



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

Αριστοποίηση της υποβοήθησης άντλησης παραγωγής με έγχυση αερίου  
(Gas Lift) ομάδας γεωτρήσεων κοιτάσματος πετρελαίου

ΣΑΜΝΙΩΤΗ ANNA

Εξεταστική Επιτροπή

Καθηγητής Βαρότσης Νικόλαος (Επιβλέπων)

Καθηγητής Πασαδάκης Νικόλαος

Δρ. Γαγάνης Βασίλειος

Χανιά

Ιούλιος, 2016



## Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται τον προσδιορισμό του βέλτιστου ρυθμού έγχυσης αερίου ως μέθοδος υποβοήθησης της παραγωγής gas lift, του πραγματικού πετρελαϊκού πεδίου OILFIELD, ο οποίος θα αντιστοιχεί στην μέγιστη παραγωγή πετρελαίου με την μικρότερη δυνατή παροχή αερίου. Η επίτευξη αυτού του βέλτιστου ρυθμού είναι αναγκαία διότι η χρήση υπερβολικής ποσότητας αερίου μειώνει την παραγωγή πετρελαίου και αυξάνει τις ανάγκες για φυσικό αέριο, ενώ συγχρόνως αυξάνει τα λειτουργικά κόστη.

Για τον προσδιορισμό του βέλτιστου ρυθμού έγχυσης, όλες οι γεωτρήσεις του πεδίου OILFIELD μοντελοποιήθηκαν πρώτα με το πρόγραμμα PROSPER και η αριστοποίηση της κατανομής του αερίου στο πεδίο, εν συνόλω, αριστοποιήθηκε με το πρόγραμμα GAP. Για την επιλογή των κατάλληλων συσχετίσεων των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων (PVT) του ταμιευτήρα χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από δοκιμές στιγμιαίας εκτόνωσης (Flash Expansion Process) του ρευστού του ταμιευτήρα.

Όλα τα διαθέσιμα δεδομένα από τις δοκιμές παραγωγής του πεδίου ελέγχθηκαν, όσον αφορά την ποιότητά τους, χρησιμοποιώντας το PROSPER. Δεδομένου ότι οι παράμετροι του ταμιευτήρα αλλάζουν συνεχώς από την έναρξη της παραγωγής, ήταν σημαντικό να χρησιμοποιηθούν επικαιροποιημένα δεδομένα τα οποία να αντιστοιχούν στις τρέχουσες συνθήκες του ταμιευτήρα. Από την μελέτη διαπιστώθηκε ότι όλα τα δεδομένα από τις δοκιμές παραγωγής, για όλες τις γεωτρήσεις, ικανοποιούν τα κριτήρια ποιότητας του PROSPER. Το εύρος της απόκλισης των δεδομένων των τεστ παραγωγής με τις τιμές που παρέχουν οι συσχετίσεις που περιέχει το PROSPER, βρέθηκε να είναι από 1.5% έως 3.3%.

Το πετρέλαιο στο πεδίο OILFIELD παράγεται από 11 συμβατικές γεωτρήσεις και 2 γεωτρήσεις διπλής ολοκλήρωσης (Dual Completion), οι οποίες υποβοηθούνται από το ήδη εγκατεστημένο σύστημα gas lift. Η τωρινή παραγωγή του πεδίου είναι περίπου 3,300 bbls/day με μία έγχυση αερίου κατά προσέγγιση 270,000 Sm<sup>3</sup>/day. Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του προγράμματος GAP, η μέγιστη παραγωγή πετρελαίου εκτιμήθηκε, περίπου, στα 3,700 bbls/day με μία έγχυση αερίου της τάξης των 270,000 Sm<sup>3</sup>/day. Η βελτιστοποίηση της παραγωγής που πραγματοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία, απέδωσε αποτελέσματα τα οποία δείχνουν ότι το παραγωγικό σύστημα επιδέχεται περαιτέρω βελτίωση με την ανακατανομή του διαθέσιμου αερίου, εφόσον υπάρχει μία διαφορά ανάμεσα στην υφιστάμενη παραγωγή και την βελτιστοποιημένη, της τάξης των 400 bbls/day.



## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Περίληψη .....	3
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1° .....	13
1.1 Γενικές πληροφορίες.....	13
1.2 Στόχοι της παρούσας διπλωματικής εργασίας.....	14
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2° .....	16
2.1 Δημιουργία υδρογονανθράκων .....	16
2.2 Ο ταμιευτήρας υδρογονανθράκων .....	18
2.3 Έρευνα για πετρέλαιο .....	19
2.3.1 Γεωλογική έρευνα.....	19
2.3.2 Γεωφυσική έρευνα .....	19
2.4 Γεωτρήσεις.....	20
2.4.1 Διάνοιξη γεώτρησης .....	20
2.4.2 Οικονομική Ανάλυση.....	21
2.5 Παραγωγή .....	22
2.6 Η σημασία και ο σκοπός της μηχανικής πετρελαίου .....	24
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3° .....	25
3.1 Εισαγωγή .....	25
3.2 Ροή στον ταμιευτήρα .....	26
3.3 Ροή σε κλειστούς αγωγούς υπό πίεση.....	31
3.4 Nodal Analysis (Κομβική Ανάλυση).....	31
3.4 Επίδοση ροής στον ταμιευτήρα (Inflow Performance Relationship).....	35
3.4.1 Παράγοντες που επηρεάζουν την καμπύλη IPR .....	35
3.4.2 Δείκτης παραγωγικότητας (Productivity Index) .....	35
3.4.3 Καμπύλη IPR σε ακόρεστο ταμιευτήρα.....	38
3.4.4 Καμπύλη IPR σε κορεσμένο ταμιευτήρα.....	39
3.4.5 Καμπύλη IPR σε ταμιευτήρα αερίου .....	40
3.5 Ροή μιγμάτων υδρογονανθράκων και άλμης στις σωληνώσεις παραγωγής .....	42
3.5.1 Μονοφασική ροή .....	43
3.6 Πολυφασική ροή σε κατακόρυφες και κεκλιμένες σωληνώσεις .....	45
3.6.1 Καθεστώτα ροής .....	46
3.6.2 Παράμετροι διφασικής ροής .....	47

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 <sup>ο</sup> .....	52
4.1 Εισαγωγή .....	52
4.2 Κριτήρια επιλογής ενός τεχνητού μηχανισμού παραγωγής .....	52
4.3 Τύποι μηχανισμών υποβοήθησης της παραγωγής .....	53
4.3.1 Άντληση με την βοήθεια εμβόλου (Sucker Rod Pumping) .....	53
4.3.2 Ηλεκτρικές υποβρύχιες αντλίες (Electric Submersible Pumps) .....	55
4.3.3 Υδραυλικά συστήματα άντλησης ακροφυσίου (Jet Hydraulic Pumping Systems) .....	57
4.3.4 Εμβολοφόρες αντλίες (Plunger Lift).....	58
4.3.5 Άντληση με αντλίες κοιλότητας (Progressive Cavity Pumps).....	60
4.4 Υποβοήθηση της παραγωγής με έγχυση αερίου (gas lift) .....	61
4.4.1 Γενική περιγραφή μεθόδου .....	61
4.4.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του μηχανισμού gas lift .....	62
4.4.3 Εξοπλισμός της μεθόδου gas lift.....	62
4.4.4 Χαρακτηριστικά βαλβίδων Gas Lift .....	64
4.4.5 Συνεχές gas lift (Continuous Gas Lift).....	67
4.4.6 Διακοπτόμενο gas lift (Intermittent Gas Lift).....	68
4.4.7 Διαδικασία έγχυσης αερίου.....	69
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 <sup>ο</sup> .....	72
5.1 Εισαγωγή .....	72
5.2 Περιγραφή Ταμιευτήρα .....	73
5.2.1 Γεωλογία.....	73
5.2.2 Δομή Ταμιευτήρα.....	73
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 <sup>ο</sup> .....	74
6.1 Το PROSPER.....	74
6.2 Προσέγγιση του PROSPER και Ανάλυση Συστήματος .....	74
6.3 Προετοιμασία γεώτρησης .....	75
6.3.1 Κύριο μενού PROSPER.....	76
6.3.2 Μενού επιλογών (option summary) .....	77
6.3.3 Δεδομένα PVT .....	79
6.3.4 Δεδομένα γεώτρησης και εξοπλισμού .....	84
6.3.5 Δεδομένα gas lift.....	86
6.3.6 Δεδομένα IPR .....	89

6.3.7 Σύνδεση IPR/VLP και έλεγχος ποιότητας (Quality check) .....	93
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 <sup>ο</sup> .....	99
7.1 Η τεχνική του GAP .....	100
7.2 Θεωρήσεις κατά την βελτιστοποίηση .....	101
7.3 Διαδικασία βελτιστοποίησης .....	106
7.3.1 Επιλογές παραγωγικού συστήματος (System options) .....	107
7.3.2 Σχεδιασμός του πεδίου γεωτρήσεων.....	108
7.3.3 Περιγραφή των γεωτρήσεων.....	109
7.4 Επίλυση του συστήματος (Network Solver Calculation) .....	113
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 <sup>ο</sup> .....	114
8.1 Ανάλυση αποτελεσμάτων PROSPER.....	114
8.1.1 Έλεγχος ποιότητας των δεδομένων PVT.....	114
8.1.2 Έλεγχος του εξοπλισμού.....	115
8.1.3 Έλεγχος ποιότητας (Quality check) δεδομένων τεστ παραγωγής.....	116
8.1.4 Ρύθμιση (match) της συσχέτισης με τα δεδομένα του τεστ παραγωγής.....	117
8.1.5 Ρύθμιση (match) της IPR .....	118
8.1.6 Σύγκριση δεδομένων των τεστ με τα δεδομένα του PROSPER .....	118
8.2 Ανάλυση αποτελεσμάτων GAP .....	123
8.2.1 Καθορισμός των περιορισμών του συστήματος .....	123
8.2.3 Βελτιστοποίηση της παραγωγής .....	124
Σύνοψη.....	127
Βιβλιογραφία .....	128
Παράρτημα Α – Κλίση και υπόγειος εξοπλισμός.....	130
Παράρτημα Β1 - Διαγράμματα ελέγχου ποιότητας .....	138
Παράρτημα Β2 – Παράμετροι συσχετίσεων.....	145
Παράρτημα Β3 – Ρύθμιση IPR/VLP .....	152





## **Κατάλογος Σχημάτων**

Σχήμα 1.2: Πεδίο OILFIELD.....	13
Σχήμα 2.1: Ιζηματογενή λεκάνες ανά τον κόσμο.....	16
Σχήμα 2.2: Δημιουργία πετρελαίου και φυσικού αερίου σαν συνάρτηση της ωρίμανσης του μητρικού πετρώματος .....	17
Σχήμα 2.3: προϋποθέσεις ύπαρξης ταμιευτήρα υδρογονανθράκων.....	18
Σχήμα 2.4: Σχηματική αναπαράσταση διάνοιξης γεώτρησης.....	21
Σχήμα 2.5: Ανάκτηση με έγχυση αερίου .....	23
Σχήμα 3.1: Σύστημα παραγωγής υδρογονανθράκων .....	25
Σχήμα 3.2: Στάδια μεταβατικής ροής .....	28
Σχήμα 3.3: Ροή σταθερής κατάστασης .....	29
Σχήμα 3.4: Ροή ψευδο-σταθερής κατάστασης.....	30
Σχήμα 3.5: Διάφορες περιοχές του node.....	33
Σχήμα 3.6: Πίεση στο node συναρτήσει του ρυθμού παραγωγής.....	34
Σχήμα 3.7: Σημείο τομής IPR/VLP.....	34
Σχήμα 3.8: Ευθεία IPR για ακόρεστο ταμιευτήρα .....	38
Σχήμα 3.9: Καμπύλη IPR για κορεσμένο ταμιευτήρα .....	40
Σχήμα 3.10: Καμπύλη IPR για ταμιευτήρα αερίου .....	41
Σχήμα 3.11: Μείωση παραγωγικότητας λόγω τυρβώδους ροής.....	42
Σχήμα 3.12: Διαδρομή ροής πετρελαϊκού συστήματος .....	45
Σχήμα 3.13: Καθεστώτα ροής.....	46
Σχήμα 3.14: Απλοποιημένη εικόνα διφασικής ροής υγρού-αερίου σε κυλινδρικό αγωγό .....	48
Σχήμα 3.15: Χάρτης καθεστώτων ροής .....	50
Σχήμα 4.1: Μηχανισμός άντλησης Sucker Rod.....	54
Σχήμα 4.2: Electric Submersible Pumps .....	57
Σχήμα 4.3: Υδραυλικό σύστημα άντλησης ακροφυσίου .....	58
Σχήμα 4.4: Εμβολοφόρες αντλίες .....	59
Σχήμα 4.5: Αντλίες κοιλοτήτων (PCPs).....	60
Σχήμα 4.6: Θήκες βαλβίδων έγχυσης αερίου gas lift.....	63
Σχήμα 4.7: βαλβίδα έγχυσης αερίου (IPO) .....	64
Σχήμα 4.8: Βαλβίδες IPO και PPO .....	67
Σχήμα 4.9: Συνεχές gas lift .....	68
Σχήμα 4.10: Λειτουργία διακοπτόμενου gas lift.....	69
Σχήμα 4.11: Αναπαράσταση διαδικασίας έγχυσης αερίου .....	70
Σχήμα 6.1: Μενού και επιλογές στην αρχική οθόνη του PROSPER.....	76
Σχήμα 6.2: Περίληψη συστήματος, εικόνα από την γεώτρηση PA-8 .....	79
Σχήμα 6.3: Οθόνη δεδομένων PVT .....	80
Σχήμα 6.4: Οθόνη δεδομένων για τις συσχετίσεις του PROSPER .....	81
Σχήμα 6.5: Οι παράμετροι 1 και 2 για όλες τις συσχετίσεις του μοντέλου black oil.....	83
Σχήμα 6.6: Τυπική απόκλιση των παραμέτρων .....	83
Σχήμα 6.7: Περιγραφή γεώτρησης.....	85
Σχήμα 6.8: Μέσος όρος θερμοχωρητικότητας πετρελαίου, αερίου και νερού .....	85

Σχήμα 6.9: Μοντελοποίηση της κατανομής της θερμοκρασίας του σχηματισμού στα διάφορα βάθη .....	86
Σχήμα 6.10: Κύρια οθόνη εισαγωγής δεδομένων για το gas lift.....	88
Σχήμα 6.11: Κύρια οθόνη για την IPR.....	92
Σχήμα 6.12: Κύρια οθόνη ελέγχου ποιότητας.....	93
Σχήμα 6.13: Γραφική αναπαράσταση της πίεσης με το βάθος .....	94
Σχήμα 6.14: Οθόνη των συσχετίσεων μαζί με τις παραμέτρους 1 και 2.....	97
Σχήμα 6.15: Αντιστοίχιση της καμπύλης IPR με την VLP (IPR/VLP matching) .....	98
Σχήμα 7.1: Διάγραμμα ροής διαδικασίας για τη βελτιστοποίηση της παραγωγής .....	99
Σχήμα 7.2: Παράδειγμα ενός παραγωγικού συστήματος.....	100
Σχήμα 7.3: Συνάρτηση X-Y .....	101
Σχήμα 7.4: Προσέγγιση του μέγιστου σημείου με την μέθοδο Bracketing .....	102
Σχήμα 7.5: Διαμερισμός σε υποδιαστήματα.....	103
Σχήμα 7.6: Συμπεριφορά συνάρτησης σε μη γραμμικό σύστημα.....	104
Σχήμα 7.7: Καμπύλη επίδοσης με σταθερή πίεση κεφαλής της γεώτρησης.....	105
Σχήμα 7.8: Καινούργια καμπύλη απόδοσης με την καινούργια πίεση κεφαλής.....	105
Σχήμα 7.9: Πραγματική αντίδραση μίας γεώτρησης .....	106
Σχήμα 7.10: Επιλογές συστήματος .....	107
Σχήμα 7.11: Δίκτυο παραγωγικού πεδίου OILFIELD .....	108
Σχήμα 7.12: Κύρια οθόνη δεδομένων της γεώτρησης.....	110
Σχήμα 7.13: Εισαγωγή των δεδομένων της επίδοσης του ταμιευτήρα .....	111
Σχήμα 7.14: Οθόνη εισαγωγής της καμπύλης VLP από το PROSPER.....	112
Σχήμα 7.15: Δεδομένα για την εισαγωγή των καμπυλών VLP.....	112
Σχήμα 7.16 : Περιορισμοί γεώτρησης.....	113
Σχήμα 8.1: Παρουσίαση αποτελεσμάτων βελτιστοποίησης με βάση τον ρυθμό έγχυσης αερίου .....	124
Σχήμα 8.2: Παρουσίαση αποτελεσμάτων βελτιστοποίησης με βάση την παραγωγή πετρελαίου .....	125

## **Κατάλογος Πινάκων**

<b>Πίνακας 6.1:</b> Εισαγωγή Δεδομένων PVT από το πεδίο OILFIELD .....	81
<b>Πίνακας 6.2:</b> Υφιστάμενα δεδομένα αερίου gas lift .....	87
<b>Πίνακας 6.3:</b> Δεδομένα gas lift για την κάθε γεώτρηση .....	87
<b>Πίνακας 6.4:</b> Μοντέλο PI.....	90
<b>Πίνακας 8.1:</b> Επιλεγμένες συσχετίσεις για τα δεδομένα PVT.....	114
<b>Πίνακας 8.2:</b> Δεδομένα από τεστ παραγωγής για την κάθε γεώτρηση.....	116
<b>Πίνακας 8.3:</b> Αποτελέσματα συσχετίσεων για τις γεωτρήσεις του πεδίου OILFIELD.....	117
<b>Πίνακας 8.4:</b> Σύγκριση γεώτρησης A-1 .....	119
<b>Πίνακας 8.5:</b> Σύγκριση γεώτρησης A-2.....	119
<b>Πίνακας 8.6:</b> Σύγκριση γεώτρησης A-3.....	119
<b>Πίνακας 8.7:</b> Σύγκριση γεώτρησης A-4.....	120
<b>Πίνακας 8.8:</b> Σύγκριση γεώτρησης A-5 (short string).....	120
<b>Πίνακας 8.9:</b> Σύγκριση γεώτρησης A-5 (long string).....	120
<b>Πίνακας 8.10:</b> Σύγκριση γεώτρησης B-1 .....	121
<b>Πίνακας 8.11:</b> Σύγκριση γεώτρησης B-2.....	121
<b>Πίνακας 8.12:</b> Σύγκριση γεώτρησης B-3.....	121
<b>Πίνακας 8.13:</b> Σύγκριση γεώτρησης B-4.....	122
<b>Πίνακας 8.14:</b> Σύγκριση γεώτρησης B-5.....	122
<b>Πίνακας 8.15:</b> Σύγκριση γεώτρησης B-6.....	122
<b>Πίνακας 8.16:</b> Σύγκριση γεώτρησης B-7 .....	123
<b>Πίνακας 8.17:</b> Περιορισμοί γεωτρήσεων.....	123



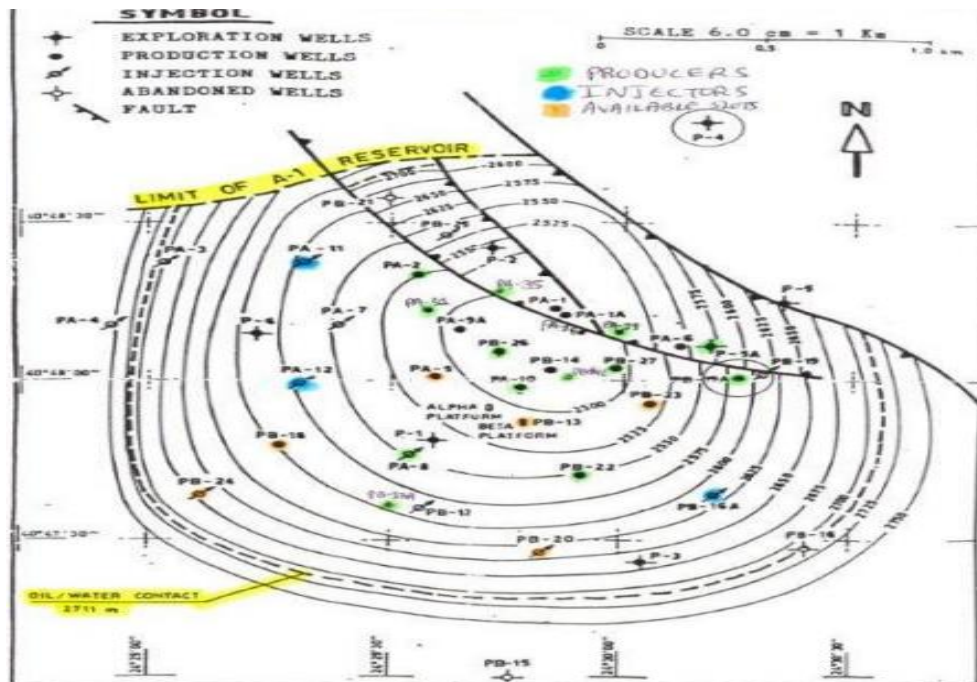
# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1<sup>ο</sup>

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1 Γενικές πληροφορίες

Το πεδίο πετρελαίου OILFIELD, επί του οποίου βασίστηκε η παρούσα διπλωματική εργασία, καλύπτει μια έκταση περίπου 6 τετραγωνικών χιλιομέτρων. Το πεδίο ανακαλύφθηκε στις αρχές του 1970 και η παραγωγή άρχισε 10 χρόνια αργότερα με τις πρώτες 24 γεωτρήσεις. Συνολικά, ένα σύνολο από γεωτρήσεις (συμπεριλαμβανομένων και αυτών της εξερεύνησης, αξιολόγησης, ανάπτυξης, πλευρικής προσέγγισης και εισπίεσης) έχουν διατηρηθεί στην περιοχή, εκ των οποίων οι 13 είναι σήμερα στο στάδιο της παραγωγής. Η έγχυση νερού τέθηκε σε εφαρμογή, στις αρχές του 1980 και τώρα μόνο 3 γεωτρήσεις εισπίεσης είναι ενεργές. Οι εγκαταστάσεις της υποβοήθησης άντλησης με έγχυση αερίου (Gas Lift) τοποθετήθηκαν αργότερα και οι γεωτρήσεις είναι σήμερα σε λειτουργία με την μέθοδο αυτή.

Η Δεκάνη του πεδίου OILFIELD διαμορφώθηκε κατά τη διάρκεια της Παλαιογενούς περιόδου, και ελέγχεται από BA - NA ρήγματα, τα οποία χωρίζουν τον ταμιευτήρα σε δύο κύρια τμήματα, ένα κάτω από το NA ρήγμα και ένα κάτω από το BA, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 1.2, στο οποίο με πράσινο χρώμα εμφανίζονται οι παραγωγικές γεωτρήσεις και με μπλε της εισπίεσης.



Σχήμα 1.2: Πεδίο OILFIELD (1)

Λόγω της θέσης των γεωτρήσεων εισπίεσης κάτω από το ΝΑ ρήγμα, οι παραγωγικές γεωτρήσεις που βρίσκονται στο ίδιο τμήμα, παρουσιάζουν μία μεγαλύτερη πίεση ταμειυτήρα. Αντίστοιχα, οι παραγωγικές γεωτρήσεις που βρίσκονται κάτω από το ΒΑ ρήγμα παρουσιάζουν μικρότερες πιέσεις διότι δέχονται μία μικρότερη επίδραση από την εισπίεση του νερού.

Η ανάπτυξη της λεκάνης άρχισε κατά το Μειόκαινο και η καθίζηση συνεχίστηκε με πλούσια σε οργανική ύλη αποθέσεις, κλαστικών και ανθρακικών ιζημάτων. Έτσι σχηματίστηκε μία μεγάλη εβαποριτική διαδοχή στρωμάτων, λόγω του ξηρού κλίματος και της απομόνωσης της λεκάνης, σχηματίζοντας μια καλή παγίδα για υδρογονάνθρακες. Η καθίζηση συνεχίστηκε με θαλάσσια κλαστικά ιζήματα και συνεχίζεται μέχρι σήμερα.

Σήμερα, τα αποθέματα του πεδίου ανέρχονται σε περίπου 12 Mbbls. Τα τελευταία χρόνια, η παραγωγή αυξήθηκε σε περίπου 3300 bbls/day από τα 1200 bbls/day, εξαιτίας ενός προγράμματος διάτρησης νέων γεωτρήσεων. Στην παρούσα φάση, η παραγωγή συνεχίζεται από 13 γεωτρήσεις στις οποίες χρησιμοποιείται η μέθοδος υποβοήθησης της παραγωγής gas lift, η οποία μετά από δοκιμή άλλων μεθόδων (ESPs) αποδείχτηκε να είναι η πιο αποτελεσματική. Αν και το πεδίο έχει φτάσει σε ένα ώριμο στάδιο παραγωγής, υπάρχουν ακόμα σημαντικά περιθώρια εξαγωγής επιπλέον ποσοτήτων υδρογονανθράκων μέσω της βελτιστοποίησης των συστημάτων παραγωγής. Επομένως, η βελτιστοποίηση του υπάρχοντος συστήματος υποβοήθησης της παραγωγής (Gas Lift) είναι ζωτικής σημασίας για την συνέχεια της παραγωγής.

## **1.2 Στόχοι της παρούσας διπλωματικής εργασίας**

Η παρούσα διπλωματική εργασία βασίζεται πάνω σε δεδομένα από το πραγματικό υπεράκτιο πεδίο OILFIELD, στο οποίο εξαιτίας των χαμηλών πιέσεων λόγω της ωριμότητας του, χρησιμοποιείται η μέθοδος ενίσχυσης της παραγωγής με έγχυση αερίου (Gas Lift). Ο κύριος στόχος της εργασίας είναι η μεγιστοποίηση του ρυθμού παραγωγής πετρελαίου με τη βελτιστοποίηση του ρυθμού έγχυσης αερίου gas lift, για το πεδίο OILFIELD το οποίο αποτελείται από 11 συμβατικές γεωτρήσεις παραγωγής (A-1, A-2, A-3, A-4, B-1, B-2, B-3, B-4, B-5, B-6, B-7) και 2 διπλής ολοκλήρωσης/dual completion (A-5 και A-6). Η επίτευξη βέλτιστων παροχών είναι σημαντική διότι τυχόν υπερβολική εγχεόμενη ποσότητα αερίων μειώνει την παραγωγή πετρελαίου και αυξάνει το κόστος λειτουργίας. Η βελτιστοποίηση της παραγωγής ως προς την ποσότητα και τον ρυθμό έγχυσης αερίου για την κάθε γεώτρηση μοντελοποιήθηκε αρχικά με την χρήση του προγράμματος PROSPER της PETROLEUM EXPERTS, με το οποίο

έγινε και ο σχεδιασμός των καμπυλών IPR (επίδοση ροής του ταμιευτήρα) και VLP (επίδοση ροής στις σωληνώσεις και την επιφάνεια) της κάθε γεώτρησης ξεχωριστά. Το πρόγραμμα PROSPER αποτελεί το λογισμικό το οποίο χρησιμοποιείται από την συντριπτική πλειοψηφία των εταιριών παραγωγής υδρογονανθράκων ανά τον κόσμο.

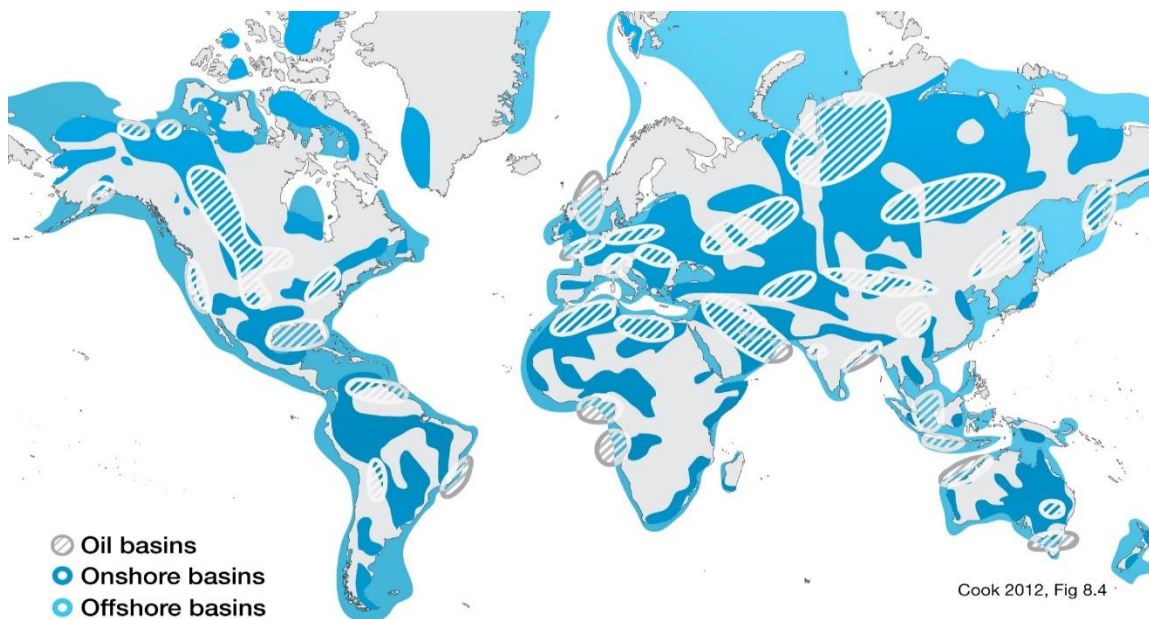
Μετά την πραγματοποίηση της μοντελοποίησης όλων των παραγωγικών γεωτρήσεων από το PROSPER, χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα GAP (General Allocation Program) το οποίο επίσης ανήκει στην ομάδα προγραμμάτων της PETROLEUM EXPERTS και η κύρια λειτουργία του είναι η βελτιστοποίηση της κατανομής του διαθέσιμου αερίου σε όλο το σύνολο των παραγωγικών γεωτρήσεων ενός πεδίου. Το GAP εισάγει τις απαραίτητες καμπύλες IPR και VLP από το PROSPER.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2<sup>ο</sup>

### ΣΥΝΤΟΜΗ ΑΝΑΦΟΡΑ ΣΤΗΝ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ

#### 2.1 Δημιουργία υδρογονανθράκων

Το πετρέλαιο είναι οργανικής προέλευσης. Όλες οι αποθέσεις στις ιζηματογενείς λεκάνες (Σχήμα 2.1) περιέχουν οργανικά υπολείμματα χερσαίων, λιμναίων, ποτάμιων και θαλάσσιων ειδών, η μετατροπή των οποίων υπό αναερόβιες συνθήκες οδηγεί στο κηρογόνο. Τέτοια πετρώματα κατατάσσονται σε μητρικά πετρώματα ανάλογα με την περιεκτικότητά τους σε οργανικό υλικό. Ο όρος κηρογόνο αναφέρεται στο αδιάλυτο οργανικό υλικό των ιζηματογενών πετρωμάτων σε οργανικούς διαλύτες, στο νερό και σε οξυγονούχα οξέα και δημιουργείται στο στάδιο της διαγένεσης της οργανικής ύλης στους γεωλογικούς σχηματισμούς αλλά διατηρείται εν μέρει και στα επόμενα στάδια μετασχηματισμού της μέχρι και την μεταμόρφωση.

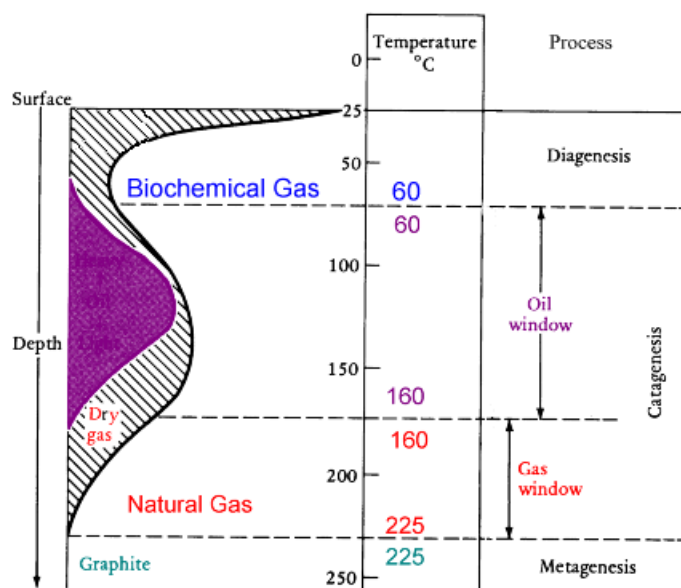


Σχήμα 2.1: Ιζηματογενή λεκάνες ανά τον κόσμο (2) (*The limits for CCS: gauging CO<sub>2</sub> storage potential - Wolf Heidug*)

Προϋπόθεση για τον σχηματισμό πετρελαίου είναι η καταβύθιση και η συσσώρευση του οργανικού υλικού π.χ. στον πυθμένα θάλασσας ή λίμνης απουσία οξυγόνου, ώστε να μπορεί να αποσυντεθεί προς δημιουργία κηρογόνου. Ιδανικές συνθήκες για αυτές τις προϋποθέσεις απαντώνται σε σαπροπηλούς στους οποίους αποσυντίθεται η οργανική ύλη από αναερόβια



βακτήρια. Παρ' όλα αυτά, η πλειονότητα της οργανικής ύλης οξειδώνεται και ανακυκλώνεται ως  $CO_2$ . Ακόμη και σε βάθη έως τα 1000 m και θερμοκρασίες έως τους 50°C το οργανικό υλικό που έχει εμπεδωθεί στο ίζημα μετατρέπεται σε κηρογόνο. Αυτή η διαγενετική διαδικασία εντείνεται με περαιτέρω κάλυψη και καταβύθιση και με αύξηση της θερμοκρασίας από την θερμότητα τους εσωτερικού της Γης. Αυτή η διαδικασία, γνωστή ως καταγένεση, προχωρά σε βάθη από 1000 – 5000 m και θερμοκρασία έως 175°C περίπου (Σχήμα 2.2). Κατά την καταγένεση, το οργανικό υλικό αφυδρογώνεται προς σχηματισμό μεθανίου και υδρογόνου και υγρών υδρογονανθράκων με την αυξανόμενη θερμοκρασία. Το οξυγόνο και το υδρογόνο διαφεύγουν πιο εύκολα από το μητρικό πέτρωμα σε σχέση με τον άνθρακα και το άζωτο, και έτσι αυξάνεται η σχετική αναλογία σε άνθρακα.



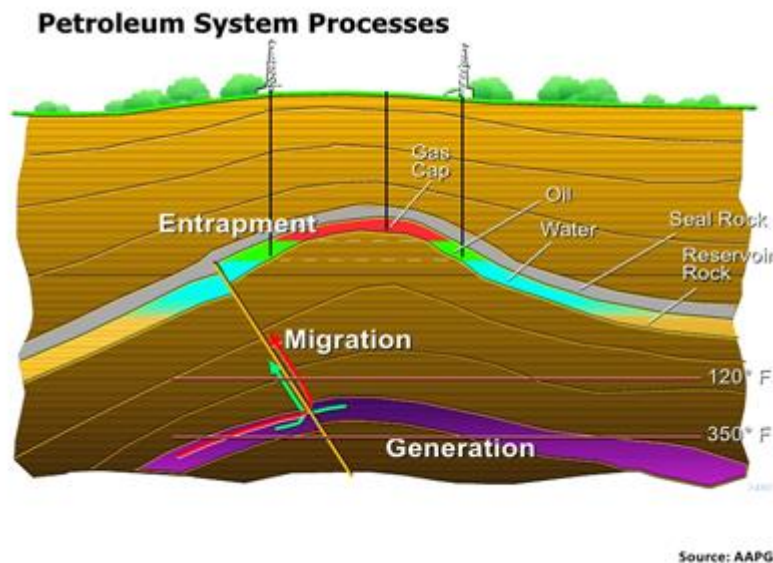
Σχήμα 2.2: Δημιουργία πετρελαίου και φυσικού αερίου σαν συνάρτηση της ωρίμανσης του μητρικού πετρώματος (3) ([www.drillingformulas.com/transform-organic-matter-into-petroleum/](http://www.drillingformulas.com/transform-organic-matter-into-petroleum/))

Η μετανάστευση του πετρελαίου από το μητρικό πέτρωμα δεν είναι ακόμα πλήρως κατανοητή. Εφόσον η δημιουργία του πετρελαίου συνοδεύεται από αλλαγές στην πίεση του μητρικού πετρώματος, είναι πιθανό να δημιουργούνται μικρο-ρωγμές οι οποίες παρέχουν μία δίοδο διαφυγής του από το μητρικό πέτρωμα προς διπλανά πιο διαπερατά συστήματα, όπως είναι τα ιζηματογενή πετρώματα. Η διαδικασία μετανάστευσης χωρίζεται σε δύο στάδια, την μετανάστευση από το μητρικό πέτρωμα και την μετανάστευση μέσα στον διαπερατό σχηματισμό. Θεωρείται ότι μόνο ένα 10% του πετρελαίου που δημιουργείται αποβάλλεται και αποθηκεύεται σε ταμειυτήρες.

## 2.2 Ο ταμιευτήρας υδρογονανθράκων

Ως ταμιευτήρας θα μπορούσε να οριστεί μία συσσώρευση οικονομικά εκμεταλλεύσιμης ποσότητας υδρογονανθράκων σε ένα πορώδες ιζηματογενές πέτρωμα. Η συσσώρευση αυτή, η οποία θα έχει φτάσει σε ισορροπία πιέσεων ανάμεσα στους πόρους του πετρώματος με την πάροδο του χρόνου, για να μπορέσει να δημιουργηθεί θα πρέπει να πληρούνται ορισμένες προδιαγραφές. Οι απαραίτητες προϋποθέσεις (Σχήμα 2.3) για να μπορέσει να υπάρξει μία εμπορικά εκμεταλλεύσιμη συγκέντρωση υγρών ή και αέριων υδρογονανθράκων είναι να υπάρχει:

- Ένα ώριμο μητρικό πέτρωμα.
- Ένα πέτρωμα ταμιευτήρας.
- Ένας διάλυλος μετανάστευσης μεταξύ του μητρικού πετρώματος και του ταμιευτήρα.
- Ένα αδιαπέρατο στεγανό πέτρωμα (cap rock) υπεράνω του ταμιευτήρα και
- Το μητρικό πέτρωμα, ο ταμιευτήρας και το στεγανό πέτρωμα να δημιουργούν συνθήκες παγίδευσης των υδρογονανθράκων.



Σχήμα 2.3: προϋποθέσεις ύπαρξης ταμιευτήρα υδρογονανθράκων (4) (Introduction to oil and gas – Dr. Deva Ghosh)

Οι πρωτογενείς διεργασίες απόθεσης και η φύση των ιζημάτων έχουν μία σημαντική επίδραση στο πορώδες και στην διαπερατότητα των σχηματισμών του ταμιευτήρα. Δευτερογενείς διεργασίες, όπως η συμπίεση, η διάλυση, η χημική αντικατάσταση και οι διαγενετικές διεργασίες, μπορούν να προκαλέσουν περαιτέρω μετατροπές στην δομή και στην γεωμετρία των πόρων. Με

την συμπίεση, οι κόκκοι των ιζημάτων συμπιέζονται όλο και περισσότερο και έτσι τα ρευστά μπορεί να αποβληθούν εξαιτίας της μείωσης του όγκου των πόρων. Εάν τα ρευστά αυτά δεν μπορέσουν τελικά να απομακρυνθούν από τους πόρους του πετρώματος, η πίεση του πορώδους αυτού σχηματισμού αυξάνεται όσο συνεχίζει να αυξάνεται και η συμπίεση.

## **2.3 Έρευνα για πετρέλαιο**

Οι πιθανότητες ύπαρξης πετρελαίου ή φυσικού αερίου πρέπει να επιβεβαιωθούν με τα ερευνητικά φρεάτια. Το κόστος, το οποίο αυξάνεται εκθετικά με το βάθος, οι ακραίες περιβαλλοντικές συνθήκες και τα αυξανόμενα κόστη εξοπλισμού και προσωπικού, απαιτούν πριν τη διάνοιξη εκτεταμένη επιστημονική μελέτη. Όμως, παρ' όλη την προετοιμασία, η πιθανότητα διάνοιξης γεώτρησης η οποία δεν θα αποδώσει οικονομικά εκμεταλλεύσιμους υδρογονάνθρακες παραμένει πάντα υψηλή. Είναι επομένως απαραίτητο να μελετηθεί η γεωλογική ιστορία της περιοχής και να ληφθούν υπόψιν τυχόν συνθήκες σχηματισμού των υδρογονανθράκων σε χρονολογικό και γεωγραφικό πλαίσιο, και να ελεγχθεί κατά πόσο τα υπό εκτίμηση πετρώματα-ταμιευτήρες είναι σε θέση να παγιδεύουν πετρέλαιο ή αέριο. Η μέθοδος της σεισμικής ανάκλασης είναι το κύριο στοιχείο της σύγχρονης εξερεύνησης και είναι σε συνεχή χρήση και ανάπτυξη.

### **2.3.1 Γεωλογική έρευνα**

Σε ηπειρωτικές, κυρίως, περιοχές η επιφανειακή γεωλογική έρευνα χρησιμοποιείται για την πρώτη αξιολόγηση και πιθανή οριοθέτηση των ταμιευτήριων πετρωμάτων. Η προϋπόθεση είναι η στρωματογραφική ακολουθία να προεκτείνεται εν μέρει στην επιφάνεια και να είναι προσπελάσιμη. Τα αποτελέσματα από την γεωλογική έρευνα, μαζί με αυτά της γεωφυσικής, χρησιμοποιούνται για την διατύπωση πιο αξιόπιστων απόψεων ως προς το πάχος, τη μορφή και την ηλικία των πετρωμάτων

### **2.3.2 Γεωφυσική έρευνα**

Η γεωφυσική έρευνα, με τις τρεις βασικές μεθόδους, την μαγνητική, βαρυτομετρική και σεισμική μέθοδο, δίνει ενδιαφέρουσες πληροφορίες για τη γεωλογική δομή του υπεδάφους πριν πραγματοποιηθούν οι δαπανηρές ερευνητικές γεωτρήσεις.

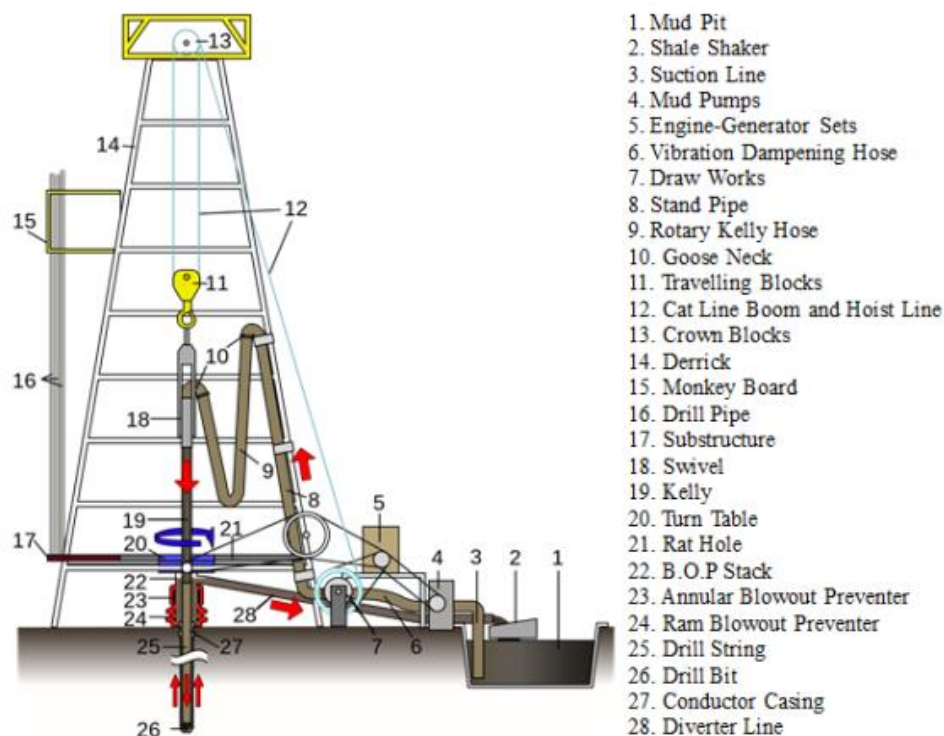
## 2.4 Γεωτρήσεις

Ο σκοπός της ερευνητικής γεώτρησης είναι η διάνοιξη του φρέατος για την ανεύρεση εμπορικά εκμεταλλεύσιμου κοιτάσματος πετρελαίου ή φυσικού αερίου με ασφάλεια και με σωστή διαχείριση των διαθέσιμων κεφαλαίων. Για την υλοποίηση του σκοπού αυτού απαιτείται η συνεργασία πολλών ομάδων και εξειδικευμένων εταιριών, υπερ-εργολάβων, συμβούλων κ.α. Οι διανοίξεις για τον εντοπισμό και την εξερεύνηση των κοιτασμάτων είναι γνωστές ως ερευνητικές γεωτρήσεις (exploratory wells), ενώ οι διανοίξεις που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή είναι γνωστές ως παραγωγικές γεωτρήσεις (production wells). Τα επιτυχημένα ερευνητικά φρεάτια μετατρέπονται σε παραγωγικά με την προσθήκη του κατάλληλου εξοπλισμού.

Τα ερευνητικά φρεάτια πρέπει να διανοιχθούν με τέτοιο τρόπο ώστε να παρέχουν ακριβείς πληροφορίες για τον σχηματισμό. Αυτό γίνεται με δειγματοληψία πετρωμάτων, ρευστών, συλλογή δεδομένων από μεγάλο αριθμό γεωφυσικών μετρήσεων, διεξαγωγή δοκιμών παραγωγικότητας και παρατήρηση της συμπεριφοράς του κοιτάσματος. Τα παραγωγικά φρεάτια πρέπει να διανοίγονται και να ολοκληρώνονται με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε το συνολικό κόστος να μην υπερβαίνει τα διαθέσιμα, για την διάνοιξη, κεφάλαια, να γίνει βέλτιστη χρήση της παραγωγικής δυναμικότητας και να επιτευχθεί η παραγωγή χωρίς προβλήματα καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του κοιτάσματος.

### 2.4.1 Διάνοιξη γεώτρησης

Το φρέαρ διανοίγεται με το περιστρεφόμενο κοπτικό άκρο (rotating bit) στο οποίο εφαρμόζεται δύναμη που ασκεί η γεωτρητική στήλη (drilling pipes/collars) προς τα κάτω. Γενικά, το κοπτικό άκρο περιστρέφεται, όπως και ολόκληρη η διατρητική στήλη, μέσω της περιστροφικής τράπεζας στην επιφάνεια. Η δύναμη προς τα κάτω εφαρμόζεται από τα διατρητικά στελέχη (drill pipes) με τη χρήση βαρέων διατρητικών στελεχών (drilling collars) λίγο πάνω από το κοπτικό άκρο. Τα θραύσματα των πετρωμάτων ανέρχονται στην επιφάνεια με την βοήθεια του ρευστού γεώτρησης (drilling mud) που εισάγεται στην διατρητική στήλη, κατέρχεται στο κοπτικό άκρο, εξέρχεται από αυτό και ανέρχεται στο δακτύλιο μέχρι και την επιφάνεια όπου και διαχωρίζεται (Σχήμα 2.4).



Σχήμα 2.4 : Σχηματική αναπαράσταση διάνοιξης γεώτρησης (5)  
[\(https://dtetechnology.wordpress.com/2014/05/04/components-of-a-land-based-rotary-drilling-platform/\)](https://dtetechnology.wordpress.com/2014/05/04/components-of-a-land-based-rotary-drilling-platform/)

#### 2.4.2 Οικονομική Ανάλυση

Καθήκον του μηχανικού γεωτρήσεων είναι να προτείνει μεθόδους που θα έχουν ως αποτέλεσμα την επιτυχή ολοκλήρωση του φρέατος με τον ασφαλέστερο και οικονομικότερο τρόπο. Παρέχει δε καθημερινά υποδείξεις για λειτουργίες της γεώτρησης όπως ρύθμιση ρευστών γεώτρησης, επιλογή κοπτικών άκρων, λειτουργία αντλιών και για οποιαδήποτε προβλήματα που μπορούν να προκύψουν κατά την διάρκεια της γεώτρησης.

Για τον υπολογισμό του κόστους, συνήθως τα έξοδα της γεώτρησης διαχωρίζονται σε α) μεταβλητά και β) σταθερά που είναι ανεξάρτητα από τις εναλλακτικές λύσεις. Το κόστος γεώτρησης εξαρτάται κύρια από την τοποθεσία και το βάθος της γεώτρησης. Συνήθως ο μηχανικός θα πρέπει να στηριχθεί σε ιστορικά στοιχεία από παρακείμενα ή όμοια φρέατα για την εκτίμηση εκ των προτέρων του κόστους της γεώτρησης.

## 2.5 Παραγωγή

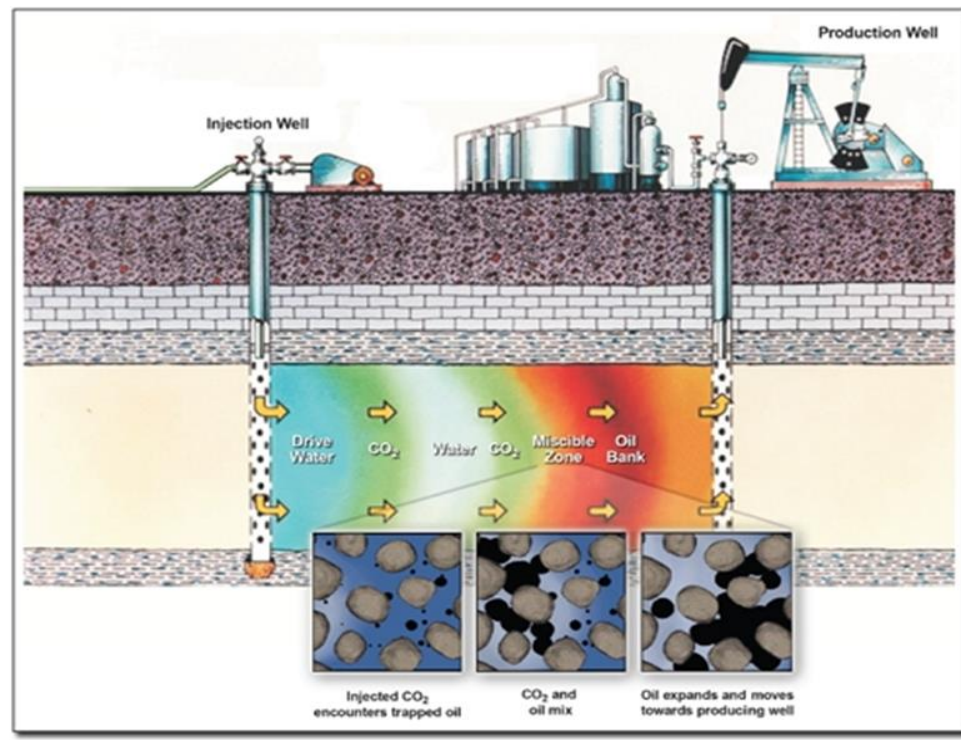
Η παραγωγή του πετρελαίου διακρίνεται σε τρία στάδια ανάκτησης: πρωτογενή, δευτερογενή και τριτογενή.

**Πρωτογενής ανάκτηση (primary recovery):** Στο στάδιο της πρωτογενούς ανάπτυξης, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο παράγονται με την πίεση του κοιτάσματος ως κινητήρια δύναμη για να προωθηθούν στην επιφάνεια. Το στάδιο της πρωτογενούς παραγωγής θα φτάσει τελικά στα όριά του, είτε όταν η πίεση του ταμιευτήρα πέσει αρκετά με αποτέλεσμα οι ρυθμοί παραγωγής να μην είναι πλέον οικονομικά ανεκτοί είτε όταν οι αναλογίες παραγόμενου φυσικού αερίου ή νερού με το πετρέλαιο είναι πολύ μεγάλες. Με την πρωτογενή ανάκτηση ανακτάται, συνήθως, περίπου το 5-15% του συνολικού πετρελαίου που υπάρχει στο κοίτασμα.

**Δευτερογενής ανάκτηση (secondary recovery):** Η δευτερογενής παραγωγή λαμβάνει χώρα όταν η κινητήρια δύναμη του ταμιευτήρα θα πρέπει να ενισχυθεί από εγχέόμενα ρευστά, όπως για παράδειγμα αέριο ή νερό, με σκοπό την διατήρηση ή την μερική διατήρηση της πίεσης. Τα εγχέόμενα ρευστά δρουν επίσης και ως ρευστά εκτόπισης του πετρελαίου, απομακρύνοντας το από τους πόρους του ταμιευτήρα και οδηγώντας το στο φρεάτιο της γεώτρησης. Μετά από την “σάρωση” του ταμιευτήρα από το νερό ή το αέριο, θα παραμείνει ακόμα κάποια ποσότητα πετρελαίου σε σχετικά υψηλό βαθμό κορεσμού, όπου το νερό ή το αέριο, για διάφορες αιτίες, όπως για παράδειγμα λόγω ιξώδους, διάταξης των γεωτρήσεων κ.α., το προσπέρασε και δεν το απομάκρυνε. Επίσης, εξαιτίας των χαρακτηριστικών του πετρώματος (διαπερατότητα, πορώδες, διαβρεχτότητα κ.α.) και των εγχόμενων ρευστών, ένα τμήμα των υδρογονανθράκων (υπολειμματικό πετρέλαιο) παρέμεινε μέσα στους πόρους του ταμιευτήρα. Αυτά τα μη ανακτηθέντα ποσοστά πετρελαίου, δηλαδή το υπολειμματικό πετρέλαιο, είναι ο στόχος των ενισχυμένων μεθόδων ανάκτησης (Enhanced Oil Recovery), δηλαδή της τριτογενούς παραγωγής.

**Τριτογενής ανάκτηση (tertiary recovery):** Οι προωθημένες μέθοδοι ανάκτησης (EOR/IOR) ή αλλιώς τριτογενής παραγωγή, προσφέρουν προοπτικές για μία συνολική παραγωγή της τάξης του 30-60% των αρχικώς περιεχομένων υδρογονανθράκων, τα οποία μπορεί να αντιπροσωπεύουν αρκετά εκατομμύρια δολάρια επιπρόσθετο κέρδος. Υπάρχουν τρεις κύριες κατηγορίες ενισχυμένων μεθόδων ανάκτησης, οι οποίες είναι:

- 1) Ανάκτηση με θερμότητα (thermal recovery): Η μέθοδος αυτή περιλαμβάνει την εισαγωγή θερμότητας, όπως για παράδειγμα ατμού, με σκοπό την μείωση του ιξώδους για την βελτίωση της ροής του πετρελαίου μέσα στον ταμιευτήρα.
- 2) Ανάκτηση με έγχυση αερίου (gas injection): Η μέθοδος αυτή (Σχήμα 2.5) χρησιμοποιεί αέρια όπως το φυσικό αέριο, το άζωτο ( $N_2$ ) ή και το διοξείδιο του άνθρακα ( $CO_2$ ) τα οποία εκτονώνονται μέσα στον ταμιευτήρα και επιτυγχάνοντας αναμειξιμότητα με το πετρέλαιο, απελευθερώνουν επιπλέον ποσότητες υδρογονανθράκων προς το φρεάτιο της γεώτρησης.



Σχήμα 2.5: Ανάκτηση με έγχυση αερίου (6) (<http://energy.gov/fe/science-innovation/oil-gas-research/enhanced-oil-recovery>)

- 3) Ανάκτηση με έγχυση χημικών (chemical injection): Η μέθοδος αυτή περιλαμβάνει τη χρήση πολυμερών με σκοπό την αύξηση της σάρωσης του εισπιεζόμενου νερού (water flooding) ή την χρήση τασιενεργών ουσιών για να βοηθήσουν στην μείωση της επιφανειακής τάσης που εμποδίζει τα σταγονίδια του πετρελαίου από το να κινούνται μέσα στους πόρους του ταμιευτήρα.

## **2.6 Η σημασία και ο σκοπός της μηχανικής πετρελαίου**

Ο σκοπός της μηχανικής πετρελαίου είναι να αναλαμβάνει τον σχεδιασμό και την εκτέλεση τεχνικών για την απόληψη εμπορικά εκμεταλλεύσιμων ποσοτήτων πετρελαίου και φυσικού αερίου. Είναι μια τεχνολογία που βασίζεται στη μηχανική (Engineering) και στις γεωεπιστήμες αλλά και στα οικονομικά και την στατιστική. Από την πλευρά της μηχανικής, είναι μία “περίεργη” επιστήμη, με την έννοια ότι ο σχεδιασμός και η υλοποίηση ενός έργου βασίζονται στην παρατήρηση της απόδοσης της παραγωγής και στην προσομοίωση του ταμειυτήρα από πολύ λίγα αρχικά δεδομένα δειγματοληψίας. Με την πάροδο του χρόνου και την πρόοδο της παραγωγής, αποκτώνται περισσότερες πληροφορίες για τη φύση του ταμειυτήρα και έτσι οι μέθοδοι παραγωγής που ακολουθούνται μπορεί να βελτιωθούν.

