



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

Διπλωματική εργασία Γεωργίου Καμπόλη

Μελέτη της επίδρασης των μεθόδων δημιουργίας Μοντέλων Μαύρου Πετρελαίου (Black Oil Tables) επί των υπολογισμών μοντέλων προσομοίωσης ροής πετρελαϊκών ρευστών (reservoir simulators) σε υπόγειους ταμειευτήρες.

Εξεταστική επιτροπή:

Καθ. Βαρότσης Νικόλαος (επιβλέπων)

Καθ. Πασαδάκης Νικόλαος

Δρ. Γαγάνης Βασίλειος

Χανιά, 2017

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές ευχαριστίες και την βαθιά εκτίμησή μου στον επιβλέποντα καθηγητή κο Νικόλαο Βαρότση για την υποστήριξη και καθοδήγησή του, καθώς και για την κατανόηση που επέδειξε στις καθυστερήσεις λόγω των δυσμενών συνθηκών που αντιμετωπίστηκαν εκ μέρους μου.

Οφείλω δε ένα πολύ μεγάλο «ευχαριστώ» στον Διδάκτορα της σχολής κο Βασίλειο Γαγάνη για τις συμβουλές του, την καθοδήγησή του και την υπομονή του καθ' όλη την διάρκεια της εκπόνησης της παρούσης εργασίας.

Ακόμη, θέλω να ευχαριστήσω τον καθηγητή κο Νικόλαο Πασαδάκη, για την συμμετοχή του στην εξεταστική επιτροπή.

Επίσης, θέλω να ευχαριστήσω και τα τρία μέλη της εξεταστικής επιτροπής, γιατί εκτός του να μου μεταλαμπαδεύσουν γνώσεις, φρόντισαν να αναπτύξουν την κριτική μου ικανότητα, «ακονίζοντας» τον τρόπο σκέψης μου.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τον πατέρα μου και τα αγαπημένα μου πρόσωπα Λυδία Χαν, Κοσμά Αθανασιάδη, Νίκο Γεωργαντά και Αλέξανδρο Κρητικό για την αμέριστη συμπαράστασή τους.

Καμπόλης Γεώργιος

Περίληψη

Είναι γνωστό ότι οι περισσότεροι χειριστές λογισμικού προσομοίωσης ταμειυτήρων (reservoir simulation) προτιμούν τις προσεγγίσεις τύπου μαύρου πετρελαίου (Black Oil model ή Modified Black Oil model), όταν αυτές είναι εφαρμόσιμες, έναντι της προσέγγισης πλήρους σύστασης (Fully Compositional) καθόσον η δεύτερη απαιτεί σημαντικά περισσότερο χρόνο CPU κατά την εκτέλεση της προσομοίωσης. Για τη δημιουργία των Black Oil Tables (BOT) απαιτείται η εκπόνηση μελέτης PVT με διαδικασίες όπως της μελέτης σταθερής μάζας (Constant Composition Expansion, CCE) και διαφορικής εξάτμισης (Differential Vaporization, DV).

Σήμερα στην βιομηχανία πετρελαίου χρησιμοποιείται ως επί το πλείστον μέθοδοι BOT βασισμένες στην διαδικασία της διαφορικής εξάτμισης και τροποποιημένες βάσει των αποτελεσμάτων τεστ διαχωριστήρα (separator test), ή ενίοτε, απευθείας στα αποτελέσματα της διαφορικής εξάτμισης.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζονται δύο ρευστά διαφορετικής πτητικότητας («μαύρου» και πτητικού πετρελαίου) για τα οποία αναπτύσσονται μοντέλα Fully Compositional αλλά και Black Oil Tables με τις πλέον δημοφιλείς μεθόδους που απαντώνται στην βιβλιογραφία και χρησιμοποιούνται στην βιομηχανία.

Συγκεκριμένα, αφού αναπτύχθηκε το Fully Compositional μοντέλο για κάθε ρευστό, προσομοιώθηκαν οι διαδικασίες DV, σύνθετης διαφορικής εξάτμισης (Differential Vaporization Composite, DVC) και σύνθετης μελέτης σταθερής μάζας (Constant Composition Expansion Composite, CCEC) με χρήση του λογισμικού PVTP της εταιρείας Petroleum Experts. Στην συνέχεια αναπτύχθηκαν για κάθε ρευστό 5 Black Oil Tables χρησιμοποιώντας τις κάτωθι μεθόδους:

- απευθείας από DV
- από τον συνδυασμό DV και separator test κατά Dake
- από τον συνδυασμό DV και separator test κατά Al Mahroun
- από την DVC
- και από την CCEC

Έπειτα, προσομοιώθηκε το ίδιο σενάριο εκμετάλλευσης ταμειυτήρα χρησιμοποιώντας τον προσομοιωτή ταμειυτήρων Reveal της εταιρείας Petroleum Experts τόσο με το Fully Compositional μοντέλο, όσο και με τα 5 διαφορετικά BOT, και συγκρίθηκαν τα δεδομένα παραγωγής που προέκυψαν.

Παρατηρήθηκε πως η ανάγκη μετάβασης από τις απλές προσεγγίσεις (Dake & Al Mahroun) στις πιο σύνθετες (DVC & CCEC) αυξάνει με την πτητικότητα του πετρελαίου, καθώς στο ρευστό χαμηλής πτητικότητας όλες οι μέθοδοι πλην της DV απέδωσαν παρόμοια αποτελέσματα.

Οι μέθοδοι διαφοροποιούνται σημαντικά στο ρευστό υψηλής πτητικότητας, με την καλύτερη προσέγγιση, ως προς τα αποτελέσματα της μεθόδου πλήρους σύστασης, να

παρέχεται από την μέθοδο BOT βάσει της CCEC και να ακολουθεί η μέθοδος BOT βάσει DVC, ενώ η μέθοδος BOT βάσει της DV υστερεί σημαντικά σε όλες τις περιπτώσεις.

Τα αποτελέσματα δείχνουν πως η διαδικασία που προσεγγίζει καλύτερα τις συστάσεις των φάσεων που ισορροπούν κατά την διάρκεια παραγωγής σε έναν ταμιευτήρα είναι η μέθοδος που βασίζεται στα δεδομένα της μελέτης σταθερής μάζας και όχι η της διαφορικής εξάτμισης όπως προτείνεται συχνά στην βιβλιογραφία.

Επίσης φάνηκε η αδυναμία όλων των μεθόδων Black Oil στο να προσεγγίσουν επαρκώς την δημιουργία μετώπου ζώνης αερίου που προέβλεψε το fully compositional μοντέλο, επιβεβαιώνοντας τα στοιχεία της βιβλιογραφίας.

Πίνακας Περιεχομένων

1	Εισαγωγή	10
1.1	Γενικά περί υδρογονανθράκων	10
1.2	Χημική σύσταση και ταξινόμηση	10
1.2.1	Υδρογονάνθρακες	11
1.2.2	Ετεροσυστατικά	13
1.3	Ταξινόμηση	15
1.3.1	Διαγράμματα Πίεσης - Θερμοκρασίας	16
1.3.2	Ξηρό αέριο (Dry Gas)	18
1.3.3	Υγρό αέριο (Wet Gas)	19
1.3.4	Αέριο συμπύκνωμα (Gas Condensate)	19
1.3.5	Πτητικό πετρέλαιο (Volatile Oil)	20
1.3.6	Μαύρο πετρέλαιο (Black Oil)	21
1.4	Γένεση Υδρογονανθράκων	22
1.5	Δημιουργία ταμιευτήρων	24
1.5.1	Μετανάστευση	24
1.5.2	Ταμιευτήρες	24
1.6	Έρευνα και Αξιολόγηση Ταμιευτήρων	25
1.7	Κινητήριοι μηχανισμοί παραγωγής ταμιευτήρων	26
1.7.1	Μηχανισμός αερίου εν διαλύσει (solution gas drive)	26
1.7.2	Μηχανισμός υπερκείμενης ζώνης αερίου (gas cap drive)	27
1.7.3	Μηχανισμός υποκείμενης υδατοφόρας ζώνης (water drive)	27
1.7.4	Σύνθετος κινητήριοι μηχανισμός (combination drive)	28
2	Προσομοίωση Παραγωγής Ταμιευτήρων Πετρελαίου	29
2.1	Σε τι εξυπηρετεί η προσομοίωση;	29
2.2	Ανάπτυξη μοντέλων προσομοίωση ταμιευτήρα	30
2.3	Είδη μοντέλων προσομοίωσης	31
2.3.1	Γιατί υπάρχουν πολλά μοντέλα;	31
2.3.2	Black Oil Model	32
2.3.3	Fully Compositional Model	33
2.3.4	Μοντέλα εξειδικευμένων εφαρμογών	34

3	Μελέτες PVT	45
3.1	Ανάγκη των μελετών.....	45
3.2	Περιγραφή πειραματικών διαδικασιών και μεθόδων	46
3.2.1	Μελέτη σταθερής μάζας (CCE).....	46
3.2.2	Μελέτη διαφορικής εξάτμισης (DV)	47
3.2.3	Τεστ διαχωριστήρα (Separator Test).....	48
3.3	Εκπόνηση Σύνθετων Μελετών (Composite).....	49
3.3.1	Λόγος ύπαρξης σύνθετων μελετών.....	49
3.3.2	Περιγραφή σύνθετων μελετών	49
3.4	Υπολογιστικές προσεγγίσεις σύνθετων μελετών	51
3.5	Επιλογή μελέτης για ανάκτηση δεδομένων	52
4	Ανάπτυξη των απαιτούμενων μοντέλων	53
4.1	Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε	53
4.2	Τα ρευστά που χρησιμοποιήθηκαν	53
4.3	Μεθοδολογία ανάπτυξης EOS μοντέλου και BOTs	55
4.4	Περιγραφή ταμιευτήρα	57
4.5	Γεωτρήσεις, σχέδιο εκμετάλλευσης και αρχικές συνθήκες	58
5	Αποτελέσματα και σύγκριση μεθόδων	60
5.1	Αποτελέσματα θερμοδυναμικού μοντέλου και υπολογιστικών προσεγγίσεων ανάπτυξης BOTs	60
5.1.1	Θερμοδυναμικά αποτελέσματα C1_70.....	60
5.1.2	Θερμοδυναμικά αποτελέσματα C1_30.....	62
5.2	Ερμηνεία προσομοιώσεων παραγωγής ταμιευτήρα από το Fully Compositional μοντέλο.....	64
5.2.1	Περίπτωση ρευστού C1_70	65
5.2.2	Περίπτωση ρευστού C1_30	71
5.3	Δεδομένα από τις προσομοιώσεις παραγωγής ταμιευτήρα με τις διάφορες μεθόδους περιγραφής των ιδιοτήτων των ρευστών	74
5.3.1	Περίπτωση ρευστού C1_70	74
5.3.2	Συμπεράσματα για την περίπτωση ρευστού C1_70	78
5.3.3	Περίπτωση ρευστού C1_30	81

5.3.4	Συμπεράσματα για την περίπτωση ρευστού C1_30.....	82
6	Γενικά συμπεράσματα και προτάσεις.....	83
7	Προτάσεις για περαιτέρω μελέτη	84

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1:	Κατανομή Στοιχείων Υδρογονανθράκων (Speight, 2014)	11
Πίνακας 2:	Άτομα Άνθρακα και Ισομέρεια (Speight, 2014)	11
Πίνακας 3:	Τυπικές κατανομές συστατικών διαφόρων τύπων πετρελαίου (Whitson, et al., 2000)	16
Πίνακας 4:	Υπολογιστικό κόστος ενδεικτικών σεναρίων εκμετάλλευσης	31
Πίνακας 5:	Υπολογιστικό κόστος και αξιοποίηση μοντέλων	31
Πίνακας 6:	Σύσταση και ιδιότητες των υπό μελέτη ρευστών	54
Πίνακας 7:	Ιδιότητες συστατικών ρευστών	54
Πίνακας 8:	Χρήσιμα στοιχεία των υπό μελέτη ρευστών.....	55
Πίνακας 9:	Separator train που χρησιμοποιήθηκε	56
Πίνακας 10:	BOT από CCEC για το ρευστό C1_70	57
Πίνακας 11:	Δεδομένα κορεσμού και διαπερατότητας ταμιευτήρα	58
Πίνακας 12:	Αρχικές συνθήκες ταμιευτήρα και κριτήρια πίεσης γεωτρήσεων.....	58
Πίνακας 13:	Σύγκριση τιμών BOT από DVC και CCEC για το ρευστό C1_70	62
Πίνακας 14:	Σύγκριση τιμών BOT από DVC και CCEC για το ρευστό C1_30	64
Πίνακας 15:	Σύγκριση αθροιστικών ιδιοτήτων και Water Cut μεταξύ CCEC, DVC & Compositional για C1_70.....	78
Πίνακας 16:	Ποσοστό παραγωγής πετρελαίου που οφείλεται σε συμπύκνωμα αέριας φάσης για το C1_70.....	80

Κατάλογος Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1:	Ενδεικτικό διάγραμμα P vs. T για ένα συστατικό (Danesh, 1998).....	16
Διάγραμμα 2:	Τυπικό διάγραμμα P vs. T για πετρελαϊκό ρευστό (Tarek, 2006)	17
Διάγραμμα 3:	Ενδεικτικό διάγραμμα P vs. T για ξηρό αέριο (Tarek, 2006)	18
Διάγραμμα 4:	Ενδεικτικό διάγραμμα P vs. T για υγρό αέριο (Tarek, 2006)	19
Διάγραμμα 5:	Ενδεικτικό διάγραμμα P vs. T για αέριο συμπύκνωμα (Danesh, 1998)....	19
Διάγραμμα 6:	Ενδεικτικό διάγραμμα P vs. T για πτητικό πετρέλαιο (Danesh, 1998)	20
Διάγραμμα 7:	Ενδεικτικό διάγραμμα P vs. T για μαύρο πετρέλαιο (Danesh, 1998)	21
Διάγραμμα 8:	Φάκελος φάσεων των υπό μελέτη ρευστών	55
Διάγραμμα 9:	Rs vs. P όλων των BOTs για το ρευστό C1_70	60
Διάγραμμα 10:	Bo vs. P όλων των BOTs για το ρευστό C1_70.....	60

Διάγραμμα 11: Σύγκριση Rs από CCEC & DVC για το ρευστό C1_70.....	61
Διάγραμμα 12: Σύγκριση Bo από CCEC & DVC για το ρευστό C1_70	61
Διάγραμμα 13: Rs vs. P όλων των BOTs για το ρευστό C1_70.....	62
Διάγραμμα 14: Bo vs. P όλων των BOTs για το ρευστό C1_30	63
Διάγραμμα 15: Σύγκριση Rs από CCEC & DVC για το ρευστό C1_30.....	63
Διάγραμμα 16: Σύγκριση Rs από CCEC & DVC για το ρευστό C1_30.....	64
Διάγραμμα 17: Μέση πίεση και κορεσμός αερίου στο σύστημα με C1_70.....	65
Διάγραμμα 18: Ρυθμοί παραγωγής ανά φάση για το σύστημα με C1_70.....	65
Διάγραμμα 19: Σύγκριση ρυθμών έγχυσης νερού και παραγωγής πετρελαίου σε σχέση με τον μέσο κορεσμό αερίου στο σύστημα με C1_70	67
Διάγραμμα 20: Ρυθμοί παραγωγής υγρών και water cut για το σύστημα με C1_70.....	68
Διάγραμμα 21: Κορεσμός αερίου και GOR για το σύστημα με C1_70.....	68
Διάγραμμα 22: Πίεση & Rs κοντά στην γεώτρηση έγχυσης και παραγωγής στο σύστημα με C1_70.....	70
Διάγραμμα 23: Rs & κορεσμός σε αέριο, κοντά στην γεώτρηση έγχυσης και παραγωγής στο σύστημα με C1_70	70
Διάγραμμα 24: Μέση πίεση και βαθμός κορεσμού στο σύστημα με C1_30	71
Διάγραμμα 25: Αθροιστική παραγωγή όλων των φάσεων στο σύστημα με C1_30.....	71
Διάγραμμα 26: Αθροιστική παραγωγή όλων των μοντέλων για C1_70.....	74
Διάγραμμα 27: Ρυθμοί παραγωγής πετρελαίου όλων των μοντέλων για C1_70... ..	75
Διάγραμμα 28: Ρυθμοί παραγωγής πετρελαίου από CCEC & DVC για C1_70	76
Διάγραμμα 29: Σύγκριση μέσης πίεσης ταμιευτήρα από CCEC, DVC & Compositional για C1_70	76
Διάγραμμα 30: Σύγκριση μέσου κορεσμού σε αέριο από CCEC, DVC & Compositional για C1_70	77
Διάγραμμα 31: Σύγκριση GOR από CCEC, DVC & Compositional για C1_70.....	77
Διάγραμμα 32: Αθροιστική παραγωγή όλων των μοντέλων για C1_70.....	81
Διάγραμμα 33: Ρυθμοί παραγωγής πετρελαίου όλων των μοντέλων για C1_30... ..	81
Διάγραμμα 34: Σύγκριση μέσης πίεσης ταμιευτήρα όλων των μοντέλων για C1_30.....	82

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1: Κύριες ομάδες υδρογονανθράκων σε ταμιευτήρες (Danesh, 1998)	12
Σχήμα 2: Σύνοψη υδρογονανθράκων σε πετρελαϊκά ρευστά (Whitson, et al., 2000).....	13
Σχήμα 3: Παράδειγμα ασφατενίου C ₇₉ (Whitson, et al., 2000)	14
Σχήμα 4: Τριγωνικό σύστημα ταξινόμησης υδρογονανθράκων	15

Σχήμα 5: Συσχετισμός βάθους με την δημιουργία πετρελαίου (Selley, et al., 2015).	22
Σχήμα 6: Πορεία της οργανικής ύλης κατά την γένεση πετρελαίου & αερίου (Selley, et al., 2015).....	23
Σχήμα 7: Αναπαράσταση τυπικών παγίδων υδρογονανθράκων (Shamsi, 2013)....	25
Σχήμα 8: Αναπαράσταση ενός κελιού σε Black Oil Model.....	32
Σχήμα 9: Αναπαράσταση αρχής λειτουργίας Black Oil Model	33
Σχήμα 10: Αναπαράσταση αρχής λειτουργίας modified Black Oil Model	33
Σχήμα 11: Αναπαράσταση ενός κελιού σε Fully Compositional Model.....	34
Σχήμα 12: Τμήμα διακριτοποιημένου «μονοδιάστατου» ταμιευτήρα	35
Σχήμα 13: Σχηματική αναπαράσταση του υπό μελέτη ταμιευτήρα (Kleppe, 2017)	39
Σχήμα 14: Σχηματική αναπαράσταση κελιού μελέτης σταθερής μάζας (Tarek, 2006).....	46
Σχήμα 15: Σχηματική αναπαράσταση κελιού μελέτης διαφορικής εξάτμισης (Tarek, 2006).....	47
Σχήμα 16: Αναπαράσταση της διαδικασίας μελέτης DVC (Gaganis, et al., 2016)...	50
Σχήμα 17: Αναπαράσταση της διαδικασίας μελέτης CCEC (Gaganis, et al., 2016) .	50
Σχήμα 18: Αναπαράσταση του μοντέλου ταμιευτήρα	59
Σχήμα 19: Κελιά προς σύγκριση ιδιοτήτων Rs και κορεσμού σε αέριο στο σύστημα με C1_70	69
Σχήμα 20: Κατανομή του Rs στον χώρο του ταμιευτήρα την τελευταία μέρα παραγωγής, για το σύστημα με C1_30	72
Σχήμα 21: Κατανομή του κορεσμού του αερίου στον χώρο του ταμιευτήρα την τελευταία μέρα παραγωγής, για το σύστημα με C1_30.....	73
Σχήμα 22: Αναπαράσταση της κατανομής του CGR στον χώρο από το Compositional μοντέλο, για t=1000days	79
Σχήμα 23: Αναπαράσταση της κατανομής του CGR στον χώρο από το Compositional μοντέλο, για t=1510days	79
Σχήμα 24: Αναπαράσταση της κατανομής του CGR στον χώρο από το Compositional μοντέλο, για t=2320days	80

1 Εισαγωγή

1.1 Γενικά περί υδρογονανθράκων

Οι υδρογονάνθρακες αποτελούν σήμερα την κυρίαρχη πηγή ενέργειας καθώς και την πρώτη ύλη για την παραγωγή ποικίλων χημικών προϊόντων, καθιστώντας τους απαραίτητους για την οικονομική και τεχνολογική ανάπτυξη. Το υψηλό ενεργειακό περιεχόμενο και η εύκολη διακίνηση του πετρελαίου, του επιτρέπουν να πρωτοστατεί στον χώρο της ενέργειας, με τις υπόλοιπες μορφές αυτής να δρουν μονάχα συμπληρωματικά.

Οι υδρογονάνθρακες απαντώνται εντός σχηματισμών στο υπέδαφος σε υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις, και μοιράζονται τον χώρο του πορώδους τους πετρώματος με νερό. Η εκμετάλλευσή τους γίνεται με γεωτρήσεις, οι οποίες δύναται να καλύπτουν αρκετά χιλιόμετρα βάθους.

Ο σχεδιασμός μιας εκμετάλλευσης υδρογονανθράκων καθορίζεται τόσο από την σύσταση του (που με την σειρά της καθορίζει τις ιδιότητές τους) αλλά και το πέτρωμα του σχηματισμού, καθώς και σε τι εντατική κατάσταση (πίεση, θερμοκρασία) απαντάται το σύστημα αυτό.

Μάλιστα, η συμπεριφορά του συστήματος αλλάζει κατά την πορεία εκμετάλλευσης λόγω των μεταβολών που προκύπτουν, από την απομάκρυνση όγκου ρευστών που μεταφράζεται άμεσα σε πτώση πίεσης, πιθανώς επαρκή για να δημιουργηθεί διφασική ισορροπία και ροή, μεταβολή της σύστασης είτε με κατανομή συστατικών σε αέρια και υγρή φάση, είτε με έγχυση αερίου κ.α.

Από τα παραπάνω προκύπτει πως η εκμετάλλευση υδρογονανθράκων παρουσιάζει έντονο ενδιαφέρον, τόσο από πλευράς χρήσεων και αξιοποίησης με ενεργειακές και οικονομικές προεκτάσεις, όσο και ως τεχνικό ζήτημα.

1.2 Χημική σύσταση και ταξινόμηση

Το πετρέλαιο απαντάται ως μίγματα ενώσεων κυρίως άνθρακα και υδρογόνου (υδρογονάνθρακες), με παρουσία αζώτου, οξυγόνου και θείου σε ενώσεις ως ετεροσυστατικά (compounds). Επίσης συνυπάρχουν και μέταλλα όπως νικέλιο, βανάδιο, σίδηρος και χαλκός (Speight, 2014) (Ζεληλίδης, 2015).

Στοιχειακά, η σύνθεση των ρευστών ενός ταμειυτήρα δεν παρουσιάζει μεγάλες αποκλίσεις όσον αφορά τα επικρατέστερα στοιχεία, παρ' όλη την πολυπλοκότητα της διαδικασίας γένεσης κοιτασμάτων, όπως θα αναλυθεί παρακάτω.

Πίνακας 1: Κατανομή Στοιχείων Υδρογονανθράκων (Spreight, 2014)

Στοιχεία	Περιεκτικότητα (% κ.β.)
Άνθρακας	83 – 87
Υδρογόνο	10 – 14
Οξυγόνο	0,1 – 2
Θείο	0,05 – 1,5
Μέταλλα (Ni & V)	< 0,1

Οι ενώσεις που προκύπτουν από τα παραπάνω στοιχεία αυξάνουν κατακόρυφα σε πολυπλοκότητα σε πλήρη αναλογία με το μοριακό βάρος της κάθε ένωσης, που μπορεί να κυμαίνεται από 16 (του μεθανίου CH₄) έως αρκετές χιλιάδες (Spreight, 2014). Επιπροσθέτως, η πολυπλοκότητα αυξάνεται αν ληφθεί υπόψη το – ιδιαίτερα συχνό στις οργανικές ενώσεις - φαινόμενο της ισομέρειας.

Ως ισομέρεια καλείται το φαινόμενο όπου παρά τον ίδιο μοριακό τύπο, δύο ή παραπάνω μόρια έχουν διαφορετική χημική δομή, διαφορετική διάταξη των επιμέρους ατόμων τους μορίου, είτε στο επίπεδο (συντακτική ισομέρεια) είτε στον χώρο (στεreoϊσομέρεια). Σαν άμεσο αντίκτυπο, τα ισομερή δεν έχουν απαραίτητα τις ίδιες ιδιότητες.

Πίνακας 2: Άτομα Άνθρακα και Ισομέρεια (Spreight, 2014)

Άτομα C σε υδρογονάνθρακα	Αριθμός Ισομερών
4	2
8	18
12	355
18	60.523

Γενικά, μαζί με τα ρευστά υδρογονανθράκων των ταμειωτήρων συνυπάρχουν και κάποια ανόργανα συστατικά όπως υδρόθειο (H₂S), διοξείδιο του άνθρακα (CO₂), άζωτο (N₂) και, προπάντων, νερό (H₂O).

1.2.1 Υδρογονάνθρακες

Ο γενικός χημικός τύπος για τους υδρογονάνθρακες σε ταμειωτήρες πετρελαίου είναι $C_nH_{2n+h}S_aN_bO_c$ (Whitson, et al., 2000). Βάση του h μπορεί να καθοριστεί η ομάδα στην οποία ανήκει η ένωση. Οι «καθαροί» υδρογονάνθρακες χαρακτηρίζονται από την ύπαρξη μονάχα άνθρακα και υδρογόνου ($a = b = c = 0$), ενώ σε αντίθετη περίπτωση γίνεται λόγος για ετεροσυστατικά του πετρελαίου, που θα αναλυθούν παρακάτω.

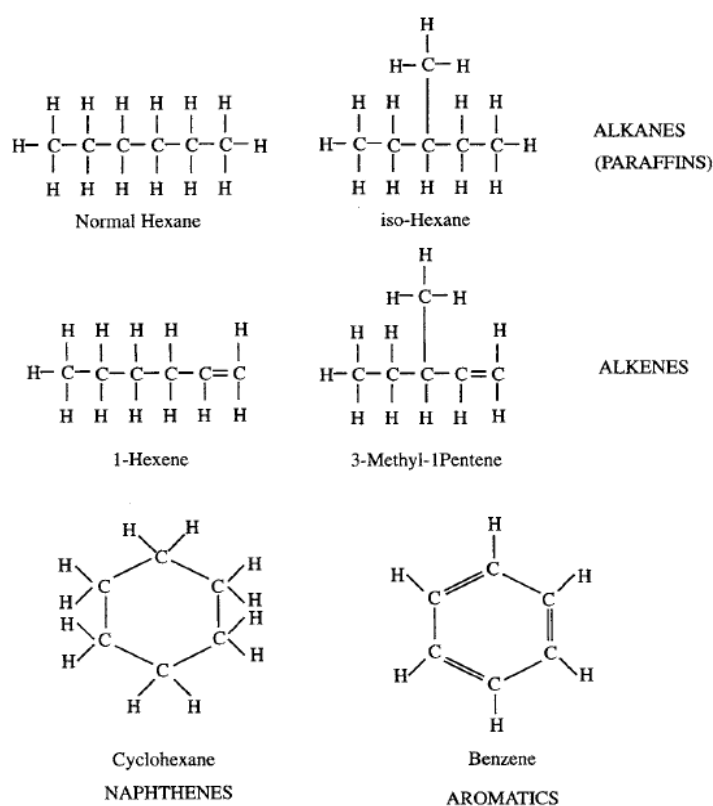
Για $h=2$ ο τύπος περιγράφει την σειρά των **αλκανίων (παραφινών)**, χαρακτηριστικό της οποίας είναι οι κορεσμένες ευθείες ή διακλαδισμένες αλυσίδες άνθρακα και η χημική σταθερότητα των μορίων. Τα διακλαδισμένα – ισομερή – αλκάνια παρουσιάζουν σημαντικά χαμηλότερα σημεία ζέσεως σε σύγκριση με τα κανονικά. Σημαντική ιδιότητά

τους είναι το ιδιαίτερα υψηλό ενεργειακό περιεχόμενό τους λόγω της μέγιστης δυνατής περιεκτικότητας ατόμων υδρογόνου για τον εκάστοτε αριθμό ανθράκων. Όμως αν αντίθετα το ενεργειακό περιεχόμενο αποδοθεί σε όρους όγκου, παρουσιάζουν το χαμηλότερο από τις άλλες μορφές υδρογονανθράκων λόγω της ιδιαίτερα χαμηλής πυκνότητάς τους (Πασαδάκης, 2007).

Οι ομάδες των αλκενίων (ολεφίνων) και αλκινίων (ακετυλενίων) με $h=0$ και $h=-2$ αντίστοιχα, αποτελούνται από ακόρεστες αλυσίδες και ως εκ τούτου είναι δεν συναντώνται συχνά σε φυσικούς ταμιευτήρες πετρελαίου (Whitson, et al., 2000).

Η σειρά των **κυκλοαλκανίων (ναφθενίων)** αποτελούν ισομερή των ολεφίνων ($h=0$) με εντελώς διαφορετικές όμως ιδιότητες, καθώς το μείζον χαρακτηριστικό τους είναι η ύπαρξη κορεσμένου δακτυλίου 5 - 6 ατόμων άνθρακα, με ή χωρίς πλευρικές διακλαδώσεις παραφινικών αλυσίδων. Εμφανίζονται δε σχεδόν σε όλα τα μίγματα υδρογονανθράκων στους ταμιευτήρες, και δύναται να φθάσουν μέχρι το 50% σε πετρέλαια.

Οι **αρωματικές** ενώσεις (αρένια ή «βενζολιοειδείς») χαρακτηρίζονται από $h=-6$ και από τους ακόρεστους εξαμελείς βενζολικούς δακτυλίους που περιέχουν, απομονωμένους ή συζυγείς. Στα περισσότερα πετρέλαια το ποσοστό τους δεν ξεπερνά το 15% κ.β. (Πασαδάκης, 2007). Τα αρωματικά με χαμηλό σημείο βρασμού δεν απαντώνται συχνά στα πετρελαϊκά ρευστά (Whitson, et al., 2000).



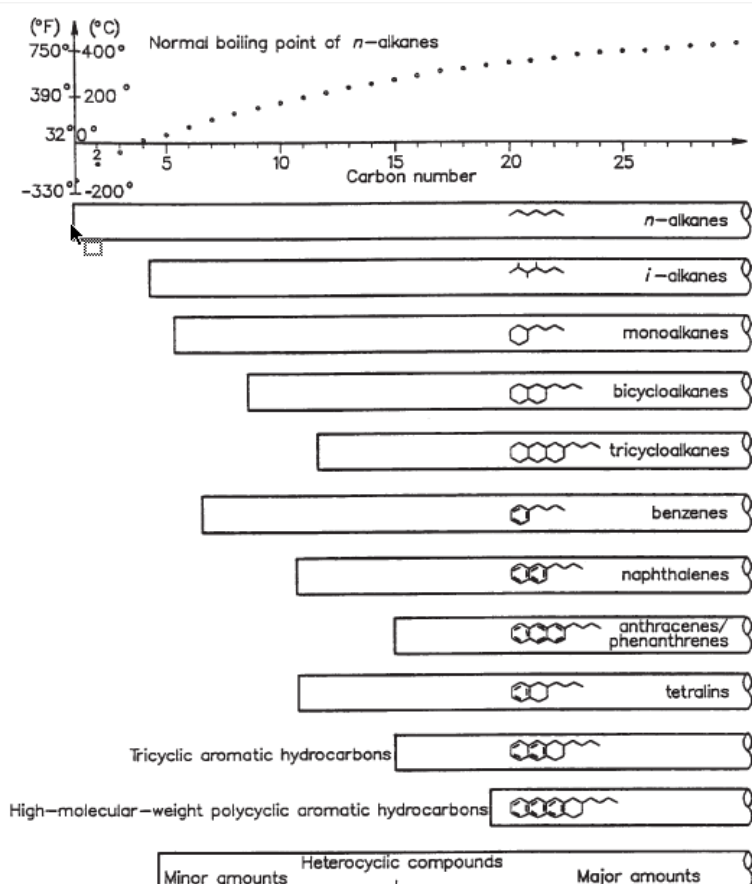
Σχήμα 1: Κύριες ομάδες υδρογονανθράκων σε ταμιευτήρες (Danesh, 1998)

1.2.2 Ετεροσυστατικά

Ετεροσυστατικά του πετρελαίου αποκαλούνται οι ενώσεις που περιέχουν άτομα στοιχείων πέραν του άνθρακα και του υδρογόνου. Τα κυριότερα στοιχεία είναι το θείο, το άζωτο και το οξυγόνο, ενώ δύναται να σχηματιστούν και οργανομεταλλικές ενώσεις νικελίου, κοβαλτίου, χαλκού κ.λπ. (Πασαδάκης, 2007).

Τα βαρύτερα κλάσματα αργού πετρελαίου είναι πλούσια σε πολυκυκλικούς αρωματικούς υδρογονάνθρακες με προσδευτικά αρνητικούς αριθμούς *h*. Καθώς το μοριακό βάρος αυξάνεται, αυξάνεται και η πιθανότητα παρουσίας θείου, οξυγόνου και αζώτου, αντικαθιστώντας δακτυλίους ή λαμβάνοντας θέση σε παρεμφερείς αλυσίδες υδρογονανθράκων (Whitson, et al., 2000).

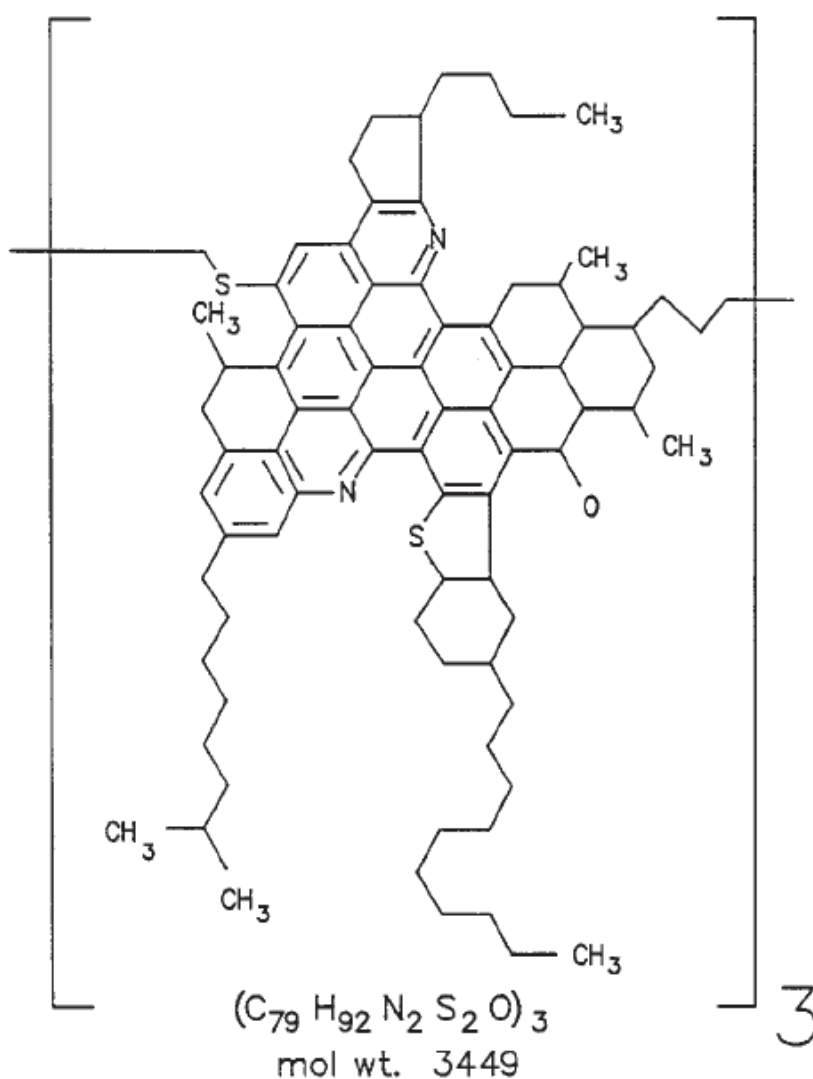
Εκ των ετεροσυστατικών, η σημαντικότερη ίσως κατηγορία είναι αυτή των ενώσεων θείου, καθώς δημιουργούν προβλήματα στην χρήση των πετρελοπροϊόντων. Ειδικότερα, κατά την καύση θειοενώσεων των βενζινών παράγεται διοξείδιο του θείου το οποίο παρουσία νερού συντελεί στην διάβρωση του κινητήρα. Στην περίπτωση του diesel και των λιπαντικών μειώνουν την οξειδωτική σταθερότητα και επιταχύνουν την δημιουργία επικαθίσεων (Πασαδάκης, 2007).



