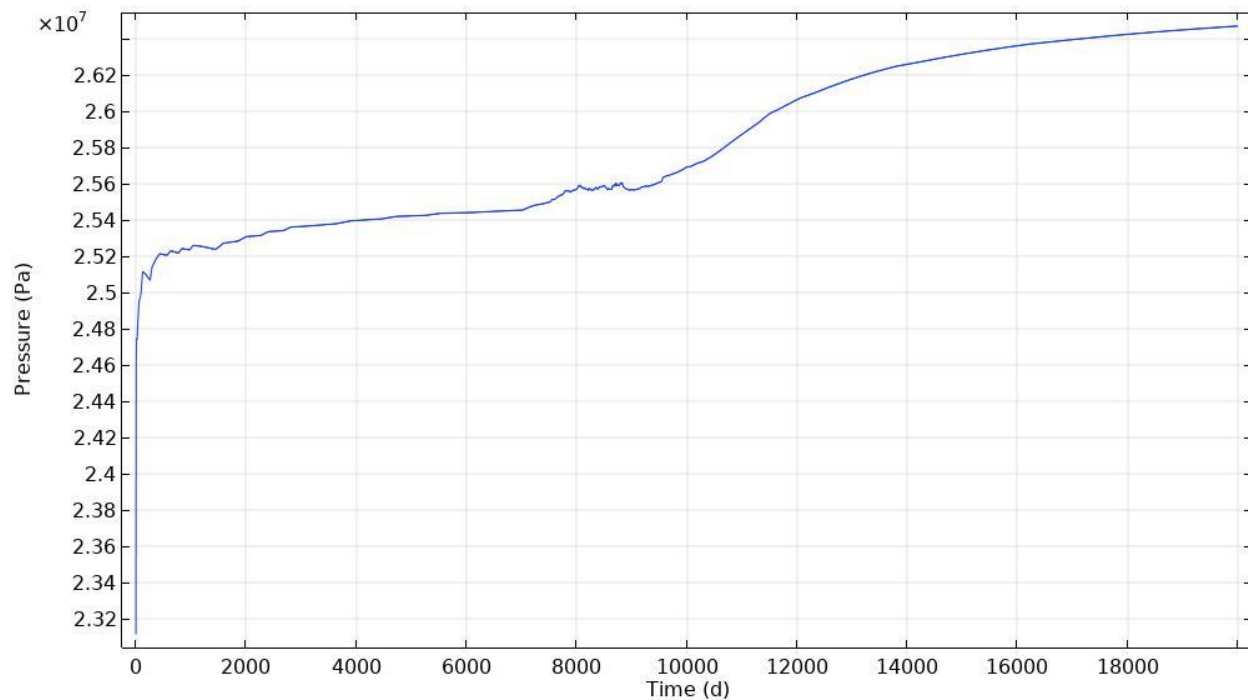
Slice: Pressure (Pa)



**Εικόνες 3.12: Πεδίο πίεσης, απεικόνιση σε “φέτες” (μοντέλο με διαστρωμάτωση)**

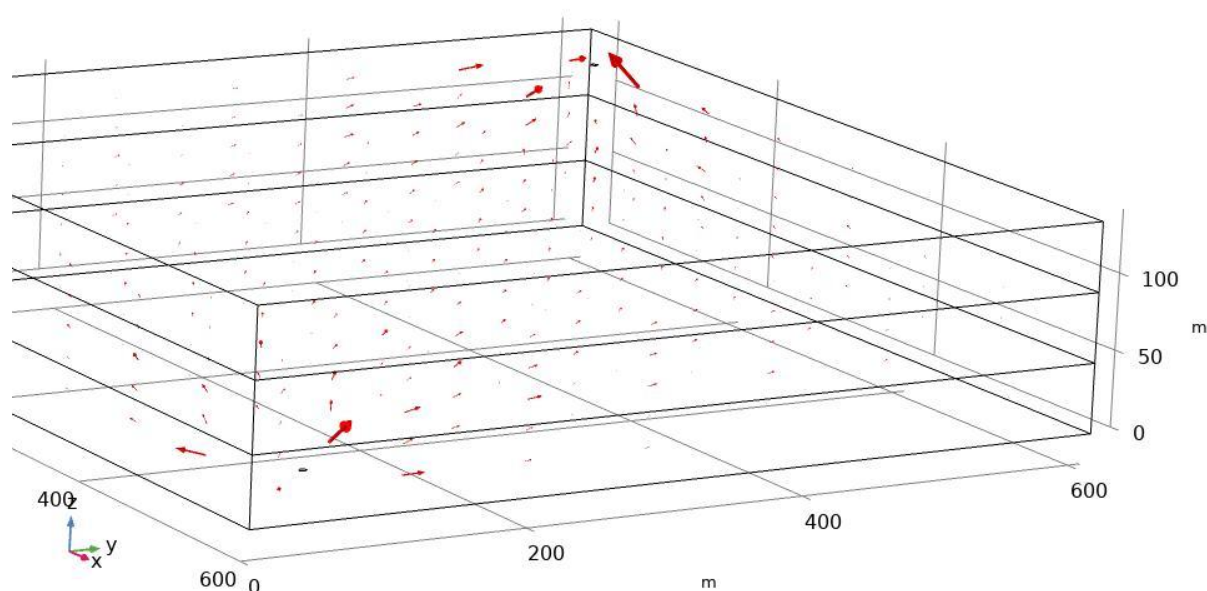
Η αρχική κατανομή του πεδίου πίεσης παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.12. Η πίεση λόγω της μεγάλης πίεσης εισαγωγής του νερού και της αύξησής της με το βάθος εμφανίζει τη μέγιστη τιμή της στο κάτω στρώμα του ταμιευτήρα. Οι διακυμάνσεις της στους άξονες  $x$ ,  $y$  αρχίζουν να γίνονται αισθητές όσο προχωράει η διαδικασία εισαγωγής νερού. Αυτή η διαδικασία προκαλεί έντονη κατανομή της πίεσης σε όλους τους άξονες γεγονός το οποίο μπορεί να επαληθευτεί και οπτικά μέσω της χρονικής συνέχειας παράθεσης των Σχημάτων 3.12. Σε όλη τη διαδικασία το πεδίο πίεσης αλλάζει όμως, είναι εμφανές όμως ότι οι περιοχές κοντά στα πηγάδια παρουσιάζουν τις μεγαλύτερες διαφορές πίεσης συναρτήσει του χρόνου.

Επίσης εκτιμάται η μέση πίεση του ταμιευτήρα και αναπαρίσταται στο παρακάτω γράφημα. Η μορφή αυτών των γραφημάτων θεωρητικά είναι ακριβής αναπαράσταση των διακυμάνσεων πίεσης στην πραγματικότητα υπάρχουν κάποιες παραπάνω, οι οποίες οφείλονται στο πλέγμα και την αριθμητική επίλυση του μοντέλου. Βέβαια, είναι λιγότερο έντονες από αυτές του προηγούμενου μοντέλου.



**Εικόνα 3.13: Μέση πίεση ταμιευτήρα (μοντέλο με διαστρωμάτωση)**

Όπως διαφαίνεται από το γράφημα η μέση πίεση του σχηματισμού συναρτήσει του χρόνου ακολουθεί ανοδική πορεία. Επίσης είναι εμφανής η σχετικά μικρή κλίση της καμπύλης στο αρχικό στάδιο παραγωγής πετρελαίου καθώς και το γεγονός ότι μεγαλώνει όσο προχωρά η διαδικασία και ειδικά όταν το νερό φτάσει στο πηγάδι παραγωγής, κοντά στις 8700 μέρες. Ακόμη παρατηρείται μια εξομάλυνση της καμπύλης στο τελικό πλέον στάδιο της παραγωγής. Καθ' όλη τη διαδικασία η μέση πίεση παραμένει χαμηλότερη από αυτήν στο φρεάτιο εισαγωγής νερού και η ροή πηγαινεί από την υψηλότερη προς την χαμηλότερη γεγονός τα οποία επαληθεύουν ότι και αυτό το μοντέλο είναι λογικό. Σε γενικές γραμμές η μέση πίεση διατηρείται σε υψηλό επίπεδο μέχρι το τέλος της δευτερεύουσας ανάκτησης.



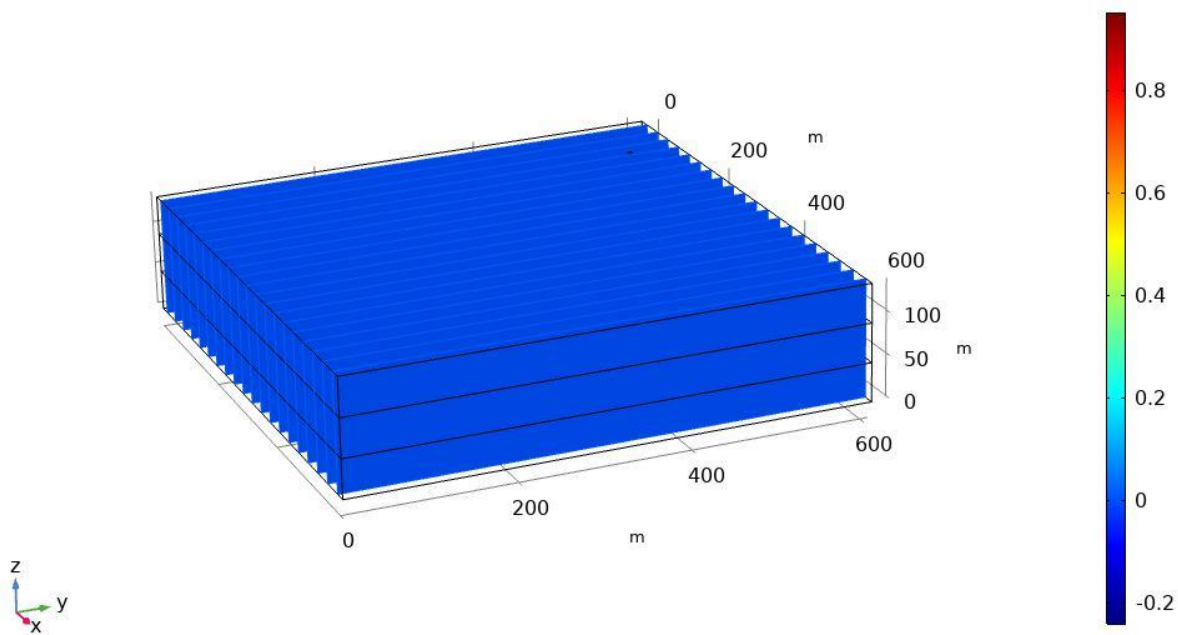
**Εικόνα 3.14: Γράφημα διανυσμάτων ταχυτήτων κατά την 20000<sup>η</sup> μέρα (μοντέλο με διαστρωμάτωση)**

Τα διανύσματα των ταχυτήτων των ρευστών υπολογίζονται επίσης από την λύση του χρονικά βασιζόμενου προβλήματος. Αυτά απεικονίζονται μέσω του γραφήματος με βέλη στην παραπάνω εικόνα. Παρουσιάζει την τελευταία μέρα της παραγωγής και όπως φαίνεται τα βέλη δείχνουν προς την κατεύθυνση του φρέατος παραγωγής.

Η πορεία κορεσμού της διαβρέχουσας φάσης σε διαφορετικές χρονικές στιγμές μετά την έναρξη της διαδικασίας εισαγωγής νερού αναπαρίσταται στις παρακάτω εικόνες.

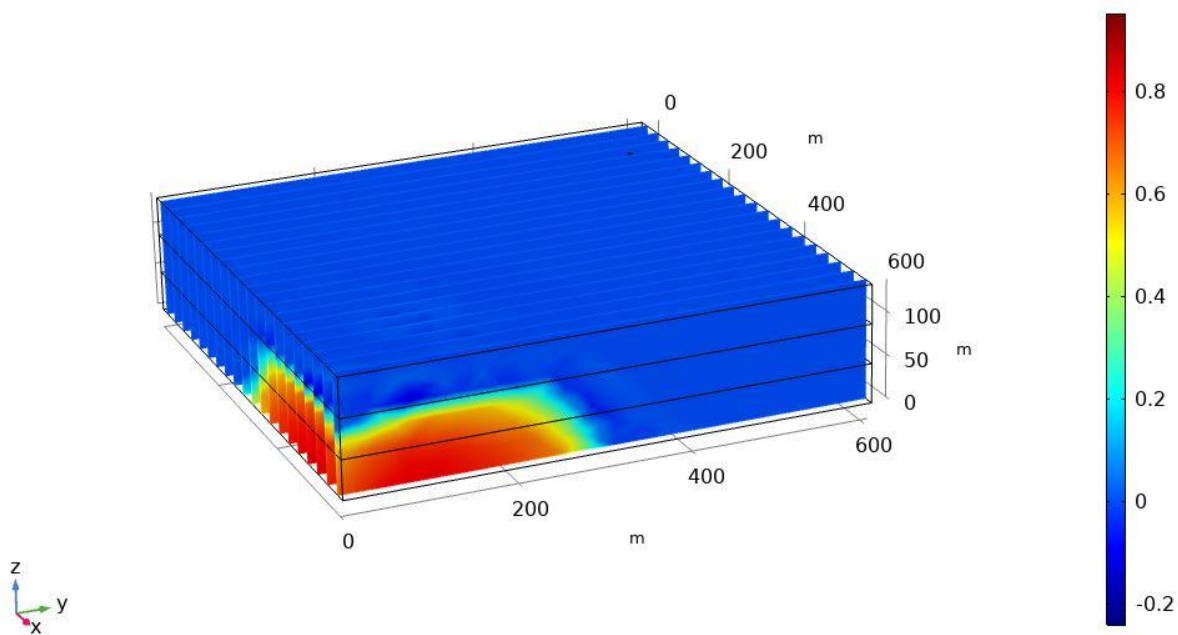
Time=0 d

Slice: Volume fraction (1)