Η οικονομική πλευρά των τεχνικών απόληψης υδρογονανθράκων, είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την εφαρμογή της μηχανικής πετρελαίου και ο μηχανικός έχει συνεχή ευθύνη να παρουσιάζει αναλυτικά σχέδια τα οποία θα πρέπει είναι τεχνικά ακριβή και οικονομικά ελκυστικά. Όσον αφορά την σημερινή πραγματικότητα, των όλο και βαθύτερων εξερευνητικών γεωτρήσεων αλλά και την αύξηση της εκμετάλλευσης σε υπεράκτια πεδία σε όλο τον κόσμο (Σχήμα 2.1), το κόστος της παραγωγής είναι τεράστιο. Το μεγάλο αυτό κόστος της ανάπτυξης ενός πεδίου δημιουργεί την ανάγκη εταιριών, οι οποίες θα συγκεντρώσουν τα σημαντικά κεφάλαια που απαιτούνται, των οποίων οι απαιτήσεις αποπληρωμής σχετίζονται άμεσα με την επιτυχία και την πρόοδο της παραγωγής πετρελαίου ή φυσικού αερίου.

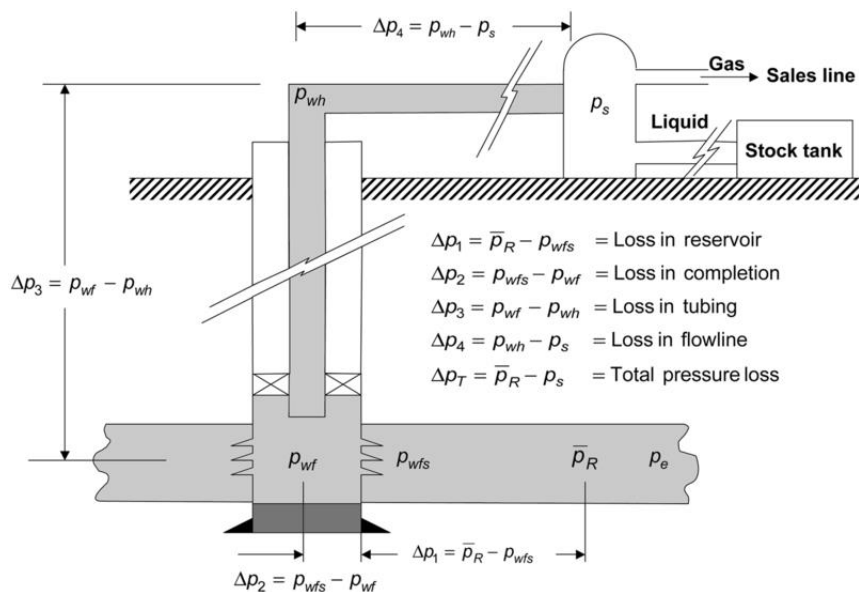


## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3<sup>ο</sup>

### ΑΠΟΔΟΣΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΤΗΣ ΓΕΩΤΡΗΣΗΣ

#### 3.1 Εισαγωγή

Στη μηχανική πετρελαίου, ο συνδυασμός της ροής στην περιοχή αποστράγγισης του φρέατος (Inflow Performance) και της ροής στη παραγωγική στήλη (Outflow Performance), καθορίζει την ικανότητα και την απόδοση της γεώτρησης παραγωγής. Τα ρευστά ενός ταμιευτήρα, με την έναρξη της παραγωγής, αφού διανύσουν απόσταση μέσα στο πορώδες μέσο, αρχίζουν να ρέουν μέσα στο φρεάτιο της γεώτρησης, μέσα από την παραγωγική σωλήνωση (tubing) και τέλος μέσα στον διαχωριστήρα (separator) (Σχήμα 3.1).



Σχήμα 3.1: Σύστημα παραγωγής υδρογονανθράκων (7) (Πηγή: Petrowiki.org)

Κατά τη διάρκεια της πορείας αυτής, η αρχική πίεση των ρευστών του ταμιευτήρα μειώνεται μέχρι και την ατμοσφαιρική μέσα από μία σειρά από διαδοχικές πτώσεις πίεσης, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.1:

$\Delta P_1$  = Πτώση πίεσης στον ταμιευτήρα

$\Delta P_2$  = Πτώση πίεσης λόγω των περιορισμών που επιβάλλουν τα στοιχεία που αποτελούν τη γεώτρηση (completion)

$\Delta P_3$  = Πτώση πίεσης στην παραγωγική στήλη

$\Delta P_4$  = Πτώση πίεσης στην επιφάνεια (επιφανειακές σωληνώσεις, διαχωριστήρας, βαλβίδες ασφαλείας κ.α.)

Η επίπτωση των παραπάνω πτώσεων πίεσης στην ροή των ρευστών προς την επιφάνεια, εξαρτάται από τις ιδιότητες και την πίεση του ταμιευτήρα. Οι μηχανικοί παραγωγής θα πρέπει να είναι σε θέση να κατανοήσουν την αλληλεπίδραση που έχουν αυτοί οι παράγοντες, ξεχωριστά στο σύστημα παραγωγής, έτσι ώστε να μπορούν να μοντελοποιήσουν σωστά μία γεώτρηση με σκοπό την βελτιστοποίηση και τις μελλοντικές προβλέψεις της παραγωγής.

### 3.2 Ροή στον ταμιευτήρα

Στους ταμιευτήρες πετρελαίου επικρατούν συστήματα ροής τα οποία ταξινομούνται ανάλογα με:

Το είδος του ρευστού (συμπιέσιμο ή ασυμπιέσιμο)

Έστω μία μονάδα όγκου ενός μέσου το οποίο είναι κορεσμένο κατά 100% με ασυμπιέσιμο ρευστό ιξώδους  $\mu$ . Η ογκομετρική παροχή του ρευστού στην είσοδο και στην έξοδο του όγκου του πορώδους μέσου θα είναι σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια του χρόνου και εφόσον το ρευστό θεωρείται ασυμπιέσιμο, η πυκνότητα θα παραμένει σταθερή σε κάθε σημείο ( $\rho_1 = \rho_2$ ):

$$m_1 = m_2 \Rightarrow \left. \frac{dm}{dt} \right|_1 = \left. \frac{dm}{dt} \right|_2$$

$$\left. \frac{1}{\rho_1} \frac{dm}{dt} \right|_1 = \left. \frac{1}{\rho_2} \frac{dm}{dt} \right|_2 \quad (3.1)$$

Από τον ορισμό της πυκνότητας ισχύει:

$$\rho = \frac{dm}{dV} \Leftrightarrow dV = \frac{dm}{\rho} \quad (3.2)$$

Αρα αντικαθιστώντας στην (3.1) προκύπτει:

$$\left. \frac{dV}{dt} \right|_1 = \left. \frac{dV}{dt} \right|_2 \Rightarrow Q_1 = Q_2 \quad (3.3)$$

Επομένως η παροχή είναι σταθερή σε κάθε σημείο. Αντίθετα, αν το ρευστό είναι συμπιέσιμο, η παροχή μάζας στην είσοδο και στην έξοδο, θεωρείται σταθερή. Επομένως η εξίσωση Darcy λαμβάνει την παρακάτω μορφή:

$$\rho U_L = \left( \frac{k}{\mu} \right) \rho \frac{dP}{dL} \quad (3.4)$$

Το  $\rho U_L$  είναι σταθερό ενώ η πυκνότητα  $\rho$  μεταβάλλεται με την πίεση. Επομένως, για να μπορέσουμε να ολοκληρώσουμε την εξίσωση (3.4) θα πρέπει να γνωρίζουμε τον τρόπο με τον οποίο μεταβάλλεται η πυκνότητα  $\rho$  με την πίεση.

#### Τη γεωμετρία του συστήματος ροής

Τα βασικά είδη γεωμετρίας ροής είναι η ακτινωτή (radial) ροή, η γραμμική (liner) και η σφαιρική (spherical). Τα πιο σημαντικά μοντέλα είναι αυτά της γραμμικής και της ακτινωτής ροής. Επίσης, το μοντέλο ακτινωτής ροής χρησιμοποιείται για την περιγραφή της ροής ενός ρευστού προς την γεώτρηση.

#### Τον τρόπο μεταβολής της ροής με το χρόνο.

Οι τρόποι μεταβολής της ροής με το χρόνο είναι της σταθερής κατάστασης (steady state), της μη σταθερής κατάστασης (unsteady state) και της μεταβατικής (transient). Τη στιγμή που, μία γεώτρηση θα τεθεί σε παραγωγή, θα δημιουργηθεί μία πτώση πίεσης στα τοιχώματά της ικανή να προκαλέσει ροή. Έτσι, με την πτώση αυτή, το ρευστό του ταμιευτήρα εκτονώνεται για να καλύψει τον χώρο που έμεινε ξαφνικά διαθέσιμος, τροφοδοτώντας την γεώτρηση με περισσότερο ρευστό. Μέχρι λοιπόν αυτή η διαταραχή της πίεσης, μέσα στον ταμιευτήρα, φτάσει στα όριά του, ο σχηματισμός παράγει σαν να έχει άπειρη ακτίνα και η ροή θεωρείται μεταβατική (transient flow).

Ανάλογα με το τι θα γίνει στα όρια του ταμιευτήρα, διακρίνονται δύο περιπτώσεις: Στην πρώτη περίπτωση, όταν η πίεση θα έχει διανύσει μία ακτίνα  $r_e$  και θα έχει φτάσει στα όρια του ταμιευτήρα, θα απαιτηθεί η παρέλευση ενός μικρού διαστήματος χρόνου, ανάλογα με τη γεωμετρία της περιοχής αποστράγγισης, για την ανακατανομή της πίεσης μέσα στον ταμιευτήρα (late transient flow). Μετά από το διάστημα αυτό, ο ταμιευτήρας παράγει υπό συνθήκες σταθεροποιημένης ροής, η οποία χωρίζεται σε σταθερής κατάστασης και μη σταθερής κατάστασης. Στην πρώτη περίπτωση, οι συνθήκες ροής διατηρούνται σταθερές είτε διότι γίνεται έγχυση νερού από γειτονικές γεωτρήσεις έγχυσης είτε διότι ο ταμιευτήρας έχει επικοινωνία με έναν υδροφόρο ορίζοντα ο οποίος αναπληρώνει συνέχεια τον όγκο των ρευστών που παράγονται. Πιο αναλυτικά:

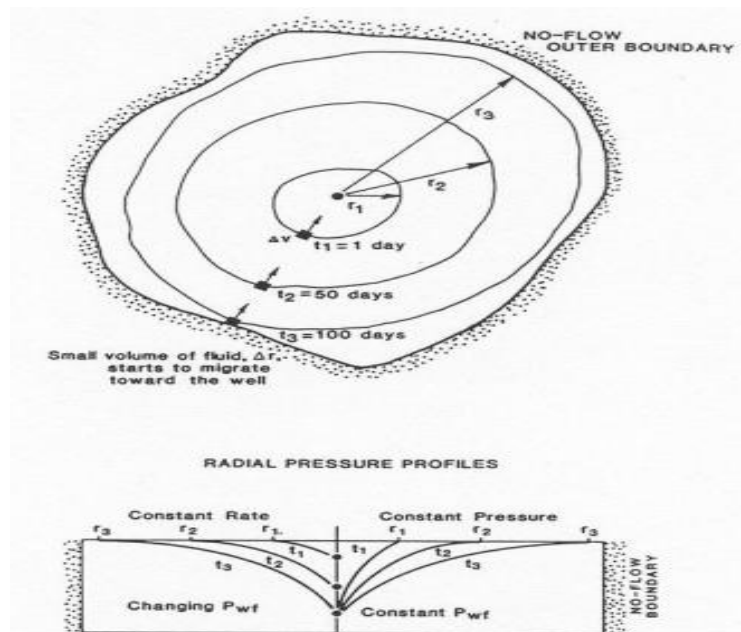
### 1. Μεταβατική ροή (Transient flow)

Η μεταβατική ροή εφαρμόζεται μόνο για το χρονικό διάστημα έως ότου η διαταραχή της πίεσης φτάσει στα όρια του ταμιευτήρα. Η σταδιακή επέκταση της διαταραχής αυτής παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.2. Στο διάστημα στο οποίο λαμβάνει χώρα η μεταβατική ροή, θεωρείται ότι η πίεση στον ταμιευτήρα δεν επηρεάζεται από την παρουσία του εξωτερικού του ορίου, επομένως ο ταμιευτήρας θεωρείται ότι έχει άπειρη έκταση. Η θεώρηση αυτή εφαρμόζεται κυρίως στην ανάλυση των τεστ παραγωγής, στα οποία ο ρυθμός παραγωγής αλλάζει σκόπιμα συνεχώς, έτσι ώστε να μετρηθεί και να καταγραφεί η πίεση του πυθμένα της γεώτρησης, κατά τη διάρκεια μιας σύντομης περιόδου μερικών ωρών από την αλλαγή του ρυθμού, δηλαδή η αντίδραση του συστήματος ροής στην μεταβολή της παροχής. Στην περίπτωση αυτή η πίεση είναι συνάρτηση τόσο της θέσης στην οποία έχει φτάσει η διαταραχή, όσο και του χρόνου:

$$P = f(r, t) \quad (3.9)$$

Και

$$\frac{\partial p}{\partial t} = f(r, t) \quad (3.10)$$



Σχήμα 3.2: Στάδια μεταβατικής ροής (8) (Πηγή: <http://infohost.nmt.edu/~petro/faculty/Engler524/PET524-7-transient.pdf>)

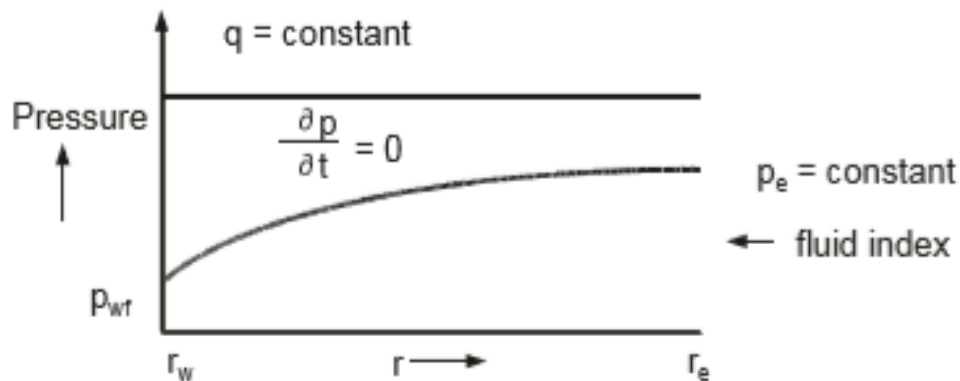
## 2. Ροή σταθερής κατάστασης (Steady state)

Πολλοί ταμιευτήρες παράγουν υπό καθεστώς σταθερής κατάστασης (Σχήμα 3.3). Αυτό συμβαίνει όταν παράγουν με ισχυρό μηχανισμό εκτόπισης από υποκείμενο υδροφόρο ορίζοντα οπότε ο ταμιευτήρας θεωρείται ότι έχει ένα ανοικτό για ροή εξωτερικό σύνορο. Οι τιμές της πίεσης και της παροχής του φρέατος που καταγράφονται κατά τη διάρκεια μιας περιόδου ροής, χρησιμοποιούνται για να προσδιοριστεί το καθεστώς ροής. Αν οι τιμές αυτές παραμένουν σταθερές με το χρόνο τότε είναι σίγουρο πως επικρατεί η ροή σταθερής κατάστασης. Θεωρείται δεδομένο ότι, για σταθερό ρυθμό παραγωγής, η απομάκρυνση των ρευστών από τον ταμιευτήρα θα αντισταθμίζεται με την είσοδο των ρευστών κατά μήκος του ανοικτού ορίου και, ως εκ τούτου:

$$P = P_e = \text{σταθερά για } r = r_e \quad (3.5)$$

Και 
$$\frac{\partial p}{\partial t} = 0 \text{ για όλα τα } r \text{ και } t \quad (3.6)$$

όπου  $P_e$  η πίεση του εξωτερικού ορίου του ταμιευτήρα,  $r_e$  η ακτίνα της περιοχής αποστράγγισης και  $P$  η πίεση σε μία ακτίνα  $r$ .



Σχήμα 3.3: Ροή σταθερής κατάστασης (9) (Fundamentals of Reservoir Engineering – L.P. Duke)

## 3. Ροή μη σταθερής κατάστασης (Unsteady state)

Ένας ταμιευτήρας ο οποίος παράγει χωρίς οι όγκοι των ρευστών του να αναπληρώνονται από έναν μεγάλο υποκείμενο υδροφόρο ορίζοντα ή από εισπίεση θαλασσινού νερού, θεωρείται πως παράγει υπό συνθήκες μη σταθερής κατάστασης και αποτελεί ένα κλειστό σύστημα ροής.

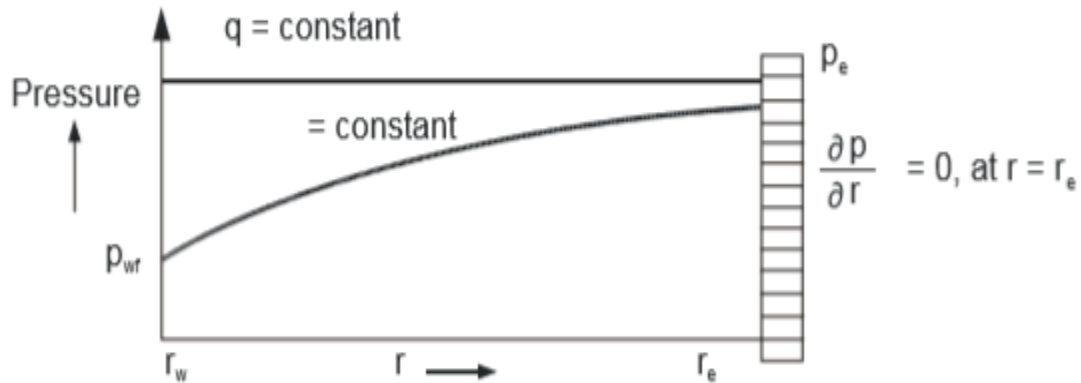
Διακρίνονται δύο περιπτώσεις ροής μη σταθερής κατάστασης ανάλογα με τον τρόπο παραγωγής. Είτε η παροχή  $q$  διατηρείται σταθερή στο βάθος του φρέατος (ψευδο-σταθερή κατάσταση) είτε η πίεση είναι αυτή που κρατείται σταθερή ενώ η παροχή κυμαίνεται (Ροή μη σταθερής κατάστασης υπό σταθερή πίεση).

#### Ροή ψευδο-σταθερής κατάστασης

Θεωρείται ότι είναι ένα κλειστό σύστημα ροής, δηλαδή τα ρευστά που απομακρύνονται δεν αναπληρώνονται από έναν μεγάλο υδροφόρο ορίζοντα ή από εισπίεση θαλασσινού νερού. Αμέσως μόλις η διαταραχή της πίεσης (pressure gradient) φτάσει σε όλο τον ταμιευτήρα, ο λόγος  $\Delta P/\Delta t$  γίνεται σταθερός σε όλα τα σημεία και έχουμε ομοιόμορφες κατανομές της πίεσης με τον χρόνο για κάθε  $r$ . Επομένως:

$$cV \frac{dP}{dt} = -\frac{dV}{dt} = -q \quad (3.7)$$

Και 
$$\frac{dP}{dt} = -\frac{q}{c\pi r_e^2 h \Phi} \quad (3.8)$$



Σχήμα 3.4: Ροή ψευδο-σταθερής κατάστασης (10) (Fundamentals of Reservoir Engineering – L.P. Dale)

### 3.3 Ροή σε κλειστούς αγωγούς υπό πίεση

Το ιξώδες κατά τη ροή των ρευστών προκαλεί διατμητικές τάσεις ή δυνάμεις τριβής μεταξύ των μορίων ενός ρευστού και μεταξύ των μορίων του ρευστού και των τοιχωμάτων των αγωγών, μέσα στους οποίους κινείται το ρευστό, με τελικό αποτέλεσμα να δημιουργείται αντίσταση προς την κίνηση. Για να υπάρξει ροή ενός ρευστού, πρέπει να εκτελεσθεί έργο για την υπερνίκηση αυτών των δυνάμεων αντιστάσεως και κατά τη διαδικασία αυτή ή μηχανική ενέργεια μετατρέπεται σε θερμότητα.

Οι επιδράσεις του ιξώδους αναγκάζουν ένα ρευστό να ρέει κάτω από δύο διαφορετικές καταστάσεις, την κατάσταση της στρωτής ροής (laminar flow) και την κατάσταση της τυρβώδους ροής (turbulent flow). Στη στρωτή ροή, τα μόρια κινούνται σε γραμμές ή στρώσεις παράλληλες μεταξύ τους και δεν υπάρχει μηχανική ανάμιξη των μορίων. Κατά την τυρβώδη ροή, τα μόρια του ρευστού, παράλληλα με την κίνηση τους προς την κύρια διεύθυνση της ροής, κινούνται τυχαία και προς όλες τις διευθύνσεις. Η μπλεγμένη αυτή μορφή της τυρβώδους ροής, επηρεάζει πολλές ιδιότητες του ρευστού που διαφέρουν σημαντικά μεταξύ των στρωτών και τυρβωδών ροών. Έτσι οι τυρβώδεις ροές μεταφέρουν πολύ μεγαλύτερη ποσότητα κινήσεως και επομένως σε πολλές περιπτώσεις ασκούν πολύ μεγαλύτερες δυνάμεις στα στερεά σώματα, που είναι σε επαφή με το ρευστό.

Η στρωτή ροή εμφανίζεται όταν οι τιμές του  $Re$  είναι μικρότερες του 2320 και η τυρβώδης ροή όταν οι τιμές του  $Re$  είναι μεγαλύτερες από 4000 έως 6000. Η ασταθής ενδιάμεση κατάσταση μεταξύ στρωτής και τυρβώδους ροής, ονομάζεται μεταβατική κατάσταση και είναι δυνατό να εμφανισθεί για αριθμούς Reynolds από 2320 ως 6000.

### 3.4 Nodal Analysis (Κομβική Ανάλυση)

Η τεχνική του nodal analysis εφαρμόζεται εδώ και πολλά χρόνια για την ανάλυση της επίδοσης της παραγωγής. Με αυτή την μέθοδο αναλύονται περίπλοκα δίκτυα αγωγών, ηλεκτρικά κυκλώματα και συστήματα άντλησης παραγωγής. Εφαρμόστηκε στα συστήματα παραγωγής, αναπτύχθηκε πρώτη φορά από τον Gilbert το 1954 ενώ ο Mach, Proano και ο Brown την ανέπτυξαν περαιτέρω το 1979.

Στο nodal analysis, επιλέγεται ένα συγκεκριμένο σημείο του συστήματος (node) και το σύστημα διαιρείται σε δύο μέρη με βάση αυτό το σημείο. Όλα τα συστήματα κατάντη του node (upstream) αποτελούν το inflow τμήμα ενώ τα συστήματα ανάντη του node (downstream) αποτελούν το outflow τμήμα. Το σημείο (node) στο οποίο χωρίζεται το σύστημα προς μελέτη, ορίζεται στον πυθμένα της γεώτρησης προκειμένου να διαχωριστεί το σύστημα στο τμήμα της ροής που σχετίζεται με τον ταμιευτήρα και στο τμήμα που σχετίζεται με τη ροή στις σωληνώσεις μέχρι και την επιφάνεια.

Οι πιο βασικοί στόχοι του nodal analysis είναι οι εξής:

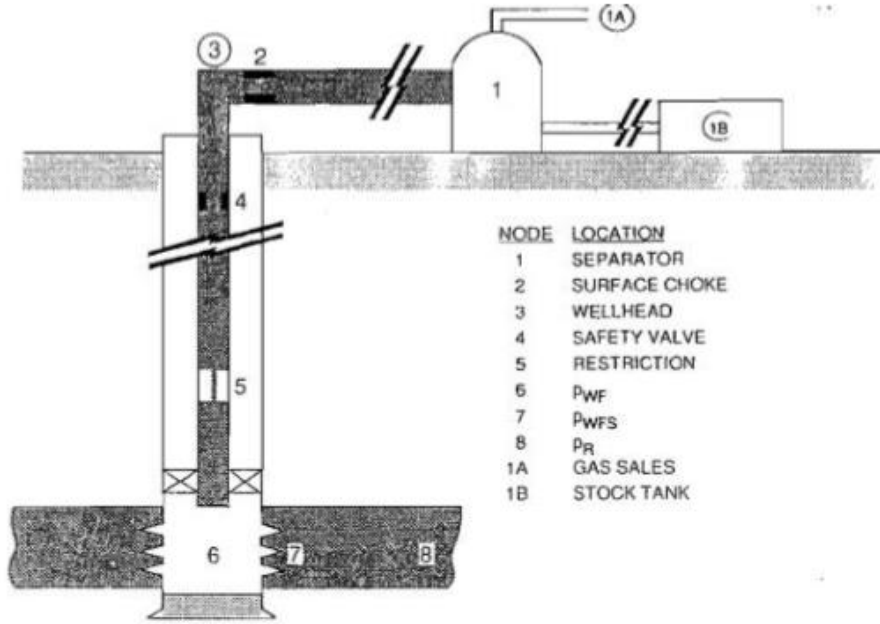
- Ο προσδιορισμός του ρυθμού παραγωγής με τον οποίο παράγει μία γεώτρηση πετρελαίου ή αερίου, λαμβάνοντας υπ' όψη τη γεωμετρία της και τους περιορισμούς της συμπλήρωσης (completion).
- Να προσδιορίσει κάτω από ποιες συνθήκες ροής η γεώτρηση θα σταματήσει να παράγει.
- Να επιλέξει την κατάλληλη περίοδο κατά την οποία θα πρέπει να αρχίσει να λειτουργεί ένας τεχνητός μηχανισμός παραγωγής (artificial lift).
- Η βελτιστοποίηση του συστήματος για την παραγωγή της μέγιστης δυνατής ποσότητας ρευστών.
- Ο έλεγχος κάθε στοιχείου του συστήματος για να προσδιορίσει αν περιορίζει την ροή για οποιοδήποτε λόγο (π.χ. μπορεί μία βαλβίδα ασφαλείας να έχει πολύ πιο μικρή διάμετρο από την απαιτούμενη και κατ' επέκταση να περιορίζει την ροή).

Ο ρυθμός παραγωγής του συστήματος μπορεί να προσδιοριστεί εφόσον τηρούνται οι ακόλουθες προϋποθέσεις:

- 1) Η ροή προς το node θα πρέπει να είναι ίση με την ροή έξω από το node.
- 2) Μόνο μία πίεση μπορεί να ισχύει στο node (upstream & downstream).

Τα κυριότερα nodes για ένα σύστημα παραγωγής υδρογονανθράκων δίνονται στο Σχήμα 3.5.





Σχήμα 3.5: Διάφορες περιοχές του node (11)

Η πίεση του ταμιευτήρα, και της κεφαλής της γεώτρησης (wellhead) ή του διαχωριστήρα, θεωρούνται σταθερές μία δεδομένη χρονική στιγμή. Εφόσον το node μπορεί να έχει μόνο μία πίεση, τότε:

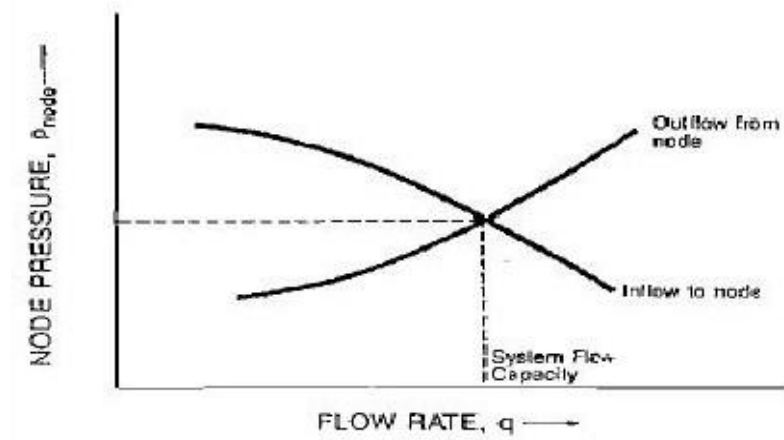
$$P_r - \Delta P_{upstream} = P_{node} \quad (\text{inflow}) \quad (3.11)$$

$$P_{wh} + \Delta P_{downstream} = P_{node} \quad (\text{outflow}) \quad (3.12)$$

Όπου:  $P_r$  η μέση πίεση ταμιευτήρα (psi),  $P_{wh}$  η πίεση στην κεφαλή της γεώτρησης (psi),  $\Delta P_{upstream}$  η πτώση πίεσης λόγω των επιμέρους τμημάτων κατάντη του node και  $\Delta P_{downstream}$  η πτώση πίεσης λόγω των επιμέρους τμημάτων ανάντη του node.

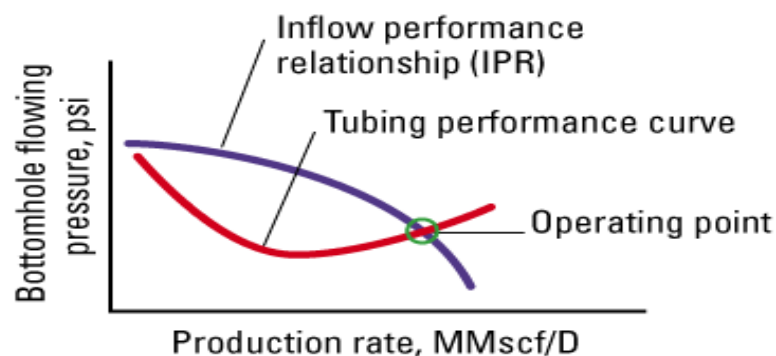
Μία τυπική γραφική αναπαράσταση από την ανάλυση των δύο παραπάνω εξισώσεων (3.11) και (3.12), παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.6, όπου και έχει παρασταθεί γραφικά η σχέση πίεσης – ρυθμού παραγωγής για τις δύο εξισώσεις inflow και outflow, για ένα κοινό σημείο ( $P_{node}$ ). Το σημείο τομής των δύο γραμμών είναι και το μοναδικό σημείο λειτουργίας (operating point) που προσδιορίζει τις τιμές της πίεσης και του ρυθμού που υπάρχουν στο συγκεκριμένο σημείο, οι οποίες θα πρέπει να ικανοποιούν και τις δύο εξισώσεις. Αυτή η προσεγγιστική μέθοδος επίλυσης

αποτελεί τη βάση για όλες τις διαδικασίες υπολογισμού ροής σε μία παραγωγική γεώτρηση και συχνά αναφέρεται ως μέθοδος κομβική ανάλυσης ή nodal analysis.



Σχήμα 3.6: Πίεση στο node συναρτήσει του ρυθμού παραγωγής (12)  
(<http://www.ingenieriadepetroleo.com/nodal-analysis-petroleum-engineering.html>)

Η κύρια χρησιμότητα της μεθόδου αυτής στην παρούσα διπλωματική εργασία, είναι να βρεθεί το σημείο εκείνο (Operating Point) το οποίο θα δώσει τον βέλτιστο ρυθμό παραγωγής πετρελαίου με την έγχυση της βέλτιστης ποσότητας αερίου για κάθε γεώτρηση, που είναι και το βασικό ζητούμενο. Αυτό θα επιτευχθεί με τον συνδυασμό της καμπύλης IPR (Inflow Performance Relationship), η οποία αντιπροσωπεύει την ροή στον ταμιευτήρα και με την καμπύλη VLP (Vertical Lift Performance) ή TPC, η οποία αναλογεί στην ροή στην παραγωγική σωλήνωση και στην επιφάνεια (Σχήμα 3.7).



Σχήμα 3.7: Σημείο τομής IPR/VLP (13)  
(Πηγή: <https://ariefhidayat.wordpress.com/category/kuliah/>)

Η καμπύλη IPR εξαρτάται από τις ιδιότητες του ταμιευτήρα (πίεση, θερμοκρασία, διαπερατότητα, επιδερμικό συντελεστή κ.α.) και τις θερμοδυναμικές ιδιότητες των ρευστών του (ιξώδες, σημείο κορεσμού, πυκνότητα, GOR κ.α.). Για το λόγο αυτό, εφόσον οι ιδιότητες αυτές παραμένουν σχετικά ανεπηρέαστες για ένα συγκεκριμένο μικρό χρονικό διάστημα, η καμπύλη IPR παραμένει σταθερή (υποθέτουμε αμελητέα μεταβολή). Έτσι, για την εύρεση του βέλτιστου ρυθμού παραγωγής θα πρέπει να επέμβουμε στα χαρακτηριστικά που αποτελούν την καμπύλη VLP, και ποιο συγκεκριμένα στην πυκνότητα του ρευστού όπως έγινε στην παρούσα διπλωματική εργασία με την βελτιστοποίηση του ρυθμού έγχυσης αερίου, με την μέθοδο υποβοήθησης της παραγωγής με έγχυση αερίου.

### **3.4 Επίδοση ροής στον ταμιευτήρα (Inflow Performance Relationship)**

#### **3.4.1 Παράγοντες που επηρεάζουν την καμπύλη IPR**

Η καμπύλη IPR επηρεάζεται από παραμέτρους που σχετίζονται με τον ταμιευτήρα. Τα πιο σημαντικά στοιχεία που επηρεάζουν την καμπύλη IPR είναι τα εξής:

1. Πίεση ταμιευτήρα: Όσο πιο υψηλή είναι η πίεση του ταμιευτήρα, θα επιτυγχάνεται και μεγαλύτερη ροή προς το φρεάτιο της γεώτρησης, δηλαδή εξαρτάται από την διαφορά πίεσης ανάμεσα στον ταμιευτήρα και την γεώτρηση.
2. Ιδιότητες πορώδους μέσου: Οι ιδιότητες των πετρωμάτων που επηρεάζουν την καμπύλη IPR είναι η διαπερατότητα και το πάχος της παραγωγικής ζώνης.
3. Ιδιότητες ρευστών: Οι ιδιότητες των ρευστών, κυρίως το ιξώδες και ο ογκομετρικός συντελεστής σχηματισμού ( $B_o$ ), είναι σημαντικές για την διαμόρφωση της καμπύλης IPR.
4. Γεωμετρία γεώτρησης: Τα κύρια στοιχεία που περιλαμβάνονται στην γεωμετρία της γεώτρησης και επηρεάζουν την αποδοτικότητα της είναι η ακτίνα της, το μέγεθος των παραγωγικών ζωνών, το μέγεθος και η πυκνότητα των διατρημάτων κ.α.

#### **3.4.2 Δείκτης παραγωγικότητας (Productivity Index)**

Η ικανότητα του ταμιευτήρα να μεταφέρει τα ρευστά μέσα στην παραγωγική στήλη είναι μεγάλης σημασίας για την πρόβλεψη της παραγωγής και θα πρέπει να προσδιορίζεται. Δείκτης παραγωγικότητας PI (συμβολίζεται με J) ενός φρέατος καλείται το πηλίκο της παροχής που μετρήθηκε κατά τη διάρκεια ενός τεστ προς την πτώση πίεσης που απαιτήθηκε και επειδή είναι

το μέτρο της δυναμικότητας του συστήματος ροής του ταμιευτήρα να παραδίδει ρευστό στο φρεάτιο, ο προσδιορισμός του είναι εξαιρετικής σημασίας.

Για ακτινωτή ψευδο-σταθερή ροή, ο συντελεστής παραγωγικότητας περιγράφεται μαθηματικά από τον τύπο του Darcy και είναι ο λόγος του ρυθμού παραγωγής προς την πτώση που υφίσταται η πίεση (Εξίσωση 3.13). Ο τύπος αυτός μπορεί να εφαρμοστεί μόνο σε μονοφασική ροή, δηλαδή στην περίπτωση ενός ακόρεστου ταμιευτήρα:

$$J = \frac{q}{P_r - P_{wf}} = \frac{2\pi kh}{\mu B_o} \frac{1}{\ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right) - \frac{3}{4} - S} \quad (3.13)$$

Όπου: J ο δείκτης παραγωγικότητας (stb/day/psi), q ο ρυθμός παραγωγής (stb/day),  $P_r$  η μέση στατική πίεση του ταμιευτήρα (psi),  $P_{wf}$  η πίεση του πυθμένα της γεώτρησης (psi),  $r_w$  η ακτίνα της γεώτρησης (ft),  $r_e$  η ακτίνα του ταμιευτήρα (ft), S ο επιδερμικός συντελεστής, h το πάχος του ταμιευτήρα (ft),  $\mu$  το ιξώδες του ρευστού του ταμιευτήρα (cP) και  $B_o$  ο ογκομετρικός συντελεστής σχηματισμού (bbl/stb).

Ο συντελεστής παραγωγικότητας σε περίπτωση σταθερής ροής, δίνεται από την εξίσωση:

$$J = \frac{2\pi kh}{\mu B_o \left( \ln \frac{r_e}{r_w} + S \right)} \quad (3.14)$$

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, ο δείκτης παραγωγικότητας μετριέται κατά τη διάρκεια ενός τεστ παραγωγής. Στα συγκεκριμένα τεστ, η γεώτρηση κλείνει (shut – in) μέχρι να εξισορροπηθεί η πίεσής σε ολόκληρο το σύστημα ροής. Εφόσον η στατική πίεση ( $P_r$ ) μετρηθεί και καταγραφεί, η γεώτρηση ανοίγει και αφήνεται να παράγει με ένα σταθερό ρυθμό Q και με μία πίεση πυθμένα  $P_{wf}$  η οποία θα πρέπει να παρατηρείται και να καταγράφεται συνεχώς από τη στιγμή που η γεώτρηση θα αρχίσει ξανά την παραγωγή. Με τον τρόπο αυτό ο δείκτης παραγωγικότητας θα μπορεί να υπολογιστεί από την Εξίσωση (3.13). Ο επιδερμικός συντελεστής εξαρτάται άμεσα από την διαπερατότητα  $k_s$  της επηρεασθείσας περιοχής και από το πάχος της περιοχής αποστράγγισης h, οι τιμές των οποίων προέρχονται από την ανάλυση των δεδομένων των τεστ παραγωγής.

Αξίζει να σημειωθεί ότι απρόσμενες μειώσεις του δείκτη παραγωγικότητας σε μία γεώτρηση μπορεί να είναι ένδειξη για μία σειρά από προβλήματα που αντιμετωπίζουν συχνά οι γεωτρήσεις, όπως βλάβες κατά τις επεμβάσεις σε μία γεώτρηση (workovers), κατά την συμπλήρωση (completion) της γεώτρησης, μηχανολογικά προβλήματα κ.α.

Η Εξίσωση (3.13) που παρουσιάστηκε παραπάνω, είναι περιοριστική, με την έννοια ότι εφαρμόζεται μόνο σε γεωτρήσεις οι οποίες παράγουν από το κέντρο μιας κυκλικής περιοχής αποστράγγισης. Για το λόγο αυτό, η παραπάνω Εξίσωση (3.13) θα πρέπει να διαμορφωθεί έτσι ώστε να συμβαδίζει με την οποιαδήποτε έλλειψη συμμετρίας που μπορεί να ισχύει. Για την επίτευξη αυτού του αποτελέσματος, η εξίσωση της ψευδο-σταθερής ροής θα πρέπει να εκφραστεί σε μία γενική μορφή με την εισαγωγή του συντελεστή μορφής Dietz (Dietz shape factor), ο οποίος συμβολίζεται με  $C_A$ . Ο συντελεστής αυτός λαμβάνει διάφορες τιμές, ανάλογα με το σχήμα της περιοχής αποστράγγισης και της θέσης της γεώτρησης στη περιοχή αυτή. Έτσι, ο παρονομαστής της Εξίσωσης (3.13) μπορεί να διαμορφωθεί σε μία σχέση της μορφής:

$$\begin{aligned}
 \ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right) - \frac{3}{4} - S &= \frac{1}{2} \ln\left(\frac{r_e^2}{r_w^2}\right) - \frac{3}{4} + S \\
 &= \frac{1}{2} \ln\left(\frac{4\pi r_e^2}{4\pi r_w^2}\right) - \ln\left(e^{\frac{3}{4}}\right) + S \\
 &= \frac{1}{2} \ln\left(\frac{4A}{56.32r_w^2}\right) + S \\
 &= \frac{1}{2} \ln\left(\frac{4A}{31.6\gamma r_w^2}\right) + S \\
 &= \frac{1}{2} \ln\left(\frac{4A}{\gamma C_A r_w^2}\right) + S
 \end{aligned} \tag{3.15}$$

Όπου το  $\gamma$  είναι η εκθετική σταθερά του Euler η οποία είναι ίση με 1.781 και το  $C_A$  είναι ο συντελεστής μορφής Dietz. Ο συνδυασμός της εξίσωσης (3.13) και (3.15) δίνει την γενική εξίσωση ροής ψευδοσταθερής κατάστασης η οποία λαμβάνει υπ' όψη τη γεωμετρία της περιοχής αποστράγγισης:

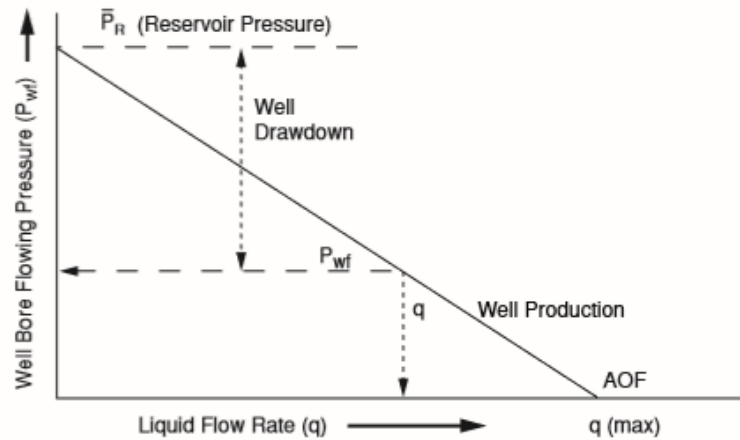
$$q = \frac{2\pi kh}{\mu B_o \left[ \frac{1}{2} \ln \left( \frac{4A}{\gamma C_A r_w^2} \right) + S \right]} (P_r - P_{wf}) \quad (3.16)$$

### 3.4.3 Καμπύλη IPR σε ακόρεστο ταμιευτήρα

Εάν η εξίσωση (3.16) αναδιατυπωθεί, προκύπτει μία γραμμική σχέση μεταξύ του ρυθμού παραγωγής και της πτώσης πίεσης για μία μοναδική τιμή του συντελεστή παραγωγικότητας:

$$q = J(P_r - P_{wf}) \quad (3.17)$$

Γραφικά, η παραπάνω εξίσωση παρίσταται από μία ευθεία γραμμή με μία κλίση η οποία ισούται με  $-1/J$  (Σχήμα 3.8). Όταν η πίεση στον πυθμένα είναι ίση με την μέση πίεση ταμιευτήρα, δεν παρατηρείται ροή εξαιτίας της μηδενικής βαθμίδας πίεσης ενώ ο μέγιστος ρυθμός παραγωγής, θεωρητικά, επιτυγχάνεται όταν η πίεση στον πυθμένα είναι μηδενική (AOF). Αν η πίεση  $P_{wf}$  πέσει κάτω από το σημείο κορεσμού του ρευστού, τότε η καμπύλη IPR δεν αποτελεί ευθεία γραμμή σε όλο της το μήκος.



Σχήμα 3.8: Ευθεία IPR για ακόρεστο ταμιευτήρα (14)

### 3.4.4 Καμπύλη IPR σε κορεσμένο ταμιευτήρα

Το γραμμικό μοντέλο της IPR που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα, ισχύει για τιμές πίεσης πάνω από το σημείο φυσαλίδας (bubble point). Κάτω από το σημείο αυτό, το αέριο αρχίζει να ελευθερώνεται από το πετρέλαιο. Η ελεύθερη φάση του αερίου καταλαμβάνει κάποιο τμήμα του χώρου των πόρων, ένα φαινόμενο το οποίο μειώνει τη σχετική διαπερατότητα του πετρελαίου και ταυτόχρονα αυξάνει το ιξώδες του. Ο συνδυασμός της επίδρασης της διαπερατότητας και του ιξώδους έχουν ως αποτέλεσμα ένα χαμηλότερο ρυθμό παραγωγής πετρελαίου, κάτω από το σημείο κορεσμού. Αυτό το φαινόμενο αποκλίνει την IPR από τη γραμμική τάση, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.9. Όσο πιο κάτω από το σημείο κορεσμού είναι η πίεση, τόσο μεγαλύτερη και η απόκλιση. Εάν η πίεση του ταμιευτήρα είναι κάτω από το σημείο κορεσμού, συνήθως υπάρχει πολυφασική ροή σε ολόκληρη την περιοχή του ταμιευτήρα.

Για την μοντελοποίηση της IPR σε πολυφασική ροή υπάρχουν μόνο εμπειρικές σχέσεις. Αυτές οι εμπειρικές σχέσεις περιλαμβάνουν την εξίσωση του Vogel η οποία χρησιμοποιείται ευρέως στην βιομηχανία πετρελαίου:

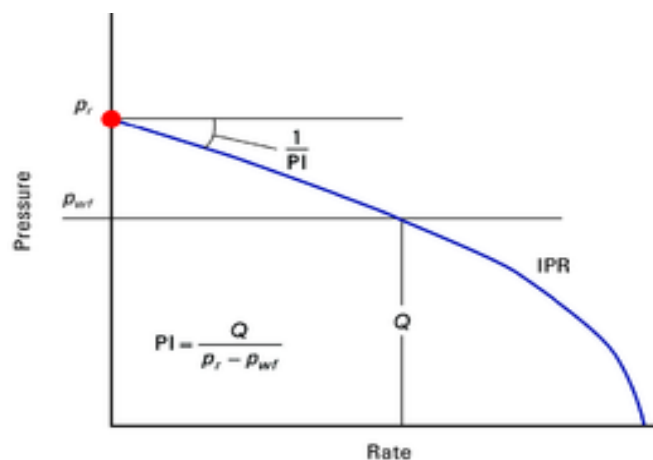
$$\frac{q}{q_{\max}} = 1 - 0.2 \left( \frac{P_{wf}}{P_r} \right) - 0.8 \left( \frac{P_{wf}}{P_r} \right)^2 \quad (3.18)$$

Όπου το  $q_{\max}$  είναι μία σταθερά, της οποίας η τιμή αντιστοιχεί σε συνθήκες AOF και το  $P_r$  η μέση πίεση του ταμιευτήρα. Η AOF (Absolute Open Flow) είναι ο μέγιστος ρυθμός παραγωγής που θα μπορούσε να έχει μία γεώτρηση, θεωρητικά, με μηδενική πίεση στα διατρήματα του φρεατίου παραγωγής.

Η κύρια συνεισφορά του Vogel ήταν η εισαγωγή της έννοιας της κανονικοποίησης και της αδιαστατοποίηση του ρυθμού παραγωγής στην τιμή της AOF ( $q_{\max}$ ). Κανονικοποίηση, είναι η δημιουργία νέων, αδιάστατων μεταβλητών και αδιαστατοποίηση είναι η επαναδιατύπωση του προβλήματος μέσω αυτών των μεταβλητών. Επομένως, ξαναγράφοντας την παραπάνω εξίσωση κατ' αυτόν τον τρόπο προκύπτει:

$$\frac{q}{q_{\max}} = \left[ 1 - \left( \frac{P_{wf}}{P_r} \right)^2 \right]^n \quad (3.19)$$

Ο συνδυασμός της ευθείας IPR και της καμπύλης του Vogel, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.9, μπορεί να περιγράψει πλήρως την απόδοση της εισροής από τον ταμιευτήρα στην γεώτρηση σε οποιαδήποτε πίεση. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.9, υπάρχει μονοφασική ροή μέχρι την πίεση  $P_{wf}$ , η οποία περιγράφεται από τον τύπο του PI (Ενότητα 3.4.3) και παρίσταται από μία ευθεία γραμμή με κλίση  $1/PI$ . Την στιγμή όμως που το ρευστό θα αρχίσει να γίνεται διφασικό, η IPR παύει να είναι ευθεία γραμμή και αρχίζει να παρουσιάζει μία καμπυλότητα η οποία γίνεται όλο και πιο έντονη όσο αυξάνει η παρουσία του περιεχόμενου αερίου μέσα στην υγρή φάση.



Σχήμα 3.9: Καμπύλη IPR για κορεσμένο ταμιευτήρα (15)  
([http://petrowiki.org/PEH%3AReservoir\\_Pressure\\_and\\_Temperature](http://petrowiki.org/PEH%3AReservoir_Pressure_and_Temperature))

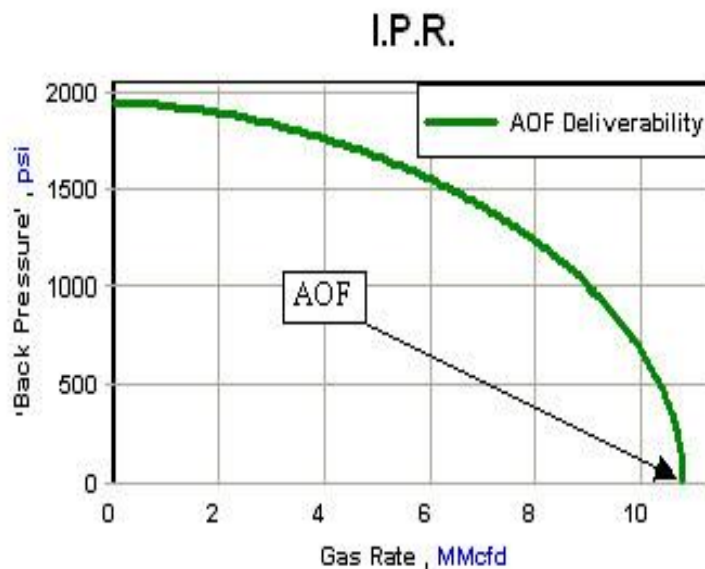
### 3.4.5 Καμπύλη IPR σε ταμιευτήρα αερίου

Το γεγονός ότι το αέριο είναι συμπιέσιμο έχει ως αποτέλεσμα η IPR, που περιγράφει την ροή του ταμιευτήρα αερίου, να μην παρίσταται γραφικά από μία ευθεία γραμμή αλλά από μία καμπύλη (Σχήμα 3.10) σε όλο το μήκος της και όχι σε κάποιο μέρος όπως στην περίπτωση του κορεσμένου ταμιευτήρα. Έτσι, η Εξίσωση (3.17) θα πρέπει να τροποποιηθεί με τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να συμπεριλάβει μία σταθερά η οποία να περιέχει τις ιδιότητες του αερίου μέσα στον ταμιευτήρα και στον φρεάτιο της γεώτρησης:

$$q = C(P_r^2 - P_{wf}^2) \quad (3.20)$$

όπου C σταθερά



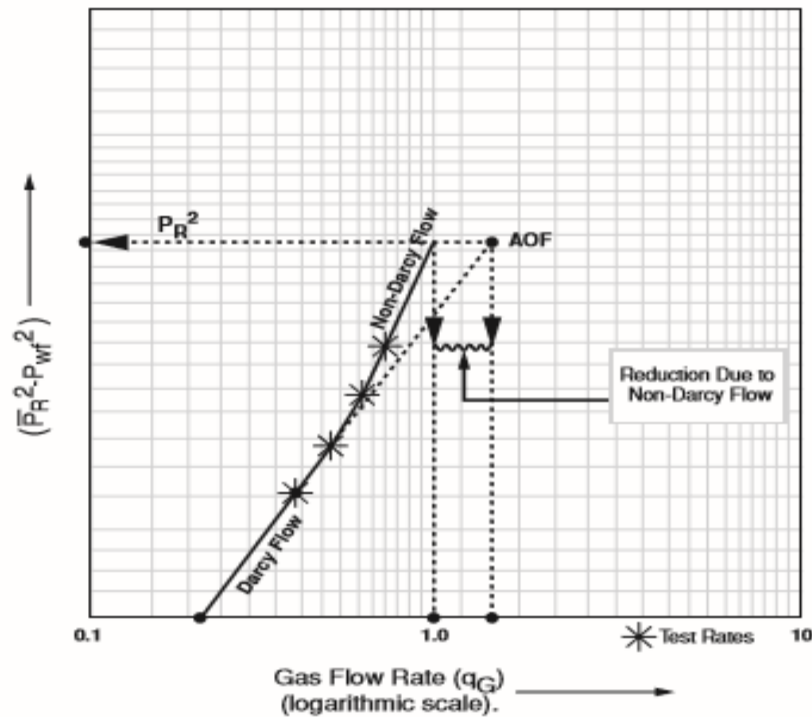


Σχήμα 3.10: Καμπύλη IPR για ταμειντήρα αερίου (16) (Πηγή: fekete.com)

Η Εξίσωση (3.20) ισχύει για χαμηλούς ρυθμούς  $q$  ενώ δεν εφαρμόζεται σε περιπτώσεις υψηλών ρυθμών όπου εμφανίζονται φαινόμενα τυρβώδους ροής. Αυτό μπορεί να ξεπεραστεί με την χρήση της εξίσωσης “Bureau of Mines” η οποία δημιουργήθηκε από παρατηρήσεις πεδίου και εκφράζεται μαθηματικά ως εξής:

$$q = C \left( P_r^2 - P_{wf}^2 \right)^n \quad (3.21)$$

όπου  $n$  είναι η κλίση της γραμμής που σχηματίζεται στο λογαριθμικό διάγραμμα  $(P_r^2 - P_{wf}^2) - q_G$  (Σχήμα 3.11) και παίρνει τιμές στο διάστημα  $[0.5, 1]$  στο οποίο η αρχική τιμή 1 (Εξίσωση 3.20) αντιπροσωπεύει τη γραμμική ροή (Darcy flow) και η τιμή 0.5 την τυρβώδη ροή (Non-Darcy flow).



Σχήμα 3.11: Μείωση παραγωγικότητας λόγω τυρβώδους ροής (17)

### 3.5 Ροή μιγμάτων υδρογονανθράκων και άλμης στις σωληνώσεις παραγωγής

Ο παράγοντας που καθορίζει την παραγωγή μίας γεώτρησης είναι η πτώση πίεσης που απαιτείται για να αρχίσει να ρέει το ρευστό, από τον πυθμένα μέχρι την κεφαλή της γεώτρησης (wellhead) και έπειτα μέχρι τον διαχωριστήρα. Αρχίζοντας από την κορυφή της γεώτρησης, οι παράμετροι που συμβάλλουν στην πίεση του πυθμένα του φρεατίου είναι:

- Η αντίθλιψη (backpressure) στην κεφαλή της γεώτρησης (wellhead). Η θλίψη αυτή είναι ουσιαστικά η πίεση ενός ρευστού, η οποία δρα αντίθετα προς την επιδιωκόμενη κίνηση μιας μηχανής, αντλίας ή βαλβίδας σωλήνωσης και η οποία πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στον υπολογισμό της χωρητικότητάς τους, σε περίπτωση εκκένωσής τους.
- Η υδροστατική πίεση μεταξύ του πυθμένα και την κεφαλή της γεώτρησης.
- Η απώλεια πίεσης που απαιτείται για να ξεπεραστούν οι απώλειες λόγω δυνάμεων τριβής. Αυτό εξαρτάται από την ταχύτητα ροής του υγρού, το καθεστώς της ροής και το ιξώδες, καθώς επίσης και το μήκος, τη διάμετρο και την τραχύτητα του σωλήνα, τις στενώσεις, τις βαλβίδες κ.α.

### 3.5.1 Μονοφασική ροή

Η μονοφασική ροή στην παραγωγική στήλη, λαμβάνει χώρα μόνο σε περιπτώσεις όπου η πίεση της κεφαλής της γεώτρησης είναι μεγαλύτερη αυτής του σημείου φυσαλίδας. Γενικά, η συνολική πτώση πίεσης της σωλήνωσης σε μία γεώτρηση είναι το άθροισμα της πτώσης πίεσης λόγω δυνάμεων τριβής ( $\Delta P_f$ ) και λόγω μεταβολών στην κινητική ( $\Delta P_k$ ) και δυναμική ( $\Delta P_g$ ) ενέργεια του ρευστού, με την τελευταία να παραλείπεται διότι η τιμή της είναι συνήθως αμελητέα σε σύγκριση με τις δύο προηγούμενες:

$$\Delta P = \Delta P_f + \Delta P_g + \Delta P_k \quad (3.22)$$

#### 1. Πτώση πίεσης λόγω τριβής

Η πτώση της πίεσης που οφείλεται στην τριβή, είναι συνάρτηση της ρεολογικής συμπεριφοράς του ρευστού (Νευτώνεια ή μη Νευτώνεια ρευστά), των συνθηκών ροής (ταχύτητα και στρωτή ή τυρβώδης ροή) και των χαρακτηριστικών της σωλήνωσης (διάμετρος και τραχύτητα).

##### Ο αριθμός Reynolds

Ο αριθμός Reynolds (Re) είναι ένας αδιάστατος αριθμός που δίνει το μέτρο της αναλογίας των αδρανειακών δυνάμεων προς τις δυνάμεις που αναπτύσσονται από το ιξώδες και κατά συνέπεια ποσοτικοποιεί τη σχέση μεταξύ αυτών των δύο μορφών δύναμης για δεδομένες συνθήκες ροής. Η έννοια εισήχθη από τον George Gabriel Stokes το 1851, αλλά ο αριθμός Reynolds πήρε το όνομά του από τον Osborne Reynolds (1842-1912). Ο αριθμός Reynolds δίνεται από τον τύπο:

$$R_e = \frac{Dv\rho}{\mu} \quad (3.23)$$

Όπου  $v$  η μέση ταχύτητα των ρευστών,  $\mu$  το ιξώδες του ρευστού,  $D$  η διάμετρος της σωλήνωσης και  $\rho$  η πυκνότητα του ρευστού.