Σχήμα 2: Σύνοψη υδρογονανθράκων σε πετρελαϊκά ρευστά (Whitson, et al., 2000)

Επιπροσθέτως των παραπάνω, συνυπάρχουν κολλοειδή μίγματα ασφατενίων (Whitson, et al., 2000). Τα ασφατένια είναι (σημαντικά βαρύτερες) παρόμοιες χημικά ενώσεις, που αρχικά βρίσκονται σε αιώρηση σχηματίζοντας κολλοειδές μίγμα με το πετρέλαιο του ταμιευτήρα, και στην συνέχεια διαχωρίζονται από αυτό με καθίζηση, λόγω μεταβολών στην πίεση, θερμοκρασία και σύσταση του πετρελαίου κατά την πορεία της εκμετάλλευσης του ταμιευτήρα (Danesh, 1998). Ως ενώσεις παρουσιάζουν ενδιαφέρον λόγω της σημαντικότητας επίδρασής τους στην συμπεριφορά του ταμιευτήρα. Καθώς πρόκειται για πολικές ενώσεις, δύναται να προσροφηθούν στο πέτρωμα του ταμιευτήρα και να αλλάξουν την διαβροχή (wettability) του, με συνέπειες στις τριχοειδείς πιέσεις, τις σχετικές διαπερατότητες, τον κορεσμό υπολειπόμενου πετρελαίου κ.α. (Whitson, et al., 2000).

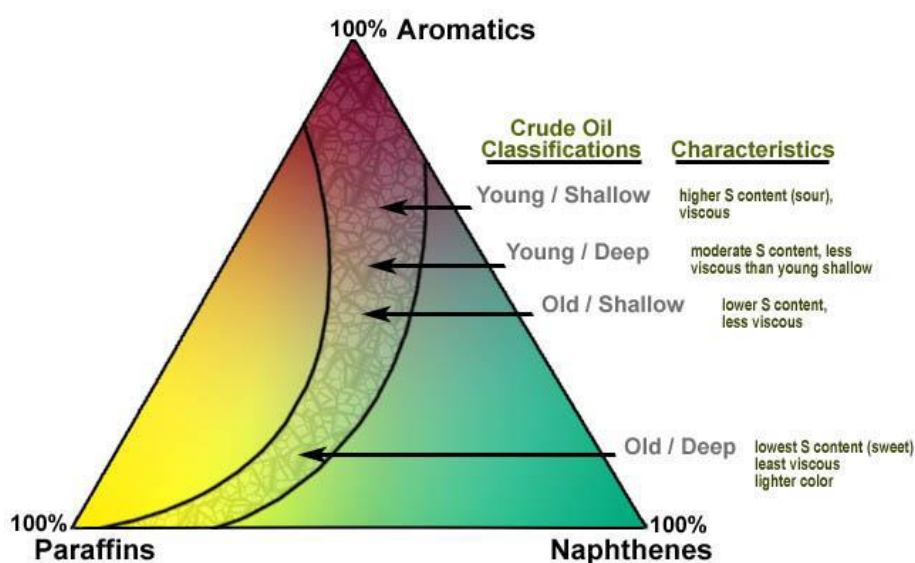
Το παρακάτω σχήμα απεικονίζει την χημική δομή ενός ασφατενίου. Οι αγκύλες αριστερά και δεξιά με τον αριθμό 3 υποδηλώνουν πως η δομή επαναλαμβάνεται στο σύνολο 3 φορές.



Σχήμα 3: Παράδειγμα ασφατενίου C_{79} (Whitson, et al., 2000)

1.3 Ταξινόμηση

Όπως είναι προφανές, η ποικιλομορφία των πετρελαϊκών ρευστών οδήγησε στην ανάγκη ταξινόμησής τους. Ένα τέτοιο σύστημα ταξινόμησης παρουσιάζεται στην επόμενη εικόνα (Pennsylvania State University, 2017) και κατατάσσει το πετρέλαιο βάση της περιεκτικότητας σε παραφίνες, αρωματικά και ναφθένια. Επειδή το θείο είναι συχνά δεσμευμένο στα αρωματικά και η ύπαρξή του δυσχεραίνει την αξιοποίηση του αργού μετά την άντλησή του, η θέση του δείγματος στο διάγραμμα αποτελεί ένδειξη και της «ποιότητας» του αργού πετρελαίου.



Σχήμα 4: Τριγωνικό σύστημα ταξινόμησης υδρογονανθράκων

Ένας άλλος τρόπος ταξινόμησης είναι βάση της συμπεριφοράς ως φάση ρευστού (phase behaviour). Τα πετρελαϊκά ρευστά, σε σχέση με τις συνθήκες που επικρατούν στον ταμιευτήρα, διαίρουνται συνήθως σε πέντε ευρύτερες ομάδες, με αυξανόμενη χημική πολυπλοκότητα και μέσο μοριακό βάρος: **ξηρό αέριο** (dry gas), **υγρό αέριο** (wet gas), **αέριο συμπύκνωμα** (gas condensate), **πτητικό πετρέλαιο** (volatile oil) και **μαύρο πετρέλαιο** (black oil). Οι κατηγορίες αυτές θα αναλυθούν παρακάτω.

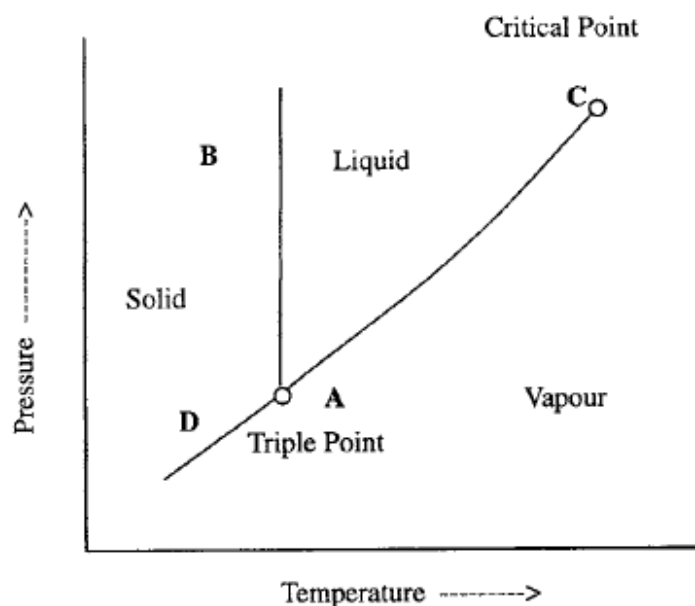
Ο ακόλουθος πίνακας παρουσιάζει τυπικές συστάσεις ανά κατηγορία. Χάριν απλούστευσης, οι υδρογονάνθρακες παρουσιάζονται βάσει του πλήθους των ατόμων άνθρακα και διακρίνονται όπου είναι απαραίτητο σε «κανονικούς» (normal, n) και σε ισομερείς (isomers, i).

Πίνακας 3: Τυπικές κατανομές συστατικών διαφόρων τύπων πετρελαίου
(Whitson, et al., 2000)

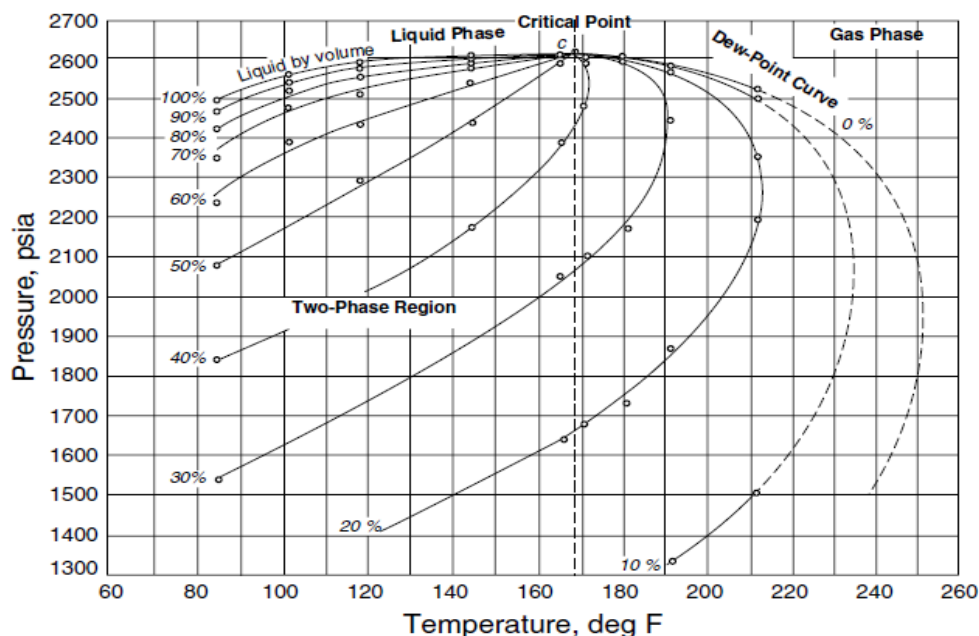
	Κατανομή κατά mol %				
	Dry Gas	Wet Gas	Gas Conden- sate	Volatile Oil	Black Oil
CO ₂	0,10	1,41	2,37	0,93	0,02
N ₂	2,07	0,25	0,31	0,21	0,34
C ₁	86,12	92,46	73,19	58,77	34,62
C ₂	5,91	3,18	7,80	7,57	4,11
C ₃	3,58	1,01	3,55	4,09	1,01
<i>i</i> -C ₄	1,72	0,28	0,71	0,91	0,76
<i>n</i> -C ₄		0,24	1,45	2,09	0,49
<i>i</i> -C ₅	0,50	0,13	0,64	0,77	0,43
<i>n</i> -C ₅		0,08	0,68	1,15	0,21
C ₆		0,14	1,09	1,75	1,61
C ₇₊		0,82	8,21	21,76	56,40

1.3.1 Διαγράμματα Πίεσης - Θερμοκρασίας

Προκειμένου να περιγραφούν οι παραπάνω κατηγορίες, κρίνεται σκόπιμη μια παρουσίαση και περιγραφή ενός διαγράμματος πίεσης – θερμοκρασίας (P vs.T). Καθώς τα πετρελαϊκά ρευστά αποτελούν μίγματα πλήθους ενώσεων, αντί μιας γραμμής που διαχωρίζει υγρή από αέρια φάση όπως στα διαγράμματα ενός συστατικού, απαντάται ο λεγόμενος «φάκελος φάσεων», εντός του οποίου δύναται να υπάρξουν ποιοτικές γραμμές που δείχνει την αναλογία υγρής και αέριας φάσης.



Διάγραμμα 1: Ενδεικτικό διάγραμμα P vs. T για ένα συστατικό (Danesh, 1998)



Διάγραμμα 2: Τυπικό διάγραμμα P vs. T για πετρελαϊκό ρευστό (Tarek, 2006)

Στο Διάγραμμα 2 απεικονίζεται ο προαναφερθείς φάκελος φάσεων, ο οποίος προκύπτει από την «διάσπαση»¹ της αντίστοιχης γραμμής στο διάγραμμα ενός συστατικού σε δύο μέρη, αυτό του αριστερού τμήματος σημείων φυσαλίδας ως το κρίσιμο (bubble point line) που διαχωρίζει την διφασική περιοχή από την υγρή, και το αντίστοιχο δεξιά από το κρίσιμο σε σημεία δρόσου (dew point line) που διαχωρίζει την διφασική περιοχή από την αέρια.

Αυτό συμβαίνει διότι στα μίγματα εμφανίζεται το φαινόμενο της διφασικής ισορροπίας για εύρος πιέσεων και θερμοκρασιών, όπου εντός του φακέλου φάσεων τα επιμέρους συστατικά κατανέμονται στην υγρή και στην αέρια φάση, αλλά σαν σύνολο η σύσταση παραμένει σταθερή. Εκτός του φακέλου φάσεων, επικρατεί μία φάση μόνο, αριστερά του κρίσιμου η υγρή, ενώ δεξιά η αέρια.

Ο φάκελος φάσεων οριοθετείται από την νοητή κατακόρυφη της μέγιστης θερμοκρασίας όπου υπάρχει διφασική ισορροπία (critical temperature) και την νοητή οριζόντια της μέγιστης πίεσης αντίστοιχα (critical pressure).

Οι ταμιευτήρες μπορούν πολύ βολικά να κατηγοριοποιηθούν ανάλογα της θέσης της αρχικής πίεσης και θερμοκρασίας στον ταμιευτήρα σε σχέση με τον φάκελο φάσεων και το κρίσιμο σημείο. Έτσι η κατηγοριοποίηση γίνεται έμμεσα από την σύσταση (καθώς από αυτήν προκύπτει ο φάκελος φάσεων) και πρωτίστως βάσει θερμοδυναμικής συμπεριφοράς.

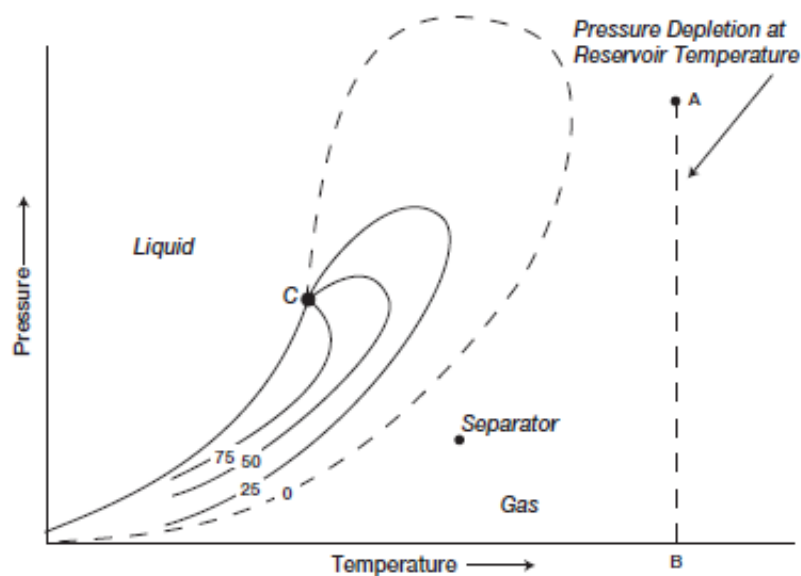
Αυτός ο τρόπος ταξινόμησης είναι εξαιρετικά χρήσιμος στον μηχανικό πετρελαίου, καθώς μεταφέρει άμεσα την πληροφορία του τι φάση αναμένεται να συναντήσει κατά

¹ Με την έννοια ότι τα σημεία φυσαλίδας και τα σημεία δρόσου δεν συμπίπτουν.

την πορεία εκμετάλλευσης. Φυσικά, κατά την πορεία αυτής, ο φάκελος φάσεων αλλάζει και μετατοπίζεται λόγω της διαφορετικής κινητικότητας των επιμέρους συστατικών, ήτοι δύναται να αλλάξει η σύνθεση του μίγματος υδρογονανθράκων. Ωστόσο τα $P - T$ διαγράμματα εξακολουθούν να παρέχουν συγκεντρωμένα αξιόπιστες και καίριες πληροφορίες για την φύση του υπό μελέτη ταμιευτήρα.

Ένας απλός πρώτος διαχωρισμός μπορεί να γίνει από το αν η θερμοκρασία ταμιευτήρα βρίσκεται αριστερά ή δεξιά του κρίσιμου σημείου. Τότε ο ταμιευτήρας είναι πρωτίστως πετρελαίου ή φυσικού αερίου, αντίστοιχα.

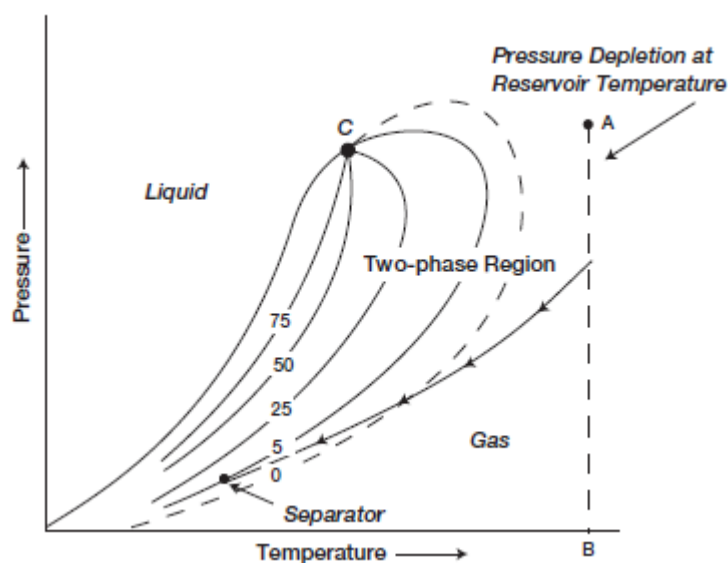
1.3.2 Ξηρό αέριο (Dry Gas)



Διάγραμμα 3: Ενδεικτικό διάγραμμα P vs. T για ξηρό αέριο (Tarek, 2006)

Χαρακτηριστικό του ξηρού αερίου – όπως υποδηλώνει και το όνομά του – είναι πως απαντάται ως αέριο στον ταμιευτήρα αλλά και στις επιφανειακές συνθήκες. Το μοναδικό υγρό που σχετίζεται με την εκμετάλλευσή του είναι το νερό. Κατά κανόνα, αν ο λόγος παραγόμενου αερίου προς πετρέλαιο σε κανονικές συνθήκες (Gas-Oil Ratio, GOR) είναι μεγαλύτερος από 100000 scf/STB, τότε ο ταμιευτήρας θεωρείται ξηρού αερίου, κι ως παράγονται μικροποσότητες πετρελαίου (Tarek, 2006).

1.3.3 Υγρό αέριο (Wet Gas)

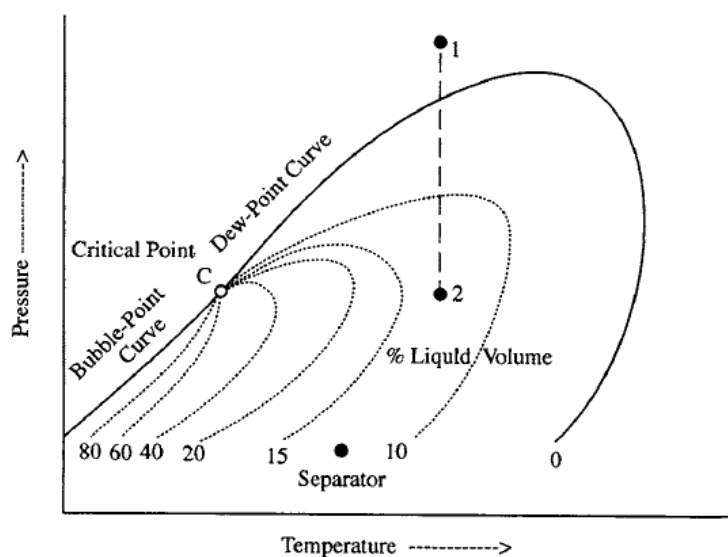


Διάγραμμα 4: Ενδεικτικό διάγραμμα P vs. T για υγρό αέριο (Tarek, 2006)

Η ιδιαιτερότητα που παρουσιάζουν οι ταμιευτήρες υγρού αερίου είναι ότι εντός του ταμιευτήρα οι υδρογονάνθρακες απαντώνται αποκλειστικά σε αέρια μορφή (θερμοκρασία ταμιευτήρα μεγαλύτερη της cricodentherm), αλλά στην επιφάνεια σε κανονικές συνθήκες σχηματίζεται και υγρή φάση.

Τυπικές τιμές GOR για ταμιευτήρες υγρού αερίου είναι άνω των 50000 scf/STB (Danesh, 1998).

1.3.4 Αέριο συμπύκνωμα (Gas Condensate)



Διάγραμμα 5: Ενδεικτικό διάγραμμα P vs. T για αέριο συμπύκνωμα (Danesh, 1998)

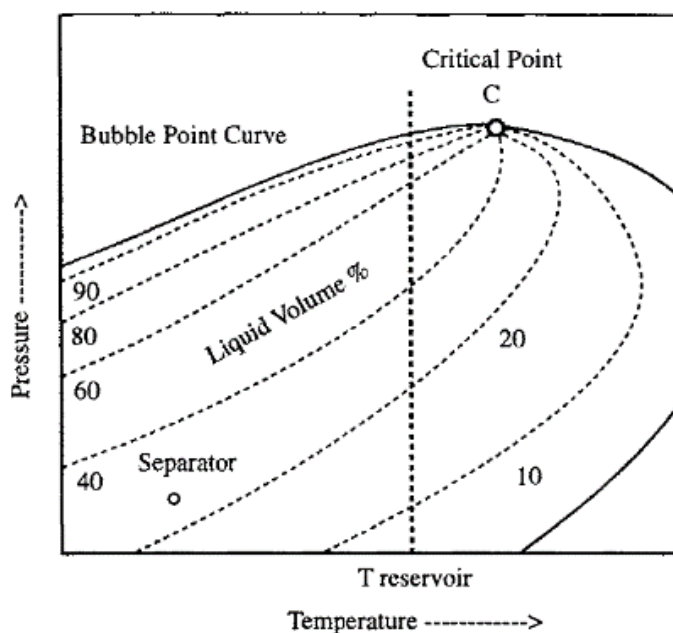
Χαρακτηριστικό των κοιτασμάτων αέριου συμπυκνώματος είναι πως στην αρχή στον ταμιευτήρα απαντάται αέριο και στις κανονικές συνθήκες παράγονται δύο φάσεις, όπως στην περίπτωση wet gas, αλλά κατά την πορεία εκμετάλλευσης του ταμιευτήρα (βλ. ευθύγραμμο τμήμα 1-2 στο σχήμα) σχηματίζονται δύο φάσεις εντός του ταμιευτήρα.

Το φαινόμενο της υγροποίησης με πτώση πίεσης αντιβαίνει της καθημερινής εμπειρίας και γι αυτό αποκαλείται ανάδρομη ή οπισθοδρομική συμπύκνωση (retrograde condensation).

Το φαινόμενο ερμηνεύεται ως εξής: καθώς μειώνεται η πίεση, κυριαρχούν οι ελκτικές δυνάμεις μεταξύ των βαρύτερων μορίων έναντι των ελαφρύτερων, με αποτέλεσμα τον διαχωρισμό τους από το μίγμα και την συγκέντρωσή τους σε υγρή φάση (Βαρότσης, 2010).

Οι τιμές GOR για τέτοιους ταμιευτήρες κυμαίνονται από 3200 έως 150000 scf/STB. Πρακτικά, όταν παρουσιάζονται τιμές άνω των 50000 scf/STB, ο ταμιευτήρας μπορεί να αντιμετωπισθεί ως υγρού αερίου (Danesh, 1998).

1.3.5 Πτητικό πετρέλαιο (Volatile Oil)



Διάγραμμα 6: Ενδεικτικό διάγραμμα P vs. T για πτητικό πετρέλαιο (Danesh, 1998)

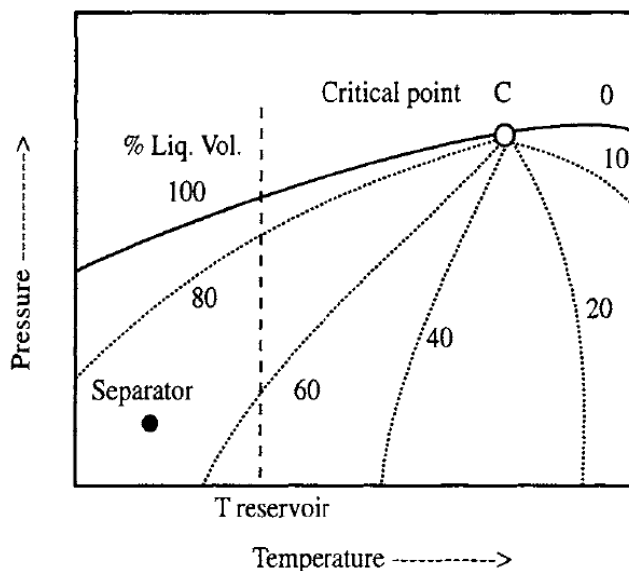
Όπως φαίνεται και από το παραπάνω διάγραμμα, στην περίπτωση πτητικού πετρελαίου, η θερμοκρασία ταμιευτήρα βρίσκεται κοντά στο κρίσιμο σημείο, με αποτέλεσμα η κατακόρυφος σε αυτήν που υποδηλώνει την πορεία εκμετάλλευσης να τέμνει πολλές ποιοτικές γραμμές για μικρή μεταβολή πίεσης. Το αποτέλεσμα είναι ο μεγάλος ρυθμός αύξησης του όγκου της αέριας φάσης σε σχέση με την πίεση, εντός του ταμιευτήρα.

Αυτό συμβαίνει διότι το πτητικό πετρέλαιο περιέχει σημαντικό ποσοστό ελαφρών συστατικών, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 3 (βλ. σελ. 16), τα οποία απαρτίζουν το παραγόμενο αέριο. Σε αυτήν την περίπτωση, αυτό αποκαλείται αέριο εκ διαλύσεως (solution gas) (Βαρότσης, 2010).

Αρχικές τιμές GOR (για $P < P_b$) κυμαίνονται από 1750 – 3200 scf/STB ενώ το παραγόμενο πετρέλαιο συνήθως χαρακτηρίζεται από μικρή πυκνότητα, μικρότερη των 0.82 ton/m³ (μεγαλύτερη των 40° API) (Danesh, 1998). Μόλις το ρευστό του ταμιευτήρα εισέλθει στην διφασική περιοχή, η πυκνότητα του πετρελαίου μειώνεται και το GOR αυξάνεται κατακόρυφα.

Σε αυτό το στάδιο παραγωγής, μεγάλο μέρος του παραγόμενου πετρελαίου οφείλεται στην συμπύκνωση του αερίου από τον ταμιευτήρα (Danesh, 1998).

1.3.6 Μαύρο πετρέλαιο (Black Oil)



Διάγραμμα 7: Ενδεικτικό διάγραμμα P vs. T για μαύρο πετρέλαιο (Danesh, 1998)

Σε αντίθεση με το πτητικό πετρέλαιο, στην περίπτωση του μαύρου πετρελαίου η θερμοκρασία ταμιευτήρα απέχει από το κρίσιμο σημείο. Χαρακτηριστικό τους είναι η χαμηλή πίεση κορεσμού/φυσαλίδας, ήτοι για να δημιουργηθεί διφασική ισορροπία εντός του ταμιευτήρα, πρέπει να μειωθεί πάρα πολύ η πίεση.

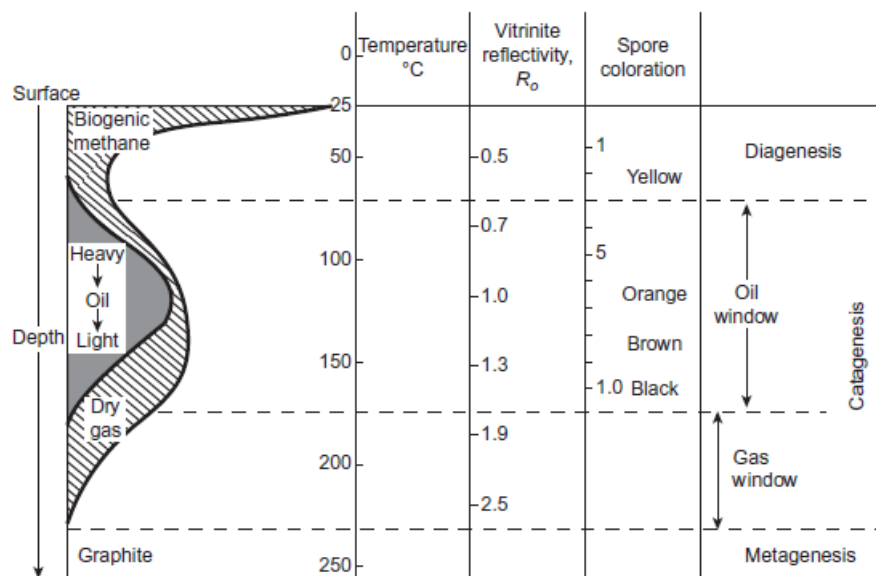
Οι τιμές GOR για το διάστημα μονοφασικής κατάστασης στον ταμιευτήρα είναι μικρότερες των 1750 scf/STB. Στην περίπτωση που η πίεση μειωθεί αρκετά ώστε να σχηματιστεί και αέρια φάση, το GOR μειώνεται μέχρις ότου να σχηματιστεί αρκετό αέριο ώστε να επιτευχθεί ο ελάχιστος βαθμός κορεσμού και να αρχίσει να ρέει η αέρια φάση. Στην συνέχεια το GOR αυξάνει απότομα και δραματικά, καθώς η κινητικότητα των φάσεων σχετίζεται άμεσα με το ιώδες, η διαφορά του οποίου μεταξύ των δύο φάσεων

είναι περίπου 2 τάξεις μεγέθους (Danesh, 1998). Η πυκνότητα του παραγόμενου πετρελαίου είναι άνω 0,8 ton/m³ (λιγότερο από 45°API²) και δεν παρουσιάζει τις έντονες διακυμάνσεις που απαντώνται στα πτητικά πετρέλαια, καθ' όλη την διάρκεια παραγωγής (Danesh, 1998).

1.4 Γένεση Υδρογονανθράκων

Οι δημιουργία των υδρογονανθράκων είναι στενά συνδεδεμένη με την διαδικασία της ιζηματογένεσης. Σήμερα είναι αποδεκτό ότι η δημιουργία του πετρελαίου οφείλεται στην αποδόμηση ζωικών και φυτικών ιστών που αποτέθηκαν σε θαλάσσια ή παραθαλάσσια περιβάλλοντα και παγιδεύτηκαν σε ιζήματα, τα οποία στην συνέχεια μετατράπηκαν σε ιζηματογενή πετρώματα (Πασαδάκης, 2007). Συνεπώς, γίνεται λόγος για διεργασίες σε βάθος χρόνου που, λόγω της ιζηματογένεσης, άμεσα μεταφράζεται σε διεργασίες με προοδευτικά αυξανόμενη θερμοκρασία και πίεση.

Τα οργανικά κατάλοιπα φυτών και ζώων διατηρήθηκαν στον πυθμένα σε αναερόβιο ανοξικό περιβάλλον. Κατά την πρώτη φάση της ιζηματογένεσης (διαγένεση), δρουν μικροοργανισμοί οι οποίοι διασπούν μέρος της οργανικής ύλης με την μεταβολική τους δραστηριότητα. Αυτή η διαδικασία αποτελεί την βιογενική (biogenic) αποδόμηση της οργανικής ύλης. Ταυτόχρονα αρχίζει και λαμβάνει χώρα θερμική αποδόμηση, η οποία γίνεται προοδευτικά σημαντικότερη καθώς το πέτρωμα εισέρχεται στην επόμενη φάση ιζηματογένεσης, αυτήν της καταγένεσης.



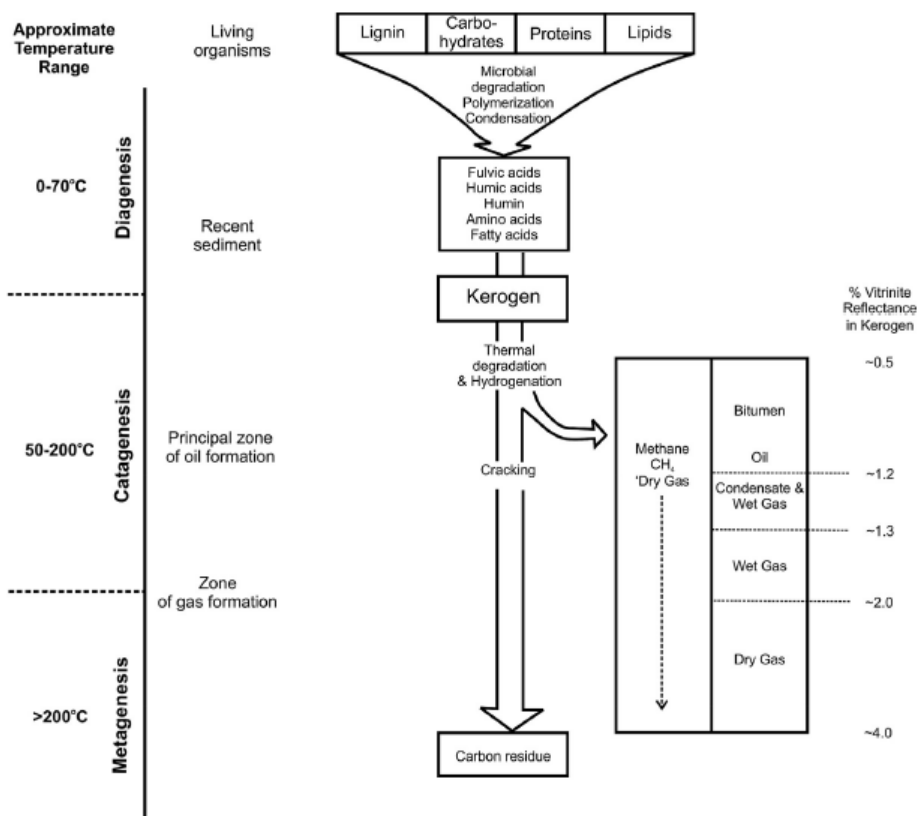
Σχήμα 5: Συσχετισμός βάθους με την δημιουργία πετρελαίου (Selley, et al., 2015)

² $API = \frac{141.5}{SG} - 131.5$, όπου η SG η σχετική πυκνότητα (specific gravity) ως προς το νερό, μετρημένη σε κανονικές συνθήκες.

Χαρακτηριστικά αυτής της φάσης είναι η αναστολή της δράσης μικροοργανισμών λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας και πίεσης, οπότε επικρατούν οι θερμικές μετατροπές, και η δημιουργία και διάσπαση κηρογόνου. Το κηρογόνο διασπάται σε μικρότερα και ευκίνητα μόρια τα βιτουμένα, προτού αυτά διασπαστούν περαιτέρω σε μόρια υγρής και αέριας φάσης με αποτέλεσμα διφασικά συστήματα (Βαρότσης, 2010).

Καθώς το βάθος αυξάνει ακόμη περισσότερο, το πέτρωμα εισάγεται στο στάδιο της μεταγένεσης, το οποίο αποτελεί και πρόδρομο του μεταμορφισμού του πετρώματος. Πλέον η εναπομένουσα οργανική ύλη υπόκειται σε υψηλότερες θερμοκρασίες και έτσι απομένει μονάχα μεθάνιο και κατάλοιπο άνθρακα το οποίο εν τέλει θα μετατραπεί σε γραφίτη.

Από τα παραπάνω προκύπτει πως το «παράθυρο» συνθηκών δημιουργίας πετρελαίου και σημαντικής ποσότητας αερίου είναι κατά την καταγένεση.



Σχήμα 6: Πορεία της οργανικής ύλης κατά την γένεση πετρελαίου & αερίου (Selley, et al., 2015)

1.5 Δημιουργία ταμιευτήρων

Χαρακτηριστικό των υδρογονανθράκων είναι η χαμηλή πυκνότητά τους σε σχέση με το νερό και τον αέρα, του πετρελαίου και του φυσικού αερίου αντίστοιχα. Συνεπώς, οι υδρογονάνθρακες, μόλις σχηματιστούν, θα διαφύγουν από το μητρικό πέτρωμα.

1.5.1 Μετανάστευση

Καθώς δημιουργούνται τα μόρια υδρογονανθράκων εντός των ιζηματογενών πετρωμάτων, αυξάνεται η πίεση στον σχηματισμό. Όταν αυτή υπερβεί την αντοχή του πετρώματος, σχηματίζονται ρωγμές διαμέσου των οποίων οι υδρογονάνθρακες διαφεύγουν προς τα περιβάλλοντα πετρώματα. Η διαδικασία αυτή αποκαλείται «μετανάστευση» και ο κύκλος αυτής (αύξηση πίεσης-ρωγμάτωση-διαφυγή υδρογονανθράκων) δύναται να επαναληφθεί πολλές φορές κατά την διάρκεια της θερμικής ωρίμανσης του μητρικού ιζηματογενούς πετρώματος.

