

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΥΠΟΒΟΗΘΗΣΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΑΝΤΛΙΩΝ  
ΚΑΙ ΕΙΣΠΙΕΣΗΣ ΑΕΡΙΟΥ



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ

# ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΥΠΟΒΟΗΘΗΣΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΑΝΤΛΙΩΝ ΚΑΙ ΕΙΣΠΙΕΣΗ ΑΕΡΙΟΥ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΧΡΗΣΤΟΣ ΤΖΙΦΑΣ

Επιβλέπων: Γαγάνης Βασίλης

ΑΘΗΝΑ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2023

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΥΠΟΒΟΗΘΗΣΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΑΝΤΛΙΩΝ  
ΚΑΙ ΕΙΣΠΙΕΣΗΣ ΑΕΡΙΟΥ

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΥΠΟΒΟΗΘΗΣΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΑΝΤΛΙΩΝ  
ΚΑΙ ΕΙΣΠΙΕΣΗΣ ΑΕΡΙΟΥ



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ

# ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΥΠΟΒΟΗΘΗΣΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΑΝΤΛΙΩΝ ΚΑΙ ΕΙΣΠΙΕΣΗΣ ΑΕΡΙΟΥ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΧΡΗΣΤΟΣ ΤΖΙΦΑΣ

Επιβλέπων: Γαγάνης Βασίλης

Ονοματεπώνυμο μέλους, Ιδιότητα,

Γαγάνης Βασίλης

Ονοματεπώνυμο μέλους, Ιδιότητα,

Σταματάκη Σοφία

Ονοματεπώνυμο μέλους, Ιδιότητα,

Αποστολόπουλος Γεώργιος

ΑΘΗΝΑ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2023

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΥΠΟΒΟΗΘΗΣΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΑΝΤΛΙΩΝ  
ΚΑΙ ΕΙΣΠΙΕΣΗΣ ΑΕΡΙΟΥ

Copyright © Χρήστος Τζίφας, Μηχανικός Μεταλλείων και Μεταλλουργός,  
2023

Με επιφύλαξη κάθε δικαιώματος. All rights reserved.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η Μηχανική Παραγωγής Πετρελαίου (Petroleum Production Engineering) αποτελεί τον κλάδο της Μηχανικής Πετρελαίου (Petroleum Engineering) που αποσκοπεί στη βελτιστοποίηση της παραγωγής, μελετώντας τη ροή των ρευστών σε ένα συνδυασμένο σύστημα ταμιευτήρα-γεώτρησης και την εφαρμογή διαφόρων μεθόδων υποβοήθησης της ροής εντός της παραγωγικής γεώτρησης. Η παρούσα διπλωματική εργασία στοχεύει στην ανάλυση του σχεδιασμού συστήματος τεχνητής ανύψωσης σε επιβαρυμένες γεωτρήσεις, εξετάζοντας μία μελέτη περίπτωσης η οποία περιλαμβάνει τον αναλυτικό σχεδιασμό των μεθόδων υποβοήθησης με το λογισμικό Pipesim της Schlumberger.

Αρχικά πραγματοποιείται εκτίμηση της παρούσας παραγωγής της υπό μελέτη γεώτρησης μέσω μίας αναλυτικής μεθόδου, γνωστή ως «ανάλυση κόμβου» (Nodal Analysis). Για την υλοποίηση της μεθόδου, είναι αναγκαία η εκτίμηση της ικανότητας ροής εντός του ταμιευτήρα και κατά μήκος της γεώτρησης, η οποία μπορεί να αναπαρασταθεί γραφικά μέσω της καμπύλης εισροής (Inflow Performance Relationship, IPR) και εκροής (Vertical Lift Performance, VLP) της γεώτρησης αντίστοιχα. Σε αυτό το πλαίσιο αναλύονται μερικές από τις πιο διαδεδομένες μεθόδους σχεδιασμού των καμπύλων. Με την πραγματοποίηση της ανάλυσης κόμβου μέσω του Pipesim, μπορεί να κριθεί από τον Μηχανικό αν είναι αναγκαία η υποβοήθηση της γεώτρησης.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τρεις από τις πιο γνωστές μεθόδους τεχνητής ανύψωσης, αναλύονται οι φυσικοί νόμοι που τις διέπουν, ο εξοπλισμός τους, ο τρόπος σχεδιασμού τους και η εφαρμογή τους και επίσης η περιγραφή του λογισμικού Pipesim. Τέλος για το συνδυαστικό σύστημα ταμιευτήρα-γεώτρησης της μελέτης περίπτωσης, σχεδιάζονται οι μέθοδοι τεχνητής ανύψωσης με τη βοήθεια του λογισμικού και εκτιμάται και αξιολογείται η πιθανή αύξηση της παραγωγικότητας.

Τα κυριότερα συμπεράσματα που προκύπτουν είναι ότι η ανάπτυξη της τεχνολογίας και των σχετικών λογισμικών έχει επιφέρει μεγάλη αύξηση στην αποδοτικότητα των Μηχανικών και στην ικανότητα τους να σχεδιάζουν μεθόδους τεχνητής ανύψωσης οι οποίες παρέχουν τη δυνατότητα αύξησης της παραγωγής κατά ένα σημαντικό ποσοστό. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι κάθε σύστημα ταμιευτήρα-γεώτρησης είναι ένα δυναμικό σύστημα που μεταβάλλεται με το χρόνο και συνεπώς οι Μηχανικοί

## ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΥΠΟΒΟΗΘΗΣΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΑΝΤΛΙΩΝ ΚΑΙ ΕΙΣΠΙΕΣΗΣ ΑΕΡΙΟΥ

πρέπει να παρακολουθούν διαρκώς τις μεταβολές του και να σχεδιάζουν τρόπους βελτίωσης της παραγωγής, λαμβάνοντας υπ' όψη ταυτόχρονα και τα διαφορετικά πεδία εφαρμογής της κάθε μεθόδου τεχνητής ανύψωσης υπό εξέταση.

### ABSTRACT

Petroleum Production Engineering is the branch of Petroleum Engineering that aims to optimize production by studying the flow of fluids in a combined reservoir-well system and the application of various flow artificial well methods within the producing well. This thesis aims to analyze the design of such a system in high water-cut wells and for this purpose a case study and the detailed design of the assisting methods with Schlumberger's Pipesim software is developed and presented.

Initially, an assessment of the current productivity of the well under study is carried out through an analytical method, known as nodal analysis. To implement this method, it is necessary to estimate the flow within the reservoir and along the well through the Inflow Performance Relationship (IPR) and Vertical Lift Performance (VLP) graphical curves of the well respectively, and in this context, some of those curve design methods are discussed. By performing the nodal analysis through Pipesim, it can be judged by the Engineer whether the artificial lift is necessary.

Three of the most well-known artificial lift methods are then presented and the physical laws governing them, their equipment, their design and their application are discussed. The Pipesim software, used in the case study, is presented and described in detail. In the case study, the productivity of the combined reservoir-well system is estimated and evaluated, and the artificial lift methods are designed with the help of the software.

The main conclusions are that the development of technology has brought about a great increase in the efficiency of Engineers by means of modern software. Artificial lift methods provide the potential of increasing production by a significant amount, but each method finds a different scope that needs to be considered. Finally, the field is a dynamic system that changes over time and therefore the Engineers must constantly monitor its changes and plan ways to improve production.

### Πίνακας Εικόνων

Εικόνα 1 Συνήθης απεικόνιση ταμιευτήρα.....	7
Εικόνα 2 Γεωμετρικό μοντέλο ευθύγραμμης ροής στον ταμιευτήρα.....	9
Εικόνα 3 Γεωμετρικό μοντέλο ακτινικής ροής στον ταμιευτήρα.....	11
Εικόνα 4 Προφίλ πίεσης σε καθεστώς σταθερή ροής.....	14
Εικόνα 5 Προφίλ πίεσης σε καθεστώς ψευδό-σταθερής ροής.....	15
Εικόνα 6 Τιμές συντελεστή σχήματος Dietz .....	16
Εικόνα 7 IPR για ακόρεστο ταμιευτήρα (μονοφασική ροή).....	19
Εικόνα 8 IPR για κορεσμένο ταμιευτήρα .....	21
Εικόνα 9 IPR για μερικώς διφασική ροή .....	22
Εικόνα 10 IPR για ταμιευτήρα αερίου.....	23
Εικόνα 11 Καμπύλη VLP .....	25
Εικόνα 12 Καθεστώτα ροής σε σωλήνωση .....	27
Εικόνα 13 Γράφημα ανάλυσης κόμβου με χρήση λογισμικού.....	29
Εικόνα 14 Νεκρή Γεώτρηση.....	30
Εικόνα 15 Διάταξη Αντλίας Βάκτρου .....	32
Εικόνα 16 Λειτουργία αντλίας εμβόλου .....	33
Εικόνα 17 Θεωρητικό φορτίο για ανελαστική ράβδο.....	37
Εικόνα 18 Θεωρητικό φορτίο για ελαστική ράβδο.....	37
Εικόνα 19 Συνήθης κάρτα δυναμόμετρου .....	38
Εικόνα 20 Φυσικός διαχωρισμός αερίου .....	39
Εικόνα 21 Στάδιο αντλίας ESP .....	42
Εικόνα 22 Διάταξη και στοιχεία ESP αντλίας.....	43
Εικόνα 23 Αύξηση τη πίεσης ρευστού με χρήση αντλίας ESP .....	44
Εικόνα 24 Εφαρμογή αντλίας ESP 100 σταδίων.....	45
Εικόνα 25 Βαλβίδα εκφόρτωσης .....	47
Εικόνα 26 Καμπύλη εύρεσης βέλτιστου ρυθμού εισπίεσης.....	51
Εικόνα 27 Περιβάλλον εργασίας λογισμικού Pipesim .....	53
Εικόνα 28 Κατάλογος σωληνώσεων.....	54
Εικόνα 29 Εισαγωγή σημείων σε γεώτρηση δύο διαστάσεων.....	55
Εικόνα 30 Εξοπλισμός εντός της γεώτρησης .....	56
Εικόνα 31 Οριζόντιες ολοκληρώσεις.....	57
Εικόνα 32 Επιλογές μοντέλων καμπύλης IPR.....	57

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΥΠΟΒΟΗΘΗΣΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΑΝΤΛΙΩΝ  
ΚΑΙ ΕΙΣΠΙΕΣΗΣ ΑΕΡΙΟΥ

Εικόνα 33 Ανάλυση κόμβου του λογισμικού Pipesim .....	58
Εικόνα 34 Παράθυρο εισαγωγής στοιχείων αντλίας βάκτρου.....	59
Εικόνα 35 Κατάλογος αντλιών ESP .....	60
Εικόνα 36 Παράθυρο εισαγωγής συστήματος gas lift.....	60
Εικόνα 37 Κατάλογος βαλβίδων.....	61
Εικόνα 38 Σχεδιασμός καμπύλης ρυθμού εισπίεσης αερίου-παραγωγής.....	61
Εικόνα 39 Σχεδιασμός αντλίας ESP μέσω Pipesim.....	62
Εικόνα 40 Δοκιμή ευαισθησίας για διαφορετικές τιμές PI.....	63
Εικόνα 41 Χρήση "P-T profile" για γραφική απεικόνιση μεγεθών κατά μήκος της γεώτρησης.....	64
Εικόνα 42 Μέθοδος Build and Hold.....	66
Εικόνα 43 Εισαγωγή εξοπλισμού μελέτης περίπτωσης στο λογισμικό Pipesim.....	68
Εικόνα 44 Απεικόνιση γεωμετρίας γεώτρησης στο λογισμικό Pipesim.....	69
Εικόνα 45 Ανάλυση κόμβου με χρήση του λογισμικού Pipesim .....	71
Εικόνα 46 Επίδραση του water cut στην παραγωγή πετρελαίου.....	72
Εικόνα 47 ILL-CONDITIONED κατάσταση .....	74
Εικόνα 48 Μεταβολή πίεσης κατά μήκος της γεώτρησης.....	75
Εικόνα 49 Δεδομένα gas lift response .....	77
Εικόνα 50 Αποτελέσματα gas lift response .....	77
Εικόνα 51 Δεδομένα gas lift design.....	78
Εικόνα 52 Αποτελέσματα gas lift design.....	79
Εικόνα 53 ESP design.....	80
Εικόνα 54 Αποτελέσματα σχεδιασμού ESP .....	81



## Περιεχόμενα

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b> .....	<b>1</b>
1.1 Σύντομη περιγραφή δημιουργίας ταμιευτήρων .....	1
1.2 Σημερινό τοπίο πετρελαϊκής αγοράς.....	2
1.3 Αύξηση της παραγωγής και τεχνητή ανύψωση .....	2
1.4 Παρουσίαση Κεφαλαίων .....	4
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΟΤΗΤΑ ΠΕΔΙΟΥ</b> .....	<b>5</b>
2.1 Εισαγωγή .....	5
2.2 Ροή σε πορώδες μέσο .....	6
2.2.1 Κορεσμός φάσεων .....	6
2.2.2 Νόμος Darcy .....	8
2.2.3 Επίδραση του χρόνου στη ροή σε πορώδες μέσο .....	13
2.3 Μοντέλα περιγραφής συμπεριφοράς ρευστών (fluid models).....	16
2.3.1 Μοντέλο Μαύρου Πετρελαίου (Black oil Model).....	16
2.3.2 Μοντέλο ρευστού πλήρης σύνθεσης (Compositional model).....	17
2.4 Σχηματισμός καμπύλης IPR .....	18
2.4.1 IPR για μονοφασική ροή πετρελαίου (ακόρεστος ταμιευτήρας).....	19
2.4.2 IPR για διφασική ροή.....	19
2.4.3 IPR για μερικώς διφασική ροή.....	21
2.4.4 IPR για ταμιευτήρες αερίου.....	22
2.5 Σχηματισμός καμπύλης VLP .....	23
2.5.1 Ροή σε σωλήνωση παραγωγής.....	23
2.5.2 Απώλειες Πίεσης .....	23
2.5.3 Διφασική ροή.....	25
2.6 Ανάλυση κόμβου (nodal analysis).....	28
2.6.1 Τεχνητή ανύψωση (artificial lift).....	30
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΤΕΧΝΗΤΗ ΑΝΥΨΩΣΗ (ARTIFICIAL LIFT)</b> .....	<b>31</b>

3.1 Εισαγωγή .....	31
3.2 Αντλία Βάκτρου (sucker rod pump) .....	31
3.2.1 Εξοπλισμός επιφάνειας .....	32
3.2.2 Εμβαπτισμένος εξοπλισμός .....	33
3.2.3 Ονοματολογία αντλίας βάκτρου .....	34
3.2.4 Φορτίο αντλίας.....	34
3.2.5 Απόληψη αντλίας .....	36
3.2.6 Αποδοτικότητα αντλίας.....	37
3.2.7 Συμπεράσματα-Εφαρμογές .....	39
3.3 Ηλεκτρική Εμβαπτιζόμενη Αντλία (ESP).....	39
3.3.1 Εμβαπτισμένος εξοπλισμός .....	40
3.3.2 Εξοπλισμός Επιφάνειας .....	42
3.3.3 Σχεδιασμός αντλίας ESP .....	43
3.3.4 Συμπεράσματα-Εφαρμογές .....	45
3.4 Υποβοήθηση γεώτρησης με εισπίεση αερίου (gas lift) .....	45
3.4.1 Διαδικασία εκφόρτωσης.....	46
3.4.2 Βαλβίδες.....	47
3.4.3 Βέλτιστος ρυθμός εισπίεσης αερίου .....	50
3.4.4 Συμπεράσματα-Εφαρμογές .....	51
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ PIPESIM ΤΗΣ SCHLUMBERGER .....</b>	<b>53</b>
4.1 Εισαγωγή .....	53
4.2 Αναπαράσταση/Προσομοίωση συστήματος ταμιευτήρα-γεώτρησης.....	53
4.3 Ανάλυση κόμβου .....	58
4.4 Τεχνητή ανύψωση.....	59
4.5 Λοιπές λειτουργίες .....	62
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ .....</b>	<b>65</b>
5.1 Εισαγωγή .....	65

5.2 Περιγραφή συστήματος ταμιευτήρα-γεώτρησης παραγωγής .....	65
5.3 Εισαγωγή δεδομένων στο λογισμικό .....	67
5.4 Αξιολόγηση συστήματος ταμιευτήρα-γεώτρησης .....	70
5.5 Υποβοήθηση της γεώτρησης με μεθόδους τεχνητής ανύψωσης.....	73
5.5.1 Δοκιμή αντλίας βάρου .....	73
5.5.2 Δοκιμή συστήματος gas lift .....	76
5.5.3 Δοκιμή αντλίας ESP .....	79
5.5.4 Εκτίμηση μελλοντικής παραγωγής .....	82
Συμπεράσματα.....	83
Βιβλιογραφία .....	85

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1 Σύντομη περιγραφή δημιουργίας ταμιευτήρων

Η προέλευση των υδρογονανθράκων εντοπίζεται σε οργανικά κατάλοιπα χερσαίων και θαλασσιών οργανισμών που εγκλωβίστηκαν μέσα σε ιζηματογενή στρώματα χωρίς επαφή με το οξυγόνο (αναερόβιες συνθήκες). Κατά το πρώτο στάδιο της μεταμόρφωσης του οργανικού υλικού, το οποίο ονομάζεται διαγένεση, μικροοργανισμοί ξεκινούν την αποδόμησή του διασπώντας το σε CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S και μεθάνιο, καθώς και σε ένα αδιάλυτο οργανικό υπόλειμμα από το οποίο προκύπτει το κηρογόνο. Η διαδικασία της διαγένεσης λαμβάνει χώρα σε βάθη έως 1000 m και θερμοκρασία έως 50-60°C περίπου. Καθώς τα ιζηματογενή στρώματα υποχωρούν σε μεγαλύτερα βάθη, όπου λόγω της διαρκούς αύξησης της θερμοκρασίας αναστέλλεται η μικροβιακή δραστηριότητα, οι θερμικές μετατροπές καθίστανται σημαντικές και το κηρογόνο που σχηματίστηκε στα πρώτα στάδια της διαγένεσης διασπάται σε μικρότερα και πλέον ευκίνητα μόρια, τα βιτουμένια, τα οποία με τη σειρά τους μετατρέπονται σε μικρότερα μόρια υγρής και αέριας φάσης. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται καταγένεση και λαμβάνει χώρα σε βάθη έως 4000 m και θερμοκρασία έως 175°C περίπου.

Η δημιουργία των μορίων των υδρογονανθράκων μέσα στα ιζηματογενή πετρώματα, επιφέρει αύξηση πίεσης στον σχηματισμό, που όταν υπερβεί την αντοχή του μητρικού πετρώματος, προκαλεί ρωγμές μέσω των οποίων ποσότητες υδρογονανθράκων αποβάλλονται στον περιβάλλοντα χώρο (μετανάστευση). Η διαδικασία αυτή, που θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως κύκλος, δηλαδή αύξηση της πίεσης του μητρικού πετρώματος-ρωγμάτωση-αποβολή υδρογονανθράκων, μπορεί να επαναληφθεί πολλές φορές κατά την διάρκεια της ωρίμανσης. Η πρωτογενής μετανάστευση είναι πολύ βραδεία και λαμβάνει χώρα διαμέσων πορώδων μέσων, συνήθως ελάχιστα διαπερατών, μέχρις ότου οι υδρογονάνθρακες συναντήσουν ευνοϊκότερες συνθήκες ροής όπου, η δευτερογενής μετανάστευση καθίσταται πολύ ταχύτερη και ρυθμίζεται κυρίως από τις δυνάμεις της βαρύτητας, καθώς οι υδρογονάνθρακες έχοντας μικρότερη πυκνότητα από το νερό του σχηματισμού (formation water) το εκτοπίζουν προς τα κάτω ενώ αυτοί κινούνται προς τα πάνω. Η ανοδική κίνηση των υδρογονανθράκων που μεταναστεύουν συνεχίζεται μέχρι να συναντηθεί κάποιο αδιαπέρατο πέτρωμα όπου, οι τριχοειδείς πιέσεις εισόδου στους

πόρους του δεν δύνανται να υπερνικηθούν από τις δυνάμεις της άνωσης, άρα και οι υδρογονάνθρακες παγιδεύονται μέσα σε αυτό. Οι παγίδες των ρευστών είναι είτε δομικές (structural), όπως αντίκλινα, μεταπτώσεις, δόμοι άλατος κ.α., είτε στρωματογραφικές (stratigraphic). Για να είναι εκμεταλλεύσιμο ένα κοίτασμα, θα πρέπει η διαμόρφωση του πετρώματος να δημιουργεί παγίδες εντός των οποίων να έχουν συσσωρευτεί σημαντικές ποσότητες πετρελαίου που να δικαιολογούν την δαπάνη για την παραγωγή του. (Σταματάκη)

## **1.2 Σημερινό τοπίο πετρελαϊκής αγοράς**

Το πετρέλαιο, ή αλλιώς μαύρος χρυσός, είναι άρρηκτα συνδεδεμένο με την παγκόσμια οικονομία και τα προϊόντα του καταναλώνονται σε όλους τους τομείς της καθημερινότητας. Οι ρίζες της σύγχρονης βιομηχανίας πετρελαίου ανιχνεύονται στο Μπακού, όπου το πρώτο εμπορικό διωλιστήριο ιδρύθηκε το 1837, για να διωλίσει πετρέλαιο σε παραφίνη για σκοπούς θέρμανσης και φωτισμού.

Η παγκόσμια ζήτηση ενέργειας αυξάνεται συνεχώς, ακολουθώντας τους ρυθμούς αύξησης του πληθυσμού της γης και τη σχετική βελτίωση του βιοτικού επιπέδου των κατοίκων της. Η πανδημία του 2019, μείωσε την παγκόσμια ζήτηση σε ορुकτούς πόρους, προκαλώντας τεράστια προβλήματα στην αποθήκευσή τους και μειώνοντας την τιμή του πετρελαίου δραματικά, η οποία τελικά ανακάμπτει σήμερα λόγω της ύφεσής της. Ωστόσο, ο πόλεμος στην Ουκρανία και ένας πιθανός αποκλεισμός του Ρωσικού πετρελαίου και αερίου (2<sup>ος</sup> μεγαλύτερος παραγωγός παγκόσμια), σε συνδυασμό με την επάνοδο της Κίνας, που ανακάμπτει από τις επιπτώσεις της πανδημίας, μπορούν να προκαλέσουν μία νέα αναταραχή στην πετρελαϊκή αγορά, με την προσφορά του πετρελαίου να μην είναι επαρκής.

## **1.3 Αύξηση της παραγωγής και τεχνητή ανύψωση**

Οι παγκόσμιες βιομηχανίες προσπαθούν να αυξήσουν την παραγωγή τους για την κάλυψη του πλεονάσματος στη ζήτηση και την αύξηση του κέρδους τους. Πολλές νεκρές γεωτρήσεις (ανικανότητα ανύψωσης ρευστού) αλλά και ανεκμετάλλευτοι ταμειυτήρες που θεωρούνταν μη οικονομικοί είτε λόγω ποιότητας και βάρους του περιεχόμενου πετρελαίου είτε γενικότερα λόγω της χαμηλής τους παραγωγικότητας, μπορούν να αξιοποιηθούν λόγω και της ανακάλυψης νέων τεχνολογιών (π.χ. υδραυλική ρωγμάτωση σε σχιστόλιθο) που μπορούν να βελτιώσουν τις δυσμενείς παραμέτρους και να αυξήσουν τελικά την παραγωγικότητά τους. Επιπλέον, σε πολλές

εν λειτουργία γεωτρήσεις, μπορεί να πραγματοποιηθεί σχεδιασμός αύξησης της παραγωγής. Συνήθως η εκμετάλλευση ενός πετρελαϊκού πεδίου ακολουθεί το παρακάτω χρονολογικό σχήμα:

Πρωτογενής παραγωγή - Δευτερογενής παραγωγή - Τριτογενής παραγωγή

Στα αρχικά στάδια εκμετάλλευσης ενός πετρελαϊκού κοιτάσματος πραγματοποιείται η πρωτογενής παραγωγή, όπου το ρευστό ρέει εκ του φυσικού του εντός του ταμιευτήρα προς τη γεώτρηση ωθούμενο από τη συμπιεστότητα του. Η πρωτογενής παραγωγή σταματάει είτε όταν η πίεση του ταμιευτήρα πέσει αρκετά χαμηλά με αποτέλεσμα η παραγωγή να μην είναι πλέον οικονομικά ελκυστική. Στη συνέχεια πραγματοποιείται η δευτερογενής παραγωγή με εισπίεση νερού στα άκρα του ταμιευτήρα (waterflooding), το οποίο διατηρεί κατά το δυνατόν την πίεση του ταμιευτήρα σταθερή και ταυτόχρονα ωθεί το ρευστό προς την κατεύθυνση της γεώτρησης, και επιτυγχάνεται είτε φυσικά, μέσω ενός υποκείμενου υδροφόρου ορίζοντα, είτε τεχνητά, μέσω γεωτρήσεων εισπίεσης νερού στα άκρα. Σπανιότερα πραγματοποιείται τριτογενής παραγωγή με διάφορες μεθόδους έγχυσης αερίου, διαλυτών κ.α. εντός του ταμιευτήρα για τη βελτίωση ορισμένων παραμέτρων που σχετίζονται με την παραγωγικότητα του πεδίου. Στόχος της είναι η ανάκτηση του υπολειμματικού πετρελαίου, δηλαδή εκείνου που λόγω κάποιων παραμέτρων του ταμιευτήρα (πορώδες, εισπιασμένο νερό, κ.α.) έχει παραμείνει μέσα στους πόρους και τελικά η παραγωγή του μπορεί να αποφέρει κέρδη.

Για την εκμετάλλευση των νεκρών γεωτρήσεων, δηλαδή εκείνων που τα ρευστά δεν έχουν την απαραίτητη ενέργεια για να ανυψωθούν εκ του φυσικού τους στην κεφαλή της γεώτρησης λόγω βαρύτητας (βαριά πετρέλαια ή/και με υψηλό ποσοστό νερού), αλλά και για την ενίσχυση της παραγωγής και ειδικότερα σε γεωτρήσεις όπου το νερό από τη δευτερογενή παραγωγή (waterflooding), έχει διαπεράσει τον ταμιευτήρα και έχει εισχωρήσει στη γεώτρηση παραγωγής (water breakthrough), οι Μηχανικοί Παραγωγής σχεδιάζουν και αξιοποιούν τις μεθόδους τεχνητής υποβοήθησης παραγωγής υδρογονανθράκων, όπου στα αγγλικά δίνονται με τον όρο «artificial lift». Οι μέθοδοι αυτοί αποσκοπούν στην προσφορά ενέργειας στα παραγόμενα ρευστά κατά μήκος της γεώτρησης, μέσω διάφορων τεχνικών και φυσικών φαινομένων, με αποτέλεσμα την αύξηση του ρυθμού ροής εντός της γεώτρησης παραγωγής. Η αύξηση της παραγωγής εξισορροπείται από τη μείωση της πίεσης πυθμένα της

γεώτρησης με αποτέλεσμα την αύξηση του ρυθμού ροής και εντός του ταμιευτήρα προς τη γεώτρηση.

#### **1.4 Παρουσίαση Κεφαλαίων**

Η παρούσα διπλωματική εργασία στοχεύει στην ανάλυση του σχεδιασμού συστήματος τεχνητής ανύψωσης σε επιβαρυμένες γεωτρήσεις. Την παρουσίαση της λειτουργικότητας των διαθέσιμων μεθόδων ακολουθεί η εφαρμογή τους σε μία πραγματική μελέτη περίπτωσης (case study). Αρχικά στο Κεφάλαιο 2, αναλύονται οι φυσικοί νόμοι που διέπουν έναν ταμιευτήρα υδρογονανθράκων και μία γεώτρηση παραγωγής, και εξηγείται ο τρόπος με τον οποίο ο Μηχανικός μπορεί να εκτιμήσει την παραγωγή πετρελαίου και γενικότερα τη μεταβολή στις ιδιότητες του συνδυαστικού συστήματος ταμιευτήρα-γεώτρησης. Στο Κεφάλαιο 3, παρουσιάζονται οι τρεις πιο δημοφιλείς μέθοδοι τεχνητής ανύψωσης και αναλύονται οι αρχές λειτουργίας τους, ο εξοπλισμός τους, η εφαρμογή τους, η απόδοσή τους και ο τρόπος σχεδιασμού τους. Έπειτα στο Κεφάλαιο 4 γίνεται αναφορά στο λογισμικό Pipesim της Schlumberger και παρουσιάζονται οι λειτουργίες του και ειδικότερα η χρήση του εργαλείου «nodal analysis». Στο Κεφάλαιο 5, παρουσιάζεται η μελέτη περίπτωσης σχεδιασμού συστήματος υποβοήθησης παραγωγής σε επιβαρυμένη γεώτρηση, με πραγματικά δεδομένα ταμιευτήρα πετρελαίου και γεώτρησης παραγωγής, με χρήση του λογισμικού Pipesim. Τέλος καταγράφονται τα βασικά συμπεράσματα που προέκυψαν κατά την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΟΤΗΤΑ ΠΕΔΙΟΥ

### 2.1 Εισαγωγή

Στην πετρελαϊκή βιομηχανία, ως παραγωγή ορίζεται ο όγκος πετρελαίου και αερίου που εξέρχεται από μια πετρελαϊκή γεώτρηση. Συγκεκριμένα γίνεται αναφορά στην ημερήσια παραγωγή, δηλαδή τον όγκο που εξέρχεται από τη γεώτρηση στο πέρας 24 ωρών. Ασφαλώς, σε ένα ταμιευτήρα πετρελαίου και αερίου, μπορεί να υπάρχουν παραπάνω από μία γεωτρήσεις και τότε γίνεται λόγος για συνολική παραγωγή, που θα είναι το άθροισμα των επιμέρους παραγωγών μετά το πέρας των 24 ωρών.

Η εκτίμηση της παραγωγής προκύπτει από μια αναλυτική μέθοδο που ονομάζεται «ανάλυση κόμβου» ή στα αγγλικά «nodal analysis». Κατά τη μέθοδο αυτή, η παραγωγή εκτιμάται από δύο καμπύλες οι οποίες μπορούν να περιγράψουν γραφικά και να συνοψίσουν όλα τα φυσικά φαινόμενα που συμβαίνουν στον ταμιευτήρα και στη γεώτρηση αντίστοιχα και κατά συνέπεια να ποσοτικοποιήσουν τον όγκο του ρευστού που εξέρχεται από τον ταμιευτήρα και από τη γεώτρηση για καθορισμένες πιέσεις. Ο μηχανικός μπορεί στη συνέχεια με την «ανάλυση κόμβου» να εκτιμήσει τον τελικό όγκο που θα παραχθεί στην επιφάνεια. Ως κόμβος συνήθως επιλέγεται ο πυθμένας της γεώτρησης, δηλαδή το σημείο που εισέρχεται το ρευστό στη σωλήνωση ή η κεφαλή της γεώτρησης. Η τομή των δύο καμπύλων στο επιλεχθέν σημείο, δηλαδή στο κόμβο, δίνει την εκτιμώμενη παραγωγή. Το «nodal analysis» είναι ένα εξαιρετικά χρήσιμο εργαλείο για τον Μηχανικό και τις πετρελαϊκές βιομηχανίες, επειδή μπορεί εύκολα να εκτιμηθεί η αναμενόμενη παραγωγή μιας γεώτρησης, είτε πριν την έναρξη της παραγωγής είτε κατά τη διάρκειά της, και με βάση αυτή να παρθούν αποφάσεις για τη διαχείρισή της. Επίσης, για λόγους πρόβλεψης και σχεδιασμού της συνολικής παραγωγής ενός πετρελαϊκού συστήματος σε βάθος χρόνου, μπορεί επίσης να εκτιμηθεί, μέσω δοκιμών ευαισθησίας, η χρονική στιγμή που η παραγωγή θα σταματήσει να είναι οικονομική. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό διότι η παραγωγή αναπόφευκτα σχετίζεται με το κέρδος της εταιρίας σε μακροπρόθεσμο επίπεδο και έτσι με την αξιοποίηση της μεθόδου του «nodal analysis» μπορούν να σχεδιαστούν οι επόμενες ενέργειες για τη βελτίωση της.

Η καμπύλη που περιγράφει τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα στον ταμιευτήρα ονομάζεται «Inflow Performance Relationship, IPR», στα ελληνικά μπορεί να μεταφραστεί ως «Σχέση Απόδοσης Εισροής», όπου ως εισροή αναφέρεται η



ποσότητα ρευστού που εισέρχεται στη γεώτρηση από τον ταμιευτήρα, ενώ η καμπύλη που περιγράφει τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα στη γεώτρηση, δηλαδή στην ανύψωση του ρευστού προς την επιφάνεια, ονομάζεται «Vertical Lift Performance, VLP» που μπορεί να μεταφραστεί ως «Απόδοση Κάθετης Ανύψωσης». Συχνά στη βιβλιογραφία χρησιμοποιείται εναλλακτικά ο όρος «Tubing Performance Relationship», δηλαδή «Σχέση Απόδοσης Παραγωγικής Σωλήνωσης». Στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει περιγραφή των φυσικών νόμων και φαινομένων που διέπουν τη ροή στον ταμιευτήρα και τη γεώτρηση, θα αναλυθεί ο τρόπος που κατασκευάζονται οι καμπύλες IPR και VLP και θα παρουσιαστεί η χρήση τους.

## **2.2 Ροή σε πορώδες μέσο**

Οι ταμιευτήρες υδρογονανθράκων δεν είναι λίμνες πετρελαίου κάτω από την επιφάνεια, καθώς δεν υπάρχουν τεράστιες ανοιχτές κοιλότητες που να περιέχουν τους υδρογονάνθρακες, αλλά αποτελούν ένα πορώδες μέσο, που για λόγους κατανόησης θα μπορούσε να παρομοιαστεί με ένα σφουγγάρι. Στους πόρους αποθηκεύονται οι υδρογονάνθρακες κατά τη διάρκεια του γεωλογικού χρόνου, και από τους πόρους αυτούς θα κινηθούν για να εισαχθούν στη γεώτρηση. Επιπλέον για να μπορεί να υπάρξει δυνατότητα κίνησης των υδρογονανθράκων από πόρο σε πόρο και τελικά μέχρι τη γεώτρηση παραγωγής, πρέπει ο σχηματισμός να είναι διαπερατός, δηλαδή να υπάρχουν οι διάφοροι «δρόμοι» από τους οποίους μπορούν να κινηθούν τα ρευστά. Η ιδιότητα αυτή καλείται διαπερατότητα. Οι υδρογονάνθρακες που έχουν συγκεντρωθεί σε απομονωμένους πόρους, δηλαδή σε πόρους που δεν επικοινωνούν με τους υπόλοιπους, δεν μπορούν να παραχθούν στην επιφάνεια. Συνεπώς το πορώδες σχετίζεται με τον διαθέσιμο χώρο για την αποθήκευση υδρογονανθράκων ενώ η διαπερατότητα σχετίζεται με την ευκολία κίνησής τους. Οι δυο αυτές ιδιότητες των ταμιευτήρων επηρεάζουν άμεσα την παραγωγή.

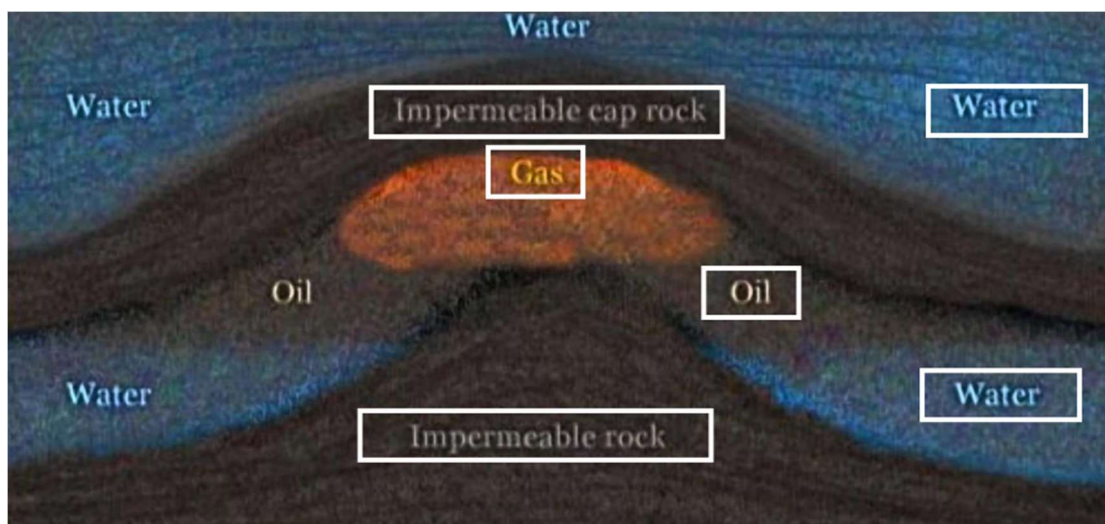
### **2.2.1 Κορεσμός φάσεων**

Στους πορώδεις σχηματισμούς ωστόσο δεν αποθηκεύονται μόνο υδρογονάνθρακες αλλά και νερό. Εδώ δεν γίνεται αναφορά στον υδροφόρο ορίζοντα, κάτω από τον οποίο δεν υπάρχουν υδρογονάνθρακες, αλλά στο ενδογενές νερό που έχει αποθηκευτεί στους πόρους. Οι πόροι δηλαδή δεν είναι πληρωμένοι αποκλειστικά με υδρογονάνθρακες αλλά περιέχουν και ποσότητα νερού. Η παρουσία του ενδογενούς νερού οφείλεται στις τριχοειδείς πιέσεις, δηλαδή στη διαφορά πίεσης στη διεπιφάνεια μεταξύ του πετρελαίου και του νερού. Θεωρείται ότι αρχικά οι πόροι ήταν

## ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΥΠΟΒΟΗΘΗΣΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΑΝΤΛΙΩΝ ΚΑΙ ΕΙΣΠΙΕΣΗΣ ΑΕΡΙΟΥ

πληρωμένοι εξολοκλήρου από νερό, το οποίο στη συνέχεια εκτοπίστηκε από το πετρέλαιο που μεταναστεύει στον σχηματισμό με εξαίρεση την προαναφερθείσα ποσότητα του ενδογενούς νερού. Το ενδογενές νερό δεν μπορεί να παραχθεί διότι δεν μπορεί να κινηθεί από πόρο σε πόρο. Το ογκομετρικό ποσοστό της κάθε φάσης ονομάζεται κορεσμός και είναι απαραίτητος για την εκτίμηση της ροής και τελικά της παραγωγής. Ο κορεσμός σε ενδογενές νερό κυμαίνεται συνήθως από 15% έως 25% και ο συμβολισμός του γίνεται με το γράμμα «S», από την αγγλική λέξη «saturation» και με δείκτη ανάλογα τη φάση στην οποία αναφέρεται (π.χ.  $S_{wc} = 0.2$ ). Σημειώνεται ότι ο κορεσμός είναι ποσοστό όγκου και όχι μάζας, δηλαδή αναφέρεται στον πόσο χώρο καταλαμβάνει κάθε φάση. (Ahmed, 1989)

Μία συνήθης απεικόνιση ενός ταμιευτήρα δίνεται στην Εικόνα 1, όπου όπως παρατηρείται μπορούν να συνυπάρχουν τρία στρώματα φάσεων.