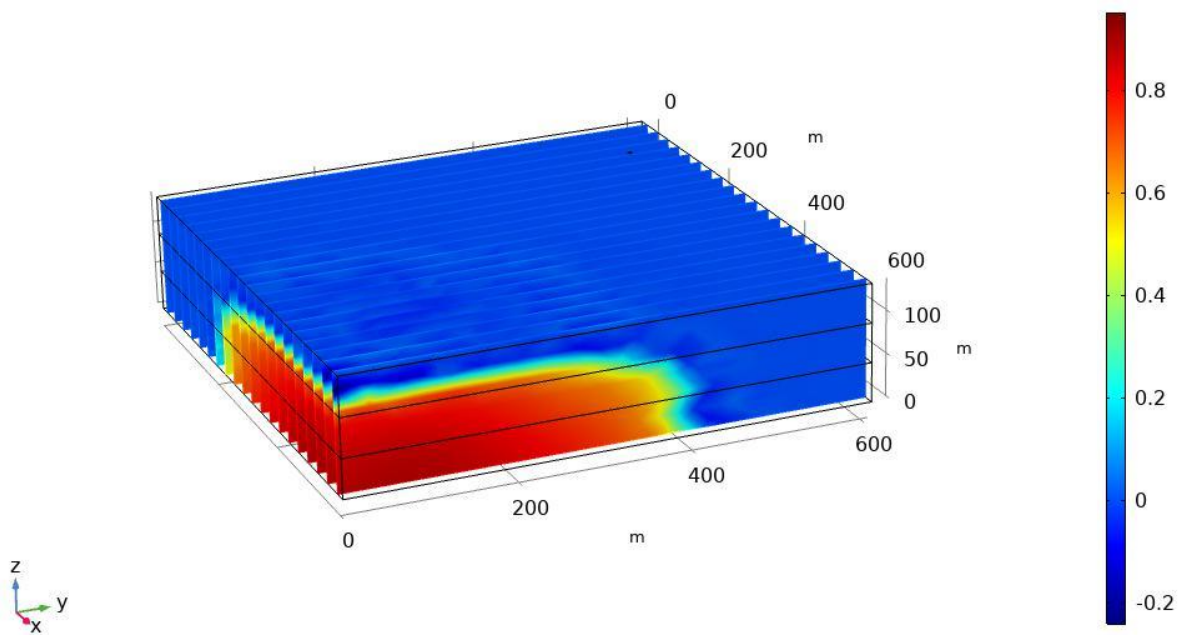
Time=1220 d

Slice: Volume fraction (1)



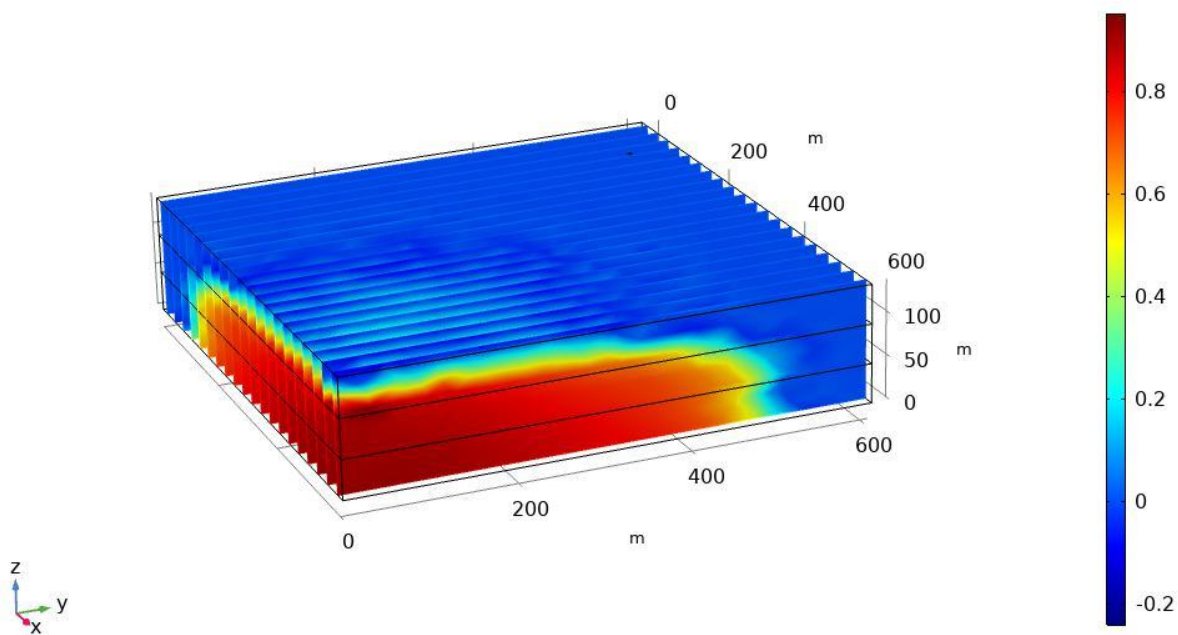
Time=2855 d

Slice: Volume fraction (1)



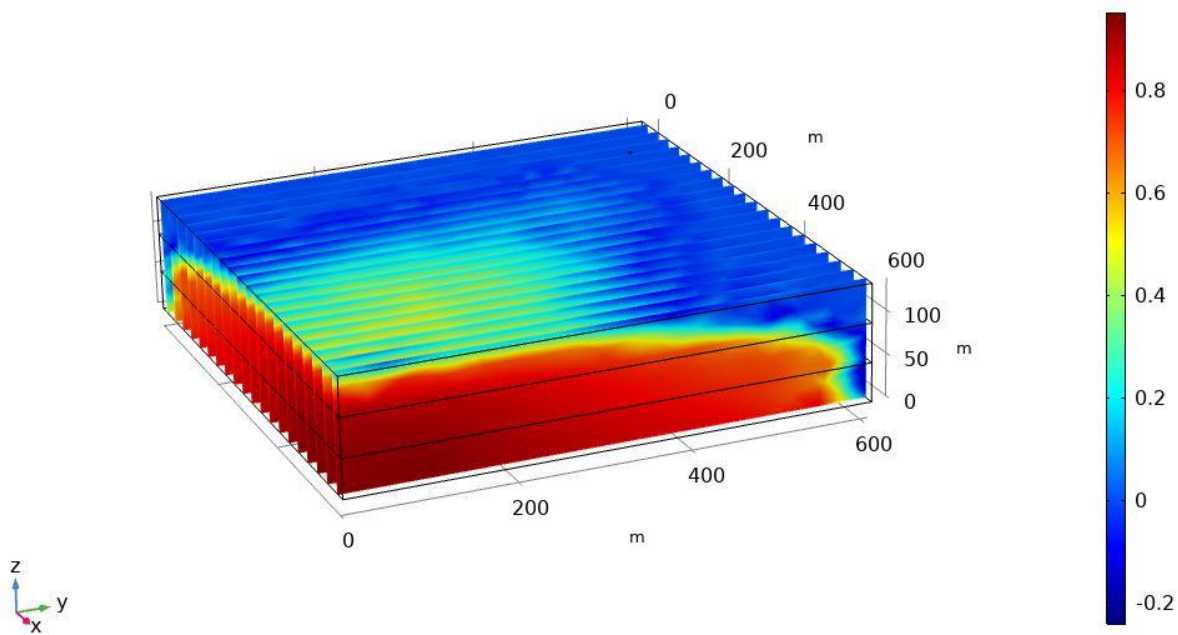
Time=4895 d

Slice: Volume fraction (1)



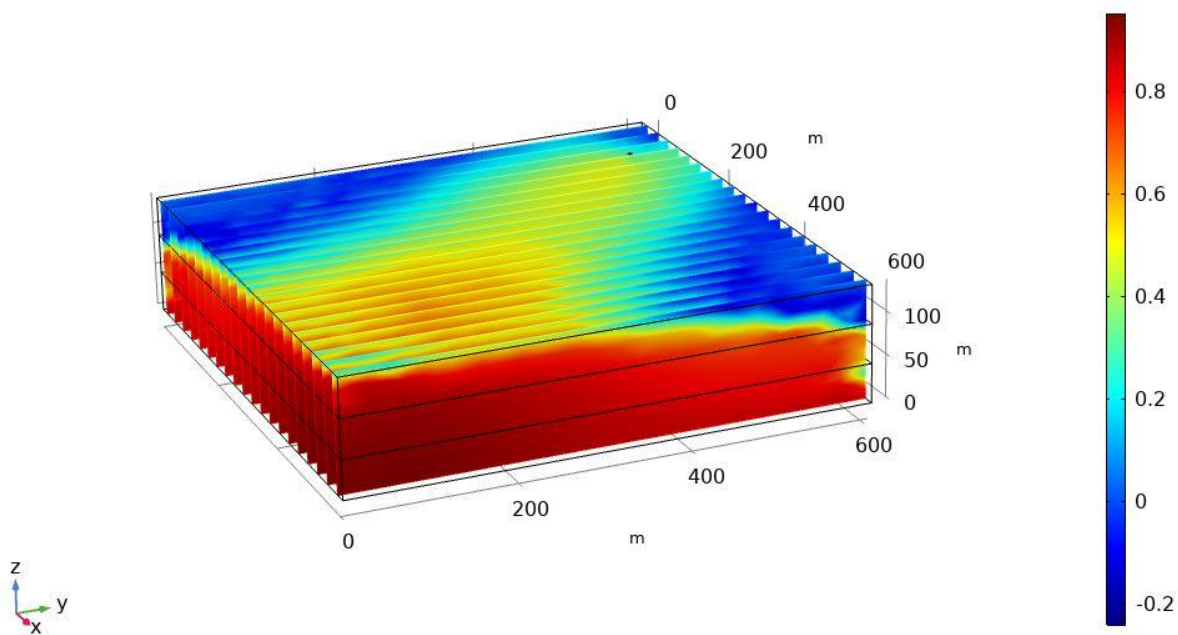
Time=8160 d

Slice: Volume fraction (1)



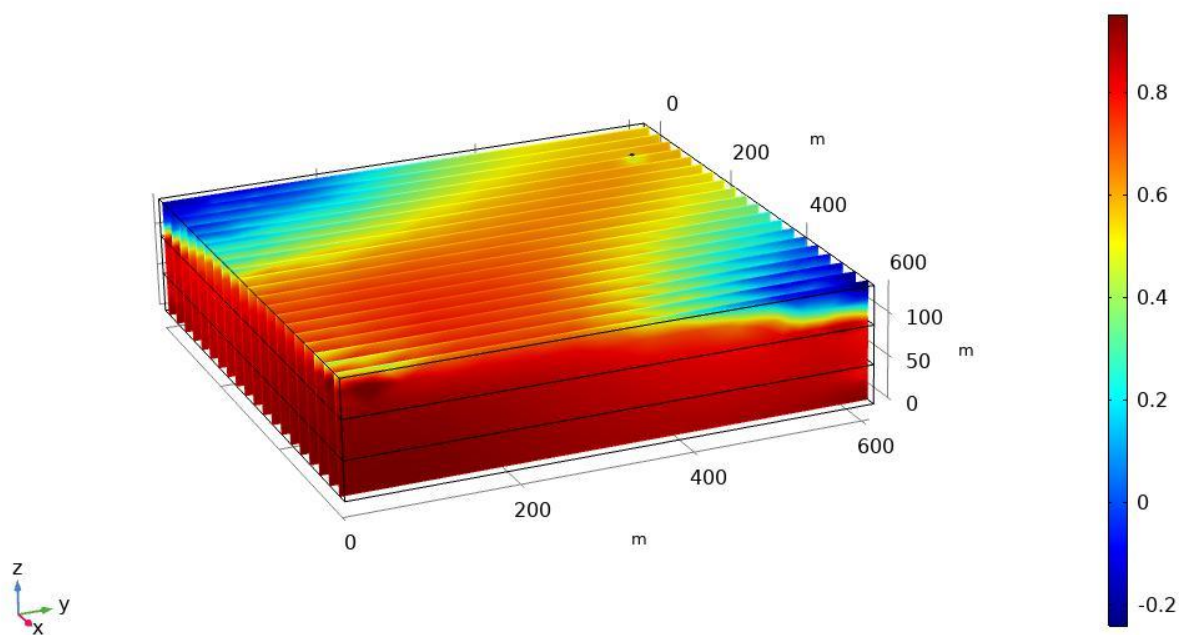
Time=11020 d

Slice: Volume fraction (1)



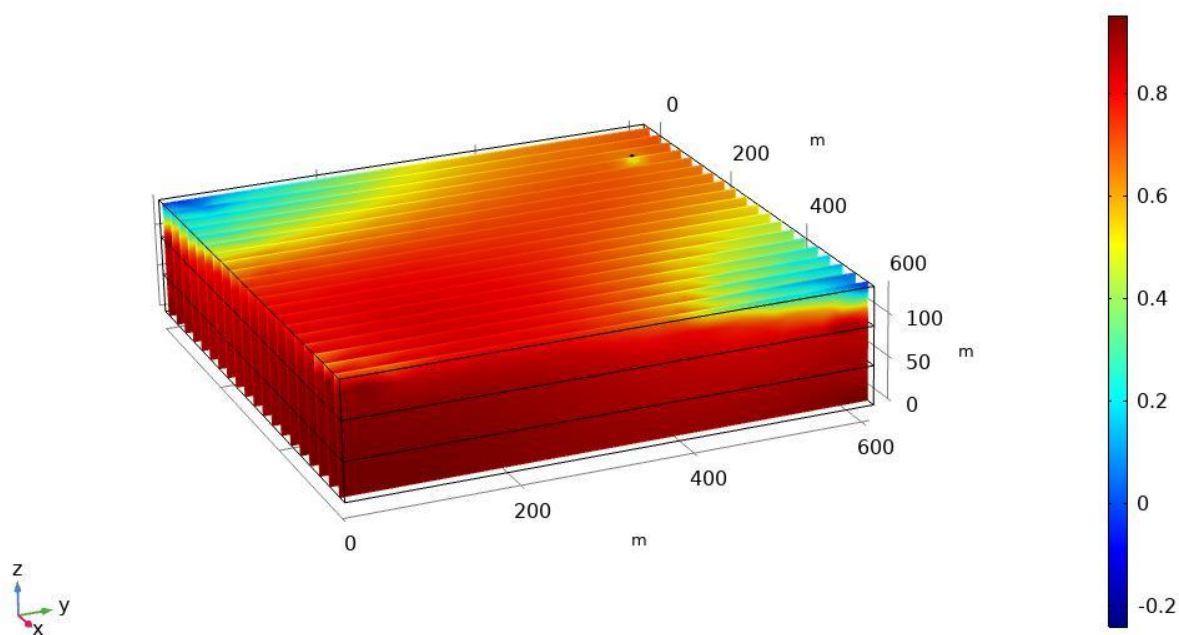
Time=15100 d

Slice: Volume fraction (1)