Το πρώτο στάδιο της μετανάστευσης είναι εξαιρετικά βραδύ λόγω του χαμηλού πορώδους και διαπερατότητας που χαρακτηρίζει αυτό το στάδιο. Στην συνέχεια, και αφού οι υδρογονάνθρακες έχουν συναντήσει πλέον διαπερατά πετρώματα, η ταχύτητά τους αυξάνεται καθώς βρίσκονται σε ευνοϊκότερες συνθήκες ροής.

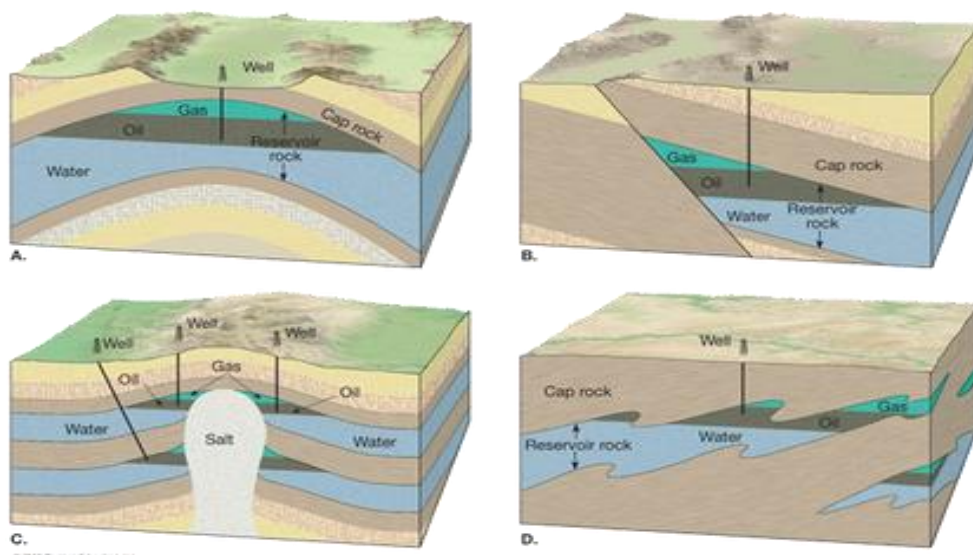
Η κύρια δύναμη της ροής των υδρογονανθράκων εντός των διαπερατών στρωμάτων κατά την δευτερογενή μετανάστευση, είναι η άνωση, λόγω της μικρότερης πυκνότητάς τους σε σχέση με το νερό που συναντούν στους πόρους (Βαρότσης, 2010).

1.5.2 Ταμιευτήρες

Η προς τα άνω κίνηση των υδρογονανθράκων συνεχίζεται μέχρις ότου συναντήσουν αδιαπέρατο στρώμα όπου οι τριχοειδείς πιέσεις εισόδου στους πόρους δεν είναι δυνατόν να υπερνικηθούν από την άνωση.

Τότε, γίνεται λόγος για παγίδευση υδρογονανθράκων, όπου δημιουργείται κοίτασμα, και όταν αυτοί συγκεντρωθούν σε επαρκής ποσότητες ώστε να είναι οικονομικά εκμεταλλεύσιμοι, τότε θεωρείται ταμιευτήρας.

Το αδιαπέρατο στρώμα που θα εμποδίσει την περαιτέρω ως άνω κίνηση των πετρελαϊκών ρευστών καλείται παγίδα. Τέτοιες παγίδες δύναται να είναι είτε δομικές (αντίκλινα, μεταπτώσεις/ρήγματα, δόμοι άλατος κ.α.) είτε στρωματογραφικές (λ.χ. ψαμμιτικός ταμιευτήρας με σχιστολιθική παγίδα) (Βαρότσης, 2010).



Σχήμα 7: Αναπαράσταση τυπικών παγίδων υδρογονανθράκων (Shamsi, 2013)

Στο Σχήμα 7 απεικονίζονται παραδείγματα παγίδων. Στο Α παρουσιάζεται μια χαρακτηριστική περίπτωση αντίκλινου. Στο Β αναπαρίσταται η περίπτωση ενός ρήγματος/μετάπτωσης, ενώ στο C και D δόμος άλατος και στρωματογραφική παγίδα αντίστοιχα.

1.6 Έρευνα και Αξιολόγηση Ταμιευτήρων

Μέχρι να φτάσει η εκμετάλλευση ενός ταμιευτήρα στο στάδιο παραγωγής, έχουν ήδη ολοκληρωθεί πλήθος πολυδάπανων εργασιών. Η ανίχνευση των ταμιευτήρων γίνεται με διάφορες μεθόδους κατά κανόνα αλληλοσυμπληρούμενες μεταξύ τους οι οποίες δύναται να ομαδοποιηθούν στις ακόλουθες τέσσερις ευρύτερες κατηγορίες:

- Επιφανειακή έρευνα
- Γεωλογική έρευνα
- Γεωφυσική έρευνα
 - Μαγνητική διασκόπηση
 - Βαρυτομετρική διασκόπηση
 - Σεισμική διασκόπηση
- Όρυξη ερευνητικών γεωτρήσεων

Η επιφανειακή έρευνα μπορεί να συμβάλει μονάχα με ενδείξεις ενώ η γεωλογική έρευνα αποτελεί την πρώτη φάση συστηματικής αναζήτησης. Σημαντικό στάδιο είναι ο συσχετισμός των γεωλογικών δεδομένων της υπό έρευνα περιοχής με αντίστοιχα γειτονικών πετρελαιοπαραγωγών περιοχών, αν υπάρχουν, οι οποίες σε αυτό το στάδιο θα είναι πολύ πιο εντατικά μελετημένες.

Η γεωφυσική έρευνα με κύριες μεθόδους την μαγνητική, βαρυτομετρική και σεισμική διασκόπηση, προσφέρει ιδιαίτερα σημαντικές και ενδιαφέρουσες πληροφορίες σχετικά με την γεωλογική δομή του υπεδάφους δίχως το εξαιρετικά υψηλό κόστος των ερευνητικών γεωτρήσεων, οι οποίες λαμβάνουν χώρα αφού τα αποτελέσματα των προηγούμενων βημάτων συνεκτιμηθούν και αξιολογηθούν (Βαρότσης, 2010).

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι προτού πραγματοποιηθούν ερευνητικές γεωτρήσεις, όλα τα δεδομένα είναι «στατικά», με την έννοια ότι δεν υπάρχουν δεδομένα για την δυναμική συμπεριφορά ενός ταμιευτήρα, ή ακόμη, ότι υφίσταται ταμιευτήρας.

Στόχος των ερευνητικών γεωτρήσεων είναι να επιβεβαιώσει όσα έχουν προκύψει από τα προηγούμενα στάδια για την δομή του υπεδάφους καθώς και να διαπιστωθεί εάν υπάρχουν ρευστά εντός του ταμιευτήρα, ποια είναι αυτά και σε τι συνθήκες απαντώνται.

1.7 Κινητήριοι μηχανισμοί παραγωγής ταμιευτήρων

Κύριοι κινητήριοι μηχανισμοί παραγωγής (natural drive mechanisms) που απαντώνται στους ταμιευτήρες πετρελαίου είναι:

- Μηχανισμός αερίου εν διαλύσει
- Μηχανισμός υπερκείμενης ζώνης αερίου
- Μηχανισμός υποκείμενης υδατοφόρας ζώνης

1.7.1 Μηχανισμός αερίου εν διαλύσει (solution gas drive)

Στην περίπτωση αυτού του μηχανισμού, κύριες πηγές ενέργειας για την ώθηση του πετρελαίου προς το φρεάτιο παραγωγής είναι η εκτόνωση του πετρελαίου και του αερίου που βρίσκεται διαλυμένο στο πετρέλαιο.

Στο πρώτο στάδιο εκμετάλλευσης όπου η πίεση διατηρείται άνω του σημείου κορεσμού ($P > P_b$), δεν έχει σχηματιστεί αέρια φάση και ως εκ τούτου όλο το παραγόμενο αέριο έχει προκύψει από την μεταφορά πετρελαίου από τις συνθήκες ταμιευτήρα στις επιφανειακές.

Όταν η πίεση υποχωρήσει κάτω από το σημείο κορεσμού ($P < P_b$) το αέριο απελευθερώνεται από το πετρέλαιο, σχηματίζοντας ξεχωριστή φάση. Καθώς η συμπίεστικότητα του αερίου είναι σημαντικά μεγαλύτερη από αυτήν της υγρής φάσης, στόχος της εκμετάλλευσης είναι η ελαχιστοποίηση της παραγωγής του, προκειμένου να διατηρηθεί η μέγιστη δυνατή ενέργεια στο σύστημα και να παραχθεί σε βάθος χρόνου. Για να επιτευχθεί το παραπάνω, συχνά απαιτείται η διατήρηση της πίεσης με έγχυση νερού.

Υπό τις καλύτερες συνθήκες και όταν δεν συνεργούν άλλοι μηχανισμοί παραγωγής, η τελική αποληψιμότητα δεν ξεπερνάει το 30% της αρχικής ποσότητας υδρογονανθράκων, ενώ σε περιπτώσεις πετρελαίου με υψηλό ιξώδες η αποληψιμότητα μπορεί να είναι και χαμηλότερη του 10% (Βαρότσης, 2008).

1.7.2 Μηχανισμός υπερκείμενης ζώνης αερίου (gas cap drive)

Και σε αυτήν την περίπτωση ισχύουν οι ίδιες θεωρητικές αρχές που αναπτύχθηκαν παραπάνω. Καθώς η πίεση του ταμιευτήρα μειώνεται κατά την παραγωγή, το αέριο συνεχώς αυξάνεται και η διεπιφάνεια μεταξύ πετρελαίου και αερίου συνεχώς μετακινείται προς τα κάτω. Αυτό συμβαίνει διότι το υγρό είναι κορεσμένο και δεν μπορεί να διαλύσει περισσότερο αέριο.

Γενικά η παρουσία αερίου στο σχηματισμό μειώνει τον ρυθμό πτώσης της πίεσης, ιδίως όταν αυτό δεν παράγεται. Γι αυτό τον λόγο, στην περίπτωση σχηματισμών με μηχανισμό υπερκείμενης ζώνης αερίου, έχει σημαντικότερο ρόλο η χωροθέτηση των γεωτρήσεων.

Σε σχέση με τους ταμιευτήρες όπου δρα μονάχα ο μηχανισμός αερίου εν διαλύσει, οι ταμιευτήρες με υπερκείμενη ζώνη αερίου παρουσιάζουν αποδόσεις αυξημένες κατά 1-10%, με κατά κανόνα καλύτερες αποδόσεις όσο πιο ομοιογενής είναι ο σχηματισμός (Βαρότσης, 2008).

1.7.3 Μηχανισμός υποκείμενης υδατοφόρας ζώνης (water drive)

Στην περίπτωση αυτή γίνεται λόγος για την φυσική εισροή νερού από υποκείμενο υδροφόρο ορίζοντα. Το κατά πόσον η φυσική εισροή νερού επηρεάζει την συμπεριφορά του ταμιευτήρα εξαρτάται από τον μέγεθός της.

Σε περίπτωση ισχυρού μηχανισμού φυσικής εισροής νερού, η πίεση και το GOR παραμένουν σχεδόν στάσιμα. Το κλάσμα του νερού σε σχέση με την συνολική παραγωγή (watercut) αυξάνει βαθμιαία και αρχικά παραμένει πρακτικά ασήμαντο, μέχρις ότου το μέτωπο του νερού φθάσει σε μια γεώτρηση παραγωγής.

Από την στιγμή που η παραγωγή νερού αρχίζει να αυξάνει σημαντικά, πρέπει να ληφθούν μέτρα προκειμένου να προστατευθεί η βιωσιμότητα της εκμετάλλευσης. Μάλιστα, η παρουσία σημαντικής στήλης νερού εντός του φρέατος είναι ικανή να εφαρμόσει τέτοια πίεση στον παράγοντα σχηματισμό που να αναγκάσει την διακοπή της παραγωγής (Βαρότσης, 2008).

1.7.4 Σύνθετος κινητήριος μηχανισμός (combination drive)

Ένας ταμιευτήρας δύναται να παράγει υπό την επίδραση άνω του ενός κινητήριου μηχανισμού. Αξίζει να σημειωθεί πως η συμβολή του εκάστοτε μηχανισμού δύναται να μεταβάλλεται με τον χρόνο.

Η ολική απόδοση του ταμιευτήρα σε αυτήν την περίπτωση θα εξαρτηθεί πρωτίστως από τις ιδιότητες του πορώδους μέσου και του ρευστού, αλλά και από την επιλογή των θέσεων των φρεατίων παραγωγής. Αν λ.χ. υφίσταται παραγωγή με εκτόνωση ζώνης αερίου και με εισροή νερού, τότε η απόδοση του ταμιευτήρα θα διαφέρει σημαντικά αν τα φρεάτια παραγωγής διαπερνούν τον σχηματισμό στο ανώτερο ή στο κατώτερο μέρος του, ή στην ιδανικότερη περίπτωση, αν βρίσκονται μεταξύ των διεπιφανειών αερίου-πετρελαίου και νερού-πετρελαίου.

2 Προσομοίωση Παραγωγής Ταμιευτήρων Πετρελαίου

2.1 Σε τι εξυπηρετεί η προσομοίωση;

Όπως έχει γίνει σαφές από τα παραπάνω, ένα σύστημα ταμιευτήρα-ρευστών είναι ιδιαίτερα περίπλοκο. Προκειμένου να είναι δυνατόν να εξεταστούν διαφορετικά σενάρια παραγωγής, είναι αναγκαία η επαρκής περιγραφή και προσέγγιση του συστήματος με τέτοιο τρόπο που να μπορεί να αξιοποιηθεί το πλήθος μετρήσεων και πληροφοριών που έχουν αποκτηθεί.

Ως εκ τούτου, δύναται να προσφέρει απαντήσεις σε πολλά ερωτήματα σχεδιασμού και βελτιστοποίησης εκμετάλλευσης ταμιευτήρων.

Η προσομοίωση ταμιευτήρων πετρελαίου (reservoir simulation) είναι ένα ακόμη βέλος στην φαρέτρα του μηχανικού πετρελαίου χωρίς δεν αντικαθιστά τις «παραδοσιακές» μεθόδους. Απεναντίας τις συμπληρώνει και εν μέρει τις επεκτείνει.

Μερικά ερωτήματα που η προσομοίωση ταμιευτήρων δύναται να απαντήσει είναι (Aziz, et al., 1979):

- Ποιο πιθανό σενάριο εκμετάλλευσης επιτρέπει την μεγιστοποίηση της αποληψιμότητας και σε τι βάθος χρόνου;
- Για ποιο λόγο δεν ανταποκρίνεται ο ταμιευτήρας στις προβλέψεις προηγούμενων μελετών ή προσομοιώσεων;
- Από ποιο μέρος του ταμιευτήρα προέρχεται το μεγαλύτερο μέρος της παραγωγής;

Τα μοντέλα προσομοίωσης απαιτούν ολοκληρωμένη προσέγγιση στην καταγραφή των ιδιοτήτων του ταμιευτήρα. Αυτό σημαίνει επίσης πως η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων τους είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την ποιότητα των δεδομένων που παρέχονται (Islam, et al., 2010).

Η απλούστερη περίπτωση μοντελοποίησης είναι αυτή της μεθόδου ισοζυγίου μάζας σε ένα νοητό tank απουσία πορώδους μέσου για την περιγραφή του οποίου χρησιμοποιούνται μέσες τιμές των ιδιοτήτων του ρευστού του ταμιευτήρα.

Στα πλαίσια της παρούσης εργασίας, θα αναπτυχθούν μοντέλα τα οποία θα λαμβάνουν υπόψη τις ιδιότητες του πορώδους μέσου και την κατανομή τους στον χώρο.

2.2 Ανάπτυξη μοντέλων προσομοίωση ταμειυτήρα

Όλα τα δεδομένα που έχουν συλλεχθεί κατά το στάδιο ανίχνευσης υδρογονανθράκων από τις γεωλογικές και γεωφυσικές μελέτες και των ερευνητικών γεωτρήσεων ως σημειακά δεδομένα κατανέμονται στον χώρο με χρήση γεωστατιστικών μεθόδων.

Στην συνέχεια, γίνεται η «χαρτογράφηση» τους σε ένα τρισδιάστατο μοντέλο, το οποίο έχει διακριτοποιηθεί σε μικρά «κελιά» (blocks) τοπικά ισότροπων τμημάτων του ταμειυτήρα. Η διακριτοποίηση αυτή επιτρέπει την μεταβολή των ιδιοτήτων του πορώδους μέσου στον χώρο, λαμβάνοντας έτσι υπόψη ετερογένεια των πετρωμάτων (Islam, et al., 2010).

Το αποτέλεσμα είναι η γνώση βασικών ιδιοτήτων που περιγράφουν το πετρελαιοφόρο στρώμα όπως το πορώδες, η διαπερατότητα, ο βαθμός κορεσμού, η λιθολογική σύσταση και η σύσταση των ρευστών προσαρμοσμένα στην ακριβή γεωμετρία του ταμειυτήρα. Το μοντέλο αυτό που έχει αναπτυχθεί με αυτήν την διαδικασία αποκαλείται στατικό, καθώς δεν συμπεριλαμβάνει φαινόμενα ροής.

Έπειτα, διατυπώνεται με εξισώσεις το μαθηματικό μοντέλο που ορίζει την ροή και τις φυσικές διεργασίες, και λαμβάνονται αρχικές τιμές βάσει του προαναφερθέντος στατικού μοντέλου. Πλέον γίνεται λόγος για δυναμικό μοντέλο.

Αφού υπάρξουν τα πρώτα δεδομένα παραγωγής, όλες οι παράμετροι του μοντέλου επανεξετάζονται, ιδίως αν υπάρχει απόκλιση μεταξύ πραγματικής και προβλεπόμενης παραγωγής, υποστηρίζοντας επόμενους υπολογισμούς και διορθώνοντας προηγούμενους.

Η διαδικασία αυτή επανεξέτασης του μοντέλου καθώς με την παραγωγή προκύπτουν νεότερα δεδομένα, δεν περιορίζεται αποκλειστικά στα πρώτα στάδια της εκμετάλλευσης, αλλά δύναται να συνεχίσει καθ' όλη την «ζωή» του ταμειυτήρα. Αυτή η αξιοποίηση της «ιστορίας» του ταμειυτήρα προκειμένου να ταυτιστούν οι προβλέψεις του μοντέλου με τις πραγματικές, αποκαλείται *history matching*.

Οι κύριες αρχές που διέπουν την λειτουργία του μοντέλου είναι η διατήρηση μάζας και ενέργειας. Ακόμη, η διατήρηση ορμής εκφράζεται από τον νόμο του Darcy που διέπει την ροή ρευστών εντός πορώδους μέσου. Λόγω της αργής ταχύτητας της κίνησης των ρευστών σε πορώδες μέσο, θεωρείται πως υπάρχει πάντα θερμοδυναμική ισορροπία μεταξύ των φάσεων (Tarek, 2006).

Οι προκύπτουσες μη-γραμμικές διαφορικές εξισώσεις παρουσιάζουν ιδιαίτερη δυσκολία στην αναλυτική επίλυσή τους. Γι αυτό τον λόγο η λύση τους προσεγγίζεται αριθμητικά, διαδικασία που γίνεται σε κάθε χρονικό «βήμα» (timestep), καθιστώντας απαραίτητη την διακριτοποίηση όχι μόνο του χώρου αλλά και του χρόνου.

2.3 Είδη μοντέλων προσομοίωσης

2.3.1 Γιατί υπάρχουν πολλά μοντέλα;

Ένα ζήτημα της προσομοίωσης ταμειυτήρων είναι το υπολογιστικό κόστος, οι ώρες δηλαδή που απαιτούνται από ένα δίκτυο υπολογιστών για να προσομοιωθεί το εκάστοτε σενάριο παραγωγής.

Ένας τρόπος να μειωθεί αυτό το κόστος, πέραν της διεύρυνσης του αξιοποιούμενου δικτύου υπολογιστών, είναι το λεγόμενο upscaling. Πρόκειται για την αντικατάσταση πολλών μικρών κελιών με μεγαλύτερα, με ισοδύναμα μεγέθη ροής, όπου χάνεται όμως μέρος της λεπτομέρειας του μοντέλου. Η επιλογή του εύρους της αντικατάστασης γίνεται ώστε να μπορεί ολοκληρωθεί ένα σενάριο εκμετάλλευσης σε λογικό χρόνο (λ.χ. εντός μιας νύχτας). Ένα στατικό μοντέλο μπορεί να είναι της τάξης των 10^7 - 10^8 κελιών ενώ το αντίστοιχο δυναμικό 10^5 - 10^6 (Islam, et al., 2010).

Πίνακας 4: Υπολογιστικό κόστος ενδεικτικών σεναρίων εκμετάλλευσης

Ταμειυτήρας	Μέγεθος (εκατομμύρια κελιών)	Ιστορικό (έτη)	Χρόνος CPU (ώρες)	
			64 Nodes	128 Nodes
Carbonate	1.2	27	3	1.7
Sandstone	1.3	49	4.5	2.5
Carbonate (w/ gas cap)	3.9	10	-	2.0
Carbonate	2.5	2.5	-	4.0

Ένας άλλος τρόπος είναι να χρησιμοποιηθούν απλούστερα δυναμικά μοντέλα που περιγράφουν την θερμοδυναμική συμπεριφορά των ρευστών, όπως λ.χ. black oil models έναντι μοντέλων πλήρους σύστασης (fully compositional), τα οποία αναλύονται στην συνέχεια.

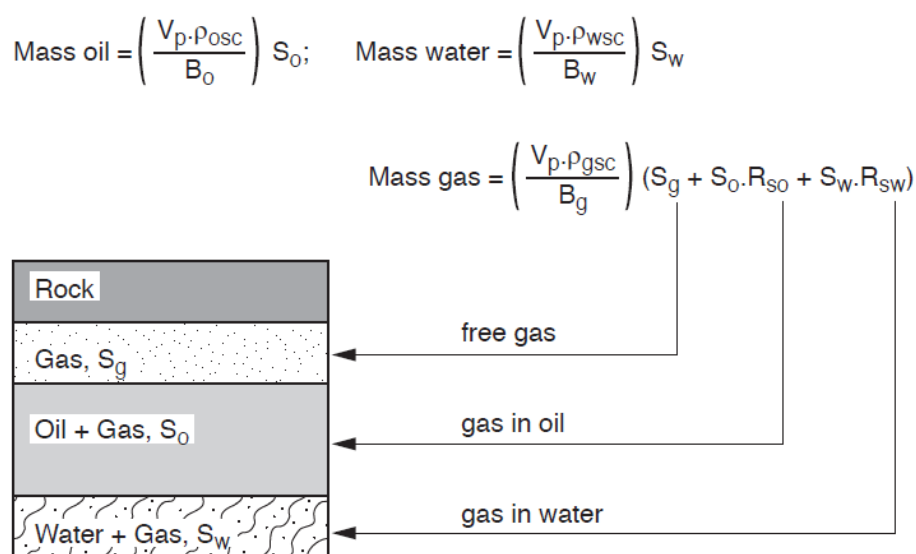
Πίνακας 5: Υπολογιστικό κόστος και αξιοποίηση μοντέλων

Προσομοίωση	Βαθμός δυσκολίας	Σχετικό υπολογιστικό κόστος	Αξιοποίηση στον κλάδο
Black Oil Model	Σύνηθες	Μικρό = 1	Ευρύτατη
Compositional	Δύσκολο Εξειδικευμένο	Μεγάλο (x3 – x20)	Μεσαία, υψηλή σε κάποιες εταιρίες
Compositional πηκτικό πετρέλαιο	Δύσκολο	Μεγάλο (x5 – x30)	Μεσαία

2.3.2 Black Oil Model

Αποτελεί με διαφορά τον ευρύτερα χρησιμοποιούμενο τύπο μοντέλων ρευστών στην βιομηχανία για μονοφασική, διφασική και τριφασική (αέριο, πετρέλαιο και νερό) ροή. Κάθε φάση αντιμετωπίζεται σαν ένα επιμέρους ψευδοσυστατικό όπου μονάχα το αέριο δύναται να διαλυθεί στο πετρέλαιο και –ανάλογα με το εκάστοτε λογισμικό– στο νερό, με χρήση των όρων R_s (για το πετρέλαιο) και R_{sw} (για το νερό) με μονάδες μέτρησης scf/STB.

Στην ουσία θεωρείται πως κάθε σύσταση ρευστών υδρογονανθράκων εντός του ταμιευτήρα μπορεί να προκύψει από την ανάμιξη των δύο ψευδοσυστατικών αερίου και πετρελαίου κανονικών συνθηκών, σε αναλογία που υπαγορεύει το R_s .

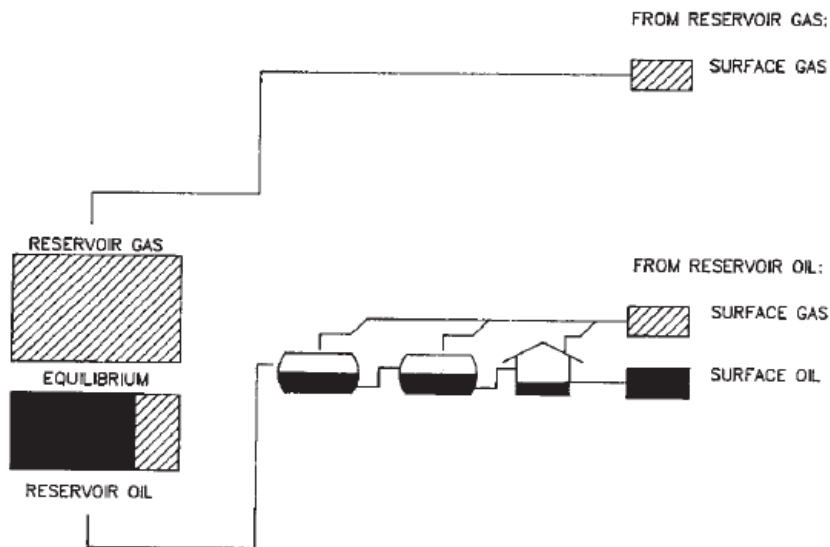


Σχήμα 8: Αναπαράσταση ενός κελιού σε Black Oil Model

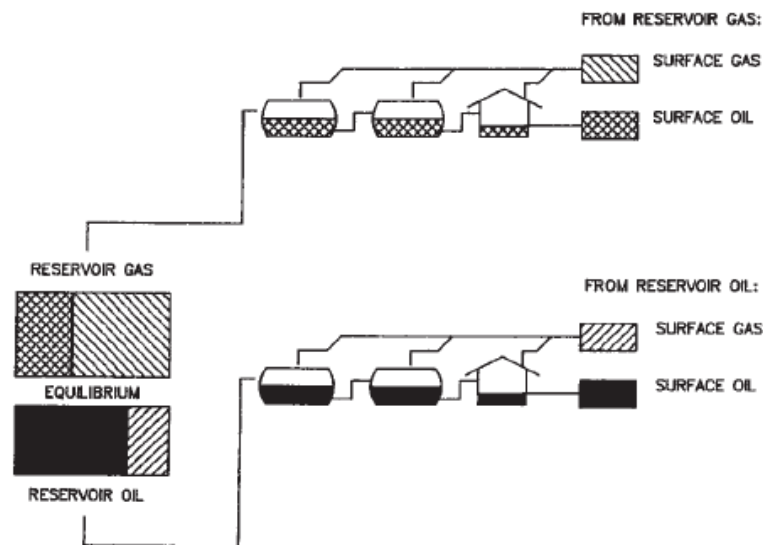
Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιείται ευρύτατα για μοντελοποίηση εκμεταλλεύσεων ταμιευτήρων με μηχανισμό αερίου εν διαλύσει, έγχυση νερού στον ταμιευτήρα και έγχυση αερίου με την παραδοχή ότι αυτό πρακτικά δεν αναμιγνύεται με τα άλλα ρευστά.

Επίσης, πολλές φορές το μοντέλο αυτό αναφέρεται και ως look-up table ή **Black Oil Table** model επειδή χρησιμοποιεί έναν πίνακα με τον οποίο συσχετίζει τα απαιτούμενα μεγέθη στις διάφορες πιέσεις που αναμένεται να απαντηθούν. Τα μεγέθη αυτά είναι η αναλογία διαλυμένου αερίου προς τον όγκο του πετρελαίου R_s , τον αντίστοιχο λόγο για το νερό R_{sw} (αν υποστηρίζεται από το εκάστοτε λογισμικό), οι ογκομετρικοί συντελεστές σχηματισμού κάθε φάσης B_o , B_g , & B_w (για την μετατροπή των όγκων από συνθήκες ταμιευτήρα σε κανονικές), καθώς και το ιξώδες κάθε φάσης μ_o , μ_g , μ_w (εκφράζοντας την κινητικότητα κάθε φάσης).

Αν στα παραπάνω προστεθεί και ο λόγος σχηματισμού πετρελαίου από αέριο λόγω ανάδρομης συμπύκνωσης r_s (Condensate Gas Ratio, CGR, STB/scf) τότε γίνεται λόγος για **modified Black Oil Table** model (Whitson, et al., 2000).



Σχήμα 9: Αναπαράσταση αρχής λειτουργίας Black Oil Model (Whitson, et al., 2000)

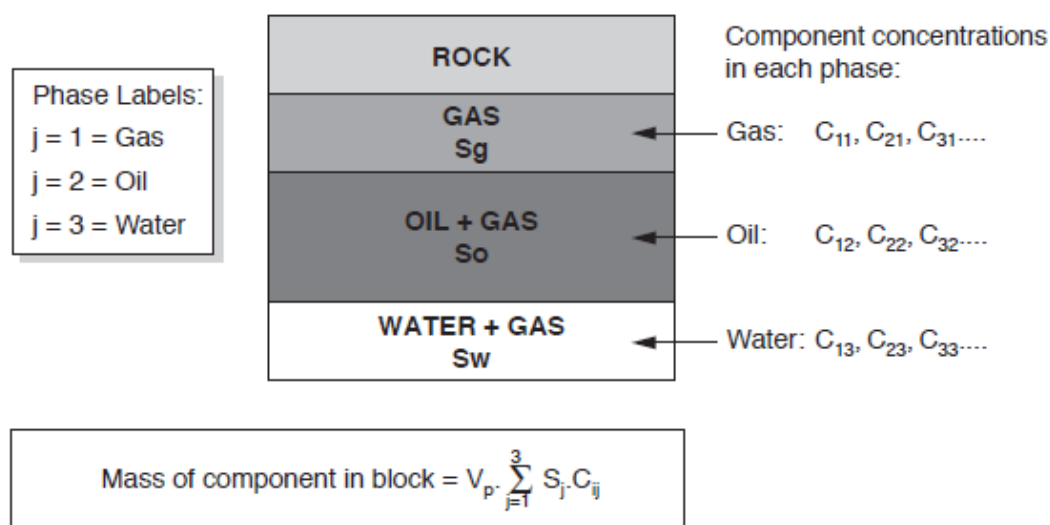


Σχήμα 10: Αναπαράσταση αρχής λειτουργίας modified Black Oil Model (Whitson, et al., 2000)

2.3.3 Fully Compositional Model

Ένα μοντέλο πλήρους σύστασης (Fully Compositional Model) απαρτίζεται και αυτό από τρεις φάσεις όπως το black oil model, με την σημαντική διαφορά πως τα επιμέρους συστατικά της σύστασης των υδρογονανθράκων υπολογίζονται ρητά και δίχως την γε-νίκευση σε φάσεις μόνο, όπως στο black oil model. Συνεπώς εφαρμόζεται η διατήρηση

μάζας όχι ανά φάση, αλλά ανά συστατικό, επιτρέποντας την μεταφορά τους από την μία φάση στην άλλη και δεν περιορίζεται σε «πακέτα» αερίου και πετρελαίου.



Σχήμα 11: Αναπαράσταση ενός κελιού σε Fully Compositional Model

Η χρήση του μοντέλου αυτού ενδείκνυται σε περιπτώσεις όπως λ.χ. όταν μελετάται ένα πτητικό πετρέλαιο, λόγω του ότι, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, μικρή μεταβολή της πίεσης μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλη αλλαγή της κατανομής της αέριας και της υγρής φάσης.

Μερικές διεργασίες που δύναται να μοντελοποιηθούν με την συγκεκριμένη μέθοδο είναι η έγχυση CO_2 , έγχυση αερίου σε πτητικούς ταμιευτήρες και ανακύκλωση αερίου σε ταμιευτήρες αερίου συμπυκνώματος.

2.3.4 Μοντέλα εξειδικευμένων εφαρμογών

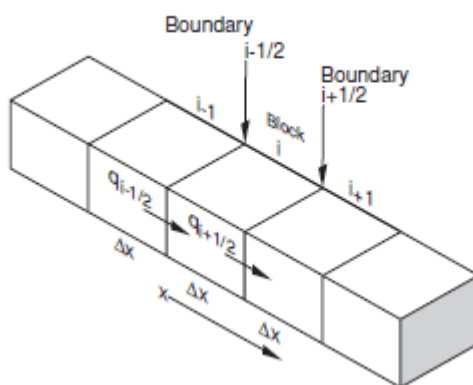
Έχουν αναπτυχθεί και άλλα μοντέλα, για την ανάγκη μοντελοποίησης πιο εξειδικευμένων χρήσεων. Λ.χ. το μοντέλο χημικής έγχυσης (“**Chemical Flood**”) δημιουργήθηκε προκειμένου να υπολογισθούν τα επιπλέον φαινόμενα που προκύπτουν με την έγχυση πολυμερών (polymers) ή επιφανειοδραστικών ουσιών (surfactants). Τα πρώτα απαιτούν την μοντελοποίηση της διάχυσης των πολυμερών στο νερό ενώ οι δεύτερες δύναται να σχηματίσουν τριφασικά γαλακτώματα μαζί με πετρέλαιο και αέριο.

Ένα άλλο μοντέλο το οποίο χρήζει αναφοράς είναι το θερμικό (“**Thermal Model**”) όπου μοντελοποιούνται η επιπτώσεις της αύξησης της θερμοκρασίας του ταμιευτήρα σε διεργασίες όπως έγχυσης ατμού ή καύσης με έγχυση αέρα, με στόχο την μεταβολή του ιξώδους και την αύξηση της παραγωγής.

2.4 Απλό παράδειγμα προσομοίωσης ροής σε ταμιευτήρα

Θα εξεταστεί πως μπορεί να προσεγγιστεί η μοντελοποίηση της ροής ενός μονοφασικού οριζόντιου ταμιευτήρα για ομοιογενή και ασυμπίεστο σχηματισμό, πλήρως κορεσμένου με μη-πτητικό ρευστό.

Έστω το κελί «block» i ταμιευτήρα το οποίο περιβάλλεται από τα γειτονικά του, όπως φαίνεται στο Σχήμα 12.



Σχήμα 12: Τμήμα διακριτοποιημένου «μονοδιάστατου» ταμιευτήρα

Τα όρια του κελιού ορίζονται ως:

- $(i-1/2)$ μεταξύ των κελιών $(i-1)$ και i
- $(i+1/2)$ μεταξύ των κελιών i και $(i+1)$

Συνεπώς οι όροι $q_{i-\frac{1}{2}}$ και $q_{i+\frac{1}{2}}$ εκφράζουν την ογκομετρική παροχή διαμέσου του ορίου $i - \frac{1}{2}$ και $i + \frac{1}{2}$ αντίστοιχα.

Ακόμη, όλα τα σχετικά μεγέθη για κάθε κελί θα έχουν τον αντίστοιχο δείκτη, λ.χ. στο κελί i , το πορώδες συμβολίζεται με φ_i , η διαπερατότητα ως k_i κοκ.