Εικόνα 1 Συνήθης απεικόνιση ταμιευτήρα

Το πρώτο στρώμα, από κάτω προς τα πάνω, είναι εκείνο του υδροφόρου ορίζοντα, το οποίο είναι πληρωμένο αποκλειστικά με νερό ( $S_w=1$ ). Το δεύτερο στρώμα είναι εκείνο του πετρελαίου όπου  $S_w=0.2$  και  $S_o=0.8$  και το τρίτο στρώμα, αν υπάρχει, είναι εκείνο του αερίου, το οποίο καλείται και αέριο κάλυμμα (gas gap), στο οποίο  $S_o=0$ ,  $S_w=0.2$  και  $S_g=0.8$ . Επομένως ο κορεσμός δεν είναι σταθερός αλλά είναι συνάρτηση της θέσης στο χώρο αλλά και του χρόνου, καθώς κατά την παραγωγή μπορεί να απελευθερωθεί διαλυμένο αέριο εντός του πετρελαίου εάν σε κάποιο σημείο εντός του ταμιευτήρα η πίεση πέσει κάτω από το σημείο φυσαλίδας, με αποτέλεσμα την αύξηση του κορεσμού σε αέριο και τη μείωση σε πετρέλαιο. Επιπλέον κατά την

δευτερογενή παραγωγή (waterflooding), ο κορεσμός του νερού αυξάνεται λόγω της συνεχής εισπίεσης νερού μέσα στον ταμιευτήρα..

Οι ταμιευτήρες βρίσκονται σε συνθήκες που έχουν δημιουργηθεί από τα γειτονικά πετρώματα, το βάθος που βρίσκονται αλλά και τα ρευστά (σύσταση) που περιέχουν. Η επικρατούσα θερμοκρασία και η πίεση είναι απαραίτητα μεγέθη για τον προσδιορισμό της παραγωγής. Μιλώντας αυστηρά για να μπορεί να απεικονιστεί όσο το δυνατόν καλύτερα ένας ταμιευτήρας, η επικρατούσα πίεση και ο κορεσμός της κάθε φάσης θα πρέπει να είναι γνωστά για κάθε χρονική στιγμή και για κάθε σημείο στο εσωτερικό του. Προς το παρόν, όλες οι θεωρήσεις του Κεφαλαίου, θα βασίζονται στο ότι όλος ο ταμιευτήρας αποτελείται μόνο από ακόρεστο πετρέλαιο, δηλαδή δεν υπάρχει κάλυμμα αερίου.

### 2.2.2 Νόμος Darcy

Όπως ήδη ειπώθηκε προηγουμένως, οι υδρογονάνθρακες δεν κινούνται σαν ποτάμι ή αντλούνται όπως το νερό από μία λίμνη, αλλά κινούνται μέσα σε πόρους. Η ροή των υδρογονανθράκων καλείται ροή σε πορώδες μέσο και διέπεται από τον νόμο του Darcy. Ο Darcy απέδειξε ότι η ταχύτητα ροής σε μονοδιάστατα πορώδη μέσα είναι συνάρτηση της διαπερατότητας  $k$  του σχηματισμού, του ιξώδους  $\mu$  του κινούμενου ρευστού και της βαθμίδας πίεσης  $\frac{dp}{dx}$ , δηλαδή τον ρυθμό με τον οποίο μεταβάλλεται η πίεση κατά μήκος της ροής. Δεδομένου ότι οι ταμιευτήρες είναι τρισδιάστατοι, ο παραπάνω νόμος μονοδιάστατης ροής επεκτείνεται όπως θα εξηγηθεί στη συνέχεια. Συνεπώς η ταχύτητα ροής δίνεται από τον τύπο:

$$u = -\frac{k}{\mu} \frac{dp}{dx} \quad (1.1)$$

Ωστόσο επειδή συνήθως η παράμετρος ενδιαφέροντος, όσον αφορά τη μοντελοποίηση της ροής εντός του ταμιευτήρα, είναι ο όγκος του ρευστού που κινείται και όχι η ταχύτητά του, υπολογίζεται η ογκομετρική παροχή η οποία εξαρτάται από τη διατομή  $A$ , μέσα στην οποία κινείται το ρευστό. Έτσι η παροχή δίνεται από:

$$q^{RC} = -\frac{Ak}{\mu} \frac{dp}{dx}, \quad (1.2)$$

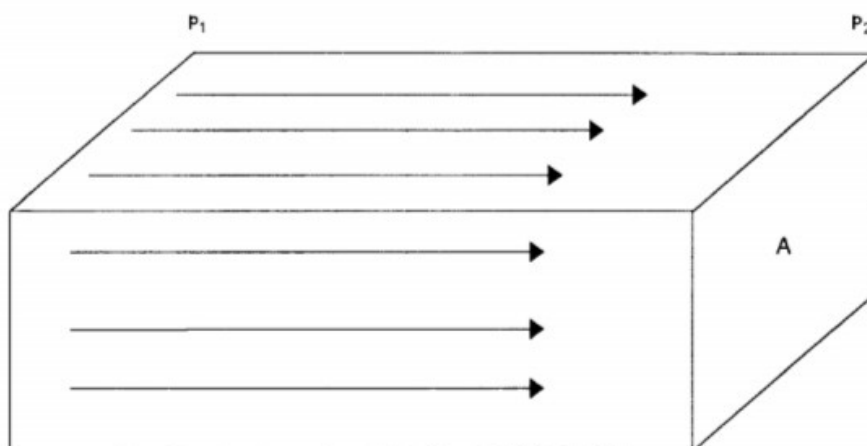
όπου ο εκθέτης RC αναφέρεται στο «reservoir conditions, RC», δηλαδή στις συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας που επικρατούν στον ταμιευτήρα. Η κινητήριος δύναμη που ωθεί το ρευστό είναι η διαφορά της πίεσης ανάμεσα σε δύο σημεία. Η

κίνηση πραγματοποιείται από ένα σημείο με υψηλότερη πίεση προς ένα σημείο με χαμηλότερη, οπότε για να εξασφαλιστεί θετική ταχύτητα εισάγεται το «-» στην εξίσωση. Αντίστοιχα, αν δεν υπάρχει διαφορά πίεσης ανάμεσα σε δύο σημεία, δεν υπάρχει και ροή ρευστού, άρα υδρογονανθράκων. (Guo, 2017)

Για να ληφθεί υπόψιν η διατομή A, έχουν προταθεί δύο απλουστευτικά μοντέλα για την περιγραφή της γεωμετρίας των ταμιευτήρων, το γεωμετρικό μοντέλο ευθύγραμμης ροής και το γεωμετρικό μοντέλο ακτινικής ροής. Πράγματι, κανένας ταμιευτήρας δεν ταυτίζεται απόλυτα με το γεωμετρικό σχήμα των δύο αυτών απλοποιημένων μοντέλων, όμως η παροχή και οι πιέσεις που υπολογίζονται προσεγγίζουν με ικανοποιητική ακρίβεια τις πραγματικές τιμές. Τα δύο μοντέλα μοιράζονται κάποιες κοινές παραδοχές. Η πρώτη παραδοχή είναι το ότι η ροή είναι μονοδιάστατη, δηλαδή το ρευστό κινείται μόνο προς την κατεύθυνση της γεώτρησης παραγωγής, ενώ η δεύτερη ότι ο ταμιευτήρας είναι ομοιογενής σε όλη την έκτασή του, που συνεπάγεται ότι το πάχος, το πορώδες και η διαπερατότητα παραμένουν σταθερά κατά τη διεύθυνση της ροής.

### 2.2.2.1 Γεωμετρικό μοντέλο ευθύγραμμης ροής

Το 1<sup>ο</sup> γεωμετρικό μοντέλο περιγράφει τον ταμιευτήρα ως οριζόντιο και επιμήκη με πολύ μεγάλο μήκος σε σχέση με τις υπόλοιπες διαστάσεις του, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.



Εικόνα 2 Γεωμετρικό μοντέλο ευθύγραμμης ροής στον ταμιευτήρα

Η ροή σε αυτό το μοντέλο πραγματοποιείται από τα πιο απομακρυσμένα σημεία του ταμιευτήρα, εκεί όπου η πίεση είναι μεγαλύτερη, προς τη γεώτρηση όπου η πίεση είναι μικρότερη λόγω επικοινωνίας με την επιφάνεια μέσω της σωλήνωσης

παραγωγής. Η διατομή μέσα από την οποία κινείται το ρευστό θεωρείται ότι αντιπροσωπεύεται από ένα ορθογώνιο επίπεδο με πλευρές το πάχος και το πλάτος του σχήματος και εμβαδό ίσο με το γινόμενό τους. Έτσι κατά τον Darcy θα ισχύει ότι

$$q^{RC} = \frac{kab}{\mu} \frac{dp}{dx}, \quad (1.3)$$

όπου a και b οι πλευρές που αποτελούν τη διατομή από την οποία περνάει το ρευστό. Το μοντέλο αυτό μπορεί να προσδιορίσει ικανοποιητικά τη ροή από τα πιο απομακρυσμένα σημεία του ταμιευτήρα προς τη γεώτρηση, αλλά όχι τη ροή κοντά στη γεώτρηση.

### 2.2.2.2 Γεωμετρικό μοντέλο ακτινικής ροής

Το δεύτερο γεωμετρικό μοντέλο θεωρεί ότι η ροή γύρω από τη γεώτρηση είναι ομοιόμορφα ακτινική. Θεωρείται δηλαδή ότι η ροή πραγματοποιείται ομοιόμορφα περιμετρικά της γεώτρησης και κατά τη διεύθυνση της νοητής ακτίνας του «σχήματος». Ακόμα και αν εισαχθεί και η τρίτη διάσταση και γίνει λόγος για σφαιρικό σχήμα γύρω από τη γεώτρηση, η ροή λόγω σφαιρικής συμμετρίας εξακολουθεί να πραγματοποιείται κατά την ίδια νοητή διεύθυνση, δηλαδή την ακτίνα, και έτσι το πρόβλημα παραμένει μονοδιάστατο ως προς τον χώρο. Για να ερμηνευτεί η διατομή A μέσω της οποίας κινείται το ρευστό, το νοητό σχήμα γύρω από τη γεώτρηση είναι κυλινδρικό, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3. Έτσι σύμφωνα με τον Darcy ισχύει:

$$u^{RC} = -\frac{k}{\mu} \frac{dp}{dx} \quad (1.4)$$

Πολλαπλασιάζοντας με τη διατομή A, προκύπτει η ζητούμενη παροχή, δηλαδή:

$$q^{RC} = -\frac{kA}{\mu} \frac{dp}{dx} \quad (1.5)$$

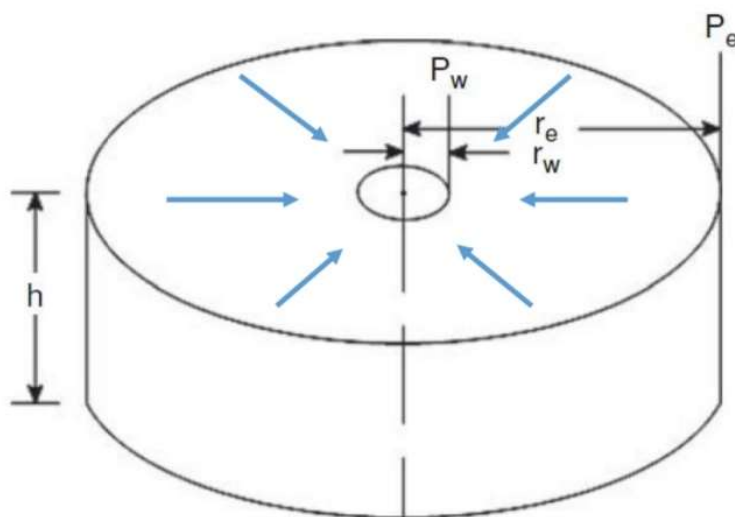
Η διατομή τελικά όπου θα κινηθεί το ρευστό είναι η καμπυλωτή επιφάνεια περιμετρικά της γεώτρησης, δηλαδή το  $A = 2\pi rh$ , όπου r η ακτίνα κατά την οποία κινείται το ρευστό και h το πάχος του κυλίνδρου. Αντικαθιστώντας προκύπτει:

$$q^{RC} = \frac{k}{\mu} 2\pi rh \frac{dp}{dr} \quad (1.6)$$

η οποία είναι μία διαφορική εξίσωση που δίνει τη διαφορά της πίεσης dp για γνωστή απόσταση dr. Επιλύοντας την εξίσωση αυτή με τη μέθοδο των χωριζομένων μεταβλητών, προκύπτει η σχέση:

$$q^{RC} = \frac{k}{\mu} \frac{2\pi h}{\ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right)} (p_e - p_w), \quad (1.7)$$

όπου  $r_e$  η ακτίνα που απομαστεύεται το ρευστό,  $r_w$  η ακτίνα της γεώτρησης,  $p_e$  η πίεση στο άκρο του ταμιευτήρα, δηλαδή στην αρχή της κίνησης του ρευστού και  $p_w$  η πίεση στο κέντρο της γεώτρησης. Εύκολα φαίνεται ότι η ακτίνα της γεώτρησης, δηλαδή η διάμετρος της εσωτερικής σωλήνωσης, επηρεάζει την παροχή. Το ακτινικό αυτό μοντέλο περιγράφει αρκετά ικανοποιητικά την πραγματική ροή γύρω από μία γεώτρηση και σε συνδυασμό με το 1<sup>ο</sup> μοντέλο μπορούν να απεικονίσουν τη συνολική ροή εντός του ταμιευτήρα.



Εικόνα 3 Γεωμετρικό μοντέλο ακτινικής ροής στον ταμιευτήρα

Μέχρι στιγμής οι εξισώσεις που έχουν περιγραφεί εκτιμούν τη ροή σε συνθήκες ταμιευτήρα. Ωστόσο, επειδή η παροχή μετράται σε ροόμετρα σε συνθήκες επιφάνειας (standard conditions, SC), είναι χρήσιμο οι εξισώσεις να μετατραπούν σε αυτές τις συνθήκες χρησιμοποιώντας τον ογκομετρικό συντελεστή σχηματισμού της υγρής φάσης  $B_o$ , ο οποίος δίνεται από τη σχέση:

$$B_o = \frac{V^{RC}}{V^{SC}} \quad (1.8)$$

Ο ογκομετρικός συντελεστής ορίζεται ως ο λόγος του όγκου του πετρελαίου εντός του ταμιευτήρα (που περιέχει και το διαλυμένο αέριο) ως προς τον όγκο του πετρελαίου στον διαχωριστή στην επιφάνεια. Η διαφορά στον όγκο οφείλεται στην μικρότερη πίεση (προκαλεί διόγκωση) και θερμοκρασία (προκαλεί συρρίκνωση) που επικρατούν στην επιφάνεια και στο γεγονός ότι κατά την ανύψωση, λόγω πτώσης της

πίεσης κατά μήκος της γεώτρησης, το διαλυμένο αέριο εντός του πετρελαίου απελευθερώνεται και τελικά η πυκνότητα του πετρελαίου αυξάνεται. (Ahmed, 1989)

Γνωρίζοντας ότι η παροχή είναι ο ρυθμός μεταβολής του όγκου  $\frac{dV}{dt}$  και χρησιμοποιώντας τον ογκομετρικό συντελεστή σχηματισμού της υγρής φάσης, η εξίσωση 1.7 γίνεται:

$$q^{SC} = \frac{1}{Bo} \frac{k}{\mu} \frac{2\pi h}{\ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right)} (p_e - p_w), \quad (1.9)$$

Ένα ακόμα στοιχείο που επηρεάζει τη ροή γύρω από τη γεώτρηση, είναι ο «επιδερμικός συντελεστής» (skin factor), ο οποίος αναφέρεται στη βλάβη που προκλήθηκε κατά τη διάρκεια της όρυξης και της ολοκλήρωσης της γεώτρησης. Ειδικότερα, κατά τη δημιουργία των διατρήσεων, αναπόφευκτα επηρεάζεται το πορώδες και η διαπερατότητα του σχηματισμού είτε γιατί έχουν συμπιεστεί οι πόροι είτε γιατί μπορεί να έχει εισχωρήσει η διατρητική λάσπη της γεώτρησης μέσα στους πόρους είτε λόγω μη ιδανικής γεωμετρίας της γεώτρησης. Αυτά τα φαινόμενα επιφέρουν περαιτέρω απώλεια πίεσης, άρα και ενέργειας, κατά τη ροή περιμετρικά της γεώτρησης μέσα στους πόρους του περιβάλλοντος πετρώματος. Ο επιδερμικός συντελεστής λοιπόν, μπορεί να ποσοτικοποιήσει όλα αυτά τα φαινόμενα σε ένα αδιάστατο αριθμό S. Έτσι η εξίσωση 1.9 γίνεται:

$$q^{SC} = \frac{1}{Bo} \frac{k}{\mu} \frac{2\pi h}{\ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right) + S} (p_e - p_w), \quad (1.10)$$

Ωστόσο, επειδή είναι πρακτικά αδύνατο να είναι γνωστή η πίεση  $p_e$ , δηλαδή η πίεση στα άκρα του ταμιευτήρα, σε κάθε χρονική στιγμή, χρησιμοποιείται εναλλακτικά η μέση πίεση. Ως μέση πίεση ορίζεται η πίεση ισορροπίας που θα επικρατήσει στον ταμιευτήρα όταν το «choke» είναι κλειστό, δηλαδή όταν δεν υπάρχει παραγωγή. Για να προσδιοριστεί η μέση πίεση, χρειάζεται ένα μικρό χρονικό διάστημα χωρίς παραγωγή μέχρις ότου επέλθει υδραυλική ισορροπία στον ταμιευτήρα. Για να εισαχθεί η μέση πίεση ( $\bar{p}$ ) στην εξίσωση 1.10 χωρίς να επηρεαστούν τα αποτελέσματα, η εξίσωση τροποποιείται ως εξής:

$$q^{SC} = \frac{1}{Bo} \frac{k}{\mu} \frac{2\pi h}{\ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right) - 0.5 + S} (\bar{p} - p_w) \quad (1.11)$$

### 2.2.3 Επίδραση του χρόνου στη ροή σε πορώδες μέσο

Ωστόσο, ο ταμιευτήρας δεν είναι ένα στατικό σύστημα που κρατά σταθερές όλες τις ιδιότητες του στον χρόνο, αλλά είναι ένα δυναμικό σύστημα που αλλάζει κατά την παραγωγή και αυτό έχει ήδη φανεί από το γεγονός ότι η πίεση δεν είναι συνάρτηση μόνο της θέσης αλλά και του χρόνου. Συνεπώς, αφού η πίεση δύναται να μεταβληθεί ως προς τον χρόνο, τότε σύμφωνα με τον Darcy, και η ογκομετρική παροχή θα αλλάξει. Για οποιοδήποτε ταμιευτήρα, η κατάσταση της ροής τελικά μπορεί να υπόκειται σε ένα από τα τρία καθεστώτα ροής που έχουν προταθεί. Αυτά είναι τα καθεστώτα «σταθερής ροής», «ψευδό-σταθερής ροής» και «ροή μεταβατικής κατάστασης».

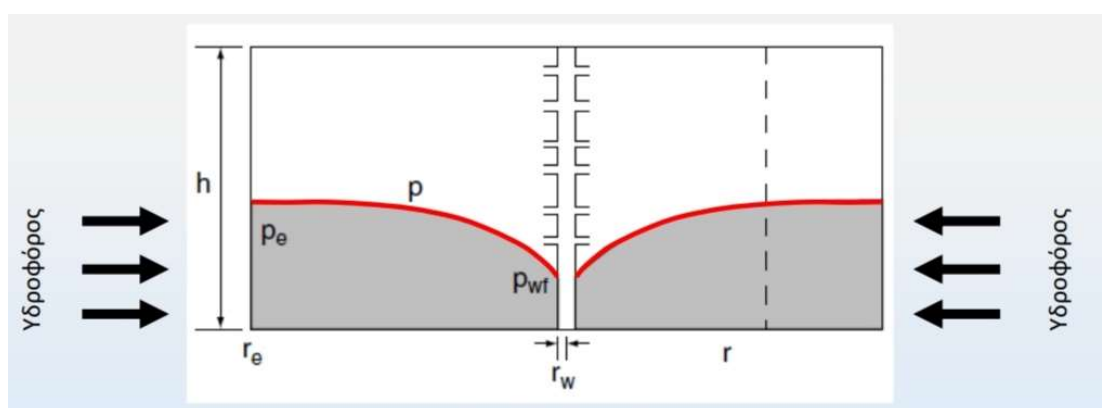
#### 2.2.3.1 Ροή μεταβατικής κατάστασης

Όταν ξεκινήσει η παραγωγή, με την άντληση της πρώτης κιόλας ποσότητας πετρελαίου από τη γεώτρηση, δημιουργείται μια διαταραχή πίεσης στον ταμιευτήρα, σαν ένα σήμα εκκίνησης της ροής προς τη γεώτρηση. Αυτή η διαταραχή μεταδίδεται μέσω του ρευστού έως τα άκρα του ταμιευτήρα. Το καθεστώς ροής αυτό υπάρχει μέχρις ότου η διαταραχή φτάσει στην πιο απομακρυσμένη ποσότητα πετρελαίου στον ταμιευτήρα. Στο διάστημα αυτό, θεωρείται ότι η πίεση στον ταμιευτήρα δεν επηρεάζεται από την παρουσία του εξωτερικού του ορίου, επομένως ο ταμιευτήρας θεωρείται ότι έχει άπειρη έκταση και άρα ακτίνα. Το φαινόμενο της ροής μεταβατικής κατάστασης συνδέεται άμεσα με τη συμπιεστότητα των περιεχόμενων ρευστών. Πράγματι, αν το ρευστό ήταν εντελώς ασυμπίεστο, η διαταραχή θα μεταδίδονταν ακαριαία σε όλη την έκταση του ταμιευτήρα, όπως θα γινόταν σε ένα στερεό σώμα και δεν θα παρατηρούνταν καμία μεταβατική κατάσταση. Το πετρέλαιο ναί μιν δεν θεωρείται ασυμπίεστο αλλά η επίδραση της συμπιεστότητας στην παραγωγή δε, είναι κατά κανόνα πολύ μικρή. Μάλιστα η επίλυση που δίνει η εξίσωση 1.11 ως προς αυτήν που προκύπτει όταν λαμβάνεται υπόψιν η συμπιεστότητα και η μεταβολή της με την πίεση, έχουν πολύ μικρή απόκλιση για το ίδιο πρόβλημα. Υπενθυμίζεται ότι ο Μηχανικός, προσπαθεί να εκτιμήσει την παραγωγικότητα του ταμιευτήρα σε βάθος χρόνου και συνεπώς την τελική παραγωγή έτσι ώστε να υπάρχει μια ρεαλιστική εικόνα του πεδίου γρήγορα για τον καλύτερο σχεδιασμό του άμεσου αλλά και του μελλοντικού πλάνου εκμετάλλευσης του ταμιευτήρα. Συνεπώς μία τόσο μικρή απόκλιση είναι αμελητέα και η μεταβατική κατάσταση μπορεί να παρακαμφθεί.



### 2.2.3.2 Σταθερή ροή (Steady-state flow)

Κατά τη σταθερή ροή, η πίεση σε κάθε σημείο του ταμιευτήρα παραμένει σταθερή με τον χρόνο. Αυτό συμβαίνει σε ταμιευτήρες που υποστηρίζονται από κάποιον υποκείμενο υδροφόρο ορίζοντα και συνεπώς το νερό που εισέρχεται στους πόρους από αυτόν, αφότου έχει απομακρυνθεί πετρέλαιο κατά την παραγωγή, διατηρεί την πίεση σταθερή στα άκρα, άρα και σε κάθε σημείο κατά τη ροή. Ένας τεχνητός τρόπος για να εξασφαλιστεί σταθερή πίεση άρα και σταθερή ροή, όταν δεν υπάρχει υδροφόρος, είναι μέσω γεωτρήσεων εισπίεσης νερού στα άκρα. Το προφίλ της πίεσης σε σταθερή ροή φαίνεται στην Εικόνα 4.

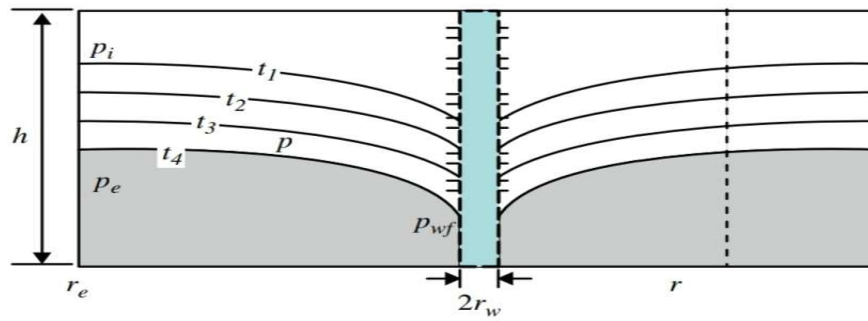


Εικόνα 4 Προφίλ πίεσης σε καθεστώς σταθερή ροής

Συνεπώς, εφόσον η πίεση είναι σταθερή σε κάθε σημείο ως προς τον χρόνο, τότε σύμφωνα με τον νόμο του Darcy θα είναι και η παροχή σταθερή και μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση ροής 1.11.

### 2.2.3.3 Ψευδό-σταθερή ροή (pseudo-steady-state flow)

Σε αυτό το καθεστώς ροής, η πίεση δεν διατηρείται σταθερή αλλά μειώνεται με σταθερό και ίδιο ρυθμό σε κάθε σημείο του ταμιευτήρα. Θεωρείται ότι είναι ένα κλειστό κύκλωμα ροής, όπου δηλαδή τα ρευστά που απομακρύνονται δεν αναπληρώνονται από έναν μεγάλο υδροφόρο ορίζοντα ή από εισπίεση νερού. Το προφίλ της πίεσης λοιπόν μειώνεται με τον χρόνο αλλά διατηρεί το ίδιο σχήμα αφού σε όλα τα σημεία του ταμιευτήρα η απώλεια πίεσης είναι ίδια. Έτσι το προφίλ της πίεσης για κάθε χρονική στιγμή απεικονίζεται γραφικά ως παράλληλο με τα υπόλοιπα όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.



Εικόνα 5 Προφίλ πίεσης σε καθεστώς ψευδό-σταθερής ροής

Η παροχή παραμένει σταθερή κατά την παραγωγή αφού μπορεί και ελέγχεται μέσω της βαλβίδας στένωσης, γνωστή ως «choke». Ο εμπειρικός τύπος της παροχής που χρησιμοποιείται για την ψευδό-σταθερή ροή προέρχεται από τον νόμο του Darcy και διαφέρει ελαφρώς από εκείνον της σταθερής ροής:

$$q^{SC} = \frac{1}{Bo} \frac{k}{\mu} \frac{2\pi h}{\ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right) - 0.5 + S} (p_e - p_w) \quad (1.12)$$













Προκειμένου να ληφθεί υπόψιν η μέση πίεση, η εξίσωση 1.5 για ψευδό-σταθερή ροή μετατρέπεται στην:

$$q^{SC} = \frac{1}{Bo} \frac{k}{\mu} \frac{2\pi h}{\ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right) - 0.75 + S} (\bar{p} - p_w) \quad (1.13)$$

Εάν τα όρια της ακτίνας απομάστευσης διαμορφώνουν μία περιοχή μη τέλειας κυκλικής γεωμετρίας, για την προσαρμογή του σχήματος, με σκοπό την ακριβέστερη εκτίμηση της ροής, χρησιμοποιείται ο συντελεστής σχήματος του Dietz (Dietz shape factor,  $C_A$ ). Στην Εικόνα 6 δίνονται οι τιμές του συντελεστή για διάφορα σχήματα ταμειντήρα και θέσης της γεώτρησης. Η νέα σχέση που εκτιμά την παραγωγή με την χρήση του συντελεστή σχήματος Dietz είναι:

$$q^{SC} = \frac{1}{Bo} \frac{k}{\mu} \frac{2\pi h}{\frac{1}{2} \ln\left(\frac{4A}{\gamma C_A r_w^2}\right) + S} (\bar{p} - p_w), \quad (1.14)$$

όπου  $A$  είναι η ακτίνα απομάστευσης και  $\gamma$  η σταθερά του Euler που ισούται με 1.78. (Guo, 2008)

Reservoir shape & well location	Shape factor $C_A$	Reservoir shape & well location	Shape factor $C_A$
	31.6		21.9
	30.9		22.6
	31.6		12.9
	27.6		4.5
	27.1	In water-drive reservoirs 	19.1
	3.39	In reservoirs of unknown production character 	25

Εικόνα 6 Τιμές συντελεστή σχήματος Dietz

Αξίζει να σημειωθεί ότι πέραν των προαναφερθέντων καθεστώτων ροής, μπορεί να επιλεγεί ένα πλάνο παραγωγής με σταθερή πίεση πυθμένα και όχι με σταθερή παροχή. Τότε οι σχέσεις που συνδέουν την παροχή με την πίεση είναι πολύπλοκες και δεν έχει νόημα να αναλυθούν για τον σκοπό της συγκεκριμένης εργασίας.

## 2.3 Μοντέλα περιγραφής συμπεριφοράς ρευστών (fluid models)

### 2.3.1 Μοντέλο Μαύρου Πετρελαίου (Black oil Model)

Για τον προσδιορισμό της θερμοδυναμικής συμπεριφοράς του ρευστού (Pressure Volume Temperature, PVT), υπάρχουν διαθέσιμοι 2 τύποι υπολογιστικών μοντέλων, το Μοντέλο Μαύρου Πετρελαίου (Black oil model) και το Μοντέλο ρευστού πλήρους σύνθεσης (Compositional model). Τα PVT δεδομένα αποτελούν παραμέτρους που περιγράφουν τη θερμοδυναμική και ογκομετρική συμπεριφορά των ρευστών του ταμιευτήρα σε κάθε επιθυμητή πίεση και θερμοκρασία, όπως είναι το σημείο φουσαλίδας (bubble point), οι ογκομετρικοί συντελεστές φάσεων ( $B_{o,g,w}$ ), ο λόγος διαλυμένου αερίου προς το πετρέλαιο ( $R_s$ ) κ.α.. Στο Μοντέλο Μαύρου Πετρελαίου γίνεται η υπόθεση ότι το ρευστό αποτελείται από δύο ξεχωριστές διαφορετικές

φάσεις, του παραγόμενου πετρελαίου και του παραγόμενου αερίου στην επιφάνεια, οι οποίες παραμένουν ποιοτικά σταθερές κατά την ροή. Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό, το παραγόμενο αέριο μπορεί να αποτελείται από το ελεύθερο αέριο που υπήρχε στον ταμιευτήρα και οδηγήθηκε στην επιφάνεια, αλλά και από το αέριο που ήταν διαλυμένο εντός του πετρελαίου σε συνθήκες πίεσης μεγαλύτερης της πίεσης φυσαλίδας (bubble point) και απελευθερώθηκε κατά την ανύψωση λόγω πτώσης της πίεσης. (Danesh, 1998)

Το συγκεκριμένο μοντέλο δίνει την δυνατότητα του μαθηματικού υπολογισμού των PVT ιδιοτήτων μέσω συσχετίσεων και με τη χρήση επιφανειακών μετρήσεων, ως συναρτήσεις της πίεσης και της θερμοκρασίας. Χρησιμοποιώντας τα δεδομένα των μετρήσεων, όπως η πυκνότητα του παραγόμενου πετρελαίου API, το ειδικό βάρος του αερίου  $\gamma_g$  και τον λόγο παραγόμενου αερίου προς παραγόμενου πετρελαίου GOR, μπορεί να προσδιοριστεί το σημείο φυσαλίδας, το οποίο είναι απαραίτητο για την μελέτη του τύπου της ροής (μονοφασική/διφασική), οι ογκομετρικοί συντελεστές ( $B_{o,g,w}$ ) που απαιτούνται για την μετατροπή των προηγούμενων εξισώσεων σε συνθήκες επιφάνειας και το ιξώδες που χρησιμοποιείται σε όλες τις εξισώσεις ροής. Έχουν αναπτυχθεί πολυάριθμες συσχετίσεις για την εκτίμηση των ιδιοτήτων του ρευστού του ταμιευτήρα με τις πιο γνωστές να είναι αυτές του Standing (1947, 1962, 1977)

### **2.3.2 Μοντέλο ρευστού πλήρους σύνθεσης (Compositional model)**

Στο συγκεκριμένο μοντέλο, θεωρείται ότι το ρευστό έχει τυχαία σύσταση, αφού λαμβάνονται υπόψη όλα τα επιμέρους συστατικά που το αποτελούν. Τα τελευταία μπορεί να είναι υδρογονάνθρακες, ανόργανες ενώσεις και ψευδοσυστατικά και κατά το μοντέλο αυτό μπορούν να επιμερίζονται τόσο στην υγρή όσο και στην αέρια φάση εντός του ταμιευτήρα. Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιείται για ρευστά με μεγάλη πτητικότητα, για ρευστά κοντά στο κρίσιμο σημείο, δηλαδή στο σημείο της πίεσης και θερμοκρασίας όπου οι δύο φάσεις (αέρια και υγρή) συνυπάρχουν και τέλος για ρευστά κατά την τριτογενή παραγωγή, όπου διαλύτες, οξέα και άλλες ουσίες μπορεί να έχουν εισπιαστεί και αλληλοεπιδράσει με τα πετρελαϊκά ρευστά. (Danesh, 1998)

Για την μελέτη του ρευστού στο συγκεκριμένο μοντέλο, είναι απαραίτητη η γνώση της σύστασής του κάθε στιγμή και τελικά οι θερμοδυναμικές του ιδιότητες υπολογίζονται μέσω καταστατικών εξισώσεων, δηλαδή των αναλυτικών εκφράσεων που συσχετίζουν την πίεση και τη θερμοκρασία με τον όγκο. Δύο από τις πιο γνωστές

και ευρέως χρησιμοποιούμενες καταστατικές εξισώσεις είναι των Soave-Redlich-Kwong και των Peng-Robinson. Η μέθοδος αυτή είναι ιδιαίτερα ακριβής, όμως απαιτεί τη γνώση της σύστασης του ρευστού διαρκώς και ενός σχετικά μεγάλου χρονικού διαστήματος για τους υπολογισμούς.

## 2.4 Σχηματισμός καμπύλης IPR

Έχοντας τις σχέσεις που συνδέουν την παροχή με την πτώση πίεσης για τα δύο καθεστώτα ροής ενδιαφέροντος, δηλαδή αυτά της σταθερής και της ψευδο-σταθερής ροής, μπορεί πλέον να κατασκευαστεί η πρώτη καμπύλη που χρησιμοποιείται στο «nodal analysis», δηλαδή η «Inflow performance relationship». Η καμπύλη αυτή έχει στον άξονα των  $y$  την πίεση στον κόμβο, δηλαδή τον πυθμένα της γεώτρησης και στον άξονα των  $x$  τη συνολική ογκομετρική παροχή. Η αντίστροφη κλίση της ονομάζεται συντελεστής παραγωγικότητας, συμβολίζεται με το γράμμα  $J$  ή με τα αρχικά PI (Productivity Index) και ισούται με το πηλίκο της παροχής ως προς τη διαφορά πίεσης. Ο συντελεστής παραγωγικότητας είναι μία από τις πιο σημαντικές παραμέτρους για την εκτίμηση της παραγωγής, άρα και του κέρδους. Εκφράζει την παραγωγικότητα ενός ταμιευτήρα πετρελαίου με μόλις έναν αριθμό και καθιστά συνεπώς την αξιολόγηση του, άμεση και εύκολη. Για μονοφασική ροή ακόρεστου πετρελαίου ο PI προκύπτει απευθείας από τις εξισώσεις 1.11, 1.13, 1.14, για σταθερή και ψευδο-σταθερή ροή αντίστοιχα.

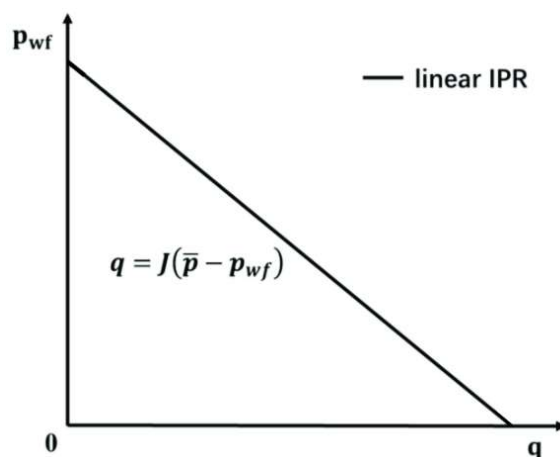
$$J = \frac{q}{(\bar{p} - p_w)} = \frac{1}{Bo} \frac{k}{\mu} \frac{2\pi h}{\ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right) - 0.5 + S} \text{ για σταθερή ροή} \quad (1.15)$$

$$J = \frac{1}{Bo} \frac{k}{\mu} \frac{2\pi h}{\ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right) - 0.75 + S} \text{ για ψευδο-σταθερή τέλεια ακτινική ροή} \quad (1.16)$$

$$J = \frac{1}{Bo} \frac{k}{\mu} \frac{2\pi h}{\frac{1}{2} \ln\left(\frac{4A}{\gamma C_A r_w^2}\right) + S} \text{ για ψευδο-σταθερή μη τέλεια ακτινική ροή} \quad (1.17)$$

Για μονοφασική ροή διακρίνεται εύκολα ότι ο PI παραμένει σταθερός, συνεπώς και η κλίση της καμπύλης παραμένει σταθερή, όπως φαίνεται στην Εικόνα 7 και η σχέση πίεσης-παροχής δίνεται από:

$$P_{wf} = \bar{p} - \frac{q}{J} \quad (1.18)$$



Εικόνα 7 IPR για ακόρεστο ταμιευτήρα (μονοφασική ροή)

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 παραγωγής όπως όπως βλάβες κατά τη συντήρηση και την επισκευή (workovers), βλάβες στις ολοκληρώσεις της γεώτρησης κ.α.