Η στρωτή ροή χαρακτηρίζεται από χαμηλούς αριθμούς Reynolds ενώ η τυρβώδης ροή εμφανίζεται όταν ο αριθμός Reynolds πάρει μία τιμή μεγαλύτερη από 2100. Έχουν γίνει πολλά πειράματα για την μέτρηση της πτώσης πίεσης ενός ρευστού το οποίο ρέει σε σωληνώσεις με γνωστές διαμέτρους. Από όλους τους πιθανούς συνδυασμούς που μελετήθηκαν, δημιουργήθηκε η εξίσωση του Fanning η οποία ορίζει μαθηματικά την πτώση πίεσης λόγω τριβής ως εξής:

$$\Delta P = \frac{f_m \rho v^2 L}{2D} \quad (3.24)$$

Όπου  $f_m$  ο συντελεστής τριβής Moody,  $\rho$  η πυκνότητα του ρευστού,  $v$  η ταχύτητα του ρευστού,  $L$  το μήκος του σωλήνα και  $D$  η διάμετρός του.

Στην περίπτωση της στρωτής ροής, η πτώση πίεσης λόγω των δυνάμεων τριβής είναι ανεξάρτητη της τραχύτητας του αγωγού ενώ είναι ανάλογη της ταχύτητας του ρευστού. Ο συντελεστής Moody είναι αντιστρόφως ανάλογος του αριθμού Reynolds και δίνεται από τον τύπο:

$$f_m = \frac{64}{Re} \quad (3.25)$$

## 2. Πτώση πίεσης λόγω δυναμικής ενέργειας

Η εξίσωση που περιγράφει την πτώση πίεσης λόγω δυναμικής ενέργειας έχει ως εξής:

$$\Delta P_g = g \rho L \sin(\theta) \quad (3.26)$$

Όπου  $g$  η επιτάχυνση της βαρύτητας,  $\rho$  η πυκνότητα του ρευστού,  $L$  το μήκος του αγωγού και  $\theta$  η γωνία μεταξύ της κατεύθυνσης του ρευστού και ενός οριζοντίου επιπέδου αναφοράς.

## 3. Πτώση πίεσης λόγω κινητικής ενέργειας

Η πτώση πίεσης που οφείλεται στην κινητική ενέργεια είναι συνήθως αμελητέα σε σχέση με την δυναμική και τις δυνάμεις τριβής, για αυτό το λόγο συνήθως παραλείπεται από τον υπολογισμό της πτώσης πίεσης:

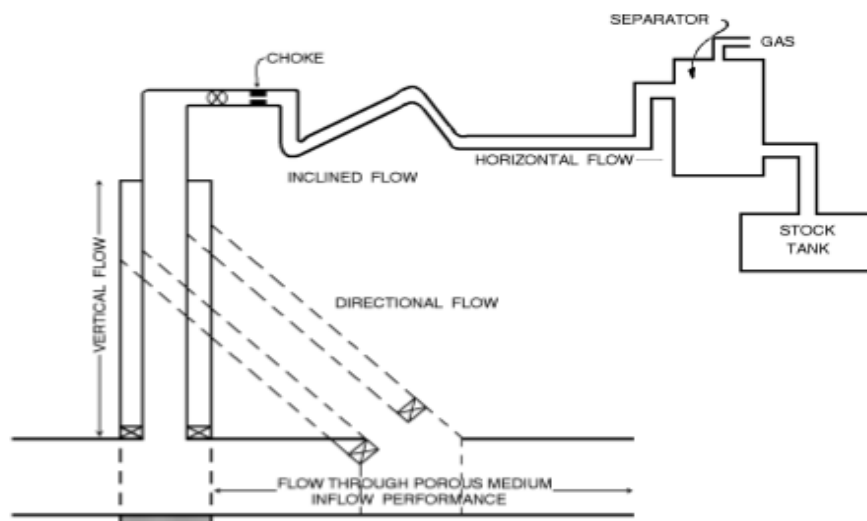
$$\Delta P_k = \rho (u_2^2 - u_1^2) \quad (3.27)$$

Όπου  $\rho$  η πυκνότητα του ρευστού και  $u_1$  και  $u_2$  η αρχική και η τελική ταχύτητα του ρευστού αντίστοιχα.

### 3.6 Πολυφασική ροή σε κατακόρυφες και κεκλιμένες σωληνώσεις

Η διφασική και γενικότερα η πολυφασική ροή είναι η συνηθέστερη ροή των ρευστών στη φύση. Πολυφασικές ροές συναντώνται σε φυσικές και χημικές διεργασίες, όπως είναι η παραγωγή πετρελαίου, αλλά και σε άλλες περιπτώσεις όπως στις διεργασίες απόσταξης, ψύξης, επεξεργασίας υγρών αποβλήτων κ.α. Η διφασική ροή διέπεται από τις ίδιες βασικές αρχές που προσδιορίζουν και την μονοφασική ροή ρευστών, όμως στη διφασική ροή οι δύο φάσεις (υγρή και αέρια) κατανέμονται στους αγωγούς με ποικίλους τρόπους, με αποτέλεσμα την εμφάνιση διαφόρων τύπων ή καθεστώτων ροής. Οι εξισώσεις που περιγράφουν τις διφασικές ροές είναι πολύπλοκες με αποτέλεσμα να είναι δύσχερης η ακριβής μαθηματική τους έκφραση, αφού η κάθε φάση επηρεάζεται από τις δικές της ιδιότητες και συνθήκες, ενώ συγχρόνως επηρεάζει και επηρεάζεται από την άλλη φάση.

Σε ένα πετρελαϊκό σύστημα, καθώς τα υγρά ρέουν από τον ταμιευτήρα προς την γεώτρηση και εν τέλει προς την επιφάνεια, υπάρχει μία συνεχής πτώση πίεσης. Αυτή η πτώση πίεσης δεν είναι σταθερή σε όλο το μήκος του συστήματος και προκαλείται από πολλούς παράγοντες. Το ρευστό το οποίο ρέει μέσα από το σύστημα των σωληνώσεων μπορεί να αποτελείται από τρεις διαφορετικές φάσεις ρευστών (πετρέλαιο, αέριο και νερό) τα οποία κινούνται με διαφορετικές ταχύτητες. Η πολυφασική ροή μπορεί να διαιρεθεί σε τρεις κατηγορίες ανάλογα με την κατεύθυνση της. Τα παραγωγικά συστήματα, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.12, περιλαμβάνουν: κατακόρυφη πολυφασική ροή, οριζόντια και κεκλιμένη. Στην εργασία αυτή θεωρείται ότι οι γεωτρήσεις του πεδίου OILFIELD είναι κατακόρυφες.

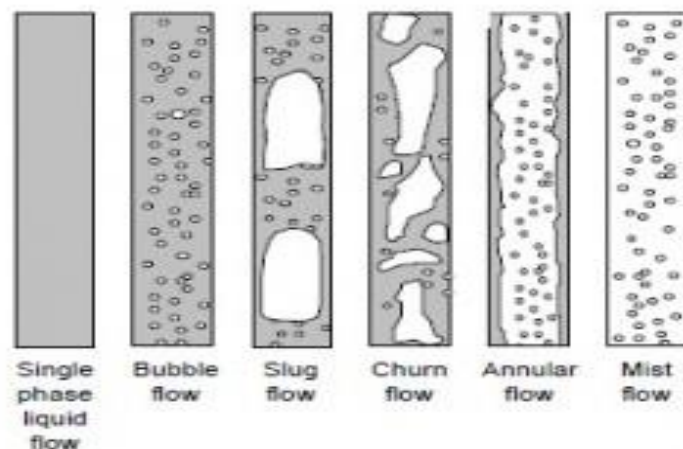


Σχήμα 3.12: Διαδρομή ροής πετρελαϊκού συστήματος (18) (Schlumberger - Gas Lift Design and Technology)

### 3.6.1 Καθεστώτα ροής

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.13, κατά την πολυφασική ροή αέριας και υγρής φάσης υδρογονανθράκων μπορούν να δημιουργηθούν αρκετά καθεστώτα ροής, τα σημαντικότερα των οποίων είναι:

- **Ροή με φυσαλίδες (bubble flow)**, κατά την οποία η αέρια φάση βρίσκεται διασκορπισμένη μέσα στην συνεχή υγρή φάση του πετρελαίου.
- **Ροή σχηματισμού μεγάλων θυλάκων αερίου (slug flow)**, στην οποία οι φυσαλίδες αερίου συγχωνεύονται σε μεγαλύτερες οι οποίες κάποια στιγμή αρχίζουν να καταλαμβάνουν το μεγαλύτερο μέρος της διατομής της σωλήνωσης.
- **Ροή με αναταράξεις (churn flow)**, κατά την οποία οι μεγαλύτερες φυσαλίδες αερίου γίνονται ασταθείς και καταρρέουν, με αποτέλεσμα να δημιουργείται τυρβώδης ροή.
- **Δακτυλιοειδής ροή (annular flow)**, κατά την οποία η φάση του αερίου γίνεται η κυρίαρχη και συνεχής, ενώ η υγρή ρέει σε ένα δακτύλιο ο οποίος επικαλύπτει την επιφάνεια του σωλήνα, με σταγονίδια να συμπαρασύρονται στην αέρια φάση.
- **Ομιχλώδης ροή (mist flow)**, κατά την οποία σε εξαιρετικά υψηλές ταχύτητες της κεντρικής στήλης αερίου, η διάτμηση στη διεπιφάνεια αερίου - πετρελαίου οδηγεί σε διασπορά του πετρελαίου στο αέριο σχηματίζοντας ένα καθεστώς “ομίχλης”. Αυτό το μοτίβο ομιχλώδης ροής λαμβάνει χώρα μόνο σε πολύ υψηλές ταχύτητες ροής και σε συστήματα με υψηλό λόγο αερίου - πετρελαίου (GOR).



Σχήμα 3.13: Καθεστώτα ροής (19) (Πηγή: <http://www.ingenieriadepetroleo.com/flow-regimes-in-horizontal-and-vertical-pipes.html>)

Δεδομένου ότι η πτώση πίεσης σε μία σωλήνωση προκαλείται από μία σύνθετη σειρά αλληλεπιδράσεων πολλών παραγόντων, ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα στην ανάλυση των παραγωγικών γεωτρήσεων και στην σχεδίαση του gas lift, είναι η πρόβλεψη της μεταβολής της πίεσης με το βάθος. Το πρόβλημα αυτό έχει αποτελέσει το αντικείμενο πολυάριθμων μελετών. Τα τελευταία χρόνια, υπήρξαν αρκετοί ερευνητές οι οποίοι δημοσίευσαν συσχετίσεις. Από αυτούς, οι πιο γνωστοί συσχετισμοί είναι του Hagedorn and Brown και Orkiszewski. Οι εξισώσεις-συσχετίσεις αυτές της πολυφασικής ροής, είναι αρκετά ακριβείς και πολύ χρήσιμες για τους μηχανικούς παραγωγής διότι χρησιμοποιούνται για την επίτευξη των ακολούθων:

- Επιλογή της σωστής διατομής των σωληνώσεων.
- Πρόβλεψη του κατάλληλου χρόνου κατά την διάρκεια ζωής του πετρελαϊκού πεδίου, που θα πρέπει να αρχίσει η λειτουργία των τεχνητών μηχανισμών παραγωγής (artificial lift).
- Σχεδιασμός των τεχνητών μηχανισμών παραγωγής.
- Προσδιορισμός της πίεσης του φρεατίου της γεώτρησης.
- Προσδιορισμός του συντελεστή παραγωγικότητας (PI).
- Πρόβλεψη των μέγιστων δυνατών ρυθμών παραγωγής.

### 3.6.2 Παράμετροι διφασικής ροής

Αρκετές παράμετροι της διφασικής ροής είναι συνέπεια του γεγονότος ότι, λόγω της διαφοράς πυκνότητας των δύο φάσεων, η ελαφρύτερη φάση ρέει ταχύτερα (Σχήμα 3.14). Η πολυφασική ροή θα απλοποιούταν σημαντικά εάν οι δύο φάσεις (υγρό-αέριο) συμπεριφέρονταν σαν ένα ομοιογενές μίγμα του οποίου οι ιδιότητες έπαιρναν μία μέση τιμή των επιμέρους ιδιοτήτων της κάθε φάσης. Επειδή όμως η αέρια φάση διαφέρει αισθητά από την υγρή ως προς την πυκνότητα και το ιξώδες, η αέρια φάση ρέει με μεγαλύτερη μέση ταχύτητα από την υγρή, ένα φαινόμενο που χαρακτηρίζεται ως <<ολίσθηση>> της μίας φάσης ως προς την άλλη. Ως κατακράτηση (HL, hold up) ορίζεται ο μέσος όγκος που καταλαμβάνει το υγρό σε μια χρονική στιγμή σε ένα ορισμένο τμήμα του αγωγού και είναι αποτέλεσμα της ολίσθησης και διαφέρει από το λόγο της ογκομετρικής παροχής του υγρού ως προς τη συνολική παροχή της γεώτρησης.

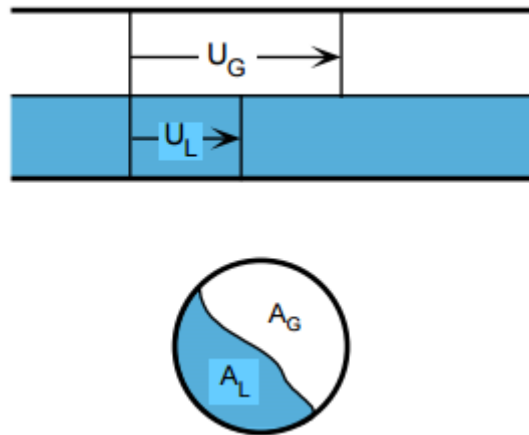
Εάν το εμβαδό διατομής μίας σωλήνωσης είναι  $A$  και τα εμβαδά της διατομής που καλύπτονται από την αέρια και την υγρή φάση αντίστοιχα είναι  $A_G$  και  $A_L$  τότε ο μέσος όγκος ( $H_G$ ) που

καταλαμβάνει η αέρια φάση μια χρονική στιγμή σε ένα ορισμένο τμήμα του αγωγού δίνεται από την εξίσωση:

$$H_G = \frac{A_G}{A} \quad (3.28)$$

Όπου  $A = A_G + A_L$ . Θα πρέπει να τονιστεί εδώ ότι χρησιμοποιούνται οι δείκτες G και L για να δηλώσουν την αέρια και την υγρή φάση αντίστοιχα. Τα δύο αυτά μεγέθη ( $H_L$  και  $H_G$ ) είναι σημαντικά διότι προσδιορίζουν το χρόνο παραμονής των ρευστών στο σύστημα και επειδή χρησιμοποιούνται στον υπολογισμό της πτώσης πίεσης. Συνδέονται μεταξύ τους με την εξίσωση:

$$H_L + H_G = 1 \quad (3.29)$$



Σχήμα 3.14: Απλοποιημένη εικόνα διφασικής ροής υγρού-αερίου σε κυλινδρικό αγωγό (20)  
(Διφασική ροή και μεταφορά θερμότητας- Ν. Ανδρίτσος, Β. Μποντόζογλου, 2012)

### Μαζική ροή

Η συνολική μαζική ροή ορίζεται ως το άθροισμα της μαζικής παροχής του υγρού ( $W_L$ ) και του αερίου ( $W_G$ ) σε kg/s:

$$W = W_G + W_L \quad (3.30)$$



### Μαζικές ταχύτητες (Mass velocities)

Οι μαζικές ταχύτητες είναι ουσιαστικά οι μαζικές ροές διαιρεμένες με την διατομή της ροής, σε  $\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$ :

$$G = \frac{W}{A} = \rho u = \frac{u}{v} \quad (3.31)$$

$$G = G_G + G_L \quad (3.32)$$

Όπου  $\rho$  και  $u$  είναι η πυκνότητα και η ταχύτητα της συνολικής ροής.

### Ποιότητα (Quality)

Στη θεώρηση φαινομένων στα οποία λαμβάνει χώρα αλλαγή φάσης (βρασμός, συμπύκνωση) είναι καταλληλότερη τις περισσότερες φορές η χρήση του όρου της μαζικής ποιότητας ( $X$ ), η οποία ορίζεται ως το κλάσμα μάζας της αέριας φάσης ως προς την συνολική (αέρια και υγρή):

$$X = \frac{G_G}{G} = \frac{G_G}{G_G + G_L} \quad (3.33)$$

Η παράμετρος αυτή δεν πρέπει να συγχέεται με τη θερμοδυναμική ποιότητα, το λόγο δηλαδή της μάζας του ατμού ως προς την συνολική μάζα της των δύο φάσεων σε μία συγκεκριμένη θέση και στιγμή.

### Φαινομενικές ταχύτητες (Superficial velocities)

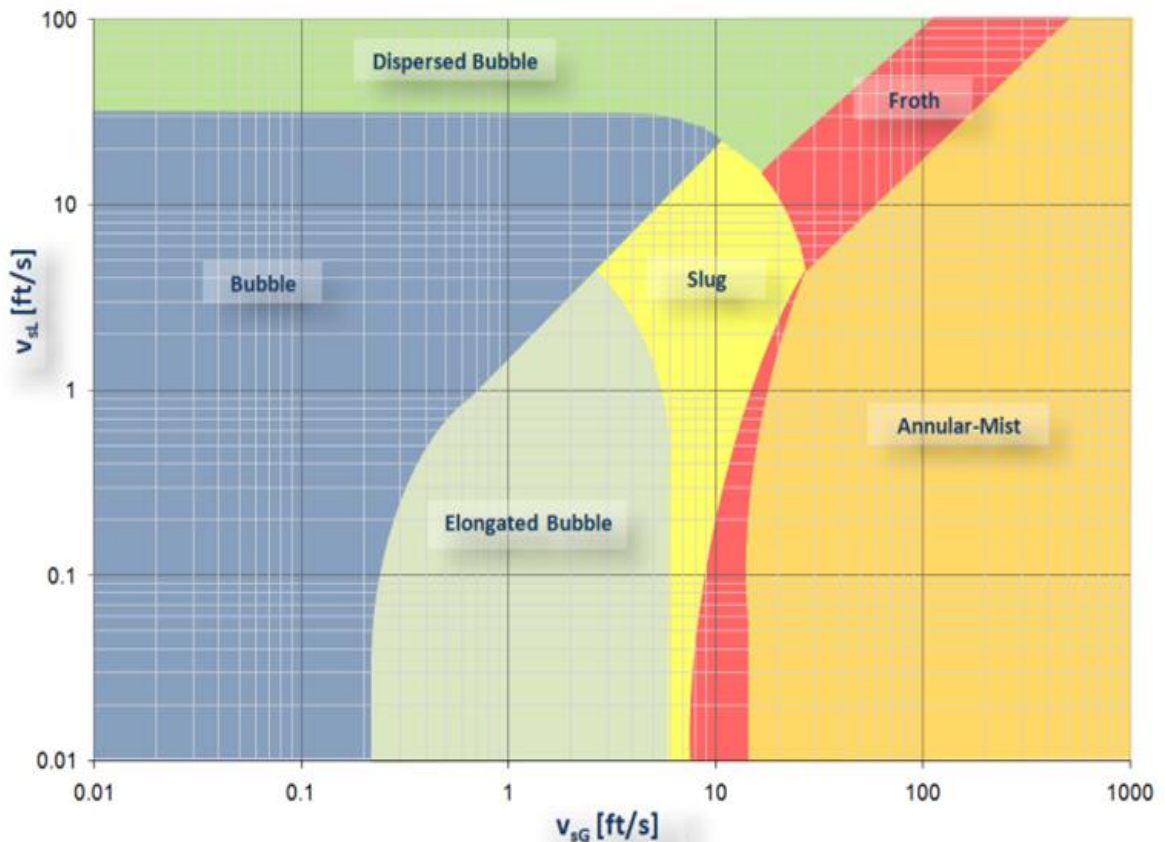
Οι φαινομενικές ταχύτητες των φάσεων προσδιορίζονται θεωρώντας ότι οι δύο φάσεις ρέουν μόνες τους στον αγωγό. Η φαινομενική ταχύτητα αέριας φάσης ορίζεται ως:

$$V_{s,gas} = \frac{q_{gas}}{A} \quad (3.34)$$

$$V_{s,liquid} = \frac{q_{liquid}}{A} \quad (3.35)$$

Όπου  $V_{s,gas}$  ,  $V_{s,liquid}$  οι φαινομενικές ταχύτητες του αερίου και του υγρού αντίστοιχα,  $Q_{gas}$  ,  $Q_{liquid}$  ο ρυθμός παραγωγής του αερίου και του υγρού αντίστοιχα και A το εμβαδόν διατομής της σωλήνωσης.

Στην πραγματικότητα, σε συνθήκες πολυφασικής ροής, οι φαινομενικές ταχύτητες δεν αντιστοιχούν σε πραγματικές ταχύτητες, όμως αποτελούν μία πολύ βολική παράμετρο για τον προσδιορισμό του τύπου ροής. Ο προσδιορισμός αυτός πραγματοποιείται με την βοήθεια των λογαριθμικών χαρτών ροής (flow maps) σε συνδυασμό με τις φαινομενικές ταχύτητες (Σχήμα 3.15).



Σχήμα 3.15: Χάρτης καθεστώτων ροής (21) (Fekete Harmony – Theory And Equations)

### Μέση πραγματική ταχύτητα (Average phase velocities)

Η μέση πραγματική ταχύτητα της αέριας φάσης και της υγρής αντίστοιχα, ορίζεται ως:

$$V_{GAS} = \frac{q_{gas}}{A_G} = \frac{G_G}{\rho_G H_G} = \frac{V_{s,gas}}{H_G} \quad (3.36)$$

$$V_{LIQUID} = \frac{q_{liquid}}{A(1-H_G)} = \frac{G_L}{\rho_L H_G} = \frac{V_{s,gas}}{1-H_G} \quad (3.37)$$

### Ταχύτητα ολίσθησης (Slip ratio)

Η ταχύτητα ολίσθησης,  $S$ , εκφράζει τη σχετική ταχύτητα της αέριας φάσης ( $V_{GAS}$ ) ως προς την υγρή ( $V_{LIQUID}$ ) και ορίζεται ως:

$$S = \frac{V_{GAS}}{V_{LIQUID}} = \frac{G_G \rho_L A_L}{G_L \rho_G A_G} = \left( \frac{X}{1-X} \right) \left( \frac{\rho_L}{\rho_G} \right) \left( \frac{1-H_G}{H_G} \right) \quad (3.38)$$

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4<sup>ο</sup>**

### **ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΥΠΟΒΟΗΘΗΣΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ (ARTIFICIAL LIFT)**

#### **4.1 Εισαγωγή**

Στη μηχανική πετρελαίου, οι μηχανισμοί υποβοήθησης της παραγωγής αναφέρονται στη χρήση τεχνητών μέσων για την αύξηση της ροής ή για την επανεκκίνηση γεωτρήσεων των οποίων η παραγωγή έχει σταματήσει (dead wells). Είναι ένα σύνολο μεθόδων, οι οποίες θα αναλυθούν στις επόμενες ενότητες και οι οποίες χρησιμοποιούνται για την μείωση της πίεσης του πυθμένα της γεώτρησης (BHP) με σκοπό την επίτευξη ενός υψηλότερου ρυθμού παραγωγής.

Σε αυτό το κεφάλαιο, θα γίνει μία περιγραφή των διάφορων τεχνητών μηχανισμών υποβοήθησης της παραγωγής, με ιδιαίτερη έμφαση στη μέθοδο υποβοήθησης της παραγωγής με έγχυση αερίου (gas lift).

#### **4.2 Κριτήρια επιλογής ενός τεχνητού μηχανισμού παραγωγής**

Υπάρχουν πολλά κριτήρια που επηρεάζουν την επιλογή μηχανισμού υποβοήθησης της παραγωγής. Πριν παρθεί οποιαδήποτε απόφαση για την επιλογή του μηχανισμού από τον διαχειριστή κοιτάσματος, θα πρέπει να γίνει μία αναλυτική μελέτη που να περιέχει στοιχεία τα οποία θα προσδιορίζουν ακριβώς ποιες είναι οι ανάγκες του έργου και πως αυτό θα πρέπει να υλοποιηθεί. Μερικά από τα πιο βασικά κριτήρια επιλογής είναι τα παρακάτω:

- Τα χαρακτηριστικά ταμειυτήρα και γεώτρησης όπως για παράδειγμα το βάθος του σχηματισμού παραγωγής, τα χαρακτηριστικά της ροής, η φύση των παραγόμενων ρευστών κ.α. .
- Η τοποθεσία του πεδίου, όπως χερσαίο ή θαλάσσιο περιβάλλον, η απόσταση από τις εγκαταστάσεις επεξεργασίας, τα καιρικά φαινόμενα κ.α.
- Η πηγή ενέργειας που θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί και η ευκολία παροχής.
- Προβλήματα λειτουργίας όπως είναι η επικάθηση στερεών π.χ. αλάτων, ασφατενίων, υδριτών κ.α., αλλά και η παρουσία διαβρωτικών αερίων όπως το υδρόθειο.
- Οικονομική ευχέρεια της εταιρίας και δυνατότητες εγκατάστασης και συντήρησης του απαραίτητου εξοπλισμού όπως για παράδειγμα κινητήρες, συμπιεστές, αντλίες κ.α.

### 4.3 Τύποι μηχανισμών υποβοήθησης της παραγωγής

Οι κυριότερες μέθοδοι μηχανισμών υποβοήθησης παραγωγής είναι:

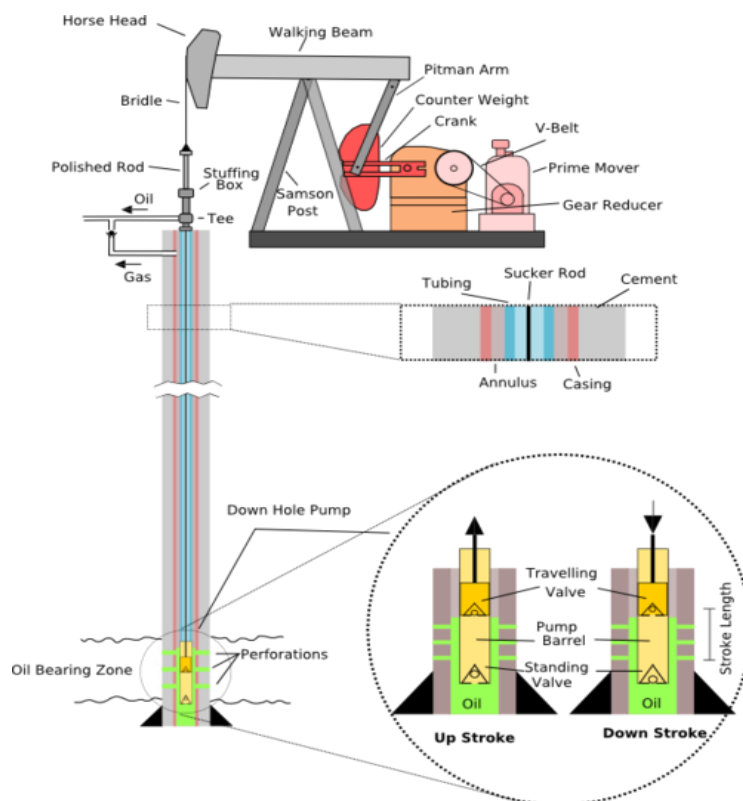
- Άντληση με την βοήθεια εμβόλου (sucker rod pumping)
- Ηλεκτρικές υποβρύχιες αντλίες (electric submersible pumps)
- Τεχνητή ανάκτηση με έγχυση αερίου (gas lift)
- Υδραυλικά συστήματα άντλησης (jet hydraulic pumping systems)

Επιπλέον, οι όχι και τόσο συχνά χρησιμοποιούμενες μέθοδοι, υποβοήθησης της παραγωγής με εμβολοφόρες αντλίες (plunger lift) και αντλίες με κοιλότητα (progressive cavity pumps), γίνονται όλο και πιο εφαρμόσιμες με την εξέλιξη της τεχνολογίας. Οι μέθοδοι αυτές περιγράφονται στα παρακάτω υπό-κεφάλαια.

#### 4.3.1 Άντληση με την βοήθεια εμβόλου (Sucker Rod Pumping)

Ο μηχανισμός άντλησης με έμβολο παρέχει μηχανική ενέργεια για την ανύψωση του πετρελαίου μέχρι την επιφάνεια. Είναι μία απλή, αποδοτική και εύκολη μέθοδος όσον αφορά την εκπαίδευση του προσωπικού του πεδίου. Είναι εφαρμόσιμη σε γεωτρήσεις μικρής διαμέτρου, πολλαπλών συστημάτων συμπλήρωσης (completion) και σε πετρέλαια τα οποία έχουν μεγάλη θερμοκρασία και υψηλό ιξώδες. Επίσης, η μεταφορά του συστήματος από γεώτρηση σε γεώτρηση είναι αρκετά εύκολη και χαμηλού κόστους.

Το σύστημα αυτό αποτελείται από διάφορα μηχανικά μέρη από τα οποία κάποια λειτουργούν στην επιφάνεια και κάποια στον πυθμένα της γεώτρησης. Η μονάδα άντλησης στην επιφάνεια, η οποία συνδέεται με την υπόγεια αντλία, αποτελείται, όπως φαίνεται και στο σχήμα 4.1, από ένα κινητήριο μηχανισμό (ηλεκτρικός κινητήρας) ο οποίος δίνει ενέργεια στον ιμάντα ελάττωσης ταχύτητας V-Belt για να κινήσει τον βραχίονα (crank). Ο βραχίονας με την σειρά του κινεί την μεταλλικό δοκό (walking beam) ο οποίος μετακινείται πάνω- κάτω για να ανεβάζει και να κατεβάζει το υπόγειο σύστημα άντλησης.



Σχήμα 4.1: Μηχανισμός άντλησης Sucker Rod (22) (πηγή: <http://Petrowiki.org>)

Στις εμβολοφόρες αντλίες, το έμβολο (plunger) κινείται μέσα και έξω από ένα σταθερό περίβλημα μέσω μιας κοιλότητας που περιέχει το παραγωγικό ρευστό. Στις αντλίες με έμβολο (piston), αυτό μετακινείται πάνω-κάτω μέσα στην κοιλότητα με το παραγωγικό ρευστό, με αποτέλεσμα να το ωθεί προς τα έξω. Η κίνηση αυτή, είτε του εμβόλου είτε του πιστονιού, δημιουργεί μία εναλλασσόμενη αύξηση και μείωση της ροής. Καθώς αυτά κινούνται προς τα πίσω, ο διαθέσιμος όγκος μέσα στον κύλινδρο αυξάνει με αποτέλεσμα να ανοίγει μία μονόδρομη βαλβίδα η οποία επιτρέπει τη ροή του ρευστού μέσα στον κύλινδρο. Αντίθετα, καθώς τα έμβολα κινούνται προς τα εμπρός, ο διαθέσιμος όγκος μέσα στον κύλινδρο μειώνεται με αποτέλεσμα η πίεση του ρευστού να μειώνεται και να ωθείται προς τα έξω μέσω της μονόδρομης βαλβίδας.

Οι εμβολοφόρες αντλίες είναι ικανές να δημιουργούν υψηλές πιέσεις και έχουν μεγάλη χωρητικότητα. Από την άλλη μεριά, απαιτούν περισσότερη συντήρηση εξαιτίας του μεγάλου αριθμού κινούμενων εξαρτημάτων που περιέχουν. Επίσης, έχουν μεγαλύτερο βάρος και χρειάζονται περισσότερο χώρο απ' ότι οι φυγοκεντρικές και οι περιστροφικές αντλίες. Επιπλέον, δεν έχουν μεγάλη δυνατότητα στον χειρισμό των ρευστών τα οποία περιέχουν στερεά συστατικά που μπορούν να διαβρώσουν τις βαλβίδες.

#### 4.3.2 Ηλεκτρικές υποβρύχιες αντλίες (Electric Submersible Pumps)

Οι ηλεκτρικές υποβρύχιες αντλίες (ESPs) είναι εύκολες στην εγκατάστασή τους και στην λειτουργία τους. Μπορούν να “σηκώσουν” εξαιρετικά μεγάλους όγκους ρευστού από τους παραγωγικούς ταμιευτήρες, μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε υπεράκτια πεδία και γενικά το κόστος ανύψωσης μεγάλου όγκου πετρελαίου είναι αρκετά χαμηλό. Παρ’ όλα αυτά υπάρχουν κάποιοι περιορισμοί όσον αφορά την χρήση τους, όπως η διαθεσιμότητα σε ηλεκτρική ενέργεια υψηλής τάσης, προβλήματα σε γεωτρήσεις με πολλαπλή συμπλήρωση (completion) και σε πετρέλαια με υψηλές θερμοκρασίες, υψηλό κόστος συντήρησης κ.α.

Ανεξάρτητα όμως από τους περιορισμούς αυτούς, τα συστήματα ESPs παρέχουν την μεγαλύτερη ιπποδύναμη από όλους τους τύπους μηχανισμών υποβοήθησης, χρησιμοποιούνται σε γεωτρήσεις με dual completion και επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως εφεδρικές μονάδες σε συνδυασμό με κάποιο άλλο σύστημα.

Η μέθοδος με ESPs είναι μία αρκετά αποτελεσματική τεχνική και κάτω από ορισμένες συνθήκες είναι πιο αποτελεσματική ακόμα και από την άντληση με έμβολο (sucker rod pumps). Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.2 α, αποτελείται από τα ακόλουθα επιφανειακά και υπόγεια συστήματα:

##### A) Υπόγειο σύστημα

- Αντλία (Pump). Η αντλία αποτελείται από μία σειρά φυγόκεντρικών στη σειρά, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.2 β. Η αντλία αυτή λειτουργεί μεταφέροντας πίεση στο ρευστό έτσι ώστε να του δώσει την απαραίτητη ενέργεια που χρειάζεται για να αρχίσει να ρέει από το φρεάτιο της γεώτρησης στην επιφάνεια με μία επιθυμητή παροχή. Αυτό επιτυγχάνεται με την μεταφορά κινητικής ενέργειας στο ρευστό από την φυγόκεντρο δύναμη που αναπτύσσεται μέσα στην αντλία, η οποία τελικά μετατρέπεται σε δυναμική ενέργεια με την μορφή πίεσης.
- Κινητήρας (Motor). Ο κινητήρας της αντλίας τροφοδοτείται με τριφασικό ρεύμα από την επιφάνεια, μέσω ενός μονωμένου καλωδίου και εάν υπάρχουν μεγαλύτερες απαιτήσεις ενέργειας από την αντλία, τότε μπορούν να τοποθετηθούν παραπάνω από ένας. Γενικά, το μήκος και η διάμετρος του κινητήρα καθορίζουν την ιπποδύναμή του.
- Μονωμένο ηλεκτρικό καλώδιο (Sealed electric cable). Το μονωμένο καλώδιο τροφοδοσίας μεταδίδει την απαιτούμενη ισχύ στον κινητήρα της αντλίας. Στις περισσότερες περιπτώσεις εγκαθίσταται πάνω στην παραγωγική στήλη, από την κεφαλή

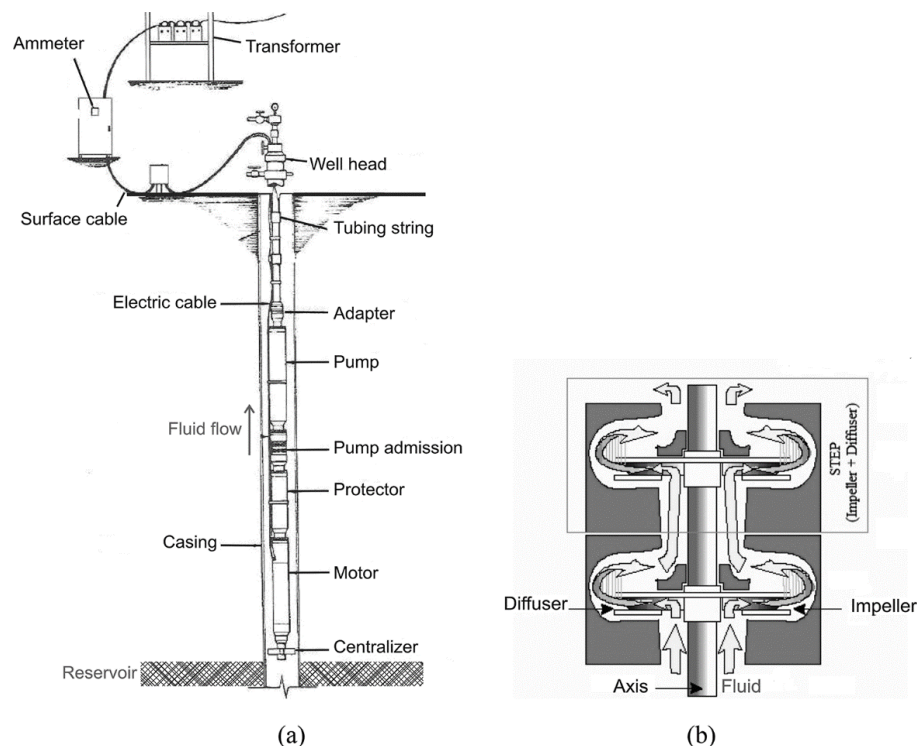
της γεώτρησης μέχρι και την αντλία και είναι ειδικά σχεδιασμένο για να λειτουργεί κάτω από τις υψηλές πιέσεις του φρεατίου.

- Διαχωριστήρας αερίου (Gas separator). Ο διαχωριστήρας αερίου χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις όπου το ποσοστό του αερίου που εισέρχεται στην αντλία είναι μεγαλύτερο από 20% του συνολικού όγκου ρευστού. Στην ουσία είναι ένας φυγοκεντρικός διαχωριστής ο οποίος διαχωρίζει την αέρια φάση, με την μικρότερη πυκνότητα, από την υγρή. Η τελευταία συγκεντρώνεται στην μέση της συσκευής και εισέρχεται μέσα στην αντλία ενώ η αέρια φάση αποβάλλεται μέσα στον δακτύλιο, ανάμεσα στην παραγωγική στήλη και τα τοιχώματα της γεώτρησης (casing). Από εκεί, το αέριο ανεβαίνει μέχρι την κεφαλή της γεώτρησης όπου είτε αποβάλλεται προς τον καυστήρα αερίου (flare) είτε συγκεντρώνεται στο σύστημα αποθήκευσης.

#### B) Επιφανειακό σύστημα

- Ελεγκτής κινητήρα (Motor controller). Ο ελεγκτής κινητήρα επιφάνειας παρέχει την απαραίτητη ενέργεια που χρειάζεται η αντλία και προστατεύει τον υπόγειο εξοπλισμό. Ο σχεδιασμός τους ποικίλει, από τους πολύ πολύπλοκους μέχρι και τους πιο απλούς και από τους πιο βασικούς έως τους πιο εξελιγμένους, οι οποίοι προσφέρουν πολλές επιλογές για την βελτίωση του ελέγχου του συστήματος, την προστασία και την παρακολούθηση όλης της λειτουργίας της αντλίας.
- Μετασχηματιστής (Transformer). Ο μετασχηματιστής προσαρμόζει το ηλεκτρικό ρεύμα, μέσω γραμμών μεταφοράς ενέργειας, έτσι ώστε να ταιριάζει με τις απαιτήσεις τάσης και έντασης του κινητήρα της αντλίας. Είναι ένα βασικό στοιχείο του συστήματος παροχής ηλεκτρικής ενέργειας στην αντλία και μία πιθανή βλάβη του θα μπορούσε να οδηγήσει σε περιορισμό της λειτουργίας του συστήματος και συνεπώς σε περιορισμό της παραγωγής.
- Επιφανειακό ηλεκτρικό καλώδιο (Surface electric cable). Το επιφανειακό καλώδιο συνδέεται με το υπόγειο μονωμένο καλώδιο και μεταδίδει την απαιτούμενη ισχύ, η οποία μεταφέρεται μέχρι την αντλία.



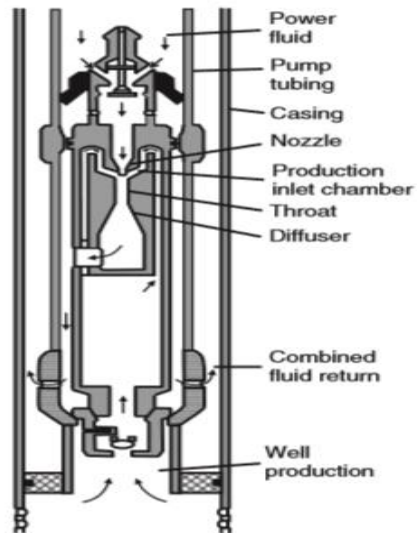


Σχήμα 4.2: Electric Submersible Pumps (23) (Oldrich Joel Romero, Anderson Hupp- Subsea Electrical Submersible Pump Significance in Petroleum Offshore Production)

#### 4.3.3 Υδραυλικά συστήματα άντλησης ακροφυσίου (Jet Hydraulic Pumping Systems)

Η εκτοξευόμενη υδραυλική άντληση ακροφυσίου είναι μία δοκιμασμένη μέθοδος που χρησιμοποιείται από τις αρχές του 1930 και έχουν επιτευχθεί επιτυχείς εφαρμογές της μεθόδου σε βάθη από 500 έως 19000 ft. Οι υδραυλικές αντλίες μετατρέπουν την ενέργεια του εγχέομενου ρευστού (νερό ή πετρέλαιο) σε πίεση για την μεταφορά των παραγόμενων ρευστών στην επιφάνεια. Επειδή στον μηχανισμό δεν εμπλέκονται κινούμενα μέρη, τα αέρια δεν δημιουργούν προβλήματα στην αντλία. Οι αντλίες μπορούν να τοποθετηθούν σε οποιοδήποτε βάθος μέσα στην γεώτρηση εφόσον η πίεση που δημιουργείται από την αναρρόφηση είναι αρκετή για να αποτρέψει τυχόν παραμορφώσεις στην αντλία. Το πιο σημαντικό όμως μειονέκτημα της αντλίας είναι η χαμηλή της αποδοτικότητα η οποία κυμαίνεται από 20-30%.

Η αρχή λειτουργίας της μεθόδου παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.3. Πρόκειται για μία αντλία δυναμικής μετατόπισης η οποία αυξάνει την πίεση του αντλούμενου ρευστού με ένα ακροφύσιο.



Σχήμα 4.3: Υδραυλικό σύστημα άντλησης ακροφυσίου (24) (Guo, Lyons, Ghalambor -Petroleum Production Engineering)

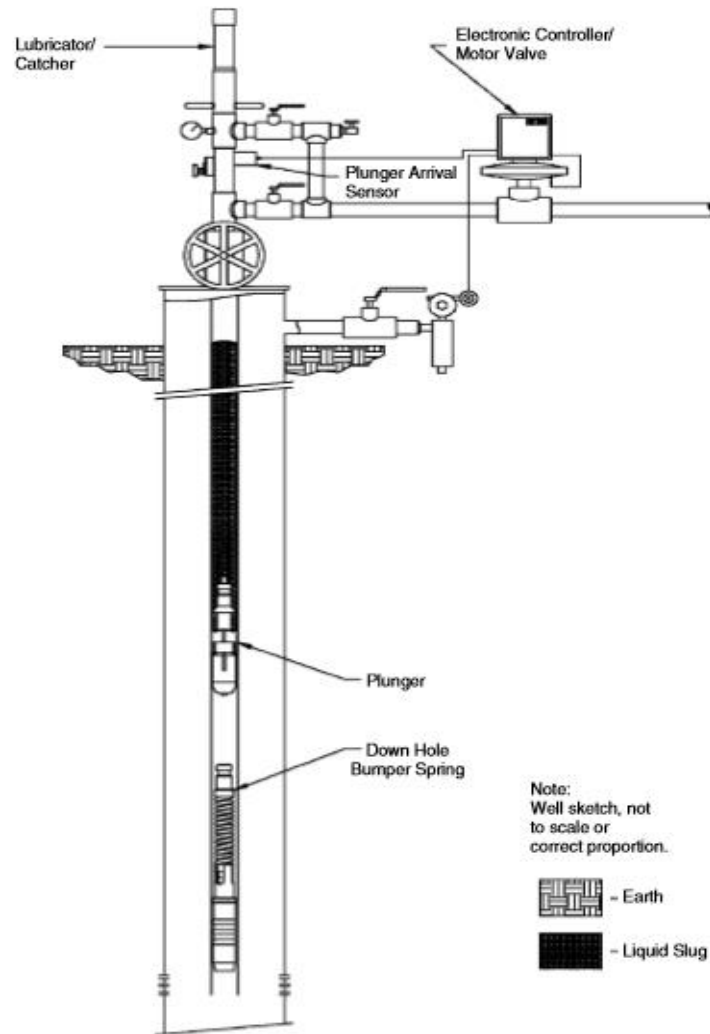
Το εγχεόμενο ρευστό εισέρχεται από την κορυφή της αντλίας, επιταχύνεται από το ακροφύσιο και αναμιγνύεται με το ρευστό της γεώτρησης. Καθώς τα ρευστά αναμιγνύονται, η δύναμη από την ροή του εγχεόμενου ρευστού μεταφέρεται μερικώς στο παραγόμενο ρευστό και αυξάνει την κινητική του ενέργεια. Το εγχεόμενο ρευστό αποτελείται από πετρέλαιο ή νερό και παρέχεται μέσα στην γεώτρηση μέσω ενός σωλήνα εισπίεσης.

#### 4.3.4 Εμβολοφόρες αντλίες (Plunger Lift)

Οι εμβολοφόρες αντλίες έχουν γίνει ευρέως αποδεκτές, ιδιαίτερα σε γεωτρήσεις με υψηλό λόγο αερίου/υγρού (GLR). Στα προηγούμενα χρόνια, η χρήση τους ήταν αποκλειστικά σε γεωτρήσεις πετρελαίου, όμως τα τελευταία χρόνια η χρήση της μεθόδου αυτής έχει γίνει πιο συχνή σε γεωτρήσεις αερίου, κυρίως για σκοπούς απομάκρυνσης του περιεχομένου νερού από το αέριο.

Στο Σχήμα 4.4 απεικονίζεται ένα σύστημα εμβολοφόρων αντλιών. Η μέθοδος χρησιμοποιεί ένα ελεύθερο έμβολο (piston) το οποίο κινείται πάνω-κάτω μέσα στην παραγωγική σωλήνωση. Το έμβολο, το οποίο είναι χαλύβδινο, αφήνεται ελεγχόμενα να κατέλθει μέσα στην σωλήνωση μέχρι τον πυθμένα της γεώτρησης και έπειτα αφήνεται να ανέλθει πάλι προς την επιφάνεια. Η λειτουργία του εμβόλου περιλαμβάνει περιόδους διακοπής της ροής (shut-in) και περιόδους ροής,

οι οποίες αντιστοιχούν στην περίοδο της ανόδου των ρευστών προς την επιφάνεια (unloading) και στην περίοδο ροής μετά την άφιξη του εμβόλου πίσω στην επιφάνεια.



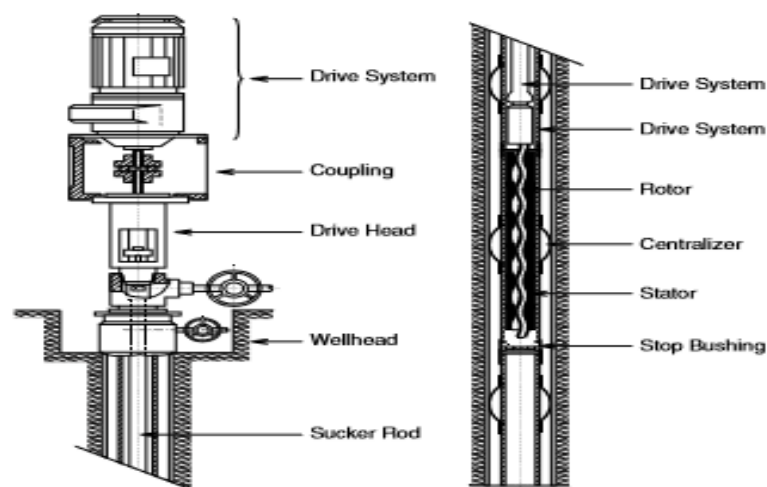
Σχήμα 4.4: Εμβολοφόρες αντλίες (25) (Guo, Lyons, Ghaleb -Petroleum Production Engineering)

Ένας κύκλος αυτής της μεθόδου, αρχίζει με την περίοδο διακοπής της ροής, η οποία περιλαμβάνει την κάθοδο του εμβόλου από την επιφάνεια μέχρι τον πυθμένα της γεώτρησης. Κατά την διάρκεια της καθόδου, η πίεση του αερίου στην γεώτρηση αυξάνεται, λόγω της πίεσης που ασκεί το έμβολο καθώς κατεβαίνει προς τον πυθμένα. Η γεώτρηση θα πρέπει να παραμείνει σε συνθήκες shut-in για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα έτσι ώστε η πίεση του ταμιευτήρα να

αυξηθεί αρκετά για να είναι σε θέση να παρέχει την απαραίτητη ενέργεια για την ανύψωση του ρευστού, αλλά και του εμβόλου, προς την επιφάνεια. Όταν η πίεση αυτή θα έχει επιτευχθεί, αρχίζει η περίοδος της ροής κατά την οποία το έμβολο μαζί με το παραγόμενο ρευστό ανεβαίνουν προς την επιφάνεια (unloading). Αρχικά, επικρατούν μεγάλοι ρυθμοί παραγωγής (3 ή 4 φορές μεγαλύτεροι από τις μέσες ημερήσιες τιμές) έως ότου η πίεση να εξισορροπηθεί και η γεώτρηση αρχίσει να παράγει ελεύθερα, με το έμβολο να συγκρατείται στην επιφάνεια από την πίεση και την ροή. Τέλος, καθώς οι ρυθμοί παραγωγής αρχίζουν να μειώνονται, το ρευστό αρχίζει πάλι να συσσωρεύεται στην παραγωγική στήλη. Τότε, η γεώτρηση ξανακλείνει (shut-in) και το έμβολο κατεβαίνει στον πυθμένα επαναλαμβάνοντας τον κύκλο.

#### 4.3.5 Αντληση με αντλίες κοιλότητας (Progressive Cavity Pumps)

Οι αντλίες κοιλότητων (PCPs) είναι αντλίες θετικής μετατόπισης οι οποίες χρησιμοποιούν έναν περιστροφικό ελικοειδή ρότορα, ο οποίος περιστρέφεται μέσα σε έναν στάτορα (ακίνητο μέρος των ηλεκτροκινητήρων και των ηλεκτρογεννητριών). Ο ρότορας κατασκευάζεται συνήθως από χάλυβα υψηλής αντοχής και ο στάτορας είναι ένα ελαστομερές. Οι αντλίες κοιλότητων (Σχήμα 4.5) μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανύψωση βαρέος πετρελαίου, χωρίς προβλήματα από ύπαρξη στερεών ή αερίων μέσα σε αυτό. Μπορούν να τοποθετηθούν σε κεκλιμένα και οριζόντια φρεάτια. Με την ικανότητάς τους να κινούν μεγάλες ποσότητες νερού, οι αντλίες κοιλότητων χρησιμοποιούνται σε γεωτρήσεις με μεγάλα ποσοστά νερού. Τα σημαντικότερα μειονεκτήματα των PCPs περιλαμβάνουν μικρή διάρκεια ζωής (2-5 χρόνια) και υψηλό κόστος λειτουργίας.



Σχήμα 4.5: Αντλίες κοιλότητων (PCPs) (26) (Guo, Lyons, Ghalambor -Petroleum Production Engineering)

## 4.4 Υποβοήθηση της παραγωγής με έγχυση αερίου (gas lift)

### 4.4.1 Γενική περιγραφή μεθόδου

Η υποβοήθηση της παραγωγής με έγχυση αερίου είναι μία από τις πιο αποτελεσματικές και λιγότερο δαπανηρές μεθόδους ενίσχυσης της παραγωγής. Η λειτουργία της μεθόδου, προϋποθέτει την εγκατάσταση ειδικών βαλβίδων έγχυσης αερίου πάνω στην παραγωγική στήλη, από τις οποίες εισέρχεται το συμπιεσμένο αέριο από την επιφάνεια. Η πίεση του αερίου που απαιτείται, για την εισαγωγή του στην σωλήνωση παραγωγής, δημιουργείται από επιφανειακούς συμπιεστές. Μόλις η βαλβίδα ανοίξει λόγω πίεσης, το αέριο εισέρχεται στην στήλη και αναμιγνύεται με το υπάρχον παραγόμενο ρευστό. Αυτή η ανάμειξη του αερίου με το υγρό βελτιώνει τη ροή των ρευστών με δύο τρόπους: (α) η ενέργεια από την διαστολή του αερίου ωθεί το ρευστό προς την επιφάνεια και (β) το αέριο αραιώνει το υγρό έτσι ώστε να ελαττωθεί η πυκνότητά του με αποτέλεσμα η πίεση στις διατρήσεις, δηλαδή στον πυθμένα της γεώτρησης, να υπερβαίνει την υδροστατική πίεση που ασκεί η στήλη. Η διαστολή συμβαίνει διότι το αέριο εισέρχεται στην στήλη με θερμοκρασία και πίεση μεγαλύτερη από την επιφανειακή, με αποτέλεσμα, η διαφορά αυτή να προκαλεί την μεταβολή στον όγκο του αερίου.

Ο τρόπος ενεργοποίησης των βαλβίδων έγχυσης, τις κατηγοριοποιεί σε δύο βασικούς τύπους: (α) βαλβίδες που ενεργοποιούνται με την πίεση της παραγωγικής στήλης (Production Pressure Operation Valves) και (β) βαλβίδες που ενεργοποιούνται με την πίεση του casing (Injection Pressure Operation Valve). Οι δύο αυτοί τύποι βαλβίδων θα αναλυθούν στις επόμενες ενότητες.

Στην περίπτωση του gas lift το βάθος της γεώτρησης δεν αποτελεί περιορισμό στην εγκατάσταση των βαλβίδων και επίσης εφαρμόζεται και σε υπεράκτιες επιχειρήσεις. Το κόστος για εφαρμογή σε ένα μεγάλο σύνολο γεωτρήσεων είναι αρκετά χαμηλό. Επίσης, εφαρμόζεται σε περιπτώσεις γεωτρήσεων με σχετικά υψηλή πίεση πυθμένα, δηλαδή ταμειυτήρες με υψηλή παραγωγικότητα και προτιμάται έναντι άλλων, σε περιπτώσεις γεωτρήσεων με μεγάλη κλίση ή γεωτρήσεων με διπλή σωλήνωση, στις οποίες η εγκατάσταση και λειτουργία άλλων επιβοηθούμενων μεθόδων είναι δύσκολη. Υπάρχουν δύο τύποι gas lift, το συνεχές και το διακοπτόμενο, τα οποία θα αναλυθούν στις επόμενες ενότητες. Στην παρούσα διπλωματική εργασία η χρήση του όρου gas lift θα υποδηλώνει πάντα το συνεχές.

#### **4.4.2 Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του μηχανισμού gas lift**

Το gas lift είναι η καλύτερη μέθοδος επιβοηθούμενης παραγωγής όσον αφορά το χειρισμό της άμμου ή των στερεών υλικών (με την βοήθεια ενσύρματων εργαλείων/αντλιών) εφόσον πολλά πηγάδια παράγουν κάποια σημαντική ποσότητα ανόργανων υλικών, ακόμη και αν έχει εγκατασταθεί ένα σύστημα ελέγχου (gravel). Γεωτρήσεις με κλίση, μπορούν επίσης να παράγουν εύκολα με την μέθοδο αυτή. Επίσης, διευκολύνει την ταυτόχρονη χρήση ενσύρματου εξοπλισμού, εφόσον με αυτόν τον τρόπο υπάρχει καθημερινή επίβλεψη (Remote control) και συντήρηση του συστήματος. Επιπλέον, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα κεντρικό σύστημα διανομής αερίου που να εξυπηρετεί πολλές γεωτρήσεις ή και ένα ολόκληρο πεδίο. Η χρήση ενός τέτοιου κεντρικού συστήματος διανομής μπορεί να ελαχιστοποιήσει το συνολικό κόστος και να επιτρέπει μία ευκολότερη παρακολούθηση των γεωτρήσεων.

Παρ' όλα τα πλεονεκτήματα αυτού του μηχανισμού, υπάρχουν και αρκετά προβλήματα τα οποία θα πρέπει να ληφθούν υπό όψη πριν από τον σχεδιασμό. Ένα από τα σημαντικότερα είναι η σχετικά υψηλή αντίθλιψη (backpressure) η οποία μπορεί να περιορίσει σοβαρά την παραγωγή του ρευστού, εφόσον το αέριο εγχέεται με υψηλή πίεση. Το πρόβλημα αυτό γίνεται όλο-ένα και σημαντικότερο με την αύξηση του βάθους και την μείωση της πίεσης του πυθμένα της γεώτρησης. Οι συμπιεστές του αερίου καταλαμβάνουν μεγάλο χώρο και βάρος όταν χρησιμοποιούνται σε υπεράκτιες πλατφόρμες. Επιπλέον, μία παράμετρος που θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη είναι η ανάγκη επαρκούς και συνεχούς παροχής φυσικού αερίου η οποία είναι απαραίτητη καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του έργου. Αν το πεδίο παρουσιάσει κάποια στιγμή έλλειψη σε φυσικό αέριο ή εάν αυτό γίνει πολύ ακριβό, μπορεί να είναι αναγκαίο να χρησιμοποιηθεί κάποια άλλη μέθοδος υποβοήθησης της παραγωγής.