Time=20000 d

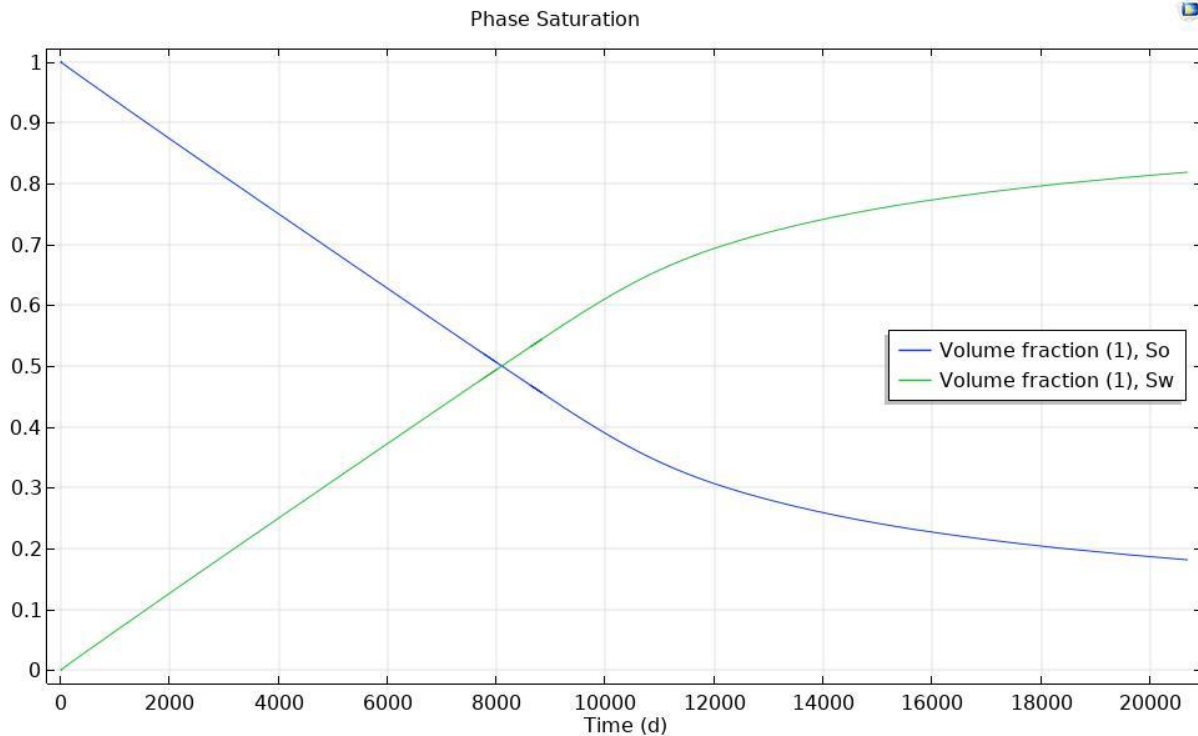
Slice: Volume fraction (1)



Εικόνες 3.15: Εξέλιξη κορεσμού της διαβρέχουσας φάσης (μοντέλο με διαστρωμάτωση)

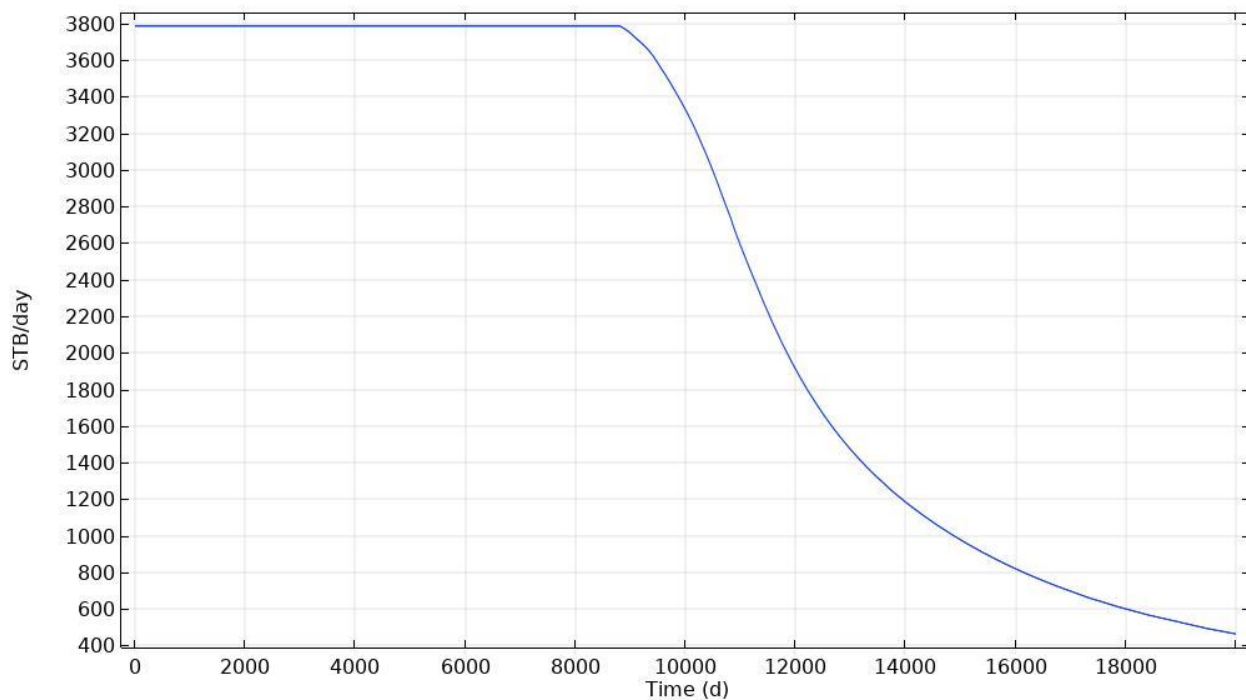
Το νερό εισάγεται από το φρεάτιο στην κάτω γωνία του κατώτερου στρώματος με κατεύθυνση το πηγάδι παραγωγής στην απέναντι γωνία του ανώτερου. Καθώς όλο και μεγαλύτερος όγκος νερού εισέρχεται στον ταμιευτήρα ο κορεσμός της διαβρέχουσας φάσης αυξάνεται σταδιακά στην περιοχή κοντά στο φρεάτιο εισαγωγής δημιουργώντας ένα μέτωπο σάρωσης με το χρόνο το οποίο βέβαια δεν είναι ομοιόμορφο. Σε αυτό συμβάλει επί το πλείστον η μεγάλη διαφορά στις διαπερατότητες των στρωμάτων και η βαρύτητα. Στο ενδιάμεσο στρώμα το μέτωπο λόγω της μεγάλης διαπερατότητας του σε σχέση με τα άλλα δύο κινείται γρηγορότερα. Μέσω αυτού οι πρώτοι όγκοι νερού φθάνουν στο πηγάδι παραγωγής. Ακόμη αξιοσημείωτη είναι και η επίδραση της βαρύτητας καθώς ενώ το ανώτερο στρώμα είναι πολύ πιο διαπερατό από το κατώτερο στο τελευταίο το μέτωπο κινείται αισθητά γρηγορότερα όπως διαφαίνεται και από τις εικόνες 3.15 για  $t=1120d$ -  $t=20000d$ . Σε κάθε στρώμα ξεχωριστά, το μέτωπο κορεσμού του νερού κατά την κίνησή του έρχεται σε επαφή με μεγαλύτερους όγκους από το πετρέλαιο του ταμιευτήρα που βρίσκεται στο κάτω μέρος του κάθε στρώματος σε σχέση με το πετρέλαιο στο πάνω μέρος αυτών. Το φαινόμενο αυτό γίνεται ιδιαίτερα εμφανές στο ανώτερο και στο κατώτερο στρώμα. Ουσιαστικά δηλαδή το νερό «σαρώνει» το πετρέλαιο από κάτω, όπως φαίνεται και από τα Σχήματα 3.15 για  $t= 2855d$ -  $t= 11020d$ . Όσο η εισαγωγή νερού (waterflooding) συνεχίζεται όλο και περισσότεροι υδρογονάνθρακες εκτοπίζονται από τις περιοχές σάρωσης εξαναγκάζοντας τα ρευστά κοντά στο πηγάδι παραγωγής (επί το πλείστον υδρογονάνθρακες) να παραχθούν. Ο κορεσμός της διαβρέχουσας αυξάνεται συνεχώς σε όλη την έκταση του ταμιευτήρα μέχρι την 20000<sup>η</sup> μέρα όπου η δευτερογενής ανάκτηση τερματίζεται. Σε αυτή την φάση στον ταμιευτήρα υπάρχει κατά κύριο λόγο νερό. Η ανομοιόμορφη «σάρωση» σε οριζόντια και κατακόρυφη κατεύθυνση μπορεί να επαληθευτεί οπτικά από τα Σχήματα 3.15.

Το παρακάτω διάγραμμα αναπαριστά τον μέσω κορεσμό κάθε φάσης στον ταμιευτήρα κατά την διαδικασία εισαγωγής νερού.



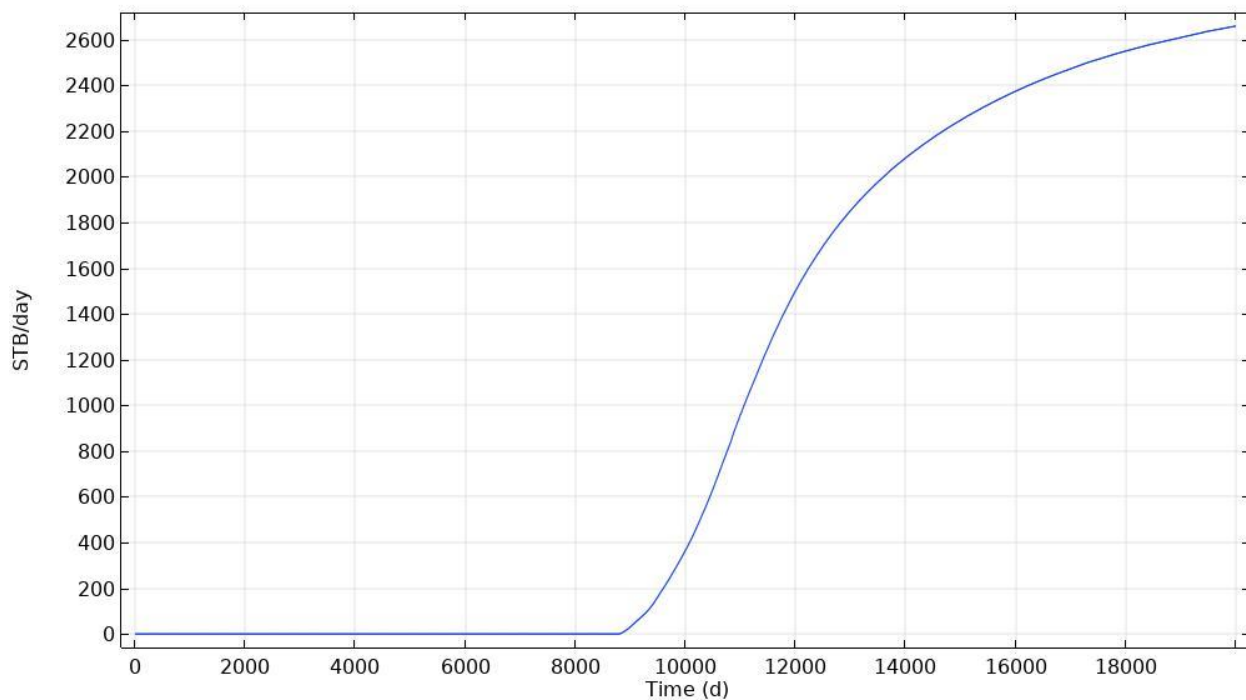
**Εικόνα 3.16: Μέσος κορεσμός φάσεων (μοντέλο με διαστρωμάτωση)**

Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας εισαγωγής νερού οι κορεσμοί των δύο φάσεων είναι αντιστρόφως ανάλογοι όπως ήταν αναμενόμενο, καθώς η διαβρέχουσα φάση εκτοπίζει τη μη διαβρέχουσα και την αναγκάζει να παραχθεί. Στο τέλος της προσομοίωσης ο ταμιευτήρας πληρώνεται κατά το μεγαλύτερο ποσοστό με νερό γεγονός το οποίο συμφωνεί πλήρως και με τις προηγούμενες τρισδιάστατες αναπαραστάσεις. Τελικά, υπολογίζεται η ημερήσια παραγωγή ρευστών σε βαρέλια (stock tank barrels, STB).



**Εικόνα 3.17: Ρυθμός παραγωγής πετρελαίου (μοντέλο με διαστρωμάτωση)**

Κατά την έναρξη της εισαγωγής νερού παράγονται καθημερινά 3800 βαρέλια (stb) υδρογονανθράκων. Η παραγωγή παραμένει σταθερή περίπου μέχρι και την 8700<sup>η</sup> ημέρα της διαδικασίας και ακολουθείται από μια ομαλή μείωση μέχρι το τέλος της προσομοίωσης. Η αλλαγή αυτή που παρατηρείται είναι αποτέλεσμα του γεγονότος ότι το νερό από το πηγάδι εισαγωγής φτάνει στο φρεάτιο παραγωγής και αρχίζει να παράγεται (water cut). Ο ρυθμός παραγωγής του αυξάνεται συνεχώς με τον χρόνο όπως φαίνεται και στο Διάγραμμα 3.16. Στο τέλος της προσομοίωσης παράγονται περίπου 450 βαρέλια ανά ημέρα.



