



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

**ΜΕΛΕΤΗ ΕΙΣΠΕΣΗΣ CO<sub>2</sub> ΚΑΙ ΟΞΙΝΟΥ ΑΕΡΙΟΥ ΣΕ  
ΓΕΩΤΡΗΣΕΙΣ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΩΝ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

**ΠΑΝΑΓΙΩΤΑΡΑΚΟΥ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΥ**

**Επιβλέπων :** Βασίλειος Γαγάνης  
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Σεπτέμβρης 2021





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

## ΜΕΛΕΤΗ ΕΙΣΠΙΕΣΗΣ CO<sub>2</sub> ΚΑΙ ΟΞΙΝΟΥ ΑΕΡΙΟΥ ΣΕ ΓΕΩΤΡΗΣΕΙΣ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΩΝ ΠΕΤΡΕΛΑΙΟΥ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΠΑΝΑΓΙΩΤΑΡΑΚΟΥ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΥ

**Επιβλέπων :** Βασίλειος Γαγάνης  
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την <sup>η</sup> Οκτωβρίου 2021.

(Υπογραφή)

.....  
Βασίλειος Γαγάνης  
Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

(Υπογραφή)

.....  
Σοφία Σταματάκη  
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

(Υπογραφή)

.....  
Γεώργιος Αποστολόπουλος  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, 2021

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Με αφορμή την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας και κατά συνέπεια την ολοκλήρωση των προπτυχιακών μου σπουδών, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους συνέλαβαν στην εκπόνησή της. Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Επ. Καθηγητή του τομέα Μεταλλευτικής της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών κ. Βασίλη Γαγάνη, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανάθεση του θέματος της παρούσας διπλωματικής εργασίας και την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα πρωτότυπο και δύσκολο θέμα. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον ίδιο και την κυρία Κόφφα, για την εποπτεία και καθοδήγησή τους κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας, καθώς και για τις χρήσιμες ιδέες και υποδείξεις τους. Τέλος ευχαριστώ τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής, Καθηγήτρια κα Σ. Σταματάκη και Καθηγητή κ. Γ. Αποστολόπουλο για τη συμβολή τους.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Είναι συχνό φαινόμενο, σε ταμιευτήρες πετρελαίου να περιέχονται υδρογονάνθρακες με έντονη παρουσία όξινων συστατικών και ειδικότερα υδρόθειου ( $H_2S$ ) και διοξειδίου του άνθρακα ( $CO_2$ ). Ο συνδυασμός τους συνθέτει ένα όξινο μείγμα, το οποίο λόγω της έντονης τοξικότητάς του αλλά και της αλλοίωσης των τελικών επιθυμητών χαρακτηριστικών των παραγόμενων υδρογονανθράκων αναγκάζει την πετρελαϊκή βιομηχανία να εισάγει στην παραγωγική διαδικασία, ένα στάδιο δέσμευσής του από τους υδρογονάνθρακες και περαιτέρω επεξεργασία του στην επιφάνεια.

Μια από τις πρακτικές που ακολουθούνται για τη διαχείρισή του όξινου αερίου είναι η επανεισπίεσή του από γεωτρήσεις εισπίεσης, με σκοπό τη μείωση του κόστους επεξεργασίας του, αλλά και τη διατήρηση της πίεσης του ταμιευτήρα. Η διεργασία της εισπίεσης του όξινου αερίου προϋποθέτει την ακριβή γνώση της αναπτυσσόμενης πίεσης και θερμοκρασίας κατά μήκος των γεωτρήσεων εισπίεσης, γεγονός το οποίο με τη σειρά του απαιτεί την ορθή περιγραφή της θερμοδυναμικής συμπεριφοράς του όξινου ρευστού.

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας είναι ο προσδιορισμός των πιέσεων και θερμοκρασιών, των ιδιοτήτων του ρευστού και της συμπεριφοράς φάσεών του, σε όλο το μήκος της γεώτρησης κατά την εισπίεση του όξινου αερίου. Για τη θερμοδυναμική περιγραφή της συμπεριφοράς του ρευστού χρησιμοποιούνται κυβικές καταστατικές εξισώσεις (Equations of State, EoS), οι οποίες είναι διαθέσιμες στο εξειδικευμένο λογισμικό προσομοίωσης πολυφασικών ροών σταθερής κατάστασης σε σωληνώσεις, που χρησιμοποιήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας. Ταυτόχρονα αξιολογείται ο τρόπος χρήσης των καταστατικών εξισώσεων από τέτοιου είδους λογισμικά και ειδικά στην προσομοίωση της εισπίεσης όξινου αερίου εντός της γεώτρησης εισπίεσης.

Με τον έλεγχο της ροής από τα εργαλεία διερεύνησης που παρέχει το λογισμικό ροής παρατηρήθηκε πως τα προφίλ πιέσεων και θερμοκρασιών έχουν τα λογικά αποτελέσματα που δίνει και η βιβλιογραφία. Ακόμη, παρά τα διαφορετικά θερμοδυναμικά μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν για τον προορισμό των ιδιοτήτων του ρευστού, τα αποτελέσματα που παρατηρήθηκαν είχαν πολύ μικρές διαφορές. Τέλος, στον λεπτομερή έλεγχο των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων παρατηρήθηκαν κάποια σφάλματα του λογισμικού, τα οποία φαίνονται να μην επηρεάζουν σημαντικά τις μακροσκοπικές ιδιότητες της ροής του ρευστού, όπως πίεση και θερμοκρασία.

## **ABSTRACT**

There are many occurrences of oil reservoirs containing hydrocarbons mixed with a high content of acidic components, such as hydrogen sulfide ( $H_2S$ ) and carbon dioxide ( $CO_2$ ). Their combination composes an acidic mixture, which due to its high toxicity and its cause of the alteration of the final desired characteristics of the produced hydrocarbons, forces the oil industry to introduce to the production procedure, a stage of its extrication from the hydrocarbons and its further process on the surface.

One of the practices followed for the management of acid gas is its re-injection using injection wells, in order to reduce the cost of the treatment, while also maintaining the reservoir pressure. The process of injecting the acid gas requires the accurate knowledge of the developing pressure and temperature along the compression wells, which in turn requires a correct description of the thermodynamic behavior of the acid fluid.

The exact purpose of this thesis is to accurately determine the pressures and temperatures, the properties of the fluid and its phase behavior, throughout the drilling's length. The cubic equations of state (EoS), which are available in the specialized steady-state multiphase flow simulation used in the present work, are used for the thermodynamic description of the fluid's behavior. At the same time, the way in which the equations of state are used by such software, especially in the simulation of the acid gas injection within the injection well, is evaluated

After the inspection of the flow using the probing tools provided by the flow simulator software, it was observed that the pressure and temperature profiles have the logical results that are given by the literature. Furthermore, despite the different thermodynamic models used to define the properties of the fluid, the observed results had minor variations. At last, in the detail inspection of the thermodynamic properties, some software errors were observed, which do not seem to significantly affect the macroscopic properties of the fluid's flow, such as pressure and temperature.



## Πίνακας περιεχομένων

|          |                                                                           |           |
|----------|---------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Εισαγωγή.....</b>                                                      | <b>9</b>  |
| 1.1      | Εισαγωγή στο όξινο αέριο .....                                            | 9         |
| 1.2      | Εισαγωγή στην εισπίεση όξινου αερίου.....                                 | 10        |
| 1.3      | Εισαγωγή στα θερμοδυναμικά μοντέλα.....                                   | 11        |
| 1.4      | Εισαγωγή στις προσομοιώσεις.....                                          | 11        |
| 1.5      | Σύνοψη.....                                                               | 12        |
| <b>2</b> | <b>Το Όξινο αέριο και η διαχείρισή του.....</b>                           | <b>14</b> |
| 2.1      | H <sub>2</sub> S και CO <sub>2</sub> .....                                | 15        |
| 2.1.1    | H <sub>2</sub> S.....                                                     | 15        |
| 2.1.2    | CO <sub>2</sub> .....                                                     | 15        |
| 2.1.3    | Βασικές θερμοδυναμικές και θερμοφυσικές ιδιότητες του όξινου αερίου ..... | 15        |
| 2.2      | Διαχείριση όξινου αερίου.....                                             | 25        |
| 2.2.1    | Γλύκανση φυσικού αερίου .....                                             | 26        |
| 2.2.2    | Η διαδικασία ανάκτησης θείου Claus (Claus Sulfur Recovery).....           | 27        |
| 2.2.3    | Εισπίεση όξινου αερίου .....                                              | 29        |
| <b>3</b> | <b>Θερμοδυναμικά εργαλεία.....</b>                                        | <b>34</b> |
| 3.1      | Καταστατικές εξισώσεις – Equations of state (EoS) .....                   | 35        |
| 3.1.1    | Εισαγωγή στις καταστατικές εξισώσεις.....                                 | 35        |
| 3.1.2    | Peng – Robinson και Soave – Redlich – Kwong (PR και SRK EOS).....         | 36        |
| 3.1.3    | Εξαγωγή τελικών αποτελεσμάτων και διόρθωση όγκου .....                    | 38        |
| <b>4</b> | <b>Ικανότητα απόληψης γεώτρησης .....</b>                                 | <b>43</b> |
| 4.1      | Εισαγωγή.....                                                             | 43        |
| 4.2      | Ικανότητα απόληψης ταμειυτήρα .....                                       | 45        |
| 4.2.1    | IPR σε ταμειυτήρες υποκορεσμένου πετρελαίου .....                         | 48        |
| 4.2.2    | IPR σε ταμειυτήρες αερίου .....                                           | 49        |
| 4.2.3    | IPR σε διφασικούς ταμειυτήρες (αερίου – πετρελαίου).....                  | 50        |
| 4.3      | Απόδοση ροής γεώτρησης .....                                              | 52        |



|          |                                                                          |            |
|----------|--------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.3.1    | Μονοφασική ροή πετρελαίου.....                                           | 52         |
| 4.3.2    | Πολυφασική ροή πετρελαίου .....                                          | 54         |
| 4.3.3    | Μονοφασική ροή αερίου .....                                              | 55         |
| 4.3.4    | Θερμικό προφίλ.....                                                      | 57         |
| 4.4      | Ανάλυση κόμβων – Nodal analysis .....                                    | 58         |
| 4.4.1    | Nodal analysis σε γεωτρήσεις εισπίεσης .....                             | 60         |
| 4.5      | Sensitivity analysis.....                                                | 61         |
| <b>5</b> | <b>Λογισμικό προσομοίωσης ροής ρευστών σε γεωτρήσεις (PIPESIM) .....</b> | <b>63</b>  |
| 5.1      | Εισαγωγή στο PIPESIM .....                                               | 64         |
| 5.2      | Μοντέλο ρευστού και θερμοδυναμικά εργαλεία .....                         | 69         |
| 5.2.1    | «Compositional» μοντέλο ρευστού.....                                     | 69         |
| 5.3      | Προφίλ Πιέσεων και Θερμοκρασιών (P/T profile).....                       | 75         |
| 5.4      | Ανάλυση Κόμβων (Nodal Analysis).....                                     | 78         |
| 5.5      | Διερεύνηση Φάκελου Φάσεων (Phase envelope) .....                         | 80         |
| <b>6</b> | <b>Προσομοιώσεις.....</b>                                                | <b>81</b>  |
| 6.1      | Ανάλυση των φακέλων φάσεων .....                                         | 84         |
| 6.2      | Ανάλυση των P/T προφίλ .....                                             | 87         |
| 6.2.1    | Πίεση κεφαλής και θερμοκρασία πυθμένα.....                               | 87         |
| 6.2.2    | Αναλυτικά P/T προφίλ.....                                                | 91         |
| 6.2.3    | Συνδυαστικός έλεγχος φάκελου φάσεων και P/T προφίλ.....                  | 97         |
| 6.3      | Λεπτομερής ανάλυση των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων .....                    | 99         |
| 6.3.1    | Διερεύνηση μέσω Phase envelope και Phase properties.....                 | 99         |
| 6.3.2    | Διερεύνηση μέσω αποτελεσμάτων των P/T profile .....                      | 102        |
| 6.3.3    | Αλλαγές μεταξύ των μοντέλων ρευστού .....                                | 104        |
| 6.3.4    | Διερεύνηση του P/T προφίλ της παροχής 10,000 m <sup>3</sup> /h.....      | 111        |
| <b>7</b> | <b>Συμπεράσματα .....</b>                                                | <b>113</b> |
| <b>8</b> | <b>Βιβλιογραφία.....</b>                                                 | <b>115</b> |