#### 2.4.1 IPR για μονοφασική ροή πετρελαίου (ακόρεστος ταμιευτήρας)

Στην περίπτωση μονοφασικής ροής, δηλαδή ταμιευτήρα ακόρεστου πετρελαίου, η IPR παρίσταται γραφικά από μία ευθεία γραμμή (Εικόνα 7). Υπάρχουν δύο χαρακτηριστικά σημεία πάνω στην καμπύλη: το σημείο με μέγιστη πίεση πυθμένα και μηδενική παροχή, που είναι ουσιαστικά η κατάσταση στον ταμιευτήρα πριν ξεκινήσει η παραγωγή, οπότε και η ροή εντός του ταμιευτήρα και το σημείο με μηδενική πίεση πυθμένα και μέγιστη παροχή που ονομάζεται σημείο «απόλυτα ελεύθερης ροής», που ουσιαστικά είναι η θεωρητικά μέγιστη παροχή που μπορεί να προκύψει με τα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά του ταμιευτήρα, θεωρώντας ότι η πίεση φυσαλίδας είναι τα 0 psi. (Guo, 2008)

#### 2.4.2 IPR για διφασική ροή

Μέχρι στιγμής έχει θεωρηθεί ότι στον ταμιευτήρα υπάρχει μόνο ροή πετρελαίου. Ωστόσο είναι πολύ σύνηθες να επικρατεί πίεση μικρότερη της πίεσης φυσαλίδας σε όλη την έκταση της περιοχής που απομαστευείται. Τότε, το διαλυμένο αέριο εντός του πετρελαίου θα απελευθερώνεται και τελικά θα συνυπάρχουν οι δύο φάσεις εντός των πόρων. Οι ταμιευτήρες αυτοί καλούνται κορεσμένοι ή διφασικοί. Κατά την παραγωγή πλέον υπάρχει ροή δύο φάσεων, γεγονός που προκαλεί φαινόμενα που δεν εμφανίζονταν κατά τη μονοφασική ροή και που συνεπώς διαφοροποιούν την ογκομετρική παροχή. Αφού απελευθερώνεται αέριο από το πετρέλαιο, το ιξώδες του

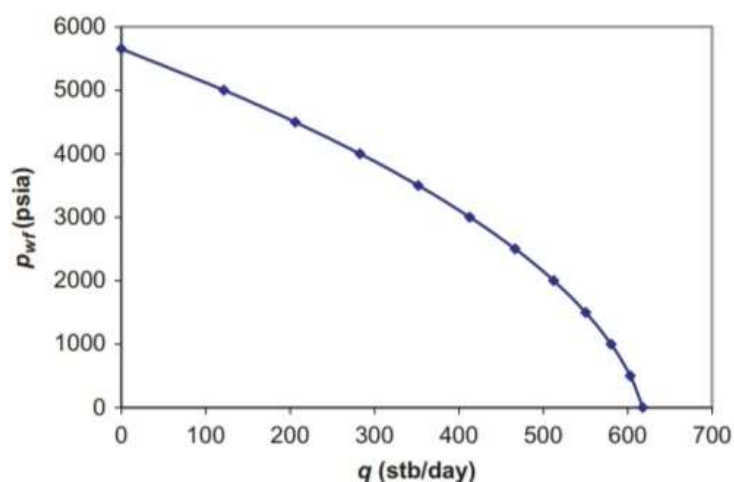
πετρελαίου αυξάνεται και παράλληλα πλέον υπάρχει ξεχωριστή διαπερατότητα για το πετρέλαιο και για το αέριο που ονομάζεται «Ενεργός διαπερατότητα» της κάθε φάσης και επηρεάζεται από τον κορεσμό. Η διαπερατότητα αυτή είναι μικρότερη της απόλυτης διαπερατότητας του πετρελαίου, δηλαδή της διαπερατότητας σε κατάσταση μονοφασικής ροής. Ο συνδυασμός της επίδρασης της διαπερατότητας και του ιξώδους έχουν ως αποτέλεσμα έναν χαμηλότερο ρυθμό παραγωγής, κάτω από το σημείο κορεσμού. Αυτό είναι το φαινόμενο που αποκλίνει την IPR από τη γραμμική τάση στην περίπτωση της διφασικής ροής. Όσο πιο κάτω από την πίεση φυσαλίδας είναι η πίεση του ταμιευτήρα, τόσο μεγαλύτερη και η απόκλιση. Για τον προσδιορισμό της απόκλισης έχουν διατυπωθεί διάφορες εμπειρικές εξισώσεις. Κατά τον Vogel, η παροχή μπορεί να εκτιμηθεί από την εξής σχέση:

$$q_{max} = \left[ 1 - 0.2 \frac{p_{wf}}{\bar{p}} - 0.8 \left( \frac{p_{wf}}{\bar{p}} \right)^2 \right], \quad (1.19)$$

όπου η  $q_{max}$  αναφέρεται στην παραγωγή με «απόλυτα ελεύθερη ροή». Η  $q_{max}$  μπορεί να υπολογιστεί από το γινόμενο της πίεσης του ταμιευτήρα και του παραγωγικού συντελεστή. Για ψευδό-σταθερή ροή χρησιμοποιείται εναλλακτικά η σχέση:

$$q_{max} = \frac{J \cdot \bar{p}}{1.8} \quad (1.20)$$

Συνεπώς, για την κατασκευή της IPR σε κορεσμένους ταμιευτήρες πρέπει να υπολογιστεί αρχικά ο παραγωγικός συντελεστής, μέσω του οποίου εκτιμάται η μέγιστη δυνατή παροχή, και τελικά να γίνει χρήση της εξίσωσης του Vogel για να βρεθούν όλα τα σημεία της καμπύλης. Στην Εικόνα 8 παρουσιάζεται μια κλασική IPR για κορεσμένο ταμιευτήρα πετρελαίου. (Guo, 2017)



Εικόνα 8 IPR για κορεσμένο ταμειυτήρα

Είναι εμφανές ότι η κλίση της καμπύλης μεταβάλλεται συνεχώς, το οποίο προέρχεται από το γεγονός ότι ο παραγωγικός συντελεστής αλλάζει διαρκώς ανάλογα με την επικρατούσα πίεση.

#### 2.4.3 IPR για μερικώς διφασική ροή

Σε ορισμένες περιπτώσεις, η πίεση στα άκρα της περιοχής απομάστευσης, από όπου ξεκινάει η ροή, μπορεί να είναι μεγαλύτερη της πίεσης φυσαλίδας, οπότε και η ροή να είναι μονοφασική, αλλά τελικά σε κάποιο σημείο κοντά στην παραγωγική γεώτρηση η πίεση να πέφτει κάτω από την πίεση φυσαλίδας με αποτέλεσμα να απελευθερώνεται αέριο και η ροή να γίνεται διφασική. Η IPR σε αυτές τις περιπτώσεις μπορεί να κατασκευαστεί συνδυάζοντας τις IPR για μονοφασική και διφασική ροή. Χρησιμοποιείται δηλαδή η ευθεία IPR μέχρι το σημείο φυσαλίδας και στη συνέχεια χρησιμοποιείται η εξίσωση του Vogel για διφασική ροή. Αρχικά, υπολογίζεται η ογκομετρική παροχή στην πίεση φυσαλίδας μέσω της σχέσης:

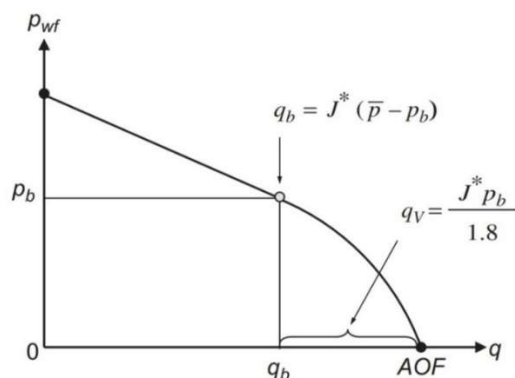
$$q_b = J(\bar{p} - p_b), \quad (1.21)$$

όπου ο δείκτης  $b$  αναφέρεται στο σημείο φυσαλίδας (bubble point). Στη συνέχεια υπολογίζεται το  $q_{max}$  και μέσω της 1.19 προσδιορίζεται η παροχή για τη διφασική ροή. Τελικά για οποιαδήποτε πίεση ταμειυτήρα κατώτερη της πίεσης φυσαλίδας, η παροχή υπολογίζεται από τη σχέση:

$$q = q_b + q_{max} \left[ 1 - 0.2 \frac{p_{wf}}{\bar{p}} - 0.8 \left( \frac{p_{wf}}{\bar{p}} \right)^2 \right] \quad (1.22)$$

Στην Εικόνα 9 παρουσιάζεται μια τυπική καμπύλη IPR για μερικώς διφασική ροή.





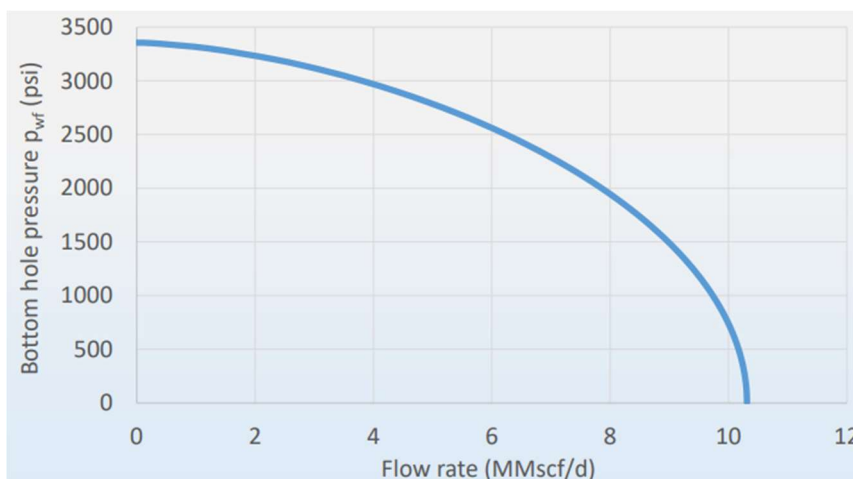
Εικόνα 9 IPR για μερικώς διφασική ροή

#### 2.4.4 IPR για ταμειυτήρες αερίου

Μία ιδιαίτερη περίπτωση ταμειυτήρα είναι εκείνου που είναι εξολοκλήρου πληρωμένος με αέριο. Σε αυτή την περίπτωση θα υπάρχει ροή μόνο συμπίεσιμου ρευστού (αέριο) με αποτέλεσμα οι σχέσεις που προσδιορίστηκαν στις προηγούμενες ενότητες να μην μπορούν να περιγράψουν την ροή. Για την κατασκευή της IPR χρησιμοποιείται η μέθοδος «Back pressure» η οποία περιγράφεται από την εξίσωση:

$$q = C(\bar{p}^2 - p_{wf}^2)^n, \quad (1.23)$$

όπου το C (mmscf.psi<sup>2</sup>/d) είναι μία σταθερά που περιγράφει την απόκριση του ταμειυτήρα στην παραγωγή με αλλαγές στην πίεση και το n είναι ένας αδιάστατος αριθμός που περιγράφει το φαινόμενο των αναταράξεων της ροής κοντά στη γεώτρηση, δηλαδή το φαινόμενο της τυρβώδους ροής και λαμβάνει τιμές από 0.5 (έντονα φαινόμενα τυρβώδους ροής) έως 1 (καθόλου τυρβώδους ροής). Συνήθως, όσο μεγαλύτερη είναι η παραγωγικότητα του ταμειυτήρα, τόσο ισχυρότερα τα φαινόμενα τυρβώδους ροής που εμφανίζονται, άρα το n τείνει στο 0.5. Στην Εικόνα 10 δίνεται η IPR για ταμειυτήρα αερίου.



Εικόνα 10 IPR για ταμειντήρα αερίου

Σημειώνεται ότι έχουν αναπτυχθεί κι άλλες εξισώσεις κατά τις οποίες μπορεί να σχηματιστεί η IPR, όπως οι εξισώσεις των Fetkovich, Forchheimer και Jones οι οποίες αξιοποιούνται σε ειδικές περιπτώσεις, όπως σε περιπτώσεις ροής με πολύ υψηλές ταχύτητες, σε ροή που δεν διέπεται από τον νόμο του Darcy (non-Darcy flow) και σε ροή με αναταράξεις (τυρβώδης ροή, turbulence).

## 2.5 Σχηματισμός καμπύλης VLP

### 2.5.1 Ροή σε σωλήνωση παραγωγής

Εφόσον το ρευστό εισέλθει στη γεώτρηση από τον πυθμένα, πλέον αλλάζει το καθεστώς της ροής. Η ροή πραγματοποιείται πλέον μέσα στη σωλήνωση παραγωγής και επομένως η κινητήριος δύναμη είναι η διαφορά της πίεσης μεταξύ του πυθμένα και της κεφαλής, δηλαδή του σημείου με την υψηλότερη πίεση και του σημείου με τη χαμηλότερη. Η ροή σπάνια είναι μονοφασική σε όλο το μήκος της γεώτρησης ακόμα και αν η πίεση στον πυθμένα υπερβαίνει την πίεση φυσαλίδας. Συνήθως σε κάποιο βάθος η πίεση θα πέσει κάτω από την πίεση φυσαλίδας, με αποτέλεσμα να απελευθερωθεί διαλυμένο αέριο και έτσι να παρατηρείται διφασική ροή από το συγκεκριμένο σημείο μέχρι την κεφαλή της γεώτρησης.

### 2.5.2 Απώλειες Πίεσης

Κατά την ανύψωση του ρευστού προς την επιφάνεια, αυτό χάνει συνεχώς ενέργεια, οι απώλειες τις οποίες οφείλονται κυρίως στο βάρος του ρευστού (υδροστατική πίεση), στην τριβή του με τα τοιχώματα, στην επιτάχυνσή του και στην απώλεια θερμότητας προς τους εξωτερικούς περιβάλλοντες σχηματισμούς μέσω της επαφής με τη σωλήνωση. Οι πρώτοι τρεις παράγοντες επιφέρουν απαιτήσεις σε πίεση, ενώ ο

τελευταίος επηρεάζει έμμεσα αυτούς τους τρεις. Σύμφωνα με τον πρώτο θερμοδυναμικό νόμο, οι απαιτήσεις σε πίεση μπορούν να γραφούν ως εξής:

$$dP + P_H + P_{acc} + P_{Fr} = 0, \quad (1.24)$$

όπου οι δείκτες H, acc, Fr αντιστοιχούν στην υδροστατική πίεση, στην πίεση λόγω επιτάχυνσης και στην πίεση λόγω τριβής αντίστοιχα, ενώ το dP στη διαφορά πίεσης μεταξύ δύο γειτονικών σημείων κατά μήκος της γεώτρησης που απέχουν απόσταση dL και έχουν κατακόρυφη διαφορά ύψους dz. Η υδροστατική πίεση αποδίδεται στην υψομετρική απόσταση του πυθμένα και της κεφαλής και υπολογίζεται από τη συνήθη σχέση:

$$P_H = 0.052\rho dz, \quad (1.25)$$

όπου το dz αναφέρεται στην απόλυτη υψομετρική διαφορά ή πραγματικό κατακόρυφο βάθος και όχι στο μετρούμενο μήκος της γεώτρησης, αφού εκείνη μπορεί να βρίσκεται υπό γωνία. Η επιτάχυνση του ρευστού προκαλείται λόγω της εκτόνωσής του, ωστόσο η απαίτηση σε πίεση συνήθως αγνοείται λόγω της πολύ μικρής τιμής της συγκριτικά με τους άλλους παράγοντες. Τέλος, η απαίτηση σε πίεση λόγω των τριβών χρειάζεται ιδιαίτερη διερεύνηση. Η σχέση που δίνει την πτώση πίεσης είναι:

$$P_F = f_F \rho u^2 \frac{dL}{2D} \quad (1.26)$$

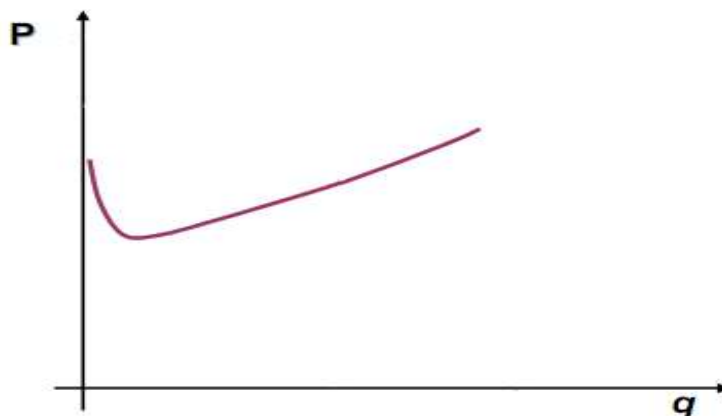
όπου το  $f_F$  αναφέρεται στον συντελεστή τριβής Fanning, το dL στο μετρούμενο μήκος της γεώτρησης και το D στην εσωτερική διάμετρο της παραγωγικής σωλήνωσης. Για τον προσδιορισμό του  $f_F$  πρέπει πρώτα να καθοριστεί το είδος της ροής μέσα στη σωλήνωση, αν είναι δηλαδή στρωτή ή τυρβώδης. Για στρωτή ροή, όπου ο αριθμός Reynolds  $N_{Re} < 2,100$ , ο συντελεστής προκύπτει από:

$$f_F = \frac{16}{N_{Re}} \quad (1.27)$$

Για περίπτωση τυρβώδους ροής, όπου  $N_{Re} > 2,100$ , ο συντελεστής προκύπτει από την εξής σχέση:

$$\frac{1}{\sqrt{f_F}} = -4 \log\left\{\left(\frac{\varepsilon}{3.7065}\right) - \left(\frac{5.0452}{N_{Re}}\right) \log\left[\left(\frac{\varepsilon^{1.1098}}{2.825}\right) + \left(\frac{7.149}{N_{Re}}\right)^2\right]\right\}, \quad (1.28)$$

όπου το  $\varepsilon$  αναφέρεται στη σχετική τραχύτητα της σωλήνωσης. (Chen, 1979). Έχοντας προσδιοριστεί όλοι οι όροι της 1.24 μπορεί να κατασκευαστεί η δεύτερη καμπύλη που χρειάζεται το nodal analysis, δηλαδή η VLP. Η αριθμητική ολοκλήρωση της σχέσης γίνεται από την κεφαλή ως τον πυθμένα και για μία δεδομένη παροχή, η οποία μπορεί και ελέγχεται μέσω της στένωσης (choke), υπολογίζεται η διαφορά πίεσης μεταξύ κεφαλής και πυθμένα και κατ' επέκταση η πίεση πυθμένα ( $p_{wf}$ ). Με τον τρόπο αυτό προσδιορίζεται ένα σημείο της καμπύλης. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για διάφορες παροχές ώστε να προσδιοριστούν επαρκή σημεία και να μπορεί να κατασκευαστεί η καμπύλη. Στην Εικόνα 11 φαίνεται η μορφή της VLP. Σημειώνεται ότι για πολύ μικρές τιμές παραγωγής, η καμπύλη VLP είναι ανακριβής διότι ενώ μειώνεται η πίεση, η παραγωγή αυξάνεται, και το κομμάτι της αυτό καλείται ασταθές. (Guo, 2008)



Εικόνα 11 Καμπύλη VLP

### 2.5.3 Διφασική ροή

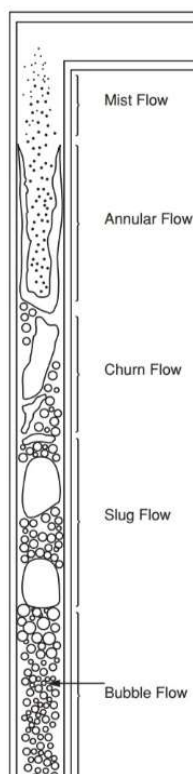
Όταν η πίεση κατά μήκος της γεώτρησης πέφτει κάτω από την πίεση φυσαλίδας, έχει ως αποτέλεσμα την απελευθέρωση αερίου. Πλέον συμβαίνουν φαινόμενα κατά την ανύψωση που δεν υπήρχαν προηγουμένως. Οι απώλειες λόγω τριβών και λόγω βαρύτητας επηρεάζονται. Υπάρχουν δύο φάσεις πλέον, οπότε και δύο διαφορετικές πυκνότητες και δύο διαφορετικοί συντελεστές τριβής Fanning. Η εκτίμηση των απωλειών, που γίνεται με χρήση συσχετίσεων, βασίζεται στον προσδιορισμό της επιφάνειας που καλύπτει η κάθε φάση, η οποία εξαρτάται από τη διαφορά της ταχύτητας των δύο φάσεων. Αν υποθεθεί ότι οι δύο φάσεις κινούνται με την ίδια ταχύτητα, τότε λόγω σταθερής παροχής θα καταλαμβάνουν την ίδια επιφάνεια, δηλαδή τη μισή διατομή. Όμως η αέρια φάση ενδέχεται να κινηθεί ταχύτερα από την

υγρή. Τότε, λόγω σταθερής παροχής θα καταλαμβάνει μικρότερη επιφάνεια. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται ολίσθηση (slip effect) και η ταχύτητα ολίσθησης είναι η διαφορά των ταχυτήτων των δύο φάσεων. Για τον προσδιορισμό της επιφάνειας της κάθε φάσης, ορίζονται οι λόγοι:

$$H_L = \frac{A_L}{A_L + A_G} \text{ και } H_G = \frac{A_G}{A_L + A_G}, \quad (1.29)$$

που ονομάζονται κατακράτηση (hold up). Η κατακράτηση επηρεάζεται από τις ιδιότητες του ρευστού, το καθεστώς της πολυφασικής ροής, το μέγεθος και την κλίση της σωλήνωσης και από τη διάταξη της γεώτρησης. (Duckler, 1964)

Όσον αφορά το καθεστώς της διφασικής ροής, μπορεί να γίνει αναφορά για πέντε διαφορετικούς τύπους. Αρχικά, με την πρώτη απελευθέρωση αερίου, ξεκινάει η ροή με φυσαλίδες (bubble flow), όπου το μεγαλύτερο μέρος της επιφάνειας καλύπτεται από την υγρή φάση, μέσα στην οποία κινούνται και φυσαλίδες αερίου. Με την απελευθέρωση περισσότερου αερίου, όλο και περισσότερες φυσαλίδες αρχίζουν να συγχωνεύονται σε μεγαλύτερες σχηματίζοντας θυλάκους αερίου (slug flow), οι οποίοι κάποια στιγμή αρχίζουν να καταλαμβάνουν το μεγαλύτερο τμήμα της διατομής της σωλήνωσης. Το επόμενο καθεστώς που μπορεί να παρατηρηθεί, είναι η ροή που διέπεται από αναταράξεις (churn flow), όπου το αέριο συγκεντρώνεται σε μεγάλες φυσαλίδες στο κέντρο της στήλης πετρελαίου. Το ιδιαίτερο χαρακτηριστικού αυτού του καθεστώτος είναι ότι οι μεγαλύτερες φυσαλίδες αερίου γίνονται ασταθείς και καταρρέουν με αποτέλεσμα να προκαλείται τοπικά τυρβώδης ροή. Αν υπάρχει και περαιτέρω απελευθέρωση αερίου, το αέριο συγκεντρώνεται στον πυρήνα της στήλης πετρελαίου, με αποτέλεσμα στη διατομή να φαίνονται δύο δακτύλιοι, ένας εσωτερικός αερίου και ένας εξωτερικός πετρελαίου. Το καθεστώς αυτό ονομάζεται δακτυλιοειδής ροή (annular flow). Τέλος μπορεί να υπάρξει και η ομιχλώδης ροή (mist flow), όπου σχεδόν όλη η επιφάνεια της διατομής καλύπτεται από την αέρια φάση μέσα στην οποία κινούνται σταγονίδια πετρελαίου. Αυτό συμβαίνει διότι σε πολύ υψηλές ταχύτητες της στήλης αερίου, η διάτμηση στη διεπιφάνεια αερίου - πετρελαίου οδηγεί σε διασπορά του πετρελαίου στο αέριο σχηματίζοντας το καθεστώς “ομίχλης”. Αυτό το μοτίβο ομιχλώδης ροής λαμβάνει χώρα μόνο σε πολύ υψηλές ταχύτητες ροής και σε συστήματα με υψηλό λόγο αερίου - πετρελαίου (GOR). Μία απεικόνιση των καθεστώτων δείχνεται στην Εικόνα 12. (Brill, 1974)



*Εικόνα 12 Καθεστάτα ροής σε σωλήνωση*

Γνωρίζοντας το καθεστώς της ροής σε κάθε σημείο, μπορούν να προσδιοριστούν οι απώλειες της πίεσης λόγω τριβών και βαρύτητας με χρήση συσχετίσεων και τελικά να κατασκευαστεί η VLP μέσω της 1.24. Μεταξύ άλλων, χρησιμοποιούνται οι συσχετίσεις που έχουν αναπτυχθεί από τους Duns & Ross, Hagedorn & Brown και Beggs & Brill.

Τέλος, η απώλεια ενέργειας λόγω διαρροής θερμότητας προς τους εξωτερικούς σχηματισμούς εξαρτάται από διάφορους παράγοντες. Αρχικά εξαρτάται από τη διαφορά της θερμοκρασίας μεταξύ του ρευστού και του γειτονικού σχηματισμού. Πράματι, ενώ το ρευστό εισέρχεται στη γεώτρηση με θερμοκρασία ίση με αυτήν του ταμειυτήρα, κινούμενο προς τα πάνω έρχεται σε επαφή με ψυχρότερους σχηματισμούς, η θερμοκρασία των οποίων ο εξαρτάται από το βάθος, τον τύπο του σχηματισμού και γενικότερα τα στοιχεία του υπεδάφους. Επιπλέον, η απώλεια θερμότητας εξαρτάται από τον ολικό συντελεστή μεταφοράς της θερμότητας μέσω των σωληνώσεων και από τη θερμοχωρητικότητα ( $C_p$ ) των φάσεων του ρευστού. Ο πρώτος αναφέρεται στην ευκολία μεταφοράς της θερμότητας από το ρευστό στη σωλήνωση και από εκεί στον σχηματισμό, ενώ η θερμοχωρητικότητα αναφέρεται στην επίπτωση της διαφυγής της θερμότητας στη θερμοκρασία του ρευστού, με άλλα

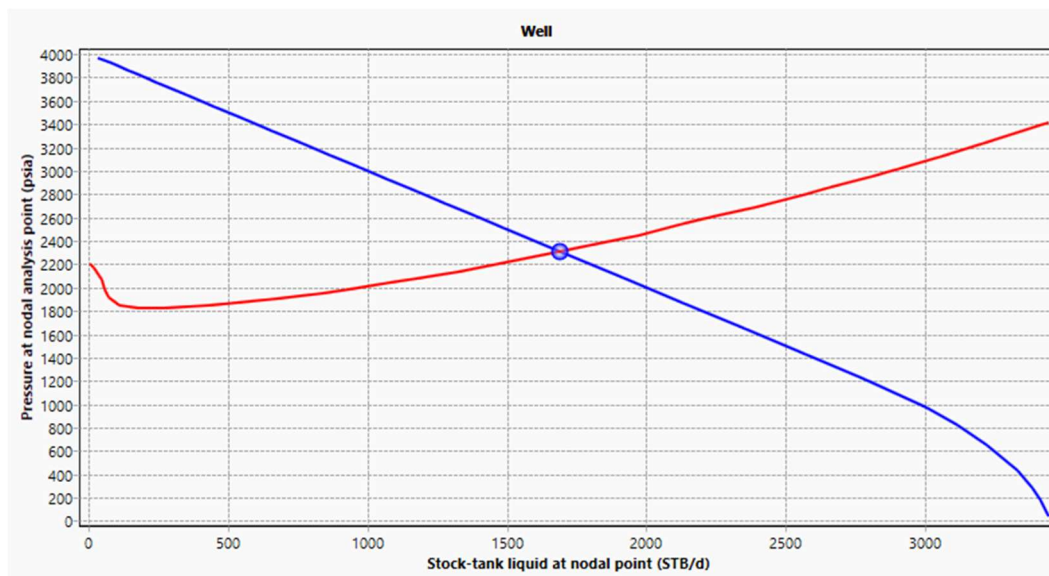
λόγια στο ποσό θερμότητας που πρέπει να αφαιρεθεί από το ρευστό για να μειωθεί η θερμοκρασία του κατά μία μονάδα. Τέλος, για πιέσεις κατώτερες της πίεσης φυσαλίδας, απελευθερώνεται διαρκώς αέριο από το πετρέλαιο, που ουσιαστικά είναι μια διαδικασία εξάτμισης. Κατά την εξάτμιση, το ρευστό λαμβάνει λανθάνουσα θερμότητα για να μπορεί να πραγματοποιηθεί η αλλαγή της φάσης. Έχοντας τα τρία πρώτα στοιχεία, μπορούν να πραγματοποιηθούν οι θερμοκρασιακοί υπολογισμοί και επομένως να εκτιμηθεί η θερμοκρασία του ρευστού κατά μήκος της γεώτρησης άλλα και η επίδραση στην πυκνότητα και το ιξώδες κατά την ανύψωση στην επιφάνεια.

## 2.6 Ανάλυση κόμβου (nodal analysis)

Ο Gilbert ήταν ίσως ο πρώτος που χρησιμοποίησε την ανάλυση συστήματος για να προσεγγίσει την αποδοτικότητα ενός συστήματος ταμειυτήρα-γεώτρησης, όμως ο όρος «ανάλυση κόμβου» χρησιμοποιήθηκε και έγινε ευρύτερα γνωστός στις πετρελαϊκές βιομηχανίες από τους Mach, Brown και Proano.

Αξιοποιώντας της καμπύλες IPR και VLP με τη μέθοδο ανάλυσης κόμβου, μπορεί να εκτιμηθεί η παροχή στο σημείο λειτουργίας του συστήματος ταμειυτήρα-γεώτρησης εντοπίζοντας το κοινό σημείο των δύο καμπύλων. Για την ανάλυση κόμβου χρησιμοποιούνται ειδικά λογισμικά που μπορούν, αφού εισαχθούν όλα τα απαραίτητα δεδομένα από τον χρήστη, να σχεδιάσουν τις καμπύλες, να εκτιμήσουν την παραγωγή αλλά και να βρουν την ευαισθησία του πεδίου σε αλλαγές στα δεδομένα. Μπορούν επιπλέον να προσδιορίσουν τους σχεδιαστικούς παράγοντες που επιδρούν αρνητικά στην παραγωγή έτσι ώστε να περιοριστεί η επίδραση τους. Ένα τέτοιο λογισμικό είναι το Pipesim της Schlumberger, το οποίο θα χρησιμοποιηθεί για τη μελέτη περίπτωσης στο Κεφάλαιο 5. Κατά αυτόν τον τρόπο, παρέχεται μια αναλυτική εικόνα για τη συμπεριφορά του ταμειυτήρα και της γεώτρησης. Στην Εικόνα 13 δίνεται το γράφημα από μία ανάλυση κόμβου. Στον οριζόντιο άξονα εντοπίζεται η παραγωγή, όπου στη συγκεκριμένη περίπτωση πρόκειται για τη συνολική παραγωγή της υγρής φάσης (νερό + πετρέλαιο), και στο κατακόρυφο άξονα εντοπίζεται η πίεση που επικρατεί στον κόμβο. Το κοινό σημείο των δύο καμπυλών ονομάζεται σημείο λειτουργίας και οι συντεταγμένες του είναι η εκτιμώμενη παραγωγή στην κεφαλή και η πίεση πυθμένα.

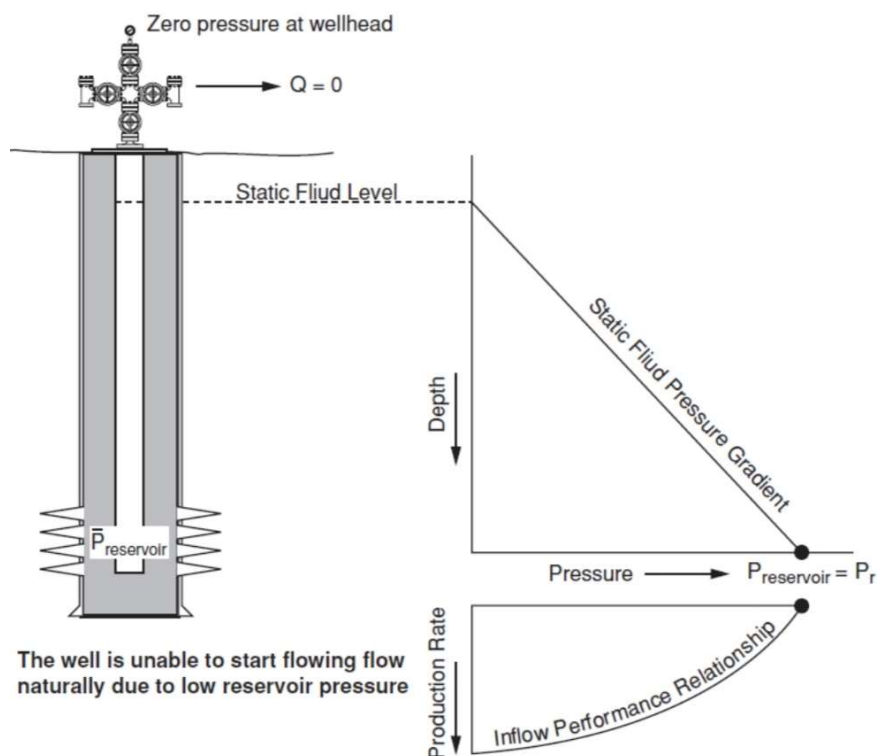
## ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΥΠΟΒΟΗΘΗΣΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΑΝΤΛΙΩΝ ΚΑΙ ΕΙΣΠΙΕΣΗΣ ΑΕΡΙΟΥ



Εικόνα 13 Γράφημα ανάλυσης κόμβου με χρήση λογισμικού

Αφού εκτελεσθεί η ανάλυση κόμβου, ο Μηχανικός μπορεί να βγάλει διάφορα συμπεράσματα και να πάρει ορισμένες αποφάσεις. Το πιο σημαντικό συμπέρασμα, είναι το αν και το πότε το ρευστό δεν θα έχει την απαραίτητη ενέργεια για να ανυψωθεί ή τουλάχιστον το πότε η παραγωγή που φτάνει στην επιφάνεια θα πάψει να είναι κερδοφόρος. Αυτό μπορεί να φανεί πολύ εύκολα όταν η ανάλυση κόμβου δεν δίνει κοινό σημείο για τις δύο καμπύλες, δηλαδή δεν υπάρχει καν παραγωγή, ή αντίστοιχα η παραγωγή που εκτιμάται είναι πολύ μικρή. Επιπλέον, ο μηχανικός προβλέποντας τις αλλαγές που θα επέλθουν στο πεδίο με τον χρόνο, δηλαδή είτε στη γεώτρηση είτε στον ταμιευτήρα, μπορεί να εκτιμήσει, σε μία ήδη εν λειτουργία γεώτρηση, τη χρονική στιγμή που η παραγωγή θα διακοπεί. Αυτές οι γεωτρήσεις ονομάζονται «Νεκρές Γεωτρήσεις» (dead well) όπως εκείνη στην Εικόνα 14. Αυτό εντοπίζεται στο γεγονός ότι η πίεση μηδενίζεται προτού το ρευστό κατορθώσει να ανυψωθεί στην κεφαλή της γεώτρησης. Αν η πίεση ήταν επαρκής, από την καμπύλη IPR θα μπορούσε να προσδιοριστεί ο αναμενόμενος ρυθμός παραγωγής.





Εικόνα 14 Νεκρή Γεώτρηση

### 2.6.1 Τεχνητή ανύψωση (artificial lift)

Όταν πλέον η παραγωγή δεν είναι επαρκής, ο Μηχανικός καλείται να προτείνει λύσεις. Οι λύσεις αναφέρονται σε αλλαγές που μπορούν να εφαρμοστούν είτε στον ταμιευτήρα είτε στη γεώτρηση. Η συγκεκριμένη εργασία θα εστιάσει σε ορισμένες λύσεις που αναφέρονται αποκλειστικά σε βελτιώσεις στη γεώτρηση, γνωστές ως «τεχνητή ανύψωση». Αυτές ουσιαστικά προσφέρουν ενέργεια στο ρευστό μέσω διάφορων τεχνικών και φυσικών φαινομένων, με αποτέλεσμα να αυξάνεται ο ρυθμός ροής εντός της γεώτρησης παραγωγής, το οποίο εξισορροπείται από την μείωση της πίεσης πυθμένα της γεώτρησης με αποτέλεσμα και την αύξηση του ρυθμού ροής και εντός του ταμιευτήρα προς τη γεώτρηση (pressure drawdown). Οι μέθοδοι που θα αναλυθούν στο επόμενο κεφάλαιο αλλά και θα χρησιμοποιηθούν στην ανάλυση της μελέτης περίπτωσης, είναι η «Αντλία Βάκτρου» (Sucker Rod Pump), η «Ηλεκτρική Εμβαπτιζόμενη Αντλία» (ESP) και το «Gas Lift», δηλαδή η υποβοήθηση ανύψωσης με χρήση αερίου.

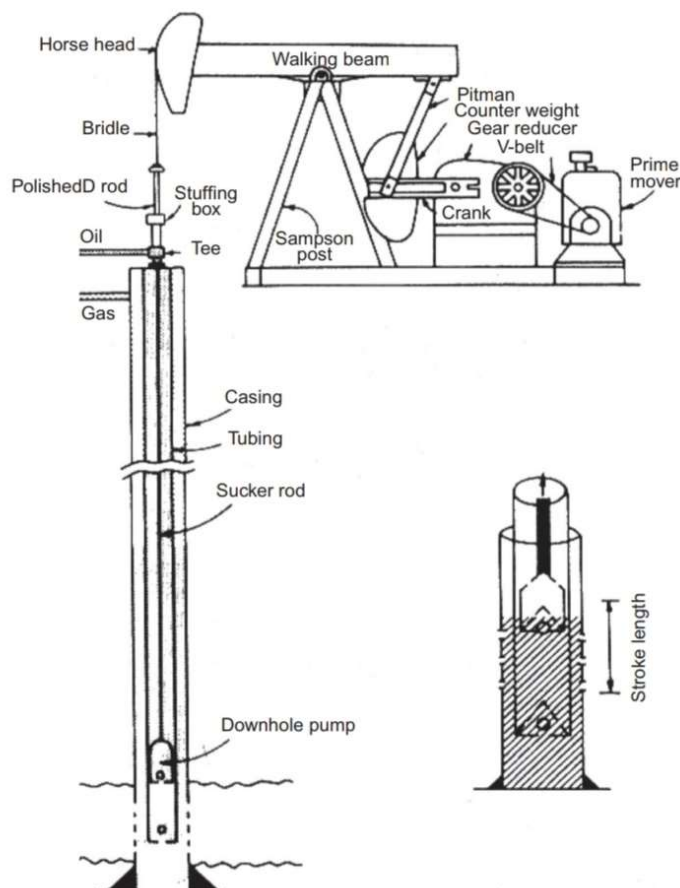
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΤΕΧΝΗΤΗ ΑΝΥΨΩΣΗ (ARTIFICIAL LIFT)

### 3.1 Εισαγωγή

Όπως ήδη αναφέρθηκε, στην παρούσα εργασία θα γίνει αναφορά στην αντλία βάκτρου, στην ηλεκτρική εμβαπτισμένη αντλία και στο σύστημα υποβοήθησης με εισπίεση αερίου. Θα εξηγηθούν τα φυσικά φαινόμενα που συμβαίνουν κατά τη λειτουργία τους, οι μαθηματικοί νόμοι που τα διέπουν, ο τρόπος σχεδιασμού τους και η εφαρμοσιμότητά τους. Σε ποσοστό που ξεπερνάει το 50%, οι πετρελαϊκές γεωτρήσεις χρησιμοποιούν μία από τις μεθόδους της τεχνητής ανύψωσης. Ακόμα και στα πιο ιδανικά συστήματα ταμειυτήρα-γεώτρησης, κάποια στιγμή για να συνεχίσει η παραγωγή να είναι κερδοφόρος (οικονομική), ειδικότερα μετά το «water breakthrough», ο Μηχανικός και γενικότερα οι βιομηχανίες θα αναζητήσουν την λύση της τεχνητής ανύψωσης. Η επιλογή της μεθόδου τεχνητής ανύψωσης είναι μια από τις πιο σημαντικές διαδικασίες για την επίτευξη οικονομικά αποδοτικής παραγωγής. Η επιλογή της βέλτιστης μεθόδου γίνεται λαμβάνοντας υπόψη τις παραμέτρους του ταμειυτήρα και των ρευστών, τον τύπο και τη γεωμετρία της γεώτρησης, την τοποθεσία του πεδίου (υπαίθρια ή υπεράκτια) και τους οικονομικούς παράγοντες (κεφάλαιο και λειτουργικό κόστος). Στα υπαίθρια πεδία, η αντλία βάκτρου είναι η πιο συνήθης μέθοδος ενώ στις υπεράκτιες εκμεταλλεύσεις κυριαρχεί η χρήση της ESP και του συστήματος gas lift.