**Εικόνα 3.18: Ρυθμός παραγωγής νερού (μοντέλο με διαστρωμάτωση)**

Αρχικά δεν υπάρχει όπως είναι φυσικό παραγωγή νερού. Το νερό φτάνει στο φρεάτιο παραγωγής περίπου στην 8700<sup>η</sup> ημέρα της δευτερογενούς ανάκτησης όπου και αρχίζει να παράγεται. Από τότε και μετά ο ρυθμός αυτός της παραγωγής νερού αυξάνεται μέχρι το τέλος της προσομοίωσης όπου παράγονται ημερησίως 2600 βαρέλια (stb).

### 3.5 Συμπεράσματα

Στο παρόν κεφάλαιο μελετήθηκε υπολογιστικά η πολυφασική ασυμπίεστη ροή κατά τη διεργασία της δευτερογενούς ανάκτησης πετρελαίου σε έναν ομοιογενή και ανισοτροπικό και σε έναν ετερογενή ταμιευτήρα με δύο προσεγγίσεις. Μία όταν η διαπερατότητα του σχηματισμού παρουσιάζει διαστρωμάτωση και μία χωρίς. Η δυναμική του πεδίου πίεσης, τα διανύσματα των ταχυτήτων και η δυναμική του κορεσμού της διαβρέχουσας φάσης παρουσιάστηκαν μέσω τρισδιάστατων απεικονίσεων, ενώ η μέση πίεση του σχηματισμού και οι ρυθμοί παραγωγής των ρευστών μέσω διαγραμμάτων. Χάρη στο μοντέλο με τη διαστρωμάτωση παρατηρήθηκε η έντονη επίδραση της διαπερατότητας της βαρύτητας στη δυναμική της ροής των φάσεων μέσα στον ταμιευτήρα. Το φυσικό πρόβλημα περιγράφεται επαρκώς και από τα δύο μοντέλα γεγονός το οποίο καταδεικνύει ότι το module του COMSOL Multiphysics για πολυφασική ροή σε πορώδες μέσω είναι ένα αξιόπιστο εργαλείο το οποίο θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί και για επίλυση ακόμη πιο σύνθετων γεωλογικών διαμορφώσεων ταμιευτήρων πετρελαίου.

# Κεφάλαιο 4

## Το πρότυπο ταμιευτήρα “Egg”

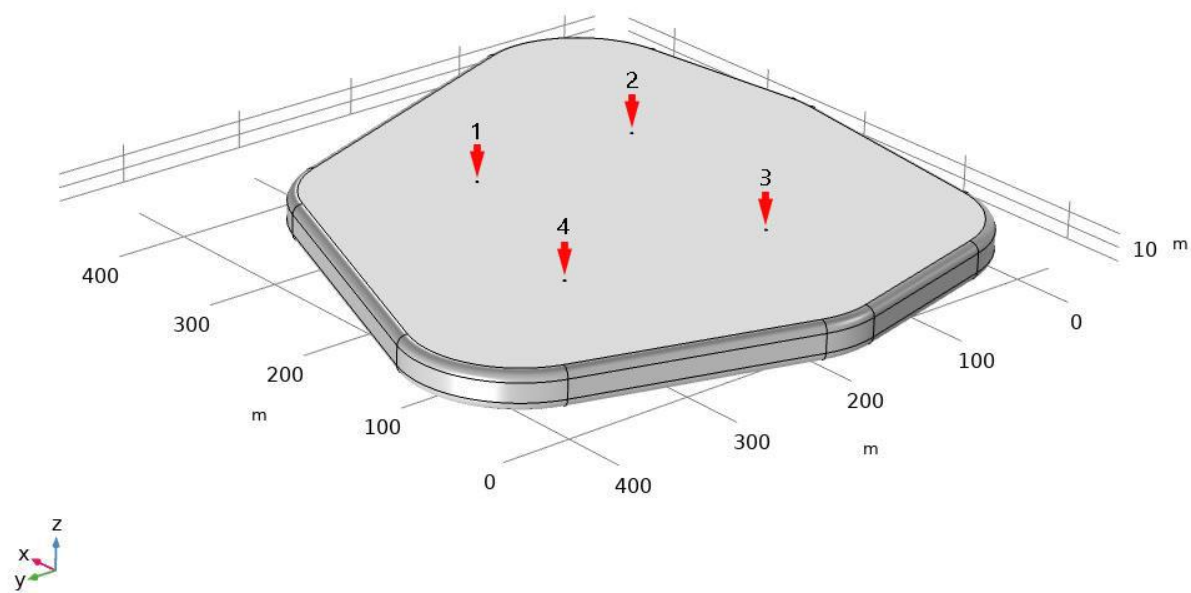
### 4.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο μελετάται η παραγωγή πετρελαίου με εισπίεση νερού από έναν σύνθετο ταμιευτήρα όπως περιγράφεται από το σενάριο αναφοράς του Jansen J.D. “egg model: a geological ensemble for reservoir simulation” (Jansen J.D. et al, 2014). Το συγκεκριμένο υπολογιστικό μοντέλο πήρε το όνομα του εξαιτίας της της γεωμετρίας του σχηματισμού του οποίου εξετάζει και αποτελεί ένα σύγχρονο σενάριο αναφοράς της SPE (Society of Petroleum Engineering) για τη σύγκριση υπολογιστικών εργαλείων πολυφασικής ροής. Η παρούσα μελέτη είναι βασισμένη σε μια μεταγενέστερη εκδοχή του egg model από τον Andrey Afanasyev στο λογισμικό MUFITS (Andrey Afanasyev, 2015). Στο παραπάνω σενάριο εξετάζεται η συμπεριφορά ενός ταμιευτήρα κατά τη διαδικασία της εισπίεσης νερού όπου υπάρχουν 8 φρεάτια εισαγωγής νερού και 4 παραγωγής υδρογονανθράκων. Το egg model έχει παλαιότερα υλοποιηθεί σε 4 προσομοιωτές ταμιευτήρων: Dynamo/Mores (Shell), Eclipse (Schlumberger), AD-GPRS (Stanford University) και MRST (Sintef) με αρκετά κοντινά αποτελέσματα όσον αφορά την παραγωγή. Παρακάτω παρουσιάζεται μία προσέγγισή του στο λογισμικό COMSOL Multiphysics με κάποιες παραλλαγές όπως την εφαρμογή σταθερής πίεσης στα φρεάτια εισαγωγής και ρυθμού παραγωγής στα φρεάτια παραγωγής ενώ στην αρχική προσέγγιση συμβαίνει το αντίθετο, έχουμε

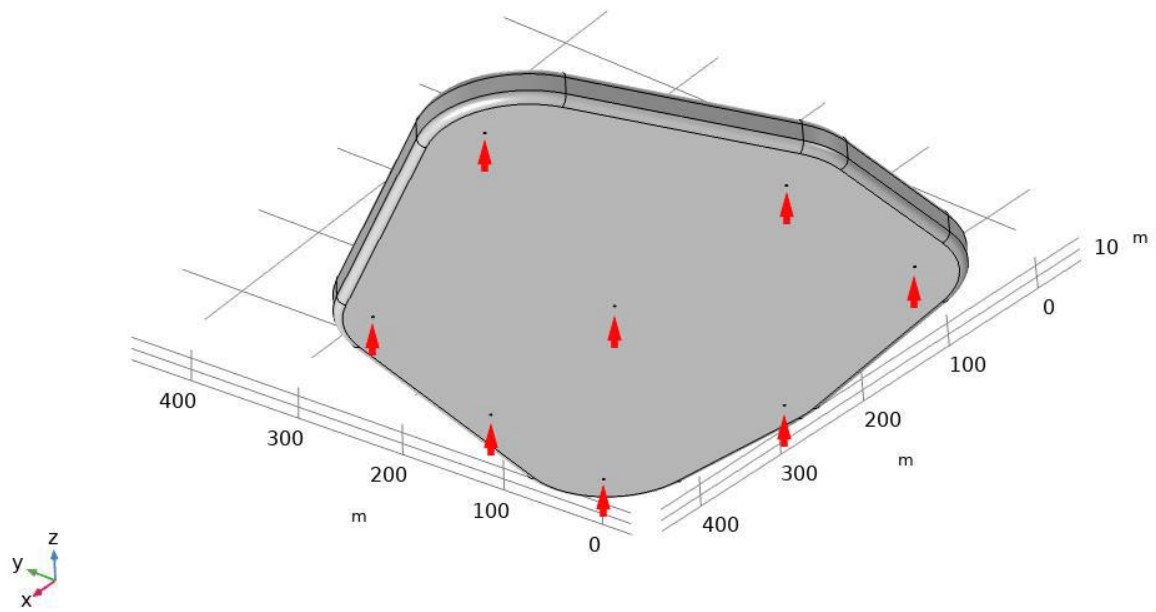
δηλαδή σταθερό ρυθμό εισαγωγής νερού στα φρεάτια εισαγωγής και πίεση στα φρεάτια παραγωγής. Επίσης, έγινε προσθήκη μιας περιοχής με μεγαλύτερη διαπερατότητα.

## 4.2 Εφαρμογή του Egg Model στο COMSOL Multiphysics

Η συμπεριφορά της πολυφασικής ασυμπίεστης ροής των φάσεων προσομοιώνεται σε έναν τρισδιάστατο εξαγωνικό ταμιευτήρα με πάχος 28m, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.1. Η ανώτερη πλευρά του βρίσκεται σε βάθος 2700m. Εκεί υπάρχουν τέσσερα φρεάτια παραγωγής (production wells) με ακτίνα 1m τα οποία έχουν αριθμηθεί. Στην κατώτερη πλευρά του ταμιευτήρα υπάρχουν οκτώ πηγάδια εισαγωγής νερού (injection wells) ίδιων διαστάσεων. Η πίεση στα φρεάτια εισαγωγής ορίζεται σταθερή σε 27.57 MPa ενώ ο ρυθμός παραγωγής από κάθε πηγάδι ορίζεται σε  $0.4\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ .

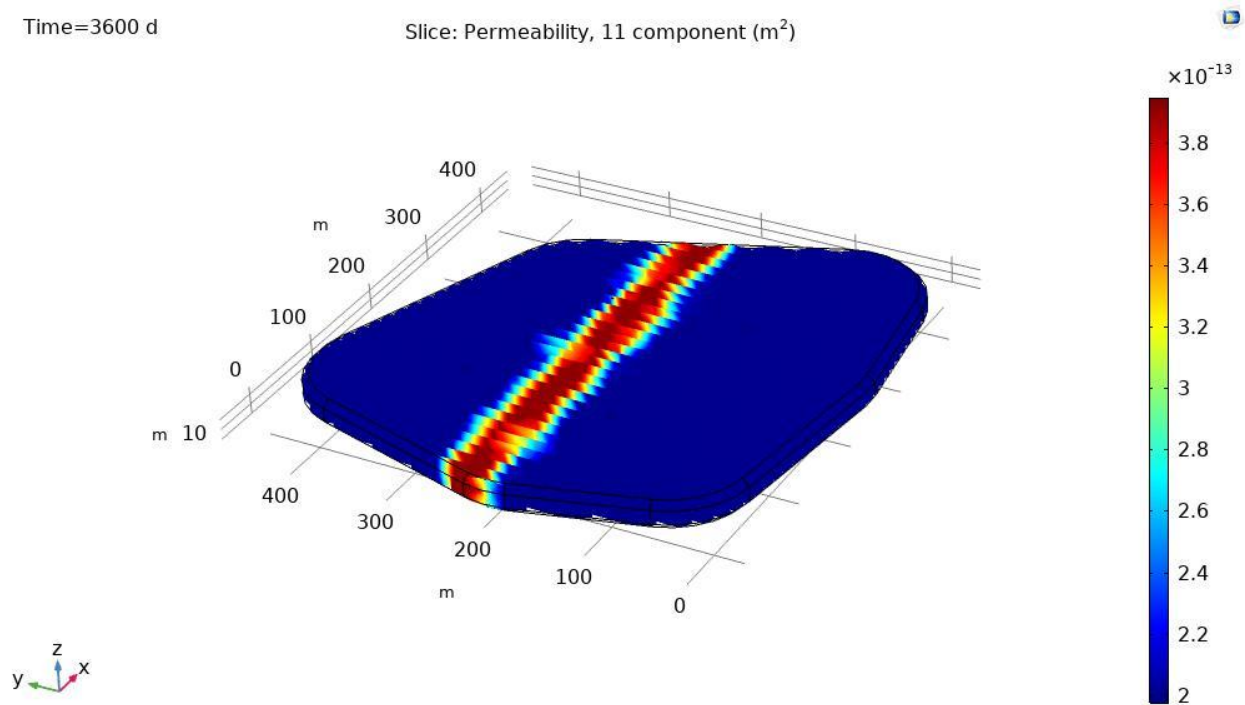


Εικόνα 4.1: Γεωμετρία ταμιευτήρα, πηγάδια παραγωγής (Egg Model)



**Εικόνα 4.2: Γεωμετρία ταμιευτήρα, πηγάδια εισαγωγής νερού (Egg Model)**

Στην μεγαλύτερη έκτασή του ο ταμιευτήρας έχει απόλυτη διαπερατότητα 200mD και στους τρεις άξονες. Όμως κατά μήκος του άξονα y από y=200m έως y=250m υπάρχει ένα κανάλι στο οποίο η διαπερατότητα αυξάνεται ισотροπικά στα 400mD όπως φαίνεται και στην εικόνα 4.3. Οι τιμές αυτές εισάγονται ως παράμετροι στο λογισμικό COMSOL.



**Εικόνα 4.3: Διαπερατότητα ταμιευτήρα (Egg Model)**

Η σχετική διαπερατότητα της κάθε φάσης δίνεται σαν συνάρτηση του κορεσμού της. Δηλαδή,  $k_{r_{oil}} = S_{oil}^2$  και  $k_{r_{water}} = S_{water}^2$ . Οι υπόλοιπες παράμετροι του μοντέλου παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα.