## Λίστα διαγραμμάτων

|                                                                                                                                                                            |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Διάγραμμα 2-1: Φάκελος φάσεων καθαρού H <sub>2</sub> S (Engineeringtoolbox site).....                                                                                      | 17  |
| Διάγραμμα 2-2: Φάκελος φάσεων καθαρού CO <sub>2</sub> (Engineeringtoolbox site) .....                                                                                      | 17  |
| Διάγραμμα 2-3: Οι τάσεις ατμών του διοξειδίου του άνθρακα και του υδρόθειου. (Carroll, 2010).....                                                                          | 18  |
| Διάγραμμα 2-4: Φάκελος φάσεων για μείγμα όξινου αερίου σύστασης 50% σε CO <sub>2</sub> και 50% σε H <sub>2</sub> S. (Carroll, 2010).....                                   | 20  |
| Διάγραμμα 2-5: Φάκελοι φάσης για μίγματα CO <sub>2</sub> και H <sub>2</sub> S διαφορετικών συστάσεων (Carroll, 2010).....                                                  | 20  |
| Διάγραμμα 2-6: Διάγραμμα πυκνότητας του CO <sub>2</sub> συναρτήσει της πίεσης και της θερμοκρασίας. (IPCC Special Report on Carbon dioxide Capture and Storage, 2005)..... | 21  |
| Διάγραμμα 2-7: Διάγραμμα ιξώδες του CO <sub>2</sub> συναρτήσει της πίεσης και της θερμοκρασίας. (IPCC Special Report on Carbon dioxide Capture and Storage, 2005).....     | 22  |
| Διάγραμμα 2-8: Διάγραμμα πίεσης και πυκνότητας του H <sub>2</sub> S (Perez, 2016).....                                                                                     | 23  |
| Διάγραμμα 6-1: Φάκελοι φάσεων για ρευστό σύστασης 25%/(H <sub>2</sub> S)/75%(CO <sub>2</sub> ).....                                                                        | 84  |
| Διάγραμμα 6-2: Φάκελοι φάσεων για ρευστό σύστασης 50%/(H <sub>2</sub> S)/50%(CO <sub>2</sub> ).....                                                                        | 85  |
| Διάγραμμα 6-3: Φάκελοι φάσεων για ρευστό σύστασης 75%/(H <sub>2</sub> S)/25%(CO <sub>2</sub> ).....                                                                        | 85  |
| Διάγραμμα 6-4: Ελαττωματικοί φάκελοι φάσεων του PVT πακέτου E300.....                                                                                                      | 86  |
| Διάγραμμα 6-5: Τα προφίλ P/T του μοντέλου Multiflash-PR.....                                                                                                               | 90  |
| Διάγραμμα 6-6: Προφίλ P/T για σύσταση 25%(H <sub>2</sub> S)/75%(CO <sub>2</sub> ) και παροχή 2,500 m <sup>3</sup> /h.....                                                  | 91  |
| Διάγραμμα 6-7: Προφίλ P/T για σύσταση 50%(H <sub>2</sub> S)/50%(CO <sub>2</sub> ) και παροχή 2,500 m <sup>3</sup> /h.....                                                  | 92  |
| Διάγραμμα 6-8: Προφίλ P/T για σύσταση 75%(H <sub>2</sub> S)/25%(CO <sub>2</sub> ) και παροχή 2,500 m <sup>3</sup> /h.....                                                  | 92  |
| Διάγραμμα 6-9: Προφίλ P/T για σύσταση 50%(H <sub>2</sub> S)/50%(CO <sub>2</sub> ) και παροχή 10,000 m <sup>3</sup> /h.....                                                 | 93  |
| Διάγραμμα 6-10: Προφίλ P/T για σύσταση 50%(H <sub>2</sub> S)/50%(CO <sub>2</sub> ) και παροχή 10,000 m <sup>3</sup> /h.....                                                | 93  |
| Διάγραμμα 6-11: Προφίλ P/T για σύσταση 75%(H <sub>2</sub> S)/25%(CO <sub>2</sub> ) και παροχή 10,000 m <sup>3</sup> /h.....                                                | 94  |
| Διάγραμμα 6-12: Σύγκριση P/T προφίλ για τις διαφορετικές παροχές.....                                                                                                      | 96  |
| Διάγραμμα 6-13: Προφίλ G-L Pattern για ρευστό σύστασης 25%(H <sub>2</sub> S)/75%(CO <sub>2</sub> ) για παροχή 2,500 m <sup>3</sup> /h.....                                 | 108 |
| Διάγραμμα 6-14: Προφίλ G-L Pattern για ρευστό σύστασης 25%(H <sub>2</sub> S)/75%(CO <sub>2</sub> ) για παροχή 10,000 m <sup>3</sup> /h.....                                | 108 |
| Διάγραμμα 6-15: Προφίλ G-L Pattern για ρευστό σύστασης 50%(H <sub>2</sub> S)/50%(CO <sub>2</sub> ) για παροχή 2,500 m <sup>3</sup> /h.....                                 | 109 |
| Διάγραμμα 6-16: Προφίλ G-L Pattern για ρευστό σύστασης 50%(H <sub>2</sub> S)/50%(CO <sub>2</sub> ) για παροχή 10,000 m <sup>3</sup> /h.....                                | 109 |
| Διάγραμμα 6-17: Προφίλ G-L Pattern για ρευστό σύστασης 75%(H <sub>2</sub> S)/25%(CO <sub>2</sub> ) για παροχή 2,500 m <sup>3</sup> /h.....                                 | 110 |

|                                                                                                                                             |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Διάγραμμα 6-18: Προφίλ G-L Pattern για ρευστό σύστασης 75%(H <sub>2</sub> S)/25%(CO <sub>2</sub> ) για παροχή 10,000 m <sup>3</sup> /h..... | 110 |
| Διάγραμμα 6-19: Προφίλ P/T για σύσταση 50%(H <sub>2</sub> S)/50%(CO <sub>2</sub> ) και παροχή 10,000 m <sup>3</sup> /h .....                | 111 |

## Λίστα πινάκων

|                                                                                                                                            |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Πίνακας 2-1: Μερικές ιδιότητες του υδρόθειου και του διοξειδίου του άνθρακα (Caroll, 2010)<br>.....                                        | 19  |
| Πίνακας 2-2: Ιδιότητες κορεσμένου υγρού διοξειδίου του άνθρακα CO <sub>2</sub> (Caroll, 2010).....                                         | 23  |
| Πίνακας 2-3: Ιδιότητες κορεσμένου αέριου διοξειδίου του άνθρακα CO <sub>2</sub> (Caroll, 2010).....                                        | 24  |
| Πίνακας 2-4: Ιδιότητες κορεσμένου υγρού υδρόθειου H <sub>2</sub> S (Caroll, 2010).....                                                     | 24  |
| Πίνακας 2-5: Ιδιότητες κορεσμένου αέριου υδρόθειου H <sub>2</sub> S (Caroll, 2010).....                                                    | 25  |
| Πίνακας 3-1: Σταθερές κυβικών καταστατικών εξισώσεων (Γαγάνης , 2020).....                                                                 | 37  |
| Πίνακας 3-2: Κρίσιμες ιδιότητες και ακεντρικός παράγοντας του H <sub>2</sub> S και του CO <sub>2</sub> .....                               | 40  |
| Πίνακας 6-1: Αρχικές και τελικές πιέσεις και θερμοκρασίες για το μείγμα με σύσταση 25%<br>(H <sub>2</sub> S) - 75% (CO <sub>2</sub> )..... | 87  |
| Πίνακας 6-2: Αρχικές και τελικές πιέσεις και θερμοκρασίες για το μείγμα με σύσταση 50% -<br>50%.....                                       | 88  |
| Πίνακας 6-3: Αρχικές και τελικές πιέσεις και θερμοκρασίες για το μείγμα με σύσταση 75%<br>(H <sub>2</sub> S) - 25% (CO <sub>2</sub> )..... | 89  |
| Πίνακας 6-4: Μέσοι όροι πίεσης και θερμοκρασίας για τις διαφορετικές συστάσεις.....                                                        | 90  |
| Πίνακας 6-5: Ιδιότητες ρευστών από τον πίνακα «PHASE PROPERTIES».....                                                                      | 101 |

## Λίστα εικόνων

|                                                                                                                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Εικόνα 2-1: Απλή σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας γλύκανσης του φυσικού αερίου με αλκαλοαμίνες. (Carroll, 2010).....                                                 | 27 |
| Εικόνα 2-2: Διάγραμμα ροής της μετατροπής υδρόθειου σε στοιχειακό θείο (Encyclopedia of hydrocarbons , 2007).....                                                        | 28 |
| Εικόνα 2-3: Κόστος αποθείωσης για μια μονάδα παραγωγής φυσικού αερίου (δυναμικότητας 10 <sup>6</sup> Sm <sup>3</sup> /d) (Τασιός, 2018).....                             | 29 |
| Εικόνα 2-4: Ανάκτηση πετρελαίου για διάφορα σχήματα εισπίεσης αερίου (AlFalahy, et al., 1998).....                                                                       | 31 |
| Εικόνα 2-5: Διάγραμμα της διαδικασίας εισπίεσης όξινου αερίου (Carroll, 2010).....                                                                                       | 32 |
| Εικόνα 4-1: Τυπική διάταξη παραγωγικής γεώτρησης (Heriot Watt University, 2011).....                                                                                     | 44 |
| Εικόνα 4-2: Οι πτώσεις πίεσης σε ένα παραγωγικό σύστημα. (Heriot Watt University, 2011).....                                                                             | 44 |
| Εικόνα 4-3: Σχηματική απεικόνιση ακτινικής ροής σταθερής κατάστασης από τα άκρα του ταμιευτήρα προς τη γεώτρηση. (Α) πλάγια όψη, (Β) Κάτοψη (Guo, Liu, & Tan, 2017)..... | 46 |
| Εικόνα 4-4: Τυπική καμπύλη IPR για ταμιευτήρα πετρελαίου (Guo, Liu, & Tan, 2017).....                                                                                    | 48 |
| Εικόνα 4-5: Τυπική καμπύλη IPR για ταμιευτήρα υποκορεσμένου πετρελαίου (Κωνσταντινόπουλος, 2018).....                                                                    | 49 |
| Εικόνα 4-6: Τυπική καμπύλη IPR για ταμιευτήρα αερίου (HIS Markit).....                                                                                                   | 50 |
| Εικόνα 4-7: Σχέσεις απόδοσης εισροής ανάλογα με τη φάση του ρευστού. (Heriot Watt University, 2011).....                                                                 | 51 |
| Εικόνα 4-8: Ροή σε σωλήνα (Guo, Liu, & Tan, 2017).....                                                                                                                   | 53 |
| Εικόνα 4-9: Ταξινόμηση καθεστώτων ροής (Nema, Garimella, & Fronk, 2014).....                                                                                             | 55 |
| Εικόνα 4-10: Καμπύλη TPR για σταθερή πίεση στην κεφαλή της γεώτρησης (PetroWiki, n.d.).....                                                                              | 56 |
| Εικόνα 4-11: Κόμβοι που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία (Guo, Liu, & Tan, 2017).....                                                                                     | 59 |
| Εικόνα 4-12: Γραφική παράσταση IPR και TPR (Heriot Watt University, 2011).....                                                                                           | 60 |
| Εικόνα 4-13 Αλλαγές στην TPR και IPR αντίστοιχα.....                                                                                                                     | 62 |
| Εικόνα 5-1: Η καρτέλα "General" του PIPESIM.....                                                                                                                         | 65 |
| Εικόνα 5-2: Η καρτέλα "Tubulars" του PIPESIM.....                                                                                                                        | 65 |
| Εικόνα 5-3: Η καρτέλα "Deviation survey" του PIPESIM.....                                                                                                                | 66 |
| Εικόνα 5-4: Η καρτέλα "Downhole equipment" του PIPESIM.....                                                                                                              | 66 |
| Εικόνα 5-5: Η καρτέλα "Artificial lift" του PIPESIM.....                                                                                                                 | 67 |
| Εικόνα 5-6: Η καρτέλα "Heat transfer" του PIPESIM.....                                                                                                                   | 67 |
| Εικόνα 5-7: Η καρτέλα "Completions" του PIPESIM.....                                                                                                                     | 68 |
| Εικόνα 5-8: Η καρτέλα "Surface equipment" του PIPESIM.....                                                                                                               | 69 |