Η μεταβολή μάζας στο block i για μεταβολή χρόνου Δt μπορεί να εκφραστεί ως προς τον χώρο ως εξής:

$$\left[(q\rho)_{i-\frac{1}{2}} \Delta t \right] - \left[(q\rho)_{i+\frac{1}{2}} \Delta t \right] = - \left[(q\rho)_{i+\frac{1}{2}} - (q\rho)_{i-\frac{1}{2}} \right] \Delta t$$

Όπου :

- q η ογκομετρική παροχή
- ρ η πυκνότητα
- t ο χρόνος

Η ίδια ποσότητα δύναται να εκφραστεί και ως προς τον χρόνο:

$$[(\rho\varphi)_{t+\Delta t} - (\rho\varphi)_t]\Delta x A$$

Όπου:

- φ το πορώδες
- x η απόσταση στην οριζόντια διάσταση
- A η υδραυλική επιφάνεια διά της οποίας ρέει το ρευστό (βλ. σκιασμένο τμήμα στο Σχήμα 12)

Εξισώνοντας τις δύο εκφράσεις προκύπτει:

$$[(\rho\varphi)_{t+\Delta t} - (\rho\varphi)_t]\Delta x A = - \left[(q\rho)_{i+\frac{1}{2}} - (q\rho)_{i-\frac{1}{2}} \right] \Delta t$$

$$\frac{(\rho\varphi)_{t+\Delta t} - (\rho\varphi)_t}{\Delta t} = - \frac{\left(\frac{q\rho}{A} \right)_{i+1/2} - \left(\frac{q\rho}{A} \right)_{i-1/2}}{\Delta x}$$

Και επειδή $q = uA \Rightarrow u = q/A$, όπου u η ταχύτητα,

$$\frac{(\rho\varphi)_{t+\Delta t} - (\rho\varphi)_t}{\Delta t} = - \frac{(u\rho)_{i+1/2} - (u\rho)_{i-1/2}}{\Delta x}$$

Λαμβάνοντας τα όρια για $\Delta t, \Delta x \rightarrow 0$ προκύπτει:

$$\frac{\partial(\rho\varphi)}{\partial t} = - \frac{\partial(u\rho)}{\partial x}$$

που είναι η διαφορική εξίσωση που εκφράζει την διατήρηση μάζας. Ο όρος της ταχύτητας μπορεί να αντικατασταθεί από τον νόμο του Darcy:

$$u = - \frac{k}{\mu} \left(\frac{\partial P}{\partial x} - \rho g \frac{\partial z}{\partial x} \right)$$

Όπου:

- k η διαπερατότητα του σχηματισμού
- μ το ιξώδες του ρευστού
- P η πίεση
- g η επιτάχυνση της βαρύτητας
- z η απόσταση κατά τον κατακόρυφο άξονα

Που για τον υπό μελέτη οριζόντιο ταμιευτήρα απλοποιείται ως εξής:

$$u = -\frac{k}{\mu} \left(\frac{\partial P}{\partial x} \right)$$

Αντικαθιστώντας στην διαφορική:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\rho k}{\mu} \left(\frac{\partial P}{\partial x} \right) \right]$$

Και επειδή η πυκνότητα και το πορώδες μεταβάλλονται με την πίεση:

$$\left(\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial P} \right) \left(\frac{\partial P}{\partial t} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\rho k}{\mu} \left(\frac{\partial P}{\partial x} \right) \right]$$

Η παραπάνω εξίσωση είναι μια μη-γραμμική διαφορική εξίσωση, ήτοι οι όροι ρ , ϕ , μ κλπ. εξαρτώνται από την -άγνωστη- πίεση (δηλαδή στην ουσία γίνεται λόγος για $\rho(P)$, $\phi(P)$, $\mu(P)$ κλπ). Τέτοια προβλήματα είναι δύσκολο να λυθούν με αναλυτική προσέγγιση και συχνά απαιτούν πλήθος παραδοχών. Αντ' αυτού η επίλυση προσεγγίζεται με αριθμητικές μεθόδους.

Στην συνέχεια παρατίθενται οι παραδοχές που τέθηκαν στην αρχή (ομοιογενής και ασυμπίεστος σχηματισμός, μη-πτητικό ρευστό).

Παραδοχές:

- Η διαπερατότητα και το πορώδες παραμένει σταθερό με την πίεση και την θέση (ομοιογενής και ασυμπίεστος σχηματισμός) όπως και το ιξώδες.
- Ο ρυθμός μεταβολής πίεσης για μικρές αποστάσεις (pressure gradients) είναι "μικρός" ώστε:

$$\left(\frac{\partial P}{\partial x} \right)^2 \approx 0$$

- Η συμπιεστότητα του ρευστού είναι σταθερή, όπου συμπιεστότητα:

$$c = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial P} \right)$$

Το πρώτο μέρος της πρώτης παραδοχής είναι ιδιαίτερα απλουστευτικό για ένα πραγματικό σύστημα, λόγω του ότι εισάγει ομοιογένεια, αλλά επιτρέπει την ευκολό-

τερη έκφραση του προβλήματος, χάριν του χρησιμοποιούμενου παραδείγματος. Η παραδοχή του ασυμπίεστου σχηματισμού όμως δεν είναι μακράν της πραγματικότητας, δεδομένου πως $c_{fluid} \gg c_{rock}$.

Επίσης, το τελευταίο μέρος της παραδοχής (ότι το ιξώδες παραμένει σταθερό με την πίεση και την θέση) θα μπορούσε να θεωρηθεί ότι αφορά μη πτητικά πετρώματα με περιορισμένη κινητικότητα.

Η δεύτερη παραδοχή εξυπηρετεί την ζητούμενη απλούστευση στο συγκεκριμένο παράδειγμα και κατ' ουσία σημαίνει πως η εστίαση γίνεται στους κύριους όρους και όχι σε αυτούς που δρουν συμπληρωματικά.

Η τρίτη παραδοχή μπορεί επίσης να αποδοθεί σε ένα μη πτητικό ρευστό.

Εφαρμόζοντας την πρώτη παραδοχή στην διαφορική, αυτή γίνεται:

$$\varphi \left(\frac{\partial \rho}{\partial P} \right) \left(\frac{\partial P}{\partial t} \right) = \frac{k}{\mu} \frac{\partial}{\partial x} \left[\rho \left(\frac{\partial P}{\partial x} \right) \right] \Leftrightarrow \frac{\varphi \mu}{k} \left(\frac{\partial \rho}{\partial P} \right) \left(\frac{\partial P}{\partial t} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left[\rho \left(\frac{\partial P}{\partial x} \right) \right]$$

εξ. 1

Εστιάζοντας στο δεξί μέρος της παραπάνω εξίσωσης:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left[\rho \left(\frac{\partial P}{\partial x} \right) \right] &= \left(\frac{\partial \rho}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial P}{\partial x} \right) + \rho \left(\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} \right) \\ &= \left(\frac{\partial \rho}{\partial P} \right) \left(\frac{\partial P}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial P}{\partial x} \right) + \rho \left(\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} \right) \\ &= \left(\frac{\partial \rho}{\partial P} \right) \left(\frac{\partial P}{\partial x} \right)^2 + \rho \left(\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} \right) \end{aligned}$$

Εφαρμόζοντας την δεύτερη παραδοχή:

$$\left(\frac{\partial P}{\partial x} \right)^2 \approx 0$$

Το δεξί μέρος μπορεί να απλοποιηθεί στην ακόλουθη έκφραση:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\rho \left(\frac{\partial P}{\partial x} \right) \right] = \rho \left(\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} \right)$$

Αντικαθιστώντας τώρα στην εξίσωση 1:

$$\frac{\mu\phi}{k} \left(\frac{\partial \rho}{\partial P} \right) \left(\frac{\partial P}{\partial t} \right) = \rho \left(\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} \right)$$

Και εφαρμόζοντας την τελευταία παραδοχή πως η συμπιεστικότητα του ρευστού δεν μεταβάλλεται με την πίεση:

$$\frac{\mu\phi}{k} \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial P} \right) \left(\frac{\partial P}{\partial t} \right) = \left(\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} \right)$$

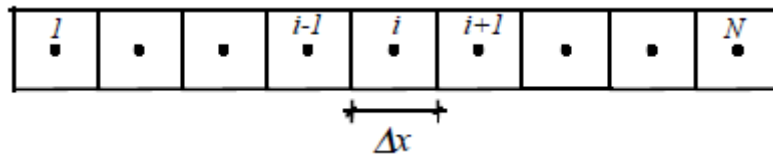
$$\frac{\mu\phi c}{k} \left(\frac{\partial P}{\partial t} \right) = \left(\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} \right)$$

$$\boxed{\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} = \left(\frac{\mu\phi c}{k} \right) \frac{\partial P}{\partial t}}$$

εξ. 2

Η παραπάνω διαφορική εξίσωση περιγράφει την ροή ενός μονοφασικού μη-πτητικού ρευστού, σε μονοδιάστατο, οριζόντιο ταμιευτήρα, πλήρως κορεσμένου στο εν λόγω ρευστό, θεωρώντας σταθερούς τους όρους “διάχυσης” (ιξώδες, πορώδες, συμπιεστικότητα ρευστού, διαπερατότητα), σε καρτεσιανές συντεταγμένες.

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, η διαφορική θα προσεγγιστεί αριθμητικά. Προκειμένου να επιτευχθεί το παραπάνω, αξιοποιείται η ιδέα της διακριτοποίησης του ταμιευτήρα όπως και προηγουμένως. Συνεπώς, ο ταμιευτήρας διακριτοποιείται ως εξής: κατά τον κύριο άξονά του χ'χ σε N αριθμό blocks μήκους Δx, με δείκτη i=1...N που αναφέρεται στο κέντρο του εκάστοτε κελιού. Επιπλέον διακριτοποιείται και ο χρόνος σε “χρονικά βήματα” (timesteps) Δt.



Σχήμα 13: Σχηματική αναπαράσταση του υπό μελέτη ταμιευτήρα (Kleppe, 2017)

Έτσι το πρόβλημα προσδιορίζεται ως η εύρεση της πίεσης σε όλο το μήκος του ταμιευτήρα για κάθε timestep.

Για σταθερό χρόνο, η μεταβολή της πίεσης από κελί σε κελί μπορεί να προσεγγισθεί αναπτύσσοντας με σειρές Taylor, και προς τις δύο κατευθύνσεις ($\pm \Delta x$):

$$P(x + \Delta x, t) = P(x, t) + \frac{\Delta x}{1!} P'(x, t) + \frac{(\Delta x)^2}{2!} P''(x, t) + \frac{(\Delta x)^3}{3!} P'''(x, t) + \dots$$

$$P(x - \Delta x, t) = P(x, t) + \frac{(-\Delta x)}{1!} P'(x, t) + \frac{(-\Delta x)^2}{2!} P''(x, t) + \frac{(-\Delta x)^3}{3!} P'''(x, t) + \dots$$

Προσθέτοντας κατά μέλη και λύνοντας ως προς την 2^η παράγωγο:

$$P''(x, t) = \frac{P(x + \Delta x, t) - 2P(x, t) + P(x - \Delta x, t)}{(\Delta x)^2} + \frac{(\Delta x)^2}{12} P'''(x, t) + \dots$$

Εκφράζοντας την παραπάνω εξίσωση με τους δείκτες όπως καθορίστηκαν κατά την διακριτοποίηση:

$$\left. \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} \right|_i^{t+\Delta t} = \frac{P_{i+1}^t - 2P_i^t + P_{i-1}^t}{(\Delta x)^2} + O(\Delta x^2)$$

Που αποτελεί την “κεντρική” (επειδή λήφθηκαν υπόψη και οι δύο κατευθύνσεις) προσέγγιση της δεύτερης παραγώγου.

Ο τελευταίος όρος “Ο” απορρίπτεται στην συνέχεια και έτσι ουσιαστικά εκφράζει το σφάλμα της διακριτοποίησης. Όσο μικρότερο είναι το μήκος του κελιού κατά τον άξονα x, τόσο μικρότερο είναι και το σφάλμα.

Αντίστοιχα (αλλά για μία μόνο “κατεύθυνση”) προκύπτει και η προσέγγιση της παραγώγου της πίεσης ως προς τον χρόνο:

$$\left. \frac{\partial P}{\partial t} \right|_i^{t+\Delta t} = \frac{P_i^{t+\Delta t} - P_i^t}{\Delta t} + O(\Delta t)$$

Αντικαθιστώντας στην διαφορική (εξ. 2), προκύπτει:

$$\frac{P_{i+1}^t - 2P_i^t + P_{i-1}^t}{(\Delta x)^2} \approx \left(\frac{\varphi \mu c}{k} \right) \frac{P_i^{t+\Delta t} - P_i^t}{\Delta t}$$

Επειδή στα άκρα πάντα θα καθορίζονται οριακές συνθήκες (boundary conditions, BCs) έστω και αν είναι απλώς μηδενικής παροχής ($Q=0$), η παραπάνω σχέση ισχύει για τα κελιά με δείκτη $i = 2 \dots N-1$.

Ορίζοντας τις BCs για πίεση (P-BCs), χρειάζεται να οριστούν πιέσεις σε αποστάσεις ίσες με το ήμισυ του Δx , ή σύμφωνα με το σύστημα των δεικτών $i \pm 1/2$. Συγκεκριμένα, επειδή εδώ ενδιαφέρουν οι BCs στα άκρα, ορίζονται οι P_L για $i=1/2$ και P_R για $i=N-1/2$ (για Left και Right αντίστοιχα) που παραμένουν σταθερά για κάθε $t > 0$. Ο ορισμός με $1/2$ του Δx και των δεικτών αποτρέπει την απλή αντικατάσταση στον παραπάνω τύπο.

Εφαρμόζοντας και πάλι όμως την ίδια διαδικασία με σειρές Taylor, χρησιμοποιώντας κατάλληλες θέσεις ώστε το ανάπτυγμα να αφορά το πρώτο block, προκύπτουν οι εξισώσεις:

$$P(x_2, t) = P(x_1, t) + \frac{\Delta x}{1!} P'(x_1, t) + \frac{\Delta x^2}{2!} P''(x_1, t) + \frac{\Delta x^3}{3!} P'''(x_1, t) + \dots$$

$$P(x=0, t) = P(x_1, t) + \frac{\left(-\Delta x/2\right)}{1!} P'(x_1, t) + \frac{\left(-\Delta x/2\right)^2}{2!} P''(x_1, t) + \frac{\left(-\Delta x/2\right)^3}{3!} P'''(x_1, t) + \dots$$

Συνδυάζοντας τις δύο εξισώσεις και εκφράζοντας το αποτέλεσμα με δείκτες, προκύπτει:

$$\left. \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} \right|_1^t \approx \frac{P_2^t - 3P_1^t + 2P_L}{\frac{3}{4}(\Delta x)^2}$$

Και αντίστοιχα για το τελευταίο block:

$$\left. \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} \right|_N^t \approx \frac{2P_R - 3P_N^t + P_{N-1}^t}{\frac{3}{4}(\Delta x)^2}$$

Με αυτόν τον τρόπο μπορούν να εκφραστούν οι πιέσεις-ως-περιορισμός από γεωτρήσεις έγχυσης και παραγωγής, θέτοντας ως P_L και P_R το κατάλληλο BHP³.

³ BHP: Bottom Hole Pressure, η πίεση που επικρατεί στο βαθύτερο σημείο της γεώτρησης.

Ακόμη, δύναται να καθορίζονται BCs με ρυθμούς ογκομετρικής ροής Q , δηλαδή για την αριστερή πλευρά:

$$Q_L = -\frac{kA}{\mu} \left(\frac{\partial P}{\partial x} \right)_{x=0}$$

Εφαρμόζοντας και πάλι σειρές Taylor, για την πρώτη παράγωγο της πίεσης στις θέσεις $x_1 + \Delta x/2$ και $x=0$ προκύπτει:

$$P'(x_1 + \Delta x/2, t) = P'(x_1, t) + \frac{\Delta x/2}{1!} P''(x_1, t) + \frac{(\Delta x/2)^2}{2!} P'''(x_1, t) + \dots$$

$$P'(x=0, t) = P'(x_1, t) + \frac{-\Delta x/2}{1!} P''(x_1, t) + \frac{(-\Delta x/2)^2}{2!} P'''(x_1, t) + \dots$$

Λύνοντας ως προς την δεύτερη παράγωγο:

$$P''(x_1, t) \approx \frac{P'(x_1 + \Delta x/2, t) - P'(x=0, t)}{\Delta x}$$

$$P''(x_1, t) \approx \frac{P'(x_1 + \Delta x/2, t) + Q_L \frac{\mu}{kA}}{\Delta x}$$

Όμως:

$$P'(x_1 + \Delta x/2, t) \approx \frac{P(x_2, t) - P(x_1, t)}{\Delta x}$$

Οπότε:

$$\left. \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} \right|_1 \approx \frac{P_2^t - P_1^t}{\Delta x^2} + Q_L \frac{\mu}{kA \Delta x}$$

και αντίστοιχα:

$$\left. \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} \right|_N \approx \frac{P_N^t - P_{N-1}^t}{\Delta x^2} - Q_R \frac{\mu}{kA \Delta x}$$

Ορίζοντας επίσης και initial conditions $P_{init} = P_0$ πλέον μπορεί να πραγματοποιηθεί η επίλυση.

Οι τελικές εξισώσεις που προκύπτουν από κατάλληλες αντικαταστάσεις στην εξ. 2 είναι:

- για $i=1$ και P-BC:

$$P_1^{t+\Delta t} = P_1^t + \frac{4}{3} \frac{\Delta t}{\Delta x^2} \frac{k}{\phi \mu c} (P_2^t - 3P_1^t + 2P_L)$$

- για $i=1$ και Q-BC:

$$P_1^{t+\Delta t} = P_1^t + \frac{k}{\phi \mu c} \frac{\Delta t}{\Delta x^2} (P_2^t - P_1^t) + Q_L \frac{1}{\phi c A} \frac{\Delta t}{\Delta x}$$

- για $i=2 \dots N-1$:

$$P_i^{t+\Delta t} = P_i^t + \frac{\Delta t}{\Delta x^2} \frac{k}{\phi \mu c} (P_{i+1}^t - 2P_i^t + P_{i-1}^t)$$

- για $i=N$ και P-BC:

$$P_N^{t+\Delta t} = P_N^t + \frac{4}{3} \frac{\Delta t}{\Delta x^2} \frac{k}{\phi \mu c} (2P_R - 3P_N^t + P_{N-1}^t)$$

- για $i=N$ και Q-BC:

$$P_N^{t+\Delta t} = P_N^t + \frac{k}{\phi \mu c} \frac{\Delta t}{\Delta x^2} (P_N^t - P_{N-1}^t) - Q_R \frac{1}{\phi c A} \frac{\Delta t}{\Delta x}$$

Αυτό το είδος επίλυσης για χρόνο t αποκαλείται explicit. Αν αντιθέτως λαμβανόταν προσέγγιση προς τα εμπρός (t και $t+\Delta t$) στο στάδιο των αναπτυγμάτων με σειρές Taylor, θα προέκυπτε σημαντικά πολυπλοκότερο σύστημα διαφορικών εξισώσεων που θα έπρεπε να λυθεί ταυτόχρονα. Η μέθοδος αυτή καλείται implicit.

Συγκεκριμένα, θα προέκυπταν διαφορικές εξισώσεις της μορφής (Kleppe, 2017):

$$a_i P_{i-1}^{t+\Delta t} + b_i P_i^{t+\Delta t} + c_i P_{i+1}^{t+\Delta t} = d_i, i = 1 \dots N$$

Θέτοντας:

$$\omega = \frac{\varphi \mu c}{k} \frac{\Delta x^2}{\Delta t}$$

και:

- $\alpha_1 = 0$
- $\alpha_i = 1, i = 2 \dots N$
- $b_1 = b_N = -3 - \frac{3}{4}\omega$
- $b_i = -2 - \omega, i = 2 \dots N$
- $c_N = 0$
- $c_i = 1, i = 1 \dots N - 1$
- $d_1 = -\frac{3}{4}\omega P_1^t - 2P_L$
- $d_i = -\omega P_i^t, i = 2 \dots N - 1$
- $d_N = -\frac{3}{4}\omega P_N^t - 2P_R$

Το παραπάνω σύστημα δύναται να επιλυθεί με αριθμητικές μεθόδους όπως αυτής της απαλοιφής κατά Gauss.

Παρά την εμφανώς απλούστερη περίπτωση της explicit περίπτωσης, και του μικρότερου υπολογιστικού κόστους που την συνοδεύει, σπανίως χρησιμοποιείται. Αυτό γιατί παρουσιάζει αστάθεια για μεγάλα timesteps. Μάλιστα, αν εφαρμοστεί ανάλυση κατά von Neumann μπορεί ναδειχθεί (Kleppe, 2017) πως το κριτήριο σταθερότητας είναι:

$$\Delta t \leq \frac{1}{2} \frac{\varphi \mu c}{k} \Delta x^2$$

Ο περιορισμός αυτός είναι σημαντικότερος διότι εξαρτάται τόσο από το μέγεθος του κελιού κατά την διακριτοποίηση (Δx) όσο και από τις ιδιότητες που περιγράφουν το σύστημα.

Αντίθετα, στην περίπτωση της implicit επίλυσης δεν υφίσταται τέτοιος περιορισμός και μπορεί ναδειχθεί ότι είναι σταθερή ανεξαρτήτως time step. Συνεπώς το επιπλέον υπολογιστικό κόστος μετριάζεται με μεγαλύτερα timesteps, ήτοι χρειάζεται να επαναληφθούν οι υπολογισμοί λιγότερες φορές για να καλυφθεί το χρονικό εύρος εκμετάλλευσης. Εδώ πρέπει να τονισθεί πως πολύ μεγάλο timestep εισάγει αβεβαιότητες στα αποτελέσματα (Kleppe, 2017). Στην πράξη, τα πακέτα λογισμικού σήμερα επιλέγουν το μέγεθος του timestep δυναμικά, δηλαδή δεν παραμένει το ίδιο για όλη την εξεταζόμενη διάρκεια εκμετάλλευσης.

3 Μελέτες PVT

3.1 Ανάγκη των μελετών

Προκειμένου να ανακτηθούν τα απαραίτητα δεδομένα για την συμπεριφορά ενός ταμειυτήρα πετρελαίου, έχουν αναπτυχθεί οι ακόλουθες πειραματικές διαδικασίες:

- Μελέτη Σταθερής Μάζας (Constant Composition Expansion)
- Μελέτη Διαφορικής Εξάτμισης (Differential Vaporization)
- Τεστ Διαχωριστήρα (separator test)
- Μελέτη ιξώδους

Η μελέτη ιξώδους αφορά τον προσδιορισμό του ιξώδους σε ένα εύρος πιέσεων. Οι υπόλοιπες τρεις (η μελέτη σταθερής μάζας μονάχα ύστερα από την τροποποίησή της σε σύνθετη, όπως θα αναλυθεί παρακάτω) όμως αποδίδουν όλες ογκομετρικούς συντελεστές σχηματισμού (Formation Volume Factor, B_i , όπου i η εκάστοτε υπό μελέτη φάση) και αναλογία αερίου εν διαλύσει προς πετρέλαιο (R_s).

Τα παραπάνω μεγέθη ορίζονται ως εξής:

$$B_i = \frac{V_i^{RC}}{V_i^{SC}}, \quad R_s = \frac{V_g^{SC}}{V_o^{SC}}$$

Όπου:

- V_i^{RC} ο όγκος της φάσης i σε συνθήκες P-T ταμειυτήρα (Reservoir Conditions)
- V_i^{SC} ο όγκος της φάσης i σε κανονικές συνθήκες (Standard Conditions)
- V_g^{SC} ο όγκος του αερίου σε κανονικές συνθήκες
- V_o^{SC} ο όγκος του πετρελαίου σε κανονικές συνθήκες

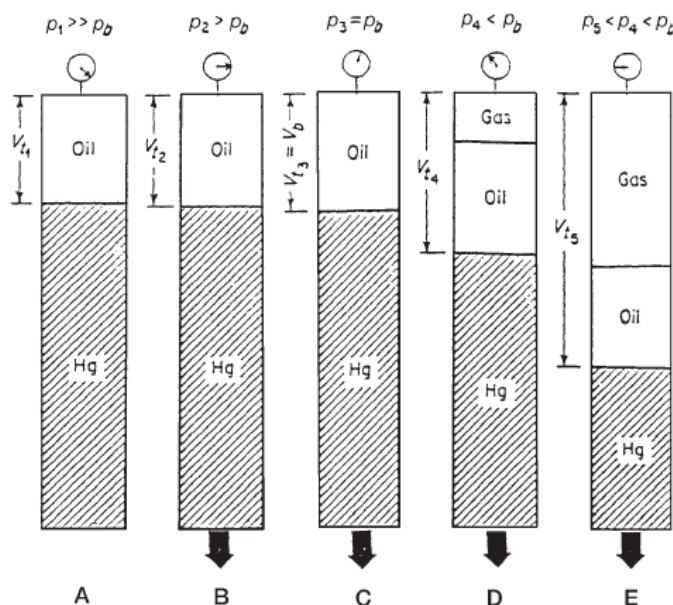
Ο λόγος R_s αποτελεί και ένδειξη της πτητικότητας του πετρελαίου. Όπως θα φανεί και παρακάτω, η μελέτη σταθερή μάζας (ύστερα από την τροποποίησή της) και διαφορικής εξάτμισης δίνουν τα παραπάνω μεγέθη για ένα εύρος πιέσεων ενώ το τεστ διαχωριστήρα καλύπτει την εκτόνωση του ρευστού στο σημείο κορεσμού του σε συνθήκες επιφάνειας σύμφωνα με τους διαχωριστήρες που χρησιμοποιούνται στην παραγωγή. Συνήθως χρησιμοποιείται ένας μόνο διαχωριστήρας προτού τα ρευστά οδηγηθούν στις κανονικές συνθήκες (Βαρότσης, 2010).

Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, τα μεγέθη αυτά αξιοποιούνται στον υπολογισμό των δεδομένων παραγωγής από το Black Oil Model. Εκτός αυτού, είναι απαραίτητα για πλήθος υπολογισμών στην μηχανική ταμειυτήρων, με ίσως πιο χαρακτηριστική την εφαρμογή τους στην μέθοδο ισοζυγίου μάζας.

3.2 Περιγραφή πειραματικών διαδικασιών και μεθόδων

3.2.1 Μελέτη σταθερής μάζας (CCE)

Στην μελέτη σταθερής μάζας, το δείγμα τοποθετείται σε κελί υψηλής πίεσης και θερμαίνεται στην θερμοκρασία ταμιευτήρα. Για τον έλεγχο της θερμοκρασίας χρησιμοποιείται είτε μανδύας κελιού κυκλοφορίας θερμού υγρού, είτε αερόλουτρο ρυθμιζόμενης θερμοκρασίας. Για την ρύθμιση της πίεσης παλαιότερα χρησιμοποιούνταν αντλία υδραργύρου (Hg) όπως στο Σχήμα 12, πλέον όμως αξιοποιούνται κελιά με πιστόνια και νερό.



Σχήμα 14: Σχηματική αναπαράσταση κελιού μελέτης σταθερής μάζας (Tarek, 2006)

Το δείγμα αρχικά συμπιέζεται στην αρχική πίεση του ταμιευτήρα P_1 και μετρίεται ο όγκος του. Στην συνέχεια μειώνεται σταδιακά η πίεση (P_2) έως το σημείο φυσαλίδας ($P_3 = P_b$) το οποίο και προσδιορίζεται και επίσης μετρίεται και η συμπιεστότητα του ρευστού στην μονοφασική περιοχή.

Η διαδικασία συνεχίζεται και κάτω από το σημείο κορεσμού έως ότου η πίεση μειωθεί κατά στάδια μέχρι μια τιμή χαμηλότερη από την πίεση εγκατάλειψης του ταμιευτήρα (abandonment pressure), συνήθως 400-500 psia. Στο δεύτερο στάδιο της μελέτης μετρίεται η συμπιεστότητα του διφασικού υγρού εντός του φακέλου φάσεων, χωρίς να έχει πραγματοποιηθεί καμία απομάκρυνση αέριας ή υγρής φάσης.

Μεταξύ των διαδοχικών μειώσεων της πίεσης, το δείγμα αναταράσσεται σημαντικά ώστε να εξασφαλιστεί ισορροπία (Βαρότσης, 2010).

Οι όγκοι που μετριοούνται κατά την διάρκεια του πειράματος αποδίδονται ως σχετικοί όγκοι ως προς την πίεση στο σημείο φυσαλίδας, ήτοι:

$$V_{relative}^i = V^i / V^{P_b}$$

Όπου i η εκάστοτε πίεση.

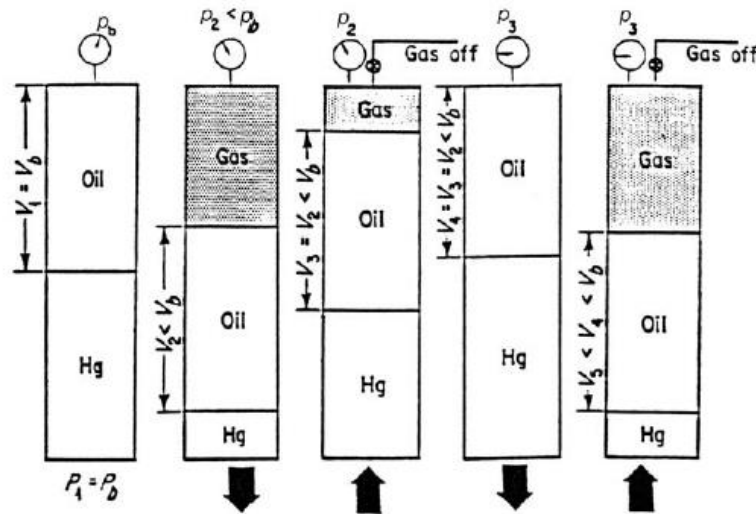
Καθώς δεν απομακρύνεται αέριο από το κελί, η σύσταση του μίγματος παραμένει σταθερή, γι αυτό και η μελέτη αποκαλείται σταθερής μάζας.

3.2.2 Μελέτη διαφορικής εξάτμισης (DV)

Ο στόχος της μελέτης αυτής είναι να προσομοιώσει στο εργαστήριο τις μεταβολές στην θερμοδυναμική ισορροπία που θεωρητικά συμβαίνουν εντός του ταμιευτήρα κατά την διάρκεια παραγωγής για πίεση υπό του σημείου φυσαλίδας (P_b) του μίγματος, καθώς λόγω της διαφορετικής κινητικότητας μεταξύ των φάσεων, το αέριο απομακρύνεται από το πετρέλαιο με το οποίο έχει αποκαταστήσει προηγουμένως ισορροπία.

Μπορεί κάλλιστα να επαναχρησιμοποιηθεί το δείγμα της μελέτης σταθερής μάζας, αφού επανασυμπιεστεί στην αρχική πίεση και αναταραχθεί ώστε να εξασφαλιστεί η επαναδιάλυση του αερίου στο υγρό. Η θερμοκρασία παραμένει σταθερή και ίση με του ταμιευτήρα.

Στην συνέχεια μειώνεται η πίεση έως το σημείο φυσαλίδας, οπότε και μπορεί να ξεκινήσει η διαδικασία της μελέτης.



Σχήμα 15: Σχηματική αναπαράσταση κελιού μελέτης διαφορικής εξάτμισης (Tarek, 2006)

Το εύρος της πίεσης από το σημείο φυσαλίδας ως την ατμοσφαιρική διαιρείται σε στάδια, συνήθως 8-10 και πάνω, ώστε να μην υπάρχει αισθητή διαφορά των αποτελεσμάτων με τον αριθμό των σταδίων, όπου για κάθε ένα ακολουθείται εξής διαδικασία (Βαρότσης, 2010):

- Απομακρύνεται μέρος του υδραργύρου ή νερού, αυξάνοντας τον όγκο που δύναται να καταλάβουν οι υδρογονάνθρακες, με άμεση συνέπεια την πτώση πίεσης σε αυτήν του επόμενου σταδίου
- Αφού το σύστημα έχει αφεθεί να ισορροπήσει, απομακρύνεται ολόκληρη η ποσότητα του υπερκείμενου αερίου με ισοβαρή τρόπο, επαναπροωθώντας υδράργυρο ή νερό εντός του κελιού. Μετρίεται ο όγκος του αερίου στις συνθήκες που επικρατούν στο κελί (V_g^i , όπου i το εκάστοτε στάδιο) και στις κανονικές συνθήκες (V_g^{SC})
- Μετρίεται ο όγκος του εναπομείναντος υγρού

Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρις ότου η πίεση φτάσει την ατμοσφαιρική και όλο το διαλελυμένο αέριο έχει εκλυθεί. Μετρίεται ο όγκος του υγρού, και στην συνέχεια, αφού η θερμοκρασία μειωθεί σε αυτή των κανονικών συνθηκών (60 °F), μετρίεται εκ νέου (V_o^{SC}).

Από τις παραπάνω μετρήσεις προσδιορίζονται τα ακόλουθα:

- οι ογκομετρικοί συντελεστές σχηματισμού αερίου για κάθε στάδιο:

$$B_g^i = V_g^i / V_g^{SC}$$
- οι ογκομετρικοί συντελεστές σχηματισμού πετρελαίου για κάθε στάδιο:

$$B_o^i = V_o^i / V_o^{SC}$$
- οι λόγοι αερίου εν διαλύσει προς το πετρέλαιο R_s διαιρώντας το άθροισμα των όγκων του αερίου που παρήχθησαν στα στάδια χαμηλότερων πιέσεων, με το τον όγκο V_o^{SC} , δηλαδή:

$$R_s^i = \frac{V_g^{i+1} + V_g^{i+2} + \dots + V_g^N}{V_o^{SC}}$$

Επιπλέον, στα αποτελέσματα της μελέτης περιλαμβάνονται οι ιδιότητες του αερίου σε κάθε στάδιο (το οποίο μετά την απομάκρυνσή του συνήθως οδηγείται σε χρωματογράφο), η σχετική πυκνότητα του αερίου συναρτήσει της πίεσης και η πυκνότητα του πετρελαίου, επίσης συναρτήσει της πίεσης (Tarek, 2006).

3.2.3 Τεστ διαχωριστήρα (Separator Test)

Ένα αντιπροσωπευτικό δείγμα του ρευστού του ταμιευτήρα υπόκειται σε μια σειρά εκτονώσεων, ίδια με αυτές που υφίσταται το ρευστό του κοιτάσματος όταν διέλθει από το σύστημα διαχωρισμού (separator train) στην επιφάνεια. Ο στόχος είναι να προσδιοριστεί ο αριθμός των απαιτούμενων διαχωριστήρων (συνήθως για τα πετρέλαια είναι ένας) και οι συνθήκες λειτουργίας τους, με στόχο την βελτιστοποίηση παραγωγής, ήτοι την μεγιστοποίηση της παραγωγής πετρελαίου (που έχει και την μεγαλύτερη εμπορική αξία) και την ελαχιστοποίηση αερίου (Βαρότσης, 2010) (Tarek, 2006).

Η θερμοκρασία ορίζεται ως ίση με την θερμοκρασία με την οποία φθάνει το πετρέλαιο στην επιφάνεια, οπότε κατ' ουσία το ζήτημα είναι η βελτιστοποίηση της πιέσεως διαχωρισμού.

Για κάθε ισοθερμοκρασιακή εκτόνωση που πραγματοποιείται, προσδιορίζονται οι ογκομετρικοί συντελεστές και η αναλογία αερίου προς πετρέλαιο (Gas-Oil Ratio, GOR).

3.3 Εκπόνηση Σύνθετων Μελετών (Composite)

3.3.1 Λόγος ύπαρξης σύνθετων μελετών

Το ζήτημα που προκύπτει είναι πως αν χρησιμοποιηθούν απευθείας τα δεδομένα από την DV μελέτη, τότε δεν έχει συμπεριληφθεί στους υπολογισμούς όλη η «διαδρομή» που έχουν υποστεί τα ρευστά από τον ταμιευτήρα ως την επιφάνεια, καθώς δεν έχει συμπεριληφθεί η επίδραση των εκτονώσεων στο σύστημα διαχωρισμού.