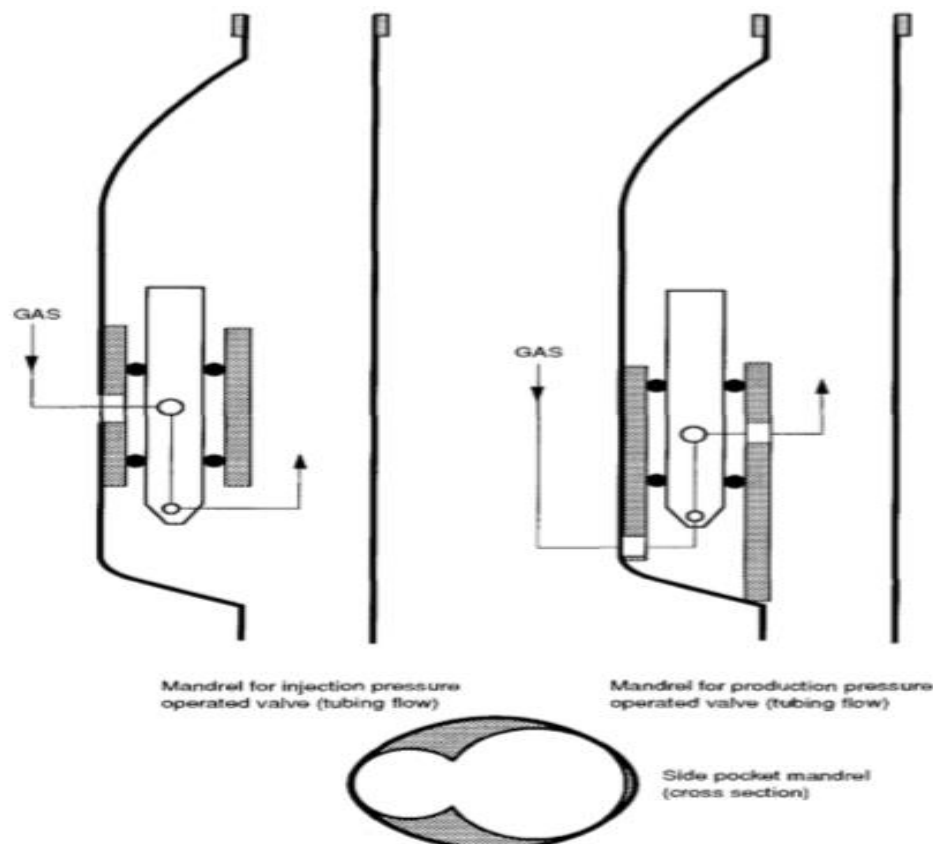
#### **4.4.3 Εξοπλισμός της μεθόδου gas lift**

Ο εξοπλισμός του μηχανισμού gas lift μπορεί να διαχωριστεί σε δύο κύριες κατηγορίες: στον υπόγειο εξοπλισμό και στον επιφανειακό. Όσον αφορά τον επιφανειακό εξοπλισμό, είναι απαραίτητος ένας συμπιεστής αερίου προκειμένου να επιτευχθεί η επιθυμητή πίεσης έγχυσης. Επίσης είναι απαραίτητο και ένα σύστημα πολλαπλής διανομής (manifold) αερίου το οποίο αποτελείται από βαλβίδα ασφαλείας, μετρητή αερίου και σωλήνωση διανομής για την κάθε

γεώτρηση. Ο υπόγειος εξοπλισμός αποτελείται κυρίως από τις βαλβίδες έγχυσης αερίου gas lift και τις θήκες μέσα στις οποίες τοποθετούνται (mandrels).

#### Θήκες βαλβίδων (gas lift mandrels)

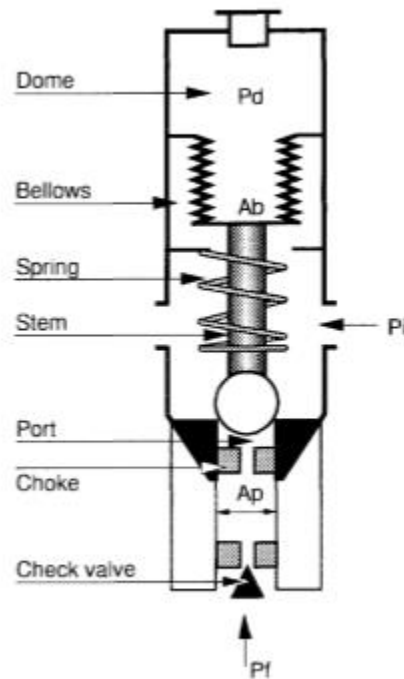
Οι θήκες βαλβίδων επιτρέπουν την μόνιμη εγκατάσταση των βαλβίδων έγχυσης αερίου σε γεωτρήσεις που έχουν σχεδιαστεί να παράγουν με τον μηχανισμό gas lift. Ωστόσο, στις περισσότερες γεωτρήσεις οι θήκες των βαλβίδων τοποθετούνται σε κατάλληλα βάθη, επί της παραγωγικής στήλης, σαν μέρος του μόνιμου εξοπλισμού της γεώτρησης. Οι θήκες αυτές επιτρέπουν την εγκατάσταση (και την ανάκτηση όταν χρειαστεί) των βαλβίδων έγχυσης αερίου με την χρήση ενσύρματης τεχνολογίας. Το σχήμα τους είναι οβάλ, με μία εξωτερική διάμετρο μεγαλύτερη από αυτή της παραγωγικής στήλης (Σχήμα 4.6). Βρίσκονται σε προκαθορισμένες θέσεις, σύμφωνα με τον σχεδιασμό της γεώτρησης. Οι περισσότεροι τύποι θηκών έχουν εσωτερική διάμετρο ίση με την αυτήν της παραγωγικής στήλης.



Σχήμα 4.6: Θήκες βαλβίδων έγχυσης αερίου gas lift (27) (artificial lift manual part 2A)

#### 4.4.4 Χαρακτηριστικά βαλβίδων Gas Lift

Το μέγιστο όφελος από ένα συγκεκριμένο ρυθμό έγχυσης αερίου, επιτυγχάνεται όταν η έγχυση του αερίου πραγματοποιείται όσο το δυνατόν βαθύτερα μέσα στην παραγωγική στήλη. Οι βαλβίδες έγχυσης αερίου είναι τα εργαλεία που χρησιμοποιούνται για το σκοπό αυτό, τα οποία έχουν σχεδιαστεί έτσι ώστε να ανοίγουν και να κλείνουν ανάλογα με την πίεση στο casing (IPO) ή στην παραγωγική στήλη (PPO). Το παρακάτω Σχήμα 4.7 δείχνει μία τέτοια βαλβίδα η οποία ελέγχεται από την πίεση του casing.



Σχήμα 4.7: βαλβίδα έγχυσης αερίου (IPO) (28) (artificial lift manual part 2A)

Υπάρχουν πολλοί τύποι βαλβίδων έγχυσης αερίου στην αγορά. Κάποιες έχουν σχεδιαστεί για χρήση σε συνεχόμενο gas lift και κάποιες για διακοπτόμενο. Η δύναμη που κλείνει την βαλβίδα τύπου IPO, δημιουργείται από την πίεση του αζώτου το οποίο περιέχεται μέσα σε έναν θάλαμο της βαλβίδας, ο οποίος ονομάζεται dome, ενώ η δύναμη αυτή για βαλβίδες τύπου PPO παρέχεται από ένα ελατήριο (spring).

Η δύναμη που τείνει να κλείσει την βαλβίδα  $F_c$  δίνεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$F_c = P_{dome} A_{bellows} \quad (4.1)$$



Όπου  $P_{dome}$  η πίεση του θόλου, δηλαδή η πίεση του αζώτου και  $A_{bellows}$  το εμβαδόν της φυσούνας.

Η δύναμη που τείνει να ανοίξει την βαλβίδα ( $F_0$ ) αποτελείται από δύο συνιστώσες, την  $F_{01}$  και την  $F_{02}$ , οι οποίες εκφράζουν την δύναμη που προκύπτει από την πίεση στην παραγωγική στήλη και από την πίεση στο casing αντίστοιχα:

$$F_{01} = P_{tubing} A_{port} \quad (4.2)$$

$$F_{02} = P_{casing} (A_{bellows} - A_{port}) \quad (4.3)$$

Όπου  $P_{tubing}$  η δύναμη που προκύπτει από την πίεση στην παραγωγική στήλη,  $P_{casing}$  η δύναμη που προκύπτει από την πίεση στο περίβλημα της γεώτρησης (casing) και  $A_{port}$  το εμβαδό της θύρας από την οποία εισέρχεται το αέριο.

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις (4.2) και (4.3) προκύπτει:

$$F_0 = F_{01} + F_{02} \quad (4.4)$$

Οι δύο δυνάμεις αυτές, που ανοίγουν και κλείνουν τις βαλβίδες, εξισορροπούνται λίγο πριν ανοίξει η βαλβίδα. Δηλαδή:

$$P_{dome} A_{bellows} = P_{casing} (A_{bellows} - A_{port}) + P_{tubing} A_{port} \quad (4.5)$$

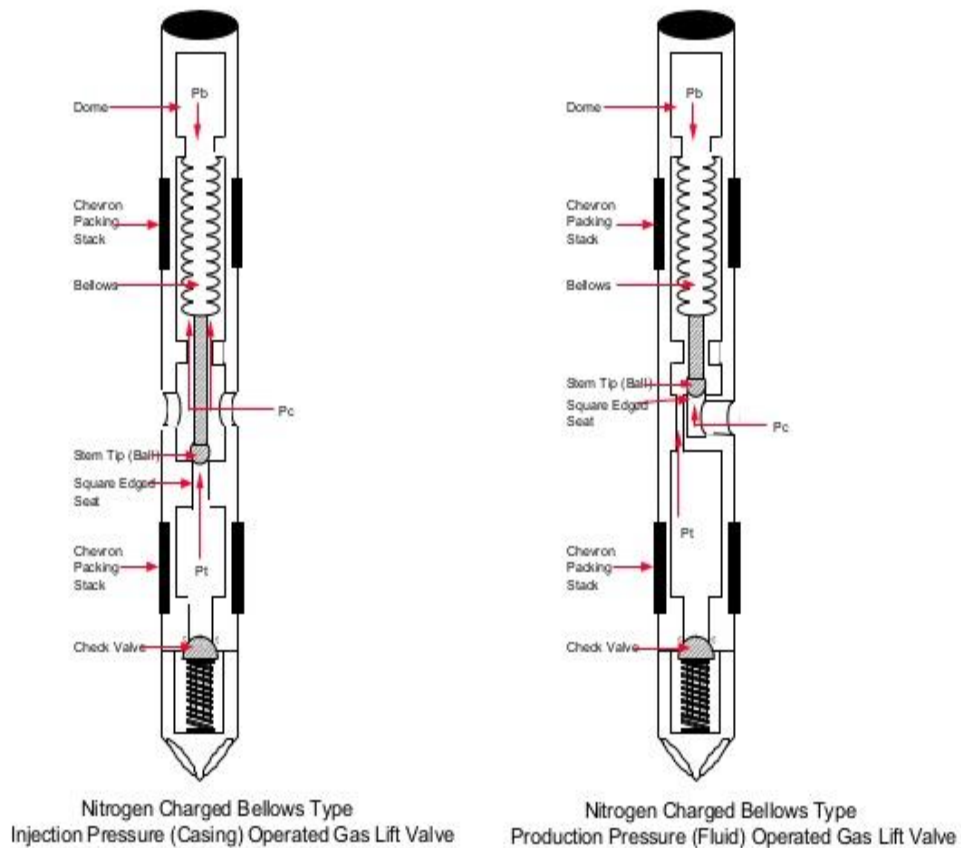
$$P_{casing} = \frac{P_{dome} - P_{tubing} \left( \frac{A_{port}}{A_{bellows}} \right)}{1 - \frac{A_{port}}{A_{bellows}}} \quad (4.6)$$

Βαλβίδες που ενεργοποιούνται με την πίεση του περιβλήματος της γεώτρησης (casing) (Injection Pressure Operated Valve)

Η βαλβίδα IPO (Injection Pressure Operated Valve) η οποία υποδεικνύεται στο παρακάτω Σχήμα 4.8 (αριστερά), ελέγχεται από την πίεση του εγχεόμενου αερίου, δηλαδή ανοίγει και κλείνει βάσει αυτής. Η βαλβίδα αυτή αποτελείται από έναν σφραγισμένο περίβλημα το οποίο περιέχει την διάταξη της φουσούνας (bellows) και τον θάλαμο (dome) με το άζωτο. Η φουσούνα λειτουργεί σαν διασύνδεση ανάμεσα στην πίεση του θαλάμου με το άζωτο και στην πίεση του εγχεόμενου αερίου, έτσι ώστε όταν η πίεση του τελευταίου ξεπεράσει την του πρώτου, η βαλβίδα θα ανοίξει, εφόσον η φουσούνα θα ανεβάσει το στέλεχος που σφραγίζει την είσοδό της, και το αέριο θα εισέλθει στην παραγωγική στήλη. Στο πεδίο OILFIELD στο οποίο βασίστηκε η διπλωματική εργασία, χρησιμοποιούνται βαλβίδες τύπου IPO.

Βαλβίδες που ενεργοποιούνται με την πίεση της παραγωγικής στήλης (Production Pressure Operated Valves)

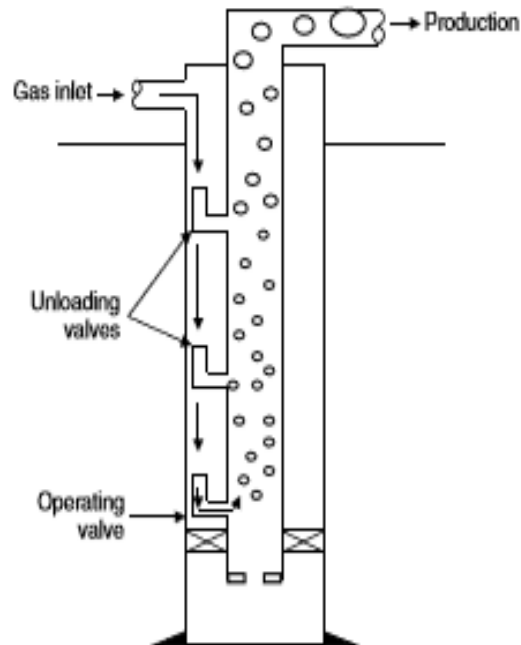
Η βαλβίδα λειτουργίας PPO (Production Pressure Operated Valves) η οποία υποδεικνύεται στο παρακάτω Σχήμα 4.8 (δεξιά), ελέγχεται από την πίεση του ρευστού παραγωγής, δηλαδή ανοίγει και κλείνει βάσει αυτής. Η βαλβίδα αυτή αποτελείται από έναν σφραγισμένο περίβλημα το οποίο αποτελείται από την διάταξη της φουσούνας (bellows) η οποία περιέχει ένα ρυθμιζόμενο ηλεκτρικό ελατήριο. Αντίθετα με την βαλβίδα IPO, η φουσούνα της βαλβίδας PPO λειτουργεί σαν διασύνδεση μεταξύ του ελατηρίου και της πίεσης του παραγόμενου ρευστού έτσι ώστε όταν η πίεση του του τελευταίου ξεπεράσει την του πρώτου, η βαλβίδα θα ανοίξει εφόσον η φουσούνα θα ανεβάσει το στέλεχος που σφραγίζει την είσοδό της, και το αέριο θα εισέλθει στην παραγωγική στήλη.



Σχήμα 4.8: Βαλβίδες IPO και PPO (29)

#### 4.4.5 Συνεχές gas lift (Continuous Gas Lift)

Η λειτουργία του συνεχούς gas lift εξασφαλίζει ροή σταθερής κατάστασης του ρευστού από τον πυθμένα της γεώτρησης έως την επιφάνεια. Ένας μικρός όγκος αερίου υψηλής πίεσης εισάγεται μέσα στον σωλήνα παραγωγής για να δώσει ώθηση και για να αραιώσει το υγρό έτσι ώστε να ελαττωθεί η πυκνότητά του με αποτέλεσμα η πίεση στον πυθμένα της γεώτρησης να υπερβεί την υδροστατική πίεση που ασκεί η στήλη. Καθώς το εγχέομενο αέριο διαστέλλεται μέσα στο ρευστό και καθώς μειώνει την υδροστατική πίεση, επιτυγχάνεται μία πιο εύκολη ροή προς την επιφάνεια. Για να πραγματοποιηθεί αποτελεσματικά αυτή η διαδικασία, είναι απαραίτητο να σχεδιαστεί ένα σύστημα που να επιτρέπει την έγχυση του αερίου μέσα από βαλβίδες στο μεγαλύτερο δυνατό βάθος γεώτρησης και με την κατάλληλη πίεση έγχυσης. Η μέθοδος ενός τέτοιου συστήματος παρουσιάζεται γραφικά στο σχήμα 4.9.

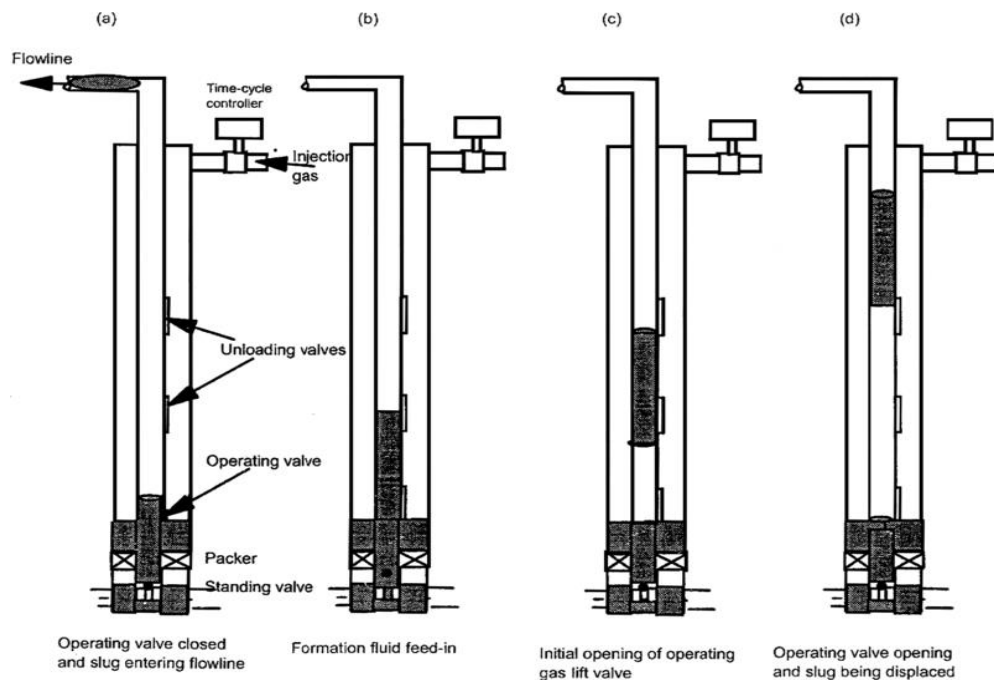


Σχήμα 4.9: Συνεχές gas lift (30) (Guo, Lyons, Ghalambor -Petroleum Production Engineering)

#### 4.4.6 Διακοπτόμενο gas lift (Intermittent Gas Lift)

Το διακοπτόμενο gas lift είναι εφαρμόσιμο σε γεωτρήσεις χαμηλής παραγωγικότητας με υψηλή πίεση ταμιευτήρα και σε γεωτρήσεις χαμηλής και υψηλής παραγωγικότητας που όμως έχουν χαμηλή πίεση ταμιευτήρα. Στις δύο αυτές περιπτώσεις, μία υπερβολικά μεγάλη πτώση πίεσης απαιτείται που έχει ως αποτέλεσμα έναν απαγορευτικά υψηλό λόγο αερίου/υγρού (GLR) για την παραγωγή των επιθυμητών ποσοτήτων πετρελαίου με την μέθοδο του συνεχούς gas lift.

Όπως υποδηλώνει το όνομα, το διακοπτόμενο gas lift λειτουργεί με βάση την αρχή της διακεκομμένης έγχυσης αερίου στην παραγωγική στήλη. Αυτό σημαίνει ότι η έγχυση αερίου πραγματοποιείται μόνο για ένα ορισμένο χρονικό διάστημα και έπειτα σταματάει. Μετά που θα έχει παρέλθει ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, επαναλαμβάνεται και πάλι η έγχυση αερίου (Σχήμα 4.10). Η λειτουργία αυτή γίνεται με έναν ρυθμιστή χρόνου ο οποίος ανοίγει τις βαλβίδες για ένα προκαθορισμένο χρονικό διάστημα, για τακτά χρονικά διαστήματα, και μετά την κλείνει.



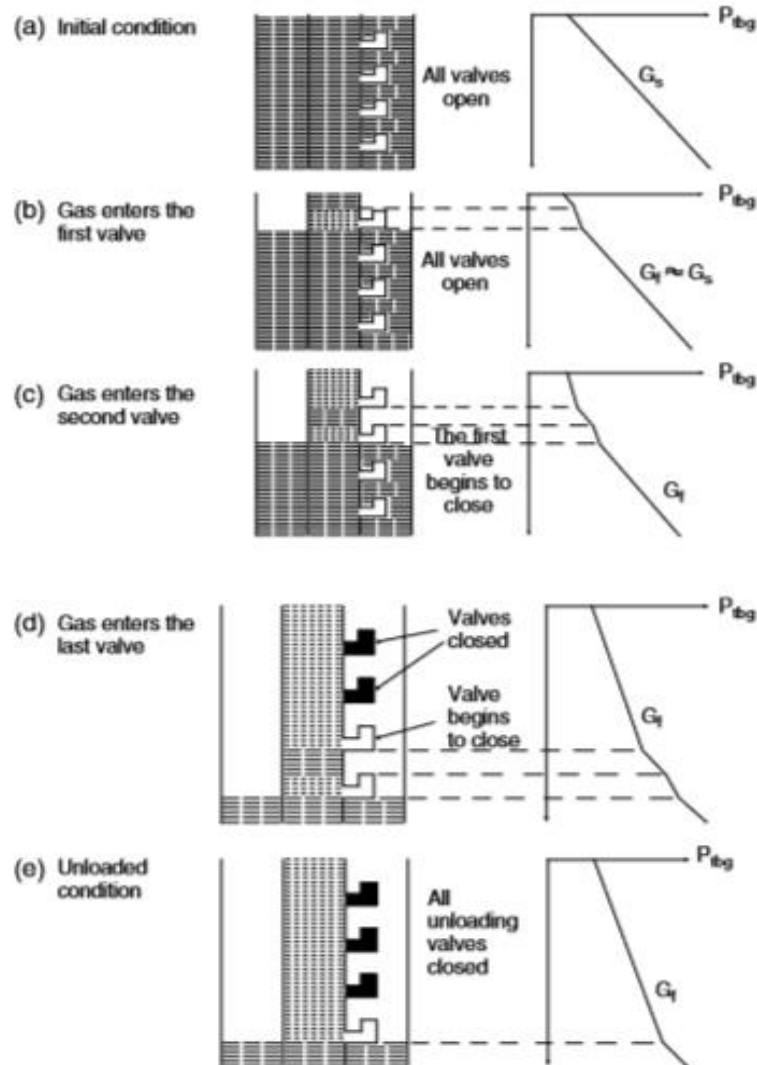
Σχήμα 4.10: Λειτουργία διακοπτόμενου gas lift (31) (Πηγή: petrowiki.org/)

Η διαδικασία παράγει τυπικά περίπου 2-5 bbls ανά κύκλο και με μια συχνότητα 1-3 κύκλων ανά ώρα. Το εύρος της βαλβίδας, δηλαδή η διαφορά πίεσης που χρειάζεται για να ανοίξει και να κλείσει, ελέγχει την ελάχιστη ποσότητα του αερίου που χρησιμοποιείται κατά τη διάρκεια κάθε κύκλου.

#### 4.4.7 Διαδικασία έγχυσης αερίου

Το σχήμα 4.11 παρουσιάζει αναλυτικά την διαδικασία έγχυσης αερίου. Συνήθως όλες οι βαλβίδες είναι ανοικτές στην αρχική κατάσταση όπου δεν υπάρχει έγχυση, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 4.11 a, λόγω υψηλών πιέσεων στην σωλήνωση. Όταν το αέριο εισέλθει μέσα από την πρώτη βαλβίδα, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.11 b, δημιουργεί θύλακες μίγματος αερίου-υγρού (slug) πάνω από αυτή, με μικρότερη πυκνότητα από την αρχική. Η διαστολή των θυλάκων αυτών ωθεί το υγρό που βρίσκεται από πάνω προς την επιφάνεια. Το φαινόμενο αυτό μπορεί επίσης να προκαλέσει μία οπισθοχώρηση των ρευστών του πυθμένα προς τον ταμιευτήρα εκτός και αν έχει εγκατασταθεί μία βαλβίδα ελέγχου που να το αποτρέπει. Ωστόσο, καθώς το μήκος του θύλακα αυξάνεται εξαιτίας της συνεχόμενης έγχυσης αερίου, η πίεση του πυθμένα της γεώτρησης αρχίζει να μειώνεται προκαλώντας εισροή ρευστών από τον ταμιευτήρα. Όταν η πίεση της παραγωγικής

στήλης στο ύψος της πρώτης βαλβίδας μειωθεί αρκετά, τότε αυτή θα κλείσει αναγκάζοντας το εγχέόμενο αέριο να περάσει από την δεύτερη βαλβίδα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.11 c.



Σχήμα 4.11: Αναπαράσταση διαδικασίας έγχυσης αερίου (32) (Guo, Lyons, Ghalambor - Petroleum Production Engineering)

Η έγχυση του αερίου από την δεύτερη βαλβίδα θα μειώσει περαιτέρω την πυκνότητα του ρευστού στην σωλήνωση, ανάμεσα στην πρώτη και την δεύτερη βαλβίδα. Το γεγονός αυτό θα μειώσει ακόμα περισσότερο την πίεση του πυθμένα της γεώτρησης και θα προκαλέσει μία μεγαλύτερη ροή από τον ταμιευτήρα. Η ίδια διαδικασία θα συνεχίζεται έως ότου το αέριο

εισέλθει τελικά από την κύρια βαλβίδα ή αλλιώς βαλβίδα λειτουργίας (operating valve) όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.11 d. Η βαλβίδα αυτή είναι η τελευταία, σε σειρά, στην παραγωγική στήλη και παραμένει συνεχόμενα ανοικτή. Στο συνεχές gas lift, όταν επιτευχθεί η ροή σταθερής κατάστασης από την έγχυση του αερίου, η βαλβίδα αυτή είναι η μόνη ανοικτή και σε λειτουργία.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5<sup>ο</sup>

### ΤΟ ΠΕΔΙΟ OILFIELD

#### 5.1 Εισαγωγή

Το πετρελαϊκό πεδίο OILFIELD, καλύπτει μια έκταση περίπου 6 τετραγωνικών χιλιομέτρων και σχηματίστηκε από μιας μεγάλης κλίμακας ρήγμα με κατεύθυνση από ΒΑ προς ΝΔ, κατά το Μειόκαινο. Ο ταμιευτήρας παράγει ένα ακόρεστο αργό πετρέλαιο, με μία πυκνότητα περίπου 27-30 βαθμούς API και υψηλή περιεκτικότητα σε θείο ( $H_2S$ ) και βρίσκεται στο ώριμο στάδιο της παραγωγής του.

Ο αρχικός σχεδιασμός του πεδίου μαζί με την διάνοιξη γεωτρήσεων περιχάραξης (delineation wells), περιελάμβανε την εγκατάσταση δύο πλατφορμών, Α και Β, την πλατφόρμα επεξεργασίας D και υποθαλάσσιους αγωγούς. Η υπεράκτια πλατφόρμα, περιλαμβάνει δύο γεωτρητικές πλατφόρμες, μια οκτάποδη πλατφόρμα επεξεργασίας, ένα flare (συσκευή καύσης αερίου) και τη διασύνδεση των γεφυρών. Το αργό πετρέλαιο διοχετεύεται στην ξηρά μέσω ενός, περίπου, 20 km μήκους αγωγού. Ο αγωγός είναι συνδεδεμένος με μια παράκτια εγκατάσταση επεξεργασίας πετρελαίου και φυσικού αερίου, όπου ανακτάται το αργό πετρέλαιο, τα συμπυκνώματα και το θείο, τα οποία σταθεροποιούνται και έπειτα πωλούνται.

Η παραγωγή κορυφώθηκε σε περισσότερα από 25 Mstb /day μέχρι τα μέσα του 1980, ενώ τα τελευταία χρόνια, η μείωση της ποσότητας του πετρελαίου έχει μετριαστεί. Καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του πεδίου οι ρυθμοί παραγωγής πετρελαίου έχουν μεταβληθεί λόγω της ύπαρξης ασφαλτενίων κοντά στο φρεάτιο της γεώτρησης και της συγκέντρωσης αλάτων, απαιτώντας συχνή συντήρηση με ξυλόλιο και ζεστό θαλασσινό νερό. Παρά το γεγονός ότι το πεδίο OILFIELD είναι ένα ώριμο πεδίο με παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων νερού, υπάρχει μεγάλο περιθώριο για περαιτέρω παραγωγή από την περιοχή, μέσω:

- Πλευρικών γεωτρήσεων (sidetracks) οι οποίες στοχεύουν το πετρέλαιο που βρίσκεται σε κοντινές αποστάσεις από τις ήδη υπάρχοντες.
- Αναδιαμόρφωση του φρεατίου της γεώτρησης (Recompletion) ή/και πρόσθετη διάτρηση των υφιστάμενων γεωτρήσεων με σκοπό την διάνοιξη νέων παραγωγικών ζωνών.
- Βελτιστοποίησης της διανομής του αερίου για το gas lift.
- Βελτιστοποίησης της έγχυσης νερού για την υποστήριξη της πίεσης και τη βελτίωση των πιέσεων του ταμιευτήρα.



- Εγκατάστασης ηλεκτρικών υποβρύχιων αντλιών σε φρεάτια με χαμηλές πιέσεις ταμιευτήρα.
- Έγχυσης χημικών για να ελαχιστοποιηθούν οι επικαθήσεις ασφαλτενίων.

## **5.2 Περιγραφή Ταμιευτήρα**

### **5.2.1 Γεωλογία**

Όπως αναφέρθηκε, το πεδίο OILFIELD σχηματίστηκε από δύο μεγάλης κλίμακας ρήγματα με ΝΑ και ΒΑ κατεύθυνση, κατά το Μειόκαινο. Οι σχέσεις έντονων και συνδυαστικών τεκτονικών κινήσεων, ταχύτητας κλαστικής ιζηματογένεσης και παλαιο-κλιματικών συνθηκών, πριν και μετά το «Μεσσήνιο Συμβάν», οδήγησαν όχι μόνο στη δημιουργία, αλλά και στην ωρίμανση και παγίδευση υδρογονανθράκων σε εκμεταλλεύσιμες ποσότητες.

Η ιζηματογένεση στην περιοχή του του πεδίου OILFIELD ξεκίνησε με χερσαίες αποθέσεις του Μέσου Μειόκαινου και συνεχίστηκε με λιμνοθάλασσα και θαλάσσια ιζήματα. Λόγω της ύπαρξης ενεργών πρηνών μεγάλης γωνίας κλίσης, έλαβαν χώρα φαινόμενα βαρυτικών ροών και ανάπτυξης τουρβιδιτών. Η σταθερή παροχή ιζημάτων, υποβοηθούμενη από την ενεργό τεκτονική, οδήγησε στη δημιουργία ιζηματογενούς ακολουθίας, περίπου, 6000 μέτρων πάχους. Στα πρώτα στάδια της ιζηματογένεσης η λεκάνη ήταν ανοικτή στο νότο προς τη θάλασσα. Βαθμιαία άρχισε να δημιουργείται μία υποθαλάσσια ράχη, δημιουργώντας έναν περιορισμό στην ανοικτή θάλασσα και μετασχηματίζοντας τη λεκάνη σε λιμνοθάλασσα κατά το Μεσσήνιο.

### **5.2.2 Δομή Ταμιευτήρα**

Τα αποδεδειγμένα αποθέματα του του πεδίου OILFIELD εμφανίστηκαν στην Προ-εβαποριτική ακολουθία. Το πεδίο, το οποίο παρουσιάζεται παρακάτω, αποτελείται από ένα ρήγμα το οποίο βρίσκεται στην νότια προς τα κάτω πλευρά του μεγάλου ΒΒΔ - ΝΝΑ ρήματος. Η τουρβιτιτική ακολουθία έχει πάχος από 300 έως 350 m και έχει υποδιαιρεθεί σε τρεις ζώνες, την Α, Β και Γ. Η ζώνη Α έχει χωριστεί περαιτέρω σε Α1 και Α2 και περιλαμβάνει την κύρια πετρελαιοφόρα περιοχή.

## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6<sup>ο</sup>**

### **ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ ΣΤΟ PROSPER**

#### **6.1 Το PROSPER**

Το PROSPER είναι ένα λογισμικό αριστοποίησης της παραγωγής και της απόδοσης ενός πετρελαϊκού συστήματος και αποτελεί ένα από τα προγράμματα της σουίτας της εταιρείας Petroleum Experts. Είναι το βιομηχανικό πρότυπο για την μοντελοποίηση της διαχείρισης της συντριπτικής πλειοψηφίας των κοιτασμάτων υδρογονανθράκων παγκοσμίως. Είναι σχεδιασμένο έτσι ώστε να δημιουργεί αξιόπιστα μοντέλα γεωτρήσεων όλων των τύπων καθώς και μεθόδων υποβοήθησης της παραγωγής, λαμβάνοντας υπ' όψη τα φυσικοχημικά και θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά του ρευστού (PVT characterization), τον εξοπλισμό και την γεωμετρία της γεώτρησης και την ροή στον ταμιευτήρα (IPR) αλλά και στις σωληνώσεις (VLP).

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει μία λεπτομερής καταγραφή της ανάπτυξης των μοντέλων για όλες τις γεωτρήσεις του πεδίου OILFIELD με τα διαθέσιμα δεδομένα για τα PVT χαρακτηριστικά των ρευστών και τα δεδομένα από μετρήσεις του ταμιευτήρα και της γεώτρησης.

#### **6.2 Προσέγγιση του PROSPER και Ανάλυση Συστήματος**

Για να λειτουργήσει το PROSPER πρέπει πρώτα να αναπτυχθεί ένα μοντέλο για την ισορροπία των φάσεων (PVT - Pressure Volume Temperature) των ρευστών του ταμιευτήρα, το οποίο αναπτύσσεται εισάγοντας δεδομένα από εργαστηριακές δοκιμές, συνήθως στιγμιαίας εκτόνωσης (flash expansion process), και συγκρίνεται με συσχετίσεις για τη βελτίωση της ακρίβειας. Τα πρότυπα αυτά, είναι κάποιες συσχετίσεις (correlations) για το black oil, όπως των Glaso, Standing, Lasater κ.α. Όταν ένα πετρέλαιο είναι φτωχό σε πτητικά συστατικά τότε περιέχει σε μικρές ποσότητες αέριο εν διαλύσει και το σημείο φυσαλίδας του είναι χαμηλό. Ένα τέτοιο ρευστό καλείται το black oil.

Εφόσον, όπως έχει αναφερθεί, το δυναμικό της γεώτρησης και οι απώλειες πίεσης από την παραγωγή των υδρογονανθράκων, εξαρτώνται και από τις PVT ιδιότητες του ρευστού, η ακρίβεια της ανάλυσης του συστήματος είναι εξαρτημένη από την ακρίβεια των τιμών των ιδιοτήτων του ρευστού.

Για να μπορέσει το PROSPER να υπολογίσει και να αναπαραστήσει την καμπύλη VLP, χωρίζει τη συνολική απώλεια πίεσης που προκύπτει από την παραγωγή, σε απώλεια πίεσης λόγω τριβής και απώλεια πίεσης λόγω βαρύτητας. Η VLP εξαρτάται άμεσα από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της γεώτρησης, από την κλίση της, από τα μηχανικά εξαρτήματα που περιέχει όπως για παράδειγμα βαλβίδες ή περιορισμούς ροής, από την γεωθερμική βαθμίδα και από την μέση θερμοχωρητικότητα των ρευστών που παράγονται προς την επιφάνεια. Οποιαδήποτε μεταβολή των στοιχείων αυτών μπορεί να αλλάξει σημαντικά την καμπύλη VLP. Όσον αφορά τον σχεδιασμό της καμπύλης IPR, η οποία εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του ταμιευτήρα, το PROSPER χρησιμοποιεί τα μοντέλα-εξισώσεις περιγραφής του ταμιευτήρα όπως για παράδειγμα αυτό του Darcy, του Vogel ή του PI. Η διαφορά του Darcy με το PI είναι ότι το πρώτο προϋποθέτει την εισαγωγή των χαρακτηριστικών του ταμιευτήρα (διαπερατότητα, πάχος, επιδερμικός συντελεστής κ.α.) και υπολογίζει το PI, ενώ στο δεύτερο εισέρχεται κατευθείαν η τιμή του, εάν είναι γνωστή, παρακάμπτοντας τα χαρακτηριστικά του ταμιευτήρα. Με αυτά, το PROSPER είναι σε θέση να υπολογίσει και να σχεδιάσει την καμπύλη IPR αλλά και να υπολογίσει με ακρίβεια την τιμή της AOF.

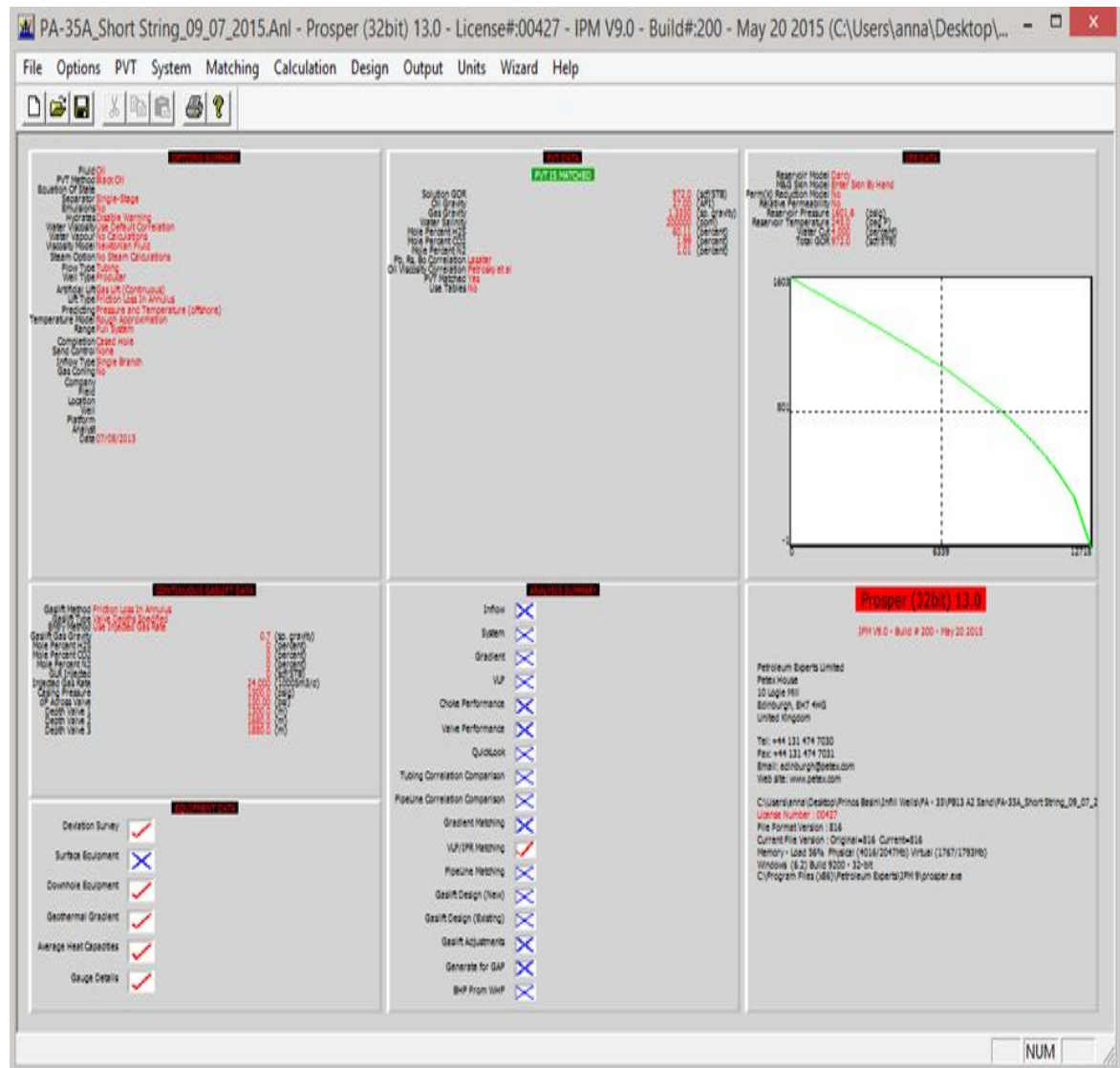
Μετά από τον σχεδιασμό των δύο βασικών καμπυλών IPR και VLP, το PROSPER θα πρέπει να επιβεβαιώσει ότι οι υπολογισμοί του είναι ακριβείς. Όταν δοθούν επαρκή και ακριβή στοιχεία του πεδίου από τεστ παραγωγής, το PROSPER προσαρμόζει τις διάφορες συσχετίσεις που χρησιμοποιεί και που θα αναλυθούν στα επόμενα υπό-κεφάλαια, επί τη βάση των δεδομένων αυτών (matching). Με τον τρόπο αυτό αναπτύσσονται αξιόπιστα μοντέλα τα οποία στην συνέχεια χρησιμοποιούνται για την βελτιστοποίηση του παραγωγικού συστήματος.

### **6.3 Προετοιμασία γεώτρησης**

Ο σχεδιασμός των γεωτρήσεων που αναπτύχθηκαν με σκοπό την αριστοποίηση της παραγωγής, πραγματοποιήθηκε από το PROSPER και αφορά τις γεωτρήσεις από το πεδίο OILFIELD, οι οποίες είναι: A-1, A-2, A-3, A-4, A-5 και A-6 από το Α Πεδίο και B-1, B-2, B-3, B-4, B-5, B-6 και B-7 από το Β Πεδίο.

### 6.3.1 Κύριο μενού PROSPER

Τα μοντέλα που δημιουργήθηκαν σε αυτό το έργο, αναπτύχθηκαν δουλεύοντας από τα αριστερά προς τα δεξιά στην κύρια οθόνη του PROSPER, η οποία φαίνεται στο Σχήμα 6.1:



Σχήμα 6.1: Μενού και επιλογές στην αρχική οθόνη του PROSPER (33) (πηγή: PROSPER manual)

Αυτή η σειρά επιλογών (αριστερά προς δεξιά) υποδεικνύει τη ροή εργασίας που πρέπει να ακολουθηθεί για να αναπτυχθεί το μοντέλο της γεώτρησης. Τα πρώτα πέντε τμήματα είναι οθόνες εισόδου δεδομένων και η τελευταία ενότητα αναφέρεται στους υπολογισμούς και τον σχεδιασμό.

### 6.3.2 Μενού επιλογών (option summary)

Το μενού επιλογών χρησιμοποιείται για να ορίσει τα βασικά χαρακτηριστικά της γεώτρησης. Στη παρούσα διπλωματική εργασία, χρησιμοποιήθηκαν οι παρακάτω επιλογές (Σχήμα 6.2) για τον καθορισμό των μοντέλων του ταμιευτήρα και όλων των γεωτρήσεων:

- **Fluid:** Η επιλογή αυτή δίνει την δυνατότητα να προσδιοριστεί το είδος του ρευστού του ταμιευτήρα: Oil and Water, Dry and Wet Gas και Retrograde Condensate. Επιλογή που υιοθετήθηκε: Oil and Water.
- **Method:** Η επιλογή αυτή χρησιμοποιεί βιομηχανικά πρότυπα μοντέλα-εξισώσεις (έξι διαθέσιμα από το PROSPER) για το black oil. Επιλογή που υιοθετήθηκε: Black Oil.
- **Separator:** Αυτή η επιλογή χρησιμοποιείται διότι η διαδρομή που θα ακολουθήσει το παραγόμενο ρευστό στην επιφάνεια, θα καθορίσει και ορισμένες ιδιότητές του όπως το GOR (αναλογία αερίου-υγρού), το Bo και την πυκνότητα του υγρού και του αερίου. Επιλογή που υιοθετήθηκε: Single-Stage Separator.
- **PVT Warnings:** Η επιλογή αυτή δίνει την δυνατότητα στο PROSPER να μοντελοποιεί οποιαδήποτε ετερογενή ισορροπία των ρευστών, όπως δημιουργία ιδρυτών, ασφατενίων, αλάτων κ.α. Επιλογή που υιοθετήθηκε: Disable Warning.
- **Water Viscosity:** Όταν χρησιμοποιείται η προεπιλεγμένη συσχέτιση, το ιξώδες του νερού εξαρτάται από την αλατότητα και την θερμοκρασία. Όταν χρησιμοποιείται η συσχέτιση με διόρθωση της πίεσης, το ιξώδες του νερού θα εξαρτάται και από την πίεση. Επιλογή που υιοθετήθηκε: Use default correlation.
- **Viscosity Model:** Από προεπιλογή, το μοντέλο του ρευστού από το PROSPER θεωρείται πως είναι Νευτώνειο. Αν είναι επιθυμητό και απαραίτητο, τα μη Νευτώνεια ρευστά μπορούν να μοντελοποιηθούν με την χρήση της επιλογής 'Non Newtonian' και με την εισαγωγή των ρεολογικών χαρακτηριστικών του ρευστού. Επιλογή που υιοθετήθηκε: Newtonian Fluid.
- **Flow Type:** Η επιλογή αυτή μοντελοποιεί την ροή μέσω της διατομής της παραγωγικής σωλήνωσης (Tubing Flow) ή την ροή στον δακτύλιο (Annular Flow) ή την ροή στην σωλήνωση και στον δακτύλιο μαζί. Επιλογή που υιοθετήθηκε: Tubing Flow.
- **Well Type:** Οι επιλογές που περιέχονται είναι οι παραγωγικές γεωτρήσεις (Producer), γεωτρήσεις εισπίεσης (αέριο, ατμός, νερό και  $CO_2$ ) (Injection) και γεωτρήσεις εισπίεσης νερού (εισπίεση μονοφασικού νερού) (Water Injection). Επιλογή που υιοθετήθηκε: Producer.

- Artificial Lift Method: Η επιλογή αυτή δίνει την δυνατότητα εισαγωγής του είδους του μηχανισμού υποβοήθησης της παραγωγής που χρησιμοποιείται ήδη στη γεώτρηση ή που θα μοντελοποιηθεί εκ νέου για παραγωγικές γεωτρήσεις. Περιλαμβάνει όλους τους διαθέσιμους τεχνητούς μηχανισμούς. Επιλογή που υιοθετήθηκε: Gas Lift (Continuous).
- Type: Η επιλογή αυτή λαμβάνεται υπ' όψη, ή όχι, την πτώση πίεσης λόγω τριβής στον δακτύλιο. Επιλογή που υιοθετήθηκε: Friction Loss in Annulus.
- Predict: Η επιλογή αυτή θα υπολογίσει τα προφίλ των πιέσεων και των θερμοκρασιών της γεώτρησης, ανάλογα αν αυτή βρίσκεται υπεράκτια (offshore) ή στην στεριά (onshore). Επιλογή που υιοθετήθηκε: Pressure and Temperature (offshore).
- Temperature Model: Η επιλογή που υιοθετήθηκε είναι το Rough Approximation. Η επιλογή αυτή υπολογίζει τις απώλειες θερμότητας από την γεώτρηση προς το περιβάλλον χρησιμοποιώντας ένα μέσο συντελεστή μεταφοράς θερμότητας, τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ των ρευστών και του περιβάλλοντος σχηματισμού και της μέσης θερμοχωρητικότητας των ρευστών. Οι άλλες επιλογές είναι η Enthalpy Balance και η Improved Approximation.
- Range: Η επιλογή που υιοθετήθηκε είναι το Full System. Η επιλογή αυτή λαμβάνει υπ' όψη για τους υπολογισμούς ολόκληρου του συστήματος (σωληνώσεις, παραγωγική στήλη και ταμιευτήρα). Η άλλη επιλογή είναι η Pipeline Only η οποία λαμβάνει υπ' όψη μόνο τις σωληνώσεις.
- Well Completion: Αυτή η επιλογή αναφέρεται στο αν η γεώτρηση είναι ανοικτή ή σωληνωμένη. Επιλογή που υιοθετήθηκε: Cased hole.
- Sand Control: Η επιλογή αυτή δίνει την δυνατότητα στο PROSPER να λάβει υπ' όψη κάποιο εξάρτημα της συμπλήρωσης (completion) της γεώτρησης, εάν υπάρχει, το οποίο εμποδίζει την εισροή ανόργανων συστατικών (π.χ. gravel). Επιλογή που υιοθετήθηκε: None.
- Inflow Type: Η επιλογή αυτή δίνει την δυνατότητα προσδιορισμού της εισροής του ρευστού μέσα στο φρεάτιο της γεώτρησης, δηλαδή αν εισέρχεται από μία παραγωγική ζώνη ή πολλές. Επιλογή που υιοθετήθηκε: Single Branch.
- Gas Coning: Η επιλογή αυτή αναφέρεται στο αν υπάρχει διείσδυση αερίου στα διατρήματα των παραγωγικών ζωνών το οποίο μειώνει την παραγωγή πετρελαίου. Επιλογή που υιοθετήθηκε: No.

System Summary (PA - 8.Out)

Done Cancel Report Export Help Datestamp

Fluid Description		Calculation Type	
Fluid	Oil and Water	Predict	Pressure and Temperature (offshore)
Method	Black Oil	Model	Rough Approximation
		Range	Full System
Separator	Single-Stage Separator		
Emulsions	No		
PVT Warnings	Disable Warning		
Water Viscosity	Use Default Correlation		
Viscosity Model	Newtonian Fluid		
Well		Well Completion	
Flow Type	Tubing Flow	Type	Cased Hole
Well Type	Producer	Sand Control	None
Artificial Lift		Reservoir	
Method	Gas Lift (Continuous)	Inflow Type	Single Branch
Type	Friction Loss In Annulus	Gas Coning	No
User information		Comments (Cntl-Enter for new line)	
Company			
Field			
Location			
Well			
Platform			
Analyst			
Date	Saturday , July 11, 2015		

Σχήμα 6.2: Περίληψη συστήματος, εικόνα από την γεώτρηση PA-8 (34) (πηγή: PROSPER)

### 6.3.3 Δεδομένα PVT

Για την πρόβλεψη της αλλαγής της πίεσης και της θερμοκρασίας του ταμειυτήρα, κατά μήκος της παραγωγικής στήλης, είναι απαραίτητο να έχουν μοντελοποιηθεί με ακρίβεια οι ιδιότητες του ρευστού σαν συνάρτηση της πίεσης και της θερμοκρασίας. Στην παρούσα εργασία, εισήχθη ένα πλήρες σετ δεδομένων PVT για να περιγράψει τις ιδιότητες του ρευστού. Τα δεδομένα που θα εισαχθούν, όπως το GOR, η πυκνότητα API, η πυκνότητα του αερίου και η αλατότητα του νερού, χρησιμοποιούνται σαν δεδομένα όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.3.

<input type="button" value="Done"/> <input type="button" value="Cancel"/> <input type="button" value="Tables"/> <input type="button" value="Match Data"/> <input type="button" value="Matching"/> <input type="button" value="Correlations"/> <input type="button" value="Calculate"/> <input type="button" value="Save"/> <input type="button" value="Import"/> <input type="button" value="Composition"/> <input type="button" value="Help"/>																									
<input type="checkbox"/> Use Tables				<input type="button" value="Export"/>																					
<b>Input Parameters</b> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="text-align: right;">Solution GOR</td> <td style="text-align: center;">649</td> <td style="text-align: left;">scf/STB</td> </tr> <tr> <td style="text-align: right;">Oil Gravity</td> <td style="text-align: center;">25.3</td> <td style="text-align: left;">API</td> </tr> <tr> <td style="text-align: right;">Gas Gravity</td> <td style="text-align: center;">1.332</td> <td style="text-align: left;">sp. gravity</td> </tr> <tr> <td style="text-align: right;">Water Salinity</td> <td style="text-align: center;">36000</td> <td style="text-align: left;">ppm</td> </tr> </table>						Solution GOR	649	scf/STB	Oil Gravity	25.3	API	Gas Gravity	1.332	sp. gravity	Water Salinity	36000	ppm	<b>Correlations</b> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="text-align: right;">Pb, Rs, Bo</td> <td style="text-align: left;">Al-Marhoun</td> </tr> <tr> <td style="text-align: right;">Oil Viscosity</td> <td style="text-align: left;">Beal et al</td> </tr> </table>				Pb, Rs, Bo	Al-Marhoun	Oil Viscosity	Beal et al
Solution GOR	649	scf/STB																							
Oil Gravity	25.3	API																							
Gas Gravity	1.332	sp. gravity																							
Water Salinity	36000	ppm																							
Pb, Rs, Bo	Al-Marhoun																								
Oil Viscosity	Beal et al																								
<b>Impurities</b> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="text-align: right;">Mole Percent H2S</td> <td style="text-align: center;">66.5</td> <td style="text-align: left;">percent</td> </tr> <tr> <td style="text-align: right;">Mole Percent CO2</td> <td style="text-align: center;">3.45</td> <td style="text-align: left;">percent</td> </tr> <tr> <td style="text-align: right;">Mole Percent N2</td> <td style="text-align: center;">0.76</td> <td style="text-align: left;">percent</td> </tr> </table>						Mole Percent H2S	66.5	percent	Mole Percent CO2	3.45	percent	Mole Percent N2	0.76	percent											
Mole Percent H2S	66.5	percent																							
Mole Percent CO2	3.45	percent																							
Mole Percent N2	0.76	percent																							

*Σχήμα 6.3: Οθόνη δεδομένων PVT (35) (πηγή: PROSPER manual)*

Τα δεδομένα αυτά περιγράφουν την θερμοδυναμική συμπεριφορά του ρευστού του ταμιευτήρα. Στην πραγματικότητα, το ρευστό αντιμετωπίζεται σαν μίγμα δύο συστατικών STO (Stock Tank Oil) και STG (Stock Tank Gas), ενώ το GOR υποδηλώνει την αναλογία του κάθε συστατικού στο ρευστό του ταμιευτήρα σε κάθε πίεση. Τα μόρια % των H<sub>2</sub>S, CO<sub>2</sub> και N<sub>2</sub>, αναφέρονται στην σύνθεση του αερίου του διαχωριστήρα και όχι του ταμιευτήρα.

Τα διαθέσιμα δεδομένα PVT (Πίνακας 6.1) προέρχονται από εργαστηριακές δοκιμές στιγμιαίας εκτόνωσης (flash expansion process) του ρευστού του ταμιευτήρα. Το πεδίο OILFIELD αποτελείται από τέσσερις διαφορετικές παραγωγικές ζώνες (A1, A2, B και C). Στις τρέχουσες συνθήκες, το ρευστό του ταμιευτήρα είναι μονοφασικό καθώς η πίεση του πεδίου είναι ακόμα κάτω από την πίεση κορεσμού (Pb).



Πίνακας 6.1: Εισαγωγή Δεδομένων PVT από το πεδίο OILFIELD (1)

	PVT A1	PVT A2	PVT B	PVT C
<b>GOR</b>	649	685	667	691
<b>Oil gravity (° API)</b>	25.3	27	28.3	28
<b>Gas gravity (sp. Gravity)</b>	1.332	1.335	1.440	1.357
<b>Water salinity (ppm)</b>	Εξαρτάται από την κάθε γεώτρηση			
<b>Mole% H<sub>2</sub>S</b>	66.50	60.11	33.89	41.69
<b>Mole% CO<sub>2</sub></b>	3.45	1.99	1.42	1.60
<b>Mole% N<sub>2</sub></b>	0.76	1.01	1.13	0.07
<b>Tres (°F)</b>	245	245	245	245
<b>Pb@Tres (psig)</b>	1175	1317	1910	2045
<b>Bo</b>	1.448	1.487	1.460	1.444
<b>μ@Pb (cP)</b>	0.74	0.55	0.50	0.51

Το επόμενο στάδιο είναι να προσαρμοστούν (matching) οι εξισώσεις του PROSPER για το black oil με τα παραπάνω δεδομένα πεδίου, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6.4. Ένα μοναδικό μόνο σημείο είναι διαθέσιμο για την ρύθμιση και αυτό είναι στο σημείο κορεσμού (Pb).