|                                                                                                                                                  |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Εικόνα 5-9: Η καρτέλα "Fluid manager" του PIPESIM.....                                                                                           | 69  |
| Εικόνα 5-10: Επιλογές για το PVT package.....                                                                                                    | 70  |
| Εικόνα 5-11: Επιλογές για τις καταστατικές εξισώσεις (EOS).....                                                                                  | 71  |
| Εικόνα 5-12: Επιλογές για τις συσχετίσεις του ιξώδους.....                                                                                       | 72  |
| Εικόνα 5-13: Επιλογές για τις συσχετίσεις του Volume shift.....                                                                                  | 73  |
| Εικόνα 5-14: Επιλογή συστατικών ρευστού.....                                                                                                     | 74  |
| Εικόνα 5-15: Εισαγωγή ποσοστιαίας σύστασης του ρευστού.....                                                                                      | 75  |
| Εικόνα 5-16: Η επιλογή «P/T profile» του PIPESIM.....                                                                                            | 76  |
| Εικόνα 5-17: Το εισαγωγικό παράθυρο του P/T profile.....                                                                                         | 76  |
| Εικόνα 5-18: Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης σε διάγραμμα.....                                                                                  | 77  |
| Εικόνα 5-19: Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης σε πίνακα.....                                                                                     | 77  |
| Εικόνα 5-20: Η επιλογή «Nodal analysis» του PIPESIM.....                                                                                         | 78  |
| Εικόνα 5-21: Εισαγωγικό παράθυρο του Nodal analysis για παραγωγική γεώτρηση.....                                                                 | 79  |
| Εικόνα 5-22: Αποτελέσματα του nodal analysis.....                                                                                                | 79  |
| Εικόνα 5-23: Επιλογή «Phase envelope» του PIPESIM.....                                                                                           | 80  |
| Εικόνα 5-24: Το εισαγωγικό παράθυρο του Phase envelope.....                                                                                      | 80  |
| Εικόνα 6-1: Δεδομένα γεώτρησης των προσομοιώσεων.....                                                                                            | 81  |
| Εικόνα 6-2: Φάκελος φάσεων και P/T προφίλ ρευστού σύστασης 75%/(H <sub>2</sub> S)/25%(CO <sub>2</sub> ), με παροχή 2,500 m <sup>3</sup> /h.....  | 98  |
| Εικόνα 6-3: Φάκελος φάσεων και P/T προφίλ ρευστού σύστασης 75%/(H <sub>2</sub> S)/25%(CO <sub>2</sub> ), με παροχή 10,000 m <sup>3</sup> /h..... | 98  |
| Εικόνα 6-4: Διερεύνηση με το «Phase envelope».....                                                                                               | 99  |
| Εικόνα 6-5: Διερεύνηση με το «Phase envelope» (2).....                                                                                           | 100 |
| Εικόνα 6-6: Διάγραμμα ταχύτητας αερίου και υγρού.....                                                                                            | 102 |
| Εικόνα 6-7: Διάγραμμα ιξώδους αερίου και υγρού.....                                                                                              | 103 |
| Εικόνα 6-8: Πίνακας αποτελεσμάτων P/T προφίλ.....                                                                                                | 103 |
| Εικόνα 6-9: Διάγραμμα προφίλ πίεσης και θερμοκρασίας του ρευστού σε σχέση με το βάθος της γεώτρησης.....                                         | 112 |



# 1 *Εισαγωγή*

## *1.1 Εισαγωγή στο όξινο αέριο*

Σε πολλούς ταμειυτήρες υδρογονανθράκων τα εμπιερόμενα ρευστά χαρακτηρίζονται από έντονη παρουσία όξινων συστατικών. Τα δυο συστατικά, που συναντώνται τακτικά στη σύσταση των υδρογονανθράκων και απαιτούν ιδιαίτερη διαχείριση, είναι το διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) και το υδρόθειο (H<sub>2</sub>S). Σε συνθήκες διαχωριστή (separator) το υδρόθειο και το διοξείδιο του άνθρακα βρίσκονται σε αέρια κατάσταση, άρα είναι αναμειγμένα στο παραγόμενο φυσικό αέριο. Το φυσικό αέριο που περιέχει μεγάλες περιεκτικότητες υδρόθειου ονομάζεται «όξινο» (sour), ενώ αντίστοιχα όταν δεν περιέχει καθόλου ή περιέχει σε πολύ μικρές ποσότητες ονομάζεται «γλυκό» (sweet). Στα όξινα, λοιπόν, αέρια είναι αναγκαία η απομάκρυνση των δύο αερίων, ώστε το παραγόμενο αέριο και πετρέλαιο να τηρούν τις προδιαγραφές της αγοράς. Το υδρόθειο απομακρύνεται λόγω της υψηλής του τοξικότητας, ενώ το διοξείδιο του άνθρακα, επειδή μειώνει την θερμογόνο ικανότητα του φυσικού αερίου. Ένας ακόμη λόγος είναι και η έντονη διαβρωτική τους ικανότητα, που μπορεί να προκαλέσει σημαντικές αλλοιώσεις και άλλα προβλήματα στο σύστημα των σωληνώσεων.

Η απομάκρυνση των δύο όξινων συστατικών γίνεται με μια διαδικασία που ονομάζεται γλύκανση (sweetening). Τα κύρια προϊόντα της γλύκανσης του φυσικού αερίου είναι το απαλλαγμένο από τις όξινες ενώσεις φυσικό αέριο (sweet gas) και το όξινο αέριο μείγμα υδρόθειου και διοξειδίου του άνθρακα (acid gas). Για τη διαδικασία της γλύκανσης υπάρχει πληθώρα μεθόδων που θα αναλυθούν σε παρακάτω ενότητα. Το σημαντικό ερώτημα, ωστόσο, που προβληματίζει τη βιομηχανία είναι η διαχείριση του εναπομείναντος όξινου αερίου. Το μείγμα H<sub>2</sub>S – CO<sub>2</sub> χαρακτηρίζεται από έντονη τοξικότητα, με αποτέλεσμα να απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή στη διαχείρισή του και να γίνει με τρόπο ασφαλές και φιλικό προς το περιβάλλον. Η πιο διαδεδομένη διαδικασία διαχείρισης του όξινου αερίου είναι η μετατροπή του υδρόθειου σε στοιχειακό θείο μέσω της τεχνολογίας CSR (Claus Sulfur Recovery). Το εναπομείναν διοξείδιο του άνθρακα είναι εν γένει αρκετά πιο εύκολο στη διαχείρισή του.

Ωστόσο, λόγω της συνεχούς πτώσης της τιμής του θείου για την εμπορική του χρήση, σε συνδυασμό με τα αυστηρά περιβαλλοντικά μέτρα ως προς τις εκπομπές αερίων, εξετάζονται και εφαρμόζονται εναλλακτικές τεχνικές διαχείρισης των όξινων αερίων. Μια από αυτές είναι η εισπίεση του όξινου αερίου εντός ταμειυτήρων υδρογονανθράκων.



## ***1.2 Εισαγωγή στην εισπίεση όξινου αερίου***

Η Εισπίεση του Όξινου Αερίου (Acid Gas Injection) είναι μια από τις νέες τεχνικές διαχείρισης, η οποία προβλέπει την εισπίεση του παραγόμενου και διαχωριζόμενου όξινου αερίου, εντός του ταμειυτήρα μέσω γεώτρησης εισπίεσης. Πέρα από τη μείωση του κόστους διαχείρισης του όξινου αερίου, επιτυγχάνεται και η αύξηση της απόληψης του πετρελαίου μέσω της διατήρησης της πίεσης του ταμειυτήρα (pressure maintenance), ή/και μέσω της πιθανής επίτευξης αναμιξιμότητας (miscibility) μεταξύ του εισπιεζόμενου αερίου και του πετρελαίου του ταμειυτήρα, η οποία βελτιώνει τις ιδιότητες του πετρελαίου (π.χ. μείωση ιξώδους) και οδηγεί σε επαύξηση της απόληψης πετρελαίου (Enhanced Oil Recovery – EOR). Ιδιαίτερη σημασία για την επίτευξη και ειδικά της πλήρους αναμιξιμότητας των δυο ρευστών έχει και η πίεση με την οποία εισπιέζεται το όξινο αέριο, και φτάνει στον τυθμένα της γεώτρησης. Το εύρος των πιέσεων αυτών καθορίζεται κατόπιν του προσδιορισμού της ελάχιστης πίεσης αναμιξιμότητας (Minimum Miscibility Pressure – MMP) του αερίου με το πετρέλαιο του ταμειυτήρα. Ουσιαστικά σε αυτή την περίπτωση, προηγείται ο προσδιορισμός της πίεσης MMP ώστε να ακολουθήσει ο προσδιορισμός των πιέσεων που θα πρέπει να υφίστανται κατά την εισπίεση.

Για τη προσομοίωση του συστήματος εισπίεσης απαιτείται η μελέτη της ροής του όξινου αερίου και κατά συνέπεια η μελέτη των μεταβολών της πίεσης και της θερμοκρασίας του κατά μήκος της γεώτρησης. Η πίεση μεταβάλλεται κατά μήκος της γεώτρησης εξ αιτίας δύο κυρίως μηχανισμών, της βαρύτητας και των τριβών. Η θερμοκρασία μεταβάλλεται λόγω των μηχανισμών μεταφοράς θερμότητας μέσω αγωγής με τον σχηματισμό πέριξ της γεώτρησης, η θερμοκρασία του οποίου μεταβάλλεται με το βάθος. Γνωρίζοντας τις συνθήκες στην κεφαλή της γεώτρησης, το λογισμικό μοντελοποίησης ροής λύνει τις διαφορικές εξισώσεις που διέπουν τη ροή, συνυπολογίζοντας τους φυσικούς μηχανισμούς που προαναφέρθηκαν (βαρύτητα, τριβές και αγωγιμότητα).

Οι αλλαγές αυτές της πίεσης και της θερμοκρασίας προκαλούν μεταβολές στην πυκνότητα και στις φάσεις του ρευστού. Αποτελεί ανάγκη επομένως, η ανάπτυξη ενός θερμοδυναμικού μοντέλου για τον υπολογισμό των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων του ρευστού, με το οποίο θα δίνεται απάντηση στα δύο σημαντικά ερωτήματα που αφορούν τον αριθμό και το είδος των φάσεων που θα υπάρχουν στο ρευστό, καθώς και την τιμή της πυκνότητας σε κάθε σημείο της ροής. Μέσω του θερμοδυναμικού μοντέλου προσδιορίζεται ο φάκελος φάσεων (phase envelope) του ρευστού, ώστε να είναι γνωστά τα ποσοστά φάσεων και η σύστασή τους σε οποιοδήποτε συνδυασμό πίεσης – θερμοκρασίας. Επίσης, με τα θερμοδυναμικά μοντέλα προσδιορίζεται και η πυκνότητα της κάθε φάσης.