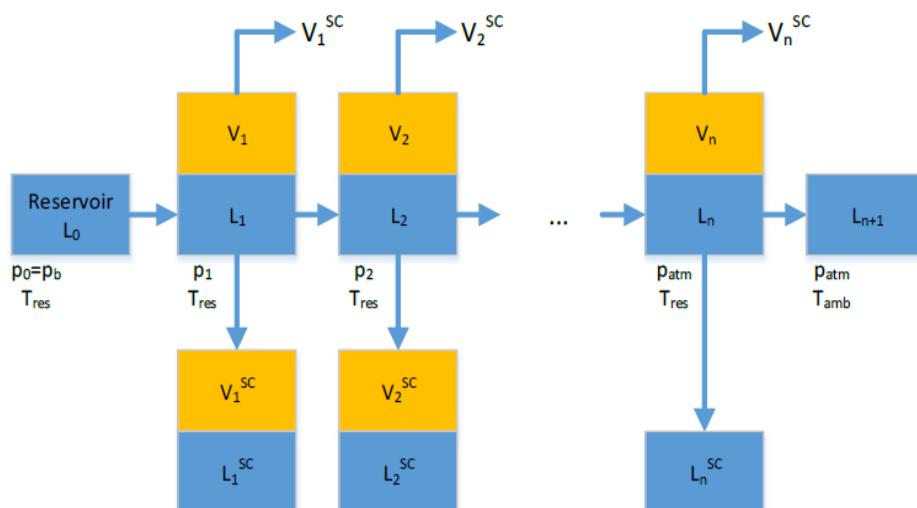
Γι αυτό έχουν αναπτυχθεί οι «σύνθετες» (composite) μελέτες, όπου συνδυάζονται οι διαδικασίες των επιμέρους μελετών με αυτήν του separator test, ώστε να προσομοιωθεί εργαστηριακά η διεργασία μέσω της οποίας φθάνει το ρευστό στην δεξαμενή επιφάνειας.

Στην βιβλιογραφία έχει θιγεί επανειλημμένως το ζήτημα πως οι μετρήσεις από DV δεν επαρκούν από μόνες τους και πως είναι σημαντικά καλύτερη προσέγγιση η μελέτη σύνθετης διαφορικής εξάτμισης (DVC) (Dodson, et al., 1953) (Smith, et al., 1997) (Moses, 1986) (Βαρότσης, 2010), καθώς επίσης και της μελέτη σύνθετης σταθερής μάζας (CCEC) (Gaganis, et al., 2016).

3.3.2 Περιγραφή σύνθετων μελετών

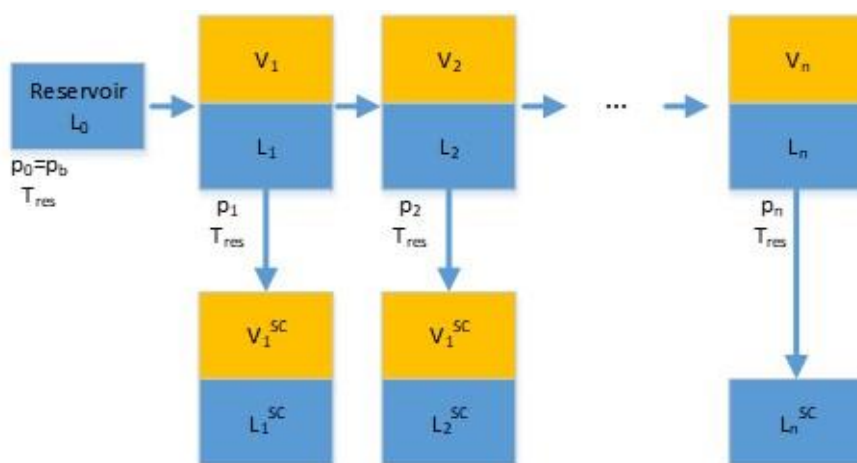
Στην περίπτωση της DVC, θα έπρεπε να τροποποιηθεί η διαδικασία και σε κάθε στάδιο να λαμβανόταν δείγμα υγρού, το οποίο θα υπόκειτο στην αλληλουχία εκτονώσεων του separator test.

Έτσι, οι ογκομετρικοί συντελεστές σχηματισμού και ο λόγος εν διαλύσει αερίου προς πετρέλαιο που προκύπτουν, εμπεριέχουν και την πληροφορία της «διαδρομής» των ρευστών προς την επιφάνεια. Η διαδικασία αποδίδεται σχηματικά στο Σχήμα 16.



Σχήμα 16: Αναπαράσταση της διαδικασίας μελέτης DVC (Gaganis, et al., 2016)

Με το ίδιο σκεπτικό προκύπτει και η μελέτη CCEC, με την διαφορά ότι αντί να μπορεί να ληφθεί δείγμα από το ίδιο κελί, θα έπρεπε να υπάρχει αρχικό δείγμα σε άλλο κελί, στο οποίο θα μειώνεται η πίεση έως του αντίστοιχου σταδίου και στην συνέχεια θα εκτονώνεται βάσει separator test. Αυτό διότι δεν μπορεί ληφθεί δείγμα απευθείας από το αρχικό κελί, καθώς έτσι θα παραβιαζόταν η αρχή σταθερής μάζας.



Σχήμα 17: Αναπαράσταση της διαδικασίας μελέτης CCEC (Gaganis, et al., 2016)

Στην πράξη, οι παραπάνω μελέτες είναι πολύ δύσκολο να λάβουν χώρα εργαστηριακά καθώς απαιτείται μεγάλη ποσότητα δείγματος και το κόστος μια τέτοιας μελέτης είναι υπέρογκο. Επίσης, οι συνθήκες του συστήματος διαχωρισμού δεν είναι συνήθως γνωστές την στιγμή που ανατίθεται η μελέτη PVT και συχνά δύναται να αλλάξουν κατά την διάρκεια της παραγωγής (Βαρότσης, 2010). Για να αντιμετωπιστεί το υψηλό κόστος έχουν αναπτυχθεί διάφορες προσεγγίσεις κυρίως της πιο διαδεδομένης DVC.

3.4 Υπολογιστικές προσεγγίσεις σύνθετων μελετών

Οι δύο μέθοδοι που παρουσιάστηκαν από Dake (Dake, 1978) και Al Mahroun (Al-Mahroun, 2003), είναι ίσως οι πιο διαδεδομένες και χρησιμοποιούνται ευρέως από την πετρελαϊκή βιομηχανία. Ο συνδυασμός των δεδομένων DV και separator test γίνεται ως εξής:

- Dake:

$$\circ \quad R_{Dake}^i = R_{flash}^{bubble} - (R_{DV}^{bubble} - R_{DV}^i) \frac{Bo_{flash}^{bubble}}{Bo_{DV}^{bubble}}$$

$$\circ \quad Bo_{Dake}^i = Bo_{DV}^i \frac{Bo_{flash}^{bubble}}{Bo_{DV}^{bubble}}$$

- Al Mahroun:

$$\circ \quad R_{Al\ Mahroun}^i = R_{DV}^i \frac{R_{flash}^{bubble}}{R_{DV}^{bubble}}$$

$$\circ \quad Bo_{Al\ Mahroun}^i = Bo_{flash}^{bubble} + \frac{Bo_{DV}^{bubble} - Bo_{DV}^i}{Bo_{DV}^{bubble} - Bo_{DV}^n} \cdot (Bo_{DV}^n - Bo_{flash}^{bubble})$$

Όπου i τα «βήματα»/στάδια της DV και n το τελευταίο στάδιο της DV.

Οι παραπάνω μέθοδοι αφορούν την διφασική περιοχή. Για πιέσεις μεγαλύτερες της P_b ισχύει:

$$\bullet \quad R_{Dake, Al\ Mahroun}^{i, P > P_b} = R_{flash}^{bubble}$$

$$\bullet \quad Bo_{Dake, Al\ Mahroun}^{i, P > P_b} = \frac{Bo_{flash}^{bubble}}{Bo_{DV}^{bubble}} Bo_{DV}^{i, P > P_b}$$

Όπως φαίνεται από τις παραπάνω εξισώσεις, η μέθοδος κατά Dake δύναται να οδηγήσει σε αποτελέσματα δίχως φυσική σημασία σε πολύ χαμηλές πιέσεις κοντά στην ατμοσφαιρική, όπως αρνητικό Rs ή/και Bo μικρότερο της μονάδας. Οι πιέσεις αυτές είναι συχνά κάτω από τις πιέσεις εγκατάλειψης ταμειυτήρα.

Το ζήτημα αυτό προσπάθησε να καλύψει η μέθοδος κατά Al Mahroun.

Ένας άλλος τρόπος προσέγγισης είναι πρώτα η ανάπτυξη υπολογιστικού μοντέλου με καταστατική εξίσωση, ρυθμισμένου ώστε να προβλέπει τα σωστά δεδομένα DV και separator test, και στην συνέχεια προσομοίωση όλων των απαιτούμενων διαδικασιών για DVC και CCEC.

3.5 Επιλογή μελέτης για ανάκτηση δεδομένων

Από τα παραπάνω φαίνεται πως υπάρχουν πολλοί τρόποι να ανακτηθούν τα απαιτούμενα δεδομένα για να εισαχθούν σε ένα BOT. Υπάρχει διχογνωμία για το ποια είναι η καλύτερη στην βιβλιογραφία, ωστόσο έμφαση δίνεται στην DVC, που προτείνεται συχνότερα, και στην CCEC (Gaganis, et al., 2016). Στόχος της παρούσης διπλωματικής εργασίας είναι να εξετάσει τα αποτελέσματα παραγωγής από Black Oil Model με BOT από κάθε μία από τις προαναφερθείσες μεθόδους, έναντι των αποτελεσμάτων ενός Fully Compositional μοντέλου και να προτείνει την βέλτιστη, με κύριο κριτήριο την ορθή πρόβλεψη της παραγωγής πετρελαίου⁴.

⁴ Λόγω της αυξημένης οικονομικής σημασίας του.

4 Ανάπτυξη των απαιτούμενων μοντέλων

Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας αναπτύχθηκε θερμοδυναμικό μοντέλο με χρήση καταστατικής εξίσωσης (Equation of State, EOS) Peng-Robinson όπως θα αναλυθεί παρακάτω. Ύστερα προσομοιάστηκαν για δύο ρευστά διαφορετικής σύστασης και πτητικότητας, οι εργαστηριακές μελέτες CCEC, DVC και DV και υπολογίσθηκαν τα σχετικά BOTs, καθώς και από τις υπολογιστικές προσεγγίσεις κατά Dake και Al Mahroun.

Στην συνέχεια αναπτύχθηκε Black Oil Model και Fully Compositional Model με τα ίδια χαρακτηριστικά ταμειυτήρα. Για κάθε ρευστό συλλέχθηκαν τα αποτελέσματα παραγωγής από το Fully Compositional και 5 φορές από το Black Oil Model, μία φορά για κάθε διαφορετικό BOT.

4.1 Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε

Χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό PVTP © και Reveal ©, μέρος της σουίτας Integrated Production Modelling (IPM ©) της εταιρείας Petroleum Experts (PetEx).

Συγκεκριμένα, με το PVTP έγιναν όλοι οι υπολογισμοί PVT για την ανάπτυξη των BOTs, ενώ οι προσομοιώσεις παραγωγής αναπτύχθηκαν στο Reveal.

4.2 Τα ρευστά που χρησιμοποιήθηκαν

Χρησιμοποιήθηκαν δύο ρευστά, ένα χαμηλής πτητικότητας και ένα υψηλής, προκειμένου να βρεθεί κατά πόσο οι μέθοδοι αποκλίνουν μεταξύ τους με την μεταβολή της πτητικότητας.

Στον Πίνακα 6 παρουσιάζεται η σύσταση των υπό εξέταση ρευστών, ονομασμένων βάσει της περιεκτικότητάς τους σε μεθάνιο (**C1_30** και **C1_70** αντίστοιχα), μαζί με κάποιες βασικές ιδιότητές τους.

Πίνακας 6: Σύσταση και ιδιότητες των υπό μελέτη ρευστών

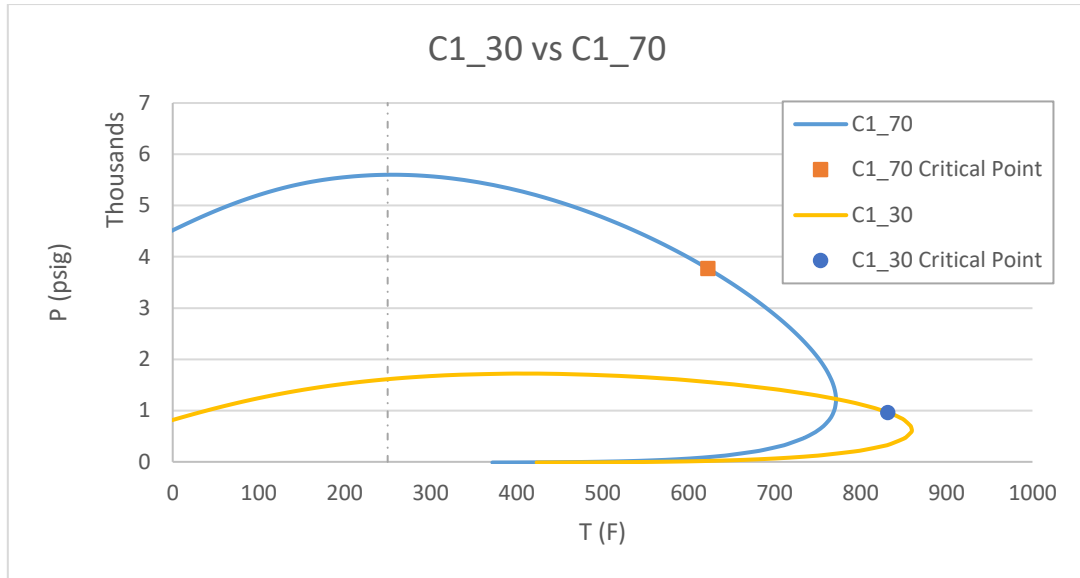
Σύσταση κατά mol %		
Component	C1_30	C1_70
C1	30	70
C6	20	15
C10	20	5
PS-1	30	10
Sum	100	100
Surface Properties		
GOR (scf/STB)	256.796	1602.380
Πυκνότητα πετρελαίου (API)	40.597	44.896
Πυκνότητα πετρελαίου (kg/m³)	822.211	802.172
Σχετική πυκνότητα αερίου	0.585	0.579

Οι ιδιότητες των επιμέρους συστατικών (συμπεριλαμβανομένου και του ψευδο-συστατικού PS-1) παρουσιάζονται στον Πίνακα 7. Πέρα από το ψευδοσυστατικό PS-1, οι υπόλοιπες τιμές προέρχονται από την βιβλιοθήκη του προγράμματος.

Πίνακας 7: Ιδιότητες συστατικών ρευστών

	C1	C6	C10	PS-1
T_c (F)	-116.52	454.10	654.01	995.82
P_c (psig)	658.38	425.01	291.27	201.02
T_{Boil} (F)	-258.79	155.75	345.47	667.19
Mol. Weight	16.04	86.20	137	280
Specific Gravity	0.41	0.67	0.73	0.88

Τέλος, στο Διάγραμμα 8 παρουσιάζονται οι φάκελοι φάσεων που περιγράφουν τα δύο μίγματα, όπως προέκυψαν από το ρυθμισμένο μοντέλο EOS μοντέλο (βλ. επόμενη ενότητα) που αναπτύχθηκε στο λογισμικό PVTP.



Διάγραμμα 8: Φάκελος φάσεων των υπό μελέτη ρευστών

Ο Πίνακας 8 παρουσιάζει τις κρίσιμες πιέσεις και θερμοκρασίες, την πίεση φυσαλίδος, την cricodentherm και την cricodenbar των υπό μελέτη ρευστών.

Πίνακας 8: Χρήσιμα στοιχεία των υπό μελέτη ρευστών

	P_c (psig)	T_c (F)	P_b (psig, $T_{res} = 250$ F)	CricodenTherm (F)	CricodenBar (psig)
C1_30	963.58	831.899	1612.4	859.586	1721.55
C1_70	3769.23	622.488	5600	771.392	5600.73

4.3 Μεθοδολογία ανάπτυξης EOS μοντέλου και BOTs

Αρχικά αναπτύσσεται το EOS μοντέλο, με χρήση της Peng-Robinson καταστατικής εξίσωσης, τροποποιημένης με volume shift, η οποία είναι (Whitson, et al., 2000):

$$P = \frac{RT}{v - b} - \frac{a}{v(v + b) + b(v - b)}$$

Οι σταθερές της εξίσωσης δίνονται ως εξής:

$$\alpha = \Omega_\alpha^o \frac{R^2 T_c^2}{P_c} a, \text{ όπου } \Omega_\alpha^o = 0,45724$$

$$b = \Omega_b^o \frac{RT_c}{P_c}, \text{ όπου } \Omega_b^o = 0.07780$$

$$a = [1 + m(1 - \sqrt{T_r})]^2, \text{ όπου } m = 0.37464 + 1.54226\omega - 0,26992\omega^2$$

Όπου:

- P η πίεση
- T η θερμοκρασία
- R η σταθερά αερίων (gas constant), ίση περίπου με $8,314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$
- ω ο ακεντρικός παράγοντας του εκάστοτε συστατικού
- P_c, T_c η πίεση και θερμοκρασία του κρίσιμου σημείου
- T_r ανοιγμένη θερμοκρασία και ίση με T/T_c
- v ο μοριακός όγκος

Ένα γνωστό πρόβλημα όλων των κυβικών καταστατικών εξισώσεων είναι η κακή πρόβλεψη όγκων ρευστών (Whitson, et al., 2000). Προκειμένου να διορθωθεί αυτή η συμπεριφορά, χρησιμοποιείται η τεχνική διόρθωσης volume shift, που διορθώνει τον όγκο ως εξής:

$$v = v^{EOS} - c$$

Όπου v^{EOS} ο μοριακός όγκος που προβλέπει η καταστατική εξίσωση και c μια σταθερά διαφορετική για κάθε συστατικό.

Θεωρώντας το μοντέλο πλήρως ρυθμισμένο (tuned)⁵, προσομοιώνονται οι πειραματικές διαδικασίες CCEC, DV, DVC. Όπως αναφέρθηκε, η σύνθετη «εκδοχή» των μελετών αυτών συνδυάζει σε κάθε βήμα και εκτόνωση στην ατμόσφαιρα, μέσω του separator train που έχει οριστεί. Στην προκειμένη περίπτωση, χρησιμοποιήθηκε ένα ενδεικτικό separator train το οποίο παρουσιάζεται στον Πίνακα 9:

Πίνακας 9: Separator train που χρησιμοποιήθηκε

	Separator 1	Separator 2
P (psig)	300	0
T (F)	80	60

Από κάθε μελέτη υπολογίζεται ένα Black Oil Table (BOT), ένας πίνακας με τις εξής ιδιότητες: P, R_s, B_x & μ_x , όπου x η εκάστοτε φάση πετρελαίου, αερίου και νερού. Συγκεκριμένα για το ιξώδες, χρησιμοποιήθηκε ο συσχετισμός των Lohrenz Bray & Clark. Επιπλέον, από τα αποτελέσματα της DV, υπολογίζονται και BOT κατά Dake & Al Mahroun (με την διαδικασία που αναλύθηκε στην §3.4, βλ. σελ. Υπολογιστικές προσεγγίσεις σύνθετων μελετών⁵¹), χρησιμοποιώντας τα δεδομένα των απαιτούμενων separator test από τα αντίστοιχα της DVC.

⁵ Δηλαδή πως οι προβλέψεις των πειραματικών διεργασιών από το μοντέλο ανταποκρίνονται στα δεδομένα αυτών, αν είχαν συμβεί εργαστηριακά.

Αποτέλεσμα είναι η κατασκευή BOTs από 5 μεθόδους:

- απευθείας από DV
- από τον συνδυασμό DV και separator test κατά Dake
- από τον συνδυασμό DV και separator test κατά Al Mahroun
- από την DVC
- και από την CCEC

Ενδεικτικά παρουσιάζεται το BOT που προέκυψε για το ένα ρευστό, C1_70:

Πίνακας 10: BOT από CCEC για το ρευστό C1_70

P	R_s	B_o	μ_o	B_g	μ_g	B_w	μ_w
(psig)	(scf/STB)	(RB/STB)	(centipoise)	(ft ³ /scf)	(centipoise)	(RB/STB)	(centipoise)
7000	1602.38	1.76748	0.241075			1.05976	0.234463
6500	1602.38	1.78896	0.222315			1.05796	0.234462
6000	1602.38	1.81294	0.204118			1.05616	0.234461
5595	1599.35	1.83286	0.190407	0.003844	0.034801	1.05436	0.23446
5000	1286.56	1.68695	0.245842	0.004115	0.030451	1.05256	0.234459
4500	1076.08	1.58991	0.301091	0.004427	0.027346	1.05076	0.234458
4000	897.14	1.50784	0.366282	0.004845	0.024577	1.04896	0.234457
3500	741.045	1.43633	0.443856	0.005415	0.022096	1.04716	0.234456
3000	602.27	1.37259	0.537187	0.006215	0.019908	1.04536	0.234455
2500	477.152	1.31477	0.651155	0.007386	0.018038	1.04356	0.234454
2000	363.246	1.26162	0.79316	0.009205	0.016508	1.04176	0.234453
1500	258.94	1.21228	0.975745	0.012315	0.015308	1.03961	0.234452
1000	163.198	1.16601	1.22759	0.018623	0.014389	1.03816	0.234451
500	75.4237	1.12126	1.67701	0.037451	0.013614	1.03636	0.23445
0	0	1.05731	11.0537	1.36201	0.011885	1.03455	0.234449

4.4 Περιγραφή ταμειυτήρα

Στόχος είναι η ανάπτυξη ενός απλού μοντέλου ταμειυτήρα για την σύγκριση των μεθόδων υπολογισμού BOTs. Ως εκ τούτου, αναπτύχθηκε ένα απλό μοντέλο οριζόντιου ταμειυτήρα, διαστάσεων 3000 x 3000ft και πάχους 100ft, ο οποίος διαιρέθηκε σε καρτεσιανό πλέγμα 10 x 10 x 1, με διαστάσεις κελιού 300ft κατά x'x & γ'γ, και 100ft κατά z. Το άνω μέρος του ταμειυτήρα ορίστηκε πως βρίσκεται στο νοητό βάθος των 10000ft.

Το πορώδες φ ορίστηκε ως ίσο με 0,2, συνεπώς ο όγκος διαθέσιμος για τα ρευστά στον ταμειυτήρα είναι $1,8 \cdot 10^8 \text{ ft}^3$. Η διαπερατότητα ορίστηκε στην οριζόντια διάσταση $k_{x,y}$ ως 0,01 Darcy (10 mD) και στην κατακόρυφη ως το 1/10 αυτής, ήτοι 0,001 Darcy (1 mD)⁶. Η πυκνότητα του πετρώματος ορίστηκε στα 160 lb/ft³ \approx 2562 kg/m³. Ο ταμειυτήρας είναι πρακτικά ασυμπίεστος με συμπίεστικότητα $c = 10^{-20} \text{ psi}^{-1}$.

⁶ Φυσικά η τιμή αυτή είναι ενδεικτική, καθώς το πάχος του ταμειυτήρα διακριτοποιήθηκε μονάχα σε ένα κελί, οπότε είναι προφανές πως η επικοινωνία των κελιών περιορίζεται στην οριζόντια διάσταση.

Οι τριχοειδείς πιέσεις μηδενίστηκαν ώστε να μην υπεισέρχονται στον υπολογισμό των επιμέρους πιέσεων στα κελιά.

Ακόμη, χρησιμοποιήθηκαν οι κρίσιμοι και υπολειμματικοί βαθμοί κορεσμού και μέγιστης σχετικής διαπερατότητας (endpoint relative permeability) που παρουσιάζονται στον Πίνακα 11.

Πίνακας 11: Δεδομένα κορεσμού και διαπερατότητας ταμιευτήρα

Βαθμοί Κορεσμού		Μέγιστη Σχετική Διαπερατότητα	
Swc	0	Krw	1
Sowc	0.1	Krow	1
Sogc	0.1	Krog	1
Sgc	0.1	Krg	0.75

Πρόκειται δηλαδή για έναν πετρελαιοδιαβρεχτό ταμιευτήρα, ο οποίος μάλιστα, στην αρχή της εκμετάλλευσης είναι πλήρως κορεσμένος με υδρογονάνθρακες.

4.5 Γεωτρήσεις, σχέδιο εκμετάλλευσης και αρχικές συνθήκες

Τοποθετήθηκαν δύο γεωτρήσεις στα άκρα της νοητής διαγώνιου του ταμιευτήρα, μία γεώτρηση εισπίεσης/έγχυσης νερού (injector) στο κελί με συντεταγμένες (10,10,1) και μία παραγωγής (producer) στο κελί (1,1,1). Και για τις δύο γεωτρήσεις χρησιμοποιήθηκε η ίδια διάμετρος 0.354 ft = 4 ¼ in.

Και οι δύο γεωτρήσεις καθορίστηκαν με κριτήριο πίεσης, με συγκεκριμένη σταθερή πίεση στο κάτω μέρος τους (downhole pressure), ώστε να συγκριθούν τα επιμέρους μοντέλα με δεδομένα παραγωγής (και όχι η εντατική κατάσταση που θα αναπτυσσόταν, εκφρασμένη από την πίεση, για δεδομένη παραγωγή).

Και οι δύο γεωτρήσεις ξεκινούν την λειτουργία τους και παραμένουν ανοικτές από την πρώτη μέρα εκμετάλλευσης μέχρι το πέρας αυτής.

Ο Πίνακας 12 συνοψίζει τις αρχικές συνθήκες και τις τιμές πιέσεως των γεωτρήσεων:

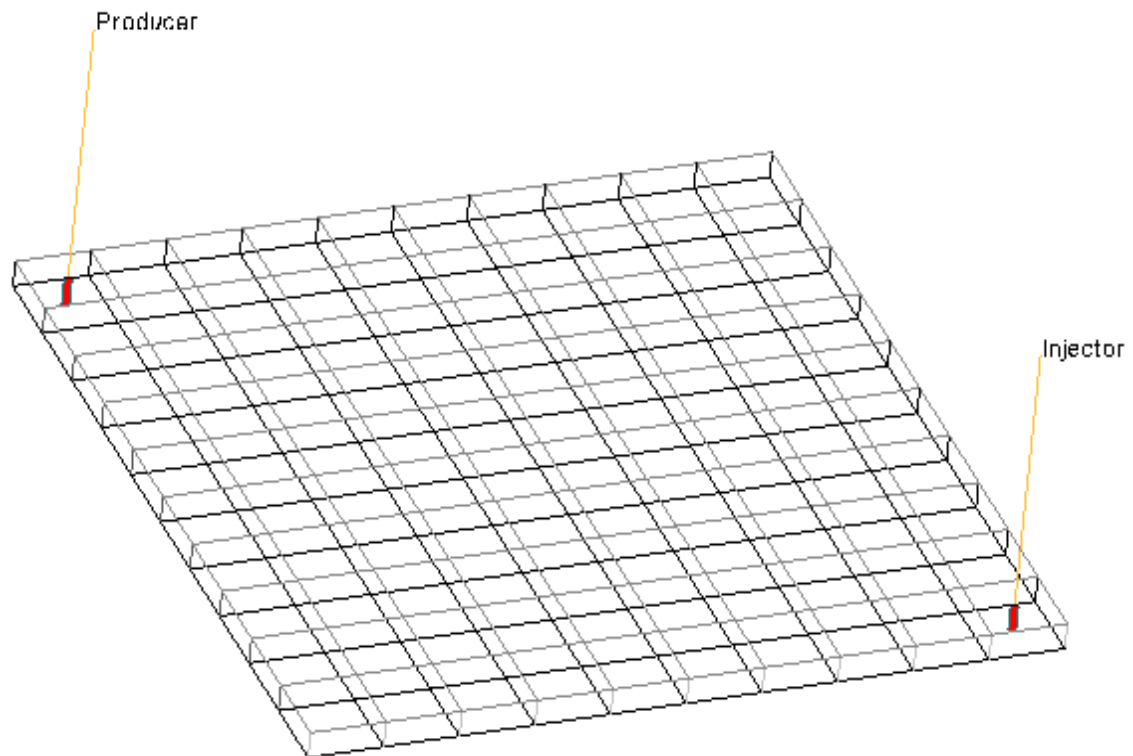
Πίνακας 12: Αρχικές συνθήκες ταμιευτήρα και κριτήρια πίεσης γεωτρήσεων

	T_{res} (F)	$P_{res}^{initial}$ (psia)	$P_{injector}$ (psia)	$P_{producer}$ (psia)	P_b (psia)
C1_30	250	1800	1800	500	1627.096
C1_70	250	6800	6800	1500	5614.696

Η επιλογή των χαμηλών πιέσεων στην περίπτωση του C1_30 έγινε ώστε να μειωθεί η πίεση κάτω από το σημείο φυσαλίδας και να δημιουργηθούν δύο φάσεις εντός του ταμιευτήρα, ώστε να είναι δυνατή μια ρεαλιστική σύγκριση μεταξύ των μεθόδων.

Πριν αρχίσει η εκμετάλλευση, ο ταμιευτήρας είναι πλήρως κορεσμένος σε υδρογονάνθρακες και μάλιστα, σε μονοφασική υγρή κατάσταση καθώς οι πιέσεις που επικρατούν είναι άνω του σημείου φυσαλίδας.

Στην συνέχεια, ξεκινά η παραγωγή διάρκειας 10 ετών, με μοναδική εξωτερική προσφορά ενέργειας προς τον ταμιευτήρα από το νερό της γεώτρησης έγχυσης (injector).



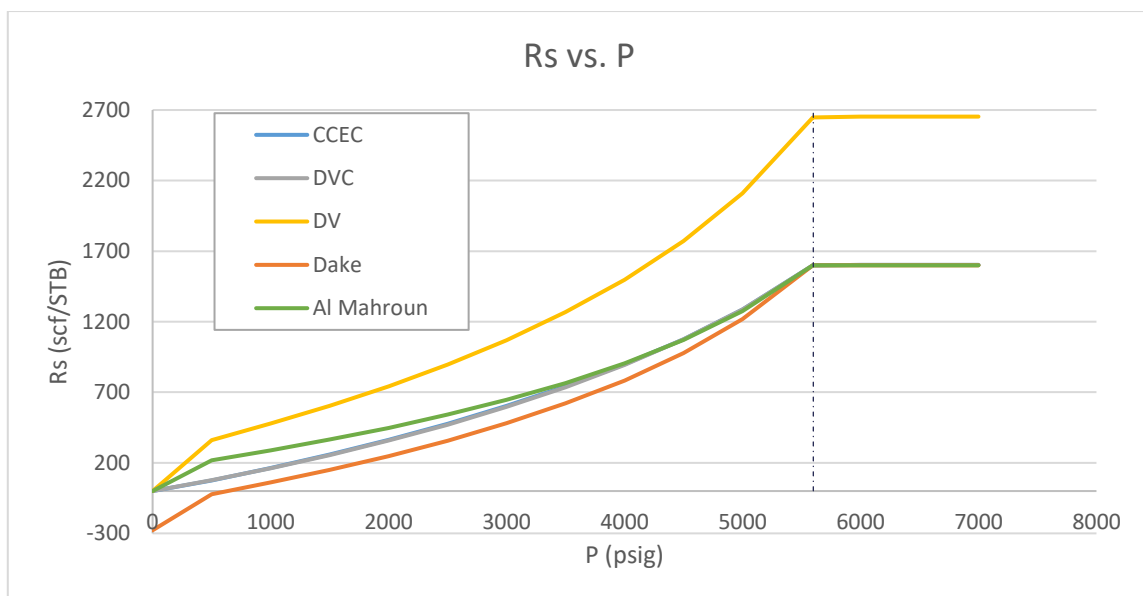
Σχήμα 18: Αναπαράσταση του μοντέλου ταμιευτήρα

5 Αποτελέσματα και σύγκριση μεθόδων

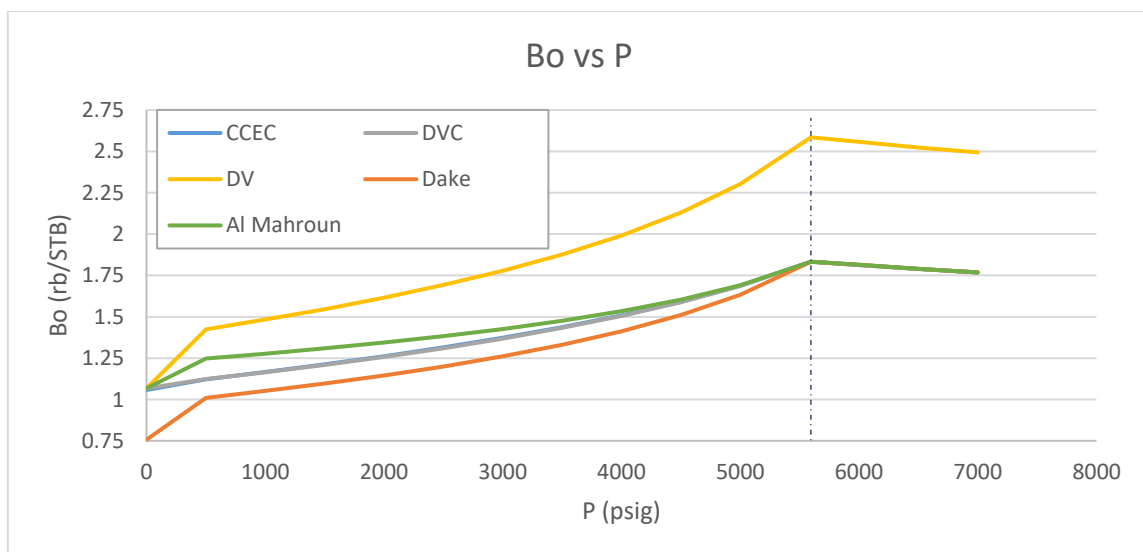
5.1 Αποτελέσματα θερμοδυναμικού μοντέλου και υπολογιστικών προσεγγίσεων ανάπτυξης BOTs

Στο παρόν μέρος εξετάζονται τα αποτελέσματα της ανάπτυξης των διαφορετικών μεθόδων BOTs και συγκρίνονται οι μέθοδοι μεταξύ τους ως προς τα μεγέθη R_s και B_o , ανά ρευστό που υπολογίστηκαν αντίστοιχα.