Παράμετροι	Μονάδες	Τιμές
Πορώδες, $\varepsilon_p$	-	0.2
Πυκνότητα νερού, $\rho_w$	kg/m <sup>3</sup>	1000
Πυκνότητα πετρελαίου, $\rho_o$	kg/m <sup>3</sup>	900
Δυναμικό ιξώδες νερού, $\mu_w$	cP	1.0
Δυναμικό ιξώδες πετρελαίου, $\mu_o$	cP	5.0
Μαζική παροχή στην έξοδο, $Q_{out}$	kg/(m <sup>2</sup> · s)	0.4

**Πίνακας 4.1: Παράμετροι για το μοντέλο ασυμπίεστης πολυφασικής ροής “Egg Model”**

Η αρχική πίεση του ταμιευτήρα καθώς και η πίεση στα φρεάτια εισαγωγής νερού εισάγονται σαν μεταβλητές στο COMSOL model builder.

Μεταβλητές	Μονάδες	Τιμή
Αρχική πίεση $p_{initial}$	MPa	26,95
Πίεση στο injector $p_{in}$	MPa	27,57

**Πίνακας 4.2: Πίεση για το μοντέλο ασυμπίεστης πολυφασικής ροής “Egg Model”**

### Πλέγμα και επίλυση

Εφαρμόζεται ένα ελεύθερο τετραεδρικό πλέγμα με μέγιστο μέγεθος στοιχείου 76m και ελάχιστο στα 14.2m. Το πλέγμα κατά την κατακόρυφη διεύθυνση z του διανύσματος της βαρύτητας επιλέγεται ώστε να έχει 1.5 φορές μεγαλύτερη πυκνότητα. Ακόμη, γίνεται χρήση μίας χρονικά μεταβαλλόμενης επίλυσης όπου οι καθορισμένες αρχικές και οριακές συνθήκες λύνονται στο

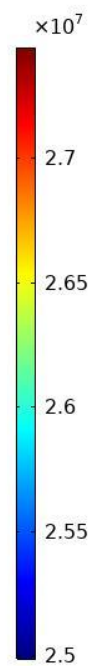
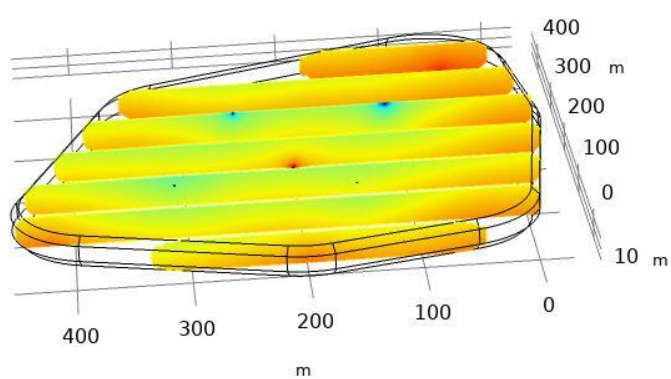
παραπάνω υπολογιστικό μοντέλο σε ένα εύρος των (0,1,3600) ημερών. Η επίλυση αυτή υπολογίζει τις εξαρτημένες μεταβλητές  $p$  και  $S_w$ .

### **Αποτελέσματα**

Η πίεση και ο κορεσμός της διαβρέχουσας φάσης υπολογίζονται σε κάθε χρονικό βήμα από την παραπάνω αριθμητική ανάλυση ως εξαρτημένες μεταβλητές. Τρισδιάστατες απεικονίσεις που αναπαριστούν αυτές τις ποσότητες παρουσιάζονται για το μοντέλο που εφαρμόζεται στο COMSOL Multiphysics.

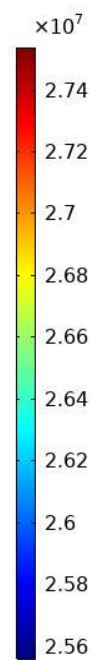
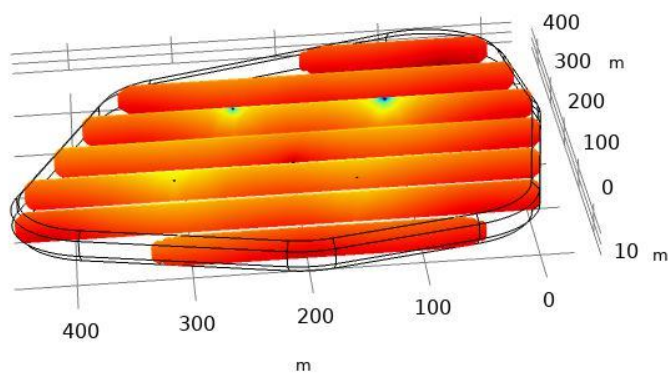
Time=0 d

Slice: Pressure (Pa)



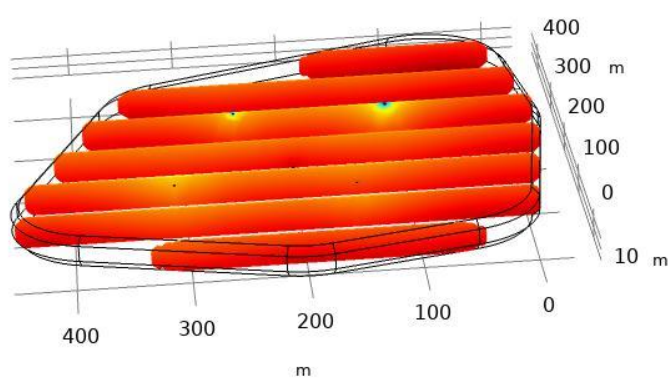
Time=250 d

Slice: Pressure (Pa)



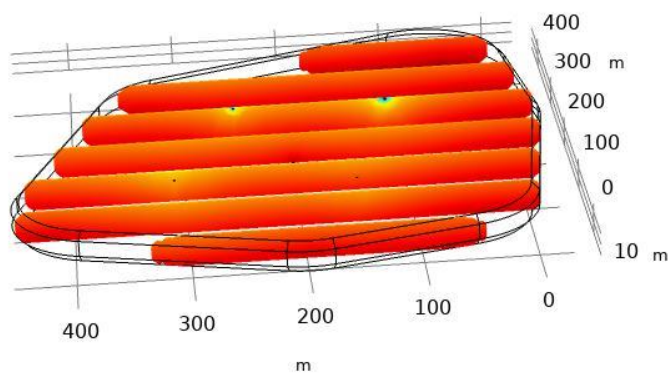
Time=1500 d

Slice: Pressure (Pa)



Time=3600 d

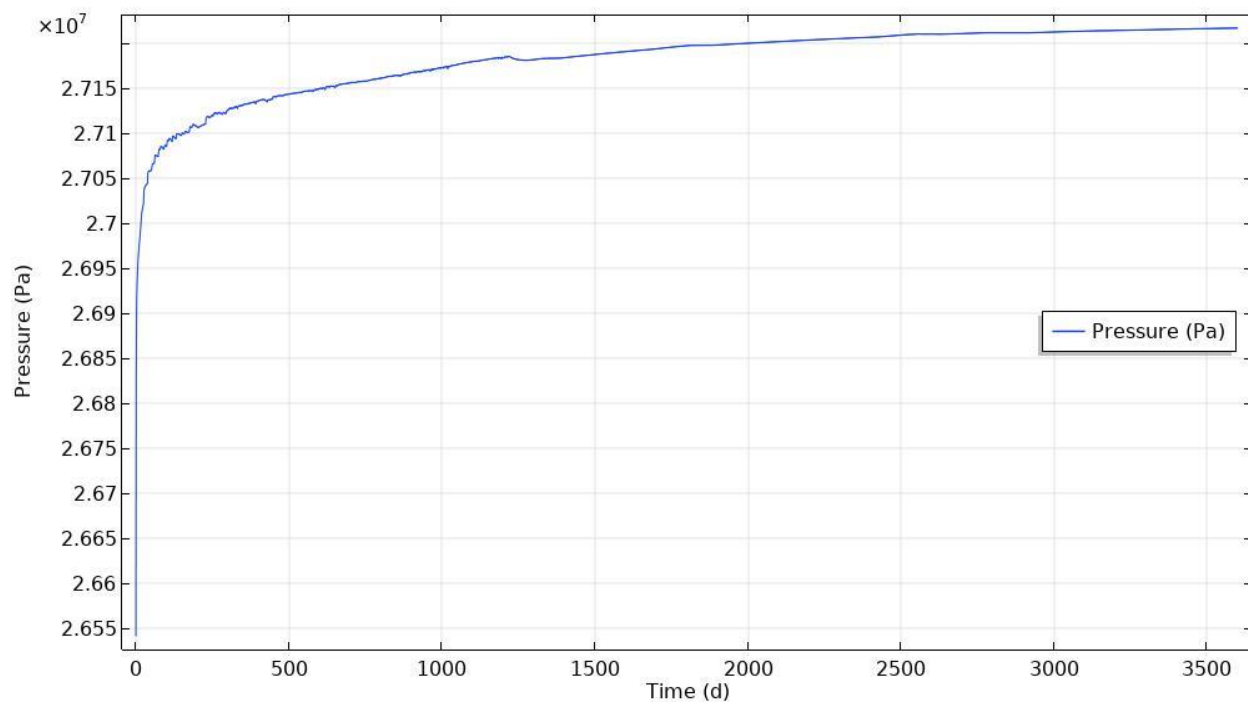
Slice: Pressure (Pa)



Εικόνες 4.4: Πεδίο πίεσης, απεικονίσεις σε “φέτες” (Egg Model)

Η αρχικές τιμές του πεδίου της πίεσης παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.4 κατά τη χρονική στιγμή  $t = 0$  days. Η πίεση αυξάνεται με το βάθος εμφανίζοντας τη μέγιστη τιμή της στο κάτω μέρος του ταμιευτήρα. Οι διακυμάνσεις της στους άξονες  $x$ ,  $y$  γίνονται αισθητές άμεσα όσο προχωράει η διαδικασία εισαγωγής νερού αφού τα φρεάτια εισαγωγής λαμβάνουν θέσεις περιμετρικά του ταμιευτήρα καθώς και ένα στο κέντρο του. Αντιθέτως, τα φρεάτια παραγωγής βρίσκονται σχετικά μακριά από τα όρια του μοντέλου. Η εισαγωγή νερού προκαλεί σημαντική μεταβολή της πίεσης σε όλους τους άξονες γεγονός το οποίο μπορεί να επαληθευτεί και οπτικά μέσω παράθεσης των εικόνων 4.4. Η πίεση παρουσιάζει μια μικρή αύξηση, είναι εμφανές όμως ότι στις περιοχές κοντά στα πηγάδια παρατηρούνται οι μεγαλύτερες διαφορές πίεσης συναρτήσει του χρόνου σε σχέση με την αρχική.

Επίσης υπολογίζεται η μέση πίεση του ταμιευτήρα και αναπαρίσταται στο παρακάτω γράφημα. Βέβαια, ενώ η μορφή αυτών των γραφημάτων θεωρητικά είναι ακριβής αναπαράσταση των μεταβολών πίεσης στην πραγματικότητα υπάρχουν κάποιες παραπάνω, ειδικά στο αρχικό στάδιο της διαδικασίας, οι οποίες οφείλονται στο πλέγμα και την αριθμητική επίλυση του μοντέλου.

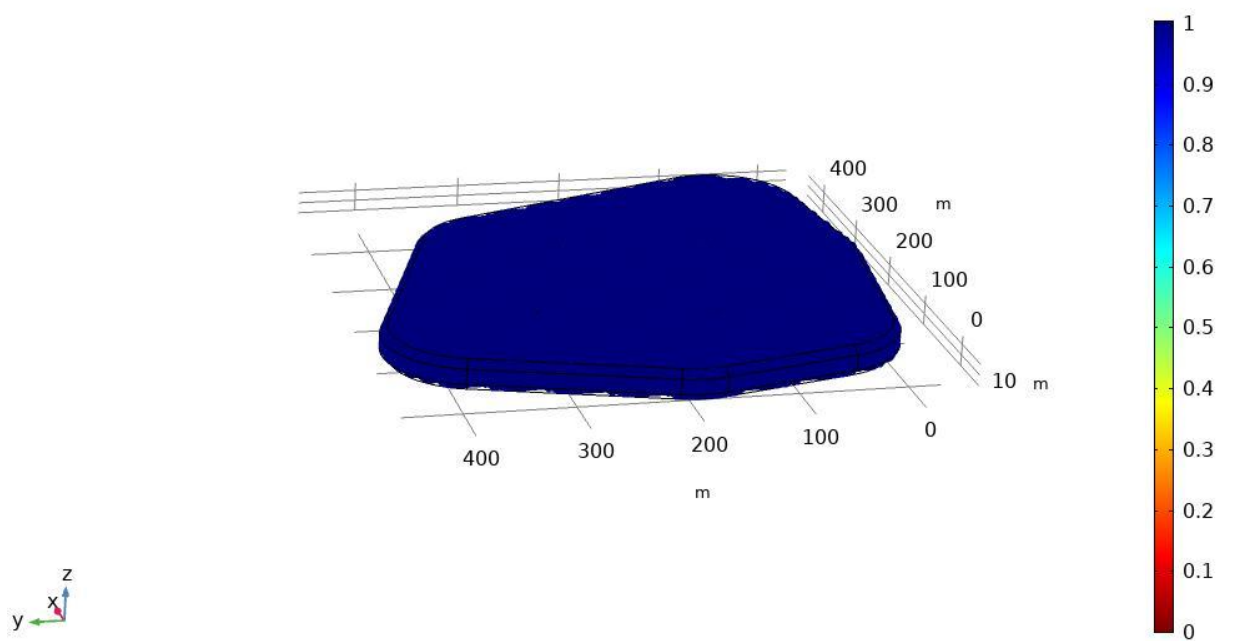


**Εικόνα 4.5: Μέση πίεση ταμιευτήρα (Egg Model)**

Είναι εμφανές από το γράφημα ότι η μέση πίεση του σχηματισμού συναρτήσει του χρόνου αυξάνεται με τον χρόνο το ίδιο συμβαίνει και στις περιοχές γύρω από τα πηγάδια παραγωγής. Επίσης, παρατηρείται σχετικά μεγάλη κλίση της καμπύλης στο αρχικό στάδιο παραγωγής πετρελαίου και ειδικά όταν το νερό φτάσει στα πρώτα πηγάδια παραγωγής, κοντά στις 500μέρες. Στο χρονικό διάστημα που απαιτείται μέχρι να υπάρξει παραγωγή από όλα τα φρεάτια η καμπύλη εξακολουθεί να είναι έντονη, βέβαια όχι τόσο όσο νωρίτερα. Επιπρόσθετα, παρατηρείται εξομάλυνση της καμπύλης στο τελικό πλέον στάδιο της παραγωγής. Καθ' όλη τη διαδικασία η μέση πίεση παραμένει χαμηλότερη από αυτήν στα φρεάτια εισαγωγής νερού φτάνοντας τη μέγιστη τιμή των 2,715MPa και η ροή πηγαίνει από την υψηλότερη προς την χαμηλότερη γεγονός τα οποία επαληθεύουν ότι και αυτό το μοντέλο είναι λογικό. Σε γενικές γραμμές η μέση πίεση διατηρείται σε υψηλό επίπεδο μέχρι το τέλος της δευτερεύουσας ανάκτησης.