### 3.2 Αντλία Βάκτρου (sucker rod pump)

Η αντλία βάκτρου είναι μία αντλία η οποία προσφέρει μηχανικό έργο ώστε να μεταφερθεί το ρευστό από τον πυθμένα της γεώτρησης στην επιφάνεια. Ουσιαστικά το ρευστό μεταφέρεται προς τα επάνω μέσω ενός βαρελιού. Η κίνηση ξεκινάει από ένα κινητήρα στην επιφάνεια όπου μέσω ενός απλού συστήματος ταχυτήτων, οι στρόφες μειώνονται στο επιθυμητό επίπεδο και η κίνηση, αφού μετατραπεί από περιστροφική σε παλινδρομική, φτάνει τελικά στην κεφαλή της αντλίας, που έχει την εμπειρική ονομασία «κεφαλή αλόγου». Η τελευταία συνδέεται με το βαρέλι μέσω ράβδων και έτσι μεταδίδεται η κίνηση σε ένα πιστόνι εντός του βαρελιού το οποίο παλινδρομεί ώστε να μεταφερθεί τελικά η ενέργεια στο ρευστό. Στην Εικόνα 15 φαίνεται μία συνήθης διάταξη αντλίας βάκτρου.



Εικόνα 15 Διάταξη Αντλίας Βάκτρου

### 3.2.1 Εξοπλισμός επιφάνειας

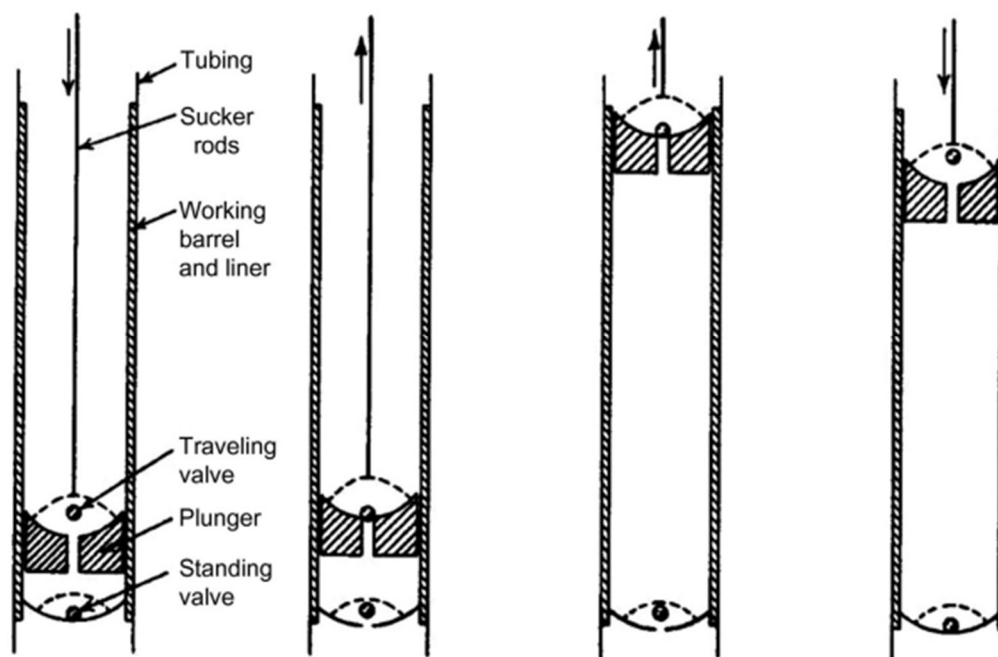
Ανάλογα με τον επιφανειακό εξοπλισμό, οι αντλίες βάκτρου μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε τρία είδη. Αυτά είναι οι συμβατικές μονάδες (conventional units), οι μονάδες Lufkin Mark II και οι μονάδες με εξισορρόπηση αέρα (air-balanced units). Η διαφορά τους έγκειται στη διάταξη του εξοπλισμού στην επιφάνεια. Στις συμβατικές μονάδες, ο στρόφαλος και η κεφαλή αλόγου βρίσκονται στην αντίθετη πλευρά της κινούμενης δοκού, ενώ στις άλλες δυο μονάδες βρίσκονται στην ίδια πλευρά. Επιπλέον, στις μονάδες με εξισορρόπηση αέρα, δεν χρησιμοποιούνται κοινά αντίβαρα αλλά χρησιμοποιούνται κύλινδροι με πεπιεσμένο αέρα.

Όπως αναφέρθηκε, η κίνηση της αντλίας ξεκινάει από έναν κινητήρα στην επιφάνεια. Αυτός μπορεί να είναι είτε ηλεκτρικός είτε εσωτερικής καύσης. Η περιστροφική κίνηση μεταφέρεται στον μειωτή στροφών μέσω μιας ελαστικής ζώνης (v-belt) ο οποίος είναι ένα κλασικό κιβώτιο ταχυτήτων. Αφού οι στροφές μειωθούν σε λειτουργικό επίπεδο, η κίνηση μεταφέρεται στον περιστροφικό βραχίονα ή στρόφαλο (crank). Στις συμβατικές και στις Mark II μονάδες, τα αντίβαρα βρίσκονται μαζί με

τον στρόφαλο. Τελικά εκείνος συνδέεται με τον βραχίονα «pitman», ο οποίος με τη σειρά του συνδέεται με την κινούμενη δοκό (walking beam). Η περιστροφική κίνηση έχει μετατραπεί πλέον σε παλινδρομική κίνηση της κινούμενης δοκού. Στο απέναντι άκρο της δοκού βρίσκεται η κεφαλή αλόγου η οποία είναι συνδεδεμένη με τη ράβδο στίλβωσης (polished rod) που εισέρχεται στη γεώτρηση. Το σχήμα της κεφαλής είναι διαμορφωμένο έτσι ώστε η κίνηση της ράβδου να είναι πάντοτε κατακόρυφη. Στη ράβδο βρίσκεται και το κουτί συλλογής, όπου συλλέγεται το παραγόμενο ρευστό και ωθείται στη σύνδεση T, η οποία βρίσκεται λίγο πιο κάτω. Από εκεί το ρευστό διαχωρίζεται σε πετρέλαιο και αέριο και οδηγείται στις δεξαμενές αποθήκευσης.

### 3.2.2 Εμβαπτισμένος εξοπλισμός

Ο εξοπλισμός εντός της γεώτρησης αποτελείται από μια αντλία εμβόλου, (plunger pump) η οποία τοποθετείται πάνω στην παραγωγική σωλήνωση και αποτελείται από τον εργαζόμενο θάλαμο (working barrel), την κινητή και τη σταθερή βαλβίδα και συνδέεται με τη ράβδο στίλβωσης μέσω της ράβδου αναρρόφησης (sucker rod). Η αρχή λειτουργίας του εμβόλου παρουσιάζεται στην Εικόνα 16.



Εικόνα 16 Λειτουργία αντλίας εμβόλου

Το έμβολο είναι αρχικά τοποθετημένο σε συγκεκριμένο βάθος όπου υπάρχει ρευστό του ταμιευτήρα. Καθώς κινείται προς τα κάτω, η κινητή βαλβίδα που βρίσκεται πάνω στο έμβολο ανοίγει επιτρέποντας στο ρευστό να περάσει πάνω από το έμβολο προς το βαρέλι. Όταν σταματήσει η καθοδική κίνηση, η κινητή βαλβίδα κλείνει και το ρευστό

εγκλωβίζεται στο θάλαμο. Αφού ξεκινήσει η ανοδική κίνηση, η σταθερή βαλβίδα ανοίγει, επιτρέποντας σε νέο ρευστό από τον ταμιευτήρα να συμπληρώσει τον χώρο από όπου αφαιρέθηκε ο προηγούμενος όγκος ρευστού. Εφόσον η κινητή βαλβίδα είναι κλειστή, το ρευστό που είχε προηγουμένως περάσει πάνω από το έμβολο ωθείται προς την επιφάνεια. (Brown, 1977)

Υπάρχουν δύο είδη αντλιών εμβόλου, το «tubing pump» και το «rod pump». Στην πρώτη περίπτωση, ο εργαζόμενος θάλαμος τοποθετείται μαζί με την παραγωγική σωλήνωση, ενώ το έμβολο τοποθετείται αργότερα πάνω στη ράβδο αναρρόφησης και τελικά κάθεται πάνω στο βαρέλι. Από την άλλη, στις «rod pump», το βαρέλι και το έμβολο είναι ενωμένα και τοποθετούνται μαζί πάνω στη ράβδο αναρρόφησης και τελικά κάθονται πάνω σε μία κατάλληλα κατασκευασμένη θέση στην παραγωγική σωλήνωση.

### 3.2.3 Ονοματολογία αντλίας βάρου

Σύμφωνα με το Αμερικανικό Πετρελαϊκό Ινστιτούτο (API) η ονοματολογία των αντλιών βάρου ακολουθεί το εξής πρότυπο:

C-228D-200-74

Ο πρώτος χαρακτήρας αναφέρεται στον τύπο της μονάδας, αν είναι δηλαδή συμβατική (C), μονάδα με εξισορρόπηση με αέρα (A) ή μονάδα Mark II (M). Στο δεύτερο πεδίο, ο αριθμός δείχνει τη μέγιστη ροπή μετρούμενη σε *inches.lbs.*  $10^3$ , ενώ ο χαρακτήρας D αναφέρεται στους διπλούς μειωτές στροφών (double-reduction). Στο τρίτο πεδίο δίνεται το μέγιστο φορτίο που μπορεί να δεχθεί η ράβδος στίλβωσης ( $PRL_{max}$ ) μετρούμενο σε *lbs.*  $10^2$ . Τέλος, στο τέταρτο πεδίο δίνεται η διαδρομή του εμβόλου (stroke length) σε ίντσες.

### 3.2.4 Φορτίο αντλίας

Για τη κατάλληλη διαστασιολόγηση της αντλίας απαιτείται η εκτίμηση του συνολικού φορτίου (βάρους) που πρέπει να αντιμετωπίσει η αντλία. Το συνολικό φορτίο που δέχεται η μονάδα άντλησης στην επιφάνεια είναι το άθροισμα του βάρους του υγρού, του βάρους του εμβόλου, του βάρους της ράβδου αναρρόφησης, του δυναμικού φορτίου λόγω επιτάχυνσης, του φορτίου λόγω τριβής και του φορτίου λόγω της ανοδικής ώσης του εμβόλου. Το βάρος του εμβόλου και η τριβή αγνοούνται ενώ η ανοδική ώση θεωρείται μηδενική για να αντισταθμίσει την αγνόηση των αντανεκλαστικών δυνάμεων. Επιπλέον, ο όρος της επιτάχυνσης, αφορά μόνο την

επιτάχυνση των ράβδων και όχι του ρευστού. Με βάση αυτές τις παραδοχές, το μέγιστο φορτίο λαμβάνεται όταν η κινητή βαλβίδα κλείνει στο τέλος της καθοδική κίνησης και υπολογίζεται από την εξής σχέση:

$$PRL_{max} = 62.4S_f(A_p - A_r)\frac{D}{144} + \gamma_s A_s \frac{D}{144} + \gamma_s \frac{D}{144} A_r SN^2 \frac{M}{70,471.2} \quad (2.1)$$

όπου το  $S_f$  αναφέρεται στο ειδικό βάρος του ρευστού στη σωλήνωση, το  $D$  στο μήκος της ράβδου αναρρόφησης, το  $A_p$  στο εμβαδόν της διατομής του εμβόλου, το  $A_r$  στο εμβαδόν της διατομής της ράβδου αναρρόφησης, το  $\gamma_s$  στο ειδικό βάρος του χάλυβα, το  $N$  στον αριθμό των παλινδρομικών κινήσεων ανά λεπτό (RPM), το  $S$  στο ενεργό μήκος διαδρομής και το  $M$  στη γεωμετρική διάταξη του βραχίονα crank και pitman. Συγκεκριμένα, για συμβατικές μονάδες το  $M$  δίνεται από τη σχέση:

$$M = 1 + \frac{c}{h} \quad (2.2)$$

όπου το  $c$  είναι το μήκος του βραχίονα crank και το  $h$  το μήκος του βραχίονα pitman. Αντίστοιχα, για μονάδες εξισορρόπησης με αέρα ισχύει:

$$M = 1 - \frac{c}{h} \quad (2.3)$$

Το ελάχιστο φορτίο εμφανίζεται όταν η κινητή βαλβίδα είναι ανοιχτή οπότε το βάρος του ρευστού αναλαμβάνεται από τη σωλήνωση και όχι από τη ράβδο στίλβωσης. Προσδιορίζεται από την εξής σχέση:

$$PRL_{min} = -62.4S_f A_r \frac{D}{144} + \gamma_s A_r \frac{D}{144} - \left(1 - \frac{c}{h}\right) \frac{D\gamma_s A_r SN^2}{70,471.2*144} \quad (2.4)$$

για συμβατικές μονάδες, ενώ για τις μονάδες εξισορρόπησης με αέρα ισχύει:

$$PRL_{min} = -62.4S_f A_r \frac{D}{144} + \gamma_s A_r \frac{D}{144} - \left(1 + \frac{c}{h}\right) \frac{D\gamma_s A_r SN^2}{70,471.2*144} \quad (2.5)$$

Για τη μείωση της απαίτησης σε ενέργεια από τον κινητήρα, τοποθετούνται αντίβαρα στην επιφάνεια. Το ιδανικό φορτίο αντίβαρων ισούται με τον μέσο όρο του επιβαλλόμενου φορτίου στη ράβδο, δηλαδή :

$$C = 0,5(PRL_{max} - PRL_{min}) \quad (2.6)$$

Στις συμβατικές και στις Mark II μονάδες, τα αντίβαρα είναι τοποθετημένα μαζί με τον βραχίονα crank ενώ στις μονάδες εξισορρόπησης με αέρα, βρίσκονται σε ξεχωριστό σημείο λίγο πριν την κεφαλή. Για εφαρμογές σε πολύ βαθιές γεωτρήσεις χρησιμοποιούνται τα λεγόμενα «tapered rod strings». Ουσιαστικά καθώς μεγαλώνει

το βάθος, τοποθετούνται ράβδοι με μικρότερη διάμετρο από την προηγούμενη. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του φορτίου που δέχεται η ανώτερη ράβδος. Επιπλέον η μονάδα λόγω σχήματος δέχεται και περιστροφικές δυνάμεις που δημιουργούν στροφική ροπή. Η μέγιστη ροπή που δέχεται η μονάδα συμβαίνει όταν ο στρόφαλος είναι οριζόντιος. Τότε:

$$T = 0.5S[C - (0.9 - F_2)W_r] \quad (2.7)$$

Όπου

$$F_2 = S \left(1 - \frac{c}{h}\right) \frac{N}{70,471.2}, \text{ για συμβατές μονάδες} \quad (2.8)$$

$$F_2 = S \left(1 + \frac{c}{h}\right) \frac{N}{70,471.2}, \text{ για μονάδες με εξισορρόπηση με αέρα} \quad (2.9)$$

ενώ το  $W_r$  αναφέρεται στο βάρος της ράβδου και ισχύει  $W_r = \gamma_s A_r \frac{D}{144}$

### 3.2.5 Απόληψη αντλίας

Η απόληψη της αντλίας αναφέρεται στον συνολικό όγκο ρευστού που εξάγεται στη διάρκεια μίας ημέρας (stb/d) και δίνεται από την εξής σχέση:

$$q = A_p S_p N E_v 24 \frac{60}{144 * 12 * B_o * 5.615} \quad \text{ή}$$

$$q = 0.1484 A_p S_p E_v \frac{N}{B_o} \text{ (stb/day)} \quad (2.10)$$

όπου το  $S_p$  αναφέρεται στο ενεργό μήκος της διαδρομής του εμβόλου και το  $E_v$  στην ογκομετρική απόδοσή του.

Επειδή και το βάκτρο αλλά και η παραγωγική σωλήνωση είναι μεταλλικά στοιχεία, η συμπεριφορά τους είναι ελαστική. Έτσι κατά την ανοδική κίνηση, το βάρος ασκεί δύναμη στο βάκτρο και τη σωλήνωση με αποτέλεσμα να επιμηκύνονται προς τα κάτω, γεγονός που επιφέρει μείωση στην ενεργό διαδρομή. Επιπλέον, κατά την καθοδική κίνηση, το έμβολο λόγω κεκτημένης ταχύτητας προχωράει πιο κάτω από το αρχικά ορισμένο κατώτερο σημείο, με αποτέλεσμα να μεγαλώνει η ενεργός διαδρομή. Αυτά τα φαινόμενα μπορούν να ποσοτικοποιηθούν και τελικά το ενεργό μήκος της διαδρομής δίνεται από την εξής σχέση:

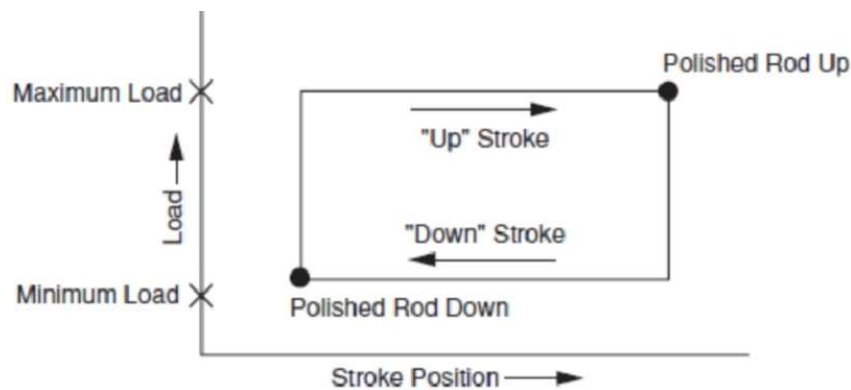
$$S_p = S - 12 \frac{D}{E} W_f \left( \frac{1}{A_r} + \frac{1}{A_t} \right) + 12 D S N^2 W_r \frac{M}{E * 70,471.2 * A_r} \quad (2.11)$$

όπου το  $S$  αναφέρεται στο ονομαστικό μήκος της διαδρομής, το  $D$  στο βάθος του εμβόλου, το  $W_f$  στο βάρος του ρευστού, το  $A_r$  στην επιφάνεια τομής της ράβδου, το

Αι στην επιφάνεια τομής της παραγωγικής σωλήνωσης και το  $E$  στο μέτρο «Young» του χάλυβα. (Guo, 2017)

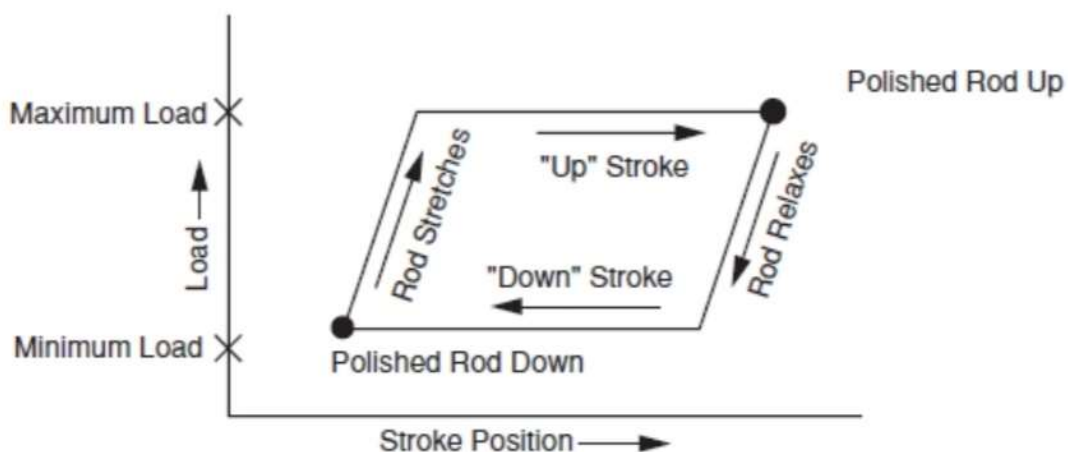
### 3.2.6 Αποδοτικότητα αντλίας

Για την παρακολούθηση την απόδοσης της αντλίας χρησιμοποιείται μία συσκευή που ονομάζεται δυναμογράφος ο οποίος τοποθετείται πάνω από το έμβολο και συλλέγει πληροφορίες για την παλμική κίνηση του εμβόλου και για το φορτίο που μεταφέρεται. Στη συνέχεια, μέσω των καρτών δυναμόμετρου, απεικονίζει γραφικά τα φαινόμενα που συμβαίνουν σε ένα κύκλο άντλησης. Αν η ράβδος ήταν απόλυτα ανελαστική και η αντλία λειτουργούσε με απόλυτη απόδοση χωρίς παραγωγή αερίου, τότε η κάρτα θα ήταν εκείνη της Εικόνας 17.



Εικόνα 17 Θεωρητικό φορτίο για ανελαστική ράβδο

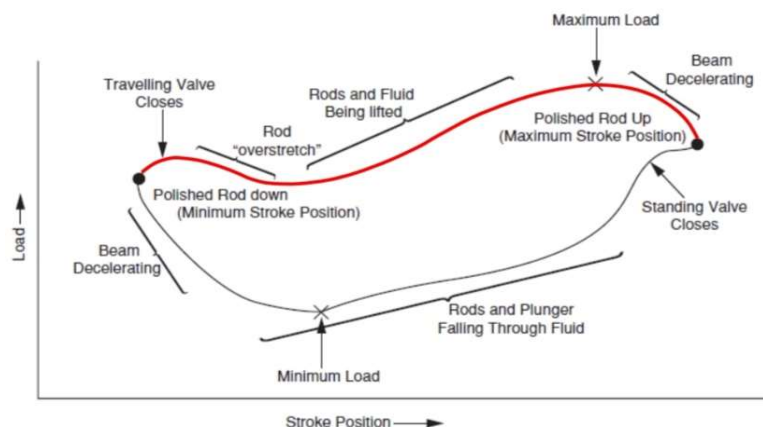
Αντίστοιχα, για ελαστική ράβδο χωρίς παραγωγή αερίου, η κάρτα θα ήταν εκείνη της Εικόνας 18.



Εικόνα 18 Θεωρητικό φορτίο για ελαστική ράβδο

Στην πραγματικότητα, ο συνδυασμός όλων των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα οδηγεί σε αποτύπωση του διαγράμματος θέσης-δύναμης όπως εκείνη της Εικόνας 19.



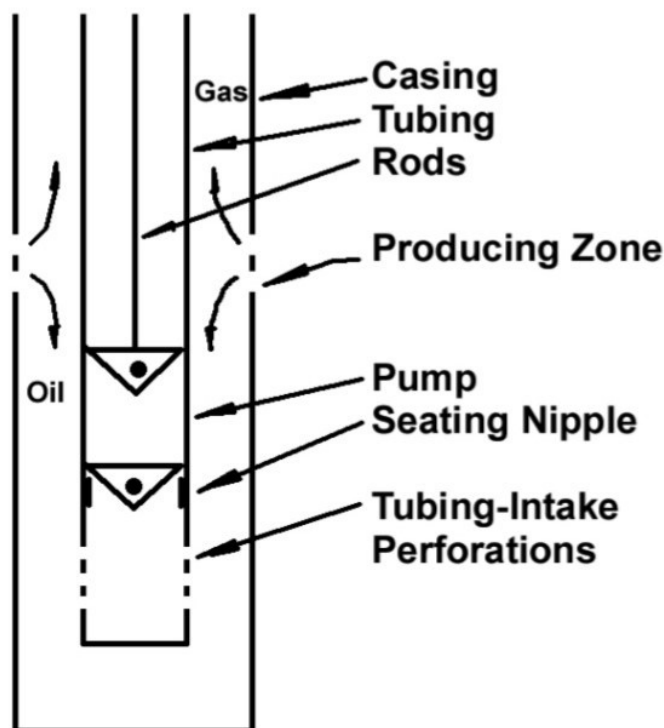


Εικόνα 19 Συνήθης κάρτα δυναμόμετρου

Η απόκλιση της πραγματικής κάρτας άρα και του φορτίου, οφείλεται σε διάφορα φαινόμενα που συμβαίνουν κατά την άντληση. Μαζί με το πετρέλαιο αναπόφευκτα εισέρχεται και αέριο το οποίο κατά την ανοδική κίνηση εκτονώνεται μειώνοντας τον διαθέσιμο χώρο για το υγρό πετρέλαιο. Επίσης, κατά την καθοδική κίνηση, το αέριο συμπιέζεται. Επιπλέον, η επιμήκυνση του βάρτρου, αλλά και η καθυστέρηση στο άνοιγμα και στο κλείσιμο των βαλβίδων, επιφέρει αποκλίσεις στο φορτίο οι οποίες αποτυπώνονται στην κάρτα. Ένα άλλο ακραίο φαινόμενο είναι το λεγόμενο «gas lock» κατά το οποίο η αντλία λειτουργεί σε πολύ χαμηλή ογκομετρική απόδοση λόγω κατάληψης του χώρου σχεδόν εξολοκλήρου από αέριο. Στη συγκεκριμένη περίπτωση δεν υπάρχει καθόλου άντληση πετρελαίου και οι βαλβίδες αδυνατούν να λειτουργήσουν. Το φαινόμενο αυτό είναι προσωρινό, διότι κάποια στιγμή θα εισέλθουν αρκετές σταγόνες πετρελαίου ώστε να ανοίξει η κινητή βαλβίδα και να ξεκινήσει και πάλι η παλινδρομική κίνηση. (Guo, 2017)

Όπως έχει ήδη αναδειχθεί, η παρουσία αερίου εμποδίζει την ομαλή λειτουργία της αντλίας βάρτρου. Για την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος, χρησιμοποιούνται συστήματα φυσικού διαχωρισμού του αερίου από το πετρέλαιο, που ονομάζονται παρεμβύσματα αερίου (gas anchors). Ουσιαστικά το αέριο ωθείται εκτός της παραγωγικής σωλήνωσης και εντός του δακτυλίου της εξωτερικής σωλήνωσης. Υπάρχουν διάφοροι τύποι παρεμβυσμάτων αερίου, που όλοι βέβαια λειτουργούν βασιζόμενοι στη διαφορά του ειδικού βάρους των δύο φάσεων και στην ταχύτητα καταβύθισής τους. Στην Εικόνα 20 δίνεται η διάταξη ενός φυσικού διαχωριστή. Το ρευστό εισέρχεται μέσω της ολοκλήρωσης της γεώτρησης στην εξωτερική σωλήνωση. Στη συνέχεια το ελαφρύτερο αέριο οδηγείται προς τα επάνω μέσω της

σωλήνωσης και παράγεται στην επιφάνεια, ενώ το βαρύτερο πετρέλαιο οδηγείται προς τα κάτω και εισέρχεται στην παραγωγική σωλήνωση.



Εικόνα 20 Φυσικός διαχωρισμός αερίου

### 3.2.7 Συμπεράσματα-Εφαρμογές

Η αντλία βάρου είναι αποδοτική, απλή, αξιόπιστη και γενικώς εύκολη στη λειτουργία. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε γεωτρήσεις με αρκετά χαμηλές πιέσεις και σε πετρελαϊκά ρευστά με υψηλή θερμοκρασία και ιξώδες και μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιαδήποτε διάμετρο σωλήνωσης, ακόμα και σε πολύ στενές, σε γεωτρήσεις με πολλές ζώνες και ολοκληρώσεις αλλά και να μεταφερθεί σε άλλη γεώτρηση πολύ εύκολα. Ωστόσο παρουσιάζει προβλήματα όταν υπάρχει παρουσία στερεών φάσεων και δίνει πολύ χαμηλή απόδοση για μεγάλες αναλογίες αερίου-πετρελαίου και για κεκλιμένες γεωτρήσεις λόγω τριβών. Τέλος, είναι υπερβολικά ογκώδης για να χρησιμοποιείται σε υπεράκτιες εκμεταλλεύσεις.

### 3.3 Ηλεκτρική Εμβαπτιζόμενη Αντλία (ESP)

Η αντλία ESP χρησιμοποιεί έναν ηλεκτρικό κινητήρα για να τροφοδοτήσει μία φυγοκεντρική αντλία πολλών σταδίων και να ανυψώσει το ρευστό στην επιφάνεια. Όλος ο εξοπλισμός της βρίσκεται εντός της γεώτρησης (εμβαπτιζόμενος).

Τοποθετείται πάνω στην παραγωγική σωλήνωση και εισέρχεται στη γεώτρηση μαζί της.

### 3.3.1 Εμβαπτισμένος εξοπλισμός

Στο κατώτερο σημείο της εμβαπτισμένης αντλίας, βρίσκεται ένας αισθητήρας ο οποίος συλλέγει πληροφορίες για την εισροή ρευστού στην αντλία, για τις θερμοκρασίες που αναπτύσσονται και για τις δονήσεις που προκαλούνται και τις αποστέλλει σε πραγματικό χρόνο στην επιφάνεια. Το μόνο στοιχείο που τον συνδέει με την επιφάνεια είναι η καλωδίωση που τον τροφοδοτεί ηλεκτρικά. Πάνω από τον αισθητήρα βρίσκεται ο ηλεκτρικός κινητήρας που κινεί την αντλία, ο οποίος τροφοδοτείται με ενέργεια μέσω ενός καλωδίου που έρχεται από την επιφάνεια. Οι συνήθεις κινητήρες λειτουργούν με ονομαστική ταχύτητα 3,500 στροφές ανά λεπτό και συχνότητα 60 Hz. Το μέγεθος και η ισχύς του κινητήρα εξαρτώνται από τον αριθμό των σταδίων αντλίας που χρειάζονται για την ανύψωση του ρευστού. Η τάση σχεδιασμού και λειτουργίας αυτών των κινητήρων μπορεί να είναι τόσο χαμηλή όσο 230 volt ή έως και 4,000 volt. Γενικώς, το μήκος και η διάμετρος του κινητήρα καθορίζουν και το μέγεθος όλης της αντλίας. Ο κινητήρας κατά τη λειτουργία του αναπόφευκτα θερμαίνεται αλλά ταυτόχρονα ψύχεται από τα κινούμενα ρευστά. Είναι γεμάτος με συνθετικά λάδια τα οποία τον μονώνουν και προσφέρουν λίπανση. (HW, 2011)

Ακριβώς πάνω από τον κινητήρα βρίσκεται ο θάλαμος στεγανοποίησης (seal chamber) ο οποίος προστατεύει τον κινητήρα από τα κινούμενα ρευστά και εξισορροπεί την πίεση μεταξύ της γεώτρησης και των ρευστών του κινητήρα. Ο κινητήρας συνδέεται με τις πτερωτές της αντλίας μέσω ενός άξονα, ο οποίος πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο στενός για να μην περιορίζει τον χώρο όπου μπορεί να κινηθεί το ρευστό. Στην αρχή του άξονα βρίσκεται η είσοδος της αντλίας ή σημείο άντλησης (pump intake), από όπου εισέρχεται το ρευστό.

Για ρευστά με χαμηλό λόγο αερίου-πετρελαίου (GOR), δεν απαιτείται κάποιος διαχωριστής. Ωστόσο για ρευστά με σχετικά μεγάλο GOR, χρησιμοποιούνται ειδικές είσοδοι διαχωρισμού. Μία από αυτές είναι η είσοδος με ανεστραμμένη ροή, η οποία αξιοποιεί τη διαφορά στο ειδικό βάρος για να διαχωρίσει τις δύο φάσεις. Σε αυτή την περίπτωση το ρευστό εισέρχεται από την είσοδο της αντλίας και οδηγείται κατευθείαν προς τα κάτω. Το ελαφρύτερο αέριο μπορεί να κινηθεί προς τα πάνω και να εξέλθει από τις οπές που βρίσκονται πιο πάνω από την είσοδο και τελικά να

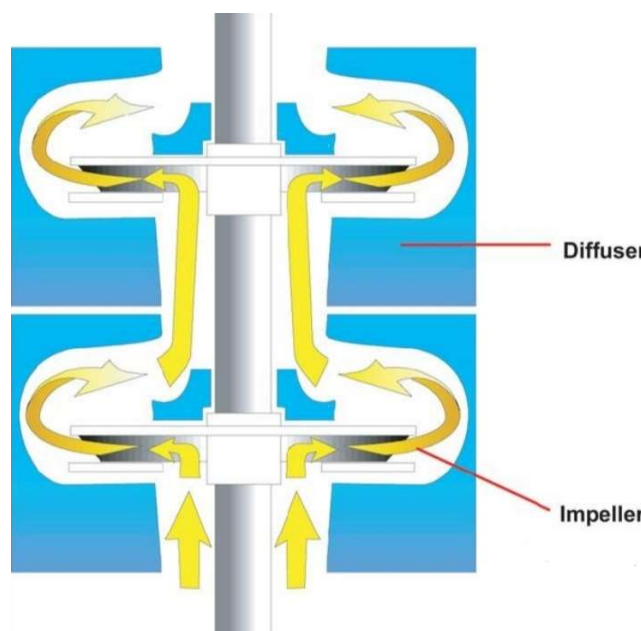
οδηγηθεί εκτός της παραγωγικής σωλήνωσης και εντός του δακτυλίου της εξωτερικής σωλήνωσης όπου από εκεί θα ανυψωθεί μόνο του προς την κεφαλή της γεώτρησης. Τελικά το βαρύτερο πετρέλαιο θα οδηγηθεί στις πτερωτές της αντλίας. (HW, 2011)

Το κάθε στάδιο της αντλίας έχει ως σκοπό την αύξηση της πίεσης του πετρελαίου έτσι ώστε να μπορέσει να ανυψωθεί. Κάθε στάδιο (Εικόνα 21) αποτελείται από μία φτερωτή (impeller) και από έναν στατικό διαχύτη (diffuser). Καθώς το πετρέλαιο εισέρχεται σε κάθε στάδιο, η κινητική του ενέργεια αυξάνεται από την πτερωτή. Στη συνέχεια, ο διαχύτης μετατρέπει την κινητική ενέργεια σε δυναμική αυξάνοντας την πίεση. Κάθε στάδιο αυξάνει όλο και περισσότερο την πίεση του ρευστού μέχρι να επιτευχθεί το επιθυμητό επίπεδο. Η διαφορά μεταξύ της αρχικής πίεσης του ρευστού, προτού εισέλθει στην αντλία, και της τελικής πίεσής του αφότου εξέλθει από το τελευταίο στάδιο, ονομάζεται «Συνολικό Δυναμικό Κεφαλής» ή απλώς «Κεφαλή» (Head). Ο ρυθμός ροής της γεώτρησης καθορίζεται από τις πτερωτές αφού εκείνες καθορίζουν την ταχύτητα του ρευστού ενώ παράλληλα ο διαθέσιμος χώρος είναι σταθερός. Η μαθηματική σχέση μεταξύ κεφαλής, χωρητικότητας, απόδοσης και ισχύος εκφράζεται ως:

$$Power = q_v H \frac{\gamma}{\eta}, \quad (2.12)$$

όπου  $q_v$  είναι ο ρυθμός ροής,  $H$  είναι το συνολικό δυναμικό της κεφαλής,  $\gamma$  είναι το ειδικό βάρος του ρευστού και  $\eta$  η απόδοση της αντλίας. Σημειώνεται ότι το  $H$  αναφέρεται στο μανομετρικό ύψος της αντλίας και χρησιμοποιείται αντί της διαφοράς πίεσης του ρευστού προτού εισέλθει στην αντλία και αφότου εξέλθει ( $\Delta p$ ). Η σχέση που συνδέει τα δύο μεγέθη είναι η εξής:

$$H = \frac{\Delta p}{0.433\gamma} \quad (2.13)$$

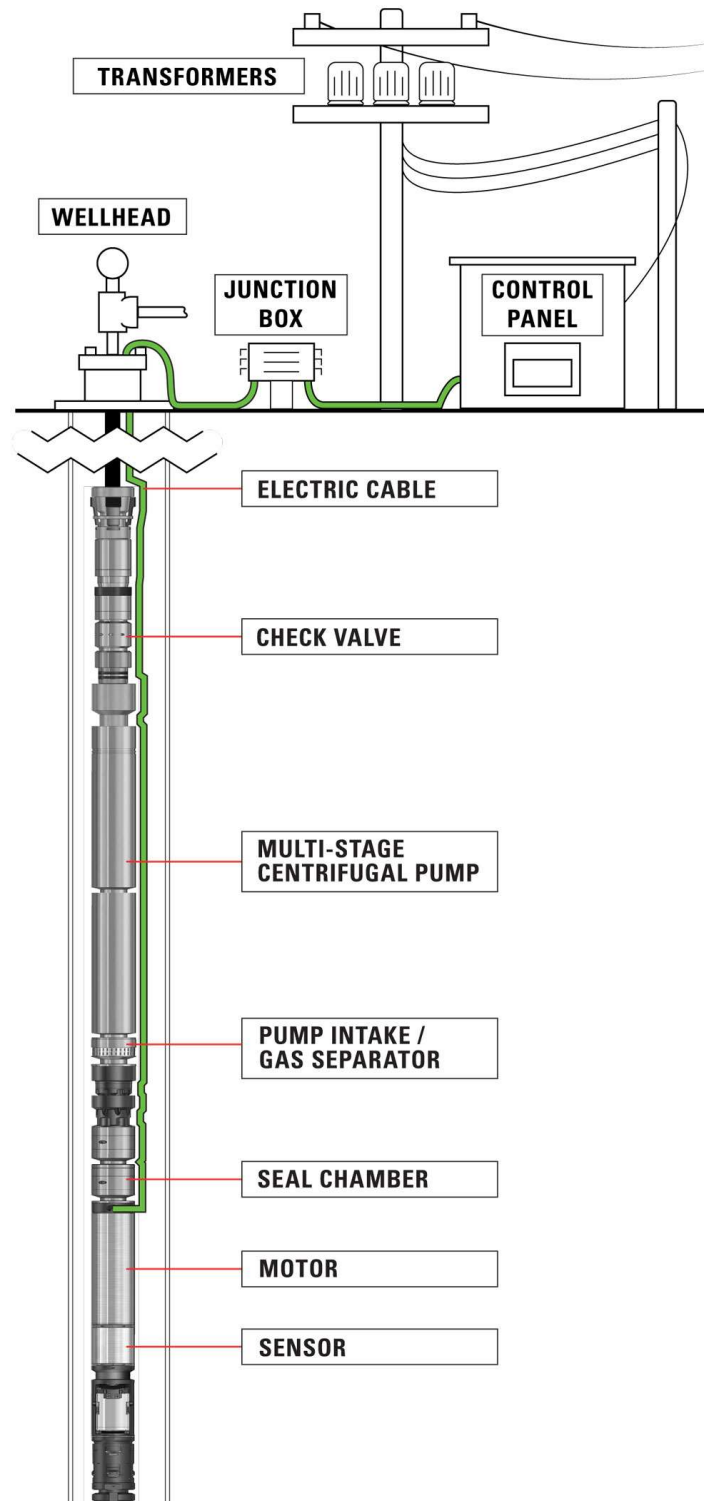


Εικόνα 21 Στάδιο αντλίας ESP

### 3.3.2 Εξοπλισμός Επιφάνειας

Όπως ήδη ειπώθηκε, η απαιτούμενη ισχύς παρέχεται στον κινητήρα μέσω ενός ηλεκτρικού καλωδίου το οποίο είναι συνδεδεμένο σταθερά πάνω στην παραγωγική σωλήνωση και είναι κατάλληλα κατασκευασμένο για να αντέχει σε δύσκολα περιβάλλοντα. Στο άλλο άκρο του είναι συνδεδεμένο στην επιφάνεια με τον ελεγκτή (Motor controller), ο οποίος ρυθμίζει την ισχύ που παρέχεται στον κινητήρα, ανάλογα με τα δεδομένα που συλλέγει ο αισθητήρας. Έτσι η αντλία μπορεί να δουλεύει διαρκώς και μπορούν να γίνονται γρήγορες τροποποιήσεις στο πεδίο ακόμα και αυτόματα. Στην επιφάνεια υπάρχουν διάφοροι μετασχηματιστές για τη διαμόρφωση της τάσης του ηλεκτρικού ρεύματος. Επιπλέον υπάρχει και το δοχείο εξαερισμού (vent box) το οποίο απομακρύνει τυχόν αέριο που μπορεί να είχε εγκλωβιστεί στο καλώδιο. Έτσι αποφεύγονται ανεπιθύμητα φαινόμενα ανάφλεξης. Στην Εικόνα 22 δίνεται η διάταξη μίας ESP.