5.1.1 Θερμοδυναμικά αποτελέσματα C1_70

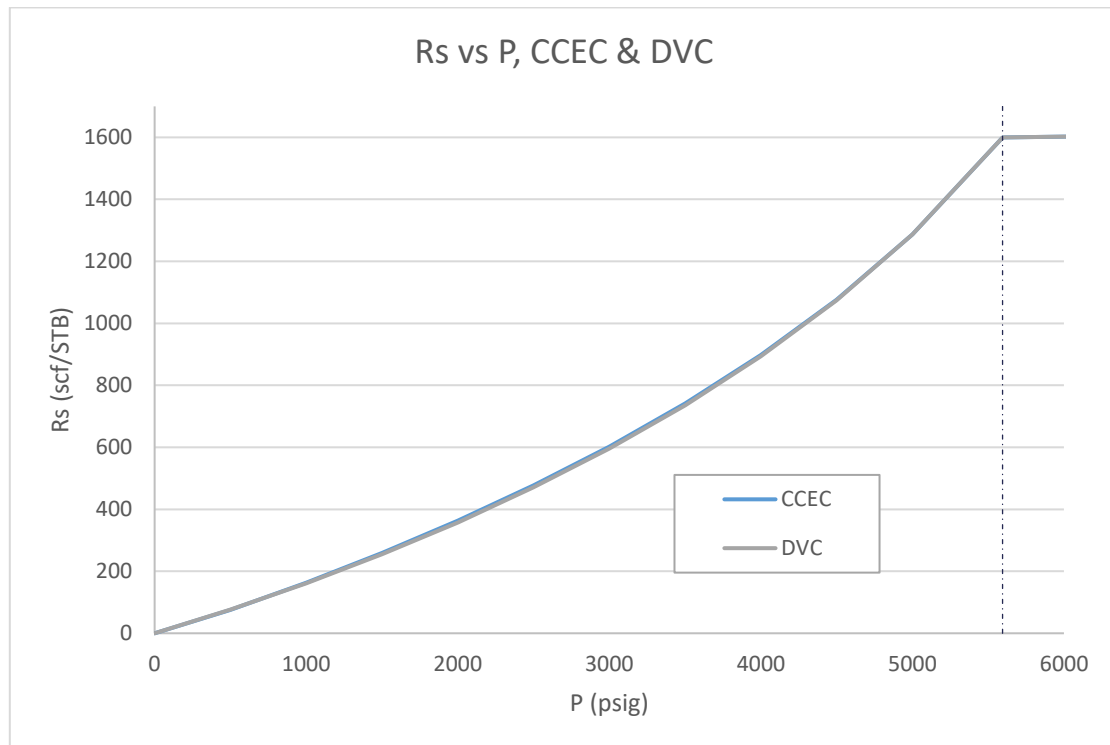


Διάγραμμα 9: R_s vs. P όλων των BOTs για το ρευστό C1_70

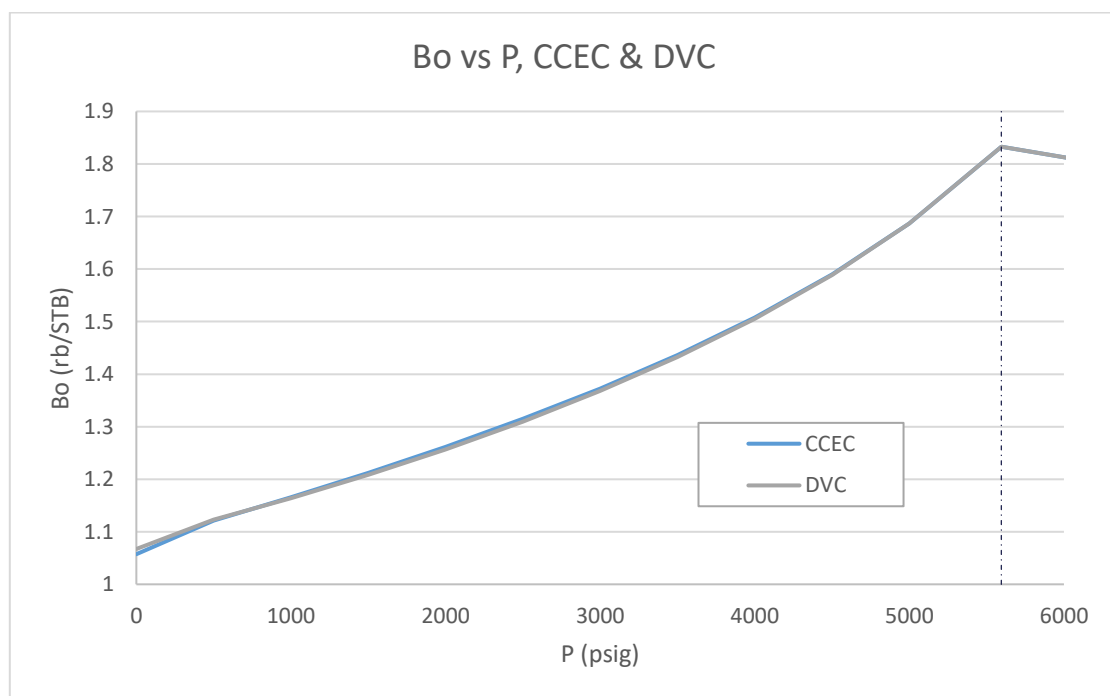


Διάγραμμα 10: B_o vs. P όλων των BOTs για το ρευστό C1_70

Ήδη φαίνεται πως η DV σημαντικά υπερεκτιμά τις παραμέτρους B_o και R_s , ενώ η μέθοδος κατά Dake παρουσιάζει παράλογα αποτελέσματα στις χαμηλές πιέσεις. Και τα δύο αποτελέσματα επιβεβαιώνουν την βιβλιογραφία (Gaganis, et al., 2016) (Βαρότσης, 2010). Επίσης, η CCEC και η DVC μοιάζουν να έχουν οδηγήσει σε πρακτικά ίδια αποτελέσματα, καθώς η αναπαράσταση της μιας καλύπτει αυτήν της άλλης στο διάγραμμα.



Διάγραμμα 11: Σύγκριση R_s από CCEC & DVC για το ρευστό C1_70



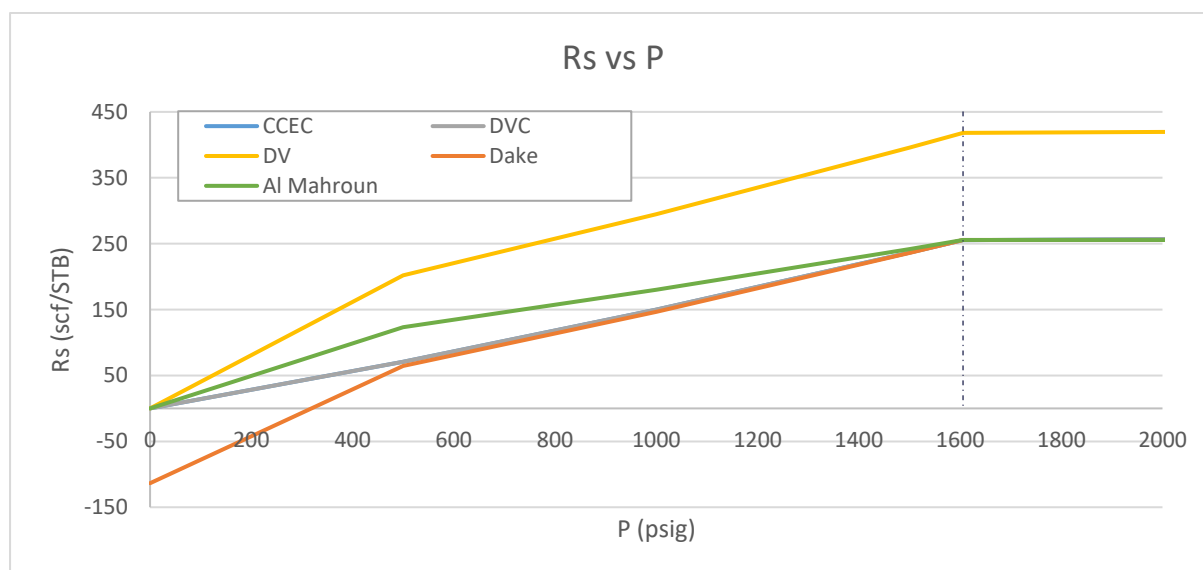
Διάγραμμα 12: Σύγκριση B_o από CCEC & DVC για το ρευστό C1_70

Πράγματι, όπως φαίνεται και στον ακόλουθο πίνακα που δείχνει την απόκλιση της DVC σε σχέση με την CCEC, οι διαφορές είναι σχετικά μικρές. Ωστόσο, όπως θα φανεί στην συνέχεια από τα δεδομένα παραγωγής, η διαφορά αυτή είναι επαρκής ώστε να προκαλέσει διαφορά στα αποτελέσματα παραγωγής του προσομοιωτή ταμειυτήρων μεταξύ των μεθόδων.

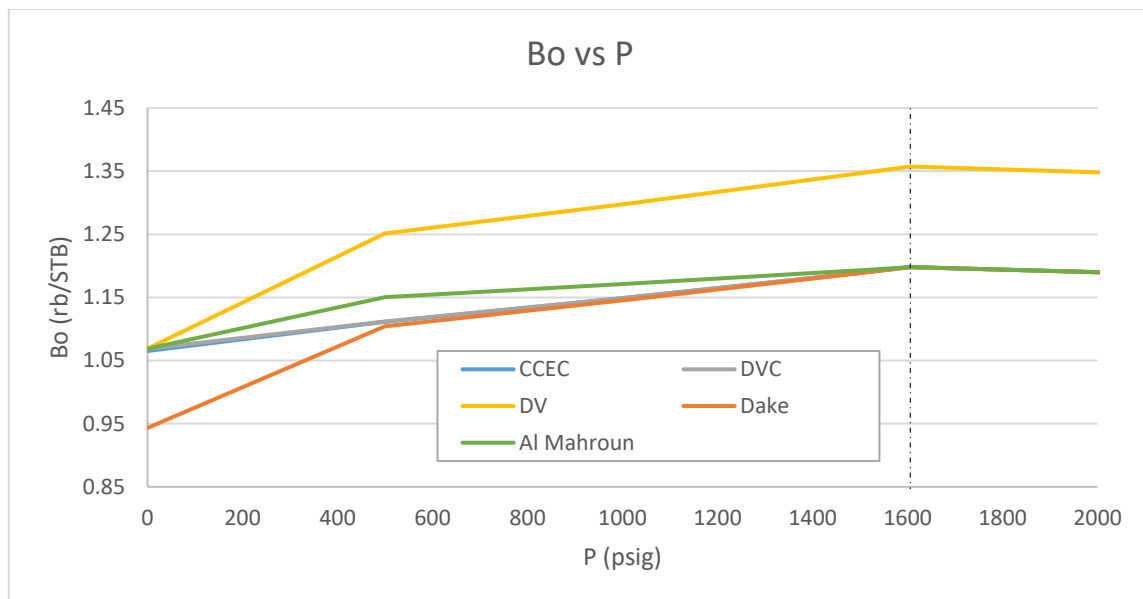
Πίνακας 13: Σύγκριση τιμών BOT από DVC και CCEC για το ρευστό C1_70

P (psig)	R_s	B_o	μ_o	B_g	μ_g
Απόκλιση της DVC ως προς την CCEC (%)					
7000	0.00%	0.00%	0.00%		
6500	0.00%	0.00%	0.00%		
6000	0.00%	0.00%	0.00%		
5595	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
5000	0.00%	0.00%	0.01%	0.00%	0.00%
4500	0.17%	0.07%	0.59%	0.01%	0.07%
4000	0.43%	0.17%	1.63%	0.03%	0.14%
3500	0.75%	0.26%	3.07%	0.06%	0.20%
3000	1.08%	0.34%	4.78%	0.10%	0.21%
2500	1.37%	0.38%	6.55%	0.12%	0.17%
2000	1.57%	0.38%	8.04%	0.13%	0.10%
1500	1.57%	0.32%	8.59%	0.11%	0.02%
1000	1.09%	0.18%	6.74%	0.05%	0.02%
500	1.08%	0.14%	3.27%	0.11%	0.17%
0	0.00%	0.94%	55.26%	1.49%	21.07%

5.1.2 Θερμοδυναμικά αποτελέσματα C1_30

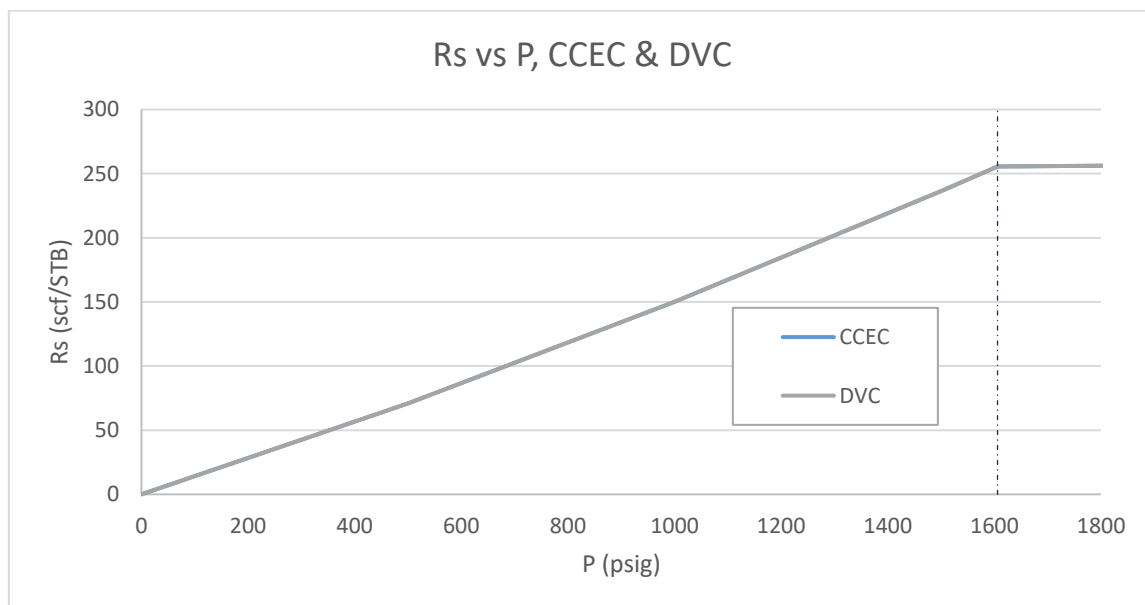


Διάγραμμα 13: Rs vs. P όλων των BOTs για το ρευστό C1_70

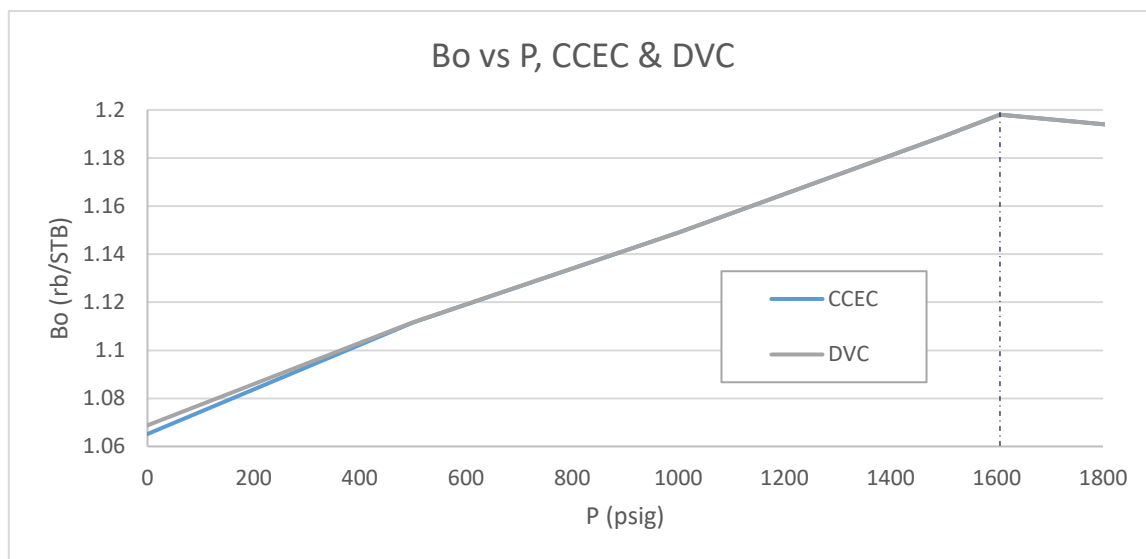


Διάγραμμα 14: Bo vs. P όλων των BOTs για το ρευστό C1_30

Και στο βαρύτερο ρευστό μπορούν να γίνουν σε γενικές γραμμές οι ίδιες παρατηρήσεις, η DV αποκλίνει σημαντικά έναντι των υπολοίπων μεθόδων ενώ στις χαμηλές πιέσεις η μέθοδος κατά Dake δίνει αφύσικα αποτελέσματα. Και πάλι η Al Mahroun φαίνεται να υπερεκτιμά λίγο σε σχέση με DVC & CCEC, οι οποίες πάλι φαίνονται να είναι εξαιρετικά κοντά.



Διάγραμμα 15: Σύγκριση Rs από CCEC & DVC για το ρευστό C1_30



Διάγραμμα 16: Σύγκριση R_s από CCEC & DVC για το ρευστό C1_30

Όπως φαίνεται και από τον ακόλουθο πίνακα, οι διαφορές μεταξύ CCEC & DVC στην περίπτωση του λιγότερου πτητικού πετρελαίου έχουν σχεδόν εξαφανισθεί:

Πίνακας 14: Σύγκριση τιμών BOT από DVC και CCEC για το ρευστό C1_30

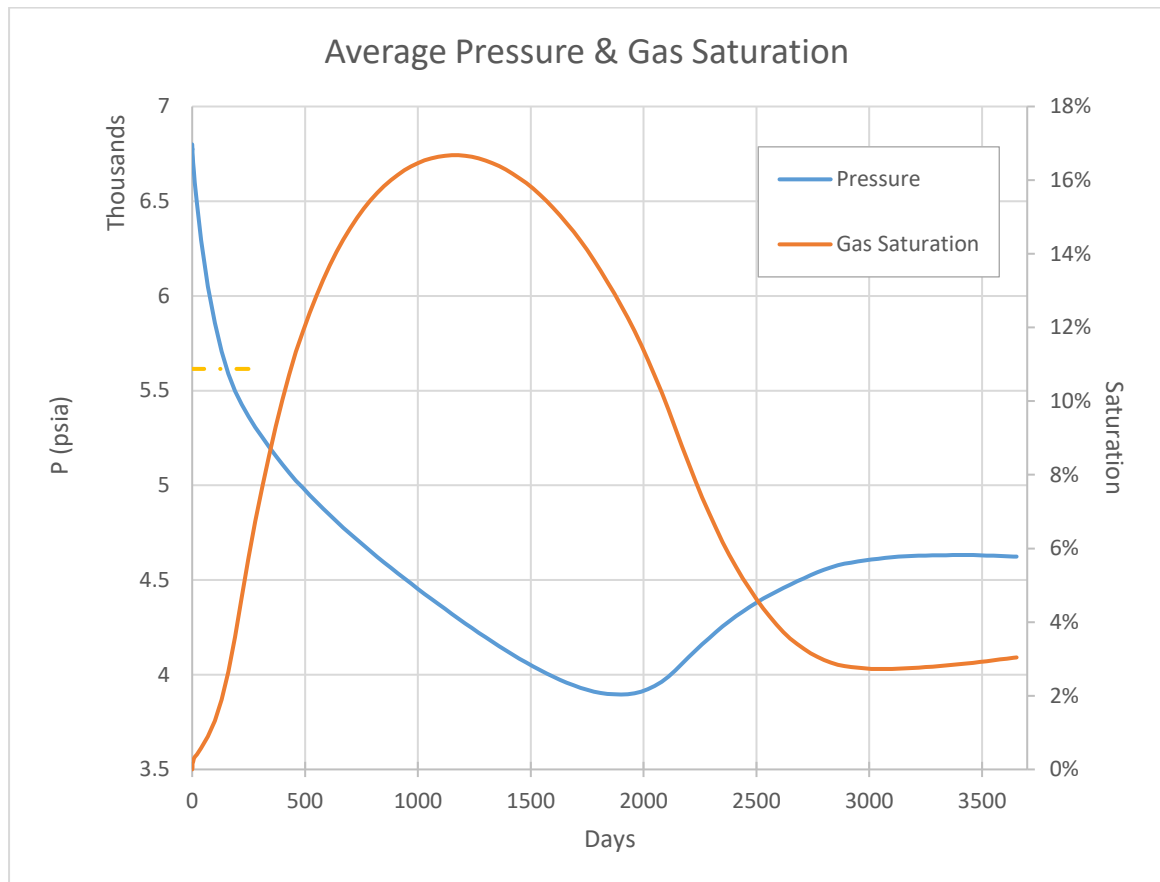
P (psig)	R_s	B_o	μ_o	B_g	μ_g
Απόκλιση της DVC ως προς την CCEC (%)					
3000	0.0000%	0.0000%	0.0000%		
2500	0.0000%	0.0000%	0.0000%		
2000	0.0000%	0.0000%	0.0000%		
1606	0.0000%	0.0000%	0.0000%	0.0000%	0.0000%
1500	0.0000%	0.0000%	0.0000%	0.0000%	0.0000%
1000	0.0047%	0.0009%	0.0196%	0.0005%	0.0000%
500	0.1288%	0.0153%	0.5691%	0.0090%	0.0167%
0	0.0000%	0.3380%	21.6749%	0.6313%	8.2606%

Όπως ήταν αναμενόμενο, στο λιγότερο πτητικό πετρέλαιο οι μέθοδοι παρουσιάζουν μικρότερες αποκλίσεις.

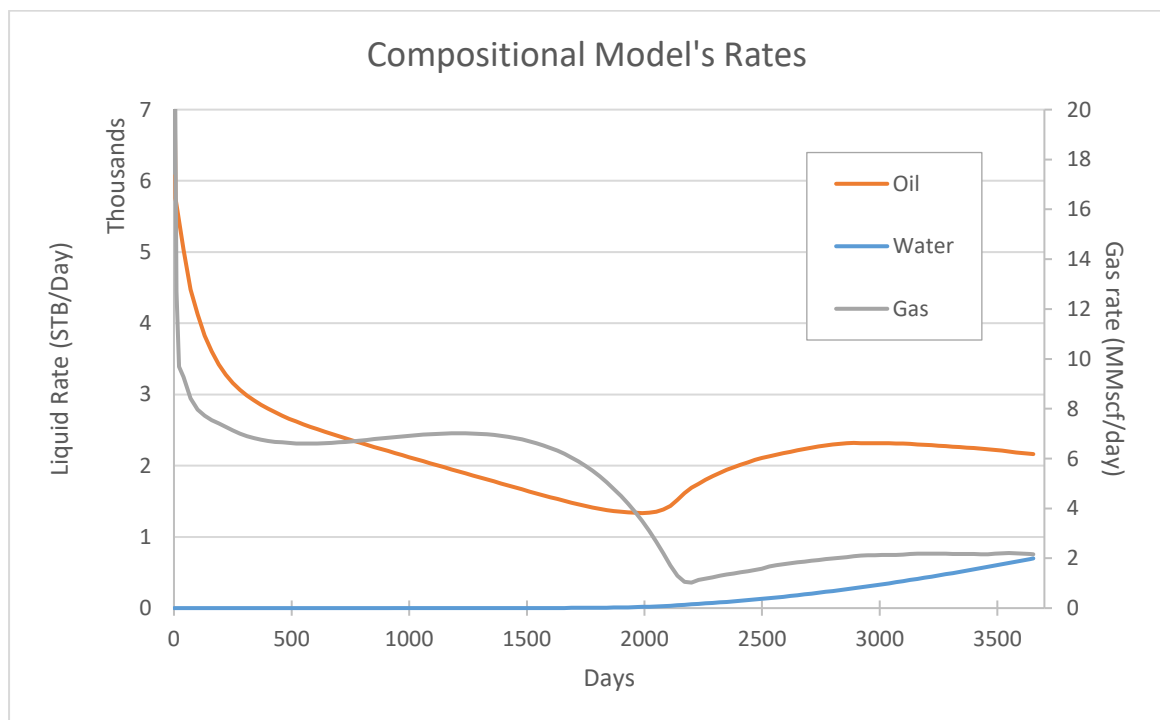
5.2 Ερμηνεία προσομοιώσεων παραγωγής ταμειευτήρα από το Fully Compositional μοντέλο

Αρχικά εξετάζονται αποτελέσματα μόνο από το compositional μοντέλο, έναντι του οποίου συγκρίνονται όλα τα υπόλοιπα, προκειμένου να γίνει η ερμηνεία του υπό μελέτη συστήματος.

5.2.1 Περίπτωση ρευστού C1_70



Διάγραμμα 17: Μέση πίεση και κορεσμός αερίου στο σύστημα με C1_70



Διάγραμμα 18: Ρυθμοί παραγωγής ανά φάση για το σύστημα με C1_70

Πριν ξεκινήσει η παραγωγή ο ταμειευτήρας είναι πλήρως κορεσμένος σε πετρέλαιο. Με την έναρξη αυτής και παρόλο που η μέση πίεση διατηρείται άνω του P_b για τις πρώτες 140 μέρες περίπου, έχει ήδη εμφανισθεί αέριο λόγω του ότι στην γεώτρηση παραγωγής έχει εφαρμοσθεί κριτήριο πίεσης στα 1500 psia, οπότε τοπικά, κοντά στην γεώτρηση, η πίεση είναι σημαντικά χαμηλότερη του P_b . Γι αυτόν τον λόγο υπάρχει σημαντική παραγωγή αερίου από την πρώτη ημέρα, η οποία όμως μειώνεται κατακόρυφα, επειδή η παραγωγή προέρχεται μονάχα από ένα κελί.

Αρχικά παράγονται μεγάλες ποσότητες τόσο αερίου, όσο και πετρελαίου. Καθώς η πίεση πλησιάζει το P_b , στο γράφημα δημιουργείται ανεπαίσθητο «γόνατο» στην πίεση, η οποία πλέον μειώνεται με χαμηλότερο ρυθμό, καθώς υπεισέρχεται η συμπιεστότητα του αερίου. Το «γόνατο» αυτό δεν είναι έντονο για δύο λόγους:

- Η «διάδοση» της πτώσης της πίεσης υπό το P_b γίνεται σχετικά αργά οπότε η μετάβαση είναι εξαιρετικά ομαλή.
- Η συμπιεστότητα του πετρελαίου είναι υψηλή λόγω της μεγάλης περιεκτικότητας σε μεθάνιο, ήτοι δεν διαφέρει αρκετά από την συμπιεστότητα του αερίου ώστε να προκαλέσει πιο έντονο γόνατο.

Παράλληλα, ο κορεσμός της αέριας φάσης εκτοξεύεται κατακόρυφα με αποτέλεσμα ο ρυθμός παραγωγής αερίου, σε αντίθεση με αυτόν του πετρελαίου που ακολουθεί στενά της καμπύλη της μέσης πίεσης, να αλλάξει κλίση αλλά και κυρτότητα.

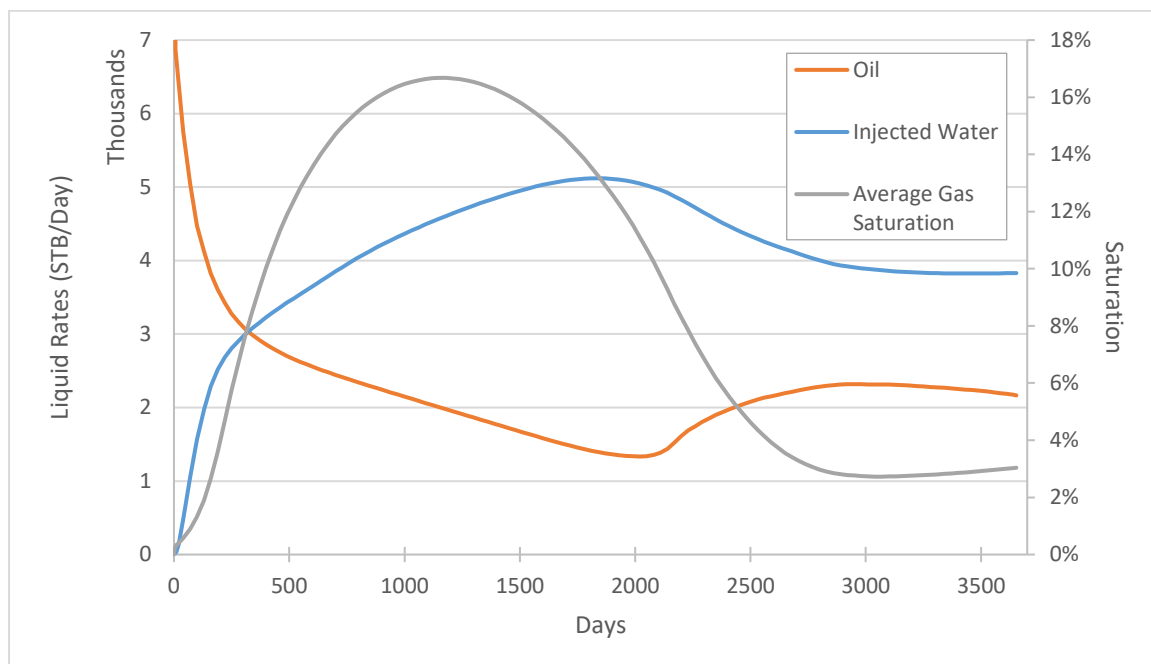
Φαίνεται λοιπόν να δημιουργείται μια «ζώνη» ή ένα «μέτωπο» ελεύθερου αερίου, το οποίο παράγεται με ταχύτατους ρυθμούς λόγω της αυξημένης κινητικότητάς του έναντι των υγρών φάσεων, προτού ο κορεσμός πέσει κατακόρυφα, καθώς τα ελαφρύτερα συστατικά θα έχουν πλέον απομακρυνθεί και το μίγμα υδρογονανθράκων βρεθεί σε νέα διφασική ισορροπία, κάτι που φαίνεται και από το ότι σταθεροποιείται ο κορεσμός και η παραγωγή της αέριας φάσης.

Στην ανάπτυξη του μοντέλου, ορίστηκαν κριτήρια πιέσεως για τις γεωτρήσεις, 6800 psia και 1500 psia για την γεώτρηση έγχυσης και παραγωγής αντίστοιχα. Συνεπώς το μοντέλο, με την πάροδο του χρόνου, προσπαθεί να αποκτήσει μέση πίεση ίση περίπου με τον αριθμητικό μέσο των δύο αυτών πιέσεων, ήτοι 4150 psia.

Πράγματι παρατηρείται μια σύγκλιση προς αυτήν την τάξη μεγέθους, πρώτα όμως η πτώση πίεσης έχει συνεχίσει σε χαμηλότερες τιμές προτού επανέλθει.

Αυτό συμβαίνει επειδή η κινητικότητα της αέριας φάσης είναι τόσο μεγάλη σε σχέση με τα άλλα δύο υγρά, που παράγεται ταχύτατα, δημιουργώντας υποπίεση στον ταμειευτήρα.

Στην συνέχεια αυτή η υποπίεση αποκαθίσταται καθώς η έγχυση νερού συνεχίζει να αυξάνει μέχρις ότου να υπάρξει αύξηση της παραγωγής πετρελαίου:



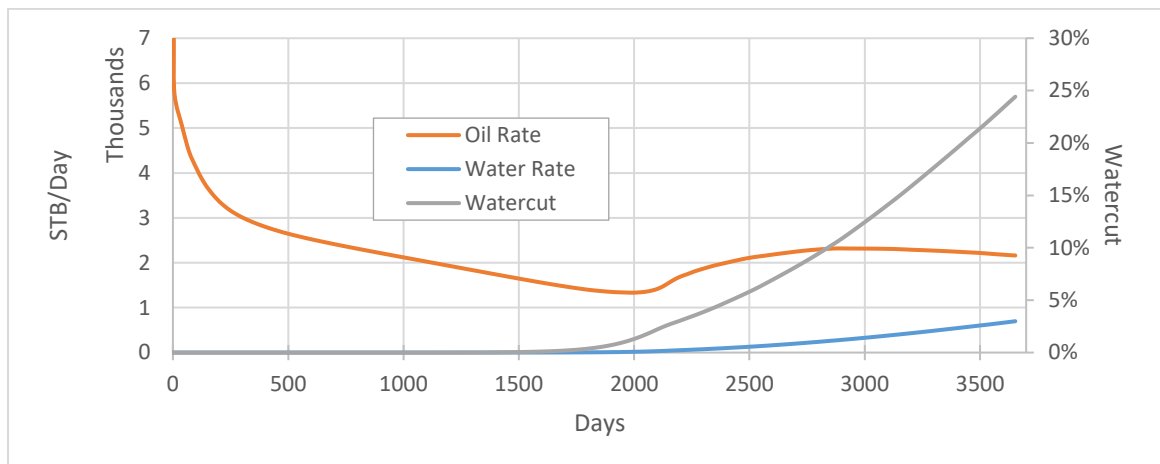
Διάγραμμα 19: Σύγκριση ρυθμών έγχυσης νερού και παραγωγής πετρελαίου σε σχέση με τον μέσο κορεσμό αερίου στο σύστημα με C1_70

Καθώς η μέση πίεση του ταμιευτήρα επανέρχεται προς τον αριθμητικό μέσο, οι εντάσεις των αλλαγών αυτών μειώνονται και παρατηρούνται ηπιότερες κλίσεις στους ρυθμούς έγχυσης νερού και παραγωγής πετρελαίου.

Στην ουσία, το σύστημα έχει αρχίσει να πλησιάζει κατάσταση steady-state παραγωγής. Αυτό όμως δεν έχει λάβει χώρα στο διάστημα των 10 ετών όπου εξετάζεται η παραγωγή, απλώς φαίνεται ότι οδεύει προς τα εκεί. Μάλιστα, προς το τέλος της υπό μελέτης χρονικής περιόδου, η καμπύλη της πίεσης λαμβάνει ελαφρά φθίνουσα πορεία, γεγονός που ενισχύει την παραπάνω ερμηνεία.

Ενδιαφέρον έχει η συμμετρία των καμπυλών παραγωγής πετρελαίου και έγχυσης νερού, που είναι αναμενόμενη. Παρατηρείται μια υστέρηση στην απόκριση της παραγωγής πετρελαίου σε σχέση με τις μεταβολές της έγχυσης νερού, που οφείλονται στην ανάγκη να περάσει χρόνος μέχρι να διαδοθούν οι επακόλουθες μεταβολές.

Η μεγάλη αύξηση της έγχυσης νερού οδηγεί σε αύξηση του watercut, το οποίο εμφανίζεται αφού παραχθεί το μέτωπο του αερίου. Συγκεκριμένα ο ρυθμός παραγωγής του νερού από πρακτικά μηδενικός, ξεκινά και αυξάνεται εκθετικά. Στις 2000 μέρες βρίσκεται μόλις στο 1.3% περίπου για να καταλήξει στο 24.4% την τελευταία μέρα παραγωγής, όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 20.

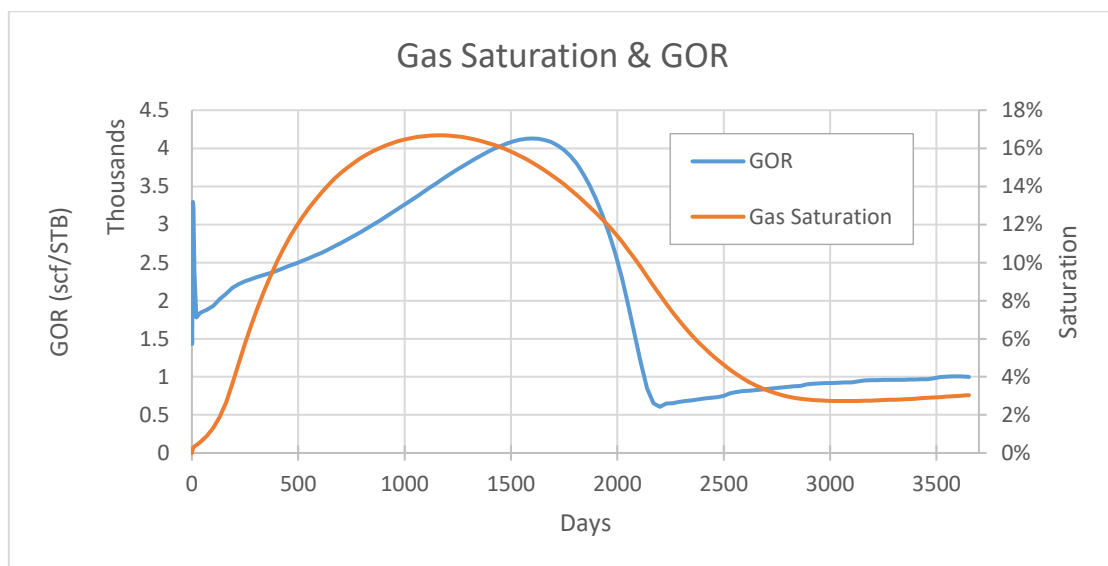


Διάγραμμα 20: Ρυθμοί παραγωγής υγρών και water cut για το σύστημα με C1_70

Κάποια επιπλέον ενδιαφέροντα σημεία είναι τα ακόλουθα:

- Η υστέρηση κορυφής του GOR έναντι του κορεσμού του αερίου
- Το φαινόμενο της επαναδιάλυσης του αερίου με την αύξηση της πίεσης από τις 2000 ημέρες και μετά.

Η υστέρηση από την δημιουργία του μετώπου αερίου και της παραγωγής του, οφείλεται στην ανάγκη χρόνου για να μεταφερθεί το αέριο προς την γεώτρηση παραγωγής.