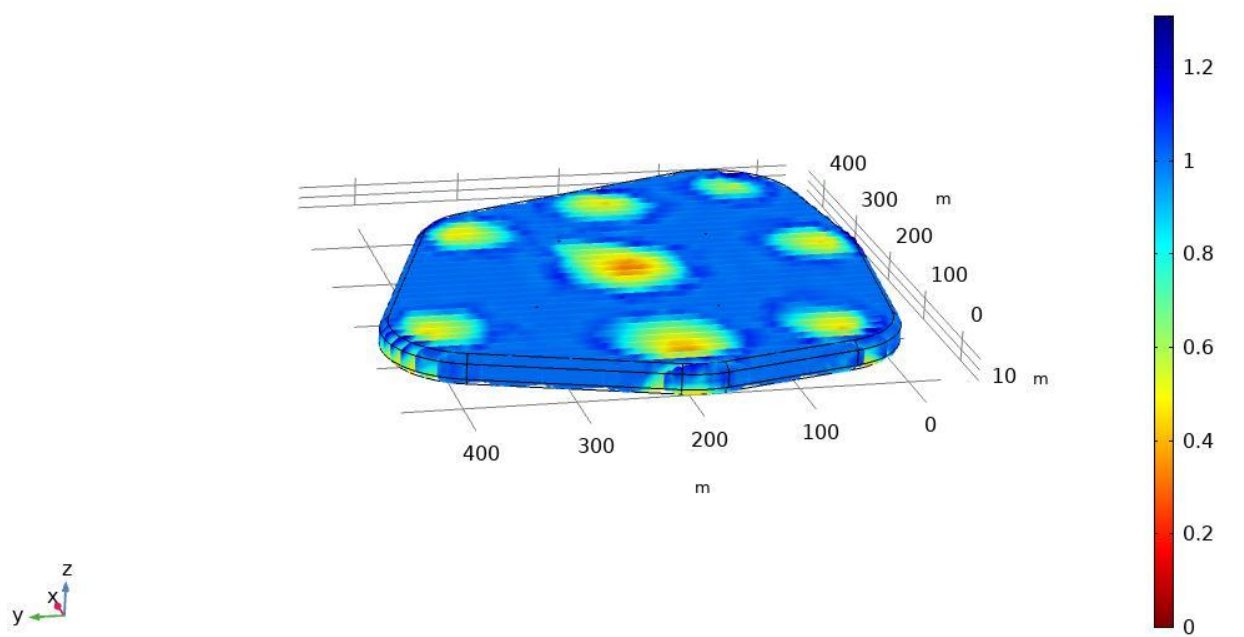
Time=0 d

Slice: Volume fraction (1)



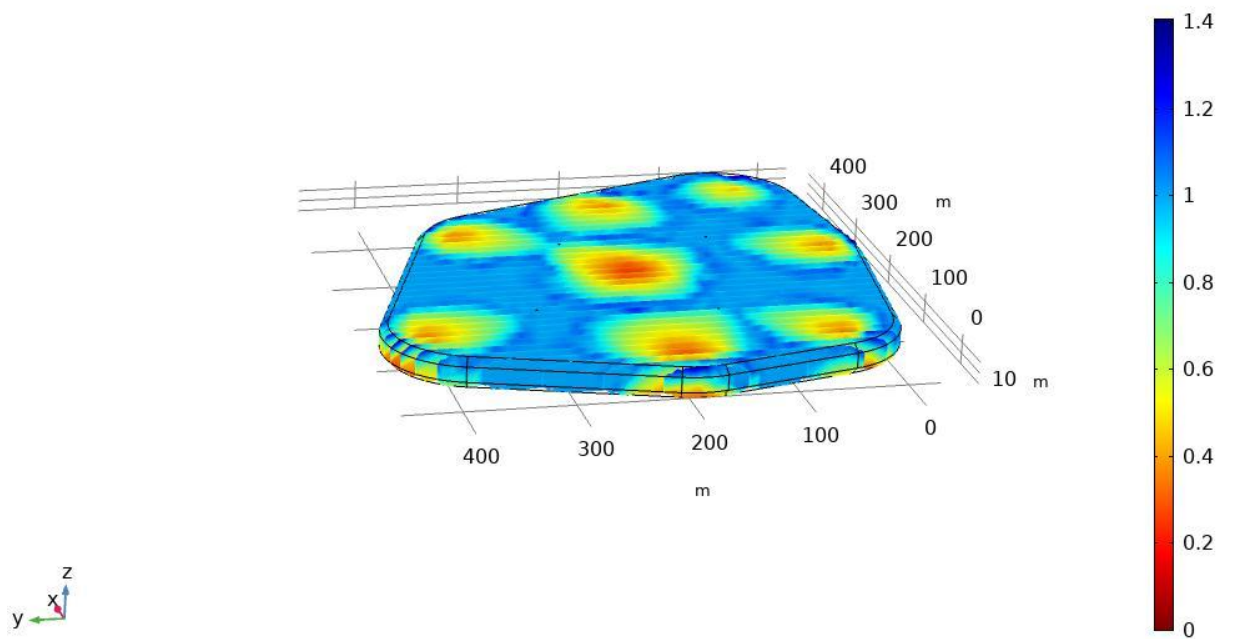
Time=350 d

Slice: Volume fraction (1)



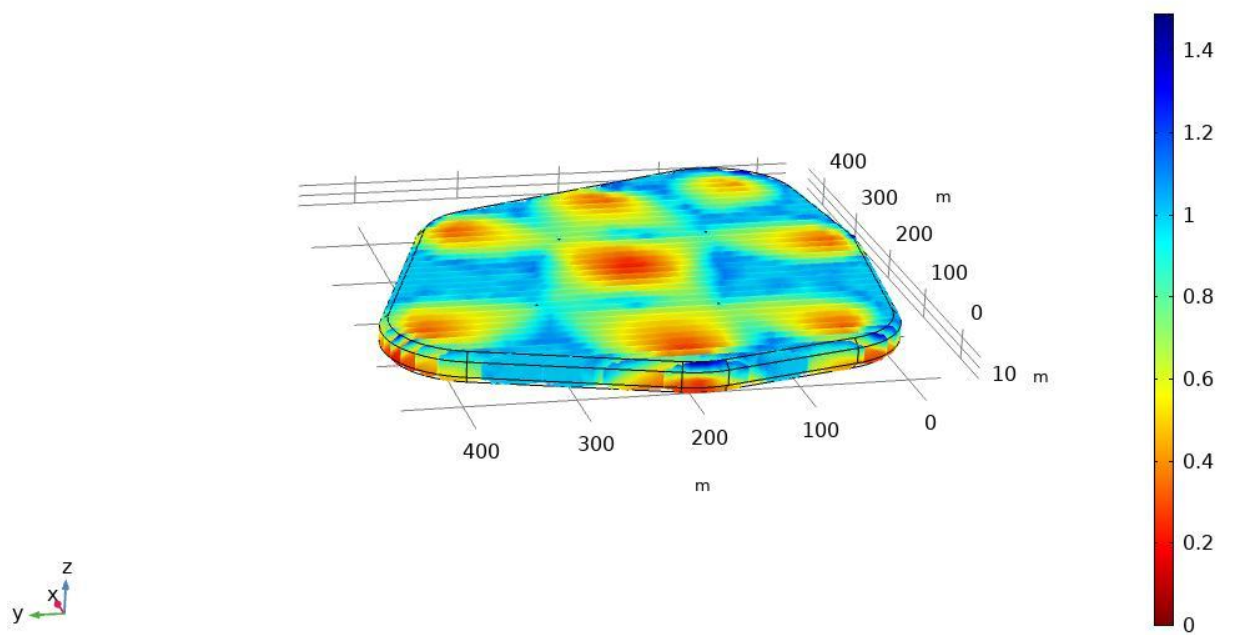
Time=620 d

Slice: Volume fraction (1)



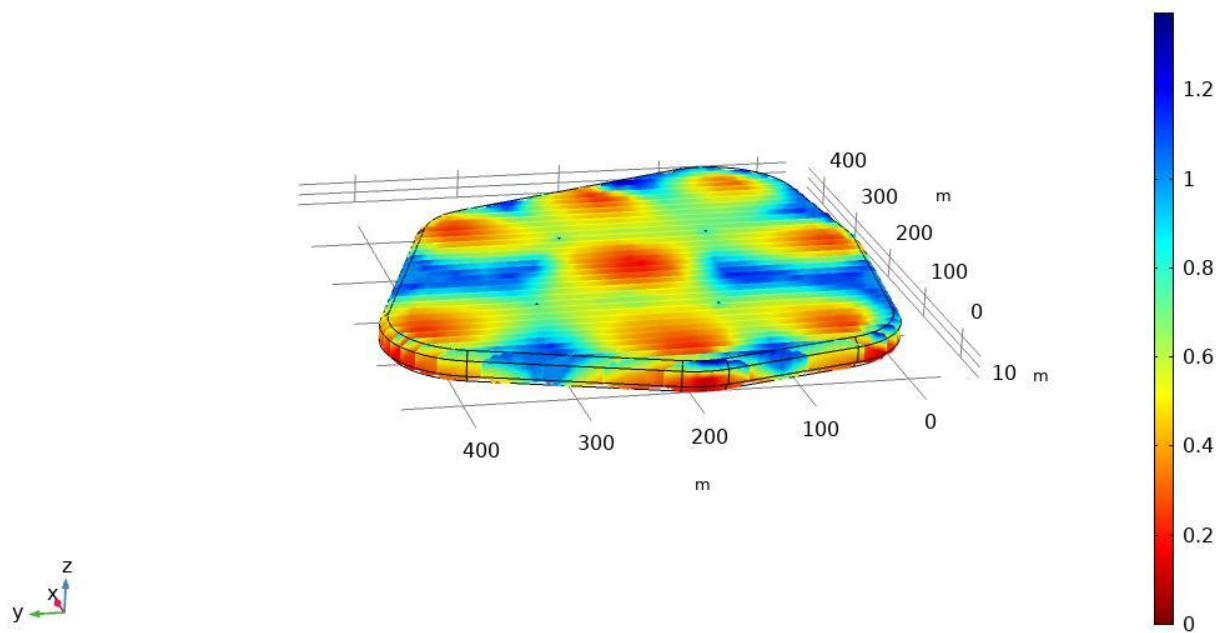
Time=1000 d

Slice: Volume fraction (1)



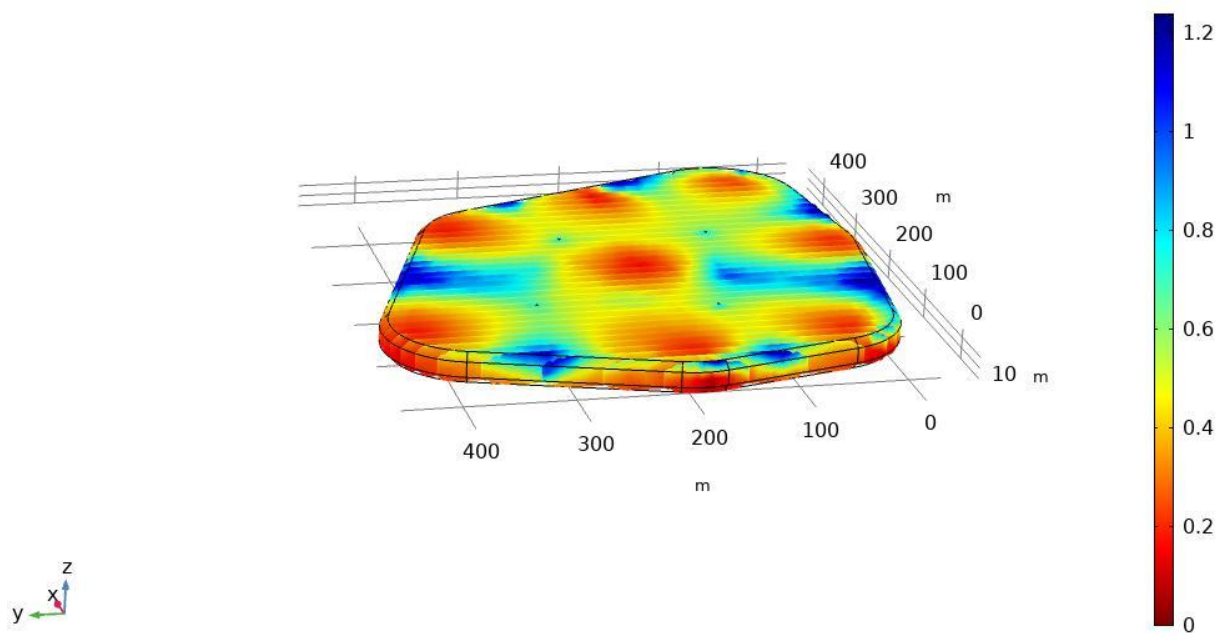
Time=2000 d

Slice: Volume fraction (1)