### **1.3 Εισαγωγή στα θερμοδυναμικά μοντέλα**

Για την περιγραφή της θερμοδυναμικής συμπεριφοράς των κλασσικών πετρελαϊκών ρευστών χρησιμοποιείται το μοντέλο του Black Oil, όπου θεωρεί το ρευστό ως συνδυασμό δύο επιμέρους διαφορετικών ρευστών, του αερίου τανκ και του πετρελαίου τανκ (αέριο και πετρέλαιο σε συνθήκες επιφάνειας – 14.7 psia και 60 °F). Πάνω από συγκεκριμένη πίεση, η οποία εξαρτάται από τη διαθέσιμη ποσότητα αερίου, το αέριο βρίσκεται διαλυμένο μέσα στο υγρό και αρχίζει να εκλύεται μόνο όταν η πίεση πέσει κάτω από το συγκεκριμένο σημείο, που ονομάζεται σημείο φυσαλίδας (bubble point). Η αρχή του Black Oil αποτελεί σημαντική απλοποίηση στον προσδιορισμό των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων του ρευστού του ταμειυτήρα, καθώς δεν λαμβάνει υπόψη τη σύσταση του ρευστού. Στην περίπτωση ωστόσο του όξινου αερίου όπου η σύστασή του επηρεάζει άμεσα τις θερμοδυναμικές του ιδιότητες, η συμπεριφορά του δεν διέπεται από το μοντέλο του Black Oil.

Το υπολογιστικό εργαλείο που χρησιμοποιείται από την πετρελαϊκή βιομηχανία και υποστηρίζεται από τα λογισμικά προσομοίωσης ροής για τον υπολογισμό των θερμοδυναμικών δεδομένων του όξινου αερίου είναι οι κυβικές καταστατικές εξισώσεις (Equations of State – EOS). Μέσω των καταστατικών εξισώσεων, συσχετίζονται πίεση και θερμοκρασία του ρευστού με τον όγκο του. Η γνώση του όγκου συνεπάγεται τη γνώση του αριθμού, του είδους και της πυκνότητας των φάσεων που συνυπάρχουν σε δεδομένες συνθήκες πίεσης – θερμοκρασίας.

Στην παρούσα διπλωματική χρησιμοποιούνται καταστατικές εξισώσεις που περιλαμβάνονται στο εμπορικό λογισμικό προσομοίωσης της ροής του όξινου αερίου κατά μήκος της γεώτρησης. Πραγματοποιείται λοιπόν και μία αξιολόγηση στο κατά πόσο ένα εμπορικό, και όχι ερευνητικό, λογισμικό προσομοίωσης μπορεί να κατανοήσει τα θερμοδυναμικά δεδομένα που λαμβάνονται από τις καταστατικές εξισώσεις και κατά συνέπεια στο αν μπορεί να γίνει χρήση του λογισμικού για τη σωστή προσομοίωση της ροής όξινου αερίου μέσα σε γεώτρηση.

### **1.4 Εισαγωγή στις προσομοιώσεις**

Το ερώτημα που τέθηκε στο τέλος της προηγούμενης Παραγράφου, θα απαντηθεί μέσω της μελέτης των προσομοιώσεων που λάβανε χώρα στο λογισμικό προσομοίωσης πολυφασικών ροών σταθερής κατάστασης σε σωληνώσεις PIPESIM της εταιρείας Schlumberger.

Αρχικά, δημιουργείται το γεωμετρικό μοντέλο μιας κλασσικής κατακόρυφης γεώτρησης, καθώς το σχήμα έχει ελάχιστη επίπτωση στο πώς το λογισμικό επεξεργάζεται τα θερμοδυναμικά δεδομένα. Στη συνέχεια, προσδιορίζεται το θερμοδυναμικό μοντέλο του

ρευστού με βάση τις καταστατικές εξισώσεις που το διέπουν. Εισάγονται όλες οι απαραίτητες παράμετροι όπως οι ιδιότητες των επιμέρους συστατικών και οι συντελεστές αλληλεπίδρασης. Η πίεση άφιξης του όξινου αερίου στον ταμειυτήρα (στον πυθμένα της γεώτρησης) θεωρείται γνωστή, καθώς έχει προαποφασιστεί από τους Μηχανικούς του ταμειυτήρα ανάλογα το σκοπό για τον οποίο προορίζεται. Επίσης, θεωρείται γνωστή η θερμοκρασία άφιξης του όξινου αερίου στην κεφαλή της γεώτρησης, καθώς αυτή εξαρτάται από το επιφανειακό δίκτυο που μεταφέρει το όξινο αέριο από το σημείο διαχωρισμού του, μέχρι την κεφαλή της γεώτρησης. Τέλος, η διαθέσιμη παροχή του όξινου αερίου είναι επίσης προκαθορισμένη και γνωστή, καθώς εξαρτάται από τη διαθεσιμότητά του.

Με βάση τα παραπάνω, το λογισμικό προσδιορίζει την απαιτούμενη πίεση στην κεφαλή της γεώτρησης και τη θερμοκρασία άφιξης του όξινου αερίου στον πυθμένα της γεώτρησης, προσδιορίζοντας αναλυτικά τη ροή κατά μήκος της γεώτρησης.

Τελευταίο βήμα αποτελεί η διερεύνηση των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων. Σκοπό αποτελεί ο προσδιορισμός του κατά πόσο το λογισμικό έχει αντιμετωπίσει σωστά το θερμοδυναμικό μοντέλο και έχει δώσει λογικά αποτελέσματα ή αν δεν έχει κατανοήσει πλήρως τη θερμοδυναμική συμπεριφορά, καθώς και την επίδραση που θα έχει αυτό στα αποτελέσματα.

## 1.5 Σύνοψη

Επομένως, με βάση τα παραπάνω, η συνέχεια της παρούσας διπλωματική εργασίας διαμορφώνεται ως εξής. Στο κεφάλαιο 2 γίνεται η παρουσίαση των ιδιοτήτων του όξινου αερίου και των επιμέρους συστατικών του, το υδρόθειο (H<sub>2</sub>S) και το διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>). Παρουσιάζονται, επίσης, οι διαδικασίες με τις οποίες το όξινο αέριο διαχωρίζεται από το πετρέλαιο και στη συνέχεια οι διαδικασίες για τη διαχείριση του παραγόμενου και απομονωμένου όξινου αερίου. Στο σημείο αυτό αναλύεται σαν μέθοδος η πρακτική της εισπίεσής του και παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματά της.

Στο κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται τα θερμοδυναμικά εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν για τη μελέτη της συμπεριφοράς φάσεων και της θερμοδυναμικής συμπεριφοράς του διφασικού μείγματος διοξειδίου του άνθρακα και υδρόθειου. Έμφαση δίνεται στις κυβικές καταστατικές εξισώσεις PR και SRK που χρησιμοποιούνται ευρύτατα στην πετρελαϊκή βιομηχανία.

Στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται οι εξισώσεις που διέπουν τη ροή ρευστών σε γεωτρήσεις εισπίεσης. Οι εξισώσεις αυτές αποτελούν τα μαθηματικά εργαλεία τα οποία χρησιμοποιεί το PIPESIM για τη μοντελοποίηση των ροών. Ακόμη, συζητείται η ανάλυση κόμβων και η ανάλυση ευαισθησίας, διαδικασίες που σκοπεύουν στην εποπτεία και στη βέλτιστη λειτουργία του συστήματος.

Στο κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται τα θερμοδυναμικά εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν για τη μελέτη της συμπεριφοράς φάσεων και της θερμοδυναμικής συμπεριφοράς του διφασικού μείγματος διοξειδίου του άνθρακα και υδρόθειου. Έμφαση δίνεται στις κυβικές καταστατικές εξισώσεις PR και SRK που χρησιμοποιούνται ευρύτατα στην πετρελαϊκή βιομηχανία.

Στο κεφάλαιο 5 γίνεται η εισαγωγή στο λογισμικό του PIPESIM και παρουσιάζονται τα δεδομένα της γεώτρησης και το μοντέλο του ρευστού, με βάση τα οποία στήθηκαν οι προσομοιώσεις.

Τέλος, στο κεφάλαιο 6 παρατίθενται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη μελέτη των προσομοιώσεων και τα τελικά συμπεράσματα της εργασίας.

## 2 Το Όξινο αέριο και η διαχείρισή του

Με την αύξηση της παγκόσμιας ενεργειακής ζήτησης, οι πετρελαϊκές εταιρείες ωθούνται στην εκμετάλλευση ολοένα και πιο απαιτητικών κοιτασμάτων υδρογονανθράκων, όπως εκείνων που περιέχουν σημαντικές ποσότητες θειούχων ενώσεων (με κυριότερο το υδρόθειο – H<sub>2</sub>S) ή/και διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>). Τα κοιτάσματα αυτά, γνωστά και ως όξινα κοιτάσματα (sour/acid reservoirs) απαντώνται σε αφθονία, με εκτιμήσεις του Διεθνούς Οργανισμού Ενέργειας (International Energy Agency – IEA) να δηλώνουν πως 70% και 40% των παγκόσμιων αποθεμάτων αργού πετρελαίου και φυσικού αερίου, αντίστοιχα, περιέχουν υψηλές συγκεντρώσεις οργανοθειικών ενώσεων (Duisenon, 2013).

Δεν αποτελεί έκπληξη το γεγονός ότι τα όξινα κοιτάσματα πάντοτε δημιουργούσαν προβλήματα στους παραγωγούς. Στο παρελθόν ένας ταμειυτήρας υψηλής περιεκτικότητας σε υδρόθειο δεν ήταν καθόλου ελκυστικός για την ανάπτυξη και αξιοποίησή του (Encyclopedia of hydrocarbons, 2007). Σήμερα, παραγωγοί εκμεταλλεύονται κοιτάσματα που περιέχουν μέχρι και 30% υδρόθειο. Συγκριτικά, στη χώρα μας υπάρχουν τρία βεβαιωμένα πετρελαϊκά κοιτάσματα (Πρίνος, Έψιλον και Δυτικό Κατάκολο), τα οποία, στη σύσταση του πετρελαίου, περιέχουν ποσότητες όξινων ενώσεων σε περιεκτικότητες της τάξης του 1,4 – 3,5% mol CO<sub>2</sub> και 16,5 – 40,8% mol H<sub>2</sub>S στον Πρίνο, 1,87% mol CO<sub>2</sub> και 7,31% mol H<sub>2</sub>S στο Έψιλον και περίπου 7% mol CO<sub>2</sub> και 11% mol H<sub>2</sub>S στο Δ. Κατάκολο.

Στο παρελθόν, τέτοια κοιτάσματα αποφεύγονταν για οικονομικούς λόγους. Η παρουσία του υδρόθειου επηρεάζει αρνητικά την οικονομικότητα του ταμειυτήρα για δύο κύριους λόγους. Ο πρώτος λόγος σχετίζεται με την έντονη διαβρωτική ικανότητα του όξινου αερίου, που προϋποθέτει τη χρήση ειδικών υλικών, όπως κράματα μετάλλου ανθεκτικά στη διάβρωση, πολύ ακριβότερα από τους απλούστερους χάλυβες. Ο δεύτερος λόγος αφορά την εκτενή επεξεργασία του που θα πρέπει να εφαρμοστεί, πρώτα στο πλούσιο σε οργανοθειικές ενώσεις φυσικό αέριο και έπειτα στο ίδιο το όξινο αέριο. Απόρροια των παραπάνω αποτελεί το πολύ μεγαλύτερο κόστος της εκμετάλλευσης ενός όξινου κοιτάσματος.