Σχήμα 6.4: Οθόνη δεδομένων για τις συσχετίσεις του PROSPER (36) (πηγή: PROSPER manual)

Πολλοί ερευνητές έχουν αναπτύξει διάφορες εξισώσεις για το μοντέλο black oil, με στόχο την πρόβλεψη του σημείου κορεσμού (Pb), του ογκομετρικού συντελεστή σχηματισμού υγρής φάσεως (Bo), του GOR και του ιξώδους, βασισμένοι σε πειραματικά δεδομένα διαφόρων μιγμάτων αργού πετρελαίου και φυσικού αερίου. Το PROSPER έχει αρκετές τέτοιες ενσωματωμένες συσχετίσεις, για τους υπολογισμούς των προαναφερθέντων ιδιοτήτων. Πιο συγκεκριμένα, για τον υπολογισμό των Pb, Bo και GOR, το PROSPER περιέχει τις παρακάτω συσχετίσεις, από τις οποίες επιλέγεται αυτή που θα έχει την μικρότερη απόκλιση από τα δεδομένα PVT:

- Glaso
- Standing
- Lasater
- Vasquez and Beggs
- Petrosky et al
- Al-Marhoun

Αντίστοιχα, για τους υπολογισμούς του ιξώδους, οι συσχετίσεις που περιέχει το PROSPER είναι:

- Beal et al
- Beggs et al
- Petrosky et al
- Egbogah et al
- Bergman and Sutton

Μετά την παροχή του συνόλου των διαθέσιμων δεδομένων, το λογισμικό PVT προχωράει στη διαδικασία προσαρμογής των συσχετίσεων με τα δεδομένα. Το PROSPER εκτελεί μη γραμμική παλινδρόμηση, η οποία προσαρμόζει τις διάφορες συσχετίσεις (correlations) που έχει το πρόγραμμα με τα δεδομένα. Η τεχνική της μη γραμμικής παλινδρόμησης που χρησιμοποιείται, εφαρμόζει στις συσχετίσεις, έναν πολλαπλασιαστή (Parameter 1) και έναν μετατοπιστή (Parameter 2), όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.5. Μετά την διαδικασία αυτή και αφού γίνει η υπόδειξη της καλύτερης συσχέτισης, εμφανίζεται η οθόνη (Σχήμα 6.6) που περιέχει την τυπική απόκλιση η οποία αντιπροσωπεύει την συνολική απόκλιση των υπολογισμών από τις συσχετίσεις.

Done Cancel Main Export Report Reset All Help Pb, Rs, Bo Glaso Uo Beggs et al

**Bubble Point**

	Glaso	Standing	Lasater	Vazquez-Beggs	Petrosky et al	Al-Marhoun
Parameter 1	1.01391	1.04638	1.16985	0.95336	0.99061	0.98053
Parameter 2	30.3198	95.0523	283.523	-115.332	-21.4443	-45.4022
Std Deviation						
	Reset	Reset	Reset	Reset	Reset	Reset

**Solution GOR**

	Glaso	Standing	Lasater	Vazquez-Beggs	Petrosky et al	Al-Marhoun
Parameter 1	0.99115	0.91161	0.76333	1.12748	1.3987	1.05894
Parameter 2	-11.3702	-6.24889	-0.15231	-2.02712	-182.715	-0.94316
Std Deviation	0.070725				0.70725	0.070799
	Reset	Reset	Reset	Reset	Reset	Reset

**Oil FVF**

	Glaso	Standing	Lasater	Vazquez-Beggs	Petrosky et al	Al-Marhoun
Parameter 1	1.07074	0.9229	0.92296	0.9111	0.94192	0.89837
Parameter 2	-0.076031	0.075615	0.07554	0.087593	0.043969	0.094896
Parameter 3	1	1	1	1	1	1
Parameter 4	1e-8	1e-8	1e-8	1e-8	1e-8	1e-8
Std Deviation						
	Reset	Reset	Reset	Reset	Reset	Reset

**Oil Viscosity**

	Beal et al	Beggs et al	Petrosky et al	Egbogah et al	Bergman-Sutton
Parameter 1	1.13339	1.03086	0.96039	0.63209	1.35946
Parameter 2	0.043177	0.011917	-0.017637	-0.56802	0.085757
Std Deviation				0.000789	
	Reset	Reset	Reset	Reset	Reset

Σχήμα 6.5: Οι παράμετροι 1 και 2 για όλες τις συσχετίσεις του μοντέλου black oil (37) (πηγή: PROSPER manual)

**PVT - Matching (untitled) (Oil - Black Oil matched)**

Done Main Match Match All Parameters Plot Help

**Match On**

All/None

☐ Bubble Point

☐ Gas Oil Ratio

☐ Oil FVF

(Above Bubble Point)

☐ Oil Viscosity

**Match Statistics**

Standard Deviation	Parameter 1	Parameter 2
34.4818	0.93339	289.08
4.77627	0.97802	-12.2216
	0.99752	-0.0024899
	1	26.6653
	1.03542	0.0095939

**Correlations**

Pb, Rs, Bo

Glaso

Oil Viscosity

Beal et al

Σχήμα 6.6: Τυπική απόκλιση των παραμέτρων (38) (πηγή: PROSPER manual)

Όσο χαμηλότερη είναι η τυπική απόκλιση, τόσο καλύτερη είναι η ρύθμιση των δεδομένων με τις συσχετίσεις. Ως καλύτερη συσχέτιση θεωρείται εκείνη με την παράμετρο 1 πιο κοντά στην τιμή 1 και την παράμετρο 2 πιο κοντά στην τιμή 0.

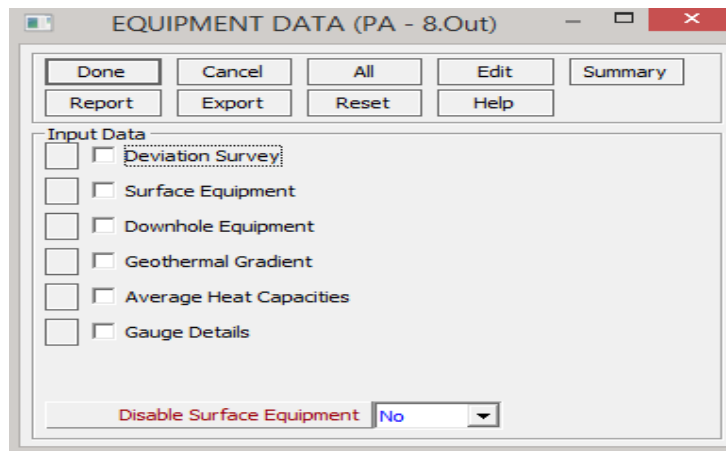
#### **6.3.4 Δεδομένα γεώτρησης και εξοπλισμού**

Οι γεωτρήσεις του πεδίου OILFIELD είναι τυπικές κεκλιμένες γεωτρήσεις (build and hold). Το βάθος καθώς και ο σχεδιασμός της ολοκλήρωσης των γεωτρήσεων είναι διαφορετικά για την κάθε μία. Το βάθος κυμαίνεται από 2,500 έως 3,500 μέτρα και ο σχεδιασμός της συμπλήρωσης (completion) της κάθε γεώτρησης περιλαμβάνει, με μικρές διαφορές στην τοποθέτηση και τα βάθη, μία παραγωγική στήλη 3 ½ in από την επιφάνεια της γεώτρησης έως ένα συγκεκριμένο βάθος ακολουθούμενη από άλλη μία μικρότερη της τάξης των 2 7/8 in μέχρι το βάθος των διατηρημάτων, ενώ το casing ξεκινάει από 18 5/3 in και καταλήγει σε 7 ή 5 in. Κάθε γεώτρηση περιλαμβάνει βαλβίδες ασφαλείας (SSSV), βαλβίδες έγχυσης αερίου gas lift, τμήματα περιορισμού της ροής (nipples) και τη συσκευή απομόνωσης της παραγωγικής στήλης από τον δακτύλιο (packer).

Το PROSPER περιέχει μία ξεχωριστή ενότητα για την περιγραφή του εξοπλισμού της γεώτρησης, της κλίσης της, της γεωθερμικής βαθμίδας και των θερμοχωρητικοτήτων των ρευστών, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.7. Τα δεδομένα που απαιτούνται για την κλίση της γεώτρησης (deviation survey) περιλαμβάνουν το πραγματικό και το κάθετο βάθος της γεώτρησης, από τα οποία το PROSPER υπολογίζει την γωνία απόκλισης της γεώτρησης από το κάθετο επίπεδο. Μία σωστή έρευνα απόκλισης είναι απαραίτητη για να υπολογιστεί με ακρίβεια η καμπύλη VLP. Το πραγματικό κάθετο βάθος (TVD) της γεώτρησης είναι απαραίτητο για τον υπολογισμό της πτώσης πίεσης εξαιτίας της βαρύτητας, δεδομένου ότι εξαρτάται μόνο από τις αλλαγές στην ανύψωση του ρευστού και στην πυκνότητά του. Από την άλλη πλευρά, η πτώση πίεσης λόγω τριβής και τα προφίλ θερμοκρασιών με το βάθος, εξαρτώνται από το μετρούμενο βάθος (MD). Για το λόγο αυτό, ο υπόγειος εξοπλισμός τοποθετείται στην παραγωγική στήλη με τα πραγματικά τους βάθη.

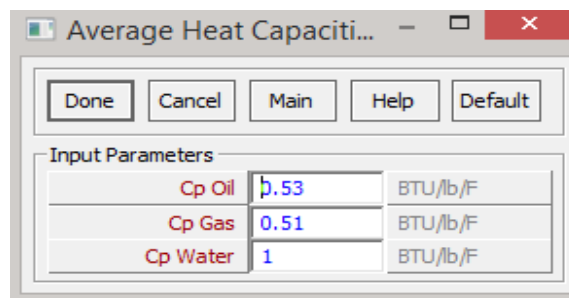
Στον επιφανειακό εξοπλισμό (Surface Equipment) εισάγονται δεδομένα για το μέγεθος και τη διάμετρο όλων των επιφανειακών στοιχείων όπως για παράδειγμα αγωγών, βαλβίδων κ.α. Ο υπόγειος εξοπλισμός από την άλλη μεριά περιλαμβάνει όλα τα τμήματα που απαρτίζουν την γεώτρηση όπως οι σωληνώσεις, casing, βαλβίδες ασφαλείας, βαλβίδες

έγχυσης αερίου gas lift, συσκευές περιορισμού ροής κ.α. μαζί με τα μήκη τους, τις διατομές τους και το βάθος που έχουν τοποθετηθεί.



Σχήμα 6.7: Περιγραφή γεώτρησης (39) (πηγή: PROSPER manual)

Οι τιμές της μέσης θερμοχωρητικότητας των ρευστών επιλέγονται αυτόματα από το PROSPER όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.8 και η γεωθερμική βαθμίδα υπολογίζεται από το βάθος και τη θερμοκρασία της γεώτρησης.



Σχήμα 6.8: Μέσος όρος θερμοχωρητικότητας πετρελαίου, αερίου και (40) νερού (πηγή: PROSPER manual)

Η θερμοκρασία του σχηματισμού σε οποιοδήποτε βάθος μπορεί να υπολογιστεί από το PROSPER μέσω της γεωθερμικής βαθμίδας. Μία πρόχειρη προσέγγιση του θερμοκρασιακού προφίλ μπορεί να επιτευχθεί με την εισαγωγή των γνωστών τιμών της θερμοκρασίας του

ταμιευτήρα και της επιφάνειας (60°F) και του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας. Το βάθος στο οποίο μετριέται η κάθε θερμοκρασία μπορεί να εισαχθεί σαν το πραγματικό βάθος (MD) ή σαν το πραγματικό κάθετο βάθος (TVD). Έπειτα, το PROSPER παρεμβάλει γραμμικά όλα τα σημεία που δίνονται από τον χρήστη (Σχήμα 6.9) και μοντελοποιεί την κατανομή της θερμοκρασίας του σχηματισμού στα διάφορα βάθη.

Point	Formation TVD (feet)	Formation Measured Depth (feet)	Formation Temperature (deg F)
1	0	0	60
2	600	600	40
3	9000	9275	210
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			
13			
14			
15			
16			
17			
18			
19			
20			

Σχήμα 6.9: Μοντελοποίηση της κατανομής της θερμοκρασίας του σχηματισμού στα διάφορα βάθη (41) (πηγή: PROSPER manual)

### 6.3.5 Δεδομένα gas lift

Τα δεδομένα του υφιστάμενου σχεδιασμού gas lift που θα πρέπει να εισαχθούν δίνονται στον παρακάτω Πίνακα 6.2 και είναι τα ίδια για όλες τις γεωτρήσεις. Η ποσότητα του εγγεόμενου αερίου gas lift, το βάθος τοποθέτησης της βαλβίδας έγχυσης καθώς και η πίεση έγχυσης παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.3 για την κάθε γεώτρηση ξεχωριστά. Τα δεδομένα αυτά δεν

αποτελούν την τελική βελτιστοποίηση του συστήματος αλλά είναι τα αρχικά δεδομένα τα οποία θα τροποποιηθούν αργότερα από το GAP.

Πίνακας 6.2: Υφιστάμενα δεδομένα αερίου gas lift (2)

Δεδομένα αερίου gas lift	
<b>Gas Lift Gas Gravity (sp. Gravity)</b>	0.7
<b>Mole % H2S</b>	0
<b>Mole % CO2</b>	0
<b>Mole % N2</b>	0
<b>Dp across valve (psig)</b>	150

Πίνακας 6.3: Δεδομένα gas lift για την κάθε γεώτρηση (3)

Γεώτρηση	Εγγεόμενο αέριο (m <sup>3</sup> /d)	Βάθος (m) (operating valve)	Πίεση casing (psig)
<b>A-1</b>	7720	1401.45	1450
<b>A-2</b>	17880	2253.27	1220
<b>A-3</b>	20000	2100.60	1500
<b>A-4</b>	24720	1722	1500
<b>B-1</b>	7320	1705	1750
<b>B-2</b>	20190	2098	1190
<b>B-3</b>	10770	1399	920
<b>B-4</b>	20840	1007	970
<b>B-5</b>	22500	1950	1770
<b>B-6</b>	26800	1900	1800
<b>B-7</b>	35650	1800	1800
<b>A-5 short string</b>	15000	1880	1500
<b>A-5 long string</b>	15000	1600	1500
<b>A-6 short string</b>	15000	1880	1500
<b>A-6 long string</b>	15000	1890	1500

Στο παρακάτω σχήμα 6.10, παρουσιάζεται η κύρια οθόνη της εισαγωγής δεδομένων για το gas lift, στην οποία απαιτείται να εισαχθούν η πυκνότητα του εγχυμένου φυσικού αερίου και οι προσμίξεις του (H<sub>2</sub>S, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>). Επίσης, είναι απαραίτητο να επιλεγεί το εάν θα χρησιμοποιηθεί η επιλογή GLR (Gas Liquid Ratio) ή η παροχή του εγχεόμενου αερίου (gas injection rate) καθ' εαυτή.

Gaslift Input Data (untitled)		
<input type="button" value="Done"/> <input type="button" value="Cancel"/> <input type="button" value="Export"/> <input type="button" value="Report"/> <input type="button" value="Help"/>		
<b>Input Data</b>		
GasLift Gas Gravity	0.7	sp. gravity
Mole Percent H2S	0	percent
Mole Percent CO2	0	percent
Mole Percent N2	0	percent
GLR Injected	0	scf/STB
Injected Gas Rate	2.5	MMscf/day
GLR/ Rate ?	<input checked="" type="radio"/> Use GLR Injected <input type="radio"/> Use Injected Gas Rate	
Gas Lift Method	<input type="radio"/> Fixed Depth of Injection <input checked="" type="radio"/> Optimum Depth of Injection <input type="radio"/> Valve Depths Specified	
<b>Gaslift Details</b>		
Maximum Depth of Injection	7800	feet
Casing Pressure	2100	psig
dP Across Valve	100	psi

Σχήμα 6.10: Κύρια οθόνη εισαγωγής δεδομένων για το gas lift (42) (πηγή: PROSPER manual)

Αν επιλεγεί η μέθοδος του GLR, το PROSPER θα χρησιμοποιήσει την τιμή αυτή για τους υπολογισμούς του, εκτός και αν επιλεγεί η εκτέλεση υπολογισμού ευαισθησίας του συστήματος για τον οποίο εισάγονται πολλές διαφορετικές τιμές του GLR για να υπολογίσει το PROSPER πως θα ανταποκριθεί το σύστημα σε κάθε μία από αυτές. Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε η επιλογή παροχής εγχεόμενου αερίου (Injected Gas Rate).

Στο PROSPER, υπάρχουν τρεις διαθέσιμες επιλογές όσον αφορά την μέθοδο έγχυσης του αερίου. Αυτές είναι οι εξής:

- Fixed Depth of Injection. Σε αυτή την περίπτωση το πρόγραμμα υποθέτει πως η πίεση του casing επαρκεί ώστε να υποστηρίξει την έγχυση του αερίου σε ένα συγκεκριμένο βάθος, σύμφωνα με τον ρυθμό έγχυσης που έχει επιλεγεί.



- Optimum Depth of Injection. Σε αυτή τη περίπτωση το PROSPER θα υπολογίσει το μέγιστο βάθος έγχυσης αερίου ώστε να προσδιοριστεί το που θα τοποθετηθούν οι βαλβίδες έγχυσης αερίου. Αυτό πραγματοποιείται με την εύρεση της πίεσης στο casing κατά μήκος του δακτυλίου και αν αυτή είναι μεγαλύτερη από την πίεση της σωλήνωσης παραγωγής, η εισπίεση μπορεί να πραγματοποιηθεί. Η επιλογή αυτή δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μία γεώτρηση που υποβοηθάται ήδη από τον μηχανισμό έγχυσης αερίου διότι οι θέσεις των βαλβίδων δεν μπορούν να αλλάξουν, λόγω υψηλού κόστους, εφόσον η παραγωγή θα πρέπει να σταματήσει για να επανατοποθετηθούν σε διαφορετικά βάθη.
- Valve Depths Specified. Στην περίπτωση αυτή, το βαθύτερο δυνατό σημείο έγχυσης μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας την πίεση στο casing της γεώτρησης και την διαφορά πίεσης (dP) της βαλβίδας.

### 6.3.6 Δεδομένα IPR

Όπως αναφέρθηκε και στην αρχή της παραγράφου 6.2, η καμπύλη IPR εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του ταμιευτήρα και των ρευστών που περιέχονται σε αυτόν. Για το λόγο αυτό το PROSPER χρησιμοποιεί τα μοντέλα-εξισώσεις περιγραφής του ταμιευτήρα όπως για παράδειγμα του Darcy, PI, Vogel κ.α. Με αυτά, το PROSPER είναι σε θέση να υπολογίσει και να σχεδιάσει την καμπύλη IPR. Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία είναι το εξής:

#### Εξίσωση PI

Ο συντελεστής παραγωγικότητας περιγράφεται μαθηματικά από τον τύπο του Darcy για ακτινωτή ημι-σταθερή ροή και είναι ο λόγος του ρυθμού παραγωγής προς την πτώση που υφίσταται η πίεση (Ενότητα 3.4.2). Στο μοντέλο αυτό, αντίθετα με το του Darcy που περιγράφεται παρακάτω, εισάγεται η τιμή του PI, παρακάμπτοντας τα χαρακτηριστικά του ταμιευτήρα και η παροχή για την κάθε πίεση υπολογίζεται από την Εξίσωση 6.1.

$$J = \frac{q}{P_r - P_{wf}} \quad (6.1)$$

Τα δεδομένα που εισάχθηκαν για τους υπολογισμούς της IPR για την κάθε γεώτρηση ξεχωριστά, παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.4.

Πίνακας 6.4: Μοντέλο PI (4)

Γεώτρηση	Pres (psig)	WCT %	PI	AOF (STB/d)
A-1	3,940	97	5.281	20,188.7
A-2	2,270	85	2.163	4,222.5
A-3	3,100	87	0.611	1,720.6
A-4	2,950	87	4	9,698.5
A-5 short	2,300	4	3.5628	6,249.4
A-5 long	2,410	20	6.8265	11,021.2
A-6 short	2,200	-	7.6465	13,042
A-6 long	2,150	10	4.4144	5,789.8
B-1	3,580	92	2.370	7,918.1
B-2	3,500	94	1.268	4,266.4
B-3	4,050	92	1.340	5,105.6
B-4	3,550	93	22.942	76,659.6
B-5	3,500	95	16.750	53,859.3
B-6	3,320	35	5.2721	13,333.2
B-7	3,750	60	2.9774	8,870.9

Άλλες σημαντικές εξισώσεις που περιέχει το PROSPER είναι οι εξής:

#### Εξίσωση Darcy (Darcy inflow equation)

Το πρόγραμμα χρησιμοποιεί την εξίσωση του Darcy για πιέσεις πάνω από το σημείο φυσαλίδας και την εξίσωση του Vogel για χαμηλότερες. Τα απαιτούμενα δεδομένα εισαγωγής είναι:

- Διαπερατότητα ταμιευτήρα
- Πάχος ταμιευτήρα (πάχος παραγωγικής ζώνης)
- Περιοχή αποστράγγισης
- Ακτίνα φρεατίου γεώτρησης
- Συντελεστής σχήματος Dietz

### Vogel

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, το πρόγραμμα χρησιμοποιεί την εξίσωση του Darcy πάνω από το σημείο φυσαλίδας και την εξίσωση του Vogel για κάτω από αυτό. Η εξίσωση αυτή διατυπώθηκε στο υποκεφάλαιο 3.4.5.

### Fetkovich

Η εξίσωση του Fetkovich είναι ουσιαστικά μία τροποποίηση της εξίσωσης του Darcy, η οποία δίνει βάση στην διφασική ροή κάτω από το σημείο φυσαλίδας και υποκαθιστά την εξίσωση του Vogel. Μαθηματικά ορίζεται από τον τύπο:

$$Q = J(P_r - P_b) + J'(P_r^2 - P_{wf}^2) \quad (6.2)$$

Όπου J ο δείκτης παραγωγικότητας,  $P_r$  η μέση πίεση ταμιευτήρα,  $P_b$  το σημείο φυσαλίδας και  $P_{wf}$  η πίεση του πυθμένα της γεώτρησης.

### Jones

Η εξίσωση Jones είναι και αυτή μια τροποποιημένη μορφή της εξίσωσης Darcy, η οποία λαμβάνει υπ' όψη την πτώση πίεσης που οφείλεται τόσο σε ροή Darcy όσο και σε ροές που δεν περιγράφονται με αυτόν. Η εξίσωση Jones μπορεί να εκφραστεί με τη μορφή:

$$(P_r - P_{wf}) = aQ^2 + bQ \quad (6.3)$$

Όπου οι τιμές a και b υπολογίζονται από τις ιδιότητες του ταμιευτήρα ή μπορούν να προσδιοριστούν από τεστ παραγωγής.

### Transient

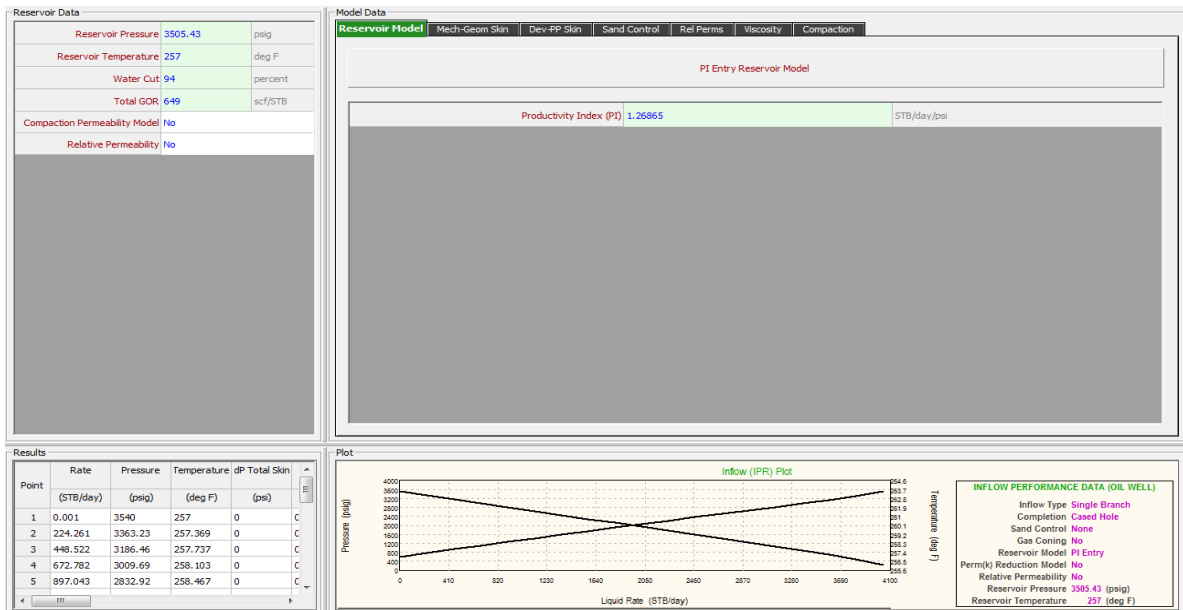
Το μοντέλο αυτό για τον σχεδιασμό της IPR, λαμβάνει υπ' όψη το ότι στα αρχικά στάδια της ροής η διαταραχή της πίεσης δεν έχει ακόμα φτάσει στα όρια του ταμιευτήρα ο οποίος θεωρείται ως έχων άπειρη ακτίνα (Infinite Acting). Αντίθετα, το μοντέλο Darcy, που αφορά την ψευδο-σταθερή κατάσταση, και Jones ισχύουν όταν η γεώτρηση έχει φτάσει να παράγει σε καθεστώς ψευδο-σταθερής κατάστασης. Το μοντέλο της μεταβατικής ροής, χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της απόδοσης του ταμιευτήρα σαν συνάρτηση του χρόνου. Μόλις έχει περάσει αρκετός χρόνος για να αναπτυχθεί η ψευδο-σταθερή κατάσταση, τότε χρησιμοποιείται το

μοντέλο του Darcy. Τα δεδομένα που εισάγονται είναι ίδια με του Darcy συν του πορώδους (porosity) και του χρόνου (time) σε μέρες. Η εξίσωση που περιγράφει αυτού του είδους ροής είναι η εξής:

$$P_r - P_{wf} = \frac{162.6 q_o \mu_o B_o}{k_o h} \left[ \log \left( \frac{k_o t}{\phi \mu_o C_t r_w^2} \right) - 3.23 + 0.87 S \right] \quad (6.4)$$

Όπου  $q_o$  η παροχή,  $\mu_o$  το ιξώδες του ρευστού,  $B_o$  ο ογκομετρικός συντελεστής σχηματισμού υγρής φάσεως,  $k_o$  η διαπερατότητα του ταμιευτήρα,  $h$  το πάχος του ταμιευτήρα,  $t$  ο χρόνος σε μέρες,  $\phi$  το πορώδες του ταμιευτήρα,  $r_w$  η ακτίνα του φρεατίου της γεώτρησης,  $S$  ο επιδερμικός συντελεστής και  $C_t$  ο συντελεστής συμπίεστότητας.

Αφού εισαχθούν τα απαραίτητα δεδομένα της κάθε γεώτρησης, το PROSPER θα υπολογίσει την IPR, η οποία παρίσταται και γραφικά στο κάτω μέρος της κύριας οθόνης όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.11:



Σχήμα 6.11: Κύρια οθόνη για την IPR (43) (πηγή: PROSPER)

### 6.3.7 Προσαρμογή IPR/VLP και έλεγχος ποιότητας (Quality check)

Μόλις εισαχθούν τα απαραίτητα δεδομένα για τον σχεδιασμό της καμπύλης IPR και του gas lift, πραγματοποιείται ο έλεγχος της ποιότητάς τους. Το πρόγραμμα μπορεί να κάνει υπολογισμούς μέχρι και για 1000 τεστ πίεσης. Η διαδικασία στο τμήμα αυτό απαιτεί την εισαγωγή των δεδομένων των δοκιμών πεδίου (well test data) στην οθόνη, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.12. Για την κάθε γεώτρηση υπάρχει διαθέσιμο μόνο ένα πρόσφατο τεστ παραγωγής. Όσον αφορά την γεώτρηση με διπλή σωλήνωση, A-6, δεν υπάρχουν καθόλου δεδομένα από τεστ παραγωγής, οπότε θεωρείται ότι τα δεδομένα που εισήχθησαν για την συγκεκριμένη γεώτρηση έχουν καλή ποιότητα. Η διαδικασία του ελέγχου ποιότητας ακολουθεί τα 4 βασικά βήματα όπως περιγράφεται στο πάνω μέρος της οθόνης με κόκκινο χρώμα.

**VLP/IPR MATCHING (WELL1.OUT) (Matched PVT)**

Buttons: Dgne, Cancel, Help, Export, Import, Report, Estimate U Value, Correlation Comparison, Match VLP, VLP / IPR

Rate Type: Liquid Rate

Adjust IPR

**Matching Procedure**

The Task Buttons are organized to reflect the process an engineer would take in Quality Assuring and matching well tests. The best way of performing this process is to try always to isolate one part of the model that can be investigated independently of the others. The methodology is :-

1. Estimate U value. This task has to be done first since the temperature will affect the PVT used in the matching.
2. Correlation Comparison. This will show if the test is valid and allow the user to select which correlation will be chosen to represent the pressure drops in the well.
3. Match VLP. Match the correlation to valid tests. Something that many engineers do is to match the chosen model to one test and cross check with others. This of course depends on the engineering judgement of the person doing the analysis.
4. VLP/IPR. Check the VLP/IPR intersection and, if needed, modify the IPR so that model results match those of the test. This will ensure that the model can reasonably represent the tests and identify possible discrepancies in the inflow model. If the VLP/IPR intersection shows a different rate to the one shown on the test, then of course the discrepancy lies with the inflow.

**Match Data**

Point	Test Point Date	Test Point Comment	Tubing Head Pressure (psig)	Tubing Head Temperature (deg F)	Water Cut (percent)	Liquid Rate (STB/day)	Gauge Depth (Measured) (feet)	Gauge Pressure (psig)	Reservoir Pressure (psig)	Gas Oil Ratio (scf/STB)	GOR Free (scf/STB)
1	01/01/2011	Test 1	375	157	0.5	11350	12500	3257	5200	800	0
2											
3											
4											
5											
6											
7											
8											
9											
10											

Σχήμα 6.12: Κύρια οθόνη ελέγχου ποιότητας (44) (πηγή: PROSPER manual)

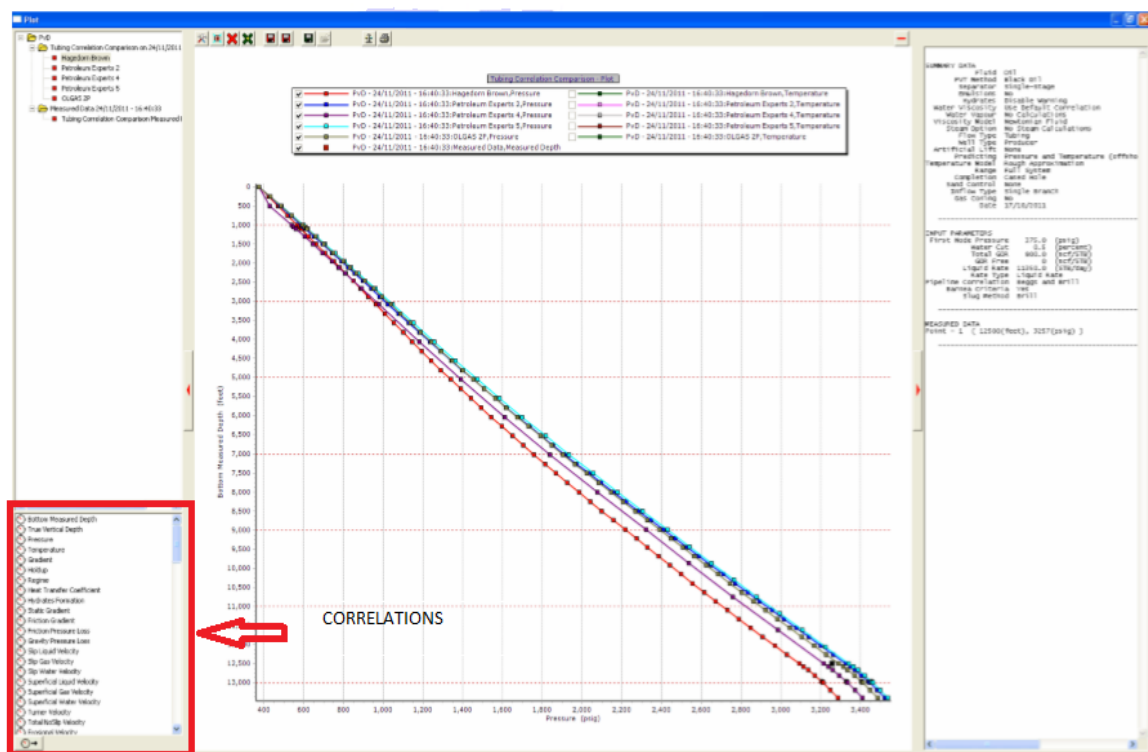
### Εκτίμηση του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας (Estimate U Value)

Εάν χρησιμοποιείται η επιλογή 'Rough Approximation' από το μενού επιλογών (παράγραφος 6.3.2), τότε μπορεί να υπολογιστεί η τιμή U Value. Για μίγματα πετρελαίου - νερού, οι αποδεκτές τιμές του συντελεστή αυτού είναι 8 - 10 BTU/h/ft<sup>2</sup>/F. Αυτή η τιμή χρησιμοποιείται για τον

υπολογισμό της απώλειας θερμότητας στον επιφανειακό ή υπόγειο εξοπλισμό προς το περιβάλλον πέτρωμα. Η καινούργια τιμή που θα προκύψει, αντικαθίσταται στην οθόνη της γεωθερμικής βαθμίδας (Παράγραφος 6.3.4).

### Correlation Comparison

Σύμφωνα με το εγχειρίδιο του χρήστη του PROSPER, ο έλεγχος της ποιότητας για ένα τεστ επιτυγχάνεται με την γραφική παράσταση της πίεσης με το βάθος (Σχήμα 6.13), στην οποία το σημείο που προκύπτει από τα δεδομένα του τεστ παραγωγής συγκρίνεται με δύο καμπύλες, οι οποίες βασίζονται σε συσχετίσεις που θεωρούνται ότι αντιπροσωπεύουν ακραίες περιπτώσεις πτώσης πίεσης. Αυτές είναι των Duns and Ross modified και Fancher and Brown, οι οποίες θα αναλυθούν παρακάτω.



Σχήμα 6.13: Γραφική αναπαράσταση της πίεσης με το βάθος (45) (πηγή: PROSPER manual)

Αυτές οι δύο συσχετίσεις δημιουργούν ένα φάκελο. Η αναθεώρηση των δεδομένων κρίνεται αναγκαία όταν το σημείο αυτό δεν βρίσκεται μέσα στον φάκελο των δύο συσχετίσεων. Στην τελευταία περίπτωση συνάγεται ότι τα δεδομένα δεν μπορούν να γίνουν αποδεκτά, δεδομένου ότι οι συσχετισμοί των Duns and Ross modified και Fancher and Brown αντιπροσωπεύουν τις ακραίες περιπτώσεις στη σχέση πίεσης-βάθους. Οι συσχετίσεις που περιέχει το PROSPER είναι οι ακόλουθες:

- Fancher and Brown: Η Fancher and Brown είναι μία συσχέτιση η οποία δεν λαμβάνει υπόψιν την ολίσθηση του αερίου και παρέχεται για τον ποιοτικό έλεγχο. Παρέχει τις ελάχιστες δυνατές απώλειες πίεσης στην σωλήνωση, και εφόσον δεν λαμβάνει υπόψιν την ολίσθηση του αερίου από το πετρέλαιο, πάντα προβλέπει πίεση στην παραγωγική σωλήνωση η οποία είναι μικρότερη από την τιμή που μετρήθηκε. Ακόμη και αν δίνει μια καλή αντιστοιχία με τις μετρούμενες πιέσεις του φρεατίου της γεώτρησης, δεν θα πρέπει να χρησιμοποιείται για την περιγραφή της ροής στην σωλήνωση. Έτσι, αν οι μετρήσεις από τα τεστ εμπίπτουν στα αριστερά της σχέσης Fancher Brown στο γράφημα, τότε υπάρχει πρόβλημα με την πυκνότητα του υγρού ή με τα δεδομένα πίεσης του πεδίου.
- Duns and Ros Modified: Η Duns and Ros Modified προέρχεται από την αρχική συσχέτιση Duns and Ros που τροποποιήθηκε από τους Petroleum Experts με σκοπό η δεύτερη να υπερεκτιμά την πτώση πίεσης σε γεωτρήσεις πετρελαίου με ομιχλώδη ροή (mist flow). Η συγκεκριμένη συσχέτιση, δεν θα πρέπει να χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της πτώσης πίεσης στο φρεάτιο γεώτρησης ή στις σωληνώσεις, εφόσον υπερεκτιμά την πτώση πίεσης και δημιουργήθηκε μόνο για τον προσδιορισμό των ορίων των αποδεκτών τιμών.
- Duns and Ros: Στο PROSPER, η συσχέτιση Duns and Ros έχει ενισχυθεί και βελτιστοποιηθεί για την χρήση της σε συμπυκνώματα. Αποδίδει καλά σε περιπτώσεις ομιχλώδους ροής και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε γεωτρήσεις με συμπυκνώματα και υψηλό GOR.
- Hagedorn Brown: Για τις γεωτρήσεις πετρελαίου, η συσχέτιση αυτή αποδίδει καλά σε ροές που σχηματίζουν μεγάλους θύλακες αερίου με μεγάλη ταχύτητα (slug flow) και σε μέτρια έως υψηλά ποσοστά παραγωγής. Η Hagedorn Brown, δεν θα πρέπει να χρησιμοποιείται για συμπυκνώματα και όταν το κύριο καθεστώς ροής είναι η ομιχλώδης ροή (mist flow). Η συσχέτιση αυτή, υποτιμά την καμπύλη VLP σε χαμηλές τιμές ρυθμών

παραγωγής και δεν πρέπει να χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη των ελάχιστων σταθερών παροχών.

- Petroleum Experts: Η συσχέτιση αυτή συνδυάζει τα χαρακτηριστικά όλων των υφιστάμενων συσχετίσεων που υπάρχουν στο PROSPER. Χρησιμοποιεί τον πίνακα ροής (flow map) των Gould et al, τη συσχέτιση του Hagedorn Brown για ροές που σχηματίζουν μεγάλους θύλακες αερίου με μεγάλη ταχύτητα και των Duns and Ros για ομιχλώδη ροή.
- Petroleum Experts 2: Η συσχέτιση Petroleum Experts 2, περιλαμβάνει τα χαρακτηριστικά της των Petroleum Experts και χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη της VLP σε περιπτώσεις χαμηλής ροής.
- Petroleum Expert 3: Η συσχέτιση αυτή περιλαμβάνει την Petroleum Expert 2 και χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις πετρελαίου με μεγάλο ιξώδες και πτητικά.
- Beggs and Brill: Αυτή είναι κατά κύριο λόγο συσχέτιση για ροή σε επιφανειακές σωληνώσεις. Υπερ-προβλέπει γενικώς την πτώση της πίεσης σε κάθετες και κεκλιμένες γεωτρήσεις.

### **Προσαρμογή VLP (matching)**

Σε αυτό το τμήμα του PROSPER γίνεται ουσιαστικά η ρύθμιση των συσχετίσεων με τα δεδομένα από το τεστ παραγωγής, εφόσον προηγουμένως επιβεβαιώθηκε πως το σημείο του τεστ βρίσκεται μεταξύ των καμπυλών Fancher and Brown και Duns and Ros Modified. Η μέθοδος της ρύθμισης της VLP, είναι η εξής:

Δεδομένου ότι οι απώλειες πίεσης στη σωλήνωση προκαλούνται κυρίως από την τριβή και από βαρυτικές δυνάμεις, το PROSPER εισάγει 2 παραμέτρους για τη διόρθωση των συσχετίσεων, παρόμοιες με αυτές στο πλαίσιο της διαδικασίας προσαρμογής για τα δεδομένα PVT. Η παράμετρος 1 (Parameter 1) είναι ο πολλαπλασιαστής για τον όρο της βαρύτητας στο, ενώ η παράμετρος 2 (Parameter 2) είναι ο πολλαπλασιαστής για τον όρο της τριβής. Στη συνέχεια, το πρόγραμμα εκτελεί μη γραμμική παλινδρόμηση για να ρυθμίσεις τις δύο αυτές παραμέτρους, προκειμένου να επιτευχθεί η καλύτερη δυνατή προσαρμογή της VLP. Όσο περισσότερο αυτοί οι δύο πολλαπλασιαστές αποκλίνουν από την μονάδα, τόσο λιγότερο αξιόπιστη είναι η επιλεγμένη συσχέτιση ως προς τα δεδομένα του τεστ. Επίσης, μία προσαρμογή μπορεί να αξιολογηθεί, ως προς την αξιοπιστία της, και από τον συντελεστή απόκλισης, όπως και στη διαδικασία αντιστοίχισης των δεδομένων PVT. Ο συντελεστής απόκλισης είναι η διαφορά ανάμεσα στα



δεδομένα από τα τεστ και στους υπολογισμούς του PROSPER. Μία τιμή της απόκλισης αυτής κοντά στο μηδέν, δίνει μία καλή ρύθμιση των δεδομένων.

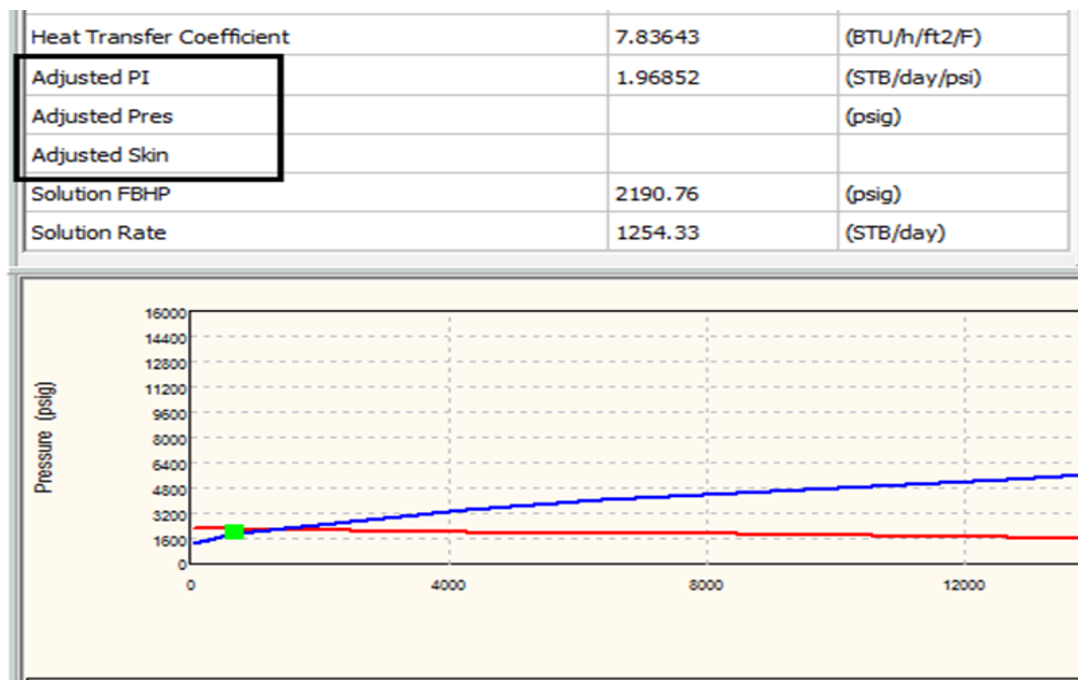
Στο παρακάτω Σχήμα 6.14, παρουσιάζεται η κύρια οθόνη των συσχετίσεων μαζί με τις παραμέτρους 1 και 2.

<div> <div>Done</div> <div>Cancel</div> <div>Main</div> <div>Reset all</div> <div>Report</div> <div>Export</div> <div>Help</div> </div>					
Point		Correlation	Parameter 1	Parameter 2	Standard Deviation
1	Reset	Duns and Ros Modified	1	1	
2	Reset	Hagedorn Brown	1	1	
3	Reset	Fancher Brown	1	1	
4	Reset	Mukerjee Brill	1	1	
5	Reset	Beggs and Brill	1	1	
6	Reset	Petroleum Experts	1	1	
7	Reset	Orkiszewski	1	1	
8	Reset	Petroleum Experts 2	0.98734	0.96014	0
9	Reset	Duns and Ros Original	1	1	
10	Reset	Petroleum Experts 3	0.99828	0.99521	0
11	Reset	GRE (modified by PE)	1	1	
12	Reset	Petroleum Experts 4	1	1	
13	Reset	Hydro-3P	1	1	
14	Reset	Petroleum Experts 5	1	1	
15	Reset	OLGAS 2P	1	1	
16	Reset	OLGAS 3P	1	1	
17	Reset	OLGAS3P EXT	1	1	
18	Reset	SRTCA	1	1	
19	Reset	MMSM	1	1	

Σχήμα 6.14: Οθόνη των συσχετίσεων μαζί με τις παραμέτρους 1 και 2 (46) (πηγή: PROSPER manual)

### Προσαρμογή της IPR με την VLP (IPR/VLP matching)

Το τελικό στάδιο του ελέγχου μία γεώτρησης είναι η προσαρμογή της καμπύλης IPR με την VLP (IPR/VLP matching). Δεδομένου ότι η VLP έχει συνδυαστεί με μία συσχέτιση από το προηγούμενο βήμα και μπορεί να θεωρηθεί πλέον αξιόπιστη, θα πρέπει να εξεταστεί εάν η τιμή της παροχής κατά το τεστ παραγωγής, δηλαδή η τομή των καμπυλών IPR και VLP, είναι κοντά στο σημείο λειτουργίας (operating point), το οποίο υπολογίστηκε από το PROSPER. (Σχήμα 6.15).



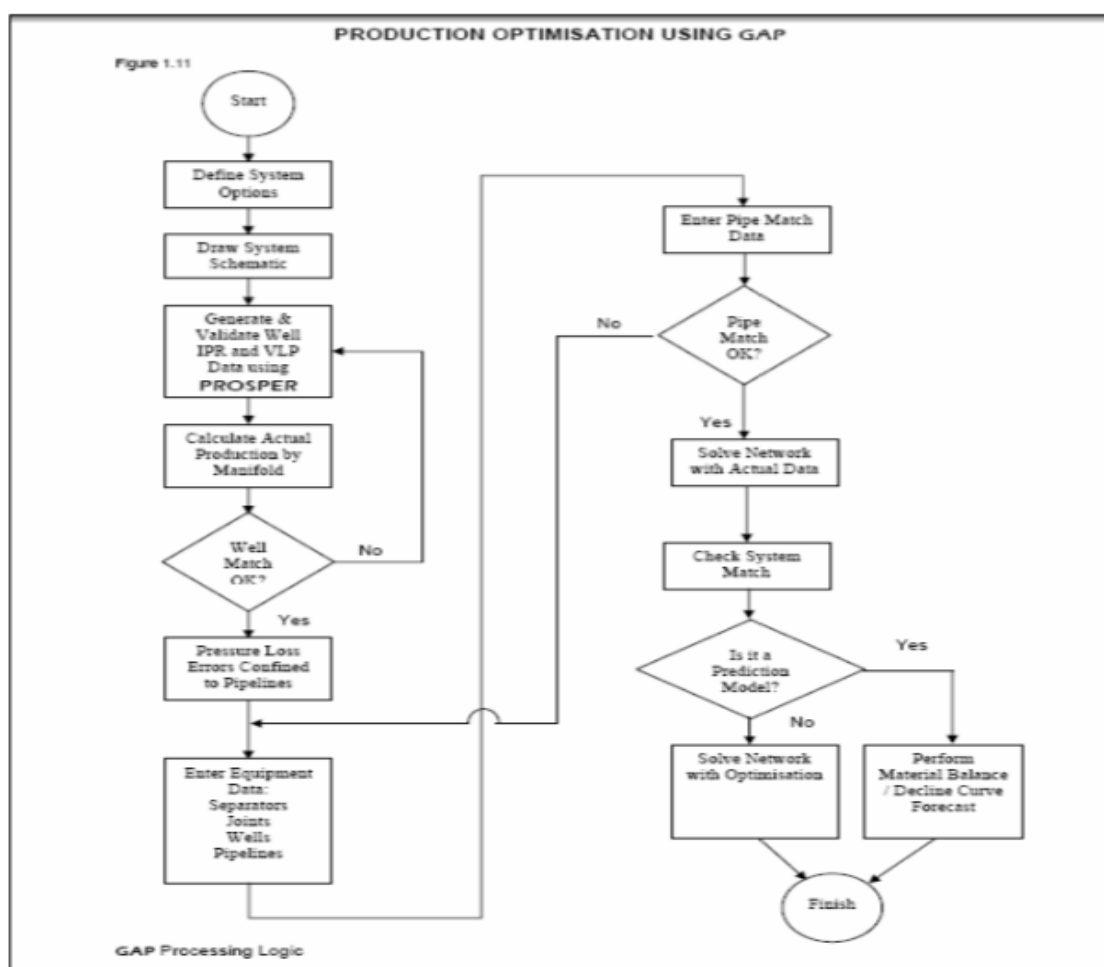
Σχήμα 6.15: Προσαρμογή της καμπύλης IPR με την VLP (IPR/VLP matching) (47) (πηγή: PROSPER)

Εάν υπάρχει μεγάλη απόκλιση ανάμεσα στους υπολογισμούς του PROSPER και στα δεδομένα από τα τεστ, το λογισμικό δίνει την ευκαιρία για την προσαρμογή της IPR είτε μεταβάλλοντας την πίεση του ταμιευτήρα, είτε τον επιδερμικό συντελεστή λόγω του ότι οι τιμές των παραμέτρων αυτών θεωρούνται ως οι πιο αμφισβητήσιμες στη διαμόρφωση της καμπύλης IPR. Όσον αφορά την πίεση του ταμιευτήρα, κατά τη διάρκεια των τεστ παραγωγής, η μέτρηση της μέσης πίεσης του ταμιευτήρα επιτυγχάνεται με το κλείσιμο της γεώτρησης στην επιφάνεια και την διακοπή της παραγωγής για κάποιο χρονικό διάστημα το οποίο μπορεί να είναι μερικές ώρες (Build-up). Όμως, η πίεση του ταμιευτήρα χρειάζεται μερικές μέρες για να έρθει σε ισορροπία, γεγονός που έχει σαν αποτέλεσμα η πίεση που μετρήθηκε να περιέχει ένα ποσοστό λάθους.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7<sup>ο</sup>

### ΜΟΝΤΕΛΑ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ ΣΤΟ GAP

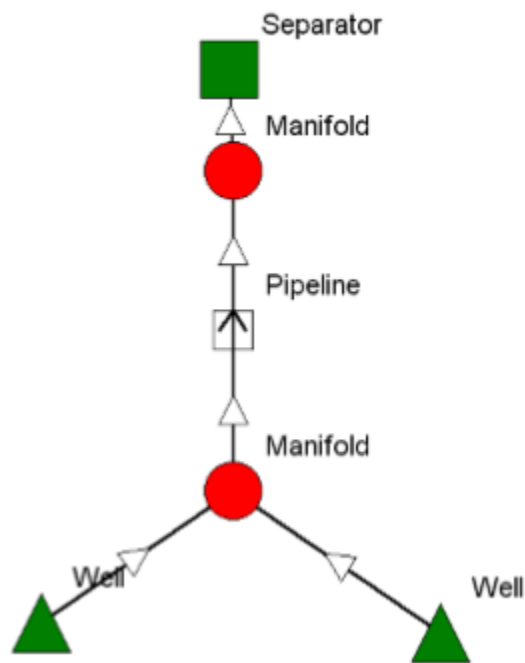
Το GAP (General Allocation Program) είναι ένα γενικό πρόγραμμα κατανομής του προς έγχυση αερίου. Είναι ένα εργαλείο που περιέχεται στο IPM toolkit για την επίτευξη σημαντικών λειτουργιών όπως η μοντελοποίηση του επιφανειακού δικτύου παραγωγής ή του δικτύου έγχυσης αερίου ή νερού, η βελτιστοποίηση της παραγωγής, η κατανομή αερίου gas lift και η πρόβλεψη της παραγωγής. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, το GAP θα χρησιμοποιηθεί για την βελτιστοποίηση της παραγωγής μέσω της επίτευξης μίας βέλτιστης κατανομής αερίου σε όλες τις γεωτρήσεις του πεδίου OILFIELD ταυτόχρονα, οι οποίες έχουν προηγουμένως μοντελοποιηθεί στο PROSPER. Το παρακάτω διάγραμμα ροής (Σχήμα 7.1) περιγράφει τη γενική διαδικασία για τη βελτιστοποίηση της παραγωγής χρησιμοποιώντας το GAP:



Σχήμα 7.1: Διάγραμμα ροής διαδικασίας για τη βελτιστοποίηση της παραγωγής (48) (Abu Taher Md. Ibrahim, Optimization of Gas Lift System in Varg Field)

## 7.1 Η τεχνική του GAP

Τα συστήματα παραγωγής και εισπίεσης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.2, περιλαμβάνουν παραγωγικές γεωτρήσεις και γεωτρήσεις εισπίεσης οι οποίες συνδέονται μέσω κοινών πολλαπλών γραμμών διανομής (manifolds) και αγωγών έως ένα σύστημα με σταθερή πίεση το οποίο ονομάζεται διαχωριστήρας (separator). Ως διαχωριστήρας εννοείται είτε ο κανονικός διαχωριστήρας του συστήματος, είτε οποιοδήποτε σημείο με γνωστή σταθερή πίεση. Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε ο πραγματικός διαχωριστήρας του παραγωγικού συστήματος και όχι κάποιο άλλο σημείο με γνωστή και σταθερή πίεση.



Σχήμα 7.2: Παράδειγμα ενός παραγωγικού συστήματος (49) (πηγή: GAP manual)

Για το κάθε σημείο (Node) ισχύουν τα παρακάτω:

$$\sum_{i=1}^n \dot{m} = 0$$

$$P_{upstream} - P_{downstream} - \Delta P = 0$$

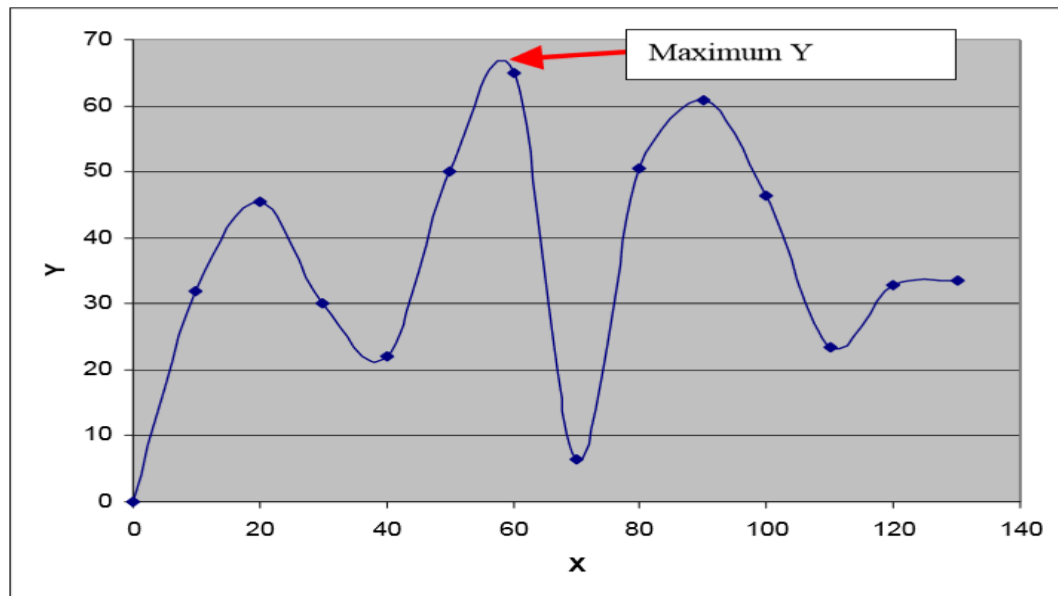
$$\Delta P = f(\dot{m}, P, T, L)$$

$$P_{sep} = C$$

Όπου C = σταθερά

## 7.2 Θεωρήσεις κατά την βελτιστοποίηση

Υπάρχουν πολλές μέθοδοι για την βελτιστοποίηση ενός παραγωγικού συστήματος. Κάποιες από αυτές είναι αρκετά απλές (Simplex, Equal Slope) και κάποιες πιο περίπλοκες όπως η SQP (Sequential Quadratic Programming), δηλαδή διαδοχικός τετραγωνικός προγραμματισμός. Η ενότητα αυτή θα κάνει μία γρήγορη ανάλυση αυτών των μεθόδων και θα εξηγηθεί γιατί το GAP επιλέγει να χρησιμοποιεί την μέθοδο SQP, η οποία είναι μία από τις πιο δύσκολες τεχνικές. Θεωρείται μία συνάρτηση της μορφής του Σχήματος 7.3:

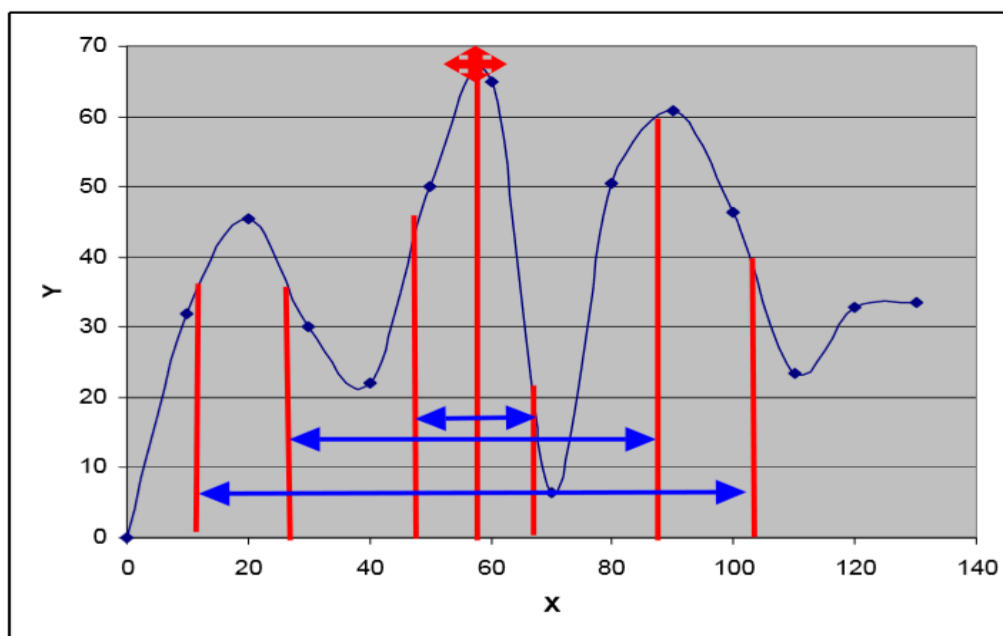


Σχήμα 7.3: Συνάρτηση X-Y (50) (Πηγή: GAP manual)

Η συνάρτηση αυτή έχει μία μέγιστη κορυφή που υποδεικνύεται από το κόκκινο βέλος. Σε ένα γραμμικό σύστημα, μπορούν να εφαρμοστούν δύο μέθοδοι για τον προσδιορισμό του μέγιστου σημείου της:

- Bracketing (προσέγγιση)
- Derivatives (παραγωγή)

Η πρώτη μέθοδος (Σχήμα 7.4), η οποία ονομάζεται αλλιώς μέθοδος διχοτόμησης, βασίζεται στην προσπάθεια προσέγγισης της ρίζας του συστήματος, δηλαδή, στην παρούσα εργασία, την βέλτιστη ποσότητα έγχυσης αερίου.