Time=3600 d

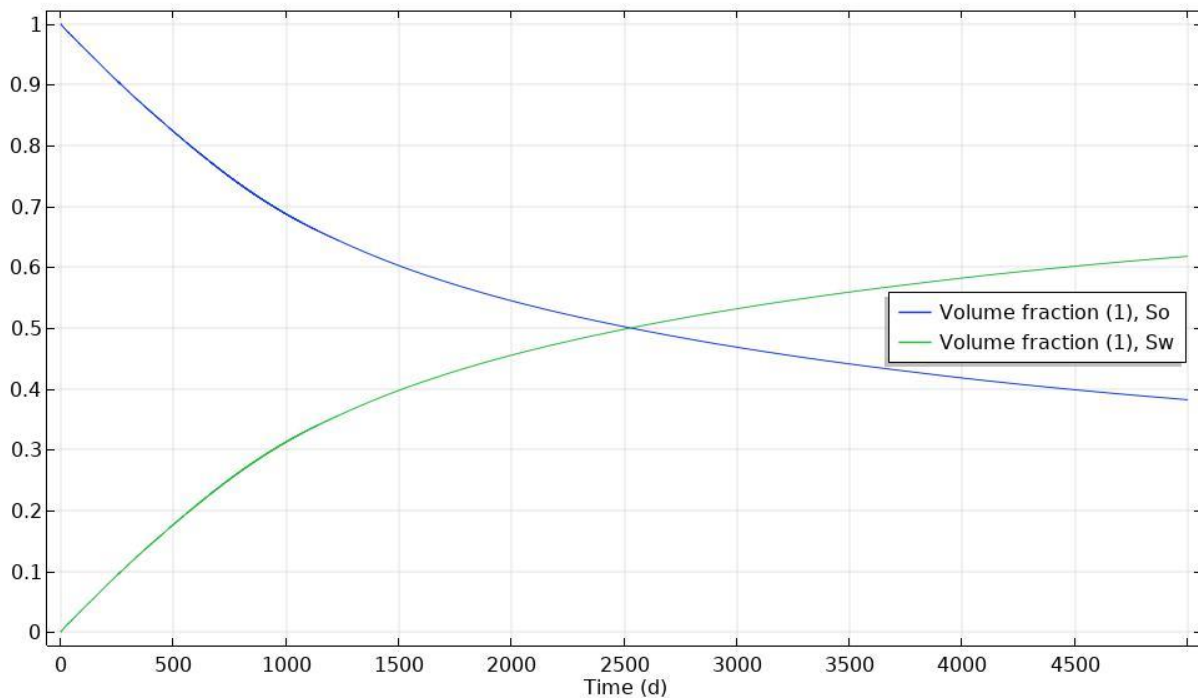
Slice: Volume fraction (1)



Εικόνες 4.6: Εξέλιξη κορεσμού της διαβρέχουσας φάσης (Egg Model)

Η εισαγωγή νερού ξεκινάει ταυτόχρονα από τα οκτώ φρεάτια εισαγωγής νερού τη χρονική στιγμή  $t=0d$ . Καθώς όλο και μεγαλύτερος όγκος νερού εισέρχεται στον ταμιευτήρα ο κορεσμός της διαβρέχουσας φάσης αυξάνεται σταδιακά στην περιοχή κοντά στα φρεάτια εισαγωγής δημιουργώντας μέτωπα σάρωσης με το χρόνο τα οποία βέβαια δεν είναι καθολικά ομοιόμορφα. Μέχρι την χρονική στιγμή  $t=620d$  παρατηρείται ότι στο πηγάδι 1 (producer) έχουν φτάσει τα «μέτωπα» ήδη από δύο πηγάδια εισαγωγής γεγονός το οποίο δεν έχει συμβεί σε κανένα άλλο σημείο του ταμιευτήρα αν και οι αποστάσεις δεν διαφέρουν ιδιαίτερα. Το συγκεκριμένο φαινόμενο είναι απόρροια του καναλιού που υπάρχει κοντά στο σημείο αυτό και επιτρέπει στα ρευστά να μετακινούνται με μεγαλύτερη ογκομετρική παροχή προς το συγκεκριμένο πηγάδι παραγωγής λόγω της υψηλότερης τιμής της διαπερατότητας στην περιοχή. Όσο η εισαγωγή νερού (waterflooding) συνεχίζεται όλο και περισσότεροι υδρογονάνθρακες εκτοπίζονται από τις περιοχές σάρωσης εξαναγκάζοντας τα ρευστά κοντά στο πηγάδι παραγωγής (επί το πλείστον υδρογονάνθρακες) να παραχθούν. Μέχρι την χρονική στιγμή  $t=1000d$  παρατηρείται ότι έχουμε παραγωγή νερού (water cut) στα φρεάτια παραγωγής προερχόμενο σχεδόν από όλα τα εισαγωγής γεγονός το οποίο είναι ένδειξη ότι ο σχεδιασμός εκτοπισμού και παραγωγής των υδρογονανθράκων του συγκεκριμένου ταμιευτήρα λειτούργησε με αρκετά μεγάλη επιτυχία. Ο κορεσμός της διαβρέχουσας αυξάνεται συνεχώς σε όλη την έκταση του ταμιευτήρα μέχρι την 3600<sup>η</sup> μέρα όπου η δευτερογενής ανάκτηση τερματίζεται. Σε αυτή την φάση στον ταμιευτήρα υπάρχει κατά κύριο λόγο νερό. Η «σάρωση» σε οριζόντια και κατακόρυφη κατεύθυνση μπορεί να επαληθευτεί οπτικά από τις εικόνες 4.6.

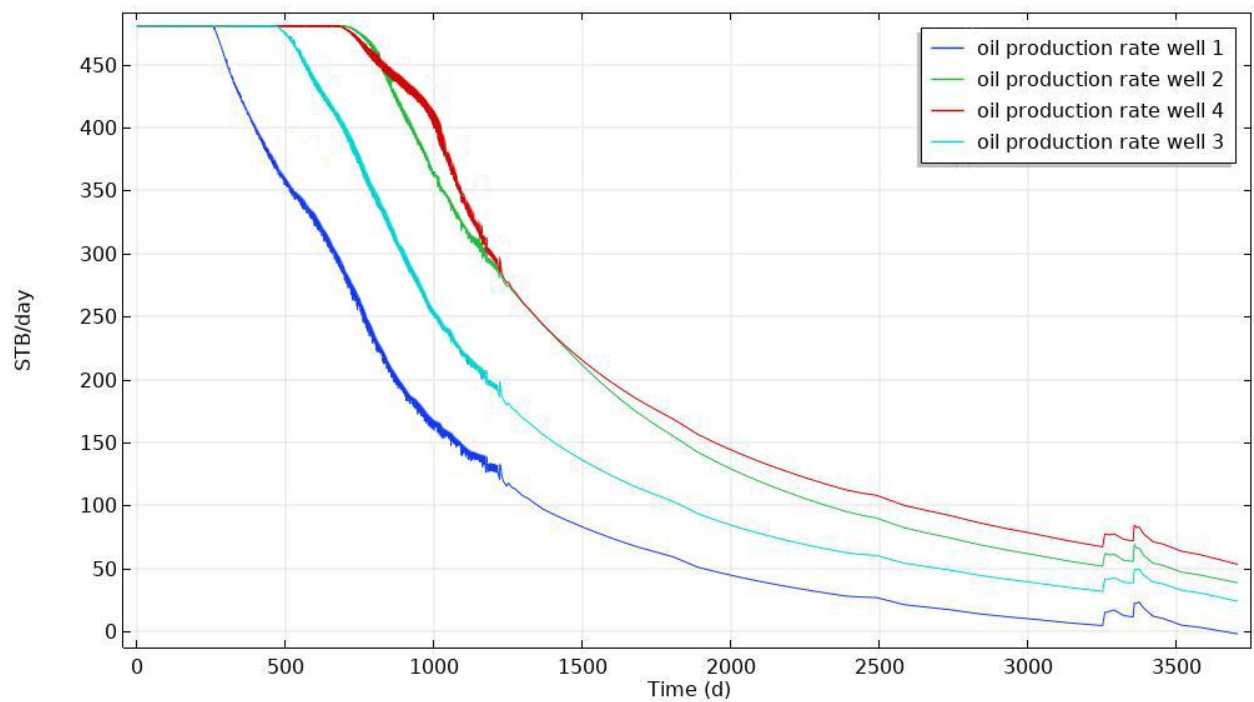
Το παρακάτω διάγραμμα αναπαριστά τον μέσω κορεσμό κάθε φάσης στον ταμιευτήρα κατά την διαδικασία εισαγωγής νερού.



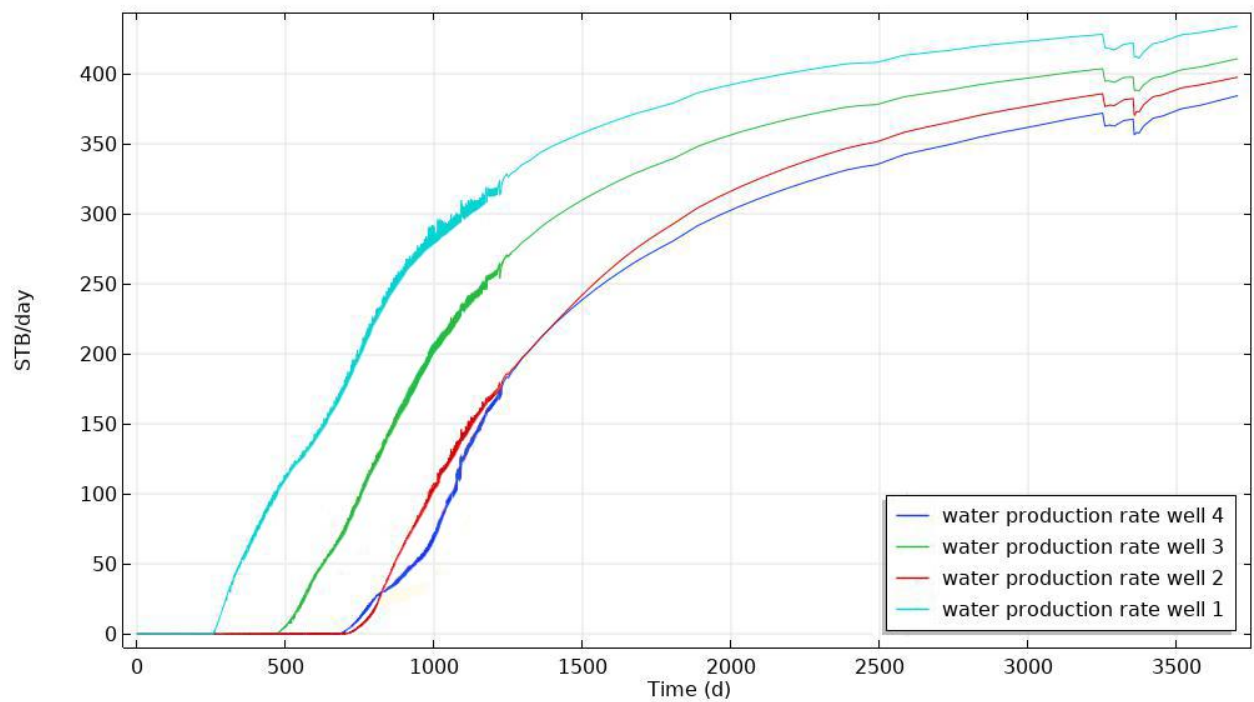
**Εικόνα 4.7: Μέσος κορεσμός φάσεων (Egg Model)**

Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας εισαγωγής νερού οι κορεσμοί των δύο φάσεων παρουσιάζουν αντίθετο ρυθμό μεταβολής όπως ήταν αναμενόμενο, καθώς η διαβρέχουσα φάση εκτοπίζει τη μη διαβρέχουσα και την αναγκάζει να παραχθεί. Στο τέλος της προσομοίωσης ο ταμιευτήρας πληρώνεται κατά το μεγαλύτερο ποσοστό με νερό γεγονός το οποίο συμφωνεί πλήρως και με τις προηγούμενες τρισδιάστατες αναπαραστάσεις.

Τελικά, υπολογίζεται η ημερήσια παραγωγή ρευστών από κάθε φρεάτιο παραγωγής σε βαρέλια (stock tank barrels, STB).



Εικόνα 4.8: Ρυθμός παραγωγής πετρελαίου φρεατίων (Egg Model)



Εικόνα 4.9: Ρυθμός παραγωγής νερού φρεατίων (Egg Model)

Παρουσιάζονται οι ρυθμοί παραγωγής ρευστών από κάθε φρεάτιο ξεχωριστά. Αυτοί έχουν αρκετά κοντινές τιμές μεταξύ τους γεγονός το οποίο μας επιβεβαιώνει ότι ο σχεδιασμός της δευτερογενούς ανάκτησης είναι ικανοποιητικός ώστε να εξασφαλίζεται ομοιογενής παραγωγή και εκτόπιση του πετρελαίου παρά την ετερογένεια του ταμιευτήρα. Αξιοπαρατήρησης είναι το γεγονός ότι το νερό αρχίζει να παράγεται (water cut) πρώτα από τα πηγάδια 1 και 3 τα οποία είναι και τα κοντινότερα στο κανάλι, ειδικά το 1, που τελικώς επιβεβαιώνει την αξιοπιστία του μοντέλου και των αριθμητικών υπολογισμών.