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται κάποιες βασικές θερμοδυναμικές και θερμοφυσικές ιδιότητες των συστατικών που απαρτίζουν το όξινο αέριο δηλαδή του CO<sub>2</sub> και του H<sub>2</sub>S αλλά και οι συνήθεις τεχνικές διαχείρισης του. (προτείνω πρώτα το CO<sub>2</sub> ως συνηθέστερο και μετά το H<sub>2</sub>S)

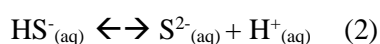
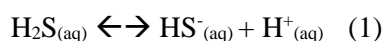
## 2.1 H<sub>2</sub>S και CO<sub>2</sub>

Οι ενώσεις H<sub>2</sub>S και CO<sub>2</sub> ανήκουν στην οικογένεια των όξινων αερίων (acid gas), δηλαδή των αερίων που στην ανάμιξή τους με το νερό δημιουργούν ασθενή οξέα. Τα όξινα διαλύματα που δημιουργούνται είναι έντονα διαβρωτικά και χρειάζονται ιδιαίτερη μεταχείριση.

### 2.1.1 H<sub>2</sub>S

Το υδρόθειο είναι ένα άχρωμο αέριο, όπου σε μικρές συγκεντρώσεις παρουσιάζει μία έντονη μυρωδιά κλούβιου αυγού, ενώ σε ψηλές συγκεντρώσεις είναι άοσμο και εύφλεκτο. Το αέριο είναι επικίνδυνο για τον άνθρωπο, με μόνο μερικά δευτερόλεπτα έκθεσης σε σχετικά χαμηλά επίπεδα συγκεντρώσεων να μπορούν να αποβούν θανάσιμα. Η επικινδυνότητα του υδρόθειου καθιστά αναγκαία την ανίχνευση και την παρακολούθησή του. Δημιουργείται σε ανοξικές συνθήκες και συνήθως ακολουθεί τον σχηματισμό του μεθανίου κατά τη διάρκεια αποσύνθεσης οργανικής μάζας.

Το υδρόθειο είναι ένα ασθενές διπρωτικό οξύ, όπου οι αντιδράσεις ιοντισμού του είναι οι εξής:

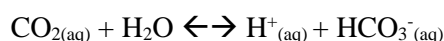


Οι αντιδράσεις λαμβάνουν χώρα σε υδατικό περιβάλλον, με το κατιόν H<sup>+</sup> να δίνει την οξύτητα στο διάλυμα. Το υδρόθειο είναι διπρωτικό, καθώς και στις δυο αντιδράσεις δημιουργείται το υδρογονοκατιόν H<sup>+</sup>.

### 2.1.2 CO<sub>2</sub>

Το διοξείδιο του άνθρακα είναι άοσμο και άχρωμο αέριο, που υπάρχει σε αφθονία στη φύση, αποτελώντας έλασσον συστατικό του ατμοσφαιρικού αέρα. Ως προϊόν της καύσης ανθρακικών υλών (ανθρώπινες δραστηριότητες), έχει συντελέσει σημαντικά στην αύξηση του ποσοστού του στον αέρα, ενώ αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα αέρια του θερμοκηπίου.

Το διοξείδιο του άνθρακα είναι και αυτό ασθενές διπρωτικό οξύ, με την πρώτη του αντίδραση να είναι υδρόλυση, ενώ η δεύτερη μια απλή αντίδραση σχηματισμού οξέος.



### 2.1.3 Βασικές θερμοδυναμικές και θερμοφυσικές ιδιότητες του όξινου αερίου

Για τη διαχείριση του όξινου αερίου είναι απαραίτητη η γνώση της συμπεριφοράς του ρευστού στις εκάστοτε συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας. Η συμπεριφορά ενός τέτοιου μίγματος

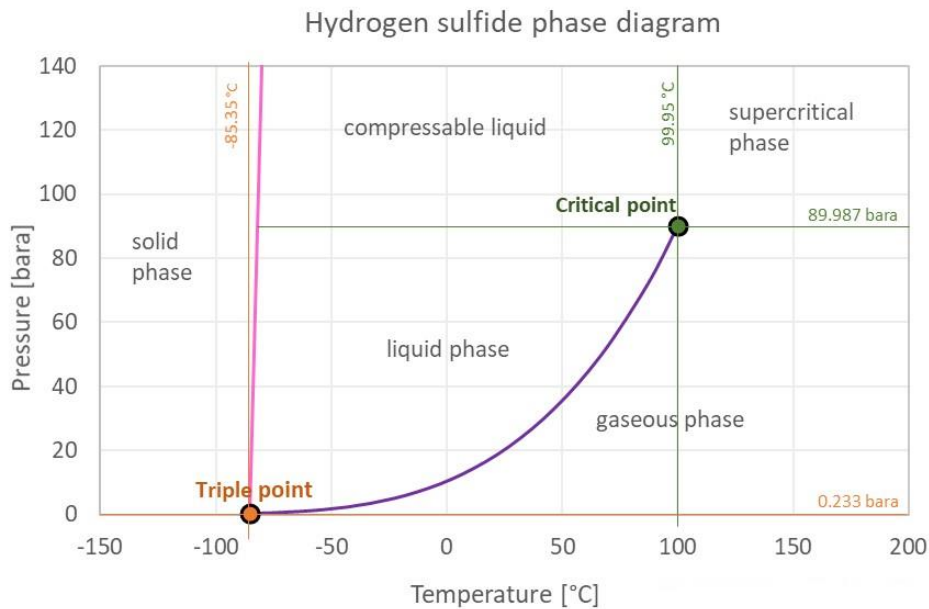
προϋποθέτει τη γνώση θερμοδυναμικών αλλά και θερμοφυσικών ιδιοτήτων των επιμέρους συστατικών ή και του μίγματος υπό μελέτη που έχουν προκύψει εργαστηριακά. Αξίζει να αναφερθεί ότι στην περίπτωση του CO<sub>2</sub> υπάρχει άφθονη βιβλιογραφία που σχετίζεται με τις ιδιότητες αυτές, ενώ στην περίπτωση του H<sub>2</sub>S αλλά και όπου συμμετέχει το H<sub>2</sub>S και ειδικά σε σημαντικό ποσοστό, η βιβλιογραφία είναι πολύ πιο περιορισμένη λόγω της τοξικότητάς του, που το καθιστούν δύσκολα διαχειρίσιμο σε εργαστηριακό επίπεδο.

Βασικό εργαλείο της θερμοδυναμικής συμπεριφοράς αποτελούν τα διαγράμματα ή φάκελοι φάσεων ή διαγράμματα πίεσης-θερμοκρασίας PT της κάθε ένωσης ή του μείγματος. Στις καθαρές ενώσεις το διάγραμμα αυτό είναι συνήθως απλή γραμμή, στα σημεία της οποίας οι δύο φάσεις συμπίπτουν. Σε μείγμα δυο ή παραπάνω συστατικών, αντί για καμπύλη, υπάρχει μια περιοχή στο διάγραμμα πίεσης – θερμοκρασίας, όπου υπάρχουν και οι δυο φάσεις.

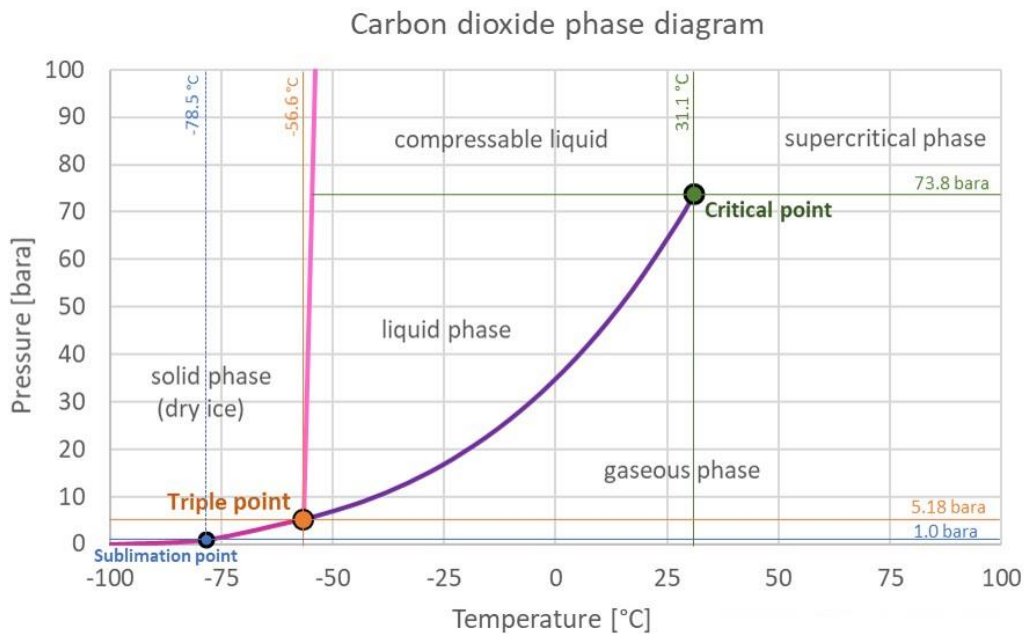
Η κατάσταση στην οποία το υγρό μόλις αρχίζει να σχηματίζεται με συμπύκνωση του αερίου ονομάζεται σημείο δρόσου (dew point). Η κατάσταση στην οποία ο ατμός μόλις αρχίζει να σχηματίζεται με εξάτμιση του υγρού ονομάζεται σημείο φυσαλίδας (bubble point). Από όλα τα σημεία δρόσου μπορεί να σχηματιστεί μια καμπύλη που δείχνει την πίεση και τη θερμοκρασία στην οποία ένα αέριο μείγμα αρχίζει να υγροποιείται. Η καμπύλη αυτή ονομάζεται καμπύλη σημείων δρόσου. Αντίστοιχα, από τα σημεία φυσαλίδας για τις διάφορες πιέσεις και θερμοκρασίες μπορεί να σχηματιστεί και η καμπύλη σημείων φυσαλίδας. Ο φάκελος φάσεων μείγματος είναι οι συνδυασμένοι γεωμετρικοί τόποι των σημείων φυσαλίδας και δρόσου, όπου το σημείο τομής τους είναι το κρίσιμο σημείο.

Το κρίσιμο σημείο αποτελεί τον συνδυασμό των συνθηκών πίεσης και θερμοκρασίας, κάτω από τις οποίες ένα ρευστό παρουσιάζει ιδιότητες ανάμεσα σε αυτές του αερίου και του υγρού. Για κάθε καθαρό συστατικό, οι συνθήκες που καθορίζουν το κρίσιμο σημείο είναι η κρίσιμη θερμοκρασία, η κρίσιμη πίεση. Κάθε ρευστό που βρίσκεται σε θερμοκρασία και πίεση πάνω από το κρίσιμο σημείο του, ονομάζεται υπερκρίσιμο ρευστό και δεν παρουσιάζει διακριτές φάσεις υγρού και αερίου. Το γεγονός αυτό αποδίδεται στο ότι σε αρκετά υψηλές θερμοκρασίες (πάνω από την κρίσιμη θερμοκρασία) η κινητική ενέργεια των μορίων είναι αρκετά υψηλή για να ξεπεράσει τις διαμοριακές δυνάμεις που θα συμπύκνωναν το ρευστό στην υγρή φάση. Από την άλλη πλευρά, αρκετά υψηλές πιέσεις (πάνω από την κρίσιμη πίεση) δεν θα επέτρεπαν στο δείγμα να παραμείνει σε καθαρή αέρια κατάσταση. Επομένως, υπάρχει μια περιοχή στο διάγραμμα πίεσης και θερμοκρασίας (υπερκρίσιμη περιοχή), όπου επιτυγχάνεται μια ισορροπία μεταξύ των δύο αυτών φάσεων και το ρευστό υπάρχει σε κατάσταση μεταξύ αερίου και υγρού (υπερκρίσιμη κατάσταση)

Στα Διαγράμματα 2-1 και 2-2 παρατίθενται οι γενικοί φάκελοι φάσεων των καθαρών ενώσεων H<sub>2</sub>S και CO<sub>2</sub> αντίστοιχα, όπου περιγράφονται οι περιοχές πίεσης και θερμοκρασίας, όπου συναντώνται σε αέρια, υγρή και στερεή φάση. Φαίνεται, επίσης, το κρίσιμο σημείο των δύο συστατικών, όπου για το H<sub>2</sub>S βρίσκεται σε συνθήκες θερμοκρασίας 99.9 °C και πίεσης 89.9 bara, ενώ για το CO<sub>2</sub> βρίσκεται σε συνθήκες θερμοκρασίας 31.1 °C και πίεσης 73.8 bara. Πάνω από τα κρίσιμα σημεία βρίσκεται η υπερκρίσιμη περιοχή.