Σχήμα 7.4: Προσέγγιση του μέγιστου σημείου με την μέθοδο Bracketing (51) (Πηγή: GAP manual)

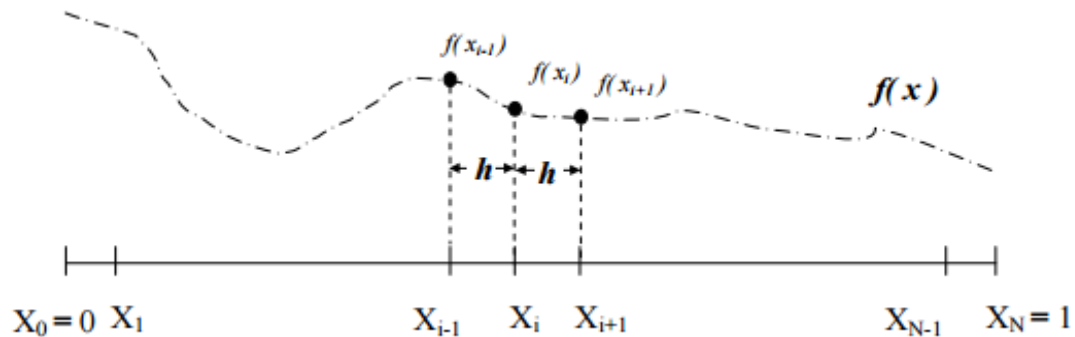
Η μέθοδος βασίζεται στο Θεώρημα Ενδιάμεσης Τιμής. Αν η συνάρτηση  $f(x)$  είναι συνεχής σε ένα διάστημα  $[a, b]$  και ισχύει  $f(a)f(b) < 0$ , τότε, υπάρχει  $c = \bar{x} \in (a, b)$  ώστε  $f(\bar{x}) = 0$ . Άρα υπάρχει τουλάχιστον μία ρίζα της  $f(x)$  στο διάστημα  $(a, b)$ . Το συμπέρασμα αυτό αποτελεί το θεώρημα Bolzano. Η διαδικασία που ακολουθεί η μέθοδος διχοτομεί το διάστημα  $[a, b]$ , εντοπίζει τη ρίζα σε ένα από τα δύο υποδιαστήματα και επαναλαμβάνεται στο επιλεγμένο υποδιάστημα. Είναι φανερό ότι σε κάθε επανάληψη των βημάτων της διχοτόμησης το εύρος του αρχικού διαστήματος όπου υπάρχει η ρίζα υποδιπλασιάζεται, διότι το ένα από τα δύο άκρα του νέου διαστήματος, μεταφέρεται ακριβώς στο μέσον του ακριβώς προηγούμενου διαστήματος. Όταν τερματιστεί η διαδικασία μετά από  $N$  επαναλήψεις, δεν θα έχει υπολογιστεί η ακριβή ρίζα  $\rho$ , αλλά μία προσέγγισή της που είναι και η λύση του συστήματος.

Η δεύτερη μέθοδος είναι αυτή της αριθμητικής παραγώγισης. Η αριθμητική παραγωγή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη, καθώς πολλά φυσικά μεγέθη αντιπροσωπεύουν τη χρονική ή χωρική μεταβολή κάποιας μετρήσιμης ποσότητας και χρησιμοποιείται όταν δεν είναι γνωστή η αναλυτική μορφή μίας συνάρτησης  $y = y(x)$ , αλλά είναι γνωστές μόνο οι τιμές της συνάρτησης σε συγκεκριμένα σημεία. Υπάρχουν πάρα πολλές περιπτώσεις όπου η πολυπλοκότητα της συνάρτησης σε συνδυασμό με την επιθυμητή ακρίβεια καθιστούν ασύμφορο και επισφαλή τον

αναλυτικό υπολογισμό 'με το χέρι'. Οι αριθμητικές μέθοδοι προτείνουν τρόπους επίλυσης αυτών ακριβώς των προβλημάτων που δεν μπορούν ή δεν συμφέρει να λυθούν αναλυτικά. Για την αριθμητική παραγωγή ειδικά, απαραίτητη προϋπόθεση για την χρήση αριθμητικής μεθόδου είναι να μεταφράσουμε το πρόβλημα σε κάτι που να μπορεί να υπολογιστεί αριθμητικά εισάγοντας τις εξισώσεις διαφορών, όπως για παράδειγμα αυτή της προς τα εμπρός διαφορά (forward difference):

$$f'(x) = \frac{f(x+h) - f(x)}{h} \quad (7.1)$$

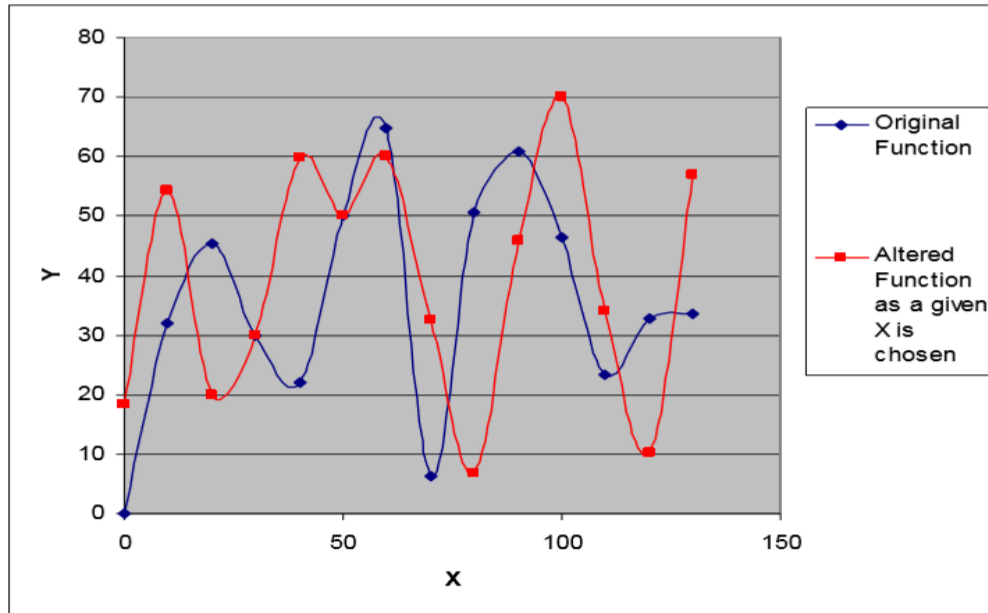
Διαμερίζουμε ένα πεδίο ορισμού  $[a, b]$  της συνάρτησης σε  $N$  υποδιαστήματα που το καθένα τους έχει μήκος  $h=1/N$ . Φαίνεται αμέσως πως όσο πιο μεγάλο είναι το  $N$  (Σχήμα 7.5), δηλαδή όσο πιο πυκνή είναι η διαμέριση, τόσο πιο μικρό είναι το  $h$ , δηλαδή τόσο πιο κοντά στην παράγωγο βρίσκεται η έκφραση  $f'(x)$ . Έτσι, υπολογίζεται η λύση του συστήματος.



Σχήμα 7.5: Διαμερισμός σε υποδιαστήματα (52)

Και οι δύο αυτές μέθοδοι, εφαρμόζονται επιτυχώς σε γραμμικά προβλήματα, στα οποία μία τιμή μπορεί να εκφραστεί σαν συνάρτηση μιας άλλης. Στα πλαίσια ενός πετρελαϊκού πεδίου, η γραμμικότητα αυτή αντιστοιχεί μόνο σε περίπτωση κοιτάσματος ξηρού αερίου, χωρίς παραγωγή νερού, στην οποία η πίεση σε κάθε σημείο είναι συνάρτηση αποκλειστικά του ρυθμού παραγωγής.

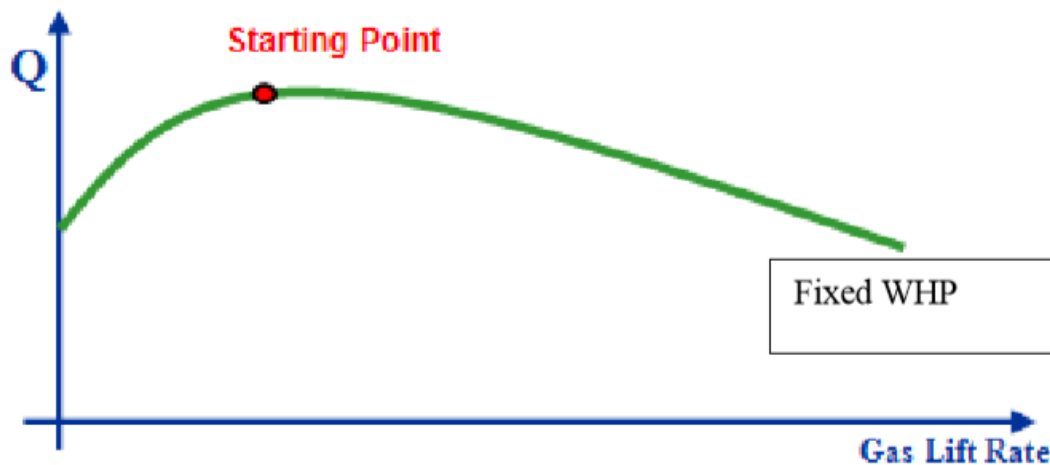
Ένα μη γραμμικό σύστημα όμως δεν θα συμπεριφέρεται κατά αυτόν τον τρόπο. Το παρακάτω Σχήμα 7.6 παρουσιάζει τον τρόπο συμπεριφοράς ενός μη γραμμικού συστήματος:



Σχήμα 7.6: Συμπεριφορά συνάρτησης σε μη γραμμικό σύστημα (53) (Πηγή: GAP manual)

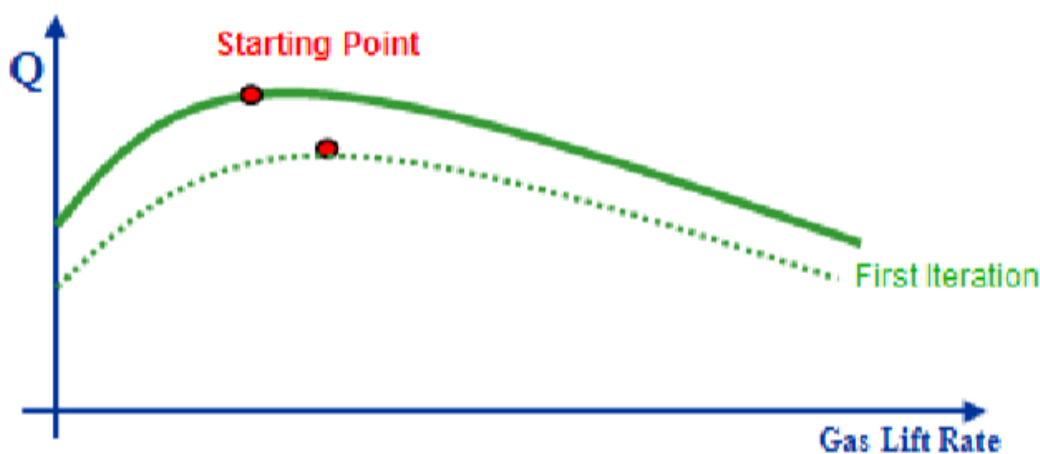
Αυτό, στην πραγματικότητα, αναπαριστά έναν κινούμενο στόχο και η προσπάθεια προσδιορισμού του βέλτιστου σημείου με γραμμικές τεχνικές δεν θα μπορούσε να είναι επιτυχής. Ας, θεωρηθεί τώρα ένα δίκτυο έγχυσης αερίου gas lift. Το δίκτυο αυτό θα αποτελείται από δύο γεωτρήσεις στις οποίες γίνεται έγχυση αερίου gas lift και ο στόχος είναι να βρεθεί το σημείο εκείνο (κορυφή της καμπύλης) το οποίο θα αντιπροσωπεύει την βέλτιστη έγχυση αερίου με την οποία θα επιτευχθεί η μέγιστη δυνατή ποσότητα πετρελαίου. Οι γραμμικές τεχνικές θα μπορέσουν να λειτουργήσουν ανάλογα με την αντίδραση του συστήματος. Η καμπύλη επίδοσης της μίας γεώτρησης με σταθερή πίεσης κεφαλής (Well Head Pressure) θα είναι (Σχήμα 7.7):





Σχήμα 7.7: Καμπύλη επίδοσης με σταθερή πίεση κεφαλής της γεώτρησης (54) (Πηγή: GAP manual)

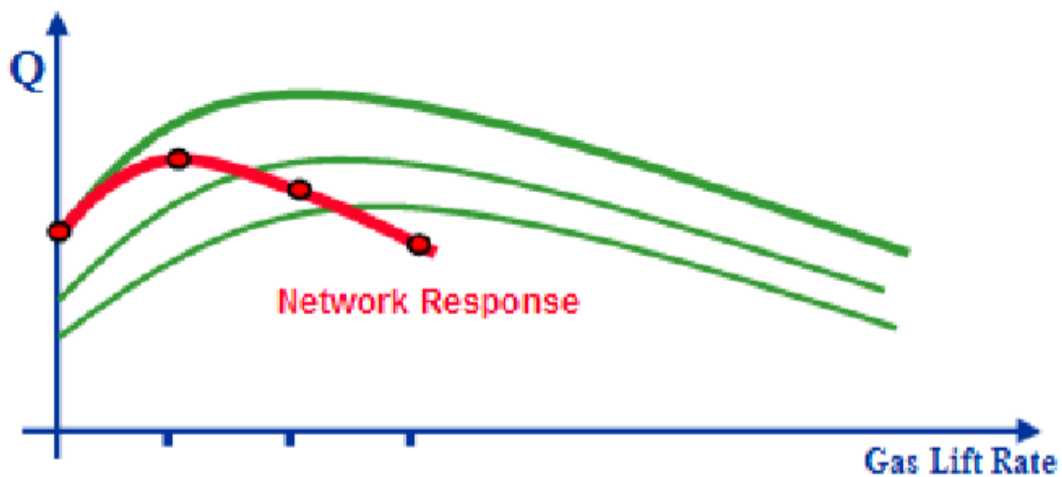
Όπου το κόκκινο σημείο αναπαριστά μία υπόθεση (starting point) του ρυθμού έγχυσης, κατά την οποία υπολογίζεται ο αντίστοιχος ρυθμός παραγωγής πετρελαίου. Έπειτα, ο ρυθμός αυτός που υπολογίστηκε με βάση μιας αρχικής θεώρησης, θα χρησιμοποιηθεί για έναν νέο υπολογισμό της πίεσης της κεφαλής της γεώτρησης, ο οποίος βασίζεται στην πτώση πίεσης που υφίσταται το σύστημα. Έτσι, θα σχεδιαστεί μία καινούργια καμπύλη απόδοσης με την καινούργια πίεση κεφαλής η οποία θα είναι και αυτή σταθερή (Σχήμα 7.8).



Σχήμα 7.8: Καινούργια καμπύλη απόδοσης με την καινούργια πίεση κεφαλής (55) (Πηγή: GAP manual)

Οι επαναλήψεις (iterations) συνεχίζονται μέχρι να βρεθεί η καμπύλη η οποία θα συγκλίνει περισσότερο προς την λύση του συστήματος.

Στην πραγματικότητα, ακόμα και σε ένα τέτοιο απλό σύστημα, τα πράγματα δεν είναι τόσο απλά. Κάθε φορά που γίνεται μία υπόθεση για τον ρυθμό έγχυσης αερίου gas lift στην πρώτη γεώτρηση, η πτώση πίεσης στις σωληνώσεις θα προκαλέσει μία διαφορετική αντίθληψη (backpressure) στην δεύτερη γεώτρηση. Έτσι, το σύστημα είναι από την φύση του μη γραμμικό, εφόσον κάθε φορά που αλλάζει ο ρυθμός έγχυσης αλλάζει η πίεση στην κεφαλή της γεώτρησης και η αντίθληψη στην άλλη, με αποτέλεσμα το σύστημα να συμπεριφέρεται όπως στην περίπτωση του Σχήματος 7.6. Οι τεχνικές γραμμικού προγραμματισμού δεν θα μπορέσουν να δουν το αντίκτυπο που θα έχει η έγχυση αερίου μίας γεώτρησης σε μία άλλη, εξαιτίας της πτώσης πίεσης στις σωληνώσεις. Η πραγματική αντίδραση μίας γεώτρησης δίνεται στο παρακάτω Σχήμα 7.9, όπου η κόκκινη καμπύλη αναπαριστά την πραγματική αντίδραση του συστήματος:



Σχήμα 7.9: Πραγματική αντίδραση μίας γεώτρησης (56) (Πηγή: GAP manual)

Αυτό μπορεί να γίνει μόνο με την μέθοδο SQP. Αυτή η μέθοδος λειτουργεί υπολογίζοντας την αντίδραση κάθε στοιχείου του συστήματος, όχι μόνο όταν αλλάζει η πίεση με τον ρυθμό παραγωγής, αλλά και όταν μεταβάλλεται με τον ρυθμό έγχυσης αερίου. Η μέθοδος αυτή, σε σχέση με την γραμμική μέθοδο, θα έχει πάντα σαν αποτέλεσμα μεγαλύτερους ρυθμούς με λιγότερη έγχυση αερίου, δηλαδή καλύτερη βελτιστοποίηση.

### 7.3 Διαδικασία βελτιστοποίησης

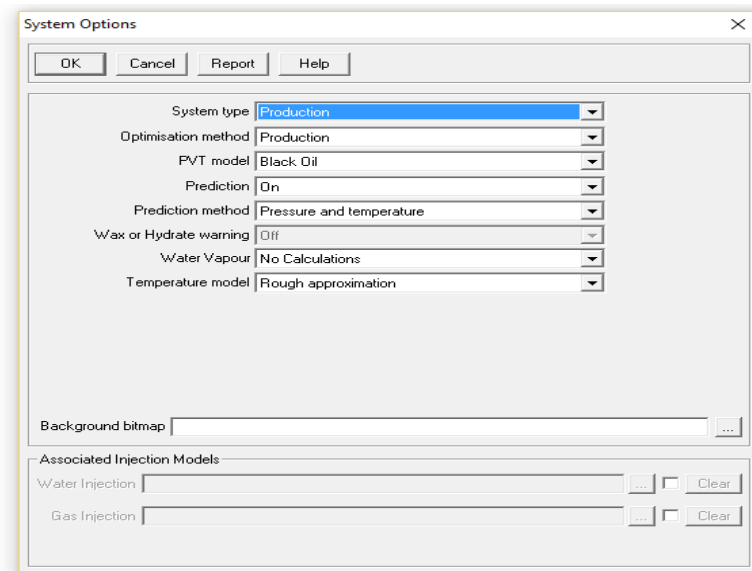
Στην παρούσα διπλωματική εργασία, αναζητήθηκε η βέλτιστη κατανομή του αερίου gas lift με σκοπό την βελτιστοποίηση της παραγωγής για τις γεωτρήσεις A και B του Πεδίου OILFIELD,

χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα GAP. Στις παρακάτω ενότητες περιγράφεται αναλυτικά όλη η διαδικασία που ακολουθήθηκε, τα δεδομένα που εισάχθηκαν καθώς και τα αποτελέσματα της επίλυσης του συστήματος.

### 7.3.1 Επιλογές παραγωγικού συστήματος (System options)

Η επιλογή αυτή επιτρέπει την εισαγωγή των γενικών παραμέτρων του συστήματος, καθώς και τον τύπο του (παραγωγή ή εισπίεση), όπως φαίνεται και στο Σχήμα 7.10. Οι επιλογές που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι εξής:

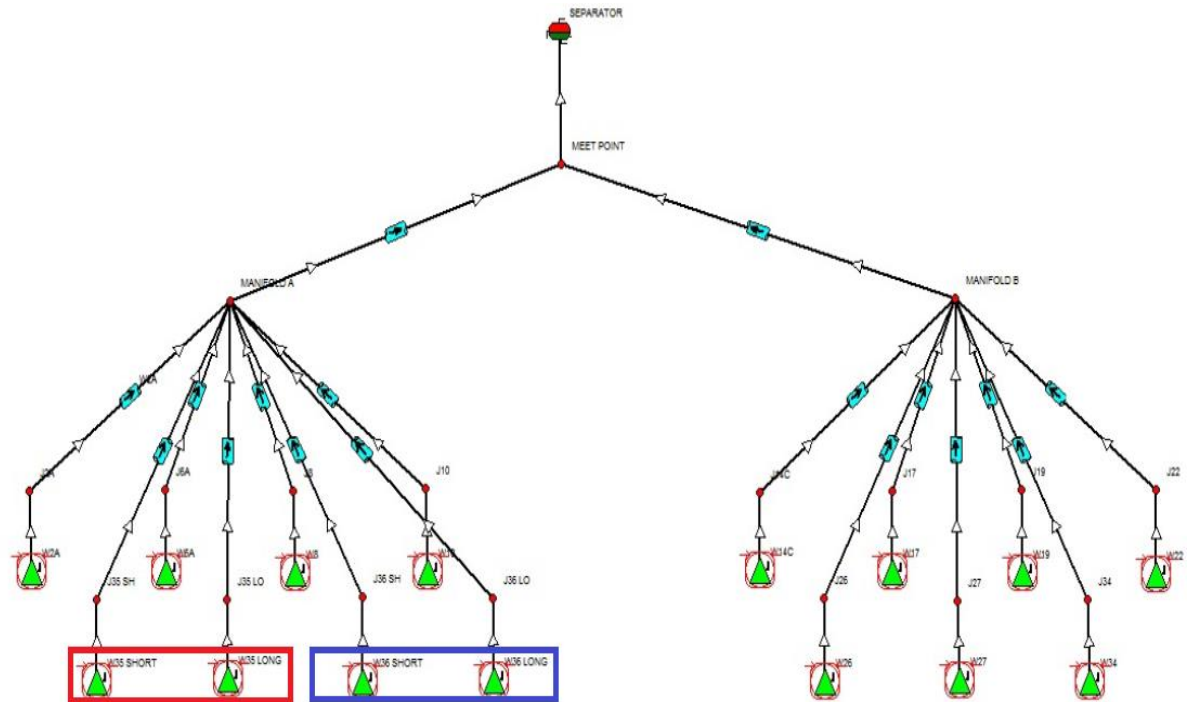
- System Type: Production – Η επιλογή αυτή υποδηλώνει πως το σύστημα είναι παραγωγικό και μπορεί να περιέχει πετρέλαιο (oil), αέριο (gas) ή συμπυκνώματα (condensate). Οι άλλες επιλογές είναι η εισπίεση νερού (water injection) και η εισπίεση αερίου (gas injection) για την υποβοήθηση της παραγωγής.
- Optimization Method: Production – Η συγκεκριμένη επιλογή βασίζεται στην βελτιστοποίηση του ρυθμού παραγωγής του ρευστού (πετρέλαιο). Το GAP θα υπολογίσει τον μέγιστο ρυθμό που θα μπορούσε να επιτευχθεί, λαμβάνοντας πάντα υπ' όψη τους περιορισμούς που ετέθησαν. Η άλλη επιλογή είναι η βελτιστοποίηση των εσόδων (revenue), η οποία βελτιστοποιεί με βάση τα έσοδα από το πετρέλαιο ή το φυσικό αέριο.



Σχήμα 7.10: Επιλογές συστήματος (57) (Πηγή: GAP)

### 7.3.2 Σχεδιασμός του πεδίου γεωτρήσεων

Ο σχεδιασμός του συστήματος έγινε με βάση το παραγωγικό σύστημα γεωτρήσεων του πεδίου OILFIELD. Το παρακάτω δίκτυο (Σχήμα 7.11) δημιουργήθηκε για την εύρεση της βέλτιστης κατανομής του αερίου gas lift στην κάθε γεώτρηση του πεδίου. Ως δεδομένα παραγωγής εισήχθησαν τα μοντέλα γεωτρήσεων από το PROSPER.



Σχήμα 7.11: Δίκτυο παραγωγικού πεδίου OILFIELD (58)

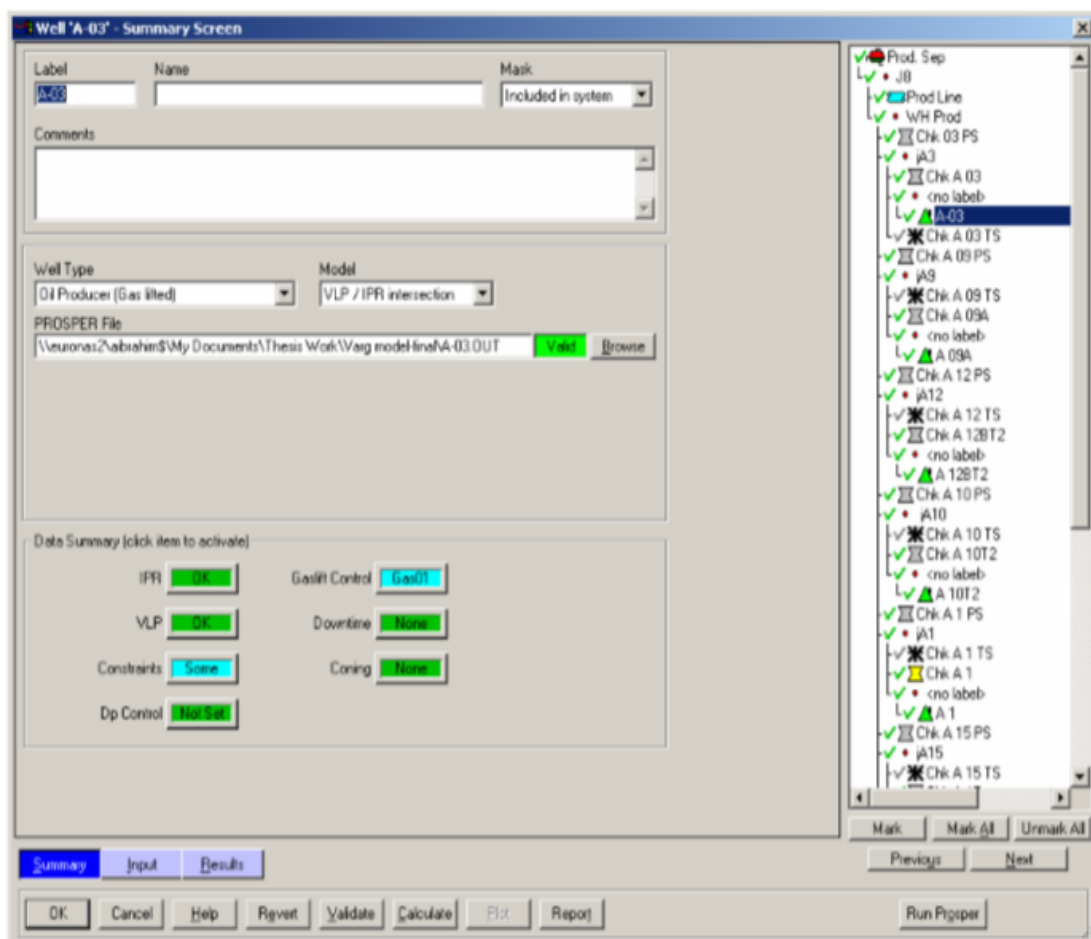
Όπως φαίνεται και στο παραπάνω Σχήμα 7.11, το δίκτυο του παραγωγικού συστήματος του πεδίου OILFIELD περιλαμβάνει 13 γεωτρήσεις. Οι γεωτρήσεις με το κόκκινο και το μπλε πλαίσιο είναι οι γεωτρήσεις με την διπλή σωλήνωση, A-5 και A-6, οι οποίες όμως στο GAP σχεδιάζονται σαν να επρόκειτο για δύο γεωτρήσεις η κάθε μία. Δηλαδή, για παράδειγμα, η γεώτρηση A-5 (κόκκινο πλαίσιο) περιλαμβάνει μία εξωτερική μεγάλη και μία εσωτερική μικρή παραγωγική σωλήνωση, οι οποίες είχαν ήδη σχεδιαστεί από το PROSPER σαν διαφορετικές γεωτρήσεις. Επομένως, και το GAP θα τις θεωρήσει σαν δύο ανεξάρτητα παραγωγικά συστήματα.

Η ροή κάθε γεώτρησης προς την επιφάνεια συνδέεται μέσω σωληνώσεων με τις πολλαπλές γραμμές διανομής (manifolds), όπου συγκεντρώνεται όλο το ρευστό για να αρχίσει να ρέει προς τον διαχωριστήρα (separator). Το σημείο συνάντησης (meet point) των γραμμών διανομής είναι η πλατφόρμα D, στην οποία συγκεντρώνεται όλο το ρευστό, από τις πλατφόρμες A και B, απ' όπου οδηγείται στον διαχωριστήρα.

### 7.3.3 Περιγραφή των γεωτρήσεων

Μία γεώτρηση αναλύεται στην οθόνη σύνοψης. Αυτή είναι η κύρια οθόνη στην οποία εισάγονται όλα τα δεδομένα μίας γεώτρησης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.12. Στην οθόνη αυτή υπάρχουν καρτέλες οι οποίες επιτρέπουν την εισαγωγή γενικών στοιχείων, όπως του τύπου της γεώτρησης, την ονομασία της, το μοντέλο βελτιστοποίησης κ.α., τα οποία είναι απαραίτητα για την βελτιστοποίηση της παραγωγής. Κάποιες από τις επιλογές που δίνει η οθόνη αυτή είναι οι εξής:

- Well type: Oil producer (Gas lifted). Η επιλογή αυτή προσδιορίζει τον τύπο της γεώτρησης και τον τύπο του μηχανισμού υποβοήθησης της παραγωγής, αν χρησιμοποιείται κάποιος. Οι άλλες επιλογές που υπάρχουν είναι η εισπίεση αερίου, παραγωγή αερίου, παραγωγή πετρελαίου (μέθοδος ESP), παραγωγή πετρελαίου, παραγωγή συμπυκνώματος, εισπίεση νερού, παραγωγή νερού.
- Model: VLP/IPR intersection. Με την επιλογή αυτή, ο ρυθμός παραγωγής της γεώτρησης θα υπολογίζεται με βάση την τομή της VLP με την IPR, οι οποίες έχουν υπολογιστεί και σχεδιάσκει από το PROSPER. Οι εναλλακτικές επιλογές που υπάρχουν είναι η Performance Curve, η PC interpolation, η Outflow only.

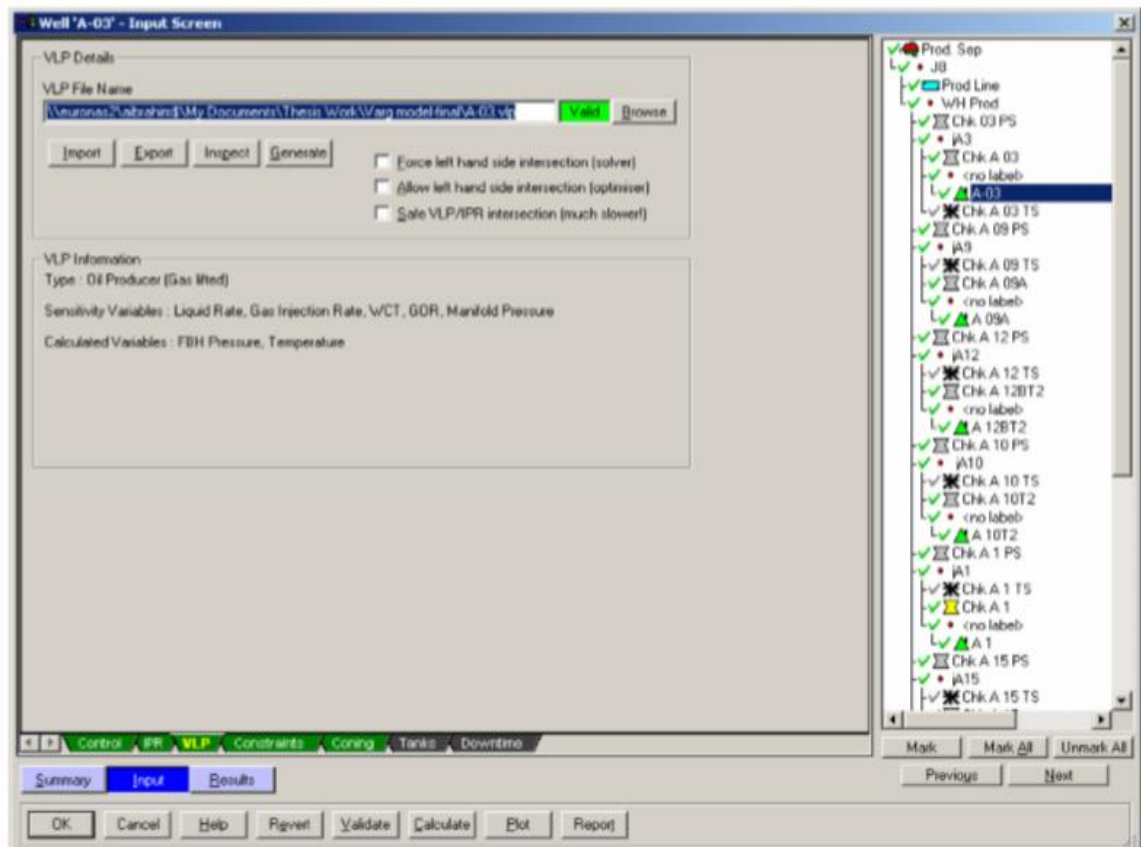


Σχήμα 7.12: Κύρια οθόνη δεδομένων της γεώτρησης (59) (Πηγή: GAP)

### Δεδομένα IPR

Η οθόνη αυτή (Σχήμα 7.13) εμφανίζει τα δεδομένα της IPR, όπως τον συντελεστή παραγωγικότητας (PI), την πίεση και την θερμοκρασία του ταμειυτήρα και τα δεδομένα PVT, τα οποία εισήχθησαν αυτόματα με την του αρχείου .Out του PROSPER.





Σχήμα 7.14: Οθόνη εισαγωγής της καμπύλης VLP από το PROSPER (61) (Πηγή: GAP)

	Liquid Rate	Manifold Pressure	GOR	WCT	GLR injected		
	STB/day	psig	scf/STB	percent	scf/STB		
1	2	100	649	85	0		
2	212.42105	175			444.44446		
3	422.8421	250			888.88892		
4	633.26318	325			1333.3334		
5	843.6842	400			1777.7778		
6	1054.1052				2222.2222		
7	1264.5264				2666.6667		
8	1474.9474				3111.1111		
9	1685.3684				3555.5557		
10	1895.7894				4000		
11	2106.2104						
12	2316.6316						
13	2527.0527						
14	2737.4736						
15	2947.8948						
16	3158.3157						
17	3368.7368						
18	3579.158						
19	3789.5789						
20	4000						
	Populate	Populate	Populate	Populate	Populate	Populate	Populate

Σχήμα 7.15: Δεδομένα για την εισαγωγή των καμπυλών VLP (62) (Πηγή: GAP)



### Περιορισμοί γεώτρησης

Η επιλογή των περιορισμών του συστήματος (Constrains) (Σχήμα 7.16) χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό των ανώτερων και των κατώτερων ορίων, όσον αφορά την θερμοκρασία, την διαφορά πίεσης του ταμιευτήρα με τον πυθμένα της γεώτρησης, τον ρυθμό παραγωγής, την ποσότητα του εγχεόμενου αερίου κ.α. Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκαν μόνο τα ανώτερα και κατώτερα όρια έγχυσης αερίου και η μέγιστη παροχή πετρελαίου.

Constraint	Value	Binding	Potential	Unit
Maximum Temperature		Yes	No	deg F
Minimum PWF		Yes	Yes	psig
Maximum Drawdown		Yes	Yes	psi
Well Optimisation Weighting				
Maximum liquid rate	5000	Yes	No	STB/day
Maximum gas rate		Yes	No	MMscf/day
Maximum gas injection rate	0.55	Yes	No	MMscf/day
Minimum gas injection rate	0.2	No	No	MMscf/day
NO-CLOSE Minimum gas injection rate	0.2	Yes	No	MMscf/day
Max Erosional Velocity		Yes	No	ft/sec

Σχήμα 7.16 : Περιορισμοί γεώτρησης (63) (Πηγή: GAP)

## **7.4 Επίλυση του συστήματος (Network Solver Calculation)**

Στο GAP, η επίλυση του συστήματος (network solver calculation) παρέχει τρεις επιλογές για το πως θα διεξαχθούν οι υπολογισμοί:

- No optimization. Η επιλογή αυτή εκτελεί τους υπολογισμούς χωρίς όμως να βελτιστοποιεί την κατανομή του εγχεόμενου αερίου.
- Optimization and honor constrains. Η επιλογή αυτή εκτελεί τους υπολογισμούς με βελτιστοποίηση της κατανομής του αερίου σε όλες τις γεωτρήσεις του πεδίου, λαμβάνοντας υπ' όψη τους περιορισμούς που έχουν τεθεί.
- Optimize, no constrains. Η επιλογή αυτή εκτελεί τους υπολογισμούς με βελτιστοποίηση της κατανομής του αερίου σε όλες τις γεωτρήσεις του πεδίου, χωρίς όμως να λαμβάνει υπ' όψη τους περιορισμούς που έχουν τεθεί.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8<sup>ο</sup>

### ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

#### 8.1 Ανάλυση αποτελεσμάτων PROSPER

Μετά από την ανάλυση της παραγωγής και τον σχεδιασμό της απόδοσης και της βελτιστοποίησης ολόκληρου του συστήματος του πεδίου OILFIELD, μέσω των προγραμμάτων PROSPER και GAP, θα παρουσιαστούν και θα αναλυθούν τα αποτελέσματα από αυτά τα δύο προγράμματα.

##### 8.1.1 Έλεγχος ποιότητας των δεδομένων PVT.

Όπως αναφέρθηκε και στην Ενότητα 6.3.3, για την πρόβλεψη της μεταβολής της πίεσης και της θερμοκρασίας του ρευστού, κατά μήκος της παραγωγικής στήλης, είναι απαραίτητο να προβλεφθούν με ακρίβεια οι ιδιότητες του ρευστού σαν συνάρτηση της πίεσης και της θερμοκρασίας. Αφού εισάχθηκε ένα πλήρες σετ δεδομένων PVT για την περιγραφή των ιδιοτήτων του ρευστού (GOR, πυκνότητα API, πυκνότητα αερίου, αλατότητα νερού, μόρια % των H<sub>2</sub>S, CO<sub>2</sub> και N<sub>2</sub>), το λογισμικό υπολόγισε τις ιδιότητες PVT και προχώρησε στη διαδικασία αντιστοίχισης. Εξετάζοντας προσεκτικά τις παραμέτρους αντιστοίχιας του PROSPER, οι παρακάτω συσχετισμοί (πίνακας 8.1) προσδιορίστηκαν ως οι καλύτεροι συνολικά για τα δεδομένα PVT για την κάθε γεώτρηση:

*Πίνακας 8.1: Επιλεγμένες συσχετίσεις για τα δεδομένα PVT (5)*

Γεωτρήσεις	Pb, Rs, Bo	Oil viscosity (μo)	Standard deviation
<b>A-1</b>	Al-Marhoun	Beal et al	0.072887
<b>A-2</b>	Al-Marhoun	Beal et al	0.094660
<b>A-3</b>	Lasater	Beggs et al	0
<b>A-4</b>	Lasater	Beggs et al	0
<b>B-1</b>	Al-Marhoun	Beggs et al	0.080362
<b>B-2</b>	Al-Marhoun	Beal et al	0.1046
<b>B-3</b>	Al-Marhoun	Beal et al	0.072887
<b>B-4</b>	Al-Marhoun	Beal et al	0.072887
<b>B-5</b>	Lasater	Beggs et al	0

<b>B-6</b>	Al-Marhoun	Beggs et al	0.42872
<b>B-7</b>	Lasater	Beggs et al	0
<b>A-5 short string</b>	Al-Marhoun	Beggs et al	0.078743
<b>A-5 long string</b>	Lasater	Beggs et al	0
<b>A-6 short string</b>	Lasater	Beggs et al	0.0000415
<b>A-6 long string</b>	Lasater	Beggs et al	0

### 8.1.2 Έλεγχος του εξοπλισμού

Για την ανάπτυξη του μοντέλου της γεώτρησης στο PROSPER, είναι σημαντικό να καθοριστούν σωστά τα δεδομένα της κλίσης της γεώτρησης (deviation survey) και του υπόγειου εξοπλισμού.

#### Κλίση γεώτρησης

Το PROPER επιτρέπει μόνο 20 ζεύγη δεδομένων για το μετρούμενο βάθος (measured depth) και το αντίστοιχο πραγματικό κάθετο βάθος, χωρίς να είναι αναγκαστικό να τοποθετηθούν και τα 20. Σε αυτή την εργασία επιλέχθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν 10 έως 18 ζεύγη δεδομένων, τα οποία υποδεικνύουν σημαντικές αλλαγές στην κλίση της γεώτρησης. Τα ζεύγη που χρησιμοποιήθηκαν για την κάθε γεώτρηση δίνονται σε πίνακες στο παράρτημα Α που βρίσκεται στο τέλος της διπλωματικής εργασίας.

Οι γωνίες απόκλισης όλων των γεωτρήσεων υπολογίστηκαν από το PROSPER. Όλες οι γεωτρήσεις σε αυτή την εργασία είναι υποθαλάσσιες με βάθος νερού περίπου 30 μέτρα.

#### Υπόγειος εξοπλισμός

Στο PROSPER, θα πρέπει να περιγράφεται ο εξοπλισμός μέσα από τον οποίο ρέει το παραγόμενο ρευστό. Επομένως, τοποθετήθηκε ο εξοπλισμός από το Xmas tree έως τα διατρήματα των ζωνών του ταμιευτήρα. Τα δεδομένα του υπόγειου εξοπλισμού που χρησιμοποιήθηκαν, αναγράφονται σε πίνακες στο παράρτημα Α. Σύμφωνα με το PROSPER, οι βαλβίδες ασφαλείας (SSSVs – Sub-Surface Safety Valves) δεν έχουν μήκος αλλά μοντελοποιούνται σαν αιχμηρά αντικείμενα τα οποία παρεμβάλλονται μεταξύ γειτονικών στοιχείων της σωλήνωσης. Η εσωτερική τραχύτητα των σωληνώσεων θεωρείται πως είναι 0.0006 ίντσες. Οι θέσεις των βαλβίδων έγχυσης αερίου gas lift εισάγονται από το τμήμα με τα δεδομένα για το gas lift και όχι στον υπόγειο εξοπλισμό.

### 8.1.3 Έλεγχος ποιότητας (Quality check) δεδομένων τεστ παραγωγής

Ένα μοντέλο το οποίο έχει συσχετιστεί σωστά με τα δεδομένα, είναι μία απαραίτητη προϋπόθεση για την ακριβή μελέτη πρόβλεψης της απόδοσης και βελτιστοποίησης της παραγωγής. Έτσι, η ποιότητα ελέγχου των δεδομένων των δοκιμών παραγωγής, είναι σημαντική για την ακριβή πρόβλεψη των επιδόσεων του μοντέλου. Σε αυτή τη διπλωματική εργασία, έγινε έλεγχος ποιότητας δεδομένων (Πίνακας 8.2), μόνο ενός τεστ παραγωγής για την κάθε γεώτρηση.

Πίνακας 8.2: Δεδομένα από τεστ παραγωγής για την κάθε γεώτρηση (6)

well	Tubing head pressure psig	Tubing head temperature C	Water cut %	Liquid rate STB/d	Gauge depth m	Gauge pressure psig	Reservoir pressure psig	GOR	GOR free	Gas lift gas rate $m^3/d$	Injection depth m
<b>A-1</b>	300	180	97	1,780	2,510	3,200	3,940	649	0	10,720	1,401.4
<b>A-2</b>	260	130	83	679	2,700	1,900	2,270	649	0	26,880	2,253.4
<b>A-3</b>	275	135	87	180	2,676	2,200	3,100	667	0	24,000	2,100.6
<b>A-4</b>	203	123	87	640	2,580	2,500	2,950	641	0	24,720	1,722
<b>B-1</b>	270	203	92	1,566	2,750	2,900	3,580	685	0	10,320	1,705
<b>B-2</b>	250	132.8	94	874	2,690	2,779	3,500	649	0	24,190	2,098
<b>B-3</b>	330	105	92	182	1,800	1,750	4,050	649	0	12,770	1,399
<b>B-4</b>	300	190	93	1,600	2,610	3,380	3,550	649	0	25,840	1,007
<b>B-5</b>	230	160	93	2,250	2,700	3,220	3,500	691	0	26,505	1,950
<b>B-6</b>	270	80	35	570	2,100	1,800	3,320	667	0	24,800	1,900
<b>B-7</b>	260	130	60	1,150	2,450	2,900	3,750	691	0	22,640	1,202
<b>A-5 short string</b>	280	85	4	1,100	2,600	2,000	2,300	972	0	21,000	1,265
<b>A-5 long string</b>	280	85	20	450	2,700	2,100	2,410	667	0	24,000	1,265

Με τον έλεγχο ποιότητας διαπιστώθηκε, από τα διαγράμματα βάθους-πίεσης (παράρτημα) ότι τα τρέχοντα δεδομένα από τα τεστ είναι από μέτριας ποιότητας έως καλής. Σε κάποιες γεωτρήσεις το σημείο του τεστ δεν είναι μέσα στο φάκελο που σχηματίζουν οι συσχετίσεις Duns and Ross modified και Fancher and Brown, αλλά συμπίπτουν με την τελευταία, δηλαδή βρίσκονται στο

άκρο του επιτρεπόμενου ορίου. Οι σχηματικές παραστάσεις για την κάθε γεώτρηση παρουσιάζονται στο παράρτημα B1.

#### 8.1.4 Ρύθμιση (match) της συσχέτισης με τα δεδομένα του τεστ παραγωγής

Αυτή η επιλογή του PROSPER επιτρέπει την ρύθμιση των συσχετίσεων ροής έτσι ώστε να ταιριάζουν με τη ρέουσα πίεση του πυθμένα της γεώτρησης. Το PROSPER χρησιμοποιεί μη - γραμμική παλινδρόμηση για να συντονίσει τις συσχετίσεις των καμπυλών VLP, με σκοπό να ταιριάζουν καλύτερα με τα στοιχεία των μετρήσεων. Οι όροι της βαρύτητας και της τριβής των εξισώσεων της πτώσης πίεσης ρυθμίζονται με τις παραμέτρους 1 και 2 (Ενότητα 6.3.7) και η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου τα μετρούμενα και τα υπολογιζόμενα μεγέθη συμφωνούν εντός του ενός psi ή έως ότου ολοκληρωθούν οι 50 επαναλήψεις που πραγματοποιεί το πρόγραμμα. Τα αποτελέσματα για τις γεωτρήσεις του πεδίου X παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα 8.3, ενώ τα αναλυτικά αποτελέσματα με όλες τις συσχετίσεις για όλες τις γεωτρήσεις παρουσιάζονται στον παράρτημα B2.

Πίνακας 8.3: Αποτελέσματα συσχετίσεων για τις γεωτρήσεις του πεδίου OILFIELD (7)

Γεωτρήσεις	Συσχέτιση	Παράμετρος 1	Παράμετρος 2
<b>A-1</b>	Petroleum Experts 2	1.10154	1
<b>A-2</b>	Petroleum Experts 2	1.23919	1
<b>A-3</b>	Petroleum Experts 2	1.35696	1
<b>A-4</b>	Petroleum Experts 3	0.94316	0.70004
<b>B-1</b>	Petroleum Experts 2	0.9551	0.99974
<b>B-2</b>	Petroleum Experts 2	1.49877	1
<b>B-3</b>	Petroleum Experts 2	1.48999	1
<b>B-4</b>	Petroleum Experts 2	1.14462	1
<b>B-5</b>	Petroleum Experts 2	1.06428	1.83375
<b>B-6</b>	Petroleum Experts 2	1.66916	1
<b>B-7</b>	Petroleum Experts 2	1.233	1
<b>A-5 short string</b>	Petroleum Experts 2	0.96518	1
<b>A-5 long string</b>	Petroleum Experts 2	0.94452	1

Όπως φαίνεται και από τον παραπάνω Πίνακα 8.3, κάποιες γεωτρήσεις, και ποιο συγκεκριμένα οι A-1, A-4, A-5, B-1, B-4, B-5 και B-7 παρουσιάζουν καλή ταύτιση με τις συσχετίσεις πράγμα που υποδεικνύει πως τα δεδομένα από τα παραγωγικά τεστ είναι αντιπροσωπευτικά για την κάθε γεώτρηση. Όμως, από την άλλη μεριά, οι υπόλοιπες γεωτρήσεις, παρουσιάζουν μία απόκλιση μεγαλύτερη από του επιτρεπόμενου ορίου (10%). Το γεγονός αυτό μπορεί να οφείλεται, μάλλον, σε λάθος δεδομένα από τα τεστ παραγωγής. Όπως έχει αναφερθεί στα προηγούμενα κεφάλαια, κάποιες γεωτρήσεις του πεδίου OILFIELD, εμφανίζουν συχνά μία τάση για σχηματισμό ασφαλτενίων και αλάτων. Το γεγονός αυτό, εμποδίζει την διαδρομή του μετρητή πίεσης (gauge) μέχρι τον πυθμένα της γεώτρησης και κατά συνέπεια εμποδίζει την διεξαγωγή των τεστ. Επίσης, υπάρχει μεγάλη περίπτωση να ληφθούν λανθασμένες μετρήσεις, λόγω του ότι ο μετρητής δεν μπορεί να φτάσει στο επιθυμητό βάθος για την μέτρηση της πίεσης.

#### **8.1.5 Ρύθμιση (match) της IPR**

Αυτή η λειτουργία επιτρέπει τον έλεγχο της συνέπειας των δεδομένων πίεσης του πυθμένα της γεώτρησης και την ρύθμιση της IPR έτσι ώστε να ταιριάζει με τα στοιχεία των μετρήσεων. Όταν είχε επιλεγεί η επιθυμητή συσχέτιση για την VLP, εμφανίζεται η οθόνη για την IPR. Όταν το σημείο δοκιμής δεν είναι σύμφωνο με το μοντέλο της IPR, τότε ρυθμίζεται είτε ο συντελεστής παραγωγικότητας είτε η πίεση του ταμιευτήρα μέχρι να υπάρξει ταύτιση. Το ταίριασμα τόσο της VLP όσο και της IPR στα πραγματικά δεδομένα από τα τεστ, διασφαλίζει ότι τα μοντέλα που δημιουργήθηκαν είναι ικανά να αναπαράγουν με ακρίβεια τις τρέχουσες γνωστές συνθήκες παραγωγής. Οι καμπύλες VLP/IPR πριν από την ρύθμιση αυτή παρουσιάζονται στο παράρτημα B3.

#### **8.1.6 Σύγκριση δεδομένων των τεστ με τα δεδομένα του PROSPER**

Για τον ακριβή έλεγχο των δεδομένων από τα τεστ, όλες οι παράμετροι παραγωγής θα πρέπει να συγκριθούν με τα υπολογιζόμενα δεδομένα του PROSPER. Η απόκλιση των τιμών βρέθηκε να είναι από 1.58% έως 3.32% για όλες τις γεωτρήσεις, εκτός από την A-5 (short string) που είναι 8.47% και την B-3 με 15.54%. Τα αποτελέσματα αυτά δείχνουν πως όλα τα μοντέλα, πλην των γεωτρήσεων A-5 (short string) και B-3, σχεδιάστηκαν στο PROSPER με ακρίβεια. Το γεγονός ότι οι δύο τελευταίες έχουν μεγάλη απόκλιση, οφείλετε μάλλον σε λάθος δεδομένα από τα τεστ παραγωγής. Τα δεδομένα σύγκρισης παρουσιάζονται στους ακόλουθους πίνακες:

Πίνακας 8.4: Σύγκριση γεώτρησης A-1 (8)

Well A-1					
	Liquid rate (STB/d)	Oil rate (STB/d)	Water rate (STB/d)	Gas rate ( $m^3$ /d)	BHP (psig)
<b>Well test data</b>	1780	53.4	1726.6	9764.1	3610.1
<b>PROSPER data</b>	1808.1	54.2	1753.9	9918.6	3616
<b>Deviation (%)</b>	1.58	1.58	1.58	1.58	0.16

Πίνακας 8.5: Σύγκριση γεώτρησης A-2 (9)

Well A-2					
	Liquid rate (STB/d)	Oil rate (STB/d)	Water rate (STB/d)	Gas rate ( $m^3$ /d)	BHP (psig)
<b>Well test data</b>	679	115.4	563.5	21106.3	1979.6
<b>PROSPER data</b>	656.8	111.6	545.2	20418.6	1966.44
<b>Deviation (%)</b>	3.25	3.25	3.25	3.25	0.66

Πίνακας 8.6: Σύγκριση γεώτρησης A-3 (10)

Well A-3					
	Liquid rate (STB/d)	Oil rate (STB/d)	Water rate (STB/d)	Gas rate ( $m^3$ /d)	BHP (psig)
<b>Well test data</b>	180	23.4	156.6	4278.7	2792.5
<b>PROSPER data</b>	184.5	23.9	160.5	4386.2	2798.4
<b>Deviation (%)</b>	2.5	2.5	2.5	2.5	0.2

Πίνακας 8.7: Σύγκριση γεώτρησης A-4 (11)

Well A-4					
	Liquid rate (STB/d)	Oil rate (STB/d)	Water rate (STB/d)	Gas rate ( $m^3/d$ )	BHP (psig)
<b>Well test data</b>	640	83.2	556.8	16197.6	2815.6
<b>PROSPER data</b>	622.4	80.9	541.5	15753.6	2794.3
<b>Deviation (%)</b>	2.74	2.74	2.74	2.74	0.75

Πίνακας 8.8: Σύγκριση γεώτρησης A-5 (short string) (12)

Well A-5 (short string)					
	Liquid rate (STB/d)	Oil rate (STB/d)	Water rate (STB/d)	Gas rate ( $m^3/d$ )	BHP (psig)
<b>Well test data</b>	1100	1056	44	28918.7	2214
<b>PROSPER data</b>	1006.8	966.5	40.3	26468	2188.1
<b>Deviation (%)</b>	8.47	8.47	8.47	8.47	1.16

Πίνακας 8.9: Σύγκριση γεώτρησης A-5 (long string) (13)

Well A-5 (long string)					
	Liquid rate (STB/d)	Oil rate (STB/d)	Water rate (STB/d)	Gas rate ( $m^3/d$ )	BHP (psig)
<b>Well test data</b>	450	360	90	676151	2348.6
<b>PROSPER data</b>	440.7	352.6	88.1	66262.6	2345.4
<b>Deviation (%)</b>	2.05	2.05	2.05	2.05	0.13



Πίνακας 8.10: Σύγκριση γεώτρησης B-1 (14)

Well B-1					
	Liquid rate (STB/d)	Oil rate (STB/d)	Water rate (STB/d)	Gas rate ( $m^3$ /d)	BHP (psig)
<b>Well test data</b>	1566	125.2	1440.7	24178	2965.5
<b>PROSPER data</b>	1516.2	121.3	1394.9	23409.3	2940.29
<b>Deviation (%)</b>	3.17	3.17	3.17	3.17	0.85

Πίνακας 8.11: Σύγκριση γεώτρησης B-2 (15)

Well B-2					
	Liquid rate (STB/d)	Oil rate (STB/d)	Water rate (STB/d)	Gas rate ( $m^3$ /d)	BHP (psig)
<b>Well test data</b>	874	52.4	821.5	9588.6	2854.4
<b>PROSPER data</b>	844.9	50.7	794.2	9269.6	2834
<b>Deviation (%)</b>	3.32	3.32	3.32	3.32	0.71

Πίνακας 8.12: Σύγκριση γεώτρησης B-3 (16)

Well B-3					
	Liquid rate (STB/d)	Oil rate (STB/d)	Water rate (STB/d)	Gas rate ( $m^3$ /d)	BHP (psig)
<b>Well test data</b>	182	14.5	167.4	2662.3	4037.3
<b>PROSPER data</b>	153.7	12.3	141.4	2248.3	3985.3
<b>Deviation (%)</b>	15.54	15.54	15.54	15.54	1.28

Πίνακας 8.13: Σύγκριση γεώτρησης B-4 (17)

Well B-4					
	Liquid rate (STB/d)	Oil rate (STB/d)	Water rate (STB/d)	Gas rate ( $m^3$ /d)	BHP (psig)
<b>Well test data</b>	1600	112	1488	20479.1	3472.6
<b>PROSPER data</b>	1633.9	114.3	1519.5	20913.7	3478.7
<b>Deviation (%)</b>	2.12	2.12	2.12	2.12	0.17

Πίνακας 8.14: Σύγκριση γεώτρησης B-5 (18)

Well B-5					
	Liquid rate (STB/d)	Oil rate (STB/d)	Water rate (STB/d)	Gas rate ( $m^3$ /d)	BHP (psig)
<b>Well test data</b>	2,250	157.5	2,092.5	30,662.5	3,391.2
<b>PROSPER data</b>	2,258	158	2,100	30,772.5	3,395.2
<b>Deviation (%)</b>	0.35	0.35	0.35	0.35	0.11

Πίνακας 8.15: Σύγκριση γεώτρησης B-6 (19)

Well B-6					
	Liquid rate (STB/d)	Oil rate (STB/d)	Water rate (STB/d)	Gas rate ( $m^3$ /d)	BHP (psig)
<b>Well test data</b>	570	370.5	199.5	69624	3202.3
<b>PROSPER data</b>	582.2	378.4	203.8	71123.8	3209.5
<b>Deviation (%)</b>	2.15	2.15	2.15	2.15	0.22

Πίνακας 8.16: Σύγκριση γεώτρησης B-7 (20)

Well B-7					
	Liquid rate (STB/d)	Oil rate (STB/d)	Water rate (STB/d)	Gas rate ( $m^3/d$ )	BHP (psig)
<b>Well test data</b>	900	360	540	70,085.6	3,652.2
<b>PROSPER data</b>	879.6	351.8	527.7	68,496	3,644.6
<b>Deviation (%)</b>	2.26	2.26	2.26	2.26	0.2

## 8.2 Ανάλυση αποτελεσμάτων GAP

Σε αυτή την ενότητα θα αναλυθούν και θα επεξηγηθούν τα αποτελέσματα από τη βελτιστοποίηση του συνολικού συστήματος του προγράμματος GAP.