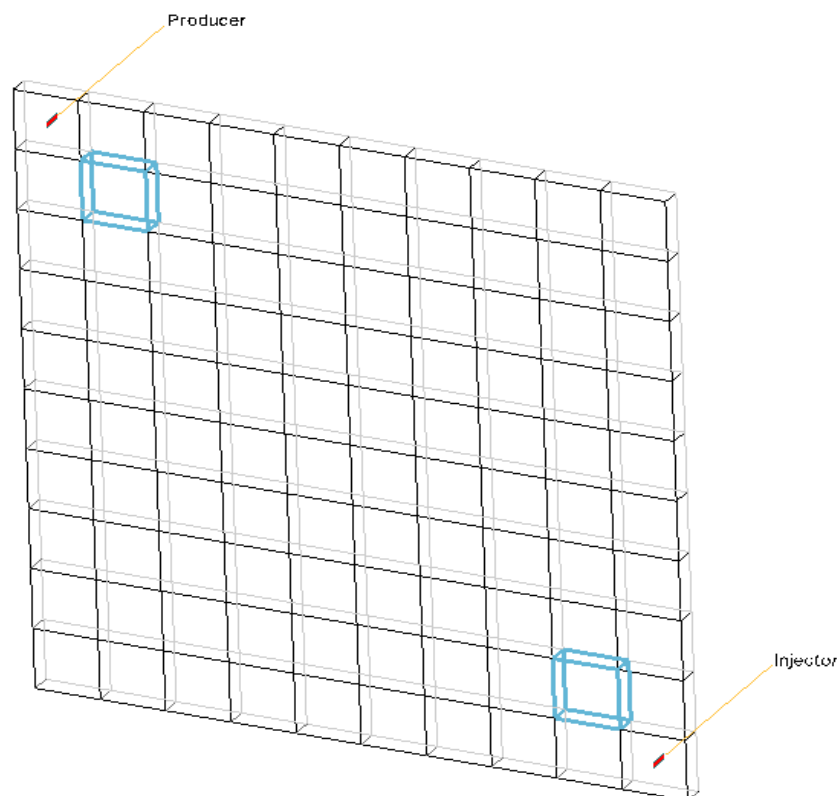


Διάγραμμα 21: Κορεσμός αερίου και GOR για το σύστημα με C1_70

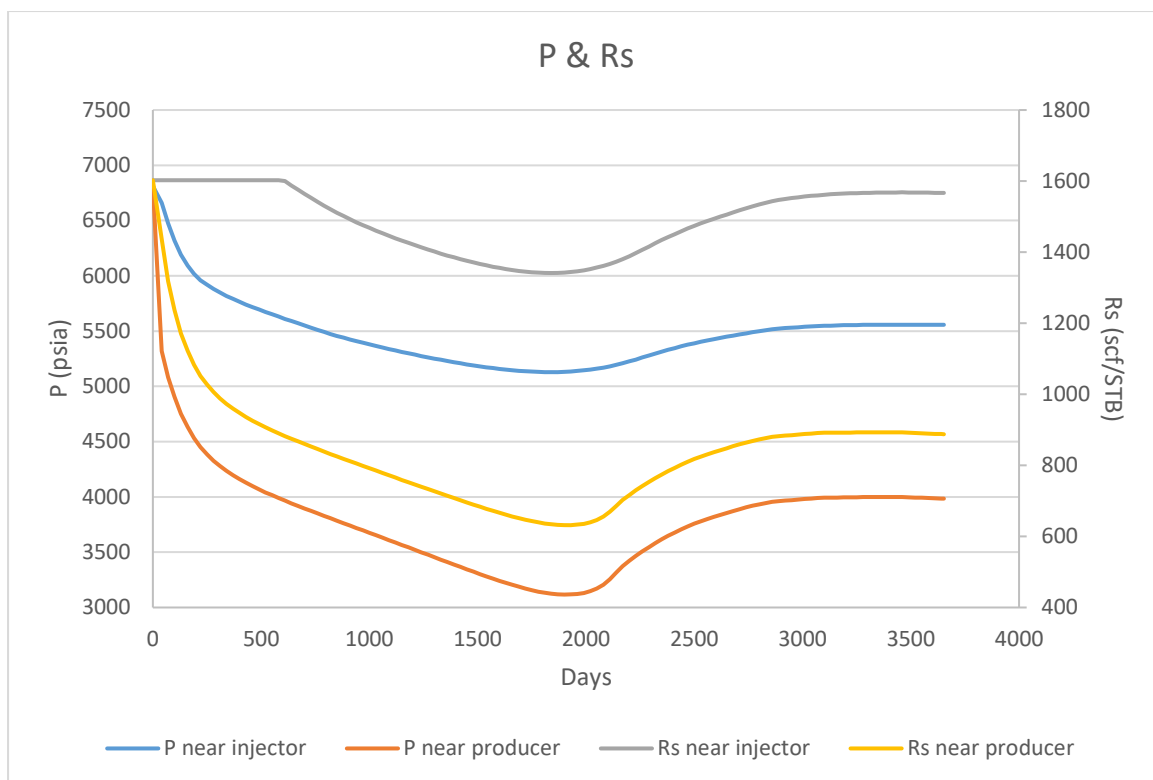
Η απότομη κορύφωση και πτώση του GOR στις πρώτες μέρες της παραγωγής οφείλεται και πάλι στην απότομη πτώση της πίεσης γύρω από την γεώτρηση παραγωγής.

Τέλος, ένα άλλο ενδιαφέρον φαινόμενο που λαμβάνει χώρα είναι πως κατά την τελευταία άνοδο της πίεσης από τις 2000 ημέρες και μετά, επαναδιαλύεται αέριο στο πετρέλαιο. Αυτό μπορεί να φανεί καλύτερα αν εξεταστούν το εν διαλύσει αέριο στην μονάδα όγκου του πετρελαίου (R_s) και ο βαθμός κορεσμού του αερίου στον ταμιευτήρα, ανά κελί του μοντέλου.

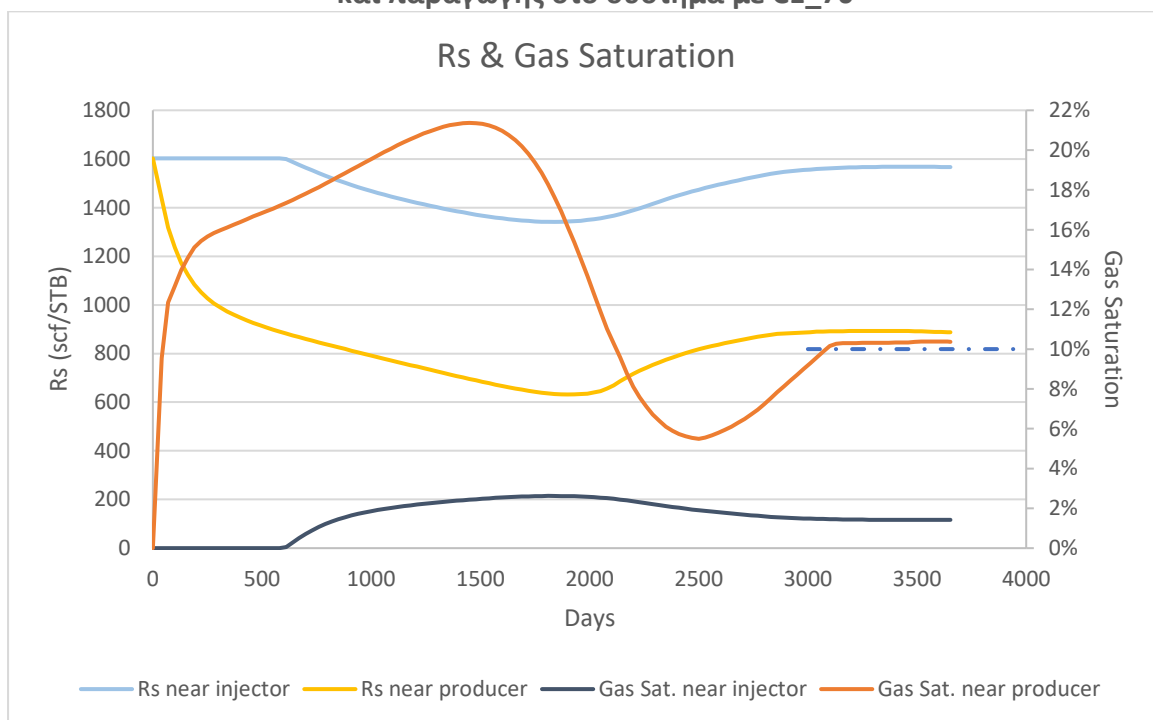
Ως αντιπροσωπευτικά κελιά που μπορούν να αναδείξουν αυτό το φαινόμενο, επιλέχθηκαν δύο επί της διαγωνίου του ταμιευτήρα, δίπλα από την γεώτρηση έγχυσης και παραγωγής αντίστοιχα:



Σχήμα 19: Κελιά προς σύγκριση ιδιοτήτων R_s και κορεσμού σε αέριο στο σύστημα με C1_70



Διάγραμμα 22: Πίεση & Rs κοντά στην γεώτρηση έγχυσης και παραγωγής στο σύστημα με C1_70

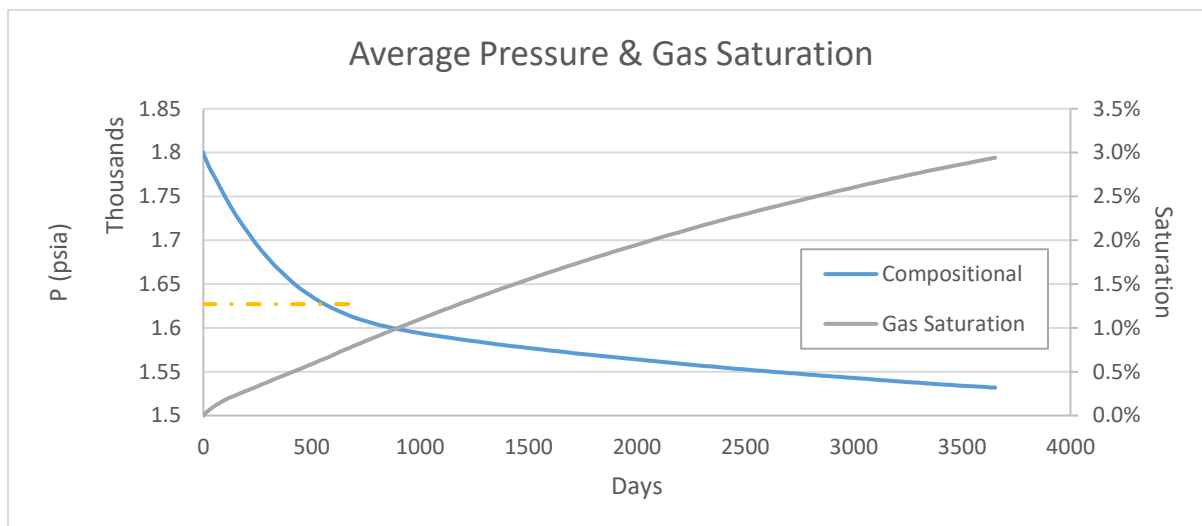


Διάγραμμα 23: Rs & κορεσμός σε αέριο, κοντά στην γεώτρηση έγχυσης και παραγωγής στο σύστημα με C1_70

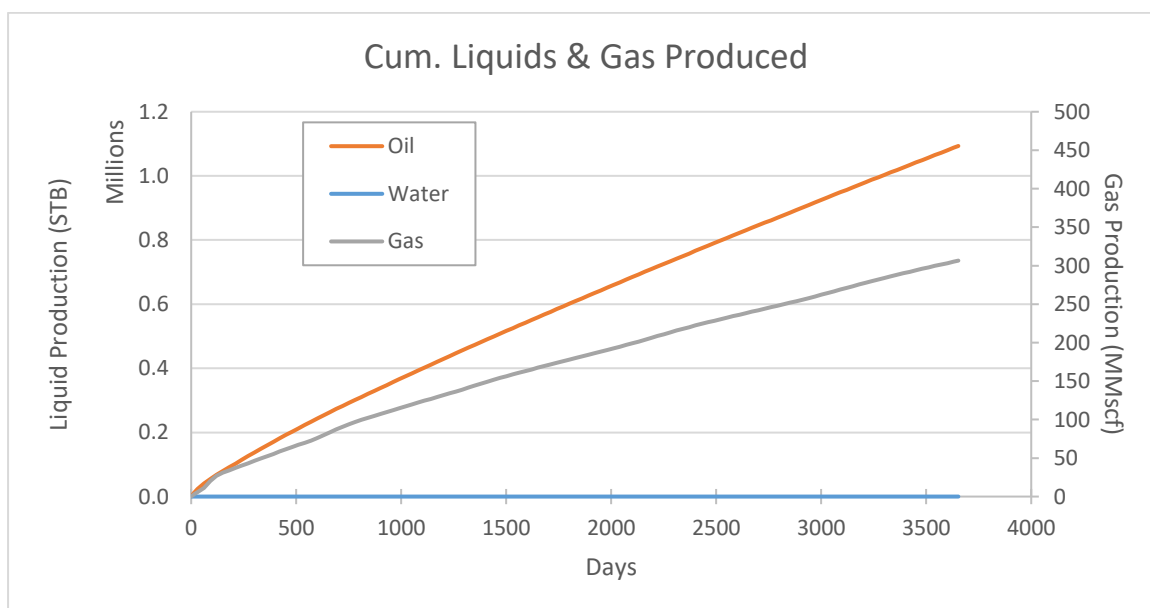
Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 22 και 23. Αξίζει να σημειωθεί η αναμενόμενη στενή σύνδεση του Rs με την πίεση και ότι το αέριο που σχηματίζεται στο κελί κοντά στην γεώτρηση έγχυσης, δεν επαρκεί για να ξεπεράσει τον κρίσιμο βαθμό

κορεσμού (=10%) και να κινηθεί, κάτι που εξηγεί την συμμετρία μεταξύ των καμπυλών Rs και κορεσμού σε αέριο. Αντιθέτως, στο κελί κοντά στην γεώτρηση παραγωγής το αέριο κινείται με το πέρας του πρώτου μήνα περίπου.

5.2.2 Περίπτωση ρευστού C1_30



Διάγραμμα 24: Μέση πίεση και βαθμός κορεσμού στο σύστημα με C1_30



Διάγραμμα 25: Αθροιστική παραγωγή όλων των φάσεων στο σύστημα με C1_30

Αυτό που είναι προφανές αμέσως, είναι πως σε πλήρη αντίθεση με την περίπτωση του συστήματος πετρώματος-ρευστού με το πτητικότερο C1_70, εδώ παρουσιάζεται μια σημαντικά απλούστερη συμπεριφορά με το πιο βαρύ πετρέλαιο.

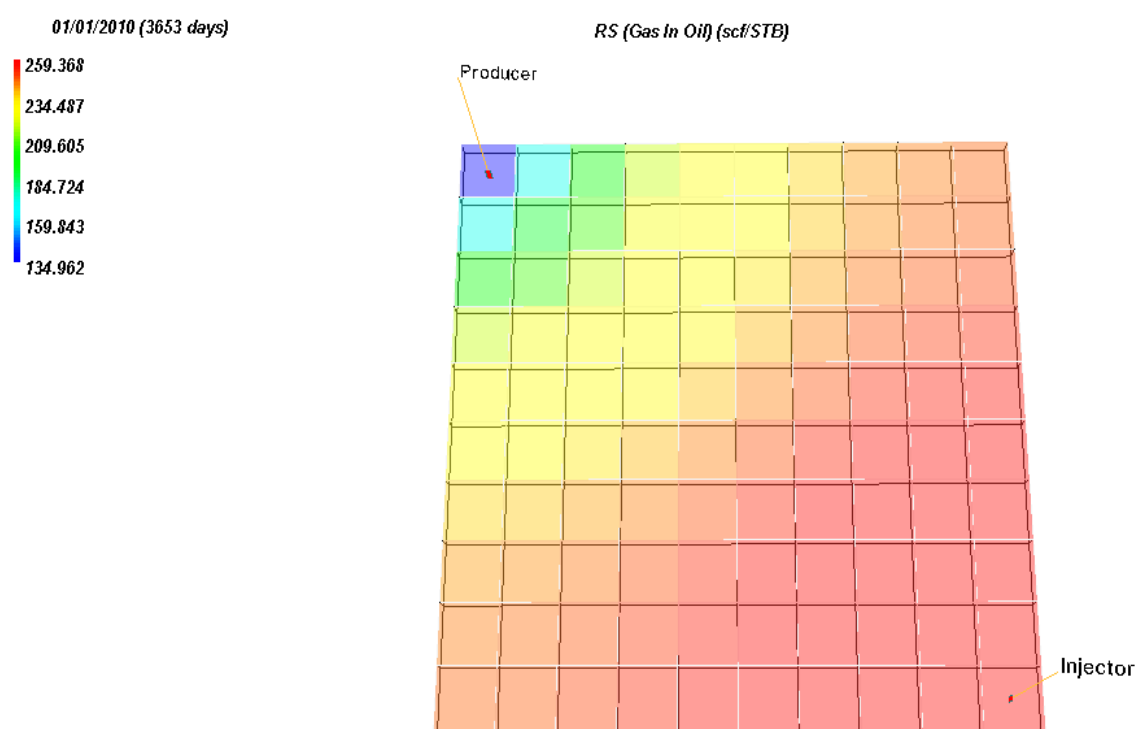
Αρχικά η πίεση μειώνεται με την εκτόνωση που προκαλεί η παραγωγή πετρελαίου, μέχρις ότου περάσει το σημείο φυσαλίδας, όπου και δημιουργείται αέριο. Η διαφορά

συμπιεστότητας αερίου και πετρελαίου δημιουργεί «γόνατο» και αλλάζει ο ρυθμός μεταβολής της πίεσης.

Η παρατήρηση που έχει ενδιαφέρον είναι πως ο μέσος κορεσμός της αέριας φάσης δεν ξεπερνά ποτέ τον κρίσιμο βαθμό κορεσμού για να κινηθεί σημαντικά το αέριο.

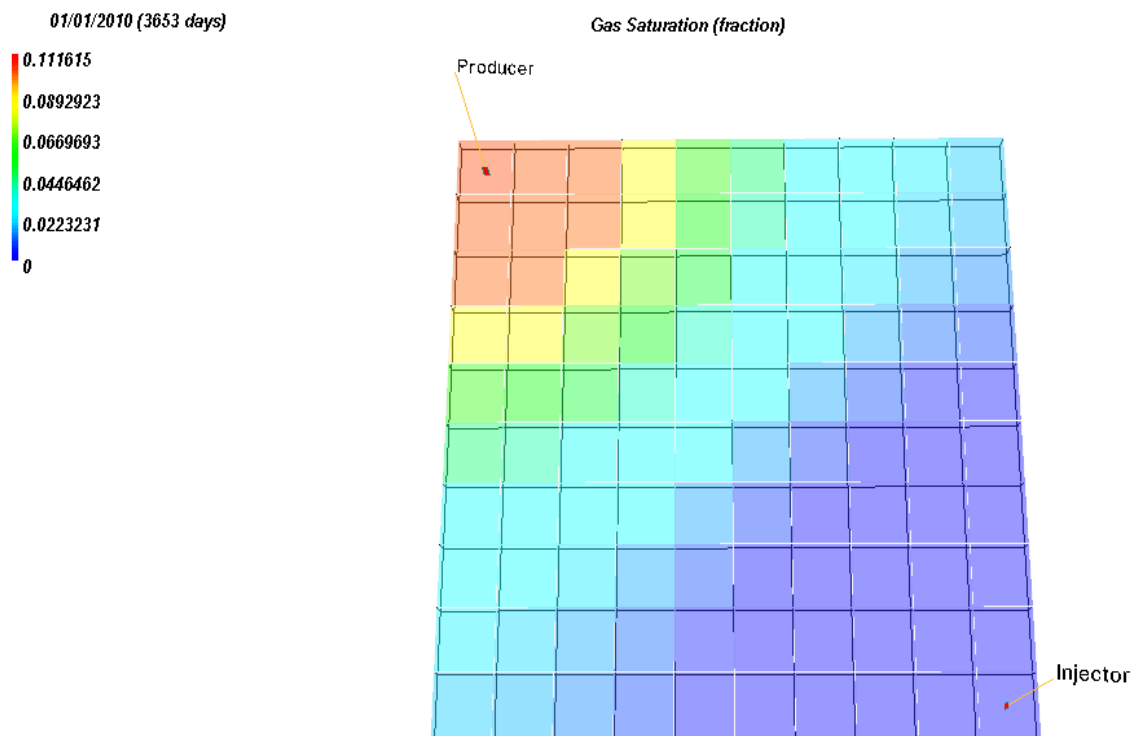
Συνεπώς, η παραγωγή του αερίου οφείλεται πρωτίστως στο αέριο εν διαλύσει και δευτερευόντως⁷ σε λίγα κελιά κοντά στην γεώτρηση παραγωγής που έχουν αναπτύξει επαρκές αέριο ώστε αυτό να ρέει, κάτι που φαίνεται και στα ακόλουθα Σχήματα 18 και 19.

Τα μικρά μεγέθη παραγωγής που παρατηρούνται οφείλονται στις μικρές πιέσεις που δόθηκαν ως κριτήρια στις γεωτρήσεις έγχυσης και παραγωγής (1800 psia και 500 psia αντίστοιχα), προκειμένου να αναγκασθεί το μοντέλο να εισέλθει σε κατάσταση συνύπαρξης τριών φάσεων.



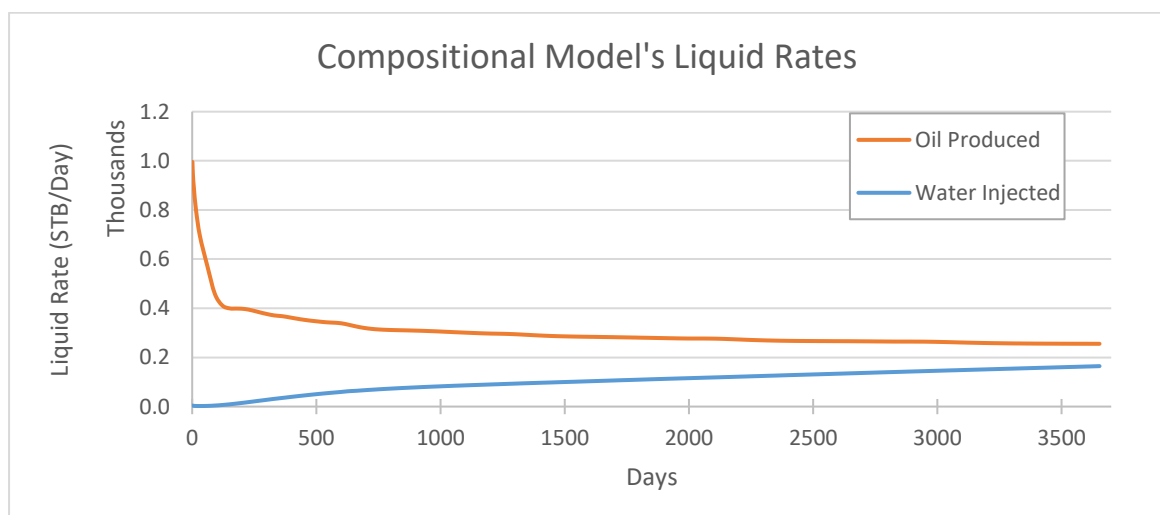
Σχήμα 20: Κατανομή του Rs στον χώρο του ταμιευτήρα την τελευταία μέρα παραγωγής, για το σύστημα με C1_30

⁷ Δευτερευόντως, διότι ο μέγιστος βαθμός κορεσμού που παρατηρείται είναι 11.16%, απέχει δηλαδή από τον κρίσιμο βαθμό κορεσμού της αέριας φάσης κατά μόλις 1.16%. Συνεπώς η συνεισφορά αυτή είναι πολύ μικρή.



Σχήμα 21: Κατανομή του κορεσμού του αερίου στον χώρο του ταμειυτήρα την τελευταία μέρα παραγωγής, για το σύστημα με C1_30

Τέλος, ενδιαφέρον έχει το διάγραμμα ρυθμού έγχυσης νερού και παραγωγής πετρελαίου. Καθώς δεν υπάρχει μεγάλη συμβολή του αερίου στην κίνηση των ρευστών, οι δύο ρυθμοί τείνουν να εξισωθούν.

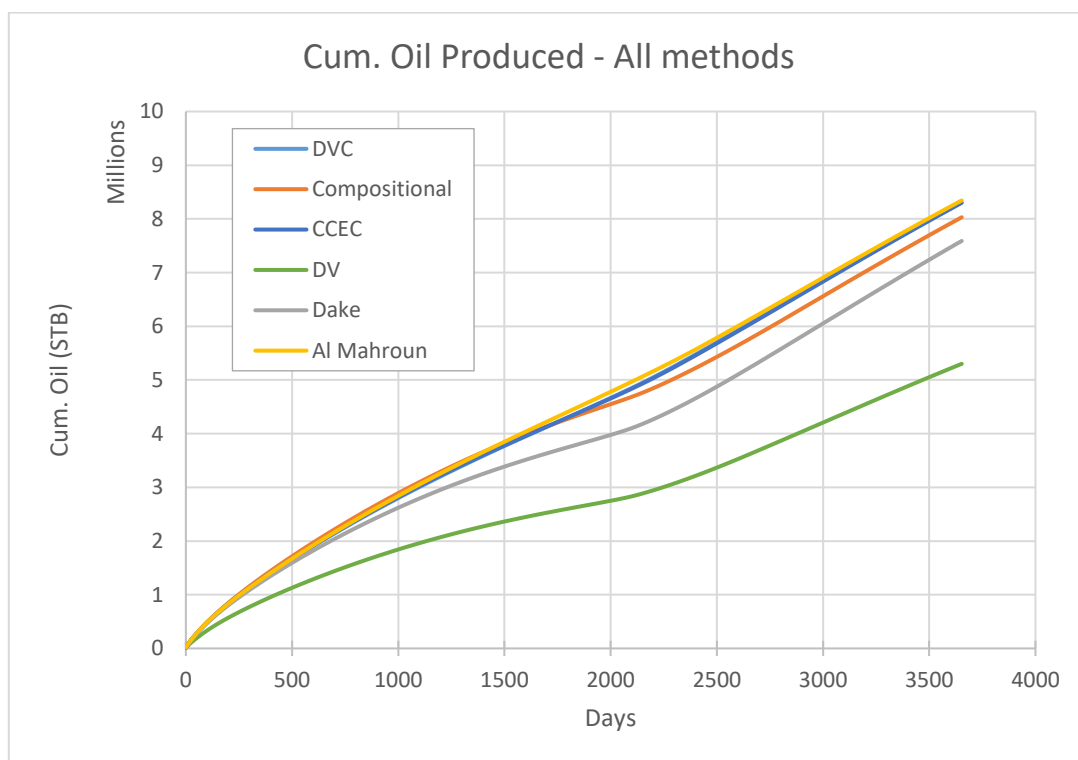


Πράγματι αν ο χρόνος παραγωγής διαρκούσε αρκετά ώστε η μέση πίεση του ταμειυτήρα να πλησίαζε τον αριθμητικό μέσο των κριτηρίων πίεσης των γεωτρήσεων ($A.M. = \frac{1800+500}{2} = 1150$), τα δύο μεγέθη αυτά θα ήταν πρακτικά ίσα.

5.3 Δεδομένα από τις προσομοιώσεις παραγωγής ταμειευτήρα με τις διάφορες μεθόδους περιγραφής των ιδιοτήτων των ρευστών

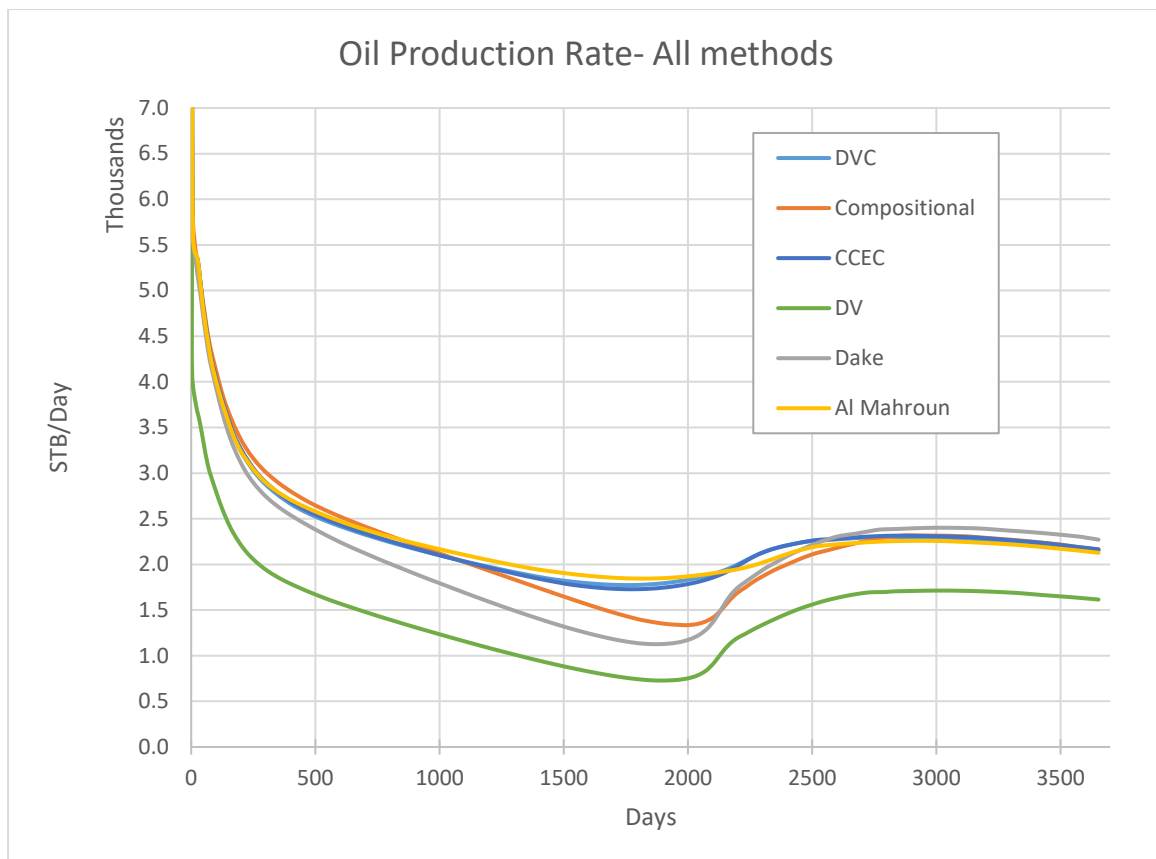
5.3.1 Περίπτωση ρευστού C1_70

Ως κυριότερο κριτήριο σύγκρισης επιλέχθηκε η πρόβλεψη κάθε μοντέλου στην παραγωγή πετρελαίου έναντι του fully compositional, λόγω της αυξημένης οικονομικής σημασίας της πετρελαϊκής φάσης.



Διάγραμμα 26: Αθροιστική παραγωγή όλων των μοντέλων για C1_70

Εκ πρώτης όψης φαίνεται αμέσως η χειρότερη ποιότητα προβλέψεων της απλής DV. Ενδιαφέρον έχει η ελαφρά σιγμοειδής μορφή της καμπύλης του fully compositional μοντέλου. Αντί της αθροιστικής παραγωγής πετρελαίου, ο ρυθμός παραγωγής επιτρέπει καλύτερη σύγκριση μεταξύ των μοντέλων:



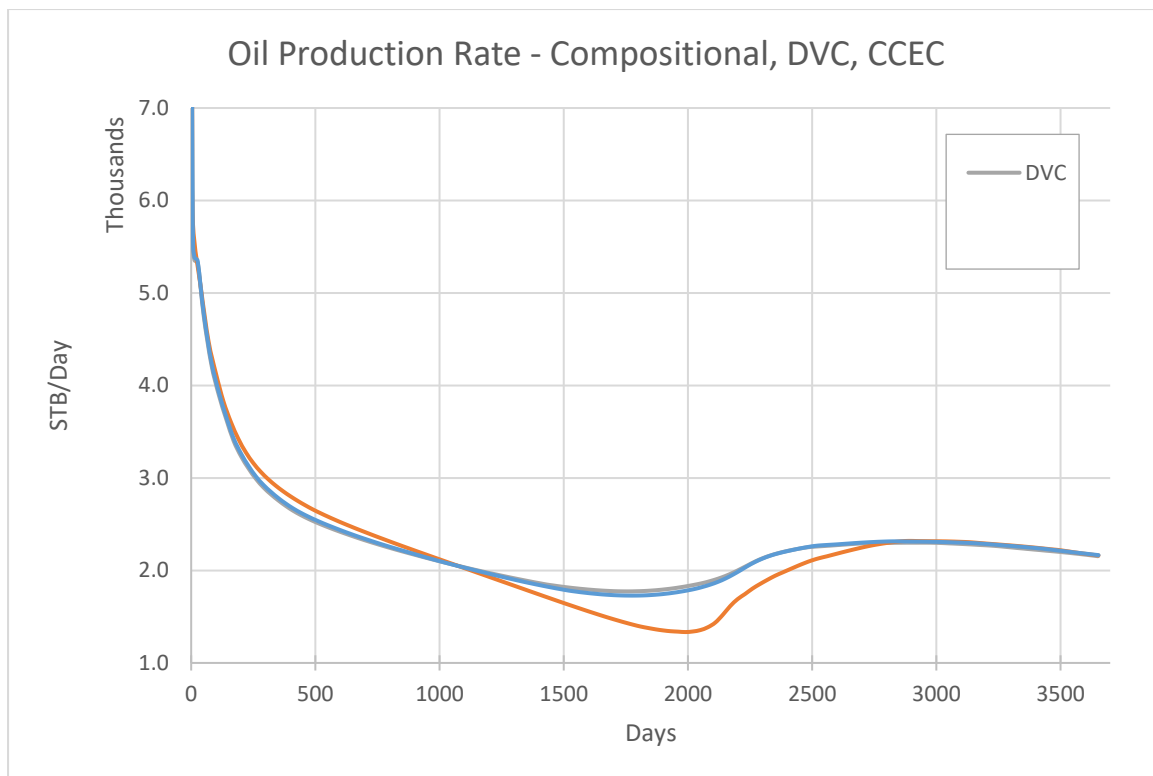
Διάγραμμα 27: Ρυθμοί παραγωγής πετρελαίου όλων των μοντέλων για C1_70

Όλες οι μέθοδοι εκτός της DV αρχικά παρουσιάζουν παραπλήσια αποτελέσματα. Στην συνέχεια, όλες αποτυγχάνουν να προβλέψουν με ακρίβεια την συμπεριφορά του ταμιευτήρα στο στάδιο του σχηματισμού και παραγωγής «μετώπου» αερίου, ενώ στο τέλος συγκλίνουν εκ νέου.

Είναι ξεκάθαρο πως η απλή DV δεν επαρκεί σε καμία περίπτωση. Η μέθοδος κατά Dake ενώ φαίνεται να προσεγγίζει ελαφρά την συμπεριφορά των ρυθμών παραγωγής, παρουσιάζει αποκλίσεις νωρίτερα και έχει σημαντικότερη απόκλιση στην πρόβλεψη της αθροιστικής και ολικής παραγωγής.

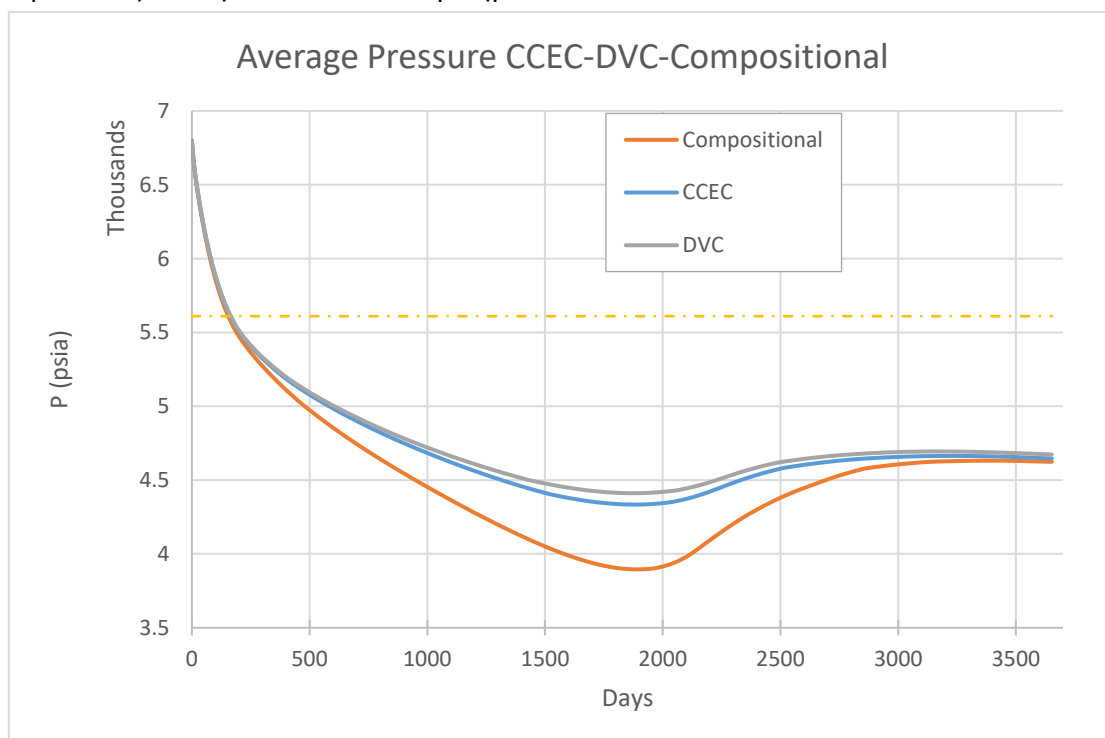
Από τις υπόλοιπες 3 μεθόδους, η Al Mahroun δείχνει την μεγαλύτερη απόκλιση στο στάδιο του μετώπου αερίου ενώ δείχνει πρώτα να υποεκτιμά, στην συνέχεια να υπερεκτιμά και μετά να υποεκτιμά ξανά, συμπίπτοντας σαν από τύχη, από αλληλοαναιρέσεις σφαλμάτων και όχι λόγω καλύτερης μοντελοποίησης της ζητούμενης συμπεριφοράς.