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΥΠΟΒΟΗΘΗΣΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΑΝΤΛΙΩΝ  
ΚΑΙ ΕΙΣΠΙΕΣΗΣ ΑΕΡΙΟΥ



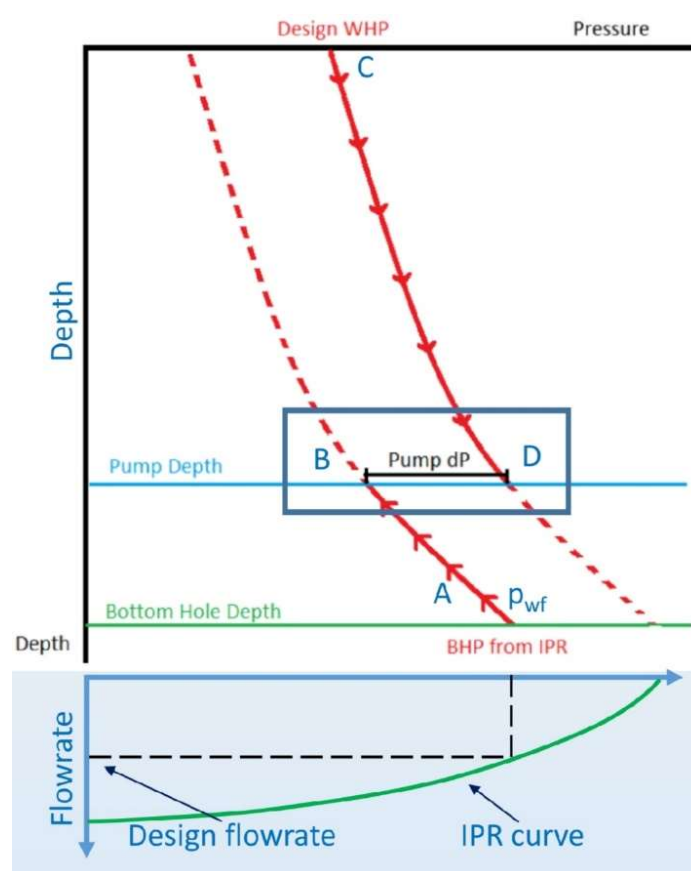
Εικόνα 22 Διάταξη και στοιχεία ESP αντλίας

### 3.3.3 Σχεδιασμός αντλίας ESP

Η Εικόνα 23 παρουσιάζει τον τρόπο σχεδιασμού της αντλίας ESP. Από την καμπύλη IPR, για την επιδιωκόμενη παραγωγή που θέλει ο Μηχανικός, εντοπίζεται η αντίστοιχη πίεση ταμειυτήρα, δηλαδή το σημείο Α. Για τον επιλεγμένο ρυθμό ροής,

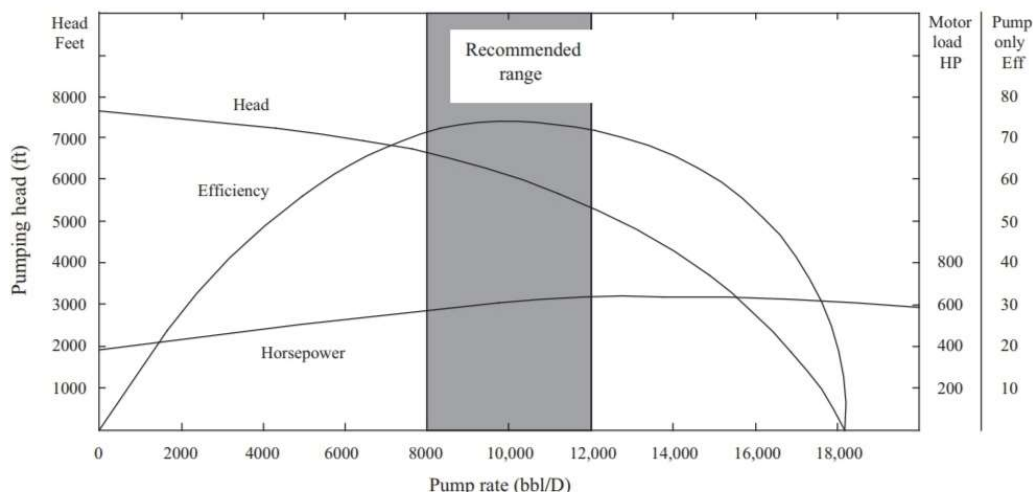
## ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΥΠΟΒΟΗΘΗΣΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΑΝΤΛΙΩΝ ΚΑΙ ΕΙΣΠΙΕΣΗΣ ΑΕΡΙΟΥ

υπολογίζονται οι απώλειες πίεσης και έτσι προσδιορίζεται το σημείο B. Από την πίεση της κεφαλής της γεώτρησης ή του διαχωριστή, δηλαδή από το σημείο C, με χρήση της καμπύλης VLP εντοπίζεται το σημείο D. Η διαφορά πίεσης των σημείων B και D είναι αυτή που απαιτείται για να μπορέσει το σύστημα ταμιευτήρα-γεώτρησης να αντλεί με την επιδιωκόμενη παροχή, προσφέρεται τελικά από την αντλία και καλείται Συνολικό Δυναμικό Κεφαλής (Head) της αντλίας. Στη συνέχεια, με βάση τα σχεδιαστικά χαρακτηριστικά των σωληνώσεων και τις διαθέσιμες αντλίες στην αγορά, εντοπίζεται εκείνη που μπορεί να προσφέρει την απαιτούμενη πίεση στη γεώτρηση.



Εικόνα 23 Αύξηση τη πίεσης ρευστού με χρήση αντλίας ESP

Στην Εικόνα 24 δίνεται η χαρακτηριστική καμπύλη λειτουργίας μιας ESP 100 σταδίων. Βάσει το Συνολικό Δυναμικό Κεφαλής που απαιτείται για να επιτευχθεί ο επιθυμητός ρυθμός ροής, εντοπίζεται και η απαιτούμενη ισχύς της αντλίας. Η σκούρα περιοχή είναι το βέλτιστο εύρος σημείων λειτουργίας της αντλίας, όπου η απόδοση της (efficiency) είναι η μέγιστη δυνατή. Διαιρώντας την Κεφαλή και την ισχύ με το πλήθος των σταδίων, υπολογίζεται και η πίεση που προσφέρεται ανά στάδιο καθώς και η ισχύς που απαιτείται άρα και η ενέργεια που καταναλώνεται ανά στάδιο.



Εικόνα 24 Εφαρμογή αντλίας ESP 100 σταδίων

### 3.3.4 Συμπεράσματα-Εφαρμογές

Οι αντλίες ESP είναι εύκολα προσαρμόσιμες σε αλλαγές. Απαιτούν ελάχιστο χώρο στην επιφάνεια, είναι αθόρυβες και ασφαλείς και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε κεκλιμένες και οριζόντιες γεωτρήσεις. Είναι αρκετά αποδοτικές για ρευστά με μεγάλο GOR και για μεγάλες θερμοκρασίες, μπορούν να διαχειριστούν διαβρωτικές ουσίες και οξέα και να επιτύχουν μεγάλους όγκους παραγωγής. Ωστόσο, δεν μπορούν να διαχειριστούν στερεά στη γεώτρηση. Επίσης, οποιαδήποτε αλλαγή και επισκευή στην αντλία απαιτεί την αφαίρεση όλης της παραγωγικής σωλήνωσης και συνεπώς τη διακοπή της παραγωγής, προκαλώντας μεγάλες απώλειες εσόδων. Τέλος, οι ESP απαιτούν μεγάλη διάμετρο παραγωγικής σωλήνωσης για να μπορεί να χωρέσει όλος ο εξοπλισμός.

### 3.4 Υποβοήθηση γεώτρησης με εισπίεση αερίου (gas lift)

Το gas lift είναι μία μέθοδος αύξησης της παραγωγής μίας γεώτρησης με εισπίεση αερίου. Η λογική λειτουργίας είναι αρκετά απλή. Το αέριο εισέρχεται στη γεώτρηση, αναμειγνύεται με το παραγόμενο πετρέλαιο και νερό που απομακρύνονται από τον ταμιευτήρα με αποτέλεσμα να βελτιώνεται η ροή των ρευστών για δύο λόγους. Πρώτον, το αέριο αραιώνει τα ρευστά με αποτέλεσμα την μείωση της πυκνότητας τους και τελικά η απαίτηση σε πίεση, για την αντιμετώπιση του υδροστατικού φορτίου, μικραίνει. Δεύτερον, το αέριο διαστέλλεται και η ενέργεια που απελευθερώνεται ωθεί τα ρευστά προς την επιφάνεια. Η διαστολή οφείλεται στο γεγονός ότι το αέριο εισέρχεται στην στήλη με τιμές πίεσης και θερμοκρασίας μεγαλύτερες των επιφανειακών, με αποτέλεσμα η διαφορά αυτή να προκαλεί



μεταβολή στον όγκο του. Ενώ οι δύο προηγούμενες μέθοδοι με χρήση αντλιών, στόχευαν στην αύξηση της πίεσης του ρευστού μέσω προσφοράς είτε μηχανικού έργου είτε κινητικής ενέργειας, το gas lift στοχεύει στη μείωση των απωλειών πίεσης. Στην επιφάνεια βρίσκονται ο σταθμός συμπίεσης του αερίου και ο σωλήνας εισπίεσης του με την στένωση (choke). (Brown, 1977)

### 3.4.1 Διαδικασία εκφόρτωσης

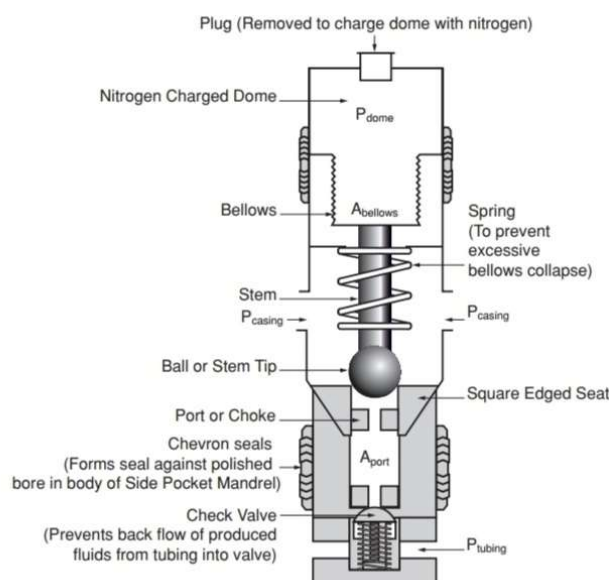
Το διαθέσιμο αέριο στην επιφάνεια συμπιέζεται μέσω κατάλληλων συμπιεστών και εισέρχεται στη γεώτρηση μέσω του δακτυλίου της σωλήνωσης και όχι από την παραγωγική σωλήνωση σε αρκετά μεγάλο βάθος. Ο δακτύλιος ωστόσο είναι πληρωμένος με ρευστό συμπλήρωσης, τη γνωστή «άλμη» (brine). Συνεπώς η πίεση που απαιτείται για να εκτοπιστεί όλη η στήλη της άλμης και ταυτόχρονα να καλυφθεί ο χώρος από την απαιτούμενη ποσότητα αερίου είναι αρκετά μεγάλη (και μεγαλύτερη από την πίεση λειτουργίας) και είναι πολύ πιθανόν η σωλήνωση να διαρρηχθεί (burst). Για αυτό τον λόγο, η διαδικασία εκκένωσης του δακτυλίου από την άλμη, πραγματοποιείται σε μικρότερα βήματα. Κατά τη διαδικασία αυτή, τοποθετούνται βαλβίδες κατά μήκος της παραγωγικής σωλήνωσης σε συγκεκριμένα βάθη όπου ο ρόλος τους είναι να αποδεσμεύσουν την άλμη από τον δακτύλιο σταδιακά και να ελαττώνουν την πίεση που προκαλεί η εισπίεση του αερίου. Η λογική είναι η εξής:

Το αέριο εισπιέζεται στον δακτύλιο και η πρώτη βαλβίδα, δηλαδή εκείνη που έχει εγκατασταθεί στο μικρότερο βάθος, ανοίγει με αποτέλεσμα να απομακρύνεται η υπάρχουσα άλμη μέχρι εκείνο το βάθος, καθώς το εσωτερικό της σωλήνωσης πάνω από το βάθος εισαγωγής πληρώνεται με πετρέλαιο. Αφού απομακρυνθεί η άλμη, μέρος του αερίου εισέρχεται στην παραγωγική σωλήνωση και παράγεται στην επιφάνεια. Η εισπίεση του αερίου συνεχίζεται, αυτή τη φορά με ανοιχτή τη βαλβίδα. Ομοίως με το πρώτο βήμα, η άλμη έως εκείνο το βάθος εισέρχεται στην παραγωγική σωλήνωση μέσω της δεύτερης βαλβίδας. Αφού απομακρυνθεί όλη η άλμη, το αέριο εισέρχεται και εκείνο μέσω της δεύτερης βαλβίδας στην παραγωγική σωλήνωση. Η πίεση στο ύψος της πρώτης βαλβίδας μειώνεται και έχει ως αποτέλεσμα το κλείσιμο της. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι το αέριο να φτάσει στην κατώτερη βαλβίδα. Τότε όλες οι ανώτερες βαλβίδες κλείνουν εκτός από εκείνη. Οι προηγούμενες βαλβίδες ονομάζονται βαλβίδες εκφόρτωσης (unloading valves), ενώ η τελευταία ονομάζεται βαλβίδα λειτουργίας, γιατί είναι εκείνη που παραμένει ανοιχτή

καθ' όλη τη διάρκεια της παραγωγής. Η συγκεκριμένη διαδικασία καλείται και kick-off. (Gilbert, 1954)

### 3.4.2 Βαλβίδες

Οι βαλβίδες που χρησιμοποιούνται για τη διαδικασία εκφόρτωσης είναι κατάλληλα διαμορφωμένες έτσι ώστε να ανοίγουν σε συγκεκριμένη στιγμή. Η στιγμή αυτή συμβαίνει όταν ο όγκος του αερίου που εισπνέζεται προκαλεί στη βαλβίδα, η οποία είναι τοποθετημένη σε συγκεκριμένο βάθος, τη σχεδιασμένη πίεση ανοίγματος. Συνεπώς οι βαλβίδες εκφόρτωσης είναι σχεδιασμένες εκ των προτέρων για να ανοίξουν και να ξανακλείσουν υπό συγκεκριμένες πιέσεις. Η δομή μίας τέτοιας βαλβίδας φαίνεται στην Εικόνα 25.



Εικόνα 25 Βαλβίδα εκφόρτωσης

Τα βασικά μέρη της είναι ο θόλος (dome), η φυσούνα (bellows), το ελατήριο, η μπάλα, η στένωση (choke/port) και η βαλβίδα αντεπιστροφής (check valve). Η λειτουργία της είναι η εξής:

Ο θόλος φορτίζεται με άζωτο, μέσω του βύσματος, στην επιθυμητή πίεση. Η πίεση αυτή δρα πάνω στη φυσούνα ασκώντας δύναμη στη μπάλα ενάντια της στένωσης. Έτσι η βαλβίδα είναι κλειστή αφού δεν μπορεί να περάσει αέριο μέσα από την στένωση. Οι δυνάμεις αντίστοιχα που προσπαθούν να ανοίξουν τη βαλβίδα προκαλούνται από τις πιέσεις που αναπτύσσονται από τα ρευστά του δακτυλίου της σωλήνωσης και της παραγωγικής σωλήνωσης. Το ελατήριο εξυπηρετεί στην αποτροπή τυχόν ζημιάς στη φυσούνα λόγω πολύ μεγάλων φορτίσεων από τα ρευστά

των σωληνώσεων. Η βαλβίδα αντεπιστροφής εμποδίζει τη ροή ρευστών από την παραγωγική σωλήνωση προς τον δακτύλιο. Όταν τελικά οι πιέσεις από τα ρευστά των σωληνώσεων υπερνικούν την πίεση από τον θόλο, η βαλβίδα ανοίγει επιτρέποντας την είσοδο αερίου.

Συνεπώς για τον σχεδιασμό της κάθε βαλβίδας γίνεται η παρακάτω ανάλυση. Η δύναμη που κλείνει τη βαλβίδα προκαλείται από την πίεση στον θόλο, συνεπώς:

$$F_{closing} = P_{dome}A_{bellows}, \quad (2.14)$$

όπου  $A_{bellows}$  η επιφάνεια της φουσούνας. Αντίστοιχα οι δυνάμεις που προσπαθούν να ανοίξουν τη βαλβίδα προκαλούνται από τις πιέσεις των ρευστών των σωληνώσεων, οπότε:

$$F_{opening} = P_{tubing}A_{port} + P_{casing}(A_{bellows} - A_{port}) \quad (2.15)$$

όπου  $A_{port}$  η επιφάνεια της στένωσης. Λίγο πριν ανοίξει η βαλβίδα, οι δυνάμεις ισορροπούν συνεπώς:

$$F_{closing} = F_{opening} \Leftrightarrow P_{casing} = \frac{(P_{dome} - P_{tubing}R)}{1-R}, \quad (2.16)$$

όπου το  $R$  είναι ο λόγος της επιφάνειας της στένωσης ως προς την επιφάνεια της φουσούνας, δηλαδή  $R = \frac{A_{port}}{A_{bellows}}$ . Έτσι ο Μηχανικός μπορεί να θέσει το άνοιγμα της βαλβίδας στην πίεση δακτυλίου που εκείνος επιθυμεί, ελέγχοντας και σχεδιάζοντας την πίεση από την παραγωγική σωλήνωση, την πίεση στο θόλο και τον λόγο των επιφανειών  $R$ .

Το καλιμπράρισμα των βαλβίδων πραγματοποιείται σε εργαστήριο για μηδενική πίεση από την παραγωγική σωλήνωση. Οι δοκιμές γίνονται για θερμοκρασία 60°F. Ωστόσο, κατά την παραγωγή αναπόφευκτα η βαλβίδα θερμαίνεται. Για τη φόρτιση του θόλου χρησιμοποιείται, όπως ήδη αναφέρθηκε, άζωτο διότι ως αέριο είναι συμπίεσιμο και μη διαβρωτικό, οπότε αποφεύγονται διαρρήξεις στη φουσούνα, αλλά και επειδή ταυτόχρονα είναι γνωστή η επίδραση της αλλαγής της θερμοκρασίας στην πίεση του. Συγκεκριμένα:

$$P_2 = P_1 T_c, \quad (2.17)$$

όπου  $P_1, P_2$  οι δύο διαφορετικές πιέσεις με  $P_2 > P_1$  και  $T_c$  ο συντελεστής θερμοκρασίας για τον οποίο ισχύει:

$$T_c = \frac{[1 + 0.00215(T_2 - 60)]}{[1 - 0.00215(T_1 - 60)]} \quad (2.18)$$

όπου  $T_1, T_2$  οι δύο διαφορετικές θερμοκρασίες με  $T_2 > T_1$ . Κατά αυτόν τον τρόπο διορθώνεται το σφάλμα λόγω αύξησης της θερμοκρασίας. (Guo, 2017)

Η απόσταση των βαλβίδων είναι το επόμενο θέμα που απασχολεί τον μηχανικό. Γενικώς χρησιμοποιούνται διάφορες μέθοδοι για την εύρεση των κατάλληλων αποστάσεων ωστόσο οι βασικοί στόχοι είναι κοινοί. Πρέπει πρώτον η απόσταση να είναι κατάλληλη ώστε οι βαλβίδες να μπορούν να ανοίξουν κατά το kick-off, δεύτερον να εξασφαλίζεται η εισπίεση αερίου εντός της παραγωγικής γεώτρησης σε μόνο ένα σημείο κατά την διαδικασία της εκφόρτωσης και κατά τη λειτουργία και τρίτον να μπορεί να εισπιάζεται το αέριο στο μεγαλύτερο δυνατό βάθος. Εδώ θα παρουσιαστεί η παγκόσμια μέθοδος (universal method), η οποία έχει λεπτομερώς αναλυθεί από τον Brown (1980). Αρχικά πρέπει να προσδιοριστεί το ανώτατο βάθος της στατικής στήλης ρευστού. Εφόσον η γεώτρηση είναι νεκρή, το ρευστό δεν έχει αρκετή ενέργεια για να ανυψωθεί μέχρι την κεφαλή, οπότε έχει σταματήσει σε κάποιο σημείο. Αφού προσδιοριστεί αυτό το σημείο, υπολογίζεται το βάθος της πρώτης βαλβίδας. Χρησιμοποιείται ο εξής τύπος:

$$D_1 = \frac{(p_{k,s} - \Delta p_{km} - p_{hf})}{[G_s - (p_{k,s} - \Delta p_{km}) \frac{1}{40,000}]} \quad (2.19)$$

όπου το  $p_{k,s}$  αναφέρεται στη διαθέσιμη πίεση εκκίνησης (kick-off) στην επιφάνεια, το  $\Delta p_{km}$  είναι το περιθώριο της πίεσης εκκίνησης το οποίο συνήθως λαμβάνεται ως 50 psi, το  $p_{hf}$  είναι η πίεση κεφαλής της γεώτρησης και τέλος το  $G_s$  είναι η στατική βαθμίδα του νεκρού ρευστού. Στο σημείο αυτό ελέγχεται αν το βάθος που βρέθηκε είναι μεγαλύτερο από το ανώτατο σημείο της στατικής στήλης του ρευστού. Προφανώς όλες οι βαλβίδες πρέπει να βρίσκονται κάτω από αυτό το σημείο. Στην συνέχεια υπολογίζεται το βάθος της δεύτερης βαλβίδας από την εξής σχέση:

$$D_2 = \frac{[p_{c,s} - \Delta p_{cm} - p_{hf,a} + (G_s - G_{fa})D_1]}{[G_s - \frac{(p_{c,m} - \Delta p_{cm})}{40,000}]}, \quad (2.20)$$

όπου το  $P_{c,s}$  αναφέρεται στη σταθερή πίεση εισπίεσης του αερίου κατά τη λειτουργία του συστήματος gas lift, δηλαδή μετά το πέρας της εκφόρτωσης, το  $\Delta p_{cm}$  είναι το περιθώριο της πίεσης στο δακτύλιο το οποίο λαμβάνεται και αυτό συνήθως ως 50 psi,

το  $p_{hf,d}$  είναι η σχεδιαστική πίεση κεφαλής της γεώτρησης, η οποία υπολογίζεται από τη σχέση:

$$p_{hf,d} = p_{hf} + 0,25p_{c,s} \quad (2.21)$$

και τέλος το  $G_{fd}$  είναι βαθμίδα εκφόρτωσης σχεδιασμού η οποία υπολογίζεται βάσει των συσχετίσεων των Hagedorn-Brown, που δίνουν την πίεση της παραγωγικής σωλήνωσης σε συγκεκριμένο βάθος για νεκρή γεώτρηση, και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$G_{fd} = \frac{[p_{t,v} - (p_{hf} + 0,25p_{c,s})]}{d_{v,h}}, \quad (2.22)$$

όπου το  $p_{t,h}$  αναφέρεται στην πίεση που δίνουν οι συσχετίσεις για το θεωρητικό βάθος της λειτουργικής βαλβίδας  $d_{v,h}$ . Το βάθος των επόμενων βαλβίδων μπορεί να υπολογιστεί από την εξίσωση 2.20 χρησιμοποιώντας το βάθος της προηγούμενης, δηλαδή από τη σχέση:

$$D_i = \frac{[p_{c,s} - \Delta p_{cm} - p_{hf,d} + (G_s - G_{fd})D]}{[G_s - \frac{(p_{c,s} - \Delta p_{cm})}{40,000}]} \quad (2.23)$$

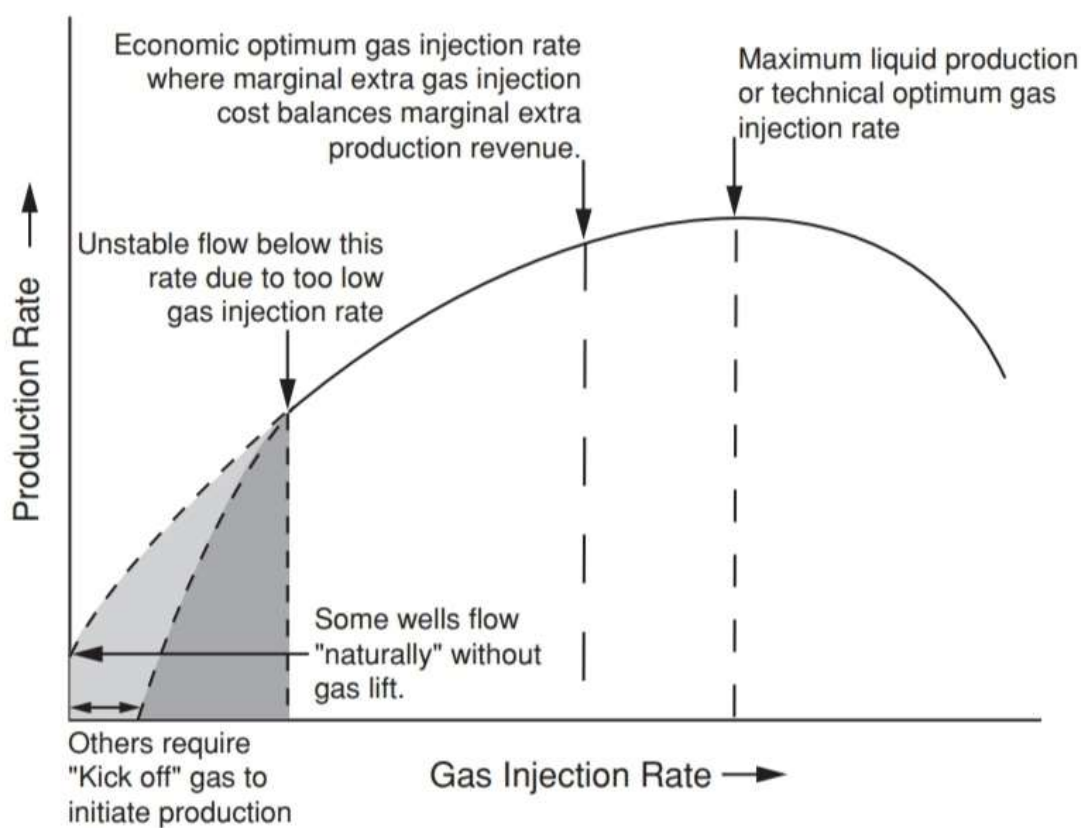
(Brown, 1980)

### 3.4.3 Βέλτιστος ρυθμός εισπίεσης αερίου

Ο ρυθμός εισπίεσης του αερίου στη γεώτρηση επηρεάζεται αναπόφευκτα από τη διαθεσιμότητα του αερίου στην επιφάνεια. Δεδομένου ότι υπάρχει άφθονο αέριο στη διάθεση του Μηχανικού, μπορεί να προσδιοριστεί ο τεχνικός βέλτιστος ρυθμός εισπίεσης του αερίου, που επηρεάζεται μόνο από το τεχνικό κομμάτι του συστήματος και καθόλου από το οικονομικό (τιμές αερίου/προϊόντων παραγωγής).

Η ανάμειξη του αερίου με τα ρευστά του ταμειυτήρα έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της πυκνότητας του ρευστού στη γεώτρηση και, τελικά, των απωλειών πίεσης λόγω βαρύτητας. Ωστόσο, επειδή πλέον η μάζα που ρέει στη γεώτρηση είναι περισσότερη από πριν, η απώλεια πίεσης λόγω τριβών αυξάνεται. Η διαρκής αύξηση του ρυθμού εισπίεσης θα προκαλεί αύξηση της παραγωγής του πετρελαίου όσο η μείωση της απώλειας πίεσης λόγω βαρύτητας είναι μεγαλύτερη από την αύξηση της απώλειας πίεσης λόγω τριβών. Το σημείο κατά το οποίο μία απειροελάχιστη αύξηση του ρυθμού εισπίεσης μειώσει τον όρο της απώλειας πίεσης λόγω βάρους κατά την ίδια τιμή που θα αυξηθεί ο όρο της απώλειας πίεσης λόγω τριβών, ονομάζεται μέγιστος ρυθμός εισπίεσης ή τεχνικός βέλτιστος ρυθμός εισπίεσης. Ο προσδιορισμός αυτού

του σημείου γίνεται με τη χρήση μίας καμπύλης (Εικόνα 26) που στον άξονα των x έχει τον ρυθμό εισπίεσης του αερίου και στον άξονα των y την παραγωγή. Με χρήση της ανάλυσης κόμβου, για συγκεκριμένους ρυθμούς εισπίεσης, μπορούν να προσδιοριστούν τα διάφορα σημεία της καμπύλης και να βρεθεί ο βέλτιστος ρυθμός εισπίεσης. Από την καμπύλη, μπορεί επιπλέον να βρεθεί ο ελάχιστος ρυθμός εισπίεσης, κάτω του οποίου δεν υπάρχει σταθερή ροή στη γεώτρηση άρα και παραγωγή, και ο οικονομικός βέλτιστος ρυθμός εισπίεσης του αερίου που εξαρτάται και από τις τιμές του αερίου και των προϊόντων.



Εικόνα 26 Καμπύλη εύρεσης βέλτιστου ρυθμού εισπίεσης

#### 3.4.4 Συμπεράσματα-Εφαρμογές

Το μεγαλύτερο προτέρημα του συστήματος gas lift είναι το κόστος. Το κόστος λειτουργίας της εγκατάστασης είναι αρκετά πιο χαμηλό από τις υπόλοιπες μεθόδους καθώς για τη λειτουργία των συμπιεστών χρησιμοποιείται αέριο ως καύσιμο. Δεν απαιτείται επιπλέον εμβλατισμένος εξοπλισμός για τη συντήρηση του συστήματος και οι επιδιορθώσεις μπορούν να γίνονται αρκετά εύκολα και χωρίς τη διακοπή της παραγωγής. Είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική μέθοδος για αμμώδη και ελαφριά πετρέλαια και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για οποιαδήποτε κλίση και βάθος. Τέλος

## ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΥΠΟΒΟΗΘΗΣΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΑΝΤΛΙΩΝ ΚΑΙ ΕΙΣΠΙΕΣΗΣ ΑΕΡΙΟΥ

μπορεί να αξιοποιηθεί με άνεση σε υπεράκτια πετρελαϊκά πεδία και σε πολλές κοντινές γεωτρήσεις με μόλις έναν σταθμό συμπίεσης και είναι ιδιαίτερα αποδοτική μέθοδος για γεωτρήσεις με υψηλή πίεση πυθμένα, δηλαδή ταμιευτήρες με υψηλή παραγωγικότητα.

Υπάρχουν δύο τύποι gas lift, ο συνεχόμενος και ο διακοπτόμενος. Ο συνεχόμενος τύπος (continuous gas lift) είναι προσαρμόσιμος για μεγάλο εύρος γεωτρήσεων αλλά μη αποδοτικός για βαριά πετρέλαια ενώ ο διακοπτόμενος τύπος (intermittent gas lift) είναι κατάλληλος για ταμιευτήρες με χαμηλή πίεση και παραγωγικό συντελεστή. Στον συνεχόμενο τύπο, η εισπίεση είναι διαρκής και δεν σταματάει για όσο αντλείται ρευστό. Αντίθετα, στον διακοπτόμενο τύπο, όπως υποδηλώνει το όνομα, το ρευστό του ταμιευτήρα παράγεται κατά διαστήματα, αφού η εισπίεση πραγματοποιείται κατά διαστήματα. Ένας ηλεκτρονικός ελεγκτής χρονικού κύκλου στη επιφάνεια, είτε με ρολόι, είτε με μία ρυθμιζόμενη ή σταθερή βαλβίδα στένωσης (choke), ελέγχει τη ροή της εισπίεσης του αερίου.

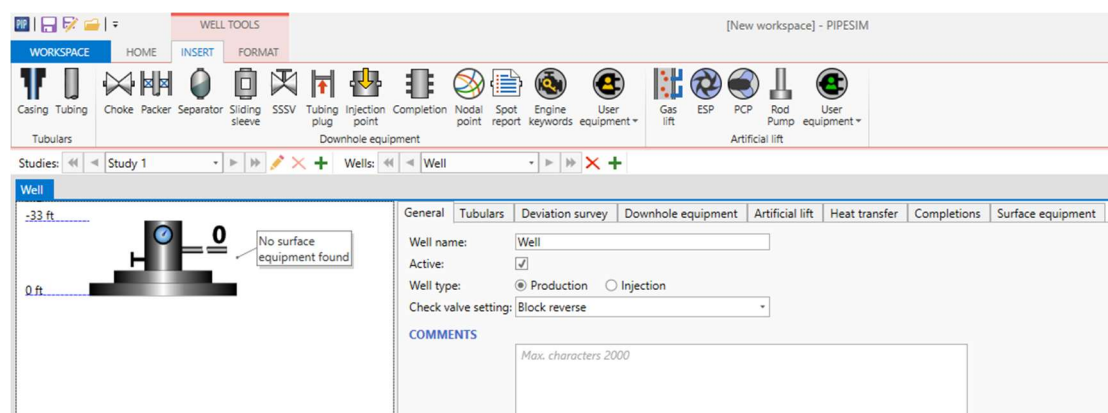
## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ PIPESIM ΤΗΣ SCHLUMBERGER

### 4.1 Εισαγωγή

Στη βιομηχανία έχουν αναπτυχθεί και διατίθενται πολυάριθμα λογισμικά που προσομοιώνουν ένα σύστημα ταμειυτήρα-γεώτρησης παραγωγής, όπως το PROSPER της IPM και το WellFlo της Petromehras. Στην παρούσα εργασία θα γίνει αναφορά στο λογισμικό Pipesim της Schlumberger, το οποίο είναι σχετικά απλό, εύχρηστο και κατάλληλο για τη μελέτη περίπτωσης που θα παρουσιαστεί αναλυτικά στο Κεφάλαιο 5. Χρησιμοποιείται αυστηρά για τη μελέτη ροής σταθερής κατάστασης στον ταμειυτήρα και προσφέρει την επιλογή ανάλυσης ροής είτε σε επίπεδο γεώτρησης παραγωγής είτε σε επίπεδο δικτύου μεταφοράς των ρευστών στην επιφάνεια, κάτι το οποίο είναι εκτός του πεδίου έρευνας και εφαρμογής στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Το συγκεκριμένο λογισμικό προσφέρει τη δυνατότητα στο Μηχανικό να προβλέψει τη συμπεριφορά των ρευστών πριν και κατά την παραγωγή, τις ενεργειακές απαιτήσεις του συστήματος ταμειυτήρα-γεώτρησης και να εκτιμήσει την αναμενόμενη ογκομετρική παροχή που θα καταλήγει στην επιφάνεια.

### 4.2 Αναπαράσταση/Προσομοίωση συστήματος ταμειυτήρα-γεώτρησης

Αφού επιλεγθεί η σχεδίαση γεώτρησης παραγωγής, και όχι δικτύου γεωτρήσεων/αγωγών, ο χρήστης οδηγείται στο περιβάλλον εργασίας του λογισμικού, όπως φαίνεται στην Εικόνα 27.