### 4.3 Συμπεράσματα

Στο παρόν κεφάλαιο εξετάστηκε η πολυφασική ασυμπίεστη ροή κατά τη διαδικασία δευτερογενούς ανάκτησης πετρελαίου σε έναν ετερογενή ταμιευτήρα με αρκετά πιο πολύπλοκη γεωμετρία από αυτές του προηγούμενου κεφαλαίου και περισσότερα φρεάτια εισαγωγής νερού και παραγωγής. Η δυναμική του πεδίου πίεσης και του κορεσμού της διαβρέχουσας φάσης παρουσιάστηκαν μέσω τρισδιάστατων αναπαραστάσεων, ενώ η μέση πίεση του σχηματισμού και οι ρυθμοί παραγωγής των ρευστών από κάθε πηγάδι ξεχωριστά μέσω διαγραμμάτων. Εξ αιτίας του καναλιού και της ετερογένειας του ταμιευτήρα στην συγκεκριμένη προσομοίωση παρατηρήθηκε η έντονη επίδραση της διαπερατότητας στην δυναμική των ρευστών σε οριζόντιο άξονα, καθώς και στην διαδικασία παραγωγής των ρευστών. Τα αποτελέσματα τα οποία παρουσιάζονται επιβεβαιώνουν ότι το συγκεκριμένο module του COMSOL Multiphysics για πολυφασική ροή σε πορώδες μέσω είναι ένα αξιόπιστο εργαλείο για την επίλυση ακόμη πιο σύνθετων και πολύπλοκων προβλημάτων της μηχανικής εκμετάλλευσης ταμιευτήρων.

# Κεφάλαιο 5

## Συμπεράσματα διπλωματικής εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί μια υπολογιστική μελέτη συνθηκών ροής κατά τη δευτερογενή ανάκτηση πετρελαίου από ετερογενείς και διαστρωματωμένους ταμιευτήρες πετρελαίου. Το βασικό εργαλείο που χρησιμοποιήθηκε για την υλοποίησή της είναι το module για πολυφασική ροή σε πορώδες μέσο του λογισμικού COMSOL Multiphysics. Η προσέγγιση του προβλήματος έγινε προοδευτικά σε πιο σύνθετους ταμιευτήρες. Αρχικά, έγινε μια απλή προσομοίωση με ένα φρεάτιο παραγωγής και ένα εισαγωγής νερού σε έναν ανισότροπο ταμιευτήρα πετρελαίου. Εφόσον τα αποτελέσματα ήταν ενθαρρυντικά το πρόβλημα έγινε κάπως πιο σύνθετο καθώς η δεύτερη προσομοίωση γίνεται σε έναν διαστρωματωμένο ετερογενή και ανισότροπο ταμιευτήρα με τρία διαφορετικά στρώματα. Σε αυτή την περίπτωση επίσης υπάρχει ένα φρεάτιο παραγωγής και ένα εισαγωγής νερού και τα αποτελέσματα ήταν αρκετά ικανοποιητικά. Το επόμενο και τελικό βήμα ήταν η αναπαράσταση της δομής και διεργασίας σε ένα σύγχρονο σενάριο αναφοράς της SPE (Society of Petroleum Engineering), του “Egg Model” όπου η γεωμετρία του ταμιευτήρα ήταν αρκετά σύνθετη. Στην συγκεκριμένη περίπτωση λόγω πολλών παραγόντων δεν μπόρεσε να γίνει πίστη αναπαράσταση και έγιναν κάποιες αλλαγές, έγινε δηλαδή εφαρμογή σταθερής πίεσης στα φρεάτια εισαγωγής και ρυθμού παραγωγής στα φρεάτια παραγωγής ενώ στην αρχική προσέγγιση συμβαίνει το αντίθετο. Οι γεωμετρικοί παράγοντες καθώς και τα χαρακτηριστικά των ρευστών παρ’ όλα αυτά παραμένουν σχεδόν ταυτόσημοι. Σε αυτή τη γεωμετρία έγινε και μια προσθήκη η οποία αποσκοπούσε στην εισαγωγή του παράγοντα της ετερογένειας μέσω ενός καναλιού κατά μήκος του ταμιευτήρα. Τα αποτελέσματα της

προσομοίωσης ήταν εξαιρετικά ικανοποιητικά ιδίως όσον αφορά το κομμάτι των τρισδιάστατων αναπαραστάσεων.

Η βασικότερη δυσκολία η οποία αντιμετωπίστηκε αφορούσε στην ευαισθησία της αριθμητικής επίλυσης με την επιλογή του κατάλληλου πλέγματος διακριτοποίησης του υπολογιστικού πεδίου. Κατά τη διαδικασία εκπόνησης της εργασίας παρατηρήθηκε ότι όσο πιο σύνθετο είναι το πρόβλημα τόσο μεγαλύτερη υπολογιστική ισχύς και χρόνος απαιτείται για την επίλυσή του. Αυτό συμβαίνει διότι μαζί με την πολυπλοκότητα του προβλήματος αυξάνεται και η απαιτούμενη πυκνότητα πλέγματος επίλυσης του.

Σε γενικές γραμμές μπορούμε να πούμε με βεβαιότητα ότι το COMSOL Multiphysics και η τυπική προσέγγιση πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιεί ως σχήμα διακριτοποίησης κρίνεται επαρκώς κατάλληλο για την προσομοίωση διεργασιών εισπίεσης νερού σε σύνθετες διαμορφώσεις ταμιευτήρων. Μια μελέτη με τη χρήση του module του COMSOL Multiphysics για πολυφασική ροή σε πορώδες μέσο η όποια θα περιλάμβανε και μια τρίτη φάση (αέριο) ή μια προσομοίωση που θα συμπεριελάμβανε τον παράγοντα της συμπιεστότητας συνιστώνται ως μελλοντική εργασία.

# Βιβλιογραφία

N. Βαρότσης. “Εκμετάλλευση Ταμιευτήρων”, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά, 2017.

Andery Afanasyev. The Egg Model Study, 2015

T. I. Bjørnarå and E. Aker. Comparing Equations for Two-Phase Fluid Flow in Porous Media. COMSOL Conference, (2):7, 2008.

Brennen, Christopher E. (2005). Fundamentals of Multiphase Flows, Cambridge University Press. ISBN 0521-848040.

Z. Chen. Formulations and Numerical Methods of the Black Oil Model in Porous Media. Society, 38(2):489–514, 2000.

Comsol. Subsurface Flow Module. Subsurface Flow Module, pages 1–12, 2015.

M. A. Diaz-Viera, D. A. Lopez-Falcon, A. Moctezuma-Berthier, and A. Ortiz-Tapia. COMSOL implementation of a multiphase fluid flow model in porous media. Proceedings of the COMSOL Conference, 2008.

Turgay Ertekin, J.H. Abou-Kassem and G.R. King. Basic Applied Reservoir Simulation, 2001. ISBN: 978-1-55563-089-8

Turgay Ertekin, Qian Sun, Jian Zhang. Reservoir Simulation: Problems and Solutions, 2019. ISBN: 978-1-61399-693-5

D. W. Green and G. P. Willhite. Enhanced Oil Recovery. SPE textbook series. Henry L. Doherty Memorial Fund of AIME, Society of Petroleum Engineers, 1998. ISBN 9781555630775.

[glossary.oilfield.slb.com](http://glossary.oilfield.slb.com)

K. H. Huebner, D. L. Dewhirst, D. E. Smith, and T. G. Byrom. THE FINITE ELEMENT METHOD FOR ENGINEERS, 4TH ED. Wiley India Pvt. Limited, 2008. ISBN 9788126516407.

Jansen JD, Fonseca RM, Kahrobaei S, Siraj MM, Van Essen G, Van den Hof PMJ. 2013. The egg model – data files. Version 1.0. 3TU.Datacentrum, The Netherlands. Doi:[10.4121/uuid:916c86cd-3558-4672-829a-105c62985ab2](https://doi.org/10.4121/uuid:916c86cd-3558-4672-829a-105c62985ab2)

Jansen J.D. et al. 2014 The egg model: a geological ensemble for reservoir simulation. Geosci. Data J. 1: 192-195. Doi:[10.1002/gdj3.21](https://doi.org/10.1002/gdj3.21)

O. Meshioye, E. Mackay, E. Ekeoma, and C. Martinez. Optimization of Waterflooding Using Smart Well Technology, 2010.

P. Ogbeiwi, Y. Aladeitan, and D. Udebhulu. An approach to waterflood optimization: case study of the reservoir X. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 2017. ISSN 2190-0558. Doi: [10.1007/s13202-017-0368-5](https://doi.org/10.1007/s13202-017-0368-5).

Tarek Ahmed. *Reservoir Engineering Handbook*, Chapter 6- Fundamentals of Reservoir Fluid Flow, 2000. ISBN 978-1-85617-803-7

Van Essen GM, Zandvliet MJ, Van den Hof PMJ, Bosgra OH, Jansen JD. 2009. Robust water flooding optimization of multiple geological scenarios. *SPE Journal* 14(1): 202– 210, doi:[10.2118/102913-PA](https://doi.org/10.2118/102913-PA)

X. Zhang. *Upscaling of the Two-Phase Flows in Petroleum Reservoirs*. Number September. 2011. ISBN 9788792481542.

[petrowiki.spe.org/Primary\\_drive\\_mechanisms](https://petrowiki.spe.org/Primary_drive_mechanisms)

# Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1.1: ταμιευτήρας πετρελαίου με κινητήριο μηχανισμό παραγωγής αυτόν του αερίου εν διαλύσει (solution gas drive) (Πηγή: Petrol wiki)

Εικόνα 1.2: ταμιευτήρας πετρελαίου με κινητήριο μηχανισμό παραγωγής αυτόν της υπερκείμενης ζώνης αερίου (gas cap drive) ( Πηγή: Petrol wiki)

Εικόνα 1.3: ταμιευτήρας πετρελαίου με κινητήριο μηχανισμό παραγωγής αυτόν της φυσικής εισροής νερού (water drive) ( Πηγή: Petrol wiki)

Εικόνα 3.1: Γεωμετρία ταμιευτήρα, πηγάδι παραγωγής (μοντέλο χωρίς διαστρωμάτωση)

Εικόνα 3.2: Γεωμετρία ταμιευτήρα, πηγάδι εισαγωγής νερού (μοντέλο χωρίς διαστρωμάτωση)

Εικόνες 3.3: Πεδίο πίεσης, απεικονίσεις σε “φέτες” (μοντέλο χωρίς διαστρωμάτωση)

Εικόνα 3.4: Μέση πίεση ταμιευτήρα (μοντέλο χωρίς διαστρωμάτωση)

Εικόνα 3.5: Γράφημα διανυσμάτων ταχυτήτων κατά την 10000<sup>η</sup> μέρα (μοντέλο χωρίς διαστρωμάτωση)

Εικόνες 3.6: Εξέλιξη κορεσμού της διαβρέχουσας φάσης (μοντέλο χωρίς διαστρωμάτωση)

Εικόνα 3.7: Μέσος κορεσμός φάσεων (μοντέλο χωρίς διαστρωμάτωση)

Εικόνα 3.8: Ρυθμός παραγωγής πετρελαίου (μοντέλο χωρίς διαστρωμάτωση)

Εικόνα 3.9: Ρυθμός παραγωγής νερού (μοντέλο χωρίς διαστρωμάτωση)

Εικόνα 3.10: Γεωμετρία ταμιευτήρα, πηγάδι παραγωγής (μοντέλο με διαστρωμάτωση)

Εικόνα 3.11: Γεωμετρία ταμιευτήρα, πηγάδι εισαγωγής νερού(μοντέλο με διαστρωμάτωση)

Εικόνες 3.12: Πεδίο πίεσης, απεικόνιση σε “φέτες” (μοντέλο με διαστρωμάτωση)

Εικόνα 3.13: Μέση πίεση ταμιευτήρα (μοντέλο με διαστρωμάτωση)

Εικόνα 3.14: Γράφημα διανυσμάτων ταχυτήτων κατά την 20000<sup>η</sup> μέρα (μοντέλο με διαστρωμάτωση)

Εικόνες 3.15: Εξέλιξη κορεσμού της διαβρέχουσας φάσης (μοντέλο με διαστρωμάτωση)

Εικόνα 3.16: Μέσος κορεσμός φάσεων (μοντέλο με διαστρωμάτωση)

Εικόνα 3.17: Ρυθμός παραγωγής πετρελαίου (μοντέλο με διαστρωμάτωση)

Εικόνα 3.18: Ρυθμός παραγωγής νερού (μοντέλο με διαστρωμάτωση)

Εικόνα 4.1: Γεωμετρία ταμιευτήρα, πηγάδια παραγωγής (Egg Model)

Εικόνα 4.2: Γεωμετρία ταμιευτήρα, πηγάδια εισαγωγής νερού (Egg Model)

Εικόνα 4.3: Διαπερατότητα ταμιευτήρα (Egg Model)

Εικόνες 4.4: Πεδίο πίεσης, απεικονίσεις σε “φέτες” (Egg Model)

Εικόνα 4.5: Μέση πίεση ταμιευτήρα (Egg Model)

Εικόνες 4.6: Εξέλιξη κορεσμού της διαβρέχουσας φάσης (Egg Model)

Εικόνα 4.7: Μέσος κορεσμός φάσεων (Egg Model)

Εικόνα 4.8: Ρυθμός παραγωγής πετρελαίου φρεατίων (Egg Model)

Εικόνα 4.9: Ρυθμός παραγωγής νερού φρεατίων (Egg Model)

# Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 3.1: Διαπερατότητα του σχηματισμού στους άξονες  $x$ ,  $y$ ,  $z$  για μοντέλο ασυμπίεστης πολυφασικής ροής χωρίς διαστρωμάτωση.

Πίνακας 3.2: Παράμετροι για το μοντέλο ασυμπίεστης πολυφασικής ροής χωρίς διαστρωμάτωση

Πίνακας 3.3: Πίεση για το μοντέλο ασυμπίεστης πολυφασικής ροής χωρίς διαστρωμάτωση

Πίνακας 3.4: Διαπερατότητα του σχηματισμού στους άξονες  $x$ ,  $y$ ,  $z$  για μοντέλο ασυμπίεστης πολυφασικής ροής με διαστρωμάτωση.

Πίνακας 3.5: Παράμετροι για το μοντέλο ασυμπίεστης πολυφασικής ροής με διαστρωμάτωση

Πίνακας 3.6: Πίεση για το μοντέλο ασυμπίεστης πολυφασικής ροής με διαστρωμάτωση

Πίνακας 4.1: Παράμετροι για το μοντέλο ασυμπίεστης πολυφασικής ροής “Egg Model”

Πίνακας 4.2: Πίεση για το μοντέλο ασυμπίεστης πολυφασικής ροής “Egg Model”