Οι μέθοδοι CCEC και DVC είναι ιδιαίτερα κοντά μεταξύ τους, με την CCEC να παρουσιάζει λίγο μικρότερες αποκλίσεις στο στάδιο της παραγωγής μετώπου αερίου.

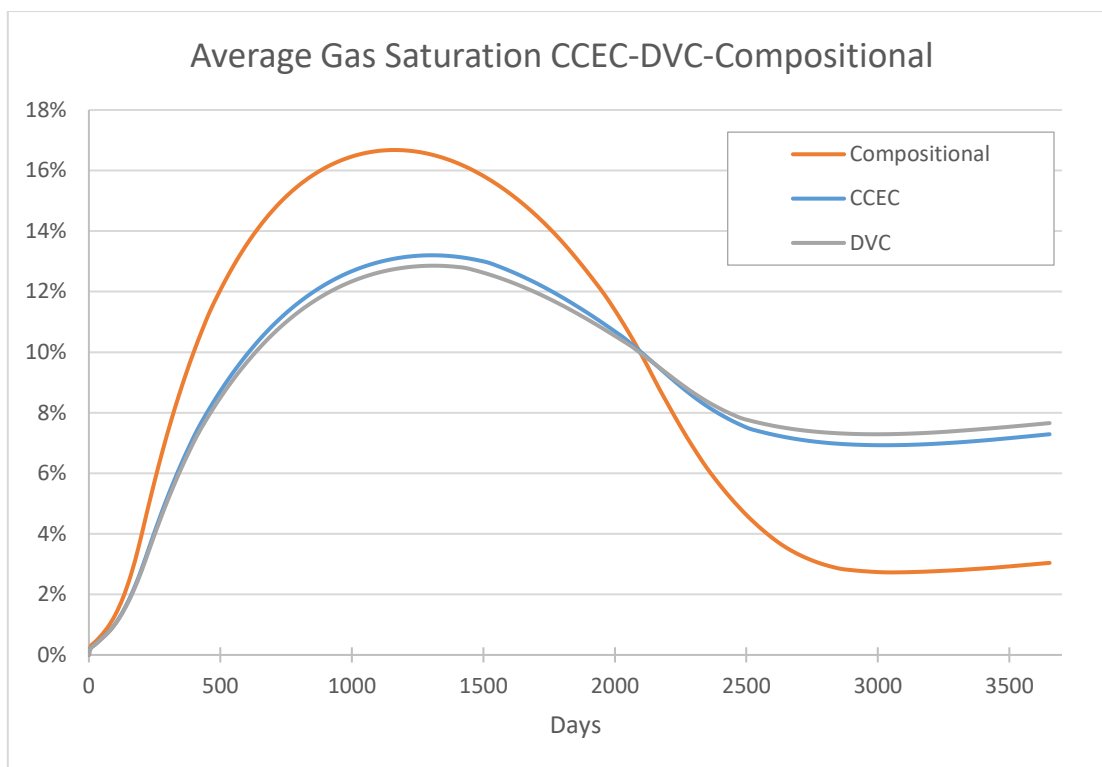


Διάγραμμα 28: Ρυθμοί παραγωγής πετρελαίου από CCEC & DVC για C1_70

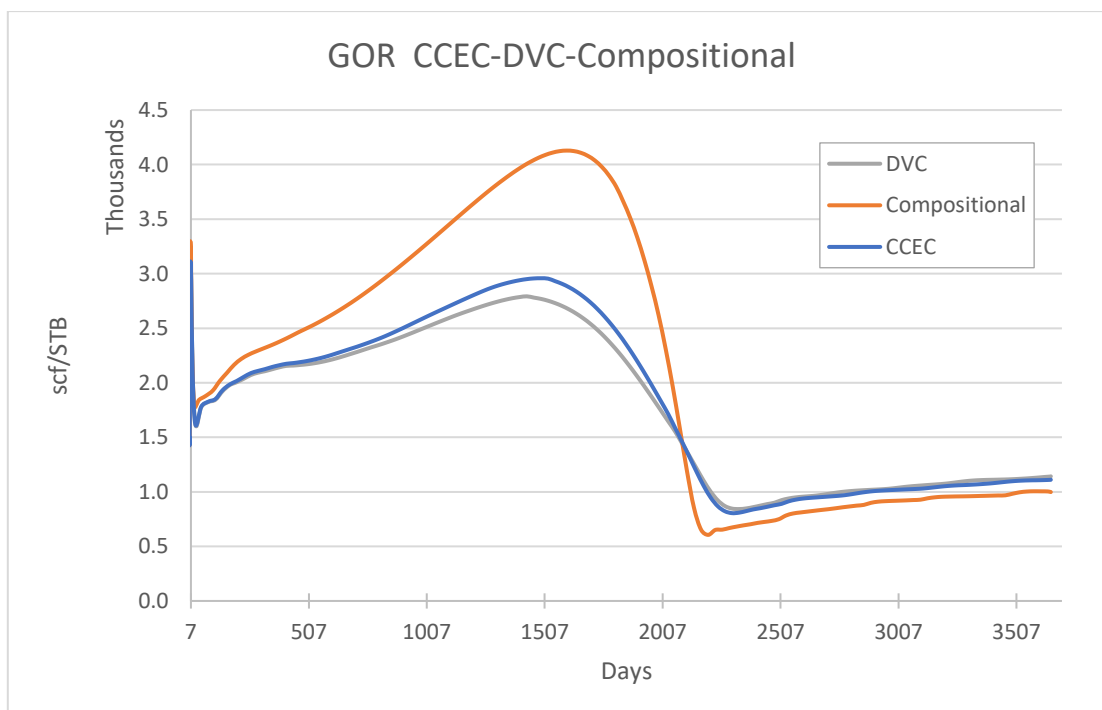
Προκειμένου να εξεταστεί καλύτερα η απόδοση των μεθόδων αυτών, κρίνεται σκόπιμο να αξιοποιηθούν και άλλα κριτήρια.



Διάγραμμα 29: Σύγκριση μέσης πίεσης ταμειυτήρα από CCEC, DVC & Compositional για C1_70



Διάγραμμα 30: Σύγκριση μέσου κορεσμού σε αέριο από CCEC, DVC & Compositional για C1_70



Διάγραμμα 31: Σύγκριση GOR από CCEC, DVC & Compositional για C1_70

Η CCEC δείχνει να προβλέπει συστηματικά λίγο καλύτερα τις πιέσεις, τον βαθμό κορεσμού και το GOR. Επίσης παρέχει ελαφρά καλύτερες τελικές τιμές:

Πίνακας 15: Σύγκριση αθροιστικών ιδιοτήτων και Water Cut μεταξύ CCEC, DVC & Compositional για C1_70

	Cum. Oil Produced		Cum. Gas Produced		Cum. Water Produced		Water Cut	
	(STB/day)	Deviation	(MMscf)		(STB/day)	Deviation	%	Deviation
Compositional	8030470	-	16448	-	488174	-	24.4159	-
DVC	8302300	3.38%	14520.4	11.72%	309932	36.51%	18.9176	22.52%
CCEC	8299990	3.36%	14777.6	10.16%	331662	32.06%	19.6635	19.46%

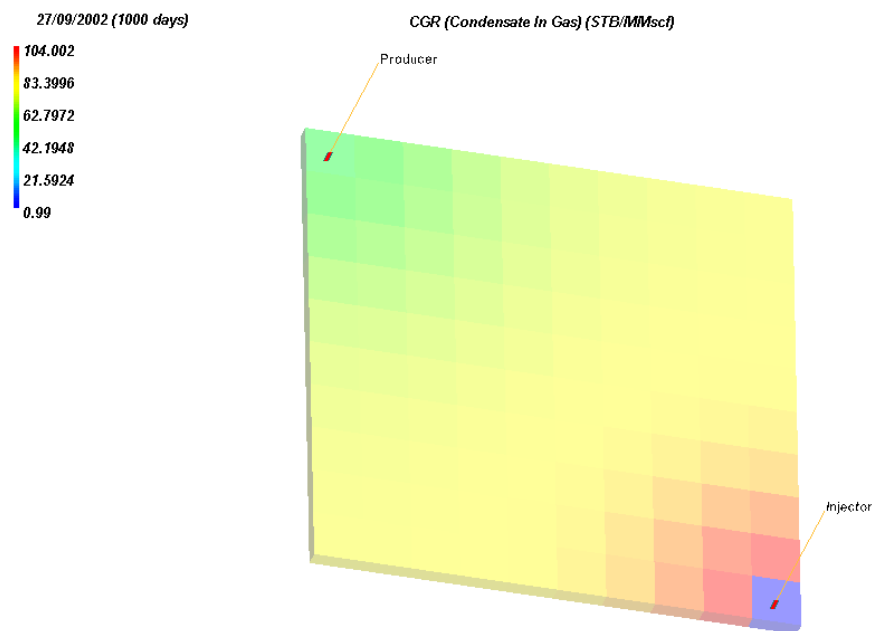
5.3.2 Συμπεράσματα για την περίπτωση ρευστού C1_70

Εκ των παραπάνω, η καλύτερη μέθοδος προσέγγισης διαφαίνεται να είναι η CCEC, με την DVC να βρίσκεται πολύ κοντά. Όλες οι υπόλοιπες υπολείπονται.

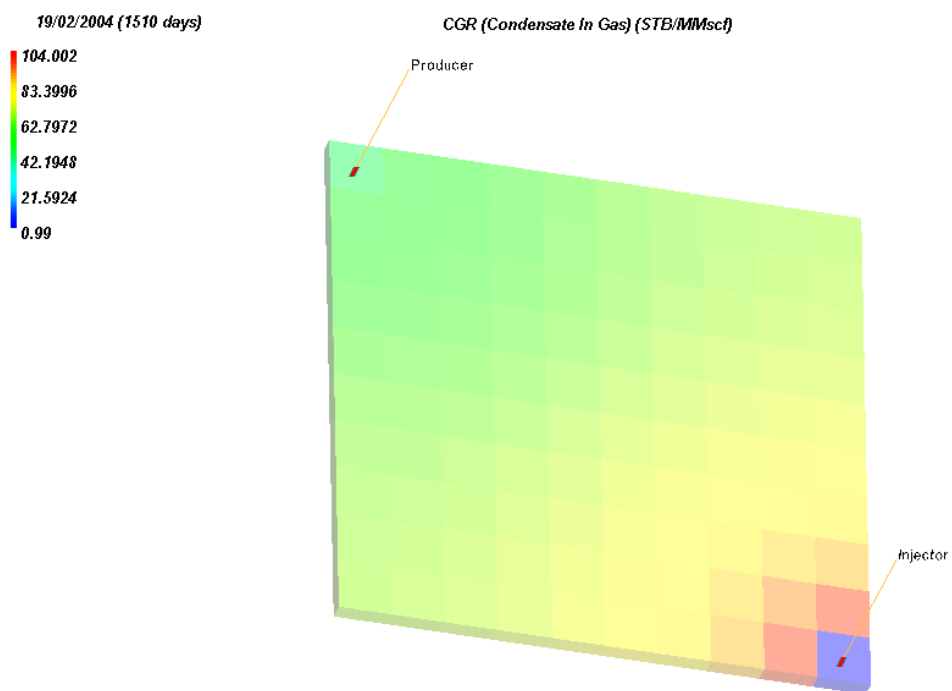
Παρατηρήθηκε ωστόσο πως συστηματικά όλες οι μέθοδοι παρουσιάζουν σημαντικότερες αποκλίσεις με την εμφάνιση του μετώπου αερίου. Ο λόγος είναι πως οι μέθοδοι χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή απλών Black Oil Tables και όχι των modified Black Oil Tables, λόγω περιορισμών του λογισμικού που χρησιμοποιήθηκε.

Η διαφορά αυτών, όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω (βλ. § 2.3.22.3.2 Black Oil Model, σελ. 32), είναι πως στην περίπτωση των modified BOTs συμπεριλαμβάνεται και ο όρος r_s ή αλλιώς CGR, Condensate Gas Ratio, και έτσι μπορεί να προβλεφθεί η συμπεριφορά του μετώπου αερίου.

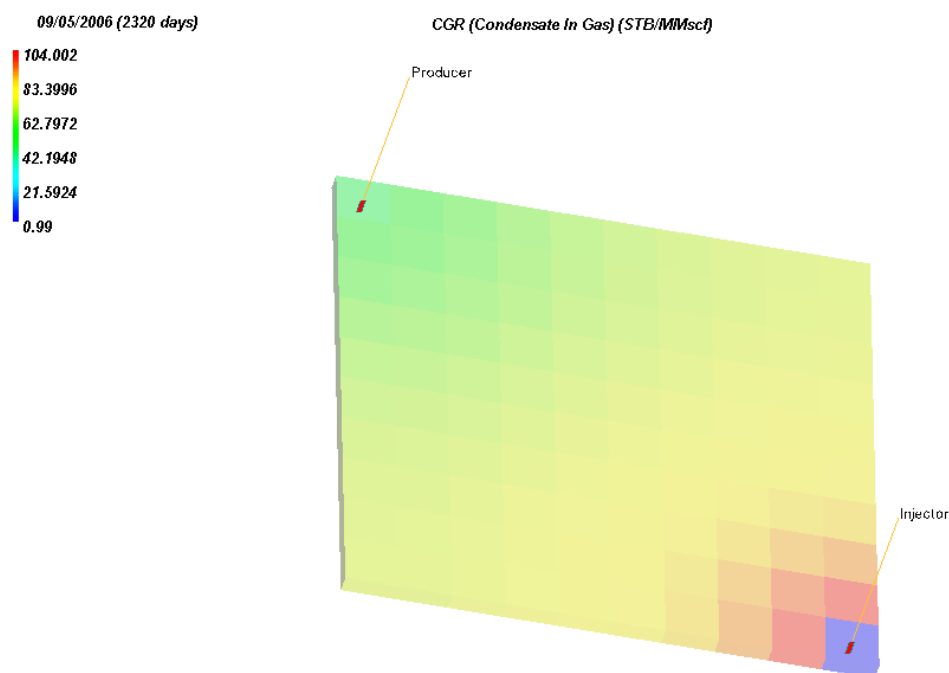
Η τάξη μεγέθους δεν είναι αμελητέα, όπως φαίνεται και στις παρακάτω ενδεικτικές εικόνες που προέκυψαν από την fully compositional μοντελοποίηση:



Σχήμα 22: Αναπαράσταση της κατανομής του CGR στον χώρο από το Compositional μοντέλο, για $t=1000\text{days}$



Σχήμα 23: Αναπαράσταση της κατανομής του CGR στον χώρο από το Compositional μοντέλο, για $t=1510\text{days}$



Σχήμα 24: Αναπαράσταση της κατανομής του CGR στον χώρο από το Compositional μοντέλο, για t=2320days

Από τα Σχήματα 22-24 φαίνεται πως η επικρατέστερη τιμή του CGR κυμαίνεται από περίπου 62.8 STB/MMscf έως 83.4 STB/MMscf, που επαρκεί για να αποτελέσει αξιόλογο μέρος της παραγωγής πετρελαίου, την οποία δεν λαμβάνει υπόψη του το Black Oil Model.

Αν και λόγω περιορισμών προγράμματος δεν είναι δυνατό να υπολογισθεί άμεσα η παραγωγή συμπυκνώματος, επιχειρείται ένας πρόχειρος υπολογισμός για προσδιορισμό της τάξης μεγέθους βάσει του μέσου CGR που επικρατεί στον ταμιευτήρα και της παραγωγής αερίου και πετρελαίου για την ίδια χρονική στιγμή. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 16.

Πίνακας 16: Ποσοστό παραγωγής πετρελαίου που οφείλεται σε συμπύκνωμα αέριας φάσης για το C1_70

	CGR	Παραγωγή Αερίου	Παραγωγή Συμπυκνώματος	Παραγωγή Πετρελαίου	Ποσοστό συμπυκνώματος της συνολικής παραγωγής πετρελαίου
	(STB/MMscf)	(MMscf/day)	(STB/day)	(STB/day)	%
1000^η μέρα	83.4	6.9	575.46	2120	27.14
1510^η μέρα	62.8	6.7	420.76	1638	25.64
2320^η μέρα	82.0	1.3	106.6	1898	5.62

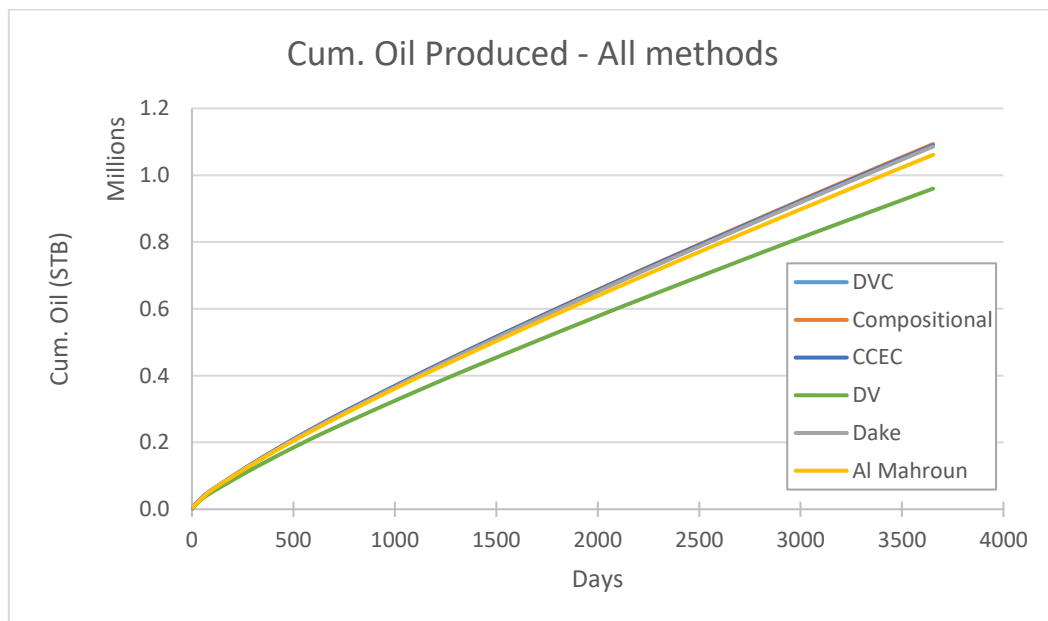
Όπως φαίνεται από τον Πίνακα 16, το ποσοστό του παραγόμενου πετρελαίου που οφείλεται στο συμπύκνωμα από την αέρια φάση είναι ιδιαίτερα σημαντικό και κατά

την ύπαρξη σημαντικού «μετώπου» αερίου, ευθύνεται για το $\frac{1}{4}$ του ρυθμού παραγωγής!

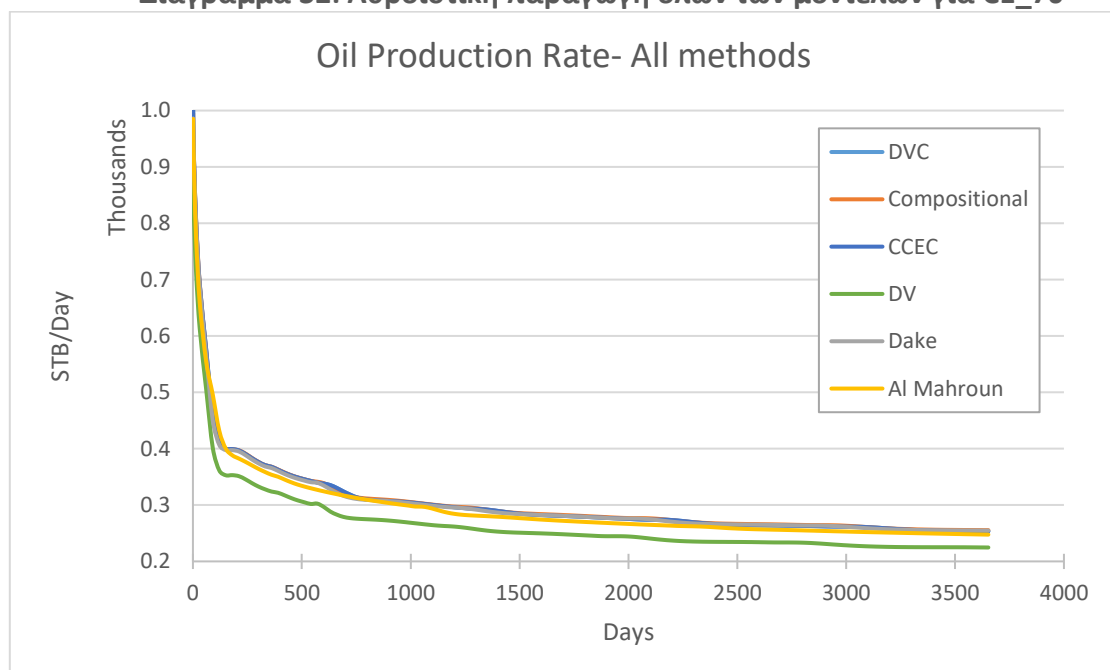
Αυτήν την ποσότητα την αγνοεί πλήρως το συμβατικό Black Oil Model.

5.3.3 Περίπτωση ρευστού C1_30

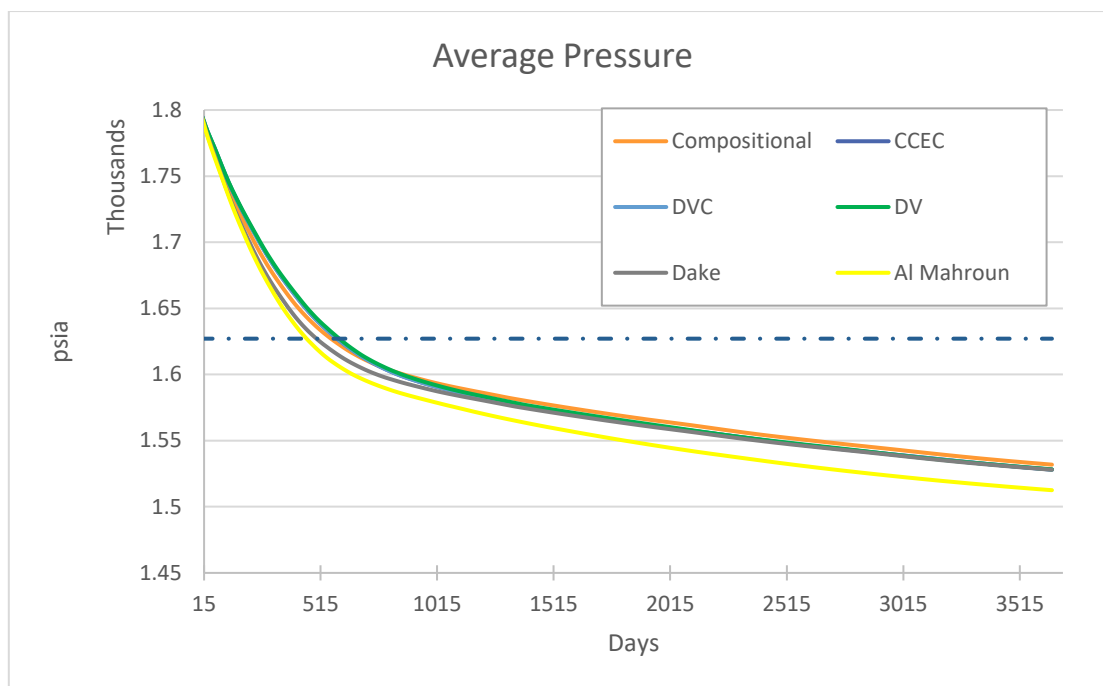
Τα αποτελέσματα της εκμετάλλευσης παρουσιάζονται στα ακόλουθα διαγράμματα. Και πάλι, κύριο κριτήριο αξιολόγησης είναι παραγωγή πετρελαίου, λόγω της οικονομικής σημασίας του.



Διάγραμμα 32: Αθροιστική παραγωγή όλων των μοντέλων για C1_70



Διάγραμμα 33: Ρυθμοί παραγωγής πετρελαίου όλων των μοντέλων για C1_30



Διάγραμμα 34: Σύγκριση μέσης πίεσης ταμιευτήρα όλων των μοντέλων για C1_30

Είναι ευδιάκριτο πως στην περίπτωση του λιγότερο πτητικού πετρελαίου, όλες οι μέθοδοι παρουσιάζουν σημαντικά λιγότερες αποκλίσεις, τόσο μεταξύ τους όσο και από την fully compositional.

Διαφαίνεται μονάχα πως η DV συστηματικά παρουσιάζει αξιόλογη απόκλιση στην προβλεπόμενη παραγωγή πετρελαίου, ενώ η Al Mahroun υστερεί ελαφρά στην πρόβλεψη της πίεσεως και με ελάχιστα χειρότερα αποτελέσματα στην πρόβλεψη παραγωγής πετρελαίου. Αυτό δεν αναιρεί το ότι η DV αποτελεί χειρότερη μέθοδο, καθώς το κύριο κριτήριο είναι η πρόβλεψη παραγωγής πετρελαίου.

5.3.4 Συμπεράσματα για την περίπτωση ρευστού C1_30

Πρακτικά, το συμπέρασμα είναι πως οποιαδήποτε μέθοδος πέρα από την DV, επαρκεί για να προβλεφθεί σωστά η παραγωγή του ταμιευτήρα με το βαρύ ρευστό. Η μικρότερη πτητικότητα του πετρελαίου αυτού μεταφράζεται άμεσα σε μικρότερης πολυπλοκότητας σύστημα.

Ως εκ τούτου, ακόμη και η απλή μετατροπή της DV σε composite διαδικασία μέσω των τύπων κατά Dake ή Al Mahroun είναι αρκετή για να προσεγγισθεί σημαντικά καλύτερα η συμπεριφορά του εν λόγω ταμιευτήρα.

Εκ των δύο αυτών μεθόδων, η κατά Dake δείχνει να είναι ελαφρώς καλύτερη, προβλέποντας καλύτερα την εντατική κατάσταση όπως αυτή εκφράζεται με τις πιέσεις.

Τόσο η CCEC όσο και η DVC δείχνουν εξαιρετικά καλή προσέγγιση του compositional μοντέλου.

6 Γενικά συμπεράσματα και προτάσεις

Από τα παραπάνω, είναι ξεκάθαρο πως η χρήση των δεδομένων από την μελέτη διαφορικής εξάτμισης ως έχουν, δεν επαρκεί σε καμία περίπτωση για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς του συστήματος πετρώματος-ρευστών και την μετατροπή των σχετικών μεγεθών σε κανονικές συνθήκες.

Στην περίπτωση χαμηλής πτητικότητας, οποιαδήποτε από τις άλλες μεθόδους που συνυπολογίζουν την διαδρομή του πετρελαίου προς την επιφάνεια, προσφέρει μια σημαντικότερα καλύτερη προσέγγιση της συμπεριφοράς του ταμιευτήρα, με τις μεθόδους των CCEC και DVC να προσφέρουν μεν μεγαλύτερη ακρίβεια, αλλά χωρίς σημαντικές διαφορές, έναντι των προσεγγίσεων κατά Dake & Al Mahgoun. Συνεπώς, η επιλογή μεθόδου σε αυτές τις περιπτώσεις είναι μια διαδικασία με προοδευτικά φθίνουσα απόδοση, με την έννοια πως η επιπλέον εργασία για την κατασκευή fully tuned EoS μοντέλου ώστε στην συνέχεια να παραχθούν δεδομένα CCEC/DVC για την δημιουργία BOTs, δεν προσφέρει ποιοτικό άλμα στις προβλέψεις των μοντέλων ανάλογο της επιπλέον εργασίας που απαιτείται. Αρκεί ο συνδυασμός πειραματικών δεδομένων εκτόνωσης με τα δεδομένα διαφορικής εξάτμισης.

Καθώς όμως αυξάνει η πτητικότητα του ρευστού, οι αποκλίσεις μεταξύ των μεθόδων γίνονται σημαντικές. Σε αυτήν την περίπτωση, η επιλογή μοντέλου μεταξύ της CCEC και της DVC γίνεται μονόδρομος, όταν το υπολογιστικό κόστος της fully compositional προσέγγισης είναι μεγάλο. Η CCEC δείχνει να προσεγγίζει λίγο καλύτερα το fully compositional μοντέλο έναντι της DVC, μια τάση που αναμένεται να συνεχιστεί με την αύξηση της πτητικότητας.

Επιπλέον, παρά το ότι η μέθοδος κατά Dake δύναται στις χαμηλές πιέσεις κοντά στην ατμοσφαιρική πίεση να οδηγήσει σε μη αποδεκτά αποτελέσματα από πλευράς φυσικής σημασίας ($Rs < 0, Bo < 1$), αυτό δεν αναιρεί την χρησιμότητά της στην πράξη, όπως φάνηκε από τα δεδομένα παραγωγής. Ο λόγος είναι πως η συμπεριφορά αυτή λαμβάνει χώρα σε πιέσεις που κατά κανόνα δεν απαντώνται στους ταμιευτήρες πετρελαίου.

Ακόμη, αρκούν πολύ μικρές αποκλίσεις στα BOTs για να οδηγήσουν σε σημαντική διαφορά στα δεδομένα παραγωγής σε βάθος, όπως φάνηκε στην περίπτωση σύγκρισης CCEC & DVC όπου διαφορές της τάξης του χιλιοστού στα BOTs οδήγησαν σε διαφορές δύο τάξεις μεγέθους άνω στα δεδομένα παραγωγής. Επίσης, μεταξύ των μεθόδων, εκτός της απόκλισης των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων, λαμβάνει χώρα και απόκλιση της προβλεπόμενης κινητικότητας, που στους BOTs εκφράζεται με το ιξώδες. Αυτές οι αλλαγές, αν και κατά περίπτωση μικρές, «τοκίζουν» στο βάθος χρόνου μιας εκμετάλλευσης ταμιευτήρα πετρελαίου. Οπότε δεν μπορούν να θεωρηθούν αμελητέες.

Συνοψίζοντας, το συμπέρασμα είναι πως πάντα η fully compositional μέθοδος είναι η μοναδική που δύναται να προσεγγίσει οποιονδήποτε ταμιευτήρα με οποιαδήποτε

συμπεριφορά, στις συνήθεις συνθήκες παραγωγής (όταν δηλαδή δεν απαιτείται η μοντελοποίηση χημικής έγχυσης ή μεταβολής θερμοκρασίας). Όταν, λόγω του υπολογιστικού κόστους, δεν είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί αυτή η επιλογή, υπάρχει προοδευτικά σημαντικό πλεονέκτημα ανάλογο της πτητικότητας του ρευστού, με την ανάπτυξη θερμοδυναμικού EOS μοντέλου και στην συνέχεια υπολογισμό BOT από αυτό κατά CCEC. Έτσι αποφεύγεται και το απαγορευτικό κόστος μιας πραγματικής πειραματικής μελέτης CCEC, που είναι υψηλό λόγω της μεγάλης ποσότητας δείγματος που απαιτείται για την διενέργεια του separator test σε κάθε βήμα της.

Μονάχα όταν η πτητικότητα του πετρελαίου είναι σημαντικά χαμηλή η ακρίβεια όλων των μεθόδων είναι επαρκής, ώστε να μπορεί να αποφευχθεί η κατασκευή EOS μοντέλου, και αρκεί η απλή τροποποίηση της DV με δεδομένα από separator test, ενώ σε καμία περίπτωση δεν επαρκούν τα πειραματικά δεδομένα της διαφορικής εξάτμισης ως έχουν.

7 Προτάσεις για περαιτέρω μελέτη

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω συμπεράσματα, προτείνονται τα ακόλουθα ζητήματα προς εξέταση:

- Η επαλήθευση των παραπάνω συμπερασμάτων με χρήση modified Black Oil Tables, που θα περιλαμβάνουν και όρο CGR, κάτι που δεν κατέστη δυνατό στην παρούσα εργασία λόγω περιορισμών του λογισμικού που χρησιμοποιήθηκε.
- Μελέτη περισσότερων ρευστών κλιμακούμενης πτητικότητας, προκειμένου να βρεθεί αν η αξία της CCEC αυξάνει γραμμικά ή εκθετικά με την πτητικότητα.

Βιβλιογραφία

- Al-Mahroun, Muhammad A. 2003.** *Adjustment of differential liberation data to separator conditions*. s.l. : Society of Petroleum Engineers, 2003.
- Aziz, Khalid and Settari, Antonin. 1979.** *Petroleum Reservoir Simulation*. London : Applied Science Publishers Ltd., 1979.
- Dake, L.P. 1978.** *Fundamentals of Reservoir Engineering*. Amsterdam : Elsevier, 1978.
- Danesh, Ali. 1998.** *PVT and Phase Behaviour of Petroleum Reservoir Fluids*. s.l. : Elsevier Science & Technology Books, 1998.
- Dodson, C. R., Goodwill, D. και Mayer, E. H. 1953.** *Application of laboratory PVT data to reservoir engineering problems*. s.l. : AIME, 1953.
- Gaganis, Vassilis, Varotsis, Nikos and Todman, Steve. 2016.** *Identification of the Compositional Path Followed During Reservoir Simulation Improves the Accuracy and Accelerates the Phase Behavior Calculations*. s.l. : Society of Petroleum Engineers, 2016. SPE-180124-MS.
- Islam, Rafiqul M, et al. 2010.** *Advanced Reservoir Simulation*. s.l. : Scrivener Publishing, Wiley, 2010.
- Kleppe, Jon. 2017.** Lecture Notes in Reservoir Simulation. *TPG4160 Reservoir Simulation*. [Online] 1 January 2017. [Cited: 3 July 2017.] <http://www.ipt.ntnu.no/~kleppe/TPG4160/note1.pdf>.
- Moses, Philip L. 1986.** *Engineering applications of phase behaviour of crude oil and condensate systems*. s.l. : Society of Petroleum Engineers, Journal of Petroleum Technology, 1986.
- Pennsylvania State University. 2017.** Crude Oil Issues. *John A. Dutton e-Education Institute*. [Online] 2017. [Cited: 5 June 2017.] https://courseware.e-education.psu.edu/courses/egee101/L05_petroileum/L05_quality.html.
- Selley, Richard C and Sonnenberg, Stephen A. 2015.** *Elements of Petroleum Geology*. 3rd. s.l. : Academic Press, Elsevier, 2015.
- Shamsi, Tariq B. 2013.** How oil and gas are formed and trapped under the surface of the earth. *Cypraegean Neftegaz Ltd*. [Online] 19 December 2013. [Cited: 2 July 2017.] <http://cypraegean-neftegaz.com/2/post/2013/12/how-oil-and-gas-are-formed-and-trapped-under-the-surface-of-the-earth.html>.
- Smith, R.A.W. και Tan, T.B. 1997.** *Selection of PVT properties for Black Oil simlation*. s.l. : The Journal of Canadian Petroleum Technology, 1997.
- Speight, James G. 2014.** *The Chemistry and Technology of Petroleum*. s.l. : CRC Press, 2014.
- Tarek, Ahmed. 2006.** *Reservoir Engineering Handbook*. 3rd. s.l. : Gulf Publishing Press, Elsevier, 2006.

Whitson, Curtis and Brulé, Michael R. 2000. *Phase Behaviour*. Richardson, Texas : Society of Petroleum Engineers, 2000.

Βαρότσης, Νικόλαος. 2008. *Εκμετάλλευση Ταμειευτήρων*. Χανιά : Πολυτεχνείο Κρήτης, 2008.

—. **2010.** *Μηχανική Ταμειευτήρων*. Χανιά : Πολυτεχνείο Κρήτης, 2010.

Ζεληλίδης, Αβραάμ. 2015. *Γεωλογία Πετρελαίων: Φυσικές και Χημικές Ιδιότητες του Πετρελαίου*. Πάτρα : Πανεπιστήμιο Πατρών, 2015.

Πασαδάκης, Νικόλαος. 2007. *Ορυκτά Καύσιμα*. Χανιά : Πολυτεχνείο Κρήτης, 2007.