Εικόνα 27 Περιβάλλον εργασίας λογισμικού Pipesim



## ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΥΠΟΒΟΗΘΗΣΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΑΝΤΛΙΩΝ ΚΑΙ ΕΙΣΠΙΕΣΗΣ ΑΕΡΙΟΥ

Στη συνέχεια εισάγονται τα στοιχεία του συστήματος, είτε μέσω της γραμμής εργαλείων, στο επάνω μέρος το παραθύρου, είτε μέσω των καρτελών(tabs). Στην πρώτη καρτέλα με τα γενικά στοιχεία της γεώτρησης (general), επιλέγεται ο τύπος της γεώτρησης, αν πρόκειται δηλαδή για γεώτρηση εισπίεσης ή για γεώτρηση παραγωγής και προσδιορίζεται η βαλβίδα ασφαλείας ορίζοντας τη λειτουργία της ως ανεπίστροφη, έτσι ώστε να εξασφαλιστεί η σχεδιασμένη κατεύθυνση της ροής στην γεώτρηση, δηλαδή προς τα πάνω αν πρόκειται για γεώτρηση παραγωγής και προς τα κάτω αν πρόκειται για γεώτρηση εισπίεσης.

Στη δεύτερη καρτέλα (tubulars), εισάγονται τα στοιχεία των σωληνώσεων της γεώτρησης. Εδώ μπορεί να επιλεγθεί είτε η απλή λειτουργία είτε η λεπτομερή. Στην απλή λειτουργία, εισάγεται μόνο η εξωτερική σωλήνωση και η παραγωγική σωλήνωση. Τα χαρακτηριστικά που ζητάει το λογισμικό είναι το μετρούμενο βάθος εδραίωσης των σωληνώσεων, την εσωτερική διάμετρο μαζί με είτε την εξωτερική διάμετρο είτε το πάχος της κάθε σωλήνωσης και τέλος την τραχύτητα της κάθε σωλήνωσης. Στη λεπτομερή λειτουργία, μπορούν να εισαχθούν οι υπόλοιπες σωληνώσεις (για παράδειγμα διπλή ή τριπλή σωλήνωση παραγωγής), εφόσον υπάρχουν, και επιπλέον απαιτείται ο προσδιορισμός της πυκνότητας των σωληνώσεων και του ρευστού που πληρώνει τον δακτύλιο. Σε κάθε περίπτωση, ο χρήστης μπορεί εναλλακτικά να επιλέξει από ένα προεγκατεστημένο κατάλογο τον τύπο και όλα τα χαρακτηριστικά της σωλήνωσης που θα χρησιμοποιηθεί στη γεώτρηση, όπως φαίνεται στην Εικόνα 28.

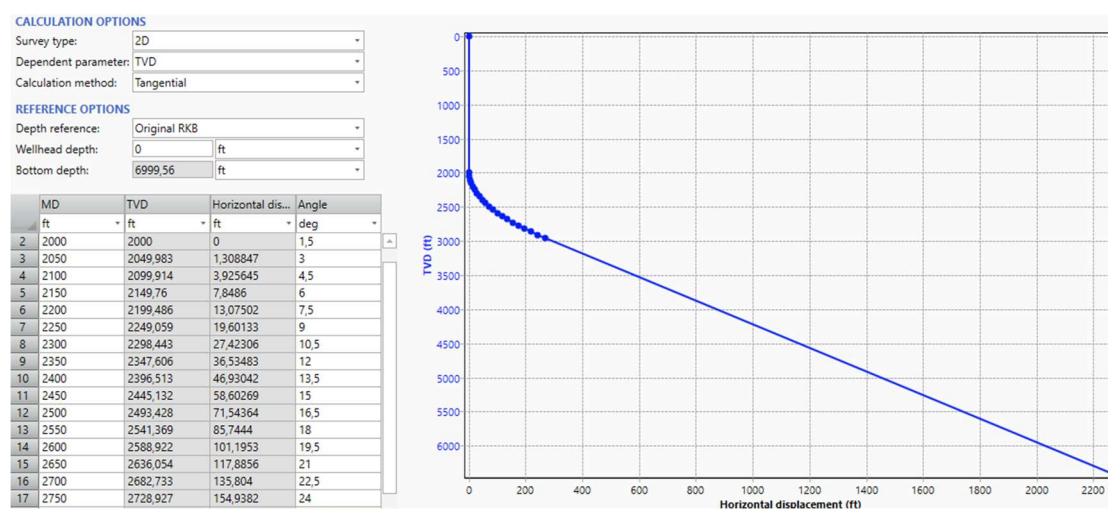
	Catalog	OD in	ID in	Thickness in	Weight lbm/ft	Roughness in	Grade
1	API	4,5	3,826	0,337	15,1	0,001	P110
2	API	4,5	3,826	0,337	15,1	0,001	Q125
3	API	4,5	3,92	0,29	13,5	0,001	C75
4	API	4,5	3,92	0,29	13,5	0,001	C90
5	API	4,5	3,92	0,29	13,5	0,001	C95
6	API	4,5	3,92	0,29	13,5	0,001	L80
7	API	4,5	3,92	0,29	13,5	0,001	M65
8	API	4,5	3,92	0,29	13,5	0,001	N80
9	API	4,5	3,92	0,29	13,5	0,001	P110
10	API	4,5	3,92	0,29	13,5	0,001	T95

Εικόνα 28 Κατάλογος σωληνώσεων

Η επόμενη καρτέλα (deviation survey) αφορά τη γεωμετρία της γεώτρησης, αν πρόκειται δηλαδή για κατακόρυφη γεώτρηση, για γεώτρηση σε δύο διαστάσεις (2D) ή για γεώτρηση σε τρεις διαστάσεις (3D). Στην πρώτη περίπτωση, που είναι και η πιο

## ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΥΠΟΒΟΗΘΗΣΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΑΝΤΛΙΩΝ ΚΑΙ ΕΙΣΠΙΕΣΗΣ ΑΕΡΙΟΥ

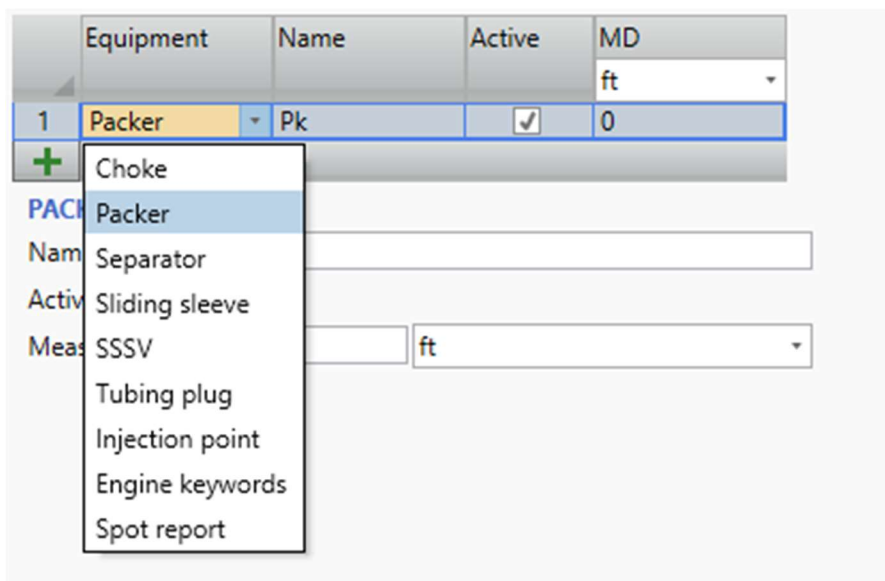
απλή, ζητούνται μόνο τα βάθη της κεφαλής και του πυθμένα. Στη δεύτερη περίπτωση, η απεικόνιση της απόκλισης από την κατακόρυφο πραγματοποιείται εισάγοντας γεωμετρικά στοιχεία για διάφορα επιμέρους σημεία κατά μήκος της γεώτρησης. Για να εισαχθούν τα σημεία αυτά, χρειάζεται να προσδιοριστούν δύο από τα τρία εξής στοιχεία για το κάθε σημείο: το μετρούμενο βάθος (measured depth-MD), το πραγματικό κατακόρυφο βάθος (true vertical depth-TVD) και τη γωνία με την κατακόρυφο (angle). Το λογισμικό υπολογίζει στη συνέχεια την οριζόντια μετατόπιση και απεικονίζει τη γεωμετρία της γεώτρησης όπως φαίνεται στην Εικόνα 29.



Εικόνα 29 Εισαγωγή σημείων σε γεώτρηση δύο διαστάσεων

Στην περίπτωση της γεώτρησης σε τρεις διαστάσεις, απαιτείται επιπλέον για το κάθε σημείο, ο προσδιορισμός της μεταβολής του αζιμούθιου.

Από την επόμενη καρτέλα, ο χρήστης μπορεί να εισάγει τον εξοπλισμό που βρίσκεται εντός της γεώτρησης (downhole equipment), όπως τα «packers» και οι υπεδαφικές βαλβίδες ασφαλείας (SubSurface Safety Valves, SSSV). Στην Εικόνα 30 δίνεται η λίστα με τον διαθέσιμο εξοπλισμό. Για κάθε είδος εξοπλισμού ζητείται το βάθος τοποθέτησής του και σε ορισμένους ζητείται περαιτέρω και το μέγεθος τους (ή κάποιο αντίστοιχο χαρακτηριστικό). Επίσης υπάρχει και η δυνατότητα ενεργοποίησης και απενεργοποίησης τους, έτσι ώστε να μπορεί να εκτελεστεί από το χρήστη οποιαδήποτε ενέργεια, όπως η ανάλυση κόμβου, με ή χωρίς αυτούς.



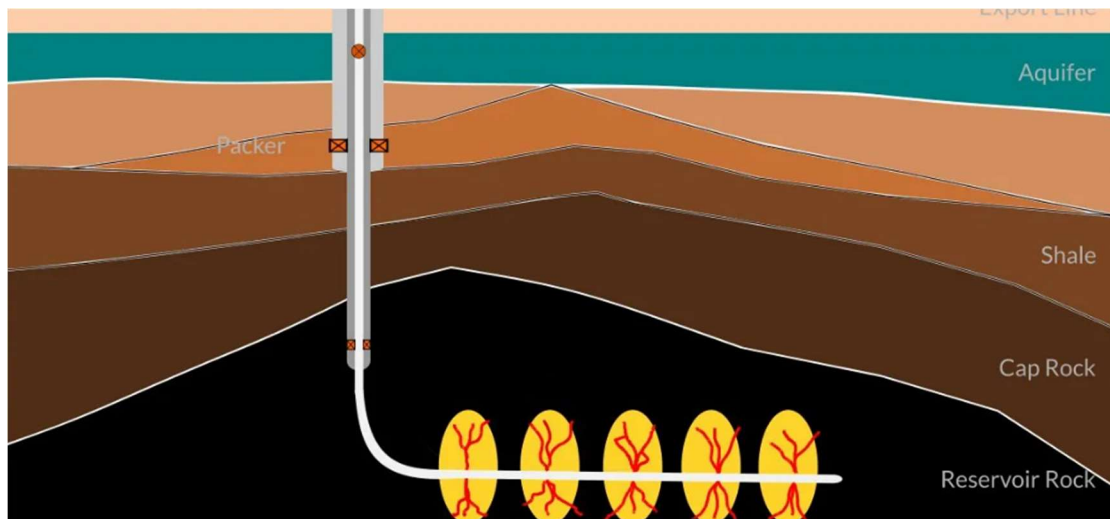
Εικόνα 30 Εξοπλισμός εντός της γεώτρησης

Η επόμενη καρτέλα, που αφορά την τεχνητή ανύψωση, θα αγνοηθεί προς το παρόν. Η μεθεπόμενη καρτέλα, αναφέρεται στον προσδιορισμό των θερμικών απωλειών κατά μήκος της γεώτρησης (heat transfer). Εδώ το λογισμικό ζητάει τη θερμοκρασία των περιβαλλόντων σχηματισμών και τον ολικό συντελεστή μεταφοράς θερμότητας. Ανάλογα με τα διαθέσιμα δεδομένα, εισάγονται από τον χρήστη ο συντελεστής και η θερμοκρασία για διάφορα βάθη κατά μήκος της γεώτρησης. Διαφορετικά, μπορεί να επιλεγθεί η απλή λειτουργία, εισάγοντας μία θερμοκρασία των γειτονικών σχηματισμών στην κεφαλή καθ' όλο το μήκος της γεώτρησης μαζί με ένα μέσο ολικό συντελεστή μεταφοράς θερμότητας για όλη τη γεώτρηση.

Όλα τα δεδομένα που έχουν συζητηθεί μέχρι στιγμής χρησιμοποιούνται από το λογισμικό για τον σχεδιασμό της καμπύλης VLP, δεδομένου ότι αυτά αφορούν τη γεώτρηση, δηλαδή την περιοχή του συστήματος πάνω από τον κόμβο και μέχρι το απέναντι άκρο (διαχωριστή). Η καμπύλη IPR κατασκευάζεται χρησιμοποιώντας την επόμενη καρτέλα που αφορά την ολοκλήρωση της γεώτρησης (completion). Εδώ εισάγονται οι ολοκληρώσεις, κατακόρυφες ή οριζόντιες, στα αντίστοιχα βάθη. Πολλές φορές ο ταμιευτήρας αποτελείται από ζώνες που περιέχουν πετρελαϊκό ρευστό σε διαφορετικά βάθη και για την εκμετάλλευσή τους πραγματοποιούνται περισσότερες από μία ολοκληρώσεις στα αντίστοιχα βάθη. Επιπλέον, ορισμένες γεωτρήσεις παραγωγής για να εκμεταλλευτούν κάποιες επιμήκεις ζώνες στον ταμιευτήρα και να αποφύγουν την διάτρηση τυχόν προβληματικών υπερκείμενων τους πετρωμάτων, αναπτύσσουν γωνία 90° με την κατακόρυφο και τελικά είναι

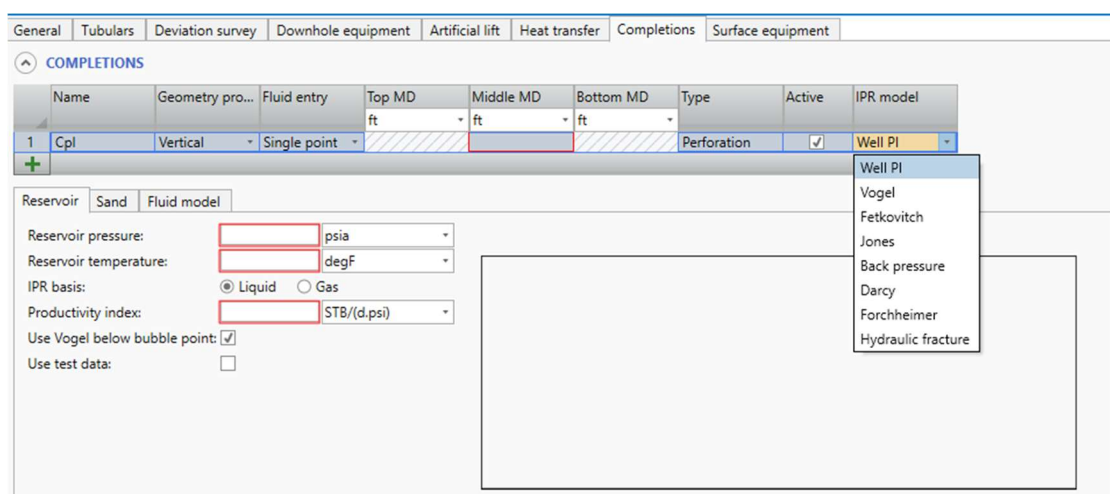
## ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΥΠΟΒΟΗΘΗΣΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΑΝΤΛΙΩΝ ΚΑΙ ΕΙΣΠΙΕΣΗΣ ΑΕΡΙΟΥ

οριζόντιες, όπως φαίνεται στην Εικόνα 31. Συνεπώς οι ολοκληρώσεις που πραγματοποιούνται για την παραγωγή του ρευστού θα είναι οριζόντιες και για αυτό το λόγο, παρέχεται από το λογισμικό, η συγκεκριμένη επιλογή.



Εικόνα 31 Οριζόντιες ολοκληρώσεις

Στη συνέχεια πρέπει να οριστεί το μοντέλο σύμφωνα με το οποίο θα κατασκευαστεί η IPR και οι επιλογές που παρέχονται από το λογισμικό δίνονται στην Εικόνα 32.



Εικόνα 32 Επιλογές μοντέλων καμπύλης IPR

Στο Κεφάλαιο 2 έγινε αναλυτική παρουσίαση της μεθόδου του παραγωγικού συντελεστή (Well PI), του Back pressure και του Vogel. Αν η τιμή του παραγωγικού συντελεστή δεν είναι γνωστή, μπορεί να προσδιοριστεί μέσω του μοντέλου του Darcy, όπως έχει ήδη εξηγηθεί στο ίδιο Κεφάλαιο. Όλες οι μέθοδοι σχεδίασης της IPR απαιτούν τη γνώση της πίεσης ταμειυτήρα, η οποία αναφέρεται στη μέση πίεση, καθώς και της θερμοκρασίας του. Στη συνέχεια πρέπει να εισαχθεί από τον χρήστη το

θερμοδυναμικό μοντέλο του ρευστού. Μπορεί να επιλεγθεί κάποιο από τα πρότυπα που υπάρχουν στο λογισμικό και έπειτα να προστεθούν ορισμένα απαραίτητα δεδομένα όπως ο λόγος αερίου-πετρελαίου, η πυκνότητα των επιφανειακών προϊόντων (API και σχετική πυκνότητα αερίου) και ο κορεσμός σε νερό. Τελικά, το λογισμικό χρησιμοποιώντας τα δεδομένα που εισήχθησαν στην τελευταία καρτέλα, σχεδιάζει την καμπύλη IPR.

### 4.3 Ανάλυση κόμβου

Αξιοποιώντας τις καμπύλες IPR και VLP, το λογισμικό μπορεί πλέον να εκτελέσει την ανάλυση κόμβου, αφού πρώτα καθοριστεί ο κόμβος και προσδιοριστεί η πίεση στην κεφαλή της γεώτρησης (ή τον γειτονικό διαχωριστή). Στην Εικόνα 33 δίνεται το γράφημα από μία ανάλυση κόμβου, όπου ως κόμβος επιλέχθηκε ο πυθμένας της γεώτρησης. Το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό του Pipesim είναι ότι μπορεί να δώσει πληροφορίες για σχεδόν όλα τα μεγέθη που ενδιαφέρουν τον χρήστη καθ' όλο το μήκος του παραγωγικού συστήματος, τόσο εντός της γεώτρησης όσο και εντός του ταμιευτήρα. Κατά την ανάλυση κόμβου, ο χρήστης μπορεί μέσω της επιλογής «select columns», να δει πολυάριθμους υπολογισμούς που εκτέλεσε το λογισμικό, όπως τις αριθμητικές απώλειες σε πίεση λόγω τριβής ή βαρύτητας, τη θερμοκρασία και την πυκνότητα των κινούμενων ρευστών κ.α.



Εικόνα 33 Ανάλυση κόμβου του λογισμικού Pipesim

#### 4.4 Τεχνητή ανύψωση

Επιστρέφοντας στην καρτέλα της «Τεχνητής ανύψωσης», ο χρήστης μπορεί να εισάγει τις μεθόδους υποβοήθησης που αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 3. Σημειώνεται ότι το Pipesim δίνει την επιλογή της προσθήκης της «Κοχλιωτής αντλίας-PCP», για την οποία δεν θα γίνει αναφορά στην παρούσα εργασία καθώς αποτελεί εξοπλισμό που χρησιμοποιείται σε ειδικές μόνο περιπτώσεις ρευστών με πολύ υψηλό ιξώδες και παρουσία άμμου. Αφού επιλεγθεί η μέθοδος που ενδιαφέρει τον χρήστη, πρέπει στη συνέχεια να εισαχθούν τα απαραίτητα χαρακτηριστικά της μεθόδου. Για την αντλία βάρου απαιτείται το βάθος εδραίωσης της, ο ονομαστικός ρυθμός άντλησης και η διάμετρος της ράβδου μεταφοράς κίνησης (drive rod). Εναλλακτικά του ονομαστικού ρυθμού άντλησης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί το μήκος της διαδρομής, ο αριθμός των παλίνδρομων κινήσεων ανά λεπτό και η διάμετρος του εμβόλου. Επιπλέον, μπορεί να επιλεγθεί αν θα υπάρχει διαχωριστής φάσεων εντός της αντλίας. Σημειώνεται ότι το λογισμικό δεν ζητάει δεδομένα για τον εξοπλισμό στην επιφάνεια και το παράθυρο εισαγωγής των στοιχείων της δίνεται στην Εικόνα 34.

ROD PUMP	
Name:	Rrmp
Active:	<input checked="" type="checkbox"/>
Measured depth:	0 ft
Performance data	
Calculation options	
Basis:	<input checked="" type="radio"/> Nominal rate <input type="radio"/> Stroke length/frequency
Nominal rate:	[ ] bbl/d
Slip coefficient:	0,0002 STB/(d.psi)
Maximum DP:	[ ] psi
Maximum power:	[ ] hp
Pump efficiency:	80 %
Drive rod diameter:	[ ] in

Εικόνα 34 Παράθυρο εισαγωγής στοιχείων αντλίας βάρου

Για την αντλία ESP, πέραν του βάθους τοποθέτησης, ζητούνται τα στοιχεία του μοντέλου, του κατασκευαστή, του κινητήρα κλπ. Το λογισμικό ωστόσο δίνει τη δυνατότητα στον χρήστη να επιλέξει από έναν κατάλογο την κατάλληλη αντλία με βάση τα σχεδιαστικά χαρακτηριστικά της γεώτρησης και την επιθυμητή αύξηση της παραγωγής, όπως φαίνεται στην Εικόνα 35. Το λογισμικό χρησιμοποιεί αυτά τα δεδομένα, τόσο για να ελέγξει, από σχεδιαστικής άποψης, αν υπάρχει ο διαθέσιμος

## ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΥΠΟΒΟΗΘΗΣΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΑΝΤΛΙΩΝ ΚΑΙ ΕΙΣΠΙΕΣΗΣ ΑΕΡΙΟΥ

χώρος για την εισαγωγή της αντλίας αλλά και για να υπολογίσει τον νέο ρυθμό παραγωγής και γενικότερα την επίδραση της αντλίας στα διάφορα μεγέθη που ενδιαφέρουν τον Μηχανικό.

	Manufacturer	Model	Series	Min. flowrate	Max. flowrate	Efficiency at d...
				bbl/d	bbl/d	%
1	ALNAS	ANA5125	92	778	1253	
2	ALNAS	ANA518	92	91	227	
3	ALNAS	ANA5200	92	1133	2000	
4	ALNAS	ANA530	92	151	302	
5	ALNAS	ANA545	92	151	529	
6	ALNAS	ANA560	92	264	604	
7	ALNAS	ANA580	92	453	868	
8	ALNAS	ANA580ES	92	453	868	
9	ALNAS	ANACONDA	92	151	529	
10	ALNAS	ANM510	92	91	227	

Εικόνα 35 Κατάλογος αντλιών ESP

Όσον αφορά τη μέθοδο υποβοήθησης με εισπίεση αερίου (Gas lift), το λογισμικό ζητά τον ρυθμό εισπίεσης του αερίου, την πίεση εισπίεσης και τη θερμοκρασία στην επιφάνεια, το βάθος εισαγωγής του αερίου στην παραγωγική γεώτρηση και τη σχετική του πυκνότητα, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των βαλβίδων και τις πιέσεις ανοίγματος και κλεισίματος των βαλβίδων εκφόρτωσης (unloading valves), όπως φαίνεται στην Εικόνα 36.

⊕ GAS LIFT

Injection option:  Fixed injection ports  Injection valve system

Gas lift	Active	MD	Manufacturer	Series	Valve type	Port size	Ptro	St	Discharge coe...	DP to fully open
1	GLI	<input checked="" type="checkbox"/>	ft	0		in	psia	psia		psia

Εικόνα 36 Παράθυρο εισαγωγής συστήματος gas lift

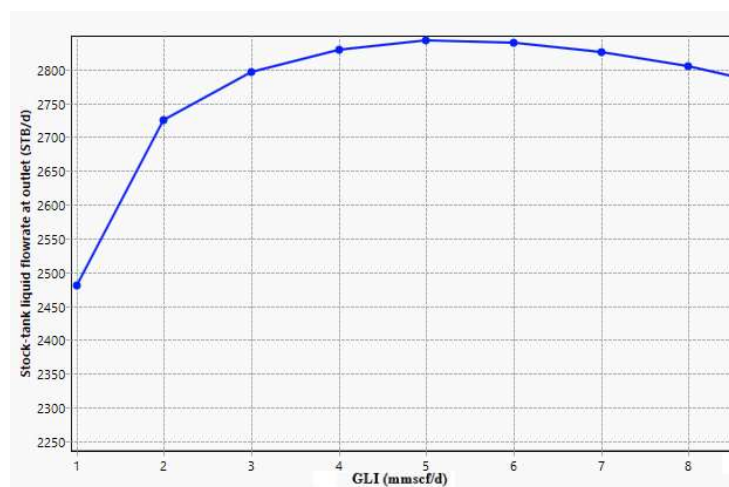
Υπάρχει ένας προεγκατεστημένος κατάλογος με τις διαθέσιμες βαλβίδες από τις οποίες μπορεί να γίνει επιλογή, ο οποίος δίνεται στην Εικόνα 37.

## ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΥΠΟΒΟΗΘΗΣΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΑΝΤΛΙΩΝ ΚΑΙ ΕΙΣΠΙΕΣΗΣ ΑΕΡΙΟΥ

	Manufacturer	Series	Valve type	Valve size	Port size	Port area	Bellow area	Discharge coe...	DP to fully open
				in	in	in2	in2		psia
1	Bompert	ERO4-JR	IPO	1	0,125	0,0118	0,3100006	0,65	1687,6
2	Bompert	ERO4-JR	IPO	1	0,1875	0,02980005	0,3100006	0,65	1243,8
3	Bompert	ERO4-JR	IPO	1	0,25	0,04839993	0,3100006	0,65	995
4	Bompert	ERO4-JR	IPO	1	0,28125	0,06110004	0,3100006	0,65	900
5	Bompert	ERO4-JR	IPO	1	0,3125	0,075	0,3100006	0,65	833,6
6	Bompert	ERO4-SR	IPO	1,5	0,125	0,0123	0,7699997	0,76	800
7	Bompert	ERO4-SR	IPO	1,5	0,1875	0,03	0,7699997	0,76	661,3
8	Bompert	ERO4-SR	IPO	1,5	0,25	0,04930002	0,7699997	0,76	529
9	Bompert	ERO4-SR	IPO	1,5	0,3125	0,07699997	0,7699997	0,76	443,2
10	Bompert	ERO4-SR	IPO	1,5	0,375	0,1108999	0,7699997	0,76	382,6
11	Bompert	ERO4-SR	IPO	1,5	0,4375	0,1508999	0,7699997	0,76	337,2
12	Bompert	ERO5-JR	IPO	1	0,125	0,0118	0,3100006	0,65	1687,6
13	Bompert	ERO5-JR	IPO	1	0,1875	0,02980005	0,3100006	0,65	1243,8
14	Bompert	ERO5-JR	IPO	1	0,25	0,04839993	0,3100006	0,65	995
15	Bompert	ERO5-JR	IPO	1	0,28125	0,06110004	0,3100006	0,65	900
16	Bompert	ERO5-JR	IPO	1	0,3125	0,07699997	0,3100006	0,65	833,6
17	Bompert	ERO5-JR	IPO	1	0,375	0,1108999	0,3100006	0,65	719,5
18	Bompert	EROBPF-SR	PPO-N	1,5	0,375	0,1108999	0,7699997	0,65	65
19	Bompert	EROBPF-SR	PPO-N	1,5	0,4375	0,1462	0,7699997	0,65	80
20	Bompert	EROCF-JR	IPO	1	0,25	0,04839993	0,3100006	0,65	995
21	Bompert	EROCF-SR	IPO	1,5	0,375	0,1108999	0,7699997	0,76	382,6
22	Daniel	RF-1	PPO-N	1	0,125	0,012	0,3100006	0,65	184,7
23	Daniel	RF-1	PPO-N	1	0,15625	0,01899994	0,3100006	0,65	245
24	Daniel	RF-1	PPO-N	1	0,1875	0,02800003	0,3100006	0,65	315,3
25	Daniel	RF-1	PPO-N	1	0,25	0,04899994	0,3100006	0,65	480,1
26	Daniel	RF-1	PPO-N	1	0,3125	0,07699997	0,3100006	0,65	600

Εικόνα 37 Κατάλογος βαλβίδων

Για τον προσδιορισμό του βέλτιστου ρυθμού εισπίεσης αερίου, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η μεθοδολογία που παρουσιάστηκε στην υποενότητα 3.4.3. Μέσω του «system analysis» ή του «gas lift response», παρέχεται η δυνατότητα κατασκευής της καμπύλης ρυθμού εισπίεσης-παραγωγής και να προσδιοριστεί ο τεχνικός βέλτιστος ρυθμός εισπίεσης αερίου. Ο χρήστης θα πρέπει να ορίσει τους δύο άξονες και να εκτελέσει δοκιμή ευαισθησίας για διάφορες τιμές του ρυθμού εισπίεσης. Τελικά θα κατασκευαστεί η καμπύλη όπως φαίνεται στην Εικόνα 38 από την οποία μπορεί να προσδιοριστεί το ανώτερο της σημείο που είναι και ο τεχνικός βέλτιστος ρυθμός εισπίεσης αερίου.

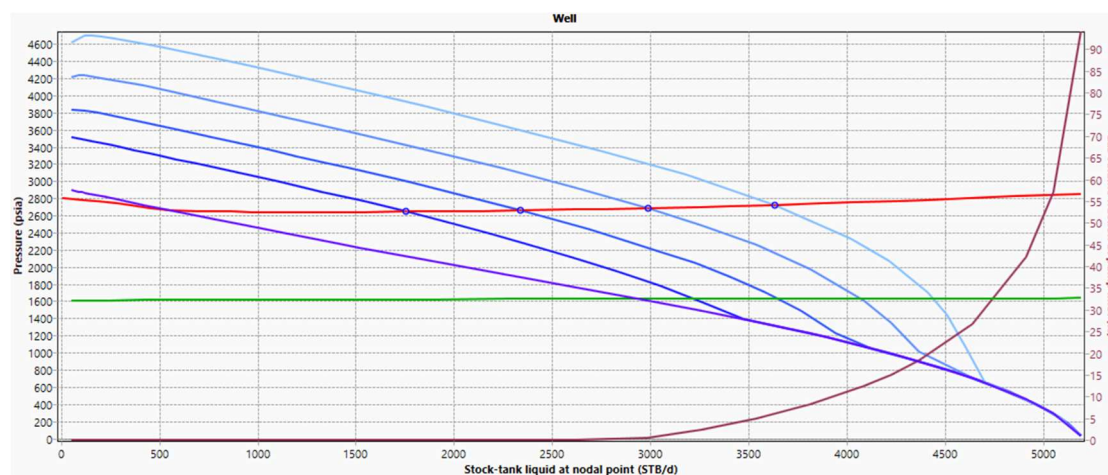


Εικόνα 38 Σχεδιασμός καμπύλης ρυθμού εισπίεσης αερίου-παραγωγής



Μέσω των καρτελών, ο χρήστης απλώς εισάγει τα χαρακτηριστικά της αντλίας ESP και του συστήματος «Gas lift». Επομένως, οι παραπάνω μέθοδοι εισαγωγής στοιχείων δεν προβαίνουν σε υπολογισμούς καθώς θεωρείται ότι ο Μηχανικός έχει ήδη εκτιμήσει τα χαρακτηριστικά του κατάλληλου εξοπλισμού τεχνητής ανύψωσης των ρευστών.

Το Pipesim ωστόσο παρέχει επιπρόσθετα τη επιλογή του αναλυτικού σχεδιασμού της αντλίας ESP και του συστήματος «Gas lift» ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή παραγωγή και να προσδιοριστούν όλα τα γεωμετρικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά. Συνεπώς για τις αντλίες ESP, το λογισμικό προσδιορίζει την απαιτούμενη πίεση που πρέπει να προσφέρει η αντλία και στη συνέχεια προτείνει εκείνες που είναι κατάλληλες για το συγκεκριμένο σύστημα ταμιευτήρα-γεώτρησης, ενώ για το σύστημα «Gas lift», ανάλογα με την πίεση εισπίεσης του αερίου και τη θερμοκρασία του στην επιφάνεια, τον ρυθμό εισπίεσής του και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά των βαλβίδων, προσδιορίζονται τα διάφορα σχεδιαστικά χαρακτηριστικά του συστήματος, όπως το πλήθος και το βάθος των βαλβίδων, οι πιέσεις ανοίγματος και κλεισίματος των βαλβίδων εκφόρτωσης, και εν τέλει ελέγχεται η απόδοση του συστήματος. Στην Εικόνα 39 δίνεται το γράφημα σχεδιασμού μίας αντλίας ESP. Το λογισμικό χρησιμοποιώντας όλα τα δεδομένα που έχουν εισαχθεί και για δοσμένη παραγωγή, προσδιορίζει τα λειτουργικά σημεία της επιλεγμένης αντλίας.



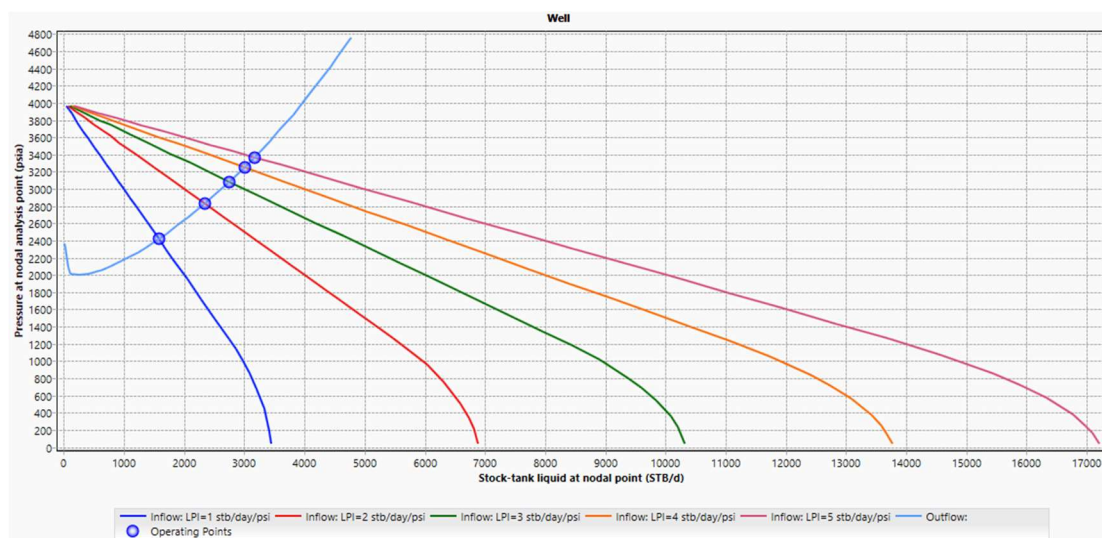
Εικόνα 39 Σχεδιασμός αντλίας ESP μέσω Pipesim

#### 4.5 Λοιπές λειτουργίες

Το λογισμικό προσφέρει κι άλλες ποικίλες λειτουργίες στον χρήστη πέραν των προαναφερθέντων. Μία αξιοσημείωτη δυνατότητα είναι οι δοκιμές ευαισθησίας. Πριν

## ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΥΠΟΒΟΗΘΗΣΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΑΝΤΛΙΩΝ ΚΑΙ ΕΙΣΠΙΕΣΗΣ ΑΕΡΙΟΥ

εκτελεστεί η ανάλυση κόμβου, ο χρήστης μπορεί να επιλέξει μία παράμετρο είτε σχετική με την IPR είτε με τη VLP και να εκτελέσει την ανάλυση κόμβου για διάφορες τιμές της. Για παράδειγμα μπορεί να δει πως εξελίσσονται οι IPR και VLP καθώς αυξάνεται το ποσοστό νερού ή καθώς μεταβάλλεται η διάμετρος της παραγωγικής σωλήνωσης. Εναλλακτικά, μπορεί μέσω της επιλογής «system analysis», να κατασκευάσει το διάγραμμα δύο οποιωνδήποτε μεγεθών που εμπεριέχονται στο σύστημα και ταυτόχρονα να εκτελέσει δοκιμή ευαισθησίας για έως τέσσερις παραμέτρους. Τελικά θα έχει μία αρκετά αναλυτική εικόνα για τον βαθμό ευαισθησίας των μεγεθών που τον ενδιαφέρουν και την επίδρασή τους στις καμπύλες. Στην Εικόνα 40 δίνεται το γράφημα μίας ανάλυσης κόμβου με πέντε διαφορετικές τιμές του παραγωγικού συντελεστή. Εύκολα διακρίνεται ότι η αύξησή του προκαλεί μεταβολή μόνο στην IPR και τελικά αυξάνεται η παραγωγή.



Εικόνα 40 Δοκιμή ευαισθησίας για διαφορετικές τιμές PI

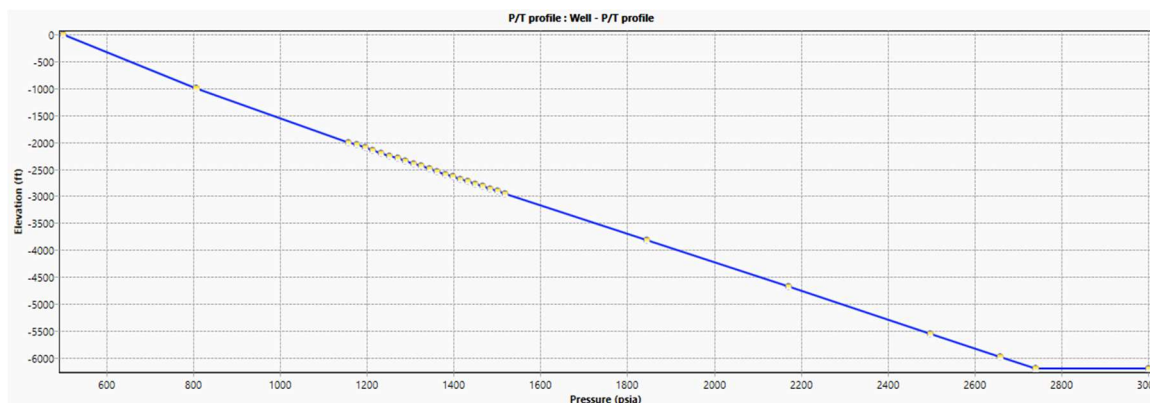
Μέσω της επιλογής «model calibration», ο Μηχανικός μπορεί να επιλέξει εναλλακτικές συσχετίσεις με βάση των οποίων το λογισμικό εκτιμά τη μεταβολή της πίεσης και της θερμοκρασίας κατά μήκος της γεώτρησης ώστε να προσεγγίσει και να προσομοιώσει με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια τα φυσικά φαινόμενα που συμβαίνουν στη γεώτρηση και τελικά οι τιμές των μεγεθών που υπολογίζονται να είναι πιο κοντά στις πραγματικές.