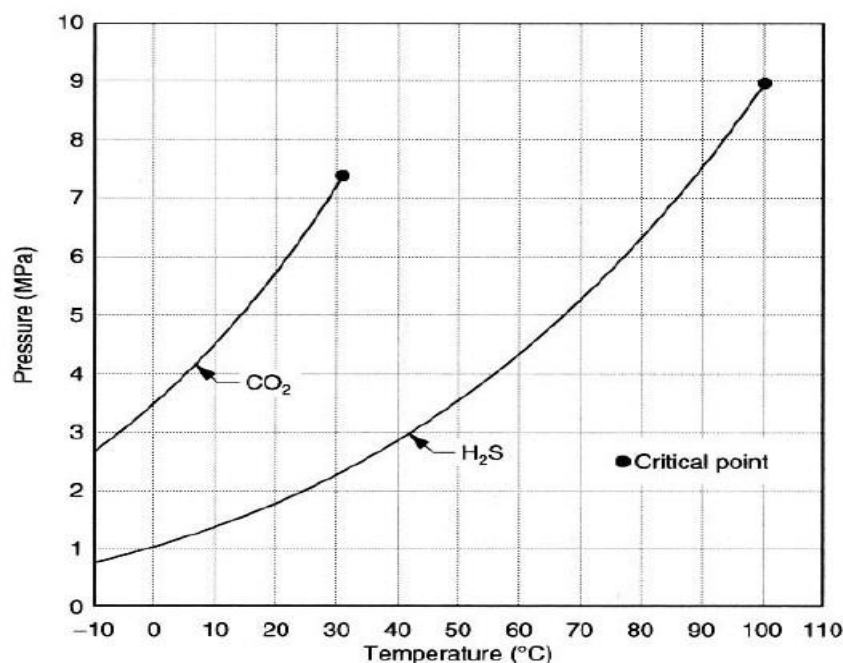
Διάγραμμα 2-1: Φάκελος φάσεων καθαρού H<sub>2</sub>S (Engineeringtoolbox site)



Διάγραμμα 2-2: Φάκελος φάσεων καθαρού CO<sub>2</sub> (Engineeringtoolbox site)



Στο Διάγραμμα 2-3 φαίνονται τα διαγράμματα PT των καθαρών συστατικών που αφορούν στις τάσεις ατμών του υδρόθειου και του διοξειδίου του άνθρακα, ενώ παρουσιάζονται και τα κρίσιμα σημεία τους. Οι τάσεις ατμών του CO<sub>2</sub> είναι υψηλότερες, καθιστώντας το περισσότερο πτητικό από το H<sub>2</sub>S. Επίσης, σημειώνεται ότι η κρίσιμη πίεση και θερμοκρασία του CO<sub>2</sub> έχουν χαμηλότερη τιμή (T<sub>c</sub>=31,1°C και P<sub>c</sub>=7,4MPa) από τις αντίστοιχες κρίσιμες τιμές του υδρόθειου (T<sub>c</sub>=100,4°C και P<sub>c</sub>= 9MPa), όπως φαίνεται στα διαγράμματα αλλά και στον Πίνακα 2-1 που συγκεντρώνει φυσικές και κρίσιμες ιδιότητες των δύο ενώσεων.



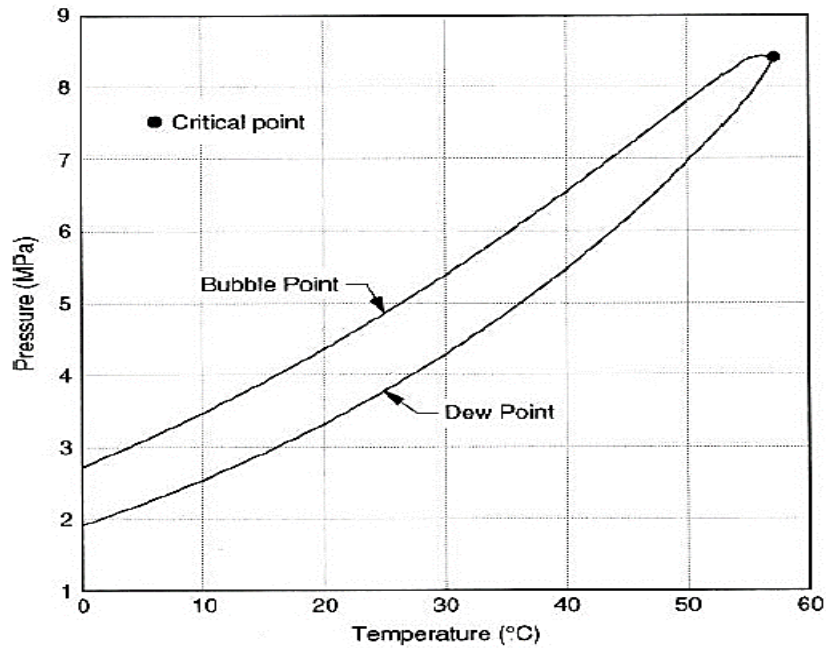
Διάγραμμα 2-3: Οι τάσεις ατμών του διοξειδίου του άνθρακα και του υδρόθειου. (Carroll, 2010)

Όπως φαίνεται στο σχήμα, τα δυο ρευστά είναι μονοφασικά εκτός από την περίπτωση των σημείων της καμπύλης, όπου συνυπάρχουν η υγρή και η αέρια φάση. Για να είναι η ουσία σε υγρή φάση, η θερμοκρασία πρέπει να είναι μικρότερη από την κρίσιμη θερμοκρασία και η πίεση πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την τάση ατμών. Για να είναι στην αέρια φάση, η πίεση πρέπει να είναι μικρότερη από την κρίσιμη πίεση και η θερμοκρασία πρέπει να είναι μικρότερη από την τάση ατμών. Εάν η πίεση είναι μικρότερη από την κρίσιμη πίεση, αλλά η θερμοκρασία είναι μεγαλύτερη από την κρίσιμη θερμοκρασία, η ουσία βρίσκεται σε αέρια φάση. Τέλος, το ρευστό βρίσκεται στην υπερκρίσιμη φάση όταν η πίεση είναι μεγαλύτερη από την κρίσιμη πίεση και η θερμοκρασία είναι μεγαλύτερη από την κρίσιμη θερμοκρασία.

|                                                                                | H <sub>2</sub> S | CO <sub>2</sub> |
|--------------------------------------------------------------------------------|------------------|-----------------|
| Molar Mass, kg/kmol                                                            | 34.082           | 44.010          |
| Critical Temperature, K                                                        | 373.5            | 304.2           |
| Critical Temperature, °C                                                       | 100.4            | 31.1            |
| Critical Pressure, MPa                                                         | 8.963            | 7.382           |
| Critical Volume, m <sup>3</sup> /kmol                                          | 0.0985           | 0.0940          |
| Critical Density, kg/m <sup>3</sup>                                            | 346              | 468             |
| Critical Compressibility,<br>(P <sub>c</sub> v <sub>c</sub> /RT <sub>c</sub> ) | 0.284            | 0.274           |
| Triple Point Temperature, K                                                    | 187.7            | 216.6           |
| Triple Point Temperature, °C                                                   | -86.5            | -56.6           |
| Triple Point Pressure, kPa                                                     | 23.2             | 518             |
| Normal Boiling Point, K                                                        | 212.8            | - <sup>†</sup>  |
| Normal Boiling Point, °C                                                       | -60.4            | - <sup>†</sup>  |
| Melting Point, K                                                               | 187.7            | - <sup>†</sup>  |
| Melting Point, °C                                                              | -85.5            | - <sup>†</sup>  |
| Enthalpy of Vaporization at<br>T <sub>b</sub> , kJ/mol                         | 18.68            | - <sup>†</sup>  |
| Enthalpy of Vaporization at<br>25°C, kJ/mol                                    | 14.08            | 5.32            |
| Gross Heating Value (Gas),<br>MJ/m <sup>3</sup>                                | 23.8             | - <sup>†</sup>  |
| Specific Gravity of Gas*, unitless                                             | 1.177            | 1.520           |

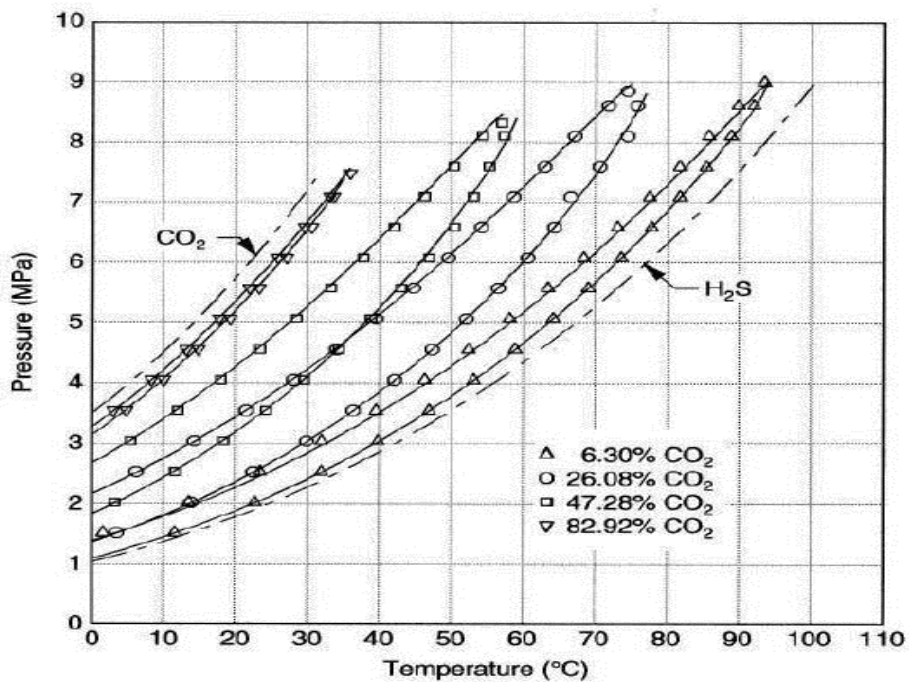
Πίνακας 2-1: Μερικές ιδιότητες του υδρόθειου και του διοξειδίου του άνθρακα (Caroll, 2010)

Στο Διάγραμμα 2-4 φαίνεται ο φάκελος φάσης για μείγμα όξινου αερίου με 50% περιεκτικότητα σε υδρόθειο και 50% περιεκτικότητα σε διοξείδιο του άνθρακα. Οποιοδήποτε σημείο στο εσωτερικό του φάκελου φάσεων, δηλαδή ανάμεσα στις καμπύλες σημείων φυσαλίδας και δρόσου, είναι σημείο δύο φάσεων. Αν οι συνθήκες του ρευστού αντιστοιχούν σε σημείο πάνω από την καμπύλη σημείων φυσαλίδας, τότε το ρευστό βρίσκεται σε υγρή κατάσταση. Στην περίπτωση που οι συνθήκες αντιστοιχούν σε σημείο κάτω από την καμπύλη σημείων δρόσου, το ρευστό είναι σε αέρια φάση. Στο σχήμα φαίνεται επίσης και το κρίσιμο σημείο (critical point), όπου στην περιοχή πάνω και δεξιά από αυτό, το ρευστό θα βρίσκεται σε υπερκρίσιμη κατάσταση.