### 8.2.1 Καθορισμός των περιορισμών του συστήματος

Το εργαλείο βελτιστοποίησης του GAP κατανέμει το διαθέσιμο αέριο gas lift σε όλες τις γεωτρήσεις παραγωγής, με σκοπό τη μεγιστοποίηση της παραγωγής, τιμώντας όμως τους περιορισμούς του συστήματος. Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν οι ακόλουθοι περιορισμοί για την κάθε γεώτρηση:

Πίνακας 8.17: Περιορισμοί γεωτρήσεων (21)

Γεωτρήσεις	Μέγιστος ρυθμός έγχυσης (MMscf/day)	Ελάχιστος ρυθμός έγχυσης (MMscf/day)
<b>A-1</b>	0.55	0.20
<b>A-2</b>	0.90	0.50
<b>A-3</b>	0.80	0.60
<b>A-4</b>	0.95	0.70
<b>B-1</b>	0.65	0.10
<b>B-2</b>	0.80	0.60
<b>B-3</b>	0.60	0.30
<b>B-4</b>	0.85	0.60

<b>B-5</b>	1.10	0.70
<b>B-6</b>	0.80	0.60
<b>B-7</b>	1.40	0.70
<b>A-5 short string</b>	0.80	0.50
<b>A-5 long string</b>	0.80	0.50
<b>A-6 short string</b>	0.80	0.40
<b>A-6 long string</b>	0.80	0.40

### 8.2.3 Βελτιστοποίηση της παραγωγής

Στο πεδίο OILFIELD, το παραγόμενο ρευστό υφίσταται επεξεργασία από έναν διαχωριστήρα ο οποίος λειτουργεί με πίεση 250 psi. Για την βελτιστοποίηση του συστήματος δοκιμάστηκαν τρεις διαφορετικές περιπτώσεις έγχυσης αερίου gas lift, 260,000, 270,000 και 280,000  $m^3/day$  από τις οποίες η τιμή 270,000  $m^3/day$  προσεγγίζει καλύτερα το διαθέσιμο αέριο για το πεδίο OILFIELD. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο Σχήμα 8.1.

Report item Gas Lift Injection Rate MMscf/day										
Total										
Gaslift available	260	270	280							1000m3/d
Oil produced	3643.58	3679.9013	3716.9805							STB/day
Gas produced	2.8945128	2.9197013	2.9453105							MMscf/day
Water produced	7535.5322	7856.2737	8268.3969							STB/day
Liquid produced	11179.112	11536.175	11985.377							STB/day
Oil Rate potential	3775.2164	3747.0228	3828.9812							STB/day
Gas Rate potential	3.0256976	3.0056643	3.0624879							MMscf/day
Water Rate potential	2273.0002	1672.2259	3143.1849							STB/day
Liquid Rate potential	6048.2166	5419.2487	6972.1661							STB/day
Gross Heating Value	3723.5325	3745.4165	3767.5096							MMBTU/d
Specific Gross Heating Value	1286.4315	1282.8081	1279.1553							BTU/scf
By Item										
Well - W10	0.700	0.700	0.700							MMscf/day
Well - W14C	0.178	0.293	0.571							MMscf/day
Well - W17	0.600	0.600	0.600							MMscf/day
Well - W19	0.300	0.300	0.300							MMscf/day
Well - W22	0.600	0.614	0.630							MMscf/day
Well - W26	0.700	0.700	0.700							MMscf/day
Well - W27	0.800	0.800	0.800							MMscf/day
Well - W2A	0.200	0.200	0.200							MMscf/day
Well - W34	0.700	0.822	0.876							MMscf/day
Well - W35 LONG	0.800	0.800	0.800							MMscf/day
Well - W35 SHORT	0.800	0.800	0.800							MMscf/day
Well - W36 LONG	0.800	0.800	0.800							MMscf/day
Well - W36 SHORT	0.800	0.800	0.800							MMscf/day
Well - W6A	0.650	0.755	0.762							MMscf/day
Well - W8	0.600	0.600	0.600							MMscf/day

Σχήμα 8.1: Παρουσίαση αποτελεσμάτων βελτιστοποίησης με βάση τον ρυθμό έγχυσης αερίου (64)

Report item	Oil Rate										STB/day
Total											
Gaslift available	260	270	280								1000m3/d
Oil produced	3643.58	3679.9013	3716.9805								STB/day
Gas produced	2.8945128	2.9197013	2.9453105								MMscf/day
Water produced	7535.5322	7856.2737	8268.3969								STB/day
Liquid produced	11179.112	11536.175	11985.377								STB/day
Oil Rate potential	3775.2164	3747.0228	3828.9812								STB/day
Gas Rate potential	3.0256976	3.0056643	3.0624879								MMscf/day
Water Rate potential	2273.0002	1672.2259	3143.1849								STB/day
Liquid Rate potential	6048.2166	5419.2487	6972.1661								STB/day
Gross Heating Value	3723.5925	3745.4165	3767.5096								MMBTU/d
Specific Gross Heating Value	1286.4315	1282.8081	1279.1553								BTU/scf
By Item											
Well - W10	75.1	75.1	75.1								STB/day
Well - W14C	70.5	91.6	124.6								STB/day
Well - W17	42.0	42.0	42.0								STB/day
Well - W19	15.3	15.3	15.3								STB/day
Well - W22	90.3	92.0	94.1								STB/day
Well - W26	85.2	85.2	85.2								STB/day
Well - W27	213.5	213.5	213.5								STB/day
Well - W2A	31.5	31.5	31.5								STB/day
Well - W34	410.1	413.6	415.0								STB/day
Well - W35 LONG	425.8	425.8	425.8								STB/day
Well - W35 SHORT	1234.8	1234.8	1234.8								STB/day
Well - W36 LONG	448.9	448.9	448.9								STB/day
Well - W36 SHORT	401.1	401.1	401.1								STB/day
Well - W6A	85.3	95.3	95.8								STB/day
Well - W8	14.2	14.2	14.2								STB/day

Σχήμα 8.1: Παρουσίαση αποτελεσμάτων βελτιστοποίησης με βάση την παραγωγή πετρελαίου (65)

Με βάση τα παραπάνω, τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης της παραγωγικής διαδικασίας είναι:

**Βέλτιστη έγχυση αερίου gas lift (σύνολο) :**  $270,768 \text{ m}^3/\text{day}$

**Μέγιστη ποσότητα παραγωγής πετρελαίου :**  $3,679 \text{ m}^3/\text{day}$



## Σύνοψη

Ο προσδιορισμός του βέλτιστου ρυθμού έγχυσης αερίου gas lift, ο οποίος αντιστοιχεί στην μέγιστη δυνατή ποσότητα παραγόμενου πετρελαίου, είναι σημαντική διότι η χρήση υπερβολικής ποσότητας αερίου μειώνει την παραγωγή πετρελαίου και αυξάνει τις ανάγκες για φυσικό αέριο, ενώ συγχρόνως αυξάνει τα λειτουργικά κόστη. Για την εύρεση του βέλτιστου ρυθμού έγχυσης, όλες οι γεωτρήσεις του πεδίου OILFIELD μοντελοποιήθηκαν από το PROSPER με επιτυχία ενώ τα θερμοδυναμικά χαρακτηριστικά του ρευστού του ταμειυτήρα ρυθμίστηκαν με τις συσχετίσεις για το Black Oil επιτυχώς, με κυρίαρχες τις των Al-Marhoun και Lasater για τις ιδιότητες Bo, Pb και Rs και τις των Beal et al και Beggs et al για το ιξώδες  $\mu_o$ .

Για τον έλεγχο της ποιότητας, εισήχθησαν δεδομένα από τεστ παραγωγής για όλες τις γεωτρήσεις του πεδίου. Εφόσον, οι ιδιότητες του ταμειυτήρα αλλάζουν συνεχώς από την αρχή της παραγωγής, τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για τον ποιοτικό έλεγχο προέρχονται από πρόσφατα τεστ παραγωγής. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, βρέθηκε πως τα δεδομένα αυτά, για όλες τις γεωτρήσεις εκτός από τρεις, ταιριάζουν με τους υπολογισμούς του PROSPER, έχοντας μία απόκλιση της τάξης του 1.58% έως 3.32% εκτός από τις A-5 (short string) που είναι 8.47% και B-3 με 15.54%.

Όσον αφορά την καμπύλη VLP, η συσχέτιση Petroleum Experts 2 βρέθηκε να είναι πολύ κοντά στα δεδομένα πεδίου για όλες σχεδόν τις γεωτρήσεις ενώ οι παράμετροι 1 και 2, οι οποίοι είναι ο πολλαπλασιαστής για τον όρο της βαρύτητας και για τον όρο της τριβής αντίστοιχα, είναι κοντά στην μονάδα.

Επί του παρόντος, το πετρέλαιο στο πεδίο OILFIELD παράγεται από 13 γεωτρήσεις, εκ των οποίων οι δύο είναι διπλής ολοκλήρωσης (dual completion) και οι οποίες μοντελοποιήθηκαν στο PROSPER και στο GAP ως δύο ξεχωριστές γεωτρήσεις η κάθε μία. Η τωρινή παραγωγή του πεδίου είναι περίπου 3,300 bbls/day με μία έγχυση αερίου της τάξης των 270,000  $m^3/day$ . Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του προγράμματος GAP, προέκυψε πως είναι δυνατή μια μεγαλύτερη παραγωγή πετρελαίου, υπό την προϋπόθεση της βελτιστοποίησης της χρήσης του διαθέσιμου αερίου και η οποία προσδιορίστηκε στα 3,679 bbls/day με έγχυση αερίου gas lift 9,584 MMscf/day ή 270,768  $m^3/day$ .

## Βιβλιογραφία

- 1) Schlumberger - Gas Lift Design and Technology
- 2) Kermit E. Brown (U. of Tulsa) | James F. Lea (Amoco Production Co.) - Nodal Systems Analysis of Oil and Gas Wells
- 3) Production Optimization: A Gas Lift Odyssey by Dr. Rick Lemanczyk
- 4) Nodal Analysis- based Design for Improving Gas Lift Wells Production by Edgar Camargo, José Aguilar, Addison Ríos, Francklin Rivas, Joseph Aguilar-Martin
- 5) A Survey of Methods for Gas-Lift Optimization by Kashif Rashid, William Bailey and Benoît Couët
- 6) J.S. Archer & C.G. Wall, 1986
- 7) Heriot watt - production technology
- 8) Optimization of Gas Lift System in Varg Field - Abu Taher Md. Ibrahim
- 9) Design of a continuous gas lift system to initiate production in a dead well - Ioannis E. Tetoros
- 10) Production optimization using nodal analysis – H. Dale Beggs
- 11) Μηχανική Ταμειυτήρων – N. Βαρότσης (2013)
- 12) Εκμετάλλευση Ταμειυτήρων - N. Βαρότσης (2014)
- 13) Φυσικοχημικός Χαρακτηρισμός ενεργειακών πρώτων υλών – N. Πασαδάκης (2004)
- 14) Γεωχημεία πετρελαίου – N. Πασαδάκης (2015)
- 15) Τεχνική Γεωτρήσεων – Βασίλειος Χ. Κελεσίδης (2009)
- 16) Δευτερογενής εκμετάλλευση κοιτασμάτων υδρογονανθράκων με την μέθοδο εισπίεσης αερίου και εισπίεσης CO<sub>2</sub> - Σειτανίδης Ιωάννης
- 17) Trangenstein, John A.; Bell, John B. (1989). "Mathematical Structure of the Black-Oil Model for Petroleum Reservoir Simulation"
- 18) Συγκριτική αξιολόγηση πετρελαίων της λεκάνης Πρίνου – Καβάλας με την χρήση βιοδεικτών-Πασαδάκης N., Κουτσοθεοδώρου E., Μανούτσογλου E., Παπακωνσταντίνου K., Κιομουρτζή Π., Ζεληλίδης Α.
- 19) Διφασική ροή και μεταφορά θερμότητας- N. Ανδρίτσος, Β. Μποντόζογλου, 2012
- 20) Oil Drilling and Refinement - Alex M, last modified by Haman, Karen J on May 05, 2009
- 21) Electrical submersible pumps – Rick von Flatern
- 22) Σχολή χημικών μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο -  
[http://www.chemeng.ntua.gr/courses/pngtech/news\\_files/webdoc\\_4\\_15\\_6\\_2007.pdf](http://www.chemeng.ntua.gr/courses/pngtech/news_files/webdoc_4_15_6_2007.pdf)



- 23) Department of Natural Resources Louisiana -  
(<http://dnr.louisiana.gov/assets/TAD/education/BGBB/3/transformation.html>)
- 24) Fekete Associates Inc -  
[http://fekete.com/SAN/TheoryAndEquations/HarmonyTheoryEquations/Content/HTML\\_Files/Reference\\_Material/Calculations\\_and\\_Correlations/Pressure\\_Loss\\_Calculations.htm](http://fekete.com/SAN/TheoryAndEquations/HarmonyTheoryEquations/Content/HTML_Files/Reference_Material/Calculations_and_Correlations/Pressure_Loss_Calculations.htm)
- 25) Introduction of oil and gas – Dr. Deva Ghosh -  
<http://www.slideshare.net/epireve/introduction-to-oil-gas-read-only>
- 26) Energy.gov, office of fossil energy - <http://energy.gov/fe/science-innovation/oil-gas-research/enhanced-oil-recovery>
- 27) IPM PROSPER Version 13, June 2014
- 28) GAP, Petroleum Experts, Version 5.00, October, 2013

## Παράρτημα Α – Κλίση και υπόγειος εξοπλισμός

Γεώτρηση Α-1				
Δεδομένα κλίσης γεώτρησης				
Measured Depth (m)	True Vertical Depth (m)	Cumulative Displacement (m)	Angle (degrees)	
0	0	0	0	
30	30	0	0	
100	100	0	0	
500	499.99	2.82841	0.40514	
800	799.98	5.27788	0.46782	
1451	1398	262.519	23.2752	
1700	1612.54	388.906	30.5026	
2000	1871.91	539.661	30.1667	
2300	2138.54	677.169	27.2813	
2632	2446.6	800.955	21.8915	
2698	2507.5	826.395	22.6719	
2710	2518.6	830.955	22.3316	
2798.2	2602	859.655	18.9895	
Δεδομένα υπόγειου εξοπλισμού				
Label	Type	Measured Depth (m)	Tubing Inside diameter	Casing Inside diameter
	Xmas Tree	0		
3 1/2"	Tubing	30	2.992	8.681
3 1/2"	Tubing	98.77	2.992	6.184
DHSV	SSSV		2.75	
3 1/2"	Tubing	2599.01	2.992	6.184
2 7/8"	Tubing	2601	2.441	6.184
SSD 2.31"	Restriction		2.312	
2 7/8"	Tubing	2604.2	2.441	6.184
2 7/8"	Tubing	2613.9	2.441	6.184
2 7/8"	Tubing	2621.4	2.441	4.276
	Casing	2649.1		4.276
	Casing	2798.2		2.441

Γεώτρηση Α-2				
Δεδομένα κλίσης γεώτρησης				
Measured Depth (m)	True Vertical Depth (m)	Cumulative Displacement (m)	Angle (degrees)	
0	0	0	0	
30	30	0	0	
300	299.968	4.1568	0.88213	
700	699.93	9.67029	0.78977	
1000	999.681	21.8907	2.33457	
1400	1383.98	132.86	16.1065	
1800	1728.66	335.828	30.492	
2200	2081.73	523.821	28.0332	
2500	2353.3	651.296	25.1453	
2753	2580	763.617	26.3567	
Δεδομένα υπόγειου εξοπλισμού				
Label	Type	Measured Depth (m)	Tubing Inside diameter	Casing Inside diameter
	Xmas Tree	0		
3 1/2", 9.2	Tubing	76	2.992	8.535
	Restriction		2.75	
3 1/2", 9.2	Tubing	89.5	2.992	6.184
XN Nipple	Restriction		2.75	
3 1/2", 9.2	Tubing	2510	2.992	6.184
SSD	Restriction		2.75	
3 1/2", 9.2	Tubing	2511.21	2.992	6.184
	Tubing	2517	2.441	6.184
	Restriction		2.361	
2 7/8", 6.4	Tubing	2523.68	2.441	6.184
XN Nipple	Restriction		2.205	
2 7/8", 6.4	Tubing	2527.4	2.441	6.184
9 5/8", 53.5	Casing	2567		6.184
7", 29	Casing	2753		4.276

Γεώτρηση Α-3				
Δεδομένα κλίσης γεώτρησης				
Measured Depth (m)	True Vertical Depth (m)	Cumulative Displacement (m)	Angle (degrees)	
0	0	0	0	
30	30	0	0	
316	315.97	4.14235	0.82989	
859	858.92	11.511	0.77755	
1001	999.04	34.5411	9.33367	
1030	1027.21	41.4296	13.741	
1201	1193.35	81.908	13.6928	
1401	1388.01	127.815	13.2698	
1523	1506.85	155.403	13.069	
1645	1625.18	185.101	14.0892	
1767	1742.61	218.18	15.7319	
1920	1889.52	260.917	16.22	
2100	2065.06	300.738	12.7811	
2280	2243.53	324.157	7.47575	
2460	2409.49	393.851	22.7797	
2580	2518.05	444.986	25.2216	
2610	2545.19	457.769	25.2216	
2970	2890	557.21	13.8221	
Δεδομένα υπόγειου εξοπλισμού				
Label	Type	Measured Depth (m)	Tubing Inside diameter	Casing Inside diameter
	Xmas Tree	0		
3 1/2", 9.2	Tubing	94.5	2.992	8.535
XL Nipple	SSSV		2.75	
3 1/2", 9.2	Tubing	99	2.992	8.535
2 7/8", 6.4	Tubing	2482	2.441	8.535
2 7/8", 6.4	Tubing	2556.4	2.441	6.094
SPM	Restriction		2.205	
2 7/8", 6.4	Tubing	2561.5	2.441	6.094
7" liner, 29	Casing	2602.5		6.094
5" liner, 18	Casing	2784.4		4.276
7" liner, 29	Casing	2970		6.094

Γεώτρηση Α-4				
Δεδομένα κλίσης γεώτρησης				
Measured Depth (m)	True Vertical Depth (m)	Cumulative Displacement (m)	Angle (degrees)	
0	0	0	0	
150	149.99	1.73202	0.6616	
300	299.99	1.73202	0	
700	699.98	4.56043	0.40514	
900	899.04	23.9284	5.55721	
1100	1092	76.5253	15.2472	
1300	1285	128.975	15.2036	
1500	1480	173.416	12.8386	
1700	1679	193.391	5.73197	
1900	1879	193.391	0	
2100	2079	193.391	0	
2300	2279	193.391	0	
2500	2479	193.391	0	
2700	2679	0	0	
2900	2879	0	0	
Δεδομένα υπόγειου εξοπλισμού				
Label	Type	Measured Depth (m)	Tubing Inside diameter	Casing Inside diameter
	Xmas Tree	0		
	Tubing	89	2.992	3.5
	SSSV		1.5	
	Tubing	2310	1.5	3.5
	Tubing	2331	1.5	3.5
	Restriction		1.4	
	Tubing	2334	1.5	2.875
	Tubing	2342.5	1.5	2.875
	Restriction		1.4	
	Tubing	2345.9	1.5	2.875
	Casing	2348.2		
	Casing	2795		

Γεώτρηση B-1				
Δεδομένα κλίσης γεώτρησης				
Measured Depth (m)	True Vertical Depth (m)	Cumulative Displacement (m)	Angle (degrees)	
0	0	0	0	
210.4	210.39	2.05132	0.55862	
600.4	600.37	6.00095	0.58026	
900.4	900.36	8.45042	0.46782	
1200.4	1200.34	11.9145	0.6616	
1500.4	1495.18	67.3164	10.6421	
1839.4	1821.89	157.768	15.4751	
2182.09	2156.37	232.331	12.5669	
2322.39	2293.66	261.237	11.8897	
2634.68	2595.05	343.024	15.1825	
2800	2760	354.078	3.83404	
Δεδομένα υπόγειου εξοπλισμού				
Label	Type	Measured Depth (m)	Tubing Inside diameter	Casing Inside diameter
	Xmas Tree	0		
3 1/2", 9.2	Tubing	88	2.992	3.5
XL Nipple	Restriction		2.75	
3 1/2", 9.2	Tubing	100	2.992	3.5
2 7/8", 6.4	Tubing	1745	2.441	2.875
2 7/8", 6.4	Tubing	2201	2.441	2.875
TXN Nipple	Restriction		2.205	
2 7/8", 6.4	Tubing	2455	2.441	2.875
2 7/8", 6.4	Tubing	2458	2.441	2.875
4.5" TOL, 13.5	Casing	2800		

Γεώτρηση B-2				
Δεδομένα κλίσης γεώτρησης				
Measured Depth (m)	True Vertical Depth (m)	Cumulative Displacement (m)	Angle (degrees)	
0	0	0	0	
100	100	0	0	
500	499.99	2.82841	0.40514	
700	699.79	11.7704	2.56256	
1000	987.03	98.3336	16.7708	
1400	1367.5	221.794	17.978	
1700	1648.51	326.834	20.4954	
2000	1932.15	424.55	19.0091	
2400	2322.19	513.256	12.8128	
2728	2643	581.557	12.0188	
Δεδομένα υπόγειου εξοπλισμού				
Label	Type	Measured Depth (m)	Tubing Inside diameter	Casing Inside diameter
	Xmas Tree	0		
3 1/2", 9.2	Tubing	90	2.992	3.5
XN Nipple	Restriction		2.75	
3 1/2", 9.2	Tubing	1805	2.992	3.5
3 1/2", 9.2	Tubing	2444.7	2.992	3.5
3 1/2", 9.2	Tubing	2470	2.992	3.5
XN Nipple	Restriction		2.635	
3 1/2", 9.2	Tubing	2473.5	2.992	3.5
7", 29 lbs./ft.	Casing	2487		
5", 18 lbs./ft.	Casing	2728		

Γεώτρηση Β-3				
Δεδομένα κλίσης γεώτρησης				
Measured Depth (m)	True Vertical Depth (m)	Cumulative Displacement (m)	Angle (degrees)	
0	0	0	0	
100	99.99	1.41418	0.81029	
500	499.99	1.41418	0	
800	798.21	34.0459	6.24456	
1200	1153.6	217.616	27.3178	
1500	1416.36	362.382	28.8523	
1800	1689.94	485.483	24.2261	
2100	1961.75	612.445	25.0372	
2400	2252.85	684.977	13.9911	
2700	2550.29	724.085	7.49042	
2921.5	2767.5	767.468	11.2949	
Δεδομένα υπόγειου εξοπλισμού				
Label	Type	Measured Depth (m)	Tubing Inside diameter	Casing Inside diameter
	Xmas Tree	0		
3 1/2", 9.3 lbs/ft	Tubing	38.3	2.992	3.5
XL safety valve	SSSV		2.75	
3 1/2", 9.3 lbs/ft	Tubing	92.6	2.992	3.5
safety valve	Restriction		2.75	
3 1/2", 9.3 lbs/ft	Tubing	121	2.992	3.5
2 7/8", 6.4 lbs/ft	Tubing	2191	2.441	2.875
2 7/8", 6.4 lbs/ft	Tubing	2666.7	2.441	2.875
SSD	Restriction		2.314	
2 7/8", 6.4 lbs/ft	Tubing	2675.4	2.441	2.875
7", 29 lbs/ft	Casing	2685		
5", 18lbs/ft	Casing	2921.5		

Γεώτρηση B-4				
Δεδομένα κλίσης γεώτρησης				
Measured Depth (m)	True Vertical Depth (m)	Cumulative Displacement (m)	Angle (degrees)	
0	0	0	0	
500	500	0	0	
700	699.99	1.99997	0.57296	
900	899.5	15.9914	4.01152	
1100	1093.89	63.0289	13.6027	
1500	1482.16	159.187	13.9099	
1900	1872.15	248.113	12.845	
2300	2262.14	337.039	12.845	
2670	2624.01	414.176	12.0332	
Δεδομένα υπόγειου εξοπλισμού				
Label	Type	Measured Depth (m)	Tubing Inside diameter	Casing Inside diameter
	Xmas Tree	0		
3 1/2", 9.3 lbs/ft	Tubing	91.4	2.992	3.5
XL DHSV	SSSV		2.75	
3 1/2", 9.3 lbs/ft	Tubing	1006.9	2.992	3.5
Otis Bore Coupling	Restriction		2.75	
3 1/2", 9.3 lbs/ft	Tubing	1008.4	2.992	3.5
nipple	Restriction		2.75	
	Restriction		2.75	
3 1/2", 9.3 lbs/ft	Tubing	1008.7	2.992	3.5
nipple	Restriction		2.75	
3 1/2", 9.3 lbs/ft	Tubing	2534	2.992	3.5
3 1/2", 9.3 lbs/ft	Tubing	2593.9	2.992	3.5
2 7/8", 6.4 lbs/ft	Tubing	2603.4	2.441	2.875
SSD	Restriction		2.313	
2 7/8", 6.4 lbs/ft	Tubing	2608.5	2.441	2.875
7" liner	Casing	2670		

Γεώτρηση B-5				
Λεδομένα κλίσης γεώτρησης				
Measured Depth (m)	True Vertical Depth (m)	Cumulative Displacement (m)	Angle (degrees)	
0	0	0	0	
100	100	0	0	
400	399.92	6.92774	1.32322	
600	594.32	53.9239	13.5905	
800	785.58	112.401	17.0009	
1100	1072.53	199.921	16.9617	
1500	1458.49	304.968	15.2254	
1800	1751.48	369.442	12.4104	
2100	2046.56	423.551	10.3909	
2400	2344.26	460.628	7.09935	
2700	2643.82	476.87	3.10353	
2819	2759	506.779	14.5567	
Λεδομένα υπόγειου εξοπλισμού				
Label	Type	Measured Depth (m)	Tubing Inside diameter	Casing Inside diameter
	Xmas Tree	0		
3 1/2", 9.2 lbs/ft	Tubing	85	2.992	3.5
Nipple	Restriction		2.75	
3 1/2", 9.2 lbs/ft	Tubing	100	2.992	3.5
3 1/2", 9.2 lbs/ft	Tubing	470	2.992	3.5
2 7/8", 6.4 lbs/ft	Tubing	2463	2.441	2.875
2 7/8", 6.4 lbs/ft	Tubing	2520	2.441	2.875
Chemical Injection Valve	SSSV		2.441	
2 7/8", 6.4 lbs/ft	Tubing	2540	2.441	2.875
Nipple	Restriction		2.205	
2 7/8", 6.4 lbs/ft	Tubing	2543	2.441	2.875
7" liner	Casing	2819		

Γεώτρηση Β-6				
Λεδομένα κλίσης γεώτρησης				
Measured Depth (m)	True Vertical Depth (m)	Cumulative Displacement (m)	Angle (degrees)	
0	0	0	0	
200	199.93	5.29104	1.51595	
400	399.88	9.7629	1.2812	
700	691.75	79.1308	13.3693	
900	861.94	184.18	31.6848	
1200	1101.47	364.805	37.0192	
1400	1271.2	470.596	31.9348	
1700	1539.61	604.596	26.5301	
1900	1696.92	728.102	38.1357	
2100	1854.43	851.352	38.0428	
2300	2020.48	962.83	33.8756	
2400	2107.84	1011.49	29.1203	
2500	2198.68	1053.3	24.7148	
2600	2288	1098.27	26.7218	
2700	2378	1141.86	25.8419	
2800	2468	1185.45	25.8419	
2900	2558	1229.04	25.8419	
2971	2620	1263.64	29.1627	
Λεδομένα υπόγειου εξοπλισμού				
Label	Type	Measured Depth (m)	Tubing Inside diameter	Casing Inside diameter
XMAS Tree	Xmas Tree	0		
3 1/5" Tubing	Tubing	80	2.992	8.535
OTIS DHSV	SSSV		2.75	
3 1/5" Tubing	Tubing	90	2.992	8.535
2 7/8" Tubing	Tubing	2364	2.441	8.535
2 7/8" Tubing	Tubing	2567	2.441	6.094
XN-Nipple	Restriction		2.205	
2 7/8" Tubing	Tubing	2570	2.441	6.094
7" Casing	Casing	2575		6.094
3 1/5 Tubing/Casing	Casing	2763		2.441
7" Casing	Casing	2905	2.992	6.094

Γεώτρηση B-7				
Δεδομένα κλίσης γεώτρησης				
Measured Depth (m)	True Vertical Depth (m)	Cumulative Displacement (m)	Angle (degrees)	
0	0	0	0	
70.9	70.9	0	0	
283.25	283.24	2.0608	0.55605	
516.15	516.13	4.21902	0.53095	
715.65	715.61	7.04384	0.81131	
975	974.93	10.9885	0.87148	
1092.48	1089.79	35.6609	12.1232	
1304.98	1293.54	96.0115	16.4992	
1498.07	1478.51	151.418	16.6751	
1909.92	1872.98	269.798	16.7044	
2100.99	2055.92	324.94	16.7741	
2345	2289.76	394.652	16.6002	
2638.88	2547.13	536.519	28.8643	
2854	2714.91	671.153	38.7452	
3021	2845.87	774.78	38.354	
Δεδομένα υπόγειου εξοπλισμού				
Label	Type	Measured Depth (m)	Tubing Inside diameter	Casing Inside diameter
Control Flow	Xmas Tree	0		
3.1/2"	Tubing	85	2.992	9.625
OTIS	Restriction		2.992	
3 1/2"	Tubing	95	2.992	9.625
2 7/8"	Tubing	2254	2.441	9.625
2 7/8"	Tubing	2313	2.441	6.184
XN Nipple	Restriction		2.205	
2 7/8"	Tubing	2317	2.441	6.184
7" Liner	Casing	2327		6.184
4.5" Liner	Casing	2741		3.958
Casing Patch @ B Res	Casing	2808		3.25
4.5" Liner	Casing	2914		3.958
Casing Patch @ C Res	Casing	2953		3.25
4.5" Liner	Casing	3021	2.992	3.958

Γεώτρηση A-5 SHORT				
Δεδομένα κλίσης γεώτρησης				
Measured Depth (m)	True Vertical Depth (m)	Cumulative Displacement (m)	Angle (degrees)	
0	0	0	0	
2325	2245.33	603.422	15.0425	
2624	2512.92	736.826	26.498	
2976	2816.77	914.531	30.321	
Δεδομένα υπόγειου εξοπλισμού				
Label	Type	Measured Depth (m)	Tubing Inside diameter	Casing Inside diameter
	Xmas Tree	0		
	Tubing	95	2.992	
Safety Valve	SSSV		2.813	Safety Valve
3 1/2" Tubing	Tubing	1300	2.992	3 1/2" Tubing
2 7/8" Tubing	Tubing	1890	2.441	2 7/8" Tubing
chemical injection spm	Restriction		2.347	chemical injection spm
	Tubing	1925	2.441	
XN Nipple	Restriction		2.21	XN Nipple
	Tubing	1930	2.441	
Vam Top Mule Shoe	Restriction		1.995	Vam Top Mule Shoe
7" Casing	Casing	2290		7" Casing
5" Casing	Casing	2845		5" Casing

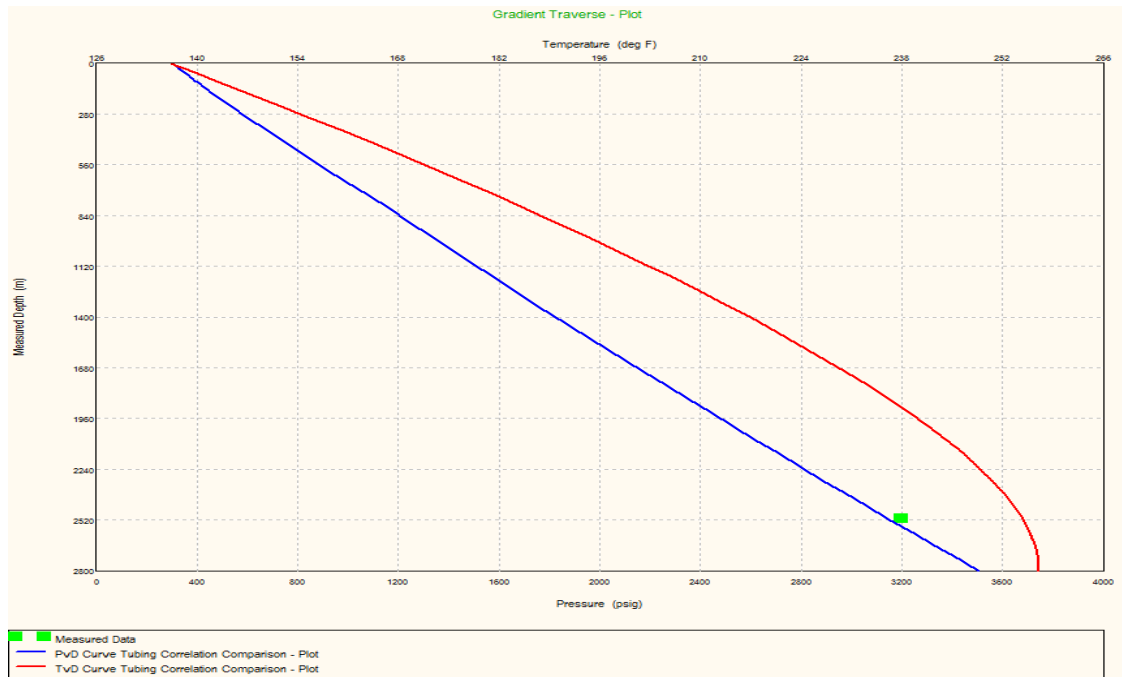
Γεώτρηση A-5 LONG				
Δεδομένα κλίσης γεώτρησης				
Measured Depth (m)	True Vertical Depth (m)	Cumulative Displacement (m)	Angle (degrees)	
0	0	0	0	
2325	2245.33	603.422	15.0425	
2624	2512.92	736.826	26.498	
2976	2816.77	914.531	30.321	
Δεδομένα υπόγειου εξοπλισμού				
Label	Type	Measured Depth (m)	Tubing Inside diameter	Casing Inside diameter
	Xmas Tree	0		
	Tubing	100	2.441	8.535
	SSSV		2.313	
	Tubing	1900	2.441	8.535
Chemical Control Line	Restriction		2.347	
	Tubing	1910	2.441	8.535
2 3/8" Vam Top Mule Shoe	Restriction		1.995	
	Tubing	2290	2.441	6.184
	Tubing	2850	2.441	4.276
XN Nipple	Restriction		1.791	
	Tubing	2855	2.441	4.276
	Casing	2966		4.276

Γεώτρηση A-6 SHORT				
Δεδομένα κλίσης γεώτρησης				
Measured Depth (m)	True Vertical Depth (m)	Cumulative Displacement (m)	Angle (degrees)	
0	0	0	0	
61.5	61.5	0	0	
319.05	319.04	2.26956	0.5049	
1474	1419.53	352.742	17.6651	
1740	1658.84	468.875	25.8864	
2010	1898.48	593.264	27.4323	
2520	2354.84	820.938	26.5142	
2760	2575.56	915.186	23.1226	
2940	2747.95	966.971	16.72	
3200	2996.96	1041.76	16.7183	
Δεδομένα υπόγειου εξοπλισμού				
Label	Type	Measured Depth (m)	Tubing Inside diameter	Casing Inside diameter
	Xmas Tree	0		
	Tubing	95	2.441	8.535
	SSSV		2.313	
	Tubing	2315	2.441	8.535
	Restriction		2.347	
	Tubing	2345	2.441	8.535
	Tubing	2360	1.995	8.535
	Restriction		1.995	
	Tubing	2420	1.995	6.094
	Casing	2960		6.094
	Casing	3200		4.276

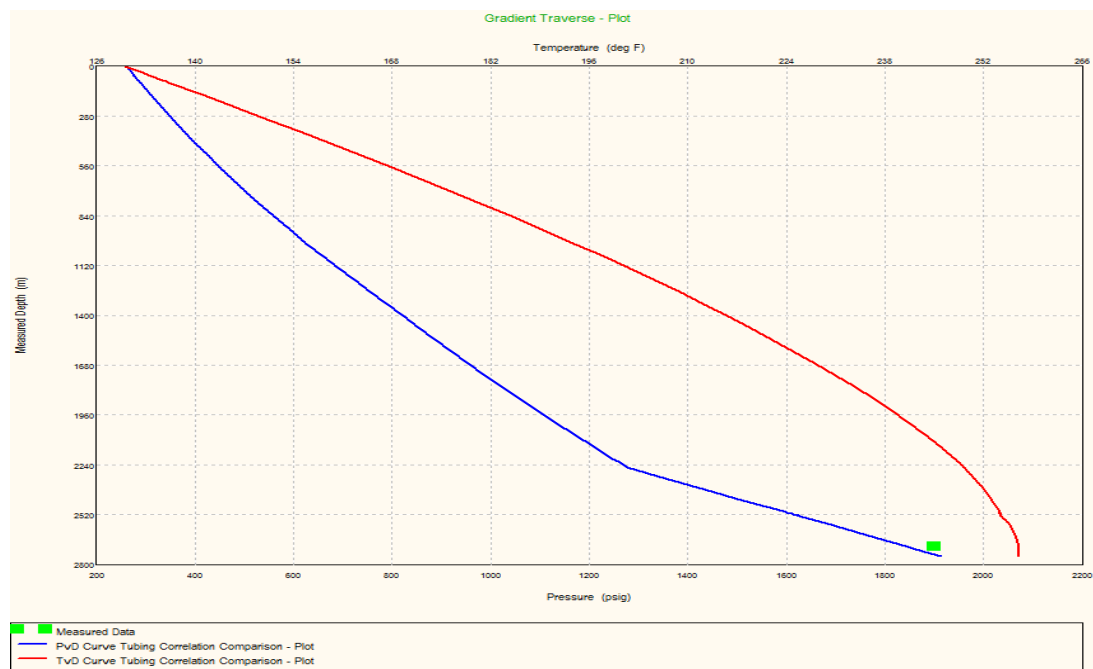


Γεώτρηση A-6 LONG				
Δεδομένα κλίσης γεώτρησης				
Measured Depth (m)	True Vertical Depth (m)	Cumulative Displacement (m)	Angle (degrees)	
0	0	0	0	
61.5	61.5	0	0	
319.05	319.04	2.26956	0.5049	
1474	1419.53	352.742	17.6651	
1740	1658.84	468.875	25.8864	
2010	1898.48	593.264	27.4323	
2520	2354.84	820.938	26.5142	
2760	2575.56	915.186	23.1226	
2940	2747.95	966.971	16.72	
3200	2996.96	1041.76	16.7183	
Δεδομένα υπόγειου εξοπλισμού				
Label	Type	Measured Depth (m)	Tubing Inside diameter	Casing Inside diameter
	Xmas Tree	0		
	Tubing	100	2.992	8.535
	SSSV		2.813	
	Tubing	1300	2.992	8.535
	Tubing	2325	2.441	8.535
	Restriction		2.347	
	Tubing	2400	2.441	8.535
	Tubing	2960	2.441	6.094
	Restriction		2.21	
	Casing	3033		4.276

## Παράρτημα Β1 - Διαγράμματα ελέγχου ποιότητας



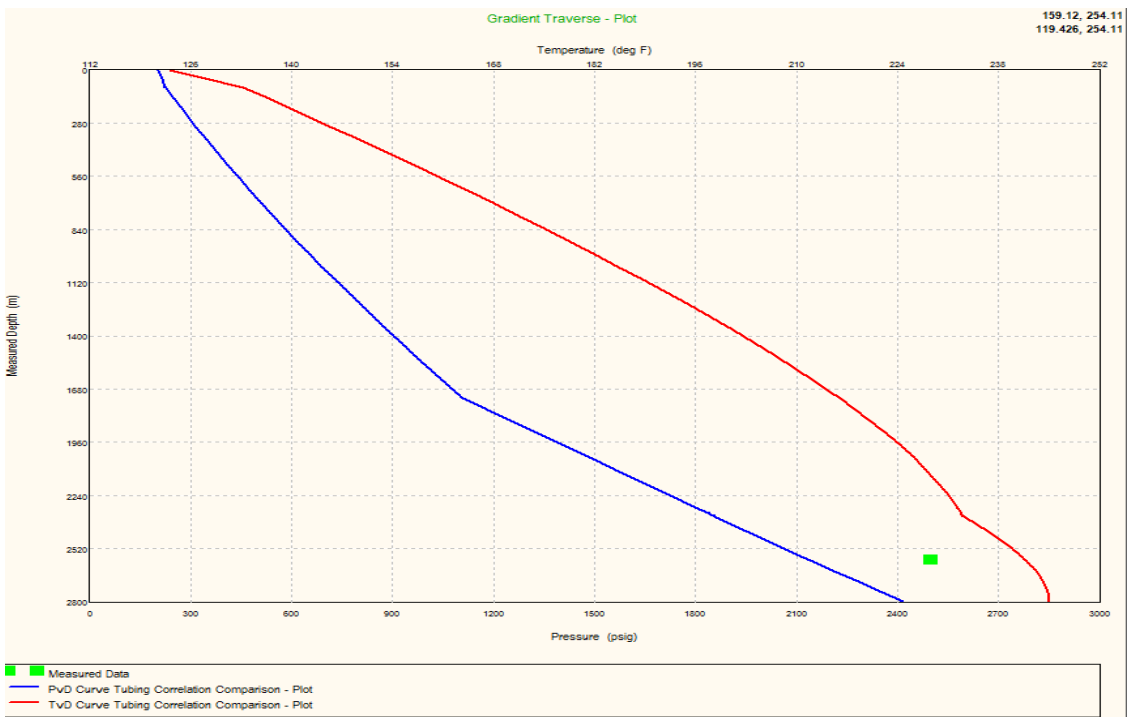
Γεώτρηση A-1



Γεώτρηση A-2



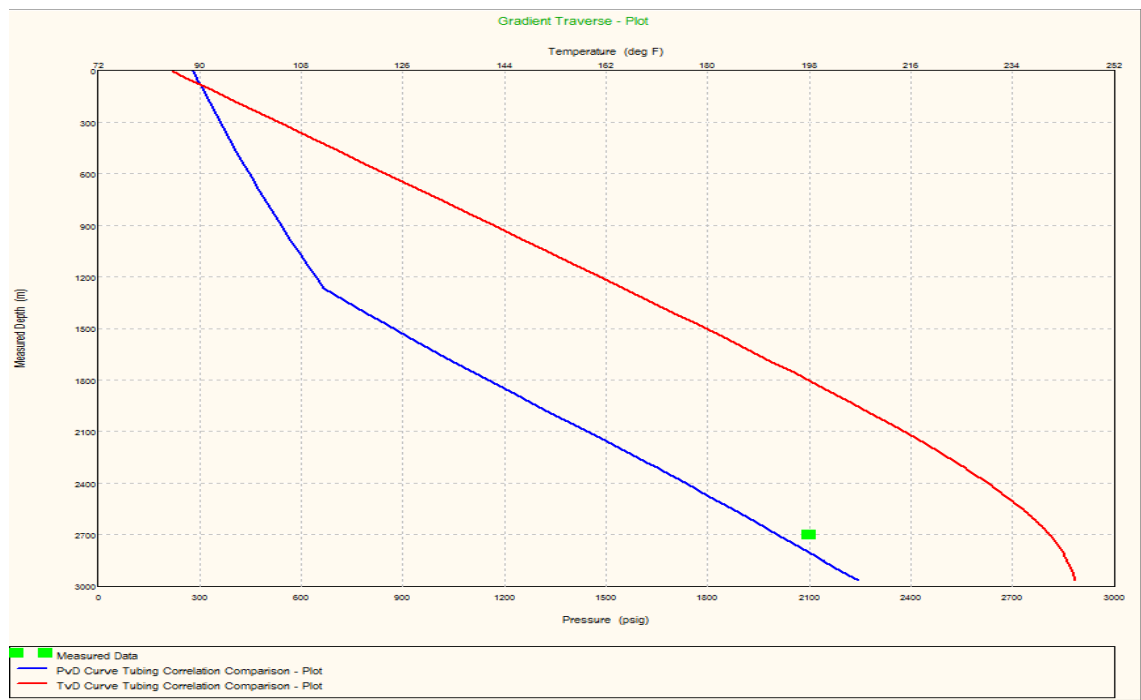
Γεώτρηση A-3



Γεώτρηση A-4



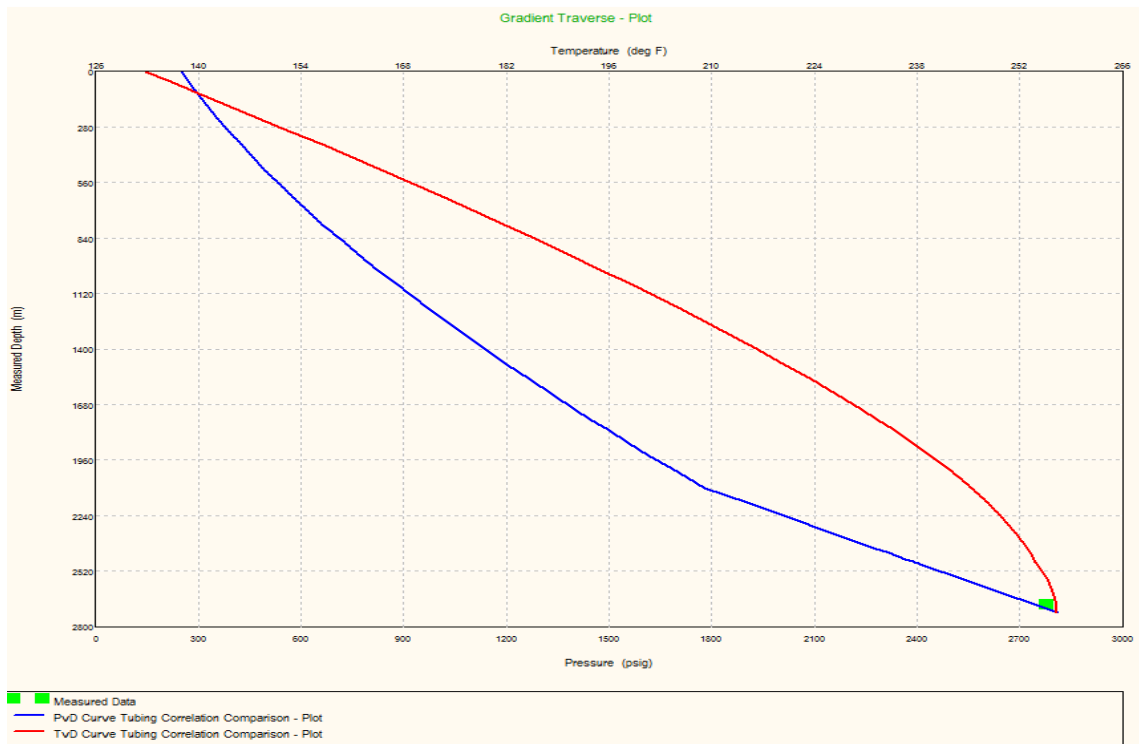
Γεώτρηση A-5 short



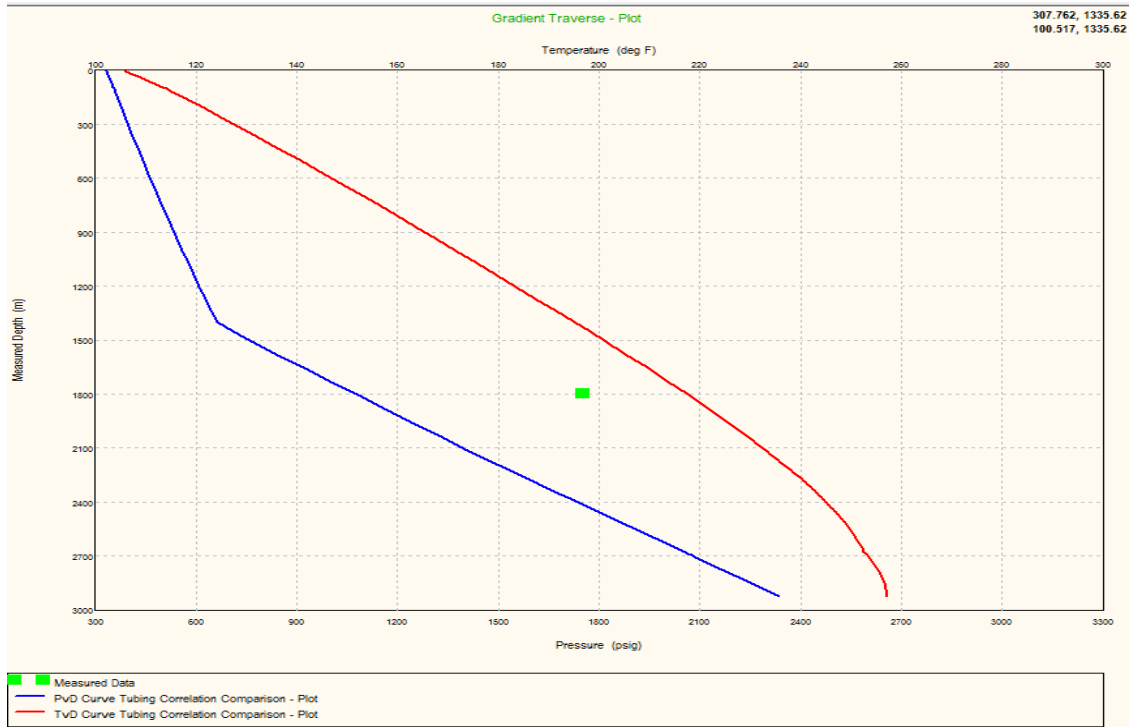
Γεώτρηση A-5 long



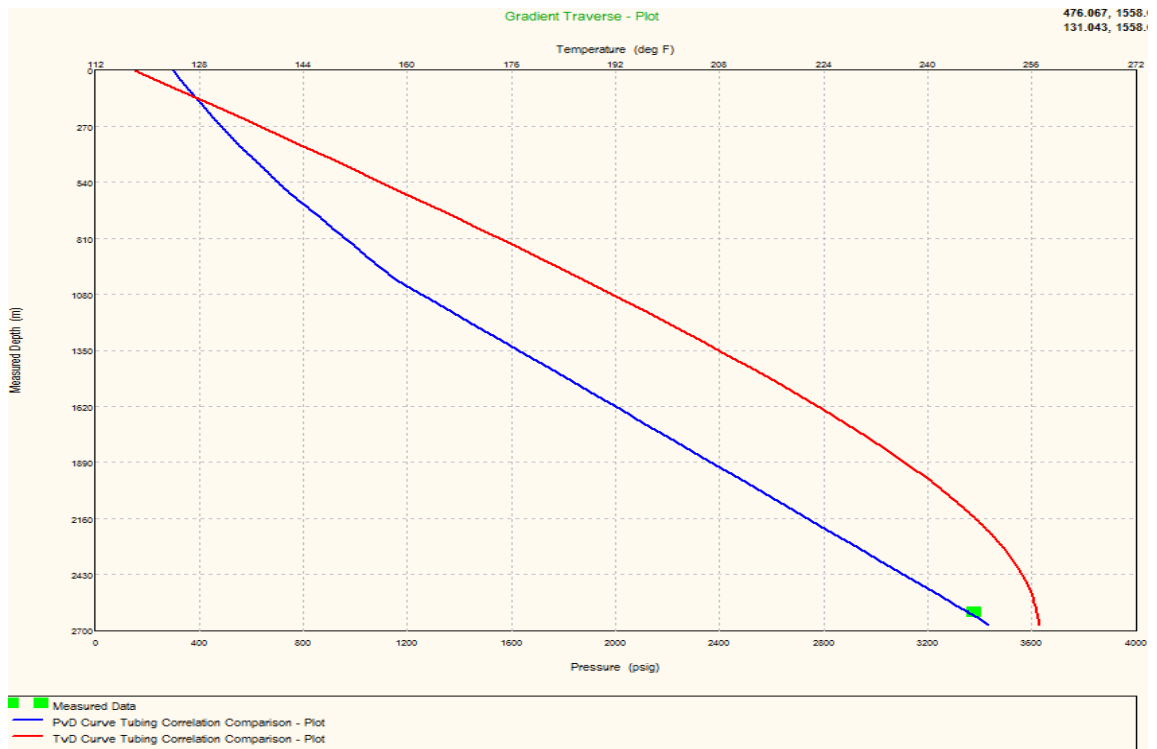
Γεώτρηση B-1



Γεώτρηση B-2



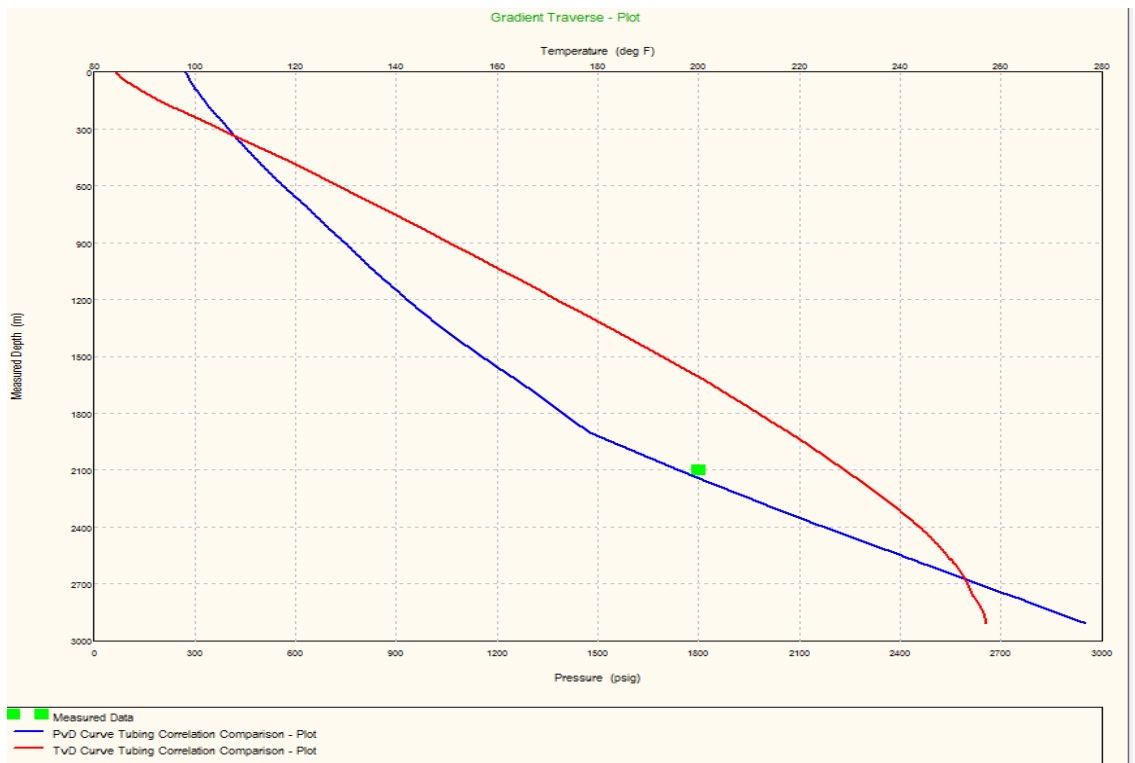
Γεώτρηση B-3



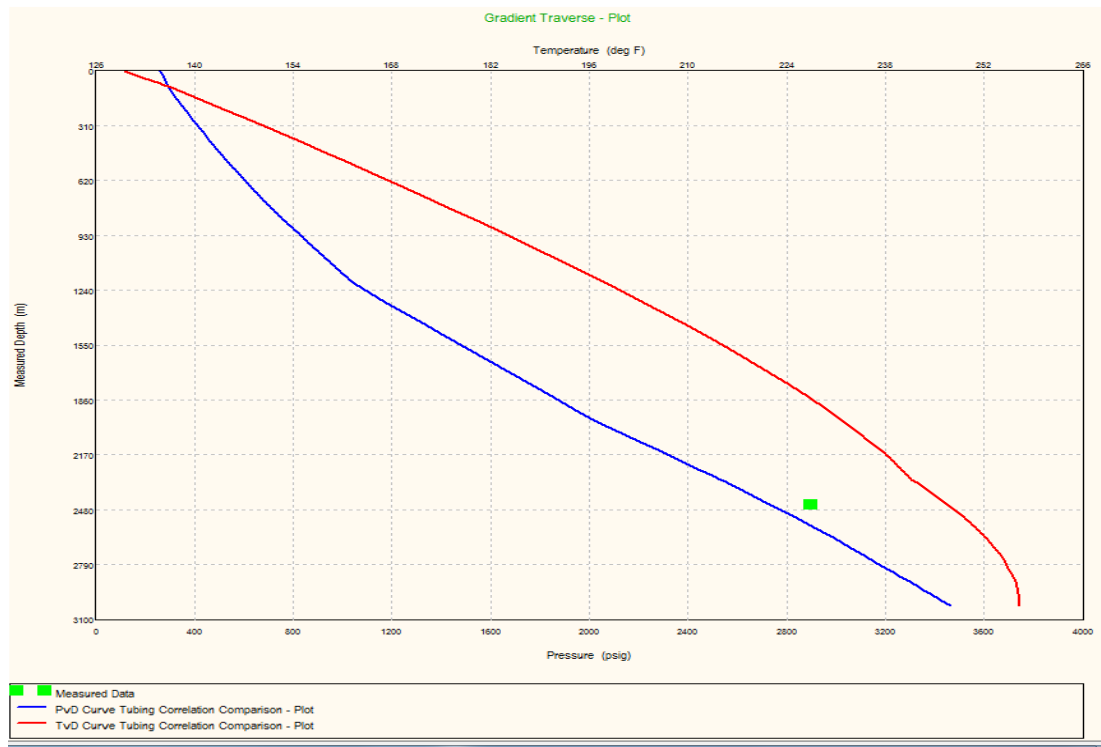
Γεώτρηση B-4



Γεώτρηση B-5



Γεώτρηση B-6



Γεώτρηση B-7



## Παράρτημα Β2 – Παράμετροι συσχετίσεων

TUBING CORRELATION MATCH PARAMETERS (PA - 2A.Anl) (Matched PVT)