Χρησιμοποιώντας την επιλογή του «perforation design», ο Μηχανικός μπορεί να μοντελοποιήσει τη διαδικασία των διατρήσεων και με βάση τα χαρακτηριστικά των σωληνώσεων, των τσιμεντώσεων και των γειτονικών πετρωμάτων να προσδιορίσει

## ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΥΠΟΒΟΗΘΗΣΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΑΝΤΛΙΩΝ ΚΑΙ ΕΙΣΠΙΕΣΗΣ ΑΕΡΙΟΥ

τον επιδερμικό συντελεστή. Τελικά μπορεί να επιλέξει τη μέθοδο διάτρησης των πετρωμάτων έχοντας μία πιο λεπτομερή εικόνα για την επίδραση της διάτρησης στην απόδοση του συστήματος ταμειυτήρα-γεώτρησης και συνεπώς στην παραγωγή.

Η συνήθης ανάλυση κόμβου χρησιμοποιείται προκειμένου να εκτιμηθεί η παραγωγή όταν είναι γνωστή η πίεση στα άκρα του συστήματος (μέση πίεση ταμειυτήρα και πίεση στην κεφαλή της γεώτρησης). Μια εναλλακτική λειτουργία είναι η εκτίμηση της πίεσης και της θερμοκρασίας κατά μήκος της γεώτρησης όταν είναι γνωστή η πίεση και η θερμοκρασία σε ένα άκρο καθώς και η παροχή. Αυτή η λειτουργία επιτυγχάνεται μέσω της επιλογής «P-T profile» του λογισμικού. Το Pipesim μπορεί να απεικονίσει γραφικά πολλές ιδιότητες που ενδιαφέρουν τον Μηχανικό όπως η πίεση, θερμοκρασία, ποσοστό αερίου και υγρού, ταχύτητα κάθε φάσης, ογκομετρικοί συντελεστές και άλλα, κατά μήκος της γεώτρησης.



Εικόνα 41 Χρήση "P-T profile" για γραφική απεικόνιση μεγεθών κατά μήκος της γεώτρησης

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ

### 5.1 Εισαγωγή

Στο παρόν Κεφάλαιο θα αξιοποιηθούν τόσο οι θεωρητικές αναλύσεις και μεθοδολογίες που παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα Κεφάλαια όσο και οι δυνατότητες του λογισμικού Pipesim με σκοπό την μελέτη περίπτωσης ενός πετρελαϊκού συστήματος. Θα παρουσιαστεί ο τρόπος εισαγωγής των δεδομένων στο λογισμικό, θα αξιολογηθεί η αποδοτικότητα του συστήματος και θα εξεταστεί η εφαρμογή των μεθόδων τεχνητής ανύψωσης που περιεγράφηκαν στο Κεφάλαιο 3 για την ενίσχυση της παραγωγής.

### 5.2 Περιγραφή συστήματος ταμιευτήρα-γεώτρησης παραγωγής

Για τη μελέτη περίπτωσης, ήταν διαθέσιμη η περιγραφή του εξής πετρελαϊκού συστήματος. Ο ταμιευτήρα θεωρείται ομοιογενής, δηλαδή διατηρεί περίπου σταθερή τη διαπερατότητα, το πορώδες και το πάχος του σε όλη την έκτασή του, είναι κυλινδρικός, έχει ακτίνα απομάστευσης 2,000', πάχος 200' και διαπερατότητα 20 mD. Η θερμοκρασία που επικρατεί σε όλη την έκταση του έχει την τιμή των 200° F και η μέση πίεσή του φτάνει τα 3,000 psi.

**Πίνακας 1 Δεδομένα ταμιευτήρα**

$\bar{p}$ (psi)	T (°F)	k (mD)	h (ft)	$r_e$ (ft)
3000	200	20	200	2000

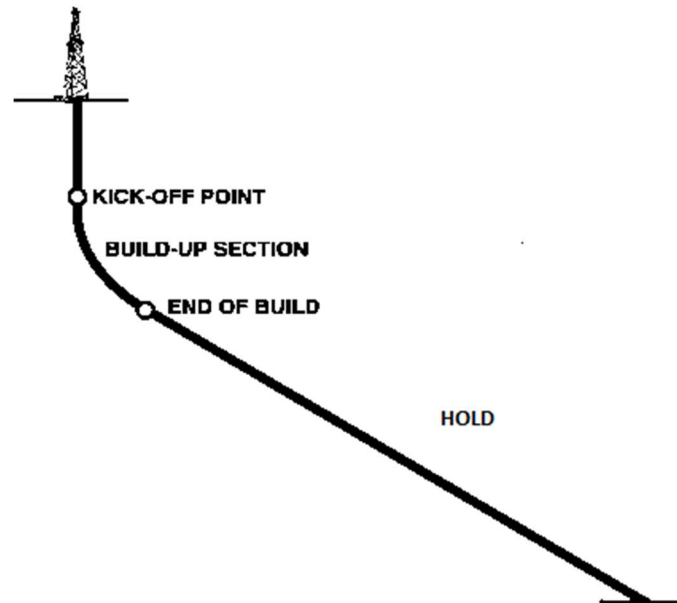
Είναι πληρωμένος με πετρέλαιο τύπου «black oil» και τα αποτελέσματα της εργαστηριακής ανάλυσής του φαίνονται στον Πίνακα 2 (μαζί με τις ιδιότητες του νερού που περιέχεται στον ταμιευτήρα).

**Πίνακας 2 Αποτελέσματα εργαστηριακής ανάλυσης προϊόντων επιφάνειας**

GOR (SCF/STB)	$\gamma_g$	API	$\gamma_w$
250	0.64	30	1.02

όπου GOR είναι ο λόγος παραγόμενου αερίου-πετρελαίου,  $\gamma_g$  η σχετική πυκνότητα του αερίου στην επιφάνεια και  $\gamma_w$  η σχετική πυκνότητα του νερού στην επιφάνεια. Ο σχεδιασμός της γεώτρησης παραγωγής είναι ο παρακάτω:

Θα πραγματοποιηθεί με τη μέθοδο build-and-hold και θα αναπτυχθεί μόνο σε δύο διαστάσεις, οπότε και δεν θα υπάρχει μεταβολή του αζιμούθιου κατά το μήκος της. Στην Εικόνα 42 δίνεται η περιγραφή της μεθόδου.



Εικόνα 42 Μέθοδος Build and Hold

Για τη διευκόλυνση της περιγραφής της, η γεώτρηση μπορεί να χωριστεί σε τρία τμήματα. Το πρώτο τμήμα ( $L_1$ ), που θα ξεκινάει από την επιφάνεια, είναι κατακόρυφο και θα έχει μήκος 2,000'. Από το τέλος του τμήματος αυτού, θα ξεκινήσει η ανάπτυξη κλίσης της γεώτρησης με ρυθμό  $3^\circ/100'$  (kick-off point). Αφού επιτευχθεί γωνία  $30^\circ$ , θα σταματήσει να αναπτύσσεται η κλίση, οπότε θα έχει ολοκληρωθεί το δεύτερο τμήμα ( $L_2$ ), το οποίο θα είναι καμπυλωτό (build-up section). Στη συνέχεια, διατηρώντας σταθερή τη γωνία των  $30^\circ$  (hold), η γεώτρηση θα συνεχίσει για άλλα 4,000', το οποίο θα αποτελεί το τρίτο τμήμα της ( $L_3$ ). Για το καμπυλωτό τμήμα και για τον συγκεκριμένο ρυθμό ανάπτυξης γωνίας, η ακτίνα καμπυλότητας προκύπτει ίση με 1,910' και συνεπώς το μήκος του τόξου που θα δημιουργηθεί, για γωνία  $30^\circ$ , υπολογίζεται από την εξής σχέση:

$$L_2 = R\varphi \frac{2\pi}{360} = 999.56 \text{ ft}, \quad (3.1)$$

όπου  $R$  είναι η ακτίνα καμπυλότητας και  $\varphi$  η τελική γωνία. Η διάμετρος της γεώτρησης παραγωγής (borehole diameter) θα είναι 9.75'', ενώ η σωλήνωση που θα τοποθετηθεί είναι τύπου L80, με εξωτερική διάμετρο 8.625'' (8 5/8'') και βάρος 49 lbm/ft. Η παραγωγική σωλήνωση (tubing), η οποία θα σταματάει 500' πριν τον πυθμένα, είναι και αυτή τύπου L80, με εξωτερική διάμετρο 3.5'' και βάρος 12.8 lbm/ft. Και οι δύο σωληνώσεις έχουν τραχύτητα 0.001''. Για την εμπόδιση της ροής του ρευστού θα τοποθετηθεί packer στη σωλήνωση, 700' πριν τον πυθμένα, το οποίο θα αγκαλιάζει τη σωλήνωση παραγωγής και θα αποτρέπει την κίνηση ρευστών στο

δακτύλιο. Επιπλέον, θα τοποθετηθεί μία βαλβίδα ασφαλείας σε βάθος 1,000' και δύο «sliding sleeves» στα 3,000' και στα 5000' αντίστοιχα, που επιτρέπουν την κατ' επιλογή επικοινωνία του δακτυλίου με το εσωτερικό της σωλήνωσης παραγωγής. Η ολοκλήρωση (διατρήσεις) θα γίνει 250' μετά το τέλος της παραγωγικής σωλήνωσης. Σημειώνεται ότι όλα τα βάθη αναφέρονται στο μετρούμενο βάθος (Measured Depth, MD) και όχι στο πραγματικό κατακόρυφο βάθος (True Vertical Depth, TVD). Εκτιμάται ότι η βλάβη που θα προκληθεί στον σχηματισμό, κατά τη διάτρηση και την ολοκλήρωση, θα επιφέρει επιδερμικό συντελεστή ίσο με 2. Τέλος, η θερμοκρασία των γειτονικών σχηματισμών στην επιφάνεια λαμβάνεται κατά τα συνήθη ίση με 60°F και ο ολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητα κατά μήκος της γεώτρησης εκτιμάται ότι θα είναι 5 btu/(h.deg.ft<sup>2</sup>). Η πίεση στον διαχωριστή θα τεθεί στα 500 psi.

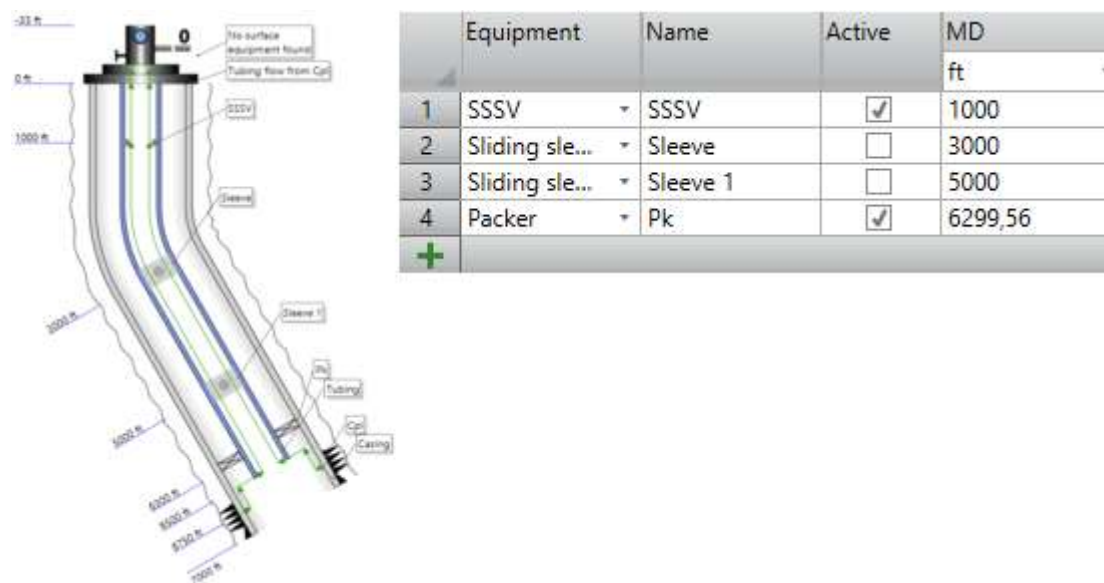
### 5.3 Εισαγωγή δεδομένων στο λογισμικό

Για την προσομοίωση της ροής στη γεώτρηση χρησιμοποιείται το λογισμικό Pipesim. Η εισαγωγή των δεδομένων στο λογισμικό έγινε με τη μέθοδο που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 4, δηλαδή μέσω των καρτελών (tabs).

Για τις δύο σωληνώσεις που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν, επιλέχθηκαν μέσω του προεγκατεστημένου καταλόγου εκείνες με τα προαναφερθέντα στοιχεία και τοποθετήθηκαν στα αντίστοιχα βάθη. Η εξωτερική σωλήνωση έχει μήκος (MD) το άθροισμα των τριών προσδιορισμένων τμημάτων, το οποίο ισούται με 7,000', ενώ η παραγωγική σωλήνωση που σταματάει 500' πριν τον πυθμένα, έχει μήκος ίσο με 6,500'.

Για τον εξοπλισμό που θα τοποθετηθεί εντός της γεώτρησης, έγινε ξεχωριστά η εισαγωγή του κάθε στοιχείου. Συγκεκριμένα, για τα packer και τα sliding sleeves χρειάστηκε μόνο το βάθος εδραίωσής τους (τα sliding sleeves είναι ανενεργά), ενώ για την υπεδαφική βαλβίδα ασφαλείας (SSSV) προσδιορίστηκε και η διατομή από την οποία επιτρέπεται να περάσει το ρευστό (bean size) που είναι 2.5". Τα packers τοποθετούνται 700 ft πριν τον πυθμένα δηλαδή στα 6,300' (MD). Στην Εικόνα 43, φαίνεται η λίστα των διαφόρων εξοπλισμών που τοποθετούνται στην προσομοίωση.

## ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΥΠΟΒΟΗΘΗΣΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΑΝΤΛΙΩΝ ΚΑΙ ΕΙΣΠΙΕΣΗΣ ΑΕΡΙΟΥ



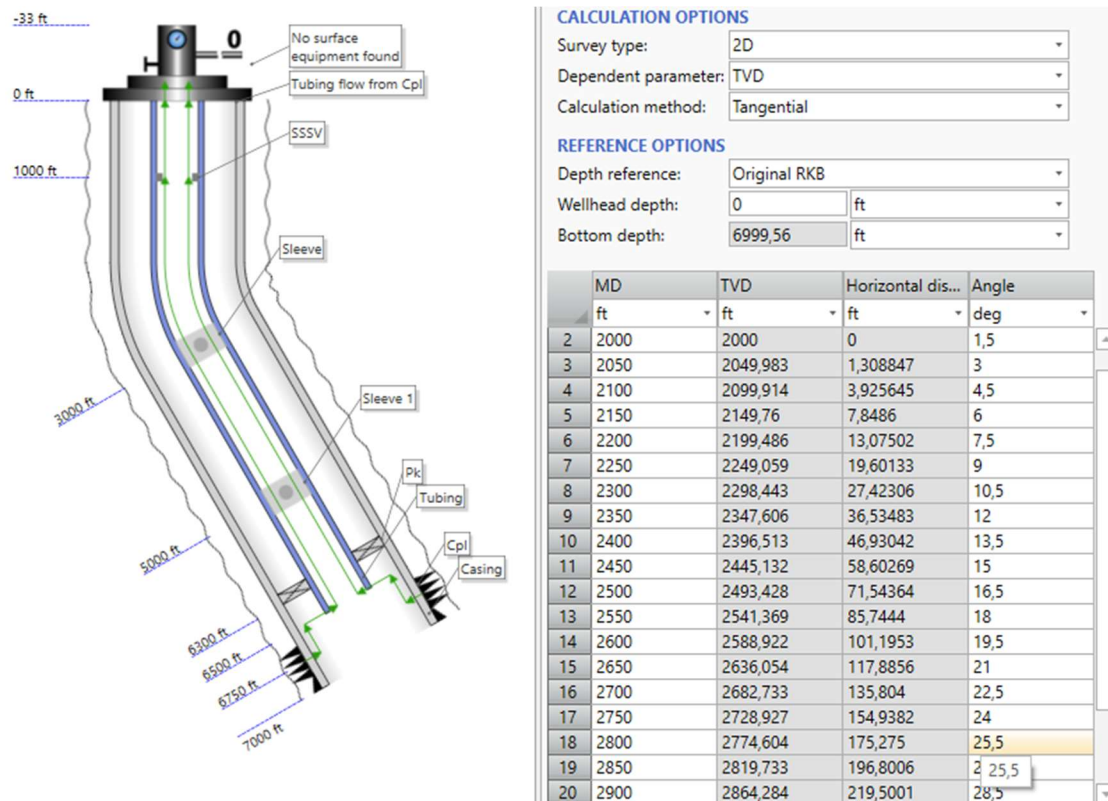
Εικόνα 43 Εισαγωγή εξοπλισμού μελέτης περίπτωσης στο λογισμικό Pipesim

Όσον αφορά την εισαγωγή στο της γεωμετρίας της σχεδιασμένης γεώτρησης στο λογισμικό, επειδή δεν υπάρχει διαθέσιμη η επιλογή της μεθόδου της ακτίνας καμπυλότητας, χρησιμοποιείται η εξής τεχνική:

Επιλέγοντας ως άγνωστη μεταβλητή το πραγματικό κατακόρυφο βάθος (TVD), εισάγεται αρχικά το κατώτερο σημείο του  $L_1$ , δηλαδή το σημείο με μετρούμενο βάθος (MD) 2000'. Εφόσον δεν έχει εισαχθεί κάποιο προηγούμενο σημείο υπό κλίση, το λογισμικό θεωρεί ότι από την κεφαλή στην επιφάνεια μέχρι τα 2000', η γεώτρηση είναι κατακόρυφη και τη σχεδιάζει με αυτόν τον τρόπο. Στη συνέχεια, για να εισαχθεί η ανάπτυξη της κλίσης ( $3^\circ/100'$ ) θα πρέπει να προσδιοριστούν τα ενδιάμεσα σημεία κατά μήκος της γεώτρησης μέχρις ότου επιτευχθεί η γωνία των  $30^\circ$ , με μικρή μεταξύ τους απόσταση δεδομένου ότι το λογισμικό θεωρεί το τμήμα μεταξύ οποιωνδήποτε διαδοχικών σημείων ως ευθύγραμμο. Αναπόφευκτα, η μέθοδος αυτή παρουσιάζει μια μικρή απόκλιση στα βάθη από τις πραγματικές τιμές λόγω της διαφοροποίησης των ευθύγραμμων τμημάτων από τα πραγματικά καμπύλα. Για τον περιορισμό της απόκλισης, προσδιορίστηκαν τα σημεία σε μικρή μεταξύ τους απόσταση, ανά  $50'$ , οπότε και η μεταξύ τους γωνία ορίστηκε ως  $1,5^\circ$ . Συνεπώς από τα 2,000 μέχρι τα 3,000', τα ενδιάμεσα σημεία προσδιορίστηκαν ανά  $50'$ , με διαφορά κλίσης του επόμενου από το προηγούμενο ίση με  $1,5^\circ$ . Ταυτόχρονα, το λογισμικό υπολόγισε το TVD και την οριζόντια μετατόπιση του κάθε σημείου. Πλέον, το τελευταίο σημείο που έχει προσδιοριστεί βρίσκεται υπό γωνία  $30^\circ$  με την κατακόρυφο, στο τέλος της περιοχής build. Για τον σχεδιασμό του  $L_3$  (περιοχή hold) αρκεί μόνο να

## ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΥΠΟΒΟΗΘΗΣΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΑΝΤΛΙΩΝ ΚΑΙ ΕΙΣΠΙΕΣΗΣ ΑΕΡΙΟΥ

προσδιοριστεί το κατώτερο σημείο της γεώτρησης, που βρίσκεται στα 7,000' (MD). Με την παραπάνω διαδικασία, το λογισμικό μπορεί να σχεδιάσει ολόκληρη τη γεώτρηση παραγωγής. Στην Εικόνα 44 δίνονται τα σημεία που εισήχθησαν στο λογισμικό και η γραφική παράσταση του TVD σε σχέση με την οριζόντια μετατόπιση.



Εικόνα 44 Απεικόνιση γεωμετρίας γεώτρησης στο λογισμικό Pipesim

Για τον προσδιορισμό των θερμικών απωλειών κατά μήκος της γεώτρησης, υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα μόνο για τη θερμοκρασία των σχηματισμών στην επιφάνεια και του ταμιευτήρα (βάθος πυθμένα γεώτρησης) και έχει εκτιμηθεί ένας μέσος συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας για όλη τη γεώτρηση. Επομένως χρησιμοποιείται η απλή μέθοδος εκτίμησης των θερμικών μεταβολών εισάγοντας τον ένα συντελεστή μεταφοράς θερμότητας για όλη τη γεώτρηση, που στην προκειμένη περίπτωση είναι 5 Btu/(h.degF.ft<sup>2</sup>), και τη θερμοκρασία των σχηματισμών στην επιφάνεια, που είναι 60° F. Η θερμοκρασία του ταμιευτήρα έχει προσδιοριστεί στην τιμή των 200°F.

Η ολοκλήρωση της γεώτρησης πραγματοποιείται 250' πριν τον πυθμένα, δηλαδή στα 6,750'. Καθώς δεν διατίθεται ο παραγωγικός συντελεστής (PI), χρησιμοποιείται εναλλακτικά το μοντέλο του Darcy για τον σχεδιασμό της IPR, για το οποίο είναι διαθέσιμα όλα τα απαιτούμενα στοιχεία. Εισάγεται η πίεση και η θερμοκρασία που



επικρατούν σε όλη την έκταση του ομοιογενή ταμιευτήρα, το πάχος και η διαπερατότητά του ταμιευτήρα, η ακτίνα απομάστευσης της γεώτρησης, η διάμετρος της και ο επιδερμικός συντελεστής.

Στη συνέχεια προσδιορίζεται το μοντέλο του ρευστού του ταμιευτήρα, τύπου black oil. Δεδομένα υπάρχουν για τον λόγο αερίου-πετρελαίου, την πυκνότητα των επιφανειακών προϊόντων και τη σχετική πυκνότητα του νερού. Για τη θερμοχωρητικότητα και άλλες ιδιότητες που αφορούν το ρευστό του ταμιευτήρα, επιλέγονται από το λογισμικό οι ενδεικτικές συνήθεις τιμές. Το ιξώδες προσδιορίζεται με χρήση συσχετίσεων black oil. Τέλος το ποσοστό του παραγόμενου νερού από τη γεώτρηση τίθεται αρχικά 0% (ο ταμιευτήρας παράγει dry oil).

#### 5.4 Αξιολόγηση συστήματος ταμιευτήρα-γεώτρησης

Εκ πρώτης όψεως, προτού γίνει προσομοίωση από το λογισμικό, το παραγωγικό σύστημα δεν μπορεί να χαρακτηριστεί ως ιδιαίτερα αποδοτικό. Η διαπερατότητα του ταμιευτήρα είναι σχετικά μικρή και το παραγόμενο πετρέλαιο σχετικά βαρύ. Η πίεση που επικρατεί στον ταμιευτήρα είναι και αυτή σχετικά χαμηλή, οπότε αντίστοιχα και η διαφορά πίεσης μεταξύ ταμιευτήρα και πυθμένα γεώτρησης, δηλαδή η κινητήριος δύναμη που ωθεί το πετρέλαιο προς παραγωγή, θα είναι χαμηλή. Οι υπόλοιπες ιδιότητες του συστήματος μπορούν να χαρακτηριστούν ως μέτριες, συνεπώς η παραγωγή αναμένεται να είναι μέτρια.

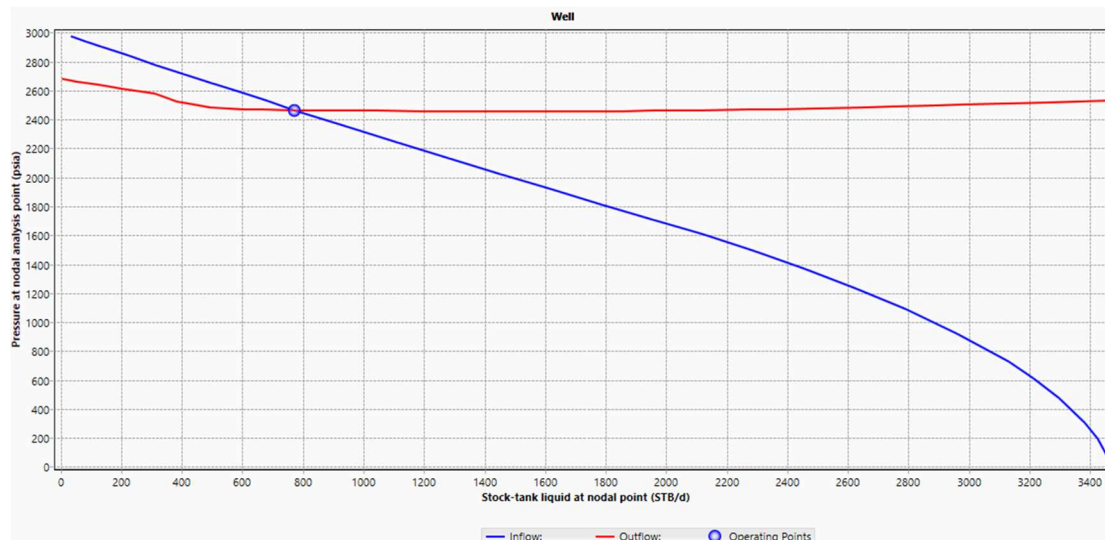
Στο λογισμικό Pipesim έχουν εισαχθεί όλα τα απαραίτητα δεδομένα για να κατασκευαστούν οι καμπύλες IPR και VLP, οπότε μπορεί να πραγματοποιηθεί και η ανάλυση κόμβου έτσι ώστε να εκτιμηθεί η παραγωγή. Επιλέγοντας ως κόμβο τον πυθμένα της γεώτρησης και θέτοντας την πίεση της κεφαλής στα 500 psi, εκτελέστηκε η ανάλυση κόμβου και τα αποτελέσματα της παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.

Πίνακας 3 Αποτελέσματα ανάλυσης κόμβου

$P_{\text{nodal}}$ (psi)	$P_{\text{wf}}$ (psi)	$q_{\text{oil}}$ (STB/d)	$q_{\text{gas}}$ (mscf/d)	$q_{\text{w}}$ (STB/d)
2,465.81	2,465.81	771.94	192.98	0

όπου  $P_{\text{nodal}}$  η πίεση στον κόμβο,  $P_{\text{wf}}$  η πίεση στον πυθμένα,  $q_{\text{oil}}, q_{\text{gas}}, q_{\text{w}}$  η παραγωγή πετρελαίου, αερίου και νερού στην επιφάνεια αντίστοιχα. Στην Εικόνα 45 παρουσιάζεται η ανάλυση κόμβου που πραγματοποιήθηκε με το λογισμικό Pipesim. Στον οριζόντιο άξονα εμφανίζεται η παραγωγή υγρού (στην προκειμένη περίπτωση

μόνο πετρελαίου) σε συνθήκες επιφάνειας και στον κατακόρυφο άξονα η πίεση που επικρατεί στον κόμβο, δηλαδή στον πυθμένα της γεώτρησης.



Εικόνα 45 Ανάλυση κόμβου με χρήση του λογισμικού Pipesim

Συνεπώς η αρχική αναμενόμενη παραγωγή πετρελαίου είναι περίπου τα 772 βαρέλια την ημέρα. Το σημείο φυσαλίδας (bubble point) προσδιορίστηκε από το λογισμικό στα 1,617.081 psi. Η παραγωγή μπορεί να αξιολογηθεί ως ιδιαίτερα μέτρια, από τη στιγμή που άλλες γεωτρήσεις μπορούν και παράγουν 5,000 βαρέλια την ημέρα, ωστόσο θεωρείται από τον διαχειριστή του πεδίου ως οικονομική (κερδοφόρα).

Το σύστημα ταμιευτήρα-γεώτρησης, όπως έχει είδη αναφερθεί στο Κεφάλαιο 2, είναι ένα δυναμικό σύστημα που μεταβάλλεται με τον χρόνο. Καθώς απομαστεύεται το ρευστό από τον ταμιευτήρα, η πίεση που επικρατεί στον ταμιευτήρα πρόκειται να μειωθεί. Για την αντιμετώπιση αυτού του φαινομένου, θα εγκατασταθούν γεωτρήσεις εισπίεσης νερού στα άκρα του ταμιευτήρα με σκοπό τη διατήρηση της πίεσης του ταμιευτήρα κατά το δυνατόν σταθερή. Τον χώρο (πόροι) που «αδειάζει» από ρευστό κατά την παραγωγή, θα τον πληρώνει το εισπιεζόμενο νερό. Κάποια στιγμή όμως, το νερό αυτό θα διαπεράσει τον ταμιευτήρα και θα εισέλθει στη γεώτρηση παραγωγής. Αυτή η χρονική στιγμή ονομάζεται «water breakthrough». Από εκείνη τη στιγμή και μετά, μαζί με το ρευστό του ταμιευτήρα, θα εισέρχεται στη γεώτρηση και νερό και τελικά θα συμπαράγεται στην επιφάνεια. Το ογκομετρικό ποσοστό του νερού που παράγεται σε σχέση με το συνολικό όγκο της υδάτινης φάσης (νερό + πετρέλαιο) αποδίδεται με τον αγγλικό όρο «watercut».

## ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΥΠΟΒΟΗΘΗΣΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΑΝΤΛΙΩΝ ΚΑΙ ΕΙΣΠΙΕΣΗΣ ΑΕΡΙΟΥ

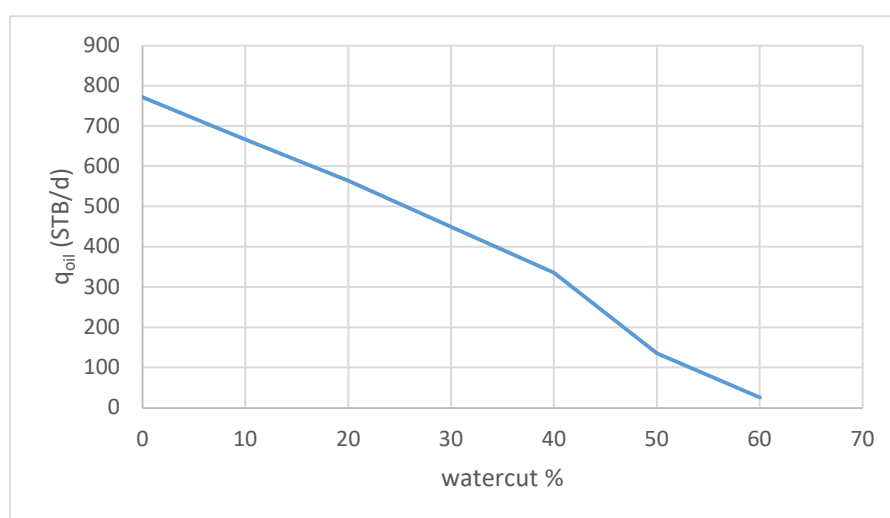
Αν και η εισπίεση νερού στα άκρα του ταμιευτήρα βοηθάει την παραγωγή διατηρώντας την πίεση του ταμιευτήρα σταθερή, το watercut δυσχεραίνει την παραγωγή. Τούτο συμβαίνει διότι το νερό έχει μεγαλύτερη πυκνότητα από ότι το πετρέλαιο, με άλλα λόγια είναι βαρύτερο, οπότε η απώλεια πίεσης λόγω βαρύτητας κατά μήκος της γεώτρησης αυξάνεται και επιπλέον η ενεργός διαπερατότητα του ταμιευτήρα μειώνεται λόγω της διαφασικής ροής. Συνεπώς, και οι δύο καμπύλες (IPR και VLP) επηρεάζονται αρνητικά.

Κάποια στιγμή το ποσοστό του watercut θα έχει αυξηθεί τόσο ώστε η παραγωγή πετρελαίου στην επιφάνεια να πάψει να είναι οικονομική. Για τον προσδιορισμό αυτού του ποσοστού, γίνεται δοκιμή ευαισθησίας με τη χρήση του λογισμικού Pipesim, για διάφορες τιμές του watercut. Πραγματοποιήθηκαν συγκεκριμένα δοκιμές από 0% μέχρι 60% watercut με βήμα 10%. Στον Πίνακα 4 δίνονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης κόμβου με τις παραπάνω δοκιμές ευαισθησίας.

**Πίνακας 4 Αποτελέσματα δοκιμών ευαισθησίας**

Water cut %	$P_{wf}$ (psi)	$q_{oil}$ (STB/d)	$q_{gas}$ (mscf/d)	$q_w$ (STB/d)
0	2,465.81	771.94	192.98	0
10	2,528.95	666.14	166.53	74.01
20	2,591.27	563.55	140.89	140.89
30	2,664.05	448.91	112.23	192.39
40	2,739.00	335.44	83.86	223.62
50	2,888.51	135.64	33.91	135.64
60	2,976.89	26.22	6.55	39.33

Στην Εικόνα 46 παρουσιάζεται γραφικά η επίδραση του watercut στην παραγωγή.



*Εικόνα 46 Επίδραση του watercut στην παραγωγή πετρελαίου*

Εύκολα διακρίνεται τόσο από τον πίνακα όσο και από το γράφημα, ότι η παραγωγή πετρελαίου μειώνεται απότομα. Για τις περιπτώσεις του 50% και 60% watercut, τα αποτελέσματα που προκύπτουν από το λογισμικό δεν είναι αξιόπιστα καθώς για τόσο μικρές τιμές παραγωγής, η VLP είναι ασταθής (η τομή με την IPR τοποθετείται στο φθίνον τμήμα της αντί για το αύξον). Το οικονομικό τμήμα της εταιρίας έχει εκτιμήσει ότι το κατώτερο όριο της παραγωγής μέχρι το οποίο η γεώτρηση θα θεωρείται οικονομική, είναι τα 400 βαρέλια πετρελαίου την ημέρα. Συνεπώς όταν η παραγωγή πέσει κάτω από αυτό το όριο, θα πρέπει η γεώτρηση να υποβοηθηθεί.

## **5.5 Υποβοήθηση της γεώτρησης με μεθόδους τεχνητής ανύψωσης**

Για ύψος watercut ίσο με 40%, η παραγωγή του πετρελαίου έχει μόλις πέσει κάτω από το όριο που έχει τεθεί και επομένως πρέπει να αυξηθεί έτσι ώστε η εταιρία να συνεχίζει να κερδοφορεί. Οι μέθοδοι υποβοήθησης που θα μελετηθούν είναι εκείνες που αναλύθηκαν στο Κεφάλαιο 3, δηλαδή η αντλία βάρου (sucker rod), η ηλεκτρική εμβυπτιζόμενη αντλία (ESP) και η εισπίεση αερίου (gas lift). Οι μέθοδοι θα εφαρμοστούν αφού έχει προκύψει 40% watercut, γεγονός που πρέπει να εισαχθεί στο μοντέλο του ρευστού στο λογισμικό.

Σημειώνεται ότι θα γίνει προσπάθεια επίτευξης της ανώτατης δυνατής παραγωγής με κάθε μία από τις μεθόδους, οπότε αρχικά γίνεται η παραδοχή ότι υπάρχει ο χώρος και η διαθεσιμότητα για τον οποιοδήποτε εξοπλισμό και κατά δεύτερον γίνεται εξέταση των μεθόδων καθαρά από τεχνικής άποψης και όχι από οικονομικής. Αντίθετα, τα τεχνικά αποτελέσματα θα προωθηθούν προς την διαχείριση του πεδίου για λήψη μελλοντικών αποφάσεων.

### **5.5.1 Δοκιμή αντλίας βάρου**

Για τη μέθοδο της αντλίας βάρου δεν υπάρχει λεπτομερής μεθοδολογία σχεδιασμού της παρά μόνο εισαγωγής των στοιχείων της μονάδας. Όπως ήδη αναφέρθηκε θα γίνει προσπάθεια επίτευξης της μέγιστης δυνατής παραγωγής. Γενικώς η αντλία βάρου δεν είναι αποδοτική για κεκλιμένες γεωτρήσεις, λόγω των τριβών που αναπτύσσονται κατά την παλλόμενη κίνηση. Συνεπώς, στη συγκεκριμένη γεώτρηση, η αντλία εμβόλου θα τοποθετηθεί λίγο πριν ξεκινήσει η κλίση, δηλαδή στα 2,000'. Το επόμενο δεδομένο το οποίο είναι αμετάβλητο είναι η διάμετρος του εμβόλου, η τιμή της οποίας πρέπει να είναι μικρότερη της εσωτερικής διαμέτρου της σωλήνωσης παραγωγής και εδώ θα λάβει την τιμή των 2". Ο συντελεστής ολίσθησης (slip

coefficient) και η απόδοση της αντλίας, έχουν τεθεί στις συνήθεις τιμές για το λογισμικό, 0.0002 STB/(day.psi) και 80% αντίστοιχα. Για την αποφυγή εισαγωγής αερίου στην αντλία, εγκαθίσταται διαχωριστής ο οποίος θεωρείται ότι έχει απόδοση 100% για τη διευκόλυνση των υπολογισμών.

Οι ιδιότητες που δεν έχουν προσδιοριστεί ακόμα είναι ο ρυθμός των παλμών (stroke per minute), το ενεργό μήκος της διαδρομής (stroke length) και η διάμετρος της ράβδου κίνησης (drive rod diameter). Το τελευταίο μέγεθος δεν επηρεάζει την παραγωγή αλλά το φορτίο που δέχεται η ανώτερη ράβδος, και θα τεθεί στην τιμή 1”.

Ο ρυθμός των παλμών και το ενεργό μήκος της διαδρομής, μπορούν να λάβουν τη μέγιστη τιμή των 30 διαδρομών ανά λεπτό και των 360” αντίστοιχα. Χρησιμοποιώντας αυτές τις τιμές, εκτελέστηκε στη συνέχεια η ανάλυση κόμβου. Στην Εικόνα 47 φαίνονται τα αποτελέσματα από την ανάλυση.

	Operating point	P at NA	P at WH	ST Oil at WH
		psia	psia	STB/d
1	ILL-CONDITIO...	1145,982	8448,665	2452,989

Εικόνα 47 ILL-CONDITIONED κατάσταση

Στο σημείο λειτουργίας που προσδιορίζει το λογισμικό, δίνεται η ονομασία ILL-CONDITIONED. Στην κατάσταση αυτή, το λογισμικό δεν μπορεί να χρησιμοποιήσει τα δεδομένα έτσι ώστε να παρέχει την προσδιορισμένη πίεση στην κεφαλή. Συγκεκριμένα προσδιορίζει την πίεση στην κεφαλή στα 8,447 psi, το οποίο είναι άτοπο. Συνεπώς στη μέγιστη λειτουργία της αντλίας, η παραγωγή που μπορεί να εκτιμηθεί από της καμπύλες VLP και IPR, δηλαδή τα 2,453 βαρέλια την ημέρα, δεν είναι πρακτικά επιτεύξιμη. Εν τέλει, πρέπει να αναπροσαρμοστούν οι τιμές του ρυθμού των παλμών και της ενεργούς διαδρομής. Θέτοντας την τιμή της ενεργούς διαδρομής στις 310’, πραγματοποιείται δοκιμή ευαισθησίας για τιμές ρυθμού από 24 έως 30 διαδρομές ανά λεπτό, με βήμα 1. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 5.