Διάγραμμα 2-4: Φάκελος φάσεων για μείγμα όξινου αερίου σύστασης 50% σε CO<sub>2</sub> και 50% σε H<sub>2</sub>S. (Carroll, 2010)

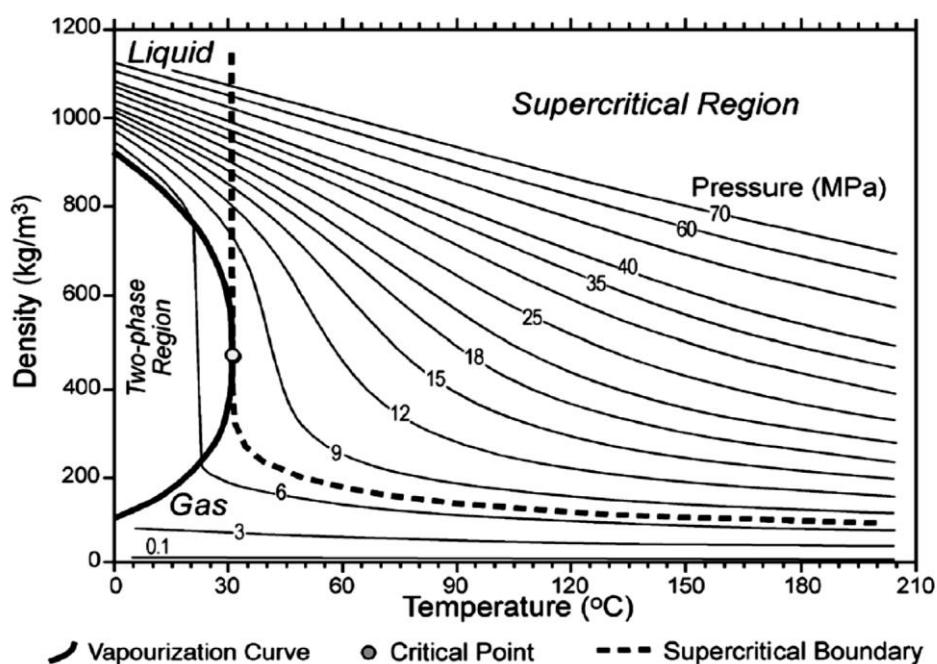
Ο παραπάνω φάκελος φάσης έχει προσδιοριστεί με χρήση της εξίσωσης Peng – Robinson, που θα αναλυθεί στο Κεφάλαιο 3 και για συγκεκριμένη σύσταση. Η επίδραση της σύστασης στις θερμοδυναμικές ιδιότητες του ρευστού φαίνεται στο Διάγραμμα 2-5, όπου απεικονίζονται φάκελοι φάσεων όξινου αερίου διαφορετικών συστάσεων. Η καταστατική εξίσωση είναι πάλι η Peng – Robinson.



Διάγραμμα 2-5: Φάκελοι φάσης για μίγματα CO<sub>2</sub> και H<sub>2</sub>S διαφορετικών συστάσεων (Carol, 2010)

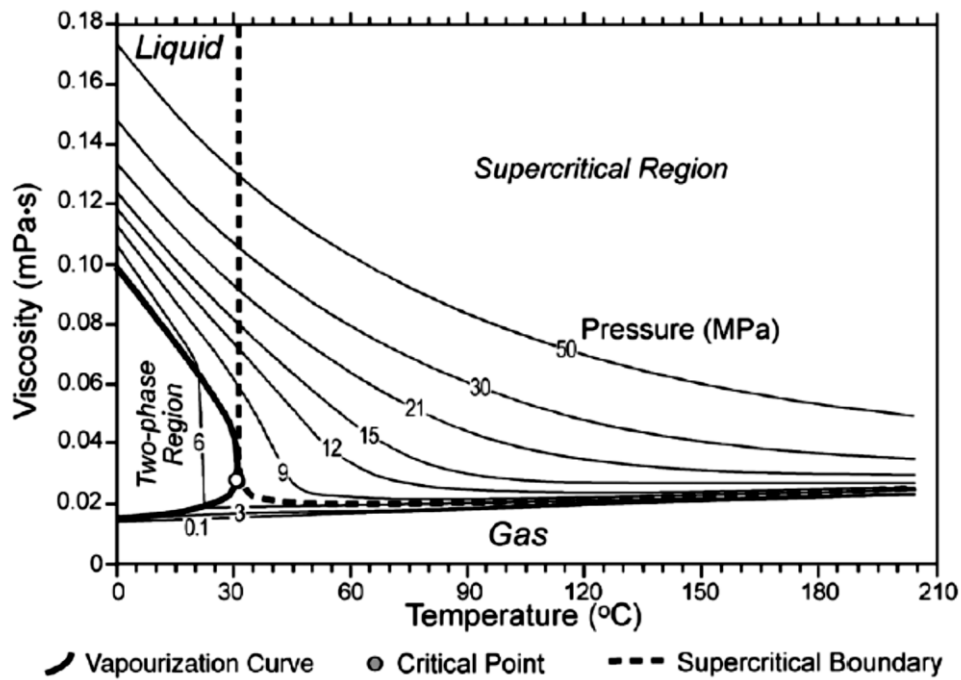
Οι τρεις φάσεις του ρευστού ενδιαφέροντος είναι η αέρια, η υγρή και η υπερκρίσιμη (ή πυκνή φάση). Η αέρια φάση χαρακτηρίζεται από υψηλή συμπιεστότητα, που σημαίνει πως η εφαρμογή πίεσης ή η μεταβολή της θερμοκρασίας έχει σημαντική επίδραση στην πυκνότητα του αερίου. Η υγρή φάση από την άλλη, είναι πολύ λιγότερο συμπιέσιμη. Για ένα πραγματικό υγρό, η πυκνότητα επηρεάζεται ελάχιστα από την πίεση και τη θερμοκρασία. Στο κρίσιμο σημείο οι ιδιότητες υγρής και αέριας φάσης γίνονται όμοιες, εφόσον πλησιάζοντας το κρίσιμο σημείο η πυκνότητα του υγρού μειώνεται, ενώ του αερίου αυξάνεται. Ένα υπερκρίσιμο ρευστό, λοιπόν, έχει χαρακτηριστικά και των δυο φάσεων. Με αποτέλεσμα να έχει υψηλή πυκνότητα, όπως ένα υγρό και ταυτόχρονα σημαντική συμπιεστότητα, όπως ένα αέριο (Carol, 2010).

Στο Διάγραμμα 2-6 παρουσιάζεται η πυκνότητα καθαρού CO<sub>2</sub> συναρτήσει της πίεσης και της θερμοκρασίας. Στο διάγραμμα φαίνεται επίσης και το κρίσιμο σημείο, δεξιά και πάνω από το οποίο βρίσκεται η υπερκρίσιμη περιοχή, που οριοθετείται από τις διακεκομμένες γραμμές. Αριστερά από το κρίσιμο σημείο βρίσκεται η καμπύλη των τάσεων ατμών του CO<sub>2</sub>, η οποία οριοθετεί την διφασική περιοχή.



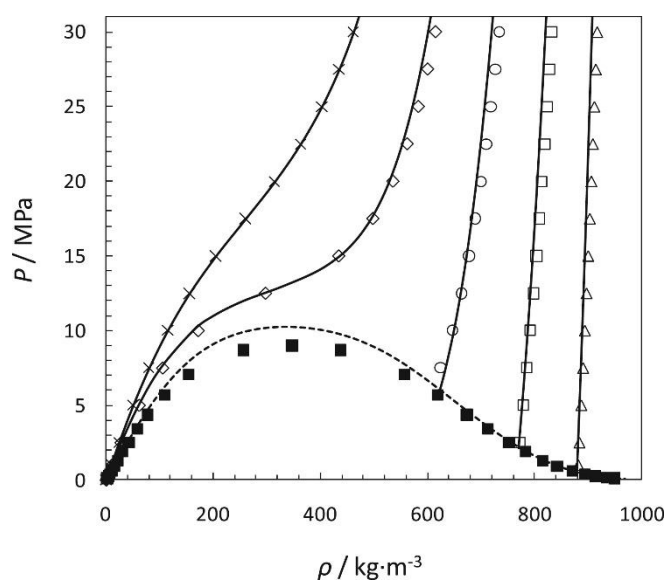
Διάγραμμα 2-6: Διάγραμμα πυκνότητας του CO<sub>2</sub> συναρτήσει της πίεσης και της θερμοκρασίας. (IPCC Special Report on Carbon dioxide Capture and Storage, 2005)

Στο Διάγραμμα 2-7, με παρόμοιο τρόπο με το παραπάνω διάγραμμα, παρουσιάζεται το ιξώδες καθαρού CO<sub>2</sub> συναρτήσει της πίεσης και της θερμοκρασίας.



Διάγραμμα 2-7: Διάγραμμα ιξώδες του CO<sub>2</sub> συναρτήσει της πίεσης και της θερμοκρασίας. (IPCC Special Report on Carbon dioxide Capture and Storage, 2005)

Αναφέρθηκε πως λόγω της τοξικότητας του H<sub>2</sub>S και κατά συνέπεια της δυσκολίας που παρουσιάζει στη διαχείρισή του σε εργαστηριακό επίπεδο, υπάρχει περιορισμένη βιβλιογραφία για τις ιδιότητές του. Στο Διάγραμμα 2-8 παρουσιάζονται οι προβλεπόμενες και οι πειραματικές τιμές του καθαρού H<sub>2</sub>S. Οι συνεχείς γραμμές είναι ισόθερμες καμπύλες υπολογισμένες με την καταστατική εξίσωση SAFT-VR Mie και η διακεκομμένη γραμμή είναι η καμπύλη τάσης ατμών. Τα σύμβολα δηλώνουν τις πειραματικές τιμές σε T = 250 K (Δ), T = 300 K (□), T = 350 K (○), T = 400 K (◇) and T = 450 K (×) και στην καμπύλη τάση ατμών (■). (Perez et al., 2016)



Διάγραμμα 2-8: Διάγραμμα πίεσης και πυκνότητας του H<sub>2</sub>S (Perez, 2016)

Στην συνέχεια, παρατίθενται πίνακες ιδιοτήτων των καθαρών CO<sub>2</sub> και H<sub>2</sub>S, σε κορεσμένη υγρή και κορεσμένη αέρια φάση, δηλαδή όταν οι δύο φάσεις συνυπάρχουν σε ισορροπία.

| Temp. (°C) | Vapor Pressure (MPa) | Density (kg/m <sup>3</sup> ) | Heat Capacity (kJ/kg·K) | Viscosity (cp) | Thermal Conduct. (W/m·K) |
|------------|----------------------|------------------------------|-------------------------|----------------|--------------------------|
| -10        | 2.649                | 983                          | 2.29                    | 0.1202         | 0.1218                   |
| -5         | 3.046                | 957                          | 2.40                    | 0.1113         | 0.1158                   |
| 0          | 3.485                | 928                          | 2.54                    | 0.1028         | 0.1097                   |
| 5          | 3.969                | 897                          | 2.73                    | 0.0904         | 0.1035                   |
| 10         | 4.502                | 862                          | 3.01                    | 0.0794         | 0.0972                   |
| 15         | 5.086                | 821                          | 3.44                    | 0.0702         | 0.0907                   |
| 20         | 5.728                | 773                          | 4.26                    | 0.0612         | 0.0837                   |
| 25         | 6.432                | 711                          | 6.41                    | 0.5016         | 0.756                    |
| 30         | 7.211                | 595                          | 33.21                   | 0.0413         | 0.0628                   |
| 31.1       | 7.382                | 468                          | ∞                       | 0.0322         | 0.0508                   |