Done Cancel Main Reset all Report Export Help

Point		Correlation	Parameter 1	Parameter 2	Standard Deviation
1	Reset	Duns and Ros Modified	0.97002	1	0.00048828
2	Reset	Hagedorn Brown	1.10921	1	0.00073242
3	Reset	Fancher Brown	1.1093	1	0.00073242
4	Reset	Mukerjee Brill	1.05019	1	0.00024414
5	Reset	Beggs and Brill	1.04609	1	0.00048828
6	Reset	Petroleum Experts	1.10831	1	0.00073242
7	Reset	Orkiszewski	1.13345	1	0.00048828
8	Reset	Petroleum Experts 2	1.10154	1	0.00073242
9	Reset	Duns and Ros Original	1.06072	1	0.00024414
10	Reset	Petroleum Experts 3	1.11086	1	0.00024414
11	Reset	GRE (modified by PE)	0.86191	1	0
12	Reset	Petroleum Experts 4	0.9995	1	0.00024414
13	Reset	Hydro-3P	1	1	
14	Reset	Petroleum Experts 5	1.01518	1.2423	0
15	Reset	PE 6 (Heavy Oil)	1	1	
16	Reset	OLGAS 2P	1	1	
17	Reset	OLGAS 3P	1	1	
18	Reset	OLGAS3P EXT	1	1	
19	Reset	LedaFlow 2P	1	1	

Γεώτρηση A-1

TUBING CORRELATION MATCH PARAMETERS (PA - 6A.Out) (Matched PVT)

Done Cancel Main Reset all Report Export Help

Point		Correlation	Parameter 1	Parameter 2	Standard Deviation
1	Reset	Duns and Ros Modified	1.06574	1	0.00036621
2	Reset	Hagedorn Brown	1.24149	1	0
3	Reset	Fancher Brown	1.34771	7.96181	0
4	Reset	Mukerjee Brill	1.023	1	0.00012207
5	Reset	Beggs and Brill	1.00599	1	0.00012207
6	Reset	Petroleum Experts	1.25464	1	0.00012207
7	Reset	Orkiszewski	1.11093	3.33881	0.00048828
8	Reset	Petroleum Experts 2	1.23919	1	0.00024414
9	Reset	Duns and Ros Original	1.15006	1	0.00061035
10	Reset	Petroleum Experts 3	1.44653	1	0.00024414
11	Reset	GRE (modified by PE)	1.16434	1	0.00012207
12	Reset	Petroleum Experts 4	1.32335	0.2	0.00061035
13	Reset	Hydro-3P	1.00515	1.09031	0.00061035
14	Reset	Petroleum Experts 5	1	1	
15	Reset	PE 6 (Heavy Oil)	1	1	
16	Reset	OLGAS 2P	1	1	
17	Reset	OLGAS 3P	1	1	
18	Reset	OLGAS3P EXT	1	1	
19	Reset	LedaFlow 2P	1	1	

Γεώτρηση A-2

Done Cancel Main Reset all Report Export Help					
Point		Correlation	Parameter 1	Parameter 2	Standard Deviation
1	Reset	Duns and Ros Modified	1.18932	1	0.00097656
2	Reset	Hagedorn Brown	1.40282	1	0.00097656
3	Reset	Fancher Brown	1.45848	6.82897	0.00024414
4	Reset	Mukerjee Brill	1.22225	1	0.00024414
5	Reset	Beggs and Brill	1.29059	1	0.00024414
6	Reset	Petroleum Experts	1.36953	1	0.00024414
7	Reset	Orkiszewski	1.29221	4.56077	0.00024414
8	Reset	Petroleum Experts 2	1.35696	1	0
9	Reset	Duns and Ros Original	1.35962	1	0
10	Reset	Petroleum Experts 3	1.52399	1	0.00048828
11	Reset	GRE (modified by PE)	1	1	
12	Reset	Petroleum Experts 4	1.63473	1	0
13	Reset	Hydro-3P	1	1	
14	Reset	Petroleum Experts 5	1	1	
15	Reset	PE 6 (Heavy Oil)	1	1	
16	Reset	OLGAS 2P	1	1	
17	Reset	OLGAS 3P	1	1	
18	Reset	OLGAS3P EXT	1	1	
19	Reset	LedaFlow 2P	1	1	

Γεώτρηση A-3

Done Cancel Main Reset all Report Export Help					
Point		Correlation	Parameter 1	Parameter 2	Standard Deviation
1	Reset	Duns and Ros Modified	0.81497	0.27446	0.00012207
2	Reset	Hagedorn Brown	0.85078	0.26612	0.00048828
3	Reset	Fancher Brown	0.88414	0.84642	0
4	Reset	Mukerjee Brill	0.84696	0.65138	0.00024414
5	Reset	Beggs and Brill	0.68149	0.46314	0.00012207
6	Reset	Petroleum Experts	0.92553	0.52021	0
7	Reset	Orkiszewski	0.80591	0.7336	0.00012207
8	Reset	Petroleum Experts 2	0.92191	0.48968	0.00024414
9	Reset	Duns and Ros Original	0.91315	0.86148	0.00012207
10	Reset	Petroleum Experts 3	0.94316	0.70004	0
11	Reset	GRE (modified by PE)	0.6853	0.65313	0.00085449
12	Reset	Petroleum Experts 4	1	1	
13	Reset	Hydro-3P	1	1	
14	Reset	Petroleum Experts 5	1	1	
15	Reset	PE 6 (Heavy Oil)	1	1	
16	Reset	OLGAS 2P	1	1	
17	Reset	OLGAS 3P	1	1	
18	Reset	OLGAS3P EXT	1	1	
19	Reset	LedaFlow 2P	1	1	

Γεώτρηση A-4

TUBING CORRELATION MATCH PARAMETERS (PA-35A\_Short String\_09\_07\_2015....)

Done Cancel Main Reset all Report Export Help

Point		Correlation	Parameter 1	Parameter 2	Standard Deviation
1	Reset	Duns and Ros Modified	0.83896	0.2	0.00048828
2	Reset	Hagedorn Brown	1	1.00008	0.00012207
3	Reset	Fancher Brown	1.1693	1.89842	0.00061035
4	Reset	Mukerjee Brill	0.86639	0.20182	0.00085449
5	Reset	Beggs and Brill	0.85246	0.3082	0.00048828
6	Reset	Petroleum Experts	0.97333	1	0.00012207
7	Reset	Orkiszewski	0.9849	0.91867	0.00024414
8	Reset	Petroleum Experts 2	0.96518	1	0.00048828
9	Reset	Duns and Ros Original	0.97714	1	0.00012207
10	Reset	Petroleum Experts 3	1.04925	1	0.00012207
11	Reset	GRE (modified by PE)	0.83627	0.2	0.00024414
12	Reset	Petroleum Experts 4	1.0138	1.09253	0.00036621
13	Reset	Hydro-3P	0.45486	0.66207	0
14	Reset	Petroleum Experts 5	1	1	
15	Reset	PE 6 (Heavy Oil)	1	1	
16	Reset	OLGAS 2P	1	1	
17	Reset	OLGAS 3P	1	1	
18	Reset	OLGAS3P EXT	1	1	
19	Reset	LedaFlow 2P	1	1	

Γεώτρηση A-5 short

TUBING CORRELATION MATCH PARAMETERS (PA-35A\_long string\_10\_07\_2015.A...

Done Cancel Main Reset all Report Export Help

Point		Correlation	Parameter 1	Parameter 2	Standard Deviation
1	Reset	Duns and Ros Modified	0.89057	1	0.00036621
2	Reset	Hagedorn Brown	0.9377	1	0.00061035
3	Reset	Fancher Brown	1.17785	1	0.00097656
4	Reset	Mukerjee Brill	0.95006	1	0
5	Reset	Beggs and Brill	0.87605	1	0.00073242
6	Reset	Petroleum Experts	0.9521	1	0.00048828
7	Reset	Orkiszewski	1	1	
8	Reset	Petroleum Experts 2	0.94452	1	0.802
9	Reset	Duns and Ros Original	0.97208	1	0
10	Reset	Petroleum Experts 3	1.02595	1	0.00024414
11	Reset	GRE (modified by PE)	1	1	
12	Reset	Petroleum Experts 4	1	1	
13	Reset	Hydro-3P	1	1	
14	Reset	Petroleum Experts 5	1	1	
15	Reset	PE 6 (Heavy Oil)	1	1	
16	Reset	OLGAS 2P	1	1	
17	Reset	OLGAS 3P	1	1	
18	Reset	OLGAS3P EXT	1	1	
19	Reset	LedaFlow 2P	1	1	

Γεώτρηση A-5 long

TUBING CORRELATION MATCH PARAMETERS (PB - 14C.Out) (Matched PVT)					
<div> <div>Done</div> <div>Cancel</div> <div>Main</div> <div>Reset all</div> <div>Report</div> <div>Export</div> <div>Help</div> </div>					
Point		Correlation	Parameter 1	Parameter 2	Standard Deviation
1	Reset	Duns and Ros Modified	0.8137	1	0.00097656
2	Reset	Hagedorn Brown	0.95382	1	0.00024414
3	Reset	Fancher Brown	0.99209	1	0.00024414
4	Reset	Mukerjee Brill	0.89431	1	0
5	Reset	Beggs and Brill	0.8829	0.93352	0.00024414
6	Reset	Petroleum Experts	0.96264	1	0
7	Reset	Orkiszewski	0.93764	1	0.00097656
8	Reset	Petroleum Experts 2	0.9551	0.99974	0.00024414
9	Reset	Duns and Ros Original	0.92988	1	0.00048828
10	Reset	Petroleum Experts 3	0.98317	0.82533	0.00024414
11	Reset	GRE (modified by PE)	1	1	
12	Reset	Petroleum Experts 4	0.96016	0.66274	0.00024414
13	Reset	Hydro-3P	1	1	
14	Reset	Petroleum Experts 5	1	1	
15	Reset	PE 6 (Heavy Oil)	1	1	
16	Reset	OLGAS 2P	1	1	
17	Reset	OLGAS 3P	1	1	
18	Reset	OLGAS3P EXT	1	1	
19	Reset	LedaFlow 2P	1	1	

Γεώτρηση B-1

TUBING CORRELATION MATCH PARAMETERS (PB - 17.Anl) (Matched PVT)					
<div> <div>Done</div> <div>Cancel</div> <div>Main</div> <div>Reset all</div> <div>Report</div> <div>Export</div> <div>Help</div> </div>					
Point		Correlation	Parameter 1	Parameter 2	Standard Deviation
1	Reset	Duns and Ros Modified	1.24132	1	0.00048828
2	Reset	Hagedorn Brown	1.51607	1	0
3	Reset	Fancher Brown	1.77589	1	0.00048828
4	Reset	Mukerjee Brill	1.23251	1	0
5	Reset	Beggs and Brill	1.22031	1	0.00024414
6	Reset	Petroleum Experts	1.51365	1	0.00048828
7	Reset	Orkiszewski	1.33166	1	0.00097656
8	Reset	Petroleum Experts 2	1.49877	1	0.00097656
9	Reset	Duns and Ros Original	1.35107	1	0.00024414
10	Reset	Petroleum Experts 3	1.66551	1	0.00073242
11	Reset	GRE (modified by PE)	1.68441	1	0.0029297
12	Reset	Petroleum Experts 4	1.54639	1	0.00024414
13	Reset	Hydro-3P	1.09299	2.53129	0.00048828
14	Reset	Petroleum Experts 5	1.27459	1	0.00024414
15	Reset	PE 6 (Heavy Oil)	1.23778	1	0.00048828
16	Reset	OLGAS 2P	1	1	
17	Reset	OLGAS 3P	1	1	
18	Reset	OLGAS3P EXT	1	1	
19	Reset	LedaFlow 2P	1	1	

Γεώτρηση B-2

TUBING CORRELATION MATCH PARAMETERS (PB - 19.Anl) (Matched PVT)

Done Cancel Main Reset all Report Export Help

Point		Correlation	Parameter 1	Parameter 2	Standard Deviation
1	Reset	Duns and Ros Modified	0.83306	0.83741	0
2	Reset	Hagedorn Brown	1.23175	1.48866	0.00012207
3	Reset	Fancher Brown	1.00031	1.00033	0.0063477
4	Reset	Mukerjee Brill	1.04156	1.04741	0.00012207
5	Reset	Beggs and Brill	1.0365	1.04094	0.00012207
6	Reset	Petroleum Experts	1.50449	1	0.00036621
7	Reset	Orkiszewski	0.89153	0.88553	0
8	Reset	Petroleum Experts 2	1.48999	1	0.00048828
9	Reset	Duns and Ros Original	1.2192	1	0.00048828
10	Reset	Petroleum Experts 3	1.69233	1	0.00048828
11	Reset	GRE (modified by PE)	1	1	
12	Reset	Petroleum Experts 4	1.11525	1.19102	0.00048828
13	Reset	Hydro-3P	1	1	
14	Reset	Petroleum Experts 5	0.39674	0.56102	0.00073242
15	Reset	PE 6 (Heavy Oil)	1	1	
16	Reset	OLGAS 2P	1	1	
17	Reset	OLGAS 3P	1	1	
18	Reset	OLGAS3P EXT	1	1	
19	Reset	LedaFlow 2P	1	1	

Γεώτρηση B-3

Point		Correlation	Parameter 1	Parameter 2	Standard Deviation
1	Reset	Duns and Ros Modified	1.01594	1	0
2	Reset	Hagedorn Brown	1.13056	1	0.00024414
3	Reset	Fancher Brown	1.19607	1	0.00024414
4	Reset	Mukerjee Brill	1.06544	1	0.00048828
5	Reset	Beggs and Brill	1.07645	1	0.00024414
6	Reset	Petroleum Experts	1.15319	1	0.00073242
7	Reset	Orkiszewski	1.13047	1	0.00073242
8	Reset	Petroleum Experts 2	1.14921	1	0.00073242
9	Reset	Duns and Ros Original	1.13832	1	0.00048828
10	Reset	Petroleum Experts 3	1.18939	1	0.00048828
11	Reset	GRE (modified by PE)	1	1	
12	Reset	Petroleum Experts 4	1.07856	2.52506	0.00024414
13	Reset	Hydro-3P	1	1	
14	Reset	Petroleum Experts 5	1	1	
15	Reset	PE 6 (Heavy Oil)	1	1	
16	Reset	OLGAS 2P	1	1	
17	Reset	OLGAS 3P	1	1	
18	Reset	OLGAS3P EXT	1	1	
19	Reset	LedaFlow 2P	1	1	

Γεώτρηση B-4

TUBING CORRELATION MATCH PARAMETERS (PB - 26.Anl) (Matched PVT)

Done Cancel Main Reset all Report Export Help

Point		Correlation	Parameter 1	Parameter 2	Standard Deviation
1	Reset	Duns and Ros Modified	0.95395	0.63339	0
2	Reset	Hagedorn Brown	1.10984	2.07049	0.00048828
3	Reset	Fancher Brown	1.13052	2.35201	0.00048828
4	Reset	Mukerjee Brill	1.05677	1.84499	0.00024414
5	Reset	Beggs and Brill	1.0353	1.35413	0.00024414
6	Reset	Petroleum Experts	1.10895	2.18188	0.00073242
7	Reset	Orkiszewski	1.12575	2.3042	0.00048828
8	Reset	Petroleum Experts 2	1.06428	1.83375	0
9	Reset	Duns and Ros Original	1.09856	1.97527	0.00024414
10	Reset	Petroleum Experts 3	1.08226	1.92796	0.00048828
11	Reset	GRE (modified by PE)	1	1	
12	Reset	Petroleum Experts 4	2.09187	5.38828	0.00024414
13	Reset	Hydro-3P	1	1	
14	Reset	Petroleum Experts 5	1.09032	1.44942	0.00024414
15	Reset	PE 6 (Heavy Oil)	1	1	
16	Reset	OLGAS 2P	1	1	
17	Reset	OLGAS 3P	1	1	
18	Reset	OLGAS3P EXT	1	1	
19	Reset	LedaFlow 2P	1	1	

Γεώτρηση B-5

TUBING CORRELATION MATCH PARAMETERS (PB-27.Anl) (Matched PVT)

Done Cancel Main Reset all Report Export Help

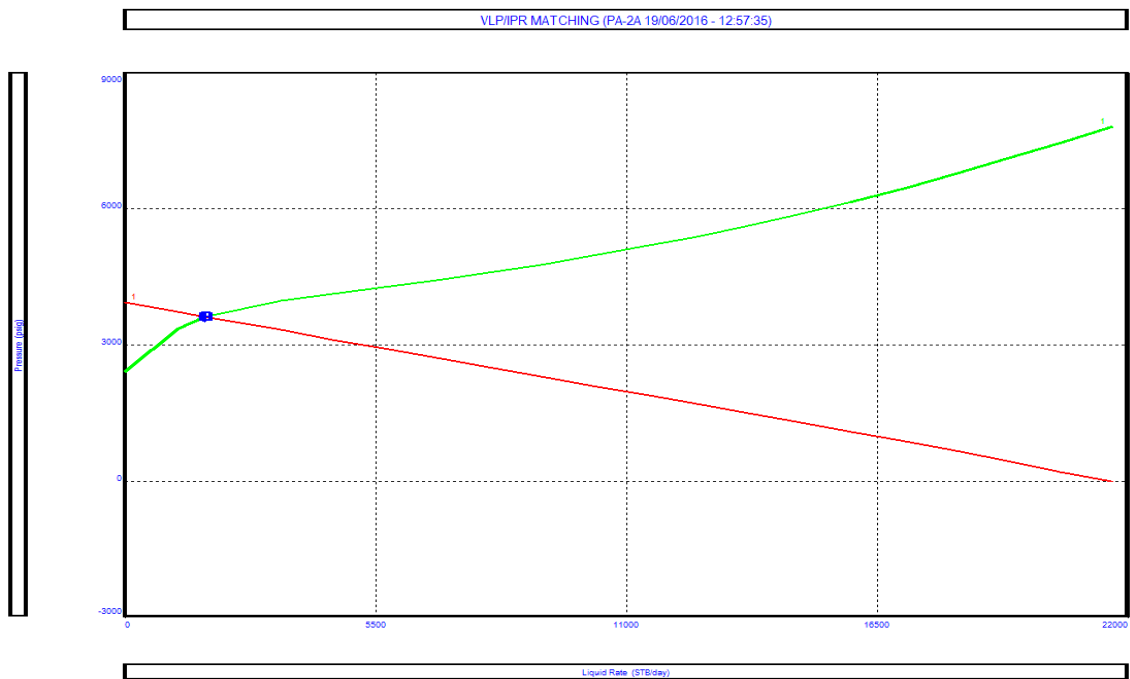
Point		Correlation	Parameter 1	Parameter 2	Standard Deviation
1	Reset	Duns and Ros Modified	1.44277	1	0
2	Reset	Hagedorn Brown	1.80206	1	0.00024414
3	Reset	Fancher Brown	2.02898	6.03245	0.00012207
4	Reset	Mukerjee Brill	1.61148	1	0.00048828
5	Reset	Beggs and Brill	1.31345	3.35543	0.00036621
6	Reset	Petroleum Experts	1.69648	1	0.00012207
7	Reset	Orkiszewski	1.77533	4.49909	0
8	Reset	Petroleum Experts 2	1.66916	1	0.00024414
9	Reset	Duns and Ros Original	1.71687	1	0.00061035
10	Reset	Petroleum Experts 3	1.56333	7.20752	0
11	Reset	GRE (modified by PE)	1	1	
12	Reset	Petroleum Experts 4	2.27981	0.2	0
13	Reset	Hydro-3P	1	1	
14	Reset	Petroleum Experts 5	1	1	
15	Reset	PE 6 (Heavy Oil)	1	1	
16	Reset	OLGAS 2P	1	1	
17	Reset	OLGAS 3P	1	1	
18	Reset	OLGAS3P EXT	1	1	
19	Reset	LedaFlow 2P	1	1	

Γεώτρηση B-6

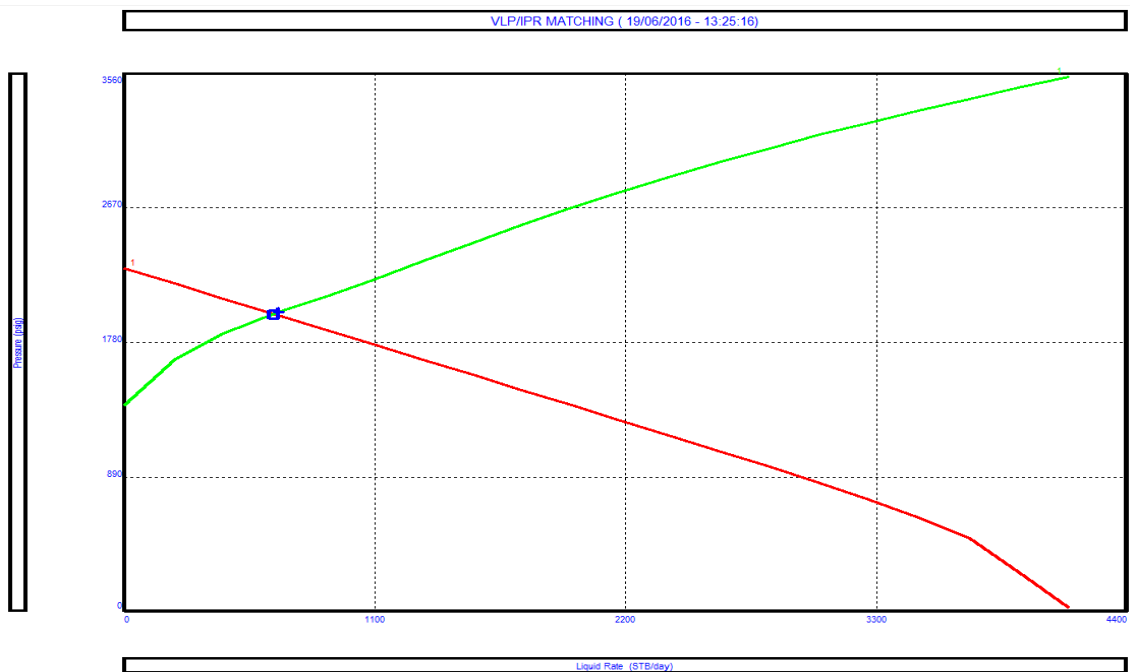
TUBING CORRELATION MATCH PARAMETERS (Backup_PB-34_02_07_2015.Anl) (...)					
<div> <div>Done</div> <div>Cancel</div> <div>Main</div> <div>Reset all</div> <div>Report</div> <div>Export</div> <div>Help</div> </div>					
Point		Correlation	Parameter 1	Parameter 2	Standard Deviation
1	Reset	Duns and Ros Modified	1.07998	1	0.00048828
2	Reset	Hagedorn Brown	1.22594	1	0.00073242
3	Reset	Fancher Brown	1.21093	2.61044	0.00048828
4	Reset	Mukerjee Brill	1.11583	2.38015	0
5	Reset	Beggs and Brill	1.0645	1.5844	0
6	Reset	Petroleum Experts	1.11949	3.72897	3.27222
7	Reset	Orkiszewski	1.08164	1.65752	0.00024414
8	Reset	Petroleum Experts 2	1.233	1	0.00048828
9	Reset	Duns and Ros Original	1.17672	3.06764	0
10	Reset	Petroleum Experts 3	1.1535	3.68915	0.00024414
11	Reset	GRE (modified by PE)	2.28785	5.55173	0.00048828
12	Reset	Petroleum Experts 4	1.23707	2.98935	0.00024414
13	Reset	Hydro-3P	1.97296	4.22929	0
14	Reset	Petroleum Experts 5	1	1	
15	Reset	PE 6 (Heavy Oil)	1	1	
16	Reset	OLGAS 2P	1	1	
17	Reset	OLGAS 3P	1	1	
18	Reset	OLGAS3P EXT	1	1	
19	Reset	LedaFlow 2P	1	1	

Γεώτρηση B-7

## Παράρτημα Β3 – Ρύθμιση IPR/VLP

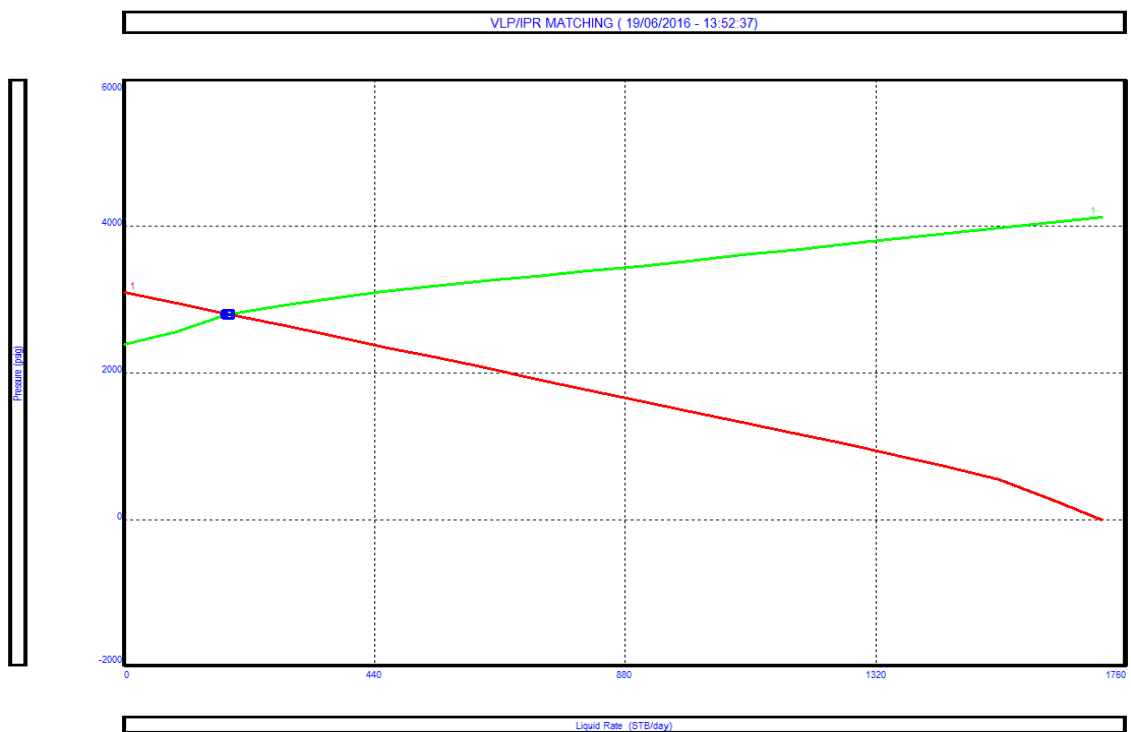


Γεώτρηση A-1

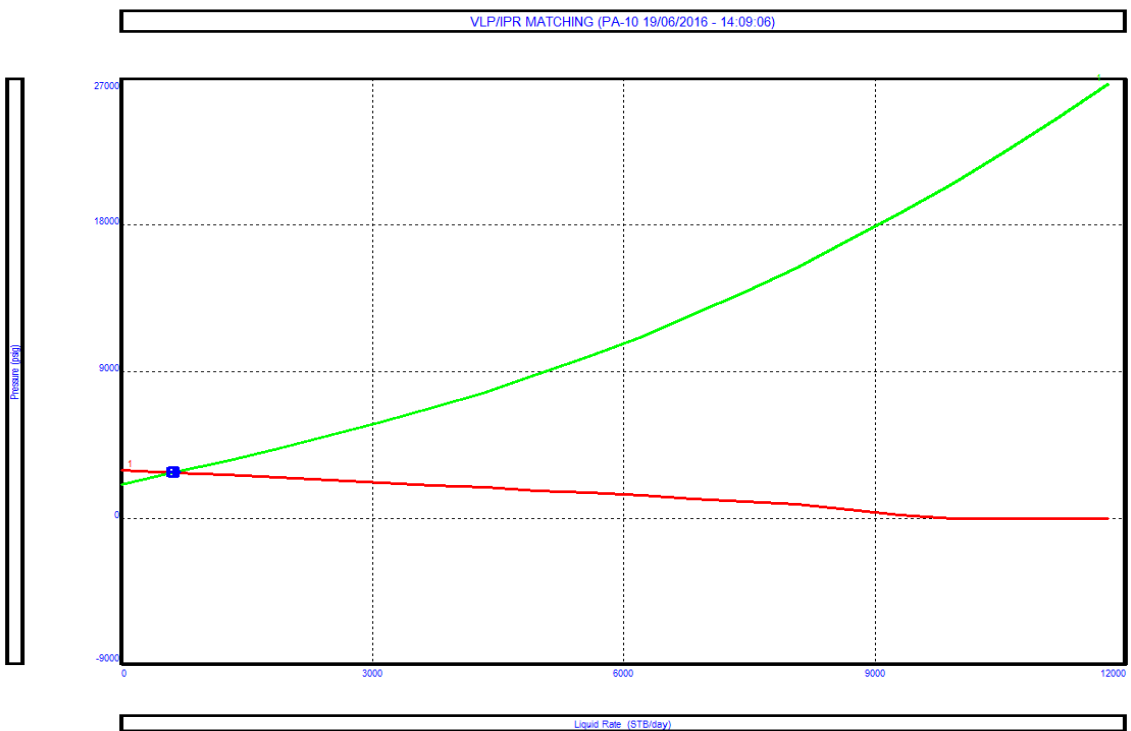


Γεώτρηση A-2

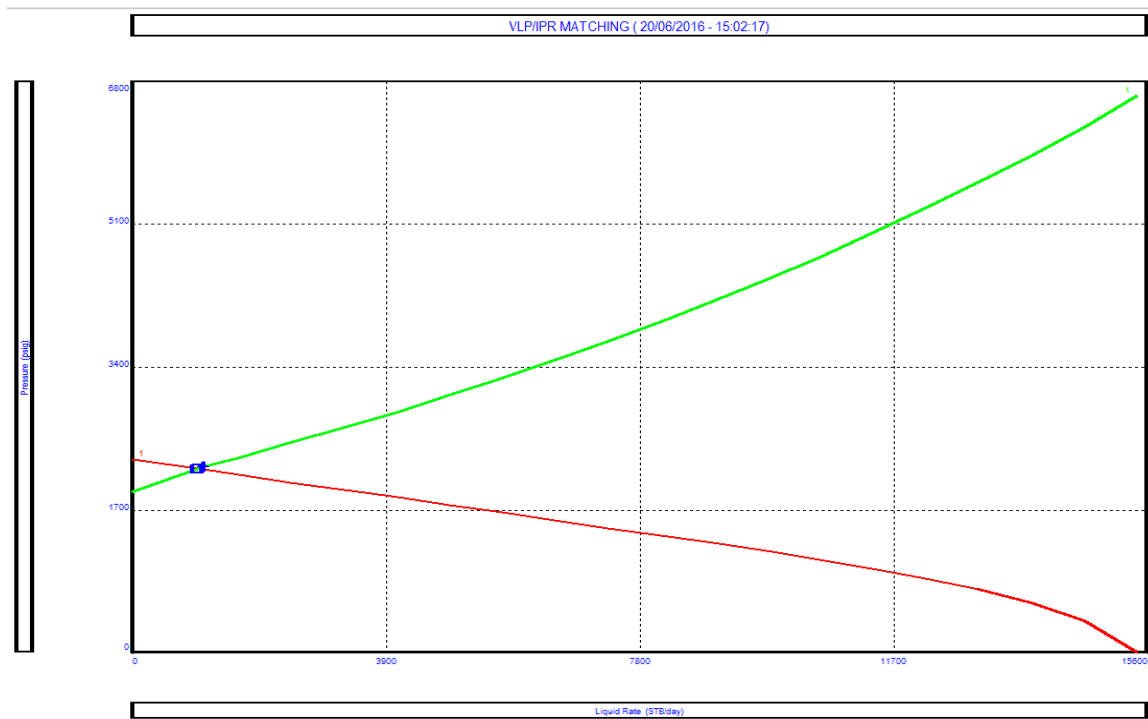




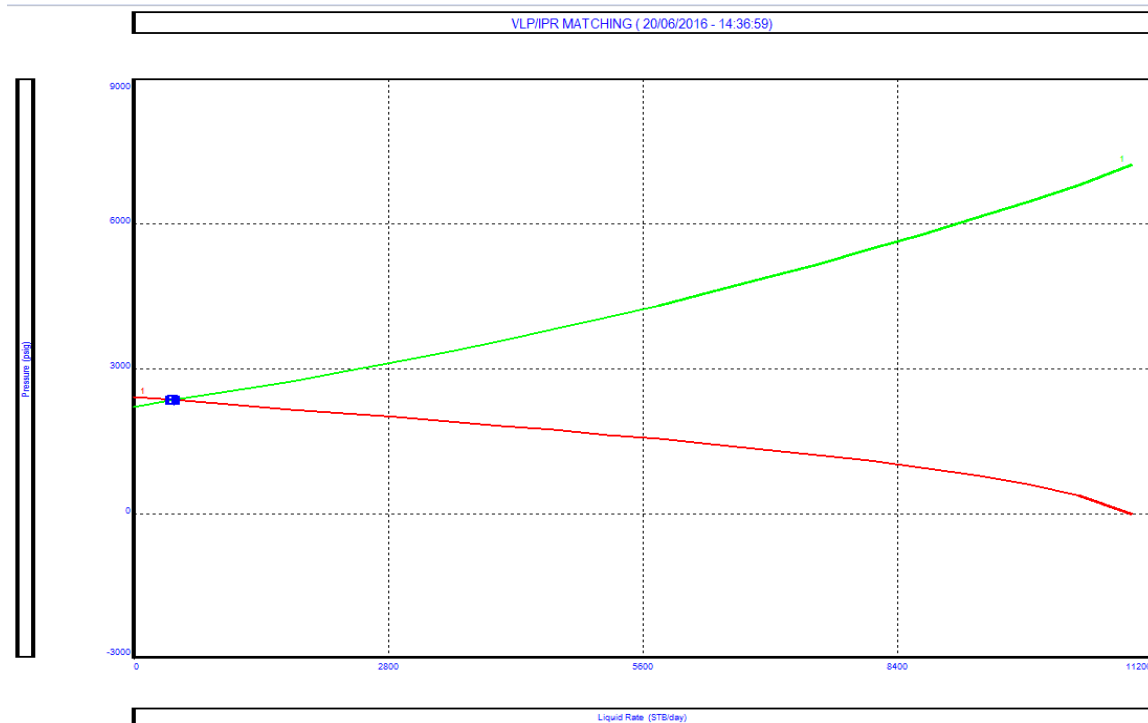
Γεώτρηση A-3



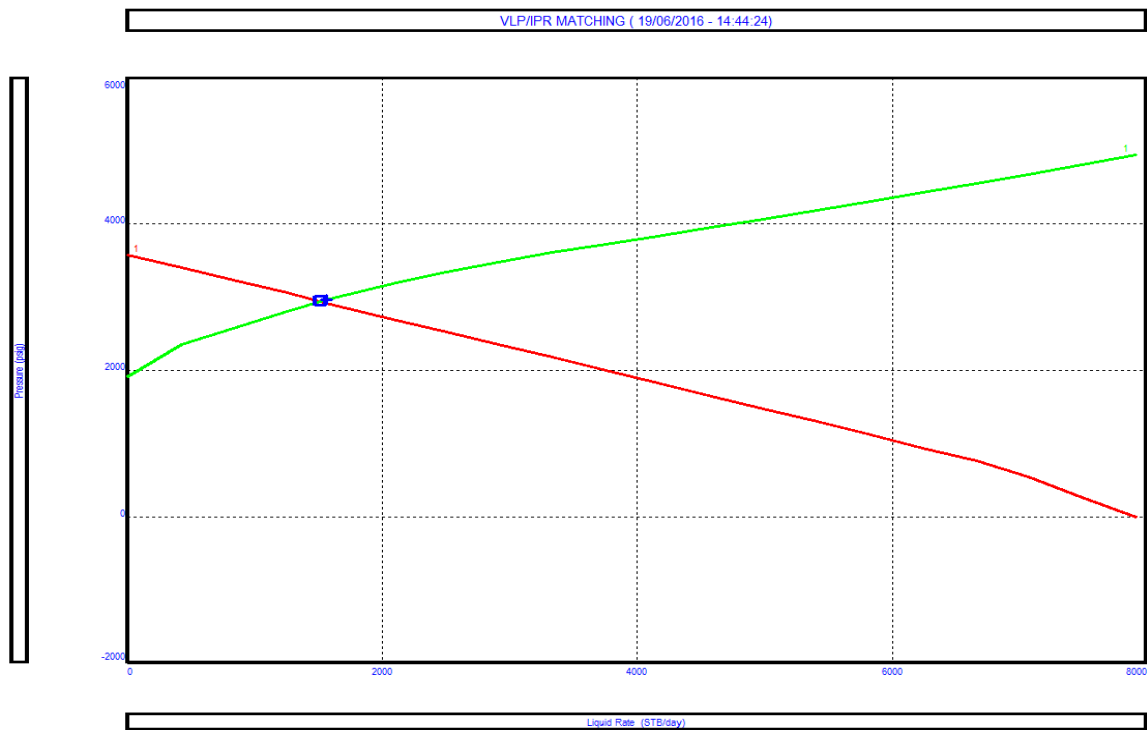
Γεώτρηση A-4



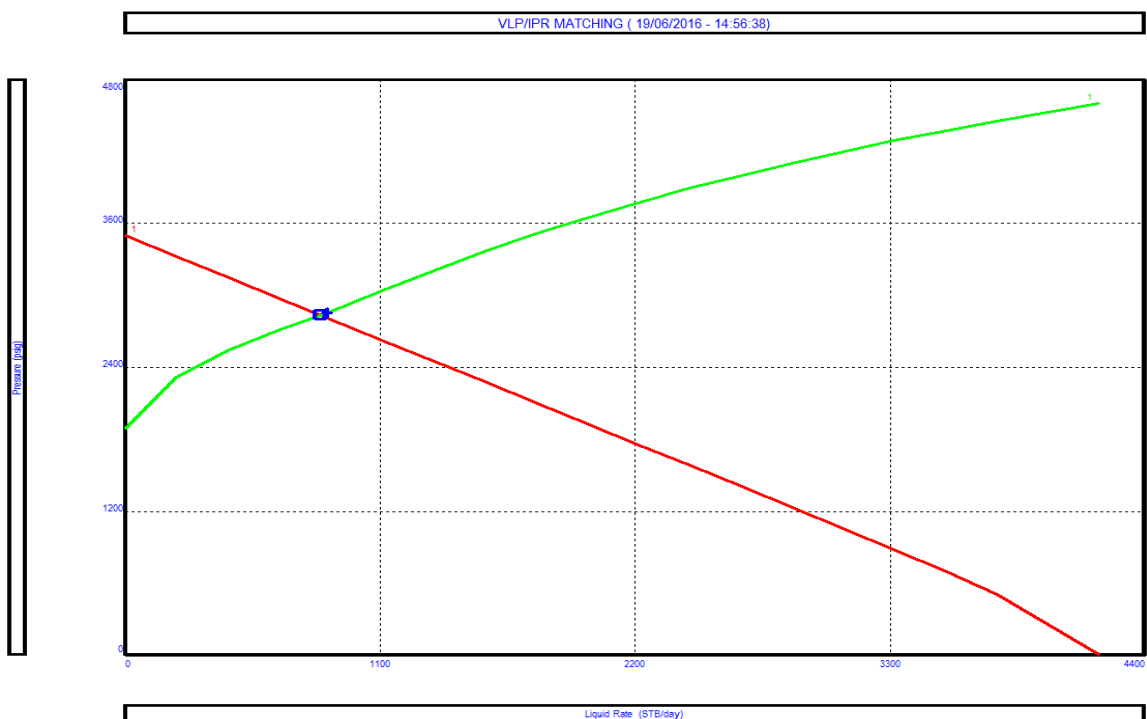
Γεώτρηση A-5 short



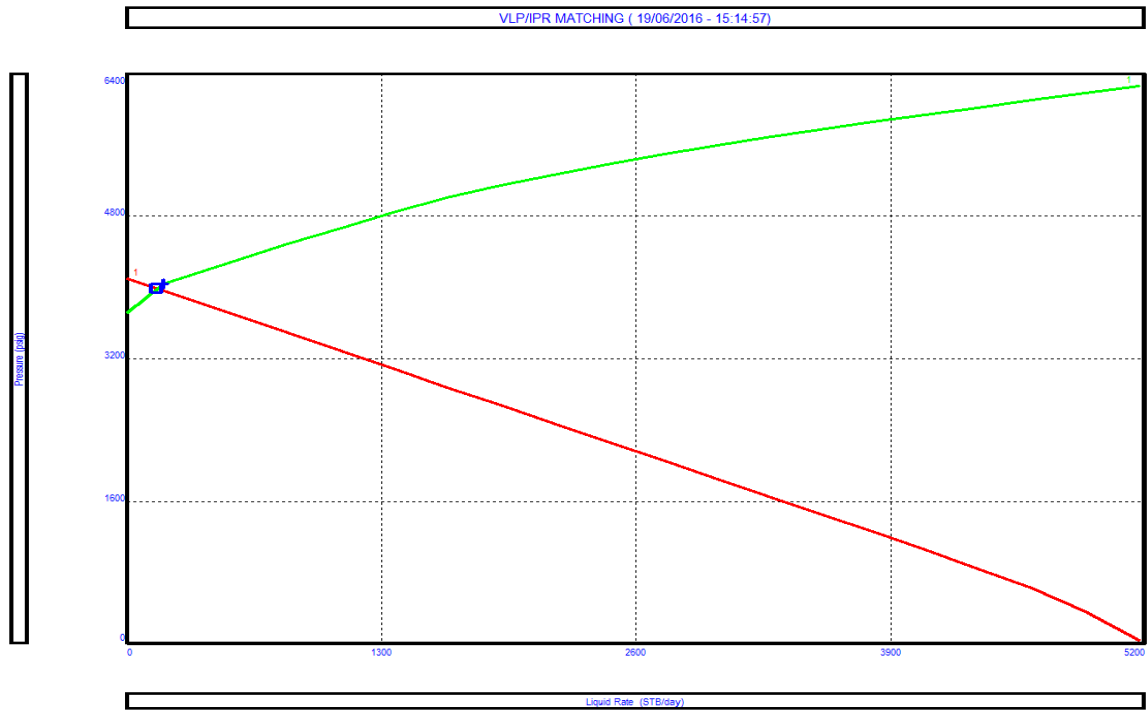
Γεώτρηση A-5 long



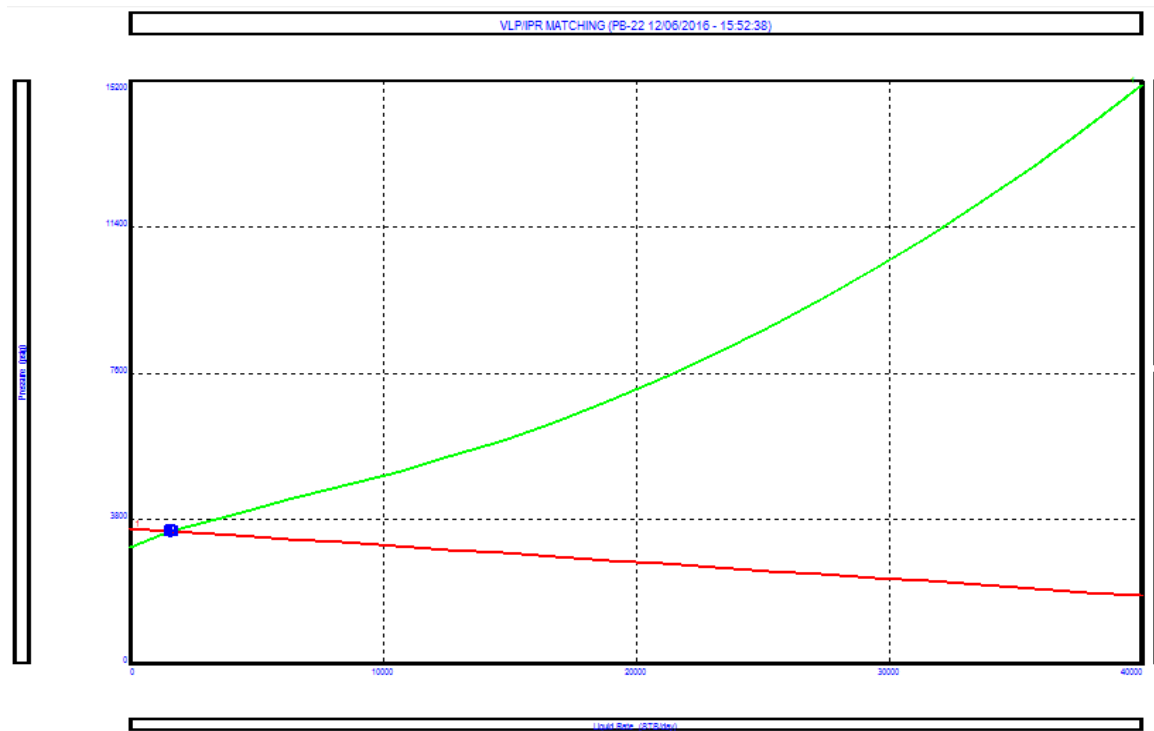
Γεώτρηση B-1



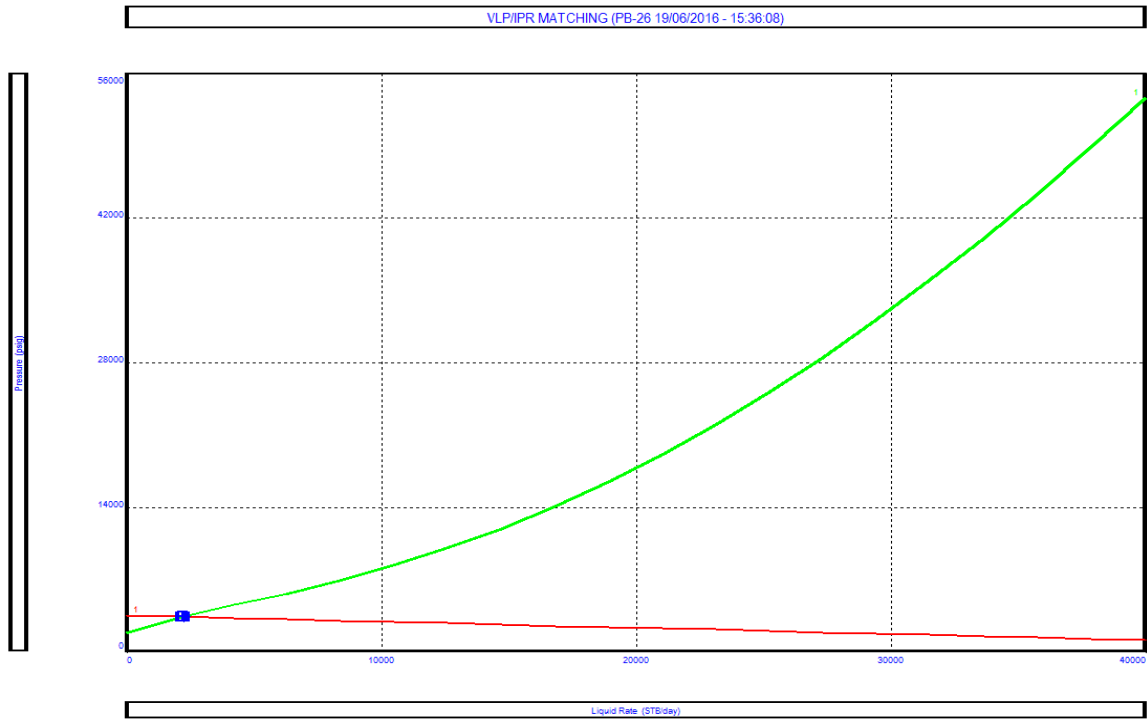
Γεώτρηση B-2



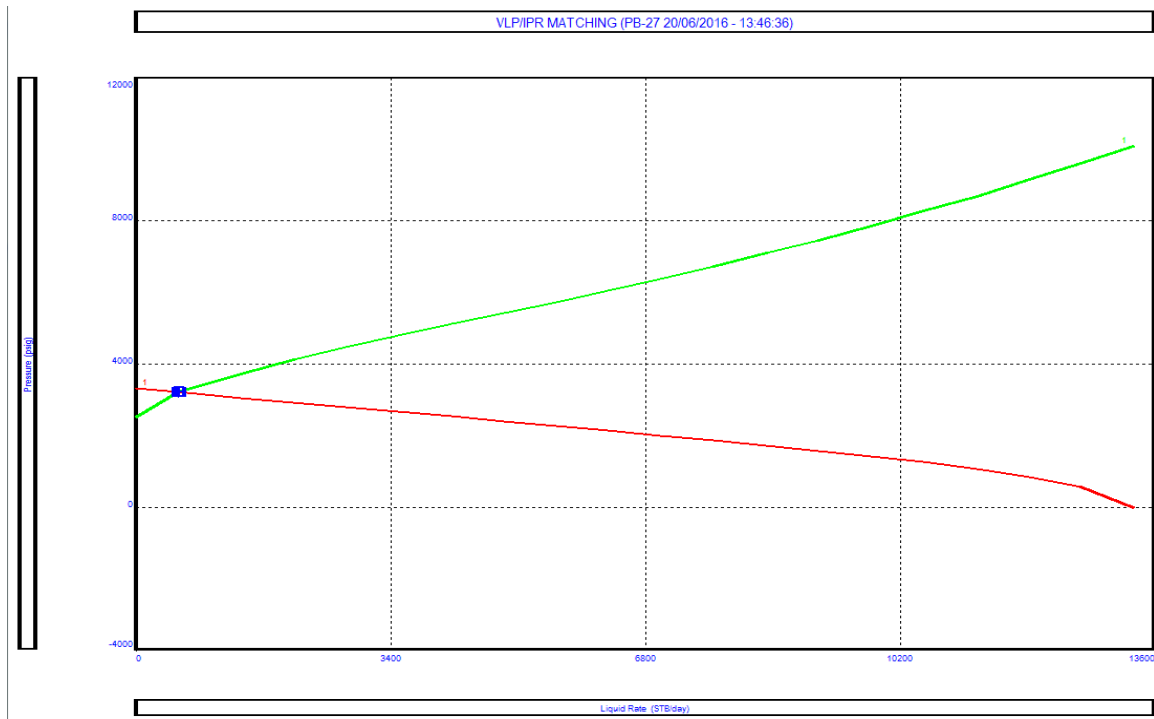
Γεώτρηση B-3



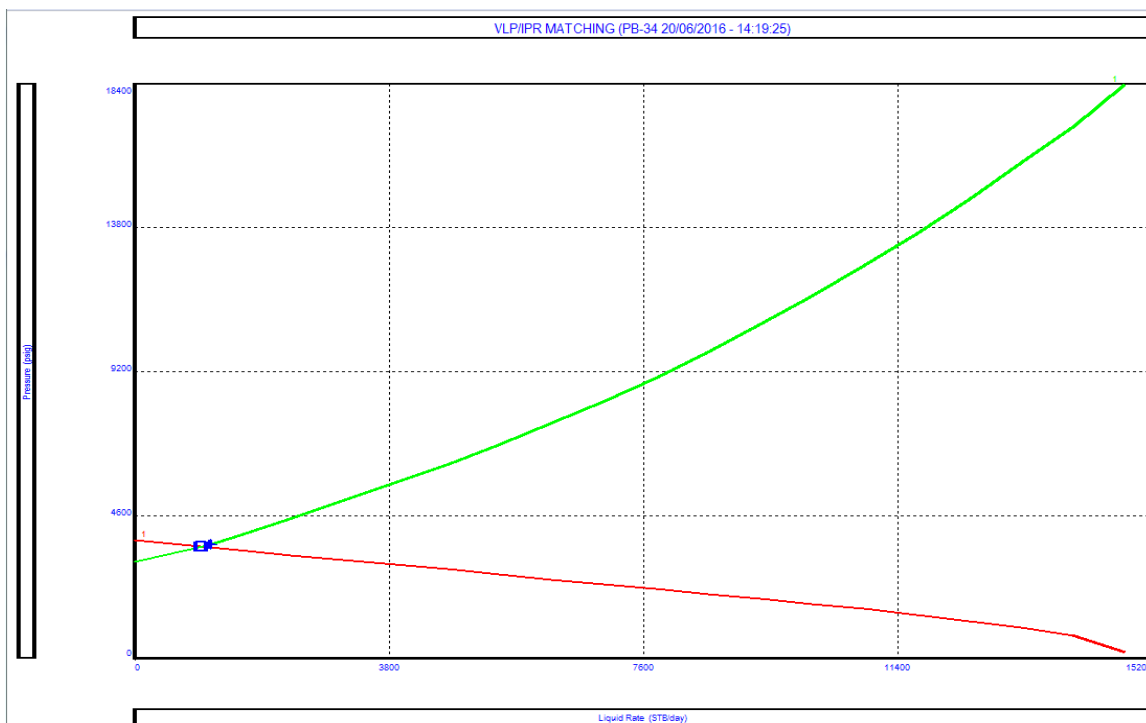
Γεώτρηση B-4



Γεώτρηση B-5



Γεώτρηση B-6



Γεώτρηση B-7