Πίνακας 5 Αποτελέσματα δοκιμής ευαισθησίας στην αντλία βάκτρου

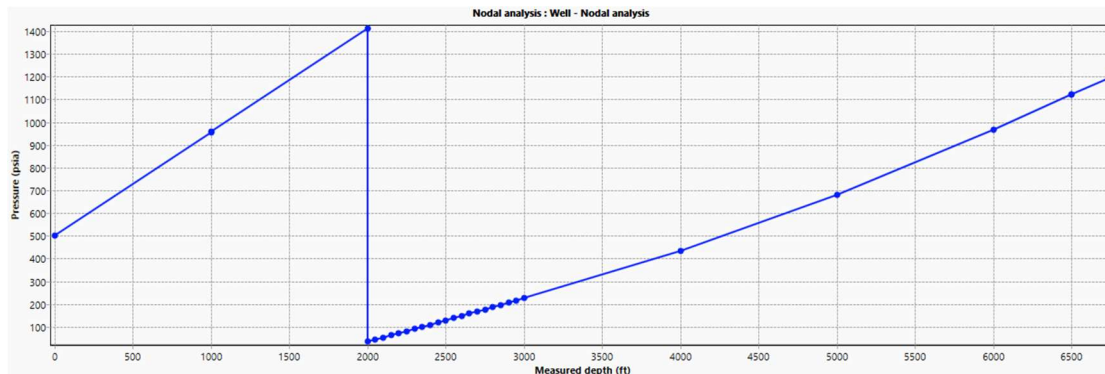
Strokes per minute	P <sub>nodal</sub> (psi)	q <sub>oil</sub> (STB/d)	q <sub>gas</sub> (mscf/d)	q <sub>w</sub> (STB/d)
24	1,555.04	1974,75	75.80	1,316.50
25	1,490.10	2059,08	65.37	1,372.72
26	1,422.28	2143,77	53.15	1,429.18
27	1,351.18	2228,84	39.02	1,485.89

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΥΠΟΒΟΗΘΗΣΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΑΝΤΛΙΩΝ ΚΑΙ ΕΙΣΠΙΕΣΗΣ ΑΕΡΙΟΥ

28	1,276.29	2314,32	22.79	1,542.88
29	1,197.00	2400,22	4.44	1,600.14
30	1,146.10	2452,87	0.89	1,635.25

Μέχρι την τιμή των 29 διαδρομών ανά λεπτό, το λογισμικό μπορεί και εκτιμάει την παραγωγή κανονικά. Στην τιμή των 30 όμως, πάλι προκύπτει η ILL-COINITIONED κατάσταση, οπότε η τιμή των 29 διαδρομών ανά λεπτό προκαλεί τη μέγιστη δυνατή παραγωγή με βάση τα συγκεκριμένα στοιχεία του συστήματος ταμειυτήρα-γεώτρηση-αντλίας που έχουν εισαχθεί στο λογισμικό.

Από μαθηματικής άποψης και μόνο, ο συγκεκριμένος σχεδιασμός θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως βέλτιστος από πλευράς παραγωγής. Στην πραγματικότητα όμως υπάρχει μια παράμετρος που δεν έχει ληφθεί υπόψιν. Για να επιτύξει η αντλία τόσο υψηλές παραγωγές, η πίεση του πυθμένα της γεώτρησης πρέπει να μειωθεί αρκετά. Συγκεκριμένα, για την τιμή των 29 διαδρομών ανά λεπτό και για παραγωγή 2,400 βαρελιών την ημέρα, η πίεση του πυθμένα έχει πέσει στα 1,197 psi. Η τιμή αυτή είναι κατώτερη της πίεσης φυσαλίδας, με αποτέλεσμα την απελευθέρωση αερίου εντός του ταμειυτήρα. Κατά τον τρόπο αυτό εντός του ταμειυτήρα θα υπήρχε τριφασική ροή (πετρέλαιο-νερό-αέριο), το οποίο είναι ανεπιθύμητο. Στην Εικόνα 48 φαίνεται γραφικά η μεταβολή της πίεσης.



Εικόνα 48 Μεταβολή πίεσης κατά μήκος της γεώτρησης

Συνεπώς, κατά τον σχεδιασμό πρέπει να οριστεί ως οριακή πίεση πυθμένα, το σημείο φυσαλίδας.

Κρατώντας σταθερό το μήκος της διαδρομής, πραγματοποιείται δοκιμή ευαισθησίας για μικρότερες τιμές του ρυθμού των παλμών, με στόχο τον εντοπισμό της μεγαλύτερης δυνατής παραγωγής διατηρώντας την πίεση πυθμένα πάνω από την πίεση φυσαλίδας (1,617 psi). Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.

**Πίνακας 6 Αποτελέσματα νέας δοκιμής ευαισθησίας με σκοπό την επίτευξη επιθυμητής πίεσης πυθμένα**

Strokes per minute	$P_{wf}$ (psi)	$q_{oil}$ (STB/d)	$q_{gas}$ (mscf/d)	$q_w$ (STB/d)
19	1,847.67	1,556.97	107.54	1,037.98
20	1,789.72	1,640.23	102.83	1,093.49
21	1,731.89	1,723.61	97.48	1,149.07
22	1,674.44	1,807.08	91.54	1,204.72
23	1,617.16	1,890.72	84.62	1,260.48

Για την τιμή των 22 διαδρομών ανά λεπτό, η πίεση είναι εντός ορίων και τελικά η εκτιμώμενη παραγωγή είναι τα 1,807 βαρέλια πετρελαίου την ημέρα.

### 5.5.2 Δοκιμή συστήματος gas lift

Για τη μέθοδο αυτή, το Pipesim παρέχει την επιλογή του αναλυτικού σχεδιασμού της, δηλαδή του υπολογιστικού προσδιορισμού των χαρακτηριστικών των βαλβίδων εκφόρτωσης, όπως το βάθος τοποθέτησης τους και η πίεση ανοίγματος τους. Το πρώτο στοιχείο που πρέπει να προσδιοριστεί είναι ο ρυθμός εισπίεσης του αερίου, και συγκεκριμένα θα χρησιμοποιηθεί ο τεχνικός βέλτιστος ρυθμός εισπίεσης. Επιλέγεται αρχικά η ενέργεια «gas lift response». Στην Εικόνα 49 φαίνονται τα στοιχεία που εισάγονται στη συγκεκριμένη ενέργεια. Τα δεδομένα του «boundary conditions» λαμβάνονται αυτόματα από το λογισμικό αφού έχουν ήδη εισαχθεί. Στις παραμέτρους εισπίεσης (injection parameter), πρέπει να προσδιοριστεί η θερμοκρασία του αερίου στην επιφάνεια και η πυκνότητα του. Ως μέγιστο βάθος εισπίεσης λαμβάνεται το σημείο που βρίσκεται 100' πάνω από το packer, δηλαδή το βαθύτερο πρακτικά σημείο που μπορεί να εισαχθεί το αέριο στη σωλήνωση. Τέλος, πρέπει να οριστούν οι τιμές του ρυθμού εισπίεσης για τις οποίες εκτελείται η δοκιμή ευαισθησίας και η μέγιστη πίεση εισπίεσης. Η τελευταία εξαρτάται από την ισχύ των συμπιεστών και από τον αριθμό των γεωτρήσεων που τροφοδοτούνται από αυτούς. Η τιμή της δεν επηρεάζει την εύρεση του βέλτιστου ρυθμού εισπίεσης ωστόσο για να μπορέσει ο συμπιεστής να εισπιάσει το αέριο μέχρι το κατώτερο βάθος, πρέπει εκείνη να ξεπερνά ένα όριο. Για το συγκεκριμένο σύστημα και τις τιμές ρυθμού εισπίεσης που δοκιμάζονται, η οριακή τιμή της πίεσης εισπίεσης προσδιορίστηκε στα 1,700 psi.

## ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΥΠΟΒΟΗΘΗΣΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΑΝΤΛΙΩΝ ΚΑΙ ΕΙΣΠΙΕΣΗΣ ΑΕΡΙΟΥ

**Gas lift response**

Name:

Description:

Gas lift response    Gas lift response results

**BOUNDARY CONDITIONS**

Branch end:

Production outlet pressure:  psia

Reservoir pressure:  psia

Reservoir temperature:  degF

GOR:  SCF/STB

Watercut:  %

**INJECTION PARAMETERS**

Surface injection temperature:  degF

Gas specific gravity:

**CALCULATION OPTIONS**

Injection gradient:

**DEPTH CONTROL**

Gas injection depth:

Maximum injection TVD:  ft

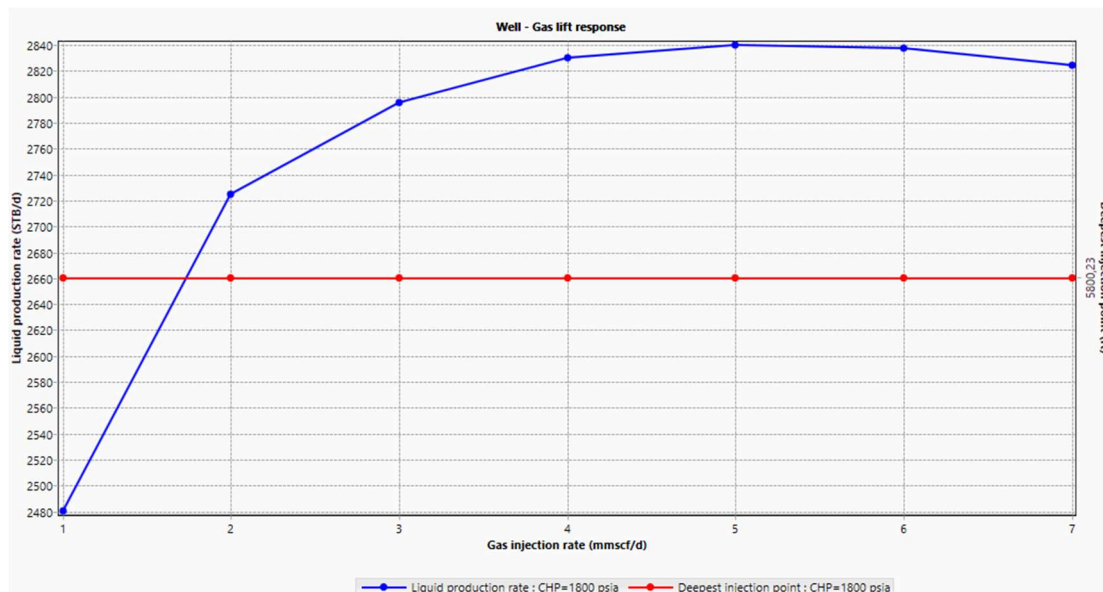
Minimum valve injection DP:  psia

**SENSITIVITY DATA**

Gas lift data		Gas lift data	
Target injection gas rate		Surface gas injection pressure	
Range...		Range...	
mmscf/d		psia	
1	1	1	1800
2	2	2	
3	3	3	
4	4		
5	5		
6	6		
7	7		
8			
9			
10			

Εικόνα 49 Δεδομένα gas lift response

Μετά την είσοδο των δεδομένων εκτελείται η ενέργεια και προσδιορίζεται η σχέση μεταξύ ρυθμού εισπίεσης και παραγωγής, αλλά και το κατώτερο βάθος εισπίεσης. Στην Εικόνα 50 δίνονται τα αποτελέσματα του gas lift response.



Εικόνα 50 Αποτελέσματα gas lift response

Από τα αποτελέσματα διακρίνεται ότι ο τεχνικός βέλτιστος ρυθμός εισπίεσης είναι τα 5 mmscf/d και το βάθος εισπίεσης του αερίου εντός της παραγωγικής γεώτρησης είναι τα 5,800.23 ft (TVD).



## ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΥΠΟΒΟΗΘΗΣΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΑΝΤΛΙΩΝ ΚΑΙ ΕΙΣΠΙΕΣΗΣ ΑΕΡΙΟΥ

Έχοντας αυτά τα απαραίτητα δεδομένα, μπορεί να γίνει πλέον ο σχεδιασμός του συστήματος gas lift (gas lift design). Αφού γίνει επιλογή της ενέργειας αυτής, πρέπει να προσδιοριστούν ορισμένες παράμετροι όπως φαίνεται στην Εικόνα 51.

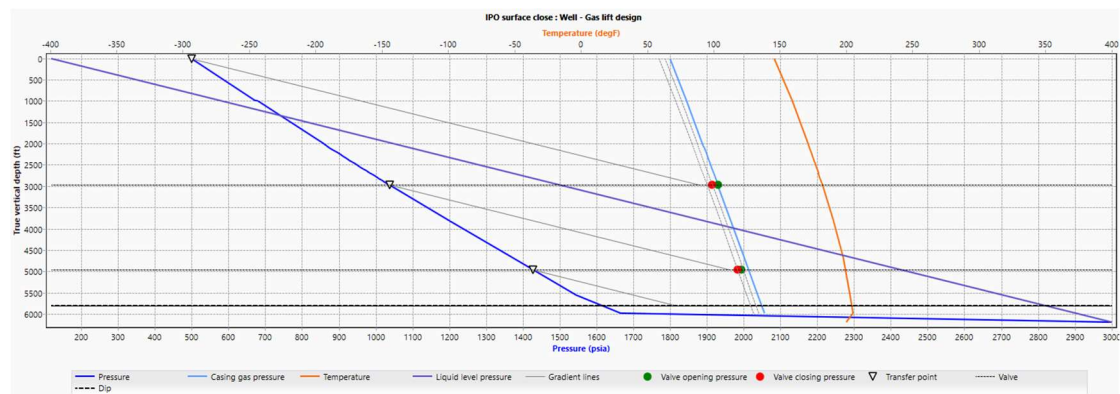
The screenshot displays the 'Gas lift design' software interface. It is divided into several sections for parameter input:

- Name:** Well - Gas lift design
- Description:** Gas lift design
- BOUNDARY CONDITIONS:**
  - Branch end: Well - Wellhead
  - Calculated variable: Production rate
  - Production outlet pressure: 500 psia
  - Unloading outlet pressure: psia
  - Reservoir pressure: 3000 psia
  - Reservoir temperature: 200 degF
  - GOR: 250 SCF/STB
  - Watercut: 40 %
- INJECTION PARAMETERS:**
  - Operating injection pressure: 1800 psia
  - Kickoff pressure: psia
  - Surface injection temperature: 60 degF
  - Target injection rate: 5 mmscf/d
  - Gas specific gravity: 0,64
- CALCULATION OPTIONS:**
  - Production pressure curve: Production pressure model
  - Injection gradient: Include friction losses
  - Top valve unload temperature: Injection
  - Lower valves unload temperature: Injection
  - Minimum unloading liquid rate: 500 STB/d
- SPACING CONTROL:**
  - Design spacing: New spacing
  - Design spacing method: IPO surface close
  - Top valve location: Assume liquid to surface
  - Maximum injection TVD: 5807,946 ft
  - Enable bracketing:
  - Unloading gradient: 0,4650002 psi/ft
  - Minimum valve injection DP: 150,0001 psia
  - Minimum valve spacing: 322,5807 ft
- DESIGN BIAS:**
  - Surface close DP: 15,00001 psia
  - Locating DP at valve location: 49,99991 psia
  - Transfer factor options: % difference between pProd and...
  - Transfer factor: 0 %
  - Use orifice as operating valve:
  - Override orifice CD:
- VALVE SELECTION FILTER:**
  - Manufacturer: SLB (Camco)
  - Valve type: IPO
  - Valve size: 1,5 Inch
  - Valve series: R20
  - Minimum port size: 0,125 Inch
  - Orifice valve series: RDO
- VALVE TEMPERATURE CORRECTION:**
  - Test rack temperature: 60,0008 degF
  - Nitrogen temp. correction: DAK Sutton

Εικόνα 51 Δεδομένα gas lift design

Εισάγεται η πίεση εισπίεσης και ο ρυθμός εισπίεσης του αερίου, που προσδιορίστηκαν προηγουμένως. Για τα υπόλοιπα στοιχεία λαμβάνονται από το λογισμικό οι ενδεικτικές τιμές. Σημειώνεται πως πρέπει να γίνει τσεκάρισμα στην επιλογή «use orifice as operating valve», καθώς έτσι η τελευταία βαλβίδα εκφόρτωσης μετατρέπεται και σε βαλβίδα λειτουργίας. Τα αποτελέσματα του σχεδιασμού φαίνονται στην Εικόνα 52. Το λογισμικό προσδιορίζει το απαιτούμενο πλήθος βαλβίδων εκφόρτωσης και το βάθος της κάθε μίας. Η πρώτη βαλβίδα προσδιορίστηκε να τοποθετηθεί στα 3,017.943 ft (MD), η δεύτερη στα 5,319.622 ft και η τρίτη, που είναι και η βαλβίδα λειτουργίας, στα 6,289.4 ft. Επίσης, υπολογίστηκε ότι η διαφορά πίεσης που απαιτείται για να ανοίξουν οι βαλβίδες είναι τα 800 psi. Τελικά μπορεί να γίνει εγκατάσταση του σχεδιασμένου συστήματος μέσω της επιλογής «install».

## ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΥΠΟΒΟΗΘΗΣΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΑΝΤΛΙΩΝ ΚΑΙ ΕΙΣΠΙΕΣΗΣ ΑΕΡΙΟΥ



Εικόνα 52 Αποτελέσματα gas lift design

Θεωρητικά, αφού πραγματοποιηθεί εκφόρτωση του δακτυλίου από την άλμη και ξεκινήσει η συνεχόμενη εισπίεση και η παραγωγή (continuous gas lift), οι βαλβίδες εκφόρτωσης έχουν κλείσει. Συνεπώς, πρέπει στην καρτέλα του artificial lift να γίνει απενεργοποίηση των δυο ανώτερων βαλβίδων και να μετατραπεί η βαλβίδα λειτουργίας σε «fixed port», δηλαδή σε ένα σταθερό σημείο εισαγωγής του εισπιεζόμενου αερίου εντός της παραγωγικής σωλήνωσης. Πλέον μπορεί να πραγματοποιηθεί η ανάλυση κόμβου και τα αποτελέσματά της παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.

Πίνακας 7 Αποτελέσματα ανάλυσης κόμβου με σύστημα gas lift

$q_{inj}$ (mmscf/d)	$P_{wf}$ (psi)	$q_{oil}$ (STB/d)	$q_{gas}$ (mscf/d)	$q_w$ (STB/d)
5	1,744.10	1,705.95	5,426.48	1,137.30

Η νέα παραγωγή πετρελαίου εκτιμάται στα 1,706 βαρέλια την ημέρα.

Στην πραγματικότητα, στο πεδίο δεν χρησιμοποιείται ο τεχνικός βέλτιστος ρυθμός εισπίεσης, αλλά ο οικονομικός βέλτιστος ρυθμός εισπίεσης. Επί της ουσίας, ο τελευταίος επηρεάζεται από τις τιμές των προϊόντων και την διαθεσιμότητα του αερίου και των συμπιεστών. Ενδεικτικά, από την ανάλυση κόμβου για ρυθμό εισπίεσης ίσο με 3 mmscf/d, η παραγωγή εκτιμήθηκε στα 1,679 βαρέλια πετρέλαιο την ημέρα. Διακρίνεται εύκολα ότι για αύξηση του ρυθμού εισπίεσης κατά 66% η παραγωγή αυξήθηκε κατά περίπου 27 βαρέλια πετρέλαιο ανά ημέρα, τιμή που σε καμία περίπτωση δεν δικαιολογεί την χρήση ενός αυξημένου ρυθμού εισπίεσης.

### 5.5.3 Δοκιμή αντλίας ESP

Για τον προσδιορισμό των στοιχείων της αντλίας ESP, το λογισμικό παρέχει την επιλογή του σχεδιασμού της. Στην ενέργεια «ESP design», το λογισμικό για τη διευκόλυνση του χρήστη παρέχει και την ανάλυση κόμβου του συστήματος όπως

έχει. Στην Εικόνα 53 παρουσιάζεται το περιβάλλον εργασίας κατά την ενέργεια «ESP design».

The screenshot shows the 'ESP design' software interface. At the top, there are fields for 'Name: Well - ESP design' and 'Description: Single pump selection'. Below this, there are two tabs: 'ESP design' (selected) and 'Results'. The 'ESP design' tab is divided into three sections: 'BOUNDARY CONDITIONS', 'DESIGN PARAMETERS', and 'PUMP SELECTION'. Under 'BOUNDARY CONDITIONS', the following values are set: Branch end: Well - Wellhead; Outlet pressure: 500 psia; Reservoir pressure: 3000 psia; Reservoir temperature: 200 degF; GOR: 250 SCF/STB; Watercut: 40%. Under 'DESIGN PARAMETERS', the values are: Design production rate: 0 STB/d (highlighted with a red box); Design option: Add a new ESP; Pump depth: 6500 ft; Design frequency: 60 Hz; Gas separator present: . Under 'PUMP SELECTION', there is an information icon and the text 'Specify required fields to select pump'.

Εικόνα 53 ESP design

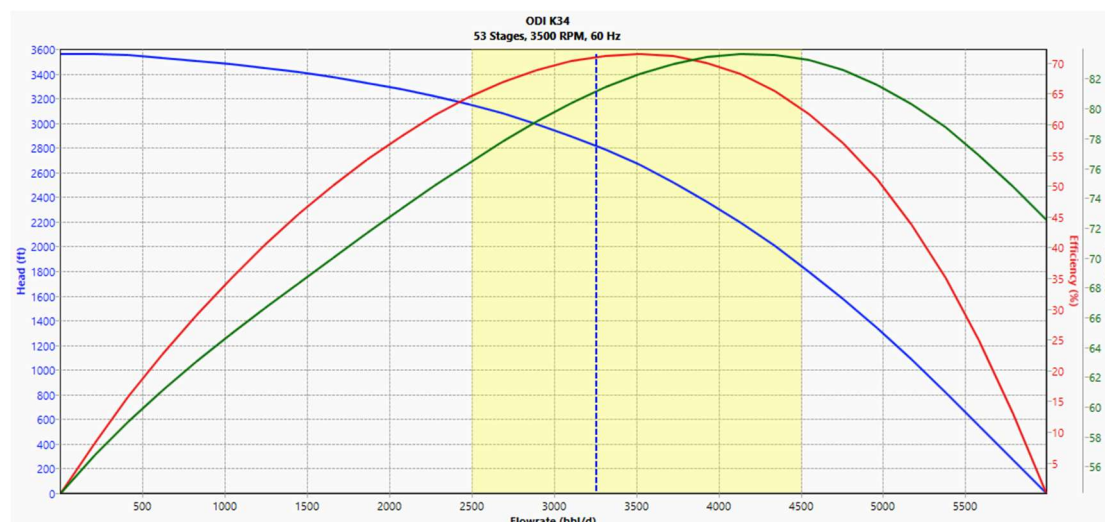
Ως βάθος έδρασης της αντλίας επιλέγεται το κατώτερο σημείο της σωλήνωσης παραγωγής. Το βασικό δεδομένο με βάση το οποίο σχεδιάζεται η αντλία, είναι η επιθυμητή ή σχεδιαστική τιμή της παραγωγής. Όπως εξηγήθηκε στην υποενότητα 5.3.2, ο Μηχανικός θέλει να αποφύγει την απελευθέρωση αερίου εντός του ταμιευτήρα, οπότε και η πίεση πυθμένα πρέπει να έχει τιμή μεγαλύτερη από εκείνη της πίεσης φυσαλίδας. Από την ανάλυση κόμβου, που παρέχεται από το λογισμικό, εντοπίζεται ότι για παραγωγή της τάξεως των 3,000 βαρελιών υγρής φάσης (πετρέλαιο + νερό) ανά ημέρα, η πίεση πυθμένα αναμένεται να έχει τιμή ίση περίπου με το bubble point. Συνεπώς, η σχεδιαστική τιμή παραγωγής θα επιλεγεί λίγο χαμηλότερα, στο ύψος των 2,900 βαρελιών ανά ημέρα.

Αφού εισαχθεί το προαναφερθέν δεδομένο, το λογισμικό υπολογίζει την απαραίτητη πίεση που πρέπει να προσφερθεί από την αντλία για να επιτευχθεί η επιθυμητή παροχή, και εμφανίζει ένα κατάλογο με τις προτεινόμενες αντλίες, δηλαδή εκείνες που μπορούν να παρέχουν τη συγκεκριμένη διαφορά πίεσης και επιπλέον τα σχεδιαστικά και γεωμετρικά τους χαρακτηριστικά είναι κατάλληλα για το συγκεκριμένο σύστημα. Τα στοιχεία της αντλίας που επιλέχθηκε παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.

Πίνακας 8 Στοιχεία αντλίας

Manufacturer	Model	Series	min $q_{liq}$ (STB/d)	max $q_{liq}$ (STB/d)	Efficiency (%)
ODI	K34	70	2,500	4,500	70

όπου  $q_{liq}$  είναι η ημερήσια παραγωγή της υγρής φάσης στην επιφάνεια. Στη συνέχεια εκτελούνται από το λογισμικό διάφοροι υπολογισμοί για τον προσδιορισμό των λειτουργικών παραμέτρων της αντλίας, όπως το πλήθος των σταδίων, η απαιτούμενη ισχύς, η ταχύτητα περιστροφής των φτερωτών, το Συνολικό Δυναμικό Κεφαλής της αντλίας και η αύξηση της τιμής της θερμοκρασίας του ρευστού. Στην Εικόνα 54 δίνονται οι τιμές των παραμέτρων της αντλίας που προσδιορίστηκαν από το λογισμικό και η χαρακτηριστική καμπύλη του κατασκευαστή.



Εικόνα 54 Αποτελέσματα σχεδιασμού ESP

Στη συνέχεια γίνεται εγκατάσταση της αντλίας και μπορεί να ελεγχθεί η αποδοτικότητα της μέσω ανάλυσης κόμβου, τα αποτελέσματα της οποίας παρουσιάζονται στον Πίνακα 8.

Πίνακας 9 Αποτελέσματα ανάλυσης κόμβου με χρήση αντλίας ESP

$P_{nodal}$	$q_{liq}$ (STB/d)	$q_{oil}$ (STB/d)	$q_{gas}$ (mscf/d)	$q_w$ (STB/d)
1,717.24	2,908.27	1,745	436.24	1,163.31

Εν τέλει, η τιμή της παραγωγής της υγρής φάσης συμπίπτει όπως θα έπρεπε, με την τιμή του σχεδιασμού και η εκτιμώμενη παραγωγή πετρελαίου είναι τα 1,745 βαρέλια την ημέρα. Σημειώνεται ότι αν για την ίδια παραγωγή σχεδιασμού είχε επιλεγεί διαφορετική αντλία, θα άλλαζαν οι παράμετροί της (πλήθος σταδίων, ισχύς κλπ.) αλλά η εκτιμώμενη παραγωγή θα πρόκυπτε περίπου ίδια.

Τα αποτελέσματα του σχεδιασμού της κάθε μεθόδου προωθούνται στο οικονομικό τμήμα της εταιρίας το οποίο στη συνέχεια μπορεί με βάση τα κόστη λειτουργίας της κάθε μεθόδου και τις τιμές των προϊόντων, να επιλέξει τη βέλτιστη μέθοδο υποβοήθησης.

#### 5.5.4 Εκτίμηση μελλοντικής παραγωγής

Η παραγωγή σε εκείνο το σημείο (40% watercut) θα έχει βελτιωθεί για όποια μέθοδο και αν επιλεγθεί από την διαχείριση του πεδίου. Ωστόσο, λόγω του waterflooding, το ποσοστό του παραγόμενου νερού θα συνεχίσει να αυξάνεται και αναπόφευκτα κάποια στιγμή η παραγωγή δεν θα είναι πια οικονομική και ενδεχόμενος να σηματοδοτεί το τέλος της ζωής της γεώτρησης. Για τη κάθε μέθοδο, το όριο της παραγωγής πετρελαίου είναι ξεχωριστό διότι το κόστος λειτουργίας της κάθε μεθόδου είναι διαφορετικό.

Για τη κάθε μέθοδο ξεχωριστά πραγματοποιήθηκε δοκιμή ευαισθησίας για 50,60,70 % watercut και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στους επόμενους Πίνακες.

**Πίνακας 10 Αποτελέσματα δοκιμής ευαισθησίας για αντλία βάκρου**

Watercut (%)	$P_{wf}$ (psi)	$q_{oil}$ (STB/d)	$q_{gas}$ (mscf/d)	$q_w$ (STB/d)
50	1,827.98	1,509.86	87.05	1,509.86
60	1,984.76	1,211.76	80.13	1,817.65
70	2,145.66	912.23	71.29	2,128.53

**Πίνακας 11 Αποτελέσματα δοκιμής ευαισθησίας για αντλία ESP**

Watercut (%)	$P_{wf}$ (psi)	$q_{oil}$ (STB/d)	$q_{gas}$ (mscf/d)	$q_w$ (STB/d)
50	1,807.22	1,538.13	384.53	1,538.13
60	1,909.95	1,305.75	326.44	1,958.62
70	2,018.45	1,053.82	263.45	2,458.90

**Πίνακας 12 αποτελέσματα δοκιμής ευαισθησίας για σύστημα gas lift**

Watercut (%)	$P_{wf}$ (psi)	$q_{oil}$ (STB/d)	$q_{gas}$ (mscf/d)	$q_w$ (STB/d)
50	1,817.93	1,523.40	5,380.85	1,523.40
60	1,901.19	1,316.74	5,329.18	1,975.11
70	1,971.19	1,106.84	5,276.71	2,582.62

Το οικονομικό τμήμα θα εξετάσει ξανά τις τιμές της παραγωγής με βάση τα κόστη λειτουργίας και ο διαχειριστής του πεδίου θα αποφασίσει για το μέλλον της γεώτρησης.

## Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία αναλύθηκε η μέθοδος της ανάλυσης κόμβου (nodal analysis), με την οποία ο Μηχανικός Παραγωγής (Production Engineer) μπορεί να εκτιμήσει την παραγωγή ενός συστήματος ταμειυτήρα-γεώτρησης. Επίσης, περιεγράφηκαν οι σημαντικότερες μέθοδοι τεχνητής ανύψωσης (artificial lift), που αποσκοπούν βελτίωση της παραγωγής σε επιβαρυνμένες γεωτρήσεις. Στο πλαίσιο αυτό, πραγματοποιήθηκε μελέτη περίπτωσης για την εφαρμογή της μεθόδου ανάλυσης κόμβου και τον σχεδιασμό των μεθόδων τεχνητής ανύψωσης με χρήση του λογισμικού Pipesim. Τα βασικά συμπεράσματα που προέκυψαν παρουσιάζονται παρακάτω.

Για την εκτίμηση της παραγωγής είναι απαραίτητα συγκεκριμένα δεδομένα για τον σχεδιασμό των καμπύλων IPR και VLP, όπου ορισμένα από αυτά συλλέγονται μέσω ερευνητικών γεωτρήσεων και δοκιμών πεδίου, ενώ άλλα προκύπτουν μετά από εργαστηριακή ανάλυση των δειγμάτων σχηματισμού και ρευστού. Σε κάθε περίπτωση, η εκτίμηση της παραγωγής, μέσω της ανάλυσης κόμβου, πραγματοποιείται με την απαίτηση σχετικά λίγων λεπτομερών δεδομένων και σε μικρό χρονικό διάστημα και εν τέλει μπορεί να κριθεί αν ο σχεδιασμός του συστήματος είναι οικονομικός, με χρήση χαμηλού αρχικού κεφαλαίου. Οι παραδοχές που λαμβάνονται για τη διευκόλυνση ορισμένων υπολογισμών και για τα δεδομένα που δεν είναι διαθέσιμα, ίσως προκαλούν μία μικρή απόκλιση από την πραγματική τιμή της παραγωγής, ωστόσο για τον σκοπό που πραγματοποιείται εκτίμηση της παραγωγής μέσω της ανάλυσης κόμβου, δηλαδή για να αποκτήσει ο Μηχανικός μία γρήγορη εικόνα για την παραγωγικότητα του συστήματος, η απόκλιση αυτή είναι ασήμαντη. Στη συνέχεια μπορεί να σχεδιαστεί μία από τις μεθόδους υποβοήθησης της παραγωγής, αν κριθεί αναγκαίο.

Η κάθε μέθοδος τεχνητής ανύψωσης (artificial lift) διέπεται από διαφορετικούς νόμους, έχει ειδικό σχεδιασμό και διαφορετικό πεδίο εφαρμογής. Η αντλία βάκτρου κυριαρχεί στις χερσαίες (onshore) εκμεταλλεύσεις, ενώ στις υπεράκτιες (offshore) χρησιμοποιούνται, ως επί το πλείστον, η αντλία ESP και το σύστημα gas lift. Επιπλέον, η επιλογή της βέλτιστης μεθόδου επηρεάζεται από τον τύπο και την γεωμετρία της γεώτρησης, δηλαδή την κλίση και τις διαμέτρους των σωληνώσεων, τις ιδιότητες των ρευστών του ταμειυτήρα, όπως την πυκνότητα και την σύστασή του

αλλά και από τους οικονομικούς παράγοντες και τη διαθεσιμότητα του εξοπλισμού. Το λογισμικό Pipesim προσφέρει τη δυνατότητα του σχεδιασμού τους και της εκτίμησης της βελτιωμένης παραγωγής.

Η τεχνολογική πρόοδος έχει επιφέρει μεγάλη αύξηση στην αποδοτικότητα των Μηχανικών και των βιομηχανιών γενικότερα, διότι έχει δώσει την δυνατότητα της αναπαράστασης ενός πετρελαϊκού συστήματος μέσω υπολογιστών. Με το λογισμικό Pipesim, μπορεί να προσομοιωθεί ένα σύστημα ταμιευτήρα-γεώτρησης με σχετική μικρή απαίτηση δεδομένων και να εκτιμηθεί η παραγωγή (nodal analysis) και η μεταβολή διαφόρων ιδιοτήτων του συστήματος κατά μήκος της γεώτρησης, χρησιμοποιώντας διάφορα μαθηματικά μοντέλα και συσχετίσεις (correlations) που έχουν αναπτυχθεί. Μέσω των δοκιμών ευαισθησίας (sensitivity tests) μπορούν να προσδιοριστούν οι σχεδιαστικές παράμετροι που επιβαρύνουν την γεώτρηση, με σκοπό την βελτίωση τους κατά τον σχεδιασμό. Επιπλέον, μπορεί να πραγματοποιηθεί βέλτιστος σχεδιασμός στις μεθόδους τεχνητής ανύψωσης.

Στη μελέτη περίπτωσης διαπιστώθηκε ότι είναι εφικτή η βελτίωση της παραγωγής, όταν το ποσοστό του παραγόμενου νερού προκύψει 40% και συνεπώς η παραγωγή δεν είναι οικονομική, από τα 335 βαρέλια χωρίς υποβοήθηση, στα 1807 βαρέλια την ημέρα (αύξηση κατά 540%) με την εφαρμογή Αντλίας Βάκτρου (sucker rod pump), στα 1706 βαρέλια την ημέρα (αύξηση κατά 509%) με την εισπίεση αερίου και στα 1745 βαρέλια την ημέρα (αύξηση κατά 520%) με την χρήση Ηλεκτρικής Εμβαπτισμένης Αντλίας (ESP).

Τελικά το πετρελαϊκό σύστημα δεν είναι ένα στατικό σύστημα, αλλά είναι ένα δυναμικό σύστημα που μεταβάλλεται με το χρόνο. Τούτο οφείλεται στην διαρκή μεταβολή των ιδιοτήτων του ταμιευτήρα, όπως είναι η πίεση και ο κορεσμός σε νερό. Συνεπώς κρίνεται απαραίτητη η συνεχής παρακολούθηση και τροποποίηση/βελτίωση των παραμέτρων του συστήματος κατά τη λειτουργία από τους Μηχανικούς Παραγωγής, για την επίτευξη της βέλτιστης παραγωγής.

## Βιβλιογραφία

1. Guo, B., Sun, K., Ghalambor, 2017 *Petroleum Production Engineering*, second ed.
2. Heriot Watt University, 2011, *Production Technology*.
3. Ahmed, T., 1989. *Hydrocarbon Phase Behavior*. Gulf Publishing Company, Houston.
4. Brill, J.P., Beggs, H.D., 1974. *Two-phase flow in pipes*. INTERCOMP course. Hague.
5. Brown, K.E., 1977. *The Technology of Artificial Lift Methods*, Vol. 1. Penn Well Books, Tulsa, OK.
6. Brown, K.E., 1980. *The Technology of Artificial Lift Methods*, Vol. 2a. Petroleum Publishing Co., Tulsa, OK.
7. Dukler, A.E., Wicks, M., Cleveland, R.G., 1964. *Frictional pressure drop in two-phase flow: a comparison of existing correlations for pressure loss and hold-up*.
8. Guo, B., Sun, K., Ghalambor, A., 2008. *Well Productivity Handbook*. Gulf Publishing Company, Houston, TX.
9. Danesh, A., 1998. PVT Tests and Correlations. In: *PVT and Phase Behaviour of Petroleum Reservoir Fluids*.
10. Chen, N.H., 1979. *An explicit equation for friction factor in pipe*. Ind. Eng. Chem. Fund 18, 296
11. Golan, M., Whitson, C.H., 1991. *Well Performance*. second ed. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ.
12. Poettmann, F.H., Carpenter, P.G., 1952. *The multiphase flow of gas, oil, and water through vertical string*.
13. Hasan, A.R., Kabir, C.S., 2002. *Fluid Flow and Heat Transfer in Wellbores*. Society of Petroleum Engineers, Richardson, TX
14. Gilbert, W.E., 1954. *Flowing and gas-lift well performance*. API Drill. Prod.
15. Economides, M.J., Hill, A.D., Ehig-Economides, C., 1994. *Petroleum Production Systems*. Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, NJ.
16. Weymouth, T.R., 1912. *Problems in natural gas engineering*.
17. Griffith, P., Wallis, G.B., 1961. *Two-phase slug flow*.



18. Hong, K.C., 1975. *Productivity of perforated completions in formations with and without damage*. J. Pet. Technol. 27
19. Σταματάκη, Σ., *Σημειώσεις μαθήματος Μηχανικής Πετρελαίων*. Αθήνα: Τμήμα Μεταλλειολόγων Μηχανικών, NTUA.
20. Βασιλική Λουίζα Α. Χριστίδη, 2022, *Ανάπτυξη Διαδικασίας Εφαρμογής Της Μεθόδου Ισοζυγίου Μάζας Σε Ταμειντήρες Πετρελαίου*, Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Θεσσαλονίκη.