Πίνακας 2-2: Ιδιότητες κορεσμένου υγρού διοξειδίου του άνθρακα CO<sub>2</sub> (Caroll, 2010)

| Temp. (°C) | Vapor Pressure (MPa) | Density (kg/m <sup>3</sup> ) | Heat Capacity (kJ/kg·K) | Viscosity (μρ) | Thermal Conduct. (W/m·K) |
|------------|----------------------|------------------------------|-------------------------|----------------|--------------------------|
| -10        | 2.649                | 71.3                         | 1.55                    | 149            | 0.0177                   |
| -5         | 3.046                | 83.5                         | 1.71                    | 152            | 0.0188                   |
| 0          | 3.485                | 97.8                         | 1.92                    | 155            | 0.0200                   |
| 5          | 3.969                | 114.8                        | 2.21                    | 162            | 0.0214                   |
| 10         | 4.502                | 135.4                        | 2.62                    | 172            | 0.0231                   |
| 15         | 5.086                | 161                          | 3.29                    | 183            | 0.0250                   |
| 20         | 5.728                | 194                          | 4.57                    | 198            | 0.0279                   |
| 25         | 6.432                | 243                          | 7.97                    | 218            | 0.0319                   |
| 30         | 7.211                | 344                          | 47.5                    | 267            | 0.0402                   |
| 31.1       | 7.382                | 468                          | ∞                       | 322            | 0.0508                   |

Πίνακας 2-3: Ιδιότητες κορεσμένου αερίου διοξειδίου του άνθρακα CO<sub>2</sub> (Caroll, 2010)

| Temp. (°C) | Vapor Pressure (MPa) | Density (kg/m <sup>3</sup> ) | Heat Capacity (kJ/kg·K) | Viscosity (cp) | Thermal Conduct. (W/m·K) |
|------------|----------------------|------------------------------|-------------------------|----------------|--------------------------|
| -10        | 0.754                | 856                          | 2.02                    | 0.167          | 0.198                    |
| 0          | 1.024                | 835                          | 2.05                    | 0.152          | 0.181                    |
| 10         | 1.358                | 813                          | 2.10                    | 0.139          | 0.165                    |
| 20         | 1.767                | 790                          | 2.18                    | 0.127          | 0.150                    |
| 30         | 2.58                 | 465                          | 2.29                    | 0.116          | 0.137                    |
| 40         | 2.841                | 738                          | 2.44                    | 0.104          | 0.124                    |
| 50         | 3.525                | 710                          | 2.64                    | 0.0934         | 0.112                    |
| 60         | 4.320                | 677                          | 2.93                    | 0.0819         | 0.100                    |
| 70         | 5.234                | 640                          | 3.37                    | 0.0700         | 0.082                    |
| 80         | 6.277                | 596                          | 4.14                    | 0.0575         | 0.067                    |
| 90         | 7.459                | 539                          | 5.81                    | 0.0440         | 0.053                    |
| 100.4      | 8.963                | 346                          | ∞                       | 0.0255         | 0.030                    |

Πίνακας 2-4: Ιδιότητες κορεσμένου υγρού υδρόθειου H<sub>2</sub>S (Caroll, 2010)

| Temp. (°C) | Vapor Pressure (MPa) | Density (kg/m <sup>3</sup> ) | Heat Capacity (kJ/kg·K) | Viscosity (μρ) | Thermal Conduct. (W/m·K) |
|------------|----------------------|------------------------------|-------------------------|----------------|--------------------------|
| -10        | 0.754                | 12.8                         | 1.15                    | 113            | 0.0124                   |
| 0          | 1.024                | 17.1                         | 1.19                    | 121            | 0.0132                   |
| 10         | 1.358                | 22.4                         | 1.23                    | 124            | 0.0140                   |
| 20         | 1.767                | 28.9                         | 1.29                    | 127            | 0.0148                   |
| 30         | 2.58                 | 37.0                         | 1.36                    | 133            | 0.0156                   |
| 40         | 2.841                | 46.7                         | 1.45                    | 141            | 0.0164                   |
| 50         | 3.525                | 58.7                         | 1.56                    | 149            | 0.0173                   |
| 60         | 4.320                | 73.6                         | 1.73                    | 155            | 0.0182                   |
| 70         | 5.234                | 92.3                         | 1.98                    | 161            | 0.0192                   |
| 80         | 6.277                | 116.6                        | 2.42                    | 169            | 0.021                    |
| 90         | 7.459                | 150.5                        | 3.43                    | 189            | 0.022                    |
| 100.4      | 8.963                | 346                          | ∞                       | 255            | 0.030                    |

Πίνακας 2-5: Ιδιότητες κορεσμένου αερίου υδρόθειου H<sub>2</sub>S (Caroll, 2010)

Η τιμή του απείρου της θερμοχωρητικότητας φαίνεται ασυνήθιστη, αλλά αυτό ισχύει για όλες τις καθαρές ουσίες. Αυτό έχει παρατηρηθεί πειραματικά και μπορεί να αποδειχθεί χρησιμοποιώντας τις αρχές της κλασσικής θερμοδυναμικής. Ωστόσο, παρόλο που η θερμική ικανότητα είναι άπειρη, η ενθαλπία είναι πεπερασμένη (Caroll, 2010).

## 2.2 Διαχείριση όξινου αερίου

Η διαχείριση του όξινου αερίου που παράγεται και διαχωρίζεται στην επιφάνεια κατά την παραγωγή υδρογονανθράκων αποτελεί ένα θέμα που απασχολεί την πετρελαϊκή βιομηχανία επί δεκαετίες. Η συνήθης πρακτική περιλαμβάνει την διεργασία της γλύκανσης του παραγόμενου φυσικού αερίου και της μετατροπής του σε στοιχειακό θείο. Όπως προαναφέρθηκε οι αλλαγές στην αγορά του θείου και οι αυστηρότερες περιβαλλοντικές απαιτήσεις ως προς τις εκπομπές αερίων ρύπων, έχουν οδηγήσει στην ανάπτυξη τεχνολογιών εισπίεσης αυτού είτε εντός του ίδιου ταμειυτήρα για επαύξηση απόληψης πετρελαίου είτε σε παρακείμενους υπεδαφικούς σχηματισμούς ή/και υδροφόρους ορίζοντες. Οι τεχνικές αυτές αναπτύχθηκαν σημαντικά στη Βόρεια Αμερική και ειδικά στον Καναδά.



Στη συνέχεια της ενότητας παρουσιάζεται συνοπτικά η διεργασία της γλύκανσης του φυσικού αερίου όπως προκύπτει από την παραγωγή υδρογονανθράκων και της μετατροπής του όξινου αερίου σε στοιχειακό θείο, αλλά και της εισπίεσης του όξινου αερίου.

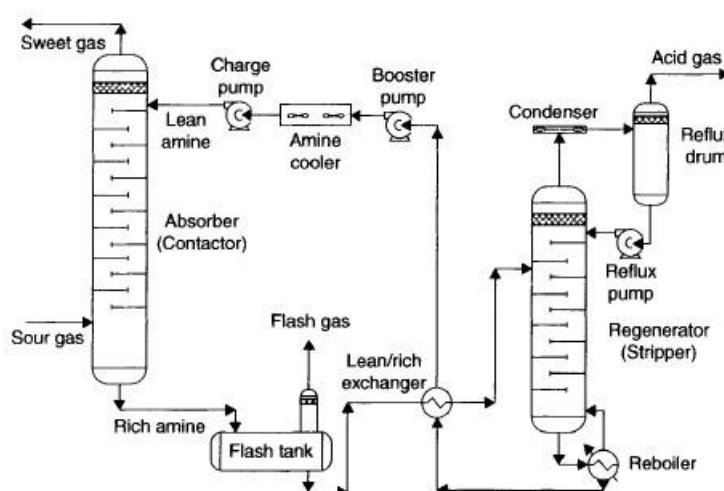
### **2.2.1 Γλύκανση φυσικού αερίου**

Ο καθαρισμός του όξινου ακατέργαστου φυσικού αερίου, δηλαδή ο διαχωρισμός των οργανοθειικών ενώσεων από το φυσικό αέριο, πραγματοποιείται με τη χρήση τεχνικών που διαφοροποιούνται ως προς το μέσο προσρόφησης των ενώσεων αυτών. Μερικές από τις τεχνικές χρησιμοποιούν:

- Αμίνες
- Μembrάνες
- Θερμό ανθρακικό κάλιο
- Φυσικοί διαλύτες
- Μικτοί διαλύτες

Η πιο συνήθης τεχνική που χρησιμοποιείται βασίζεται στις αλκαλοαμίνες, οι οποίες χωρίζονται σε primary, secondary και tertiary αμίνες, ανάλογα με το πόσοι άνθρακες συνδέονται με το άτομο άζωτου στα μόριά τους (ένας, δύο και τρεις αντίστοιχα). Οι αλκαλοαμίνες είναι, λοιπόν, οργανικές ενώσεις που μοιάζουν με την αμμωνία. Όταν διαλύονται στο νερό σχηματίζουν αδύναμες βάσεις, οι οποίες αντιδρούν με τα οξέα που σχηματίζονται όταν τα H<sub>2</sub>S και CO<sub>2</sub> διαλύονται στο νερό. Αυτή η όξινο-βασική αντίδραση ενισχύει σημαντικά τη διαλυτότητα των όξινων αερίων. Επειδή οι αλκαλοαμίνες είναι αδύναμες βάσεις, η διαδικασία μπορεί να αντιστραφεί. Όταν τα διαλύματα θερμαίνονται, τα όξινα αέρια απελευθερώνονται και ανακτάται ο διαλύτης.

Η διαδικασία δέσμευσης του όξινου αερίου πραγματοποιείται σε δύο στάδια: (1) στάδιο απορρόφησης και (2) στάδιο ανάκτησης. Το πρώτο στάδιο πραγματοποιείται σε στήλη απορρόφησης στην οποία το όξινο αέριο έρχεται σε επαφή με τον διαλύτη. Ο πλούσιος πλέον σε όξινα αέρια διαλύτης αποστέλλεται σε μια δεύτερη στήλη από όπου και ανακτάται. Η θερμότητα παρέχεται στο σύστημα μέσω ενός αναβραστήρα ενώ τα τελικά προϊόντα κορυφής συμπυκνώνονται συνήθως σε ψύκτη. Η ανάκτηση του διαλύτη γίνεται σε υψηλή θερμοκρασία και σε χαμηλή πίεση (Caroll, 2010). Η παραπάνω διαδικασία απεικονίζεται στην Εικόνα 2-1.



Εικόνα 2-1: Απλή σχηματική απεικόνιση της διαδικασίας γλύκανσης του φυσικού αερίου με αλκαλοαμίνες. (Carroll, 2010)

## 2.2.2 Η διαδικασία ανάκτησης θείου Claus (Claus Sulfur Recovery)

Η ανάκτηση θείου αναφέρεται στη μετατροπή του υδρόθειου (H<sub>2</sub>S) σε στοιχειακό θείο. Το στοιχειακό αυτό θείο οι πετρελαϊκές το προωθούν στην αγορά, συνήθως σε βιομηχανίες λιπασμάτων, για να ελαχιστοποιήσουν τα έξοδα της επεξεργασίας. Υπάρχουν πολλές τεχνολογίες ανάκτησης θείου διαθέσιμες για διαφορετικές εφαρμογές, ωστόσο η πιο κοινή μέθοδος μετατροπής που χρησιμοποιείται είναι η ανάκτηση Claus, η οποία παρουσιάζει ποσοστά ανάκτησης 95 έως 98 % της ροής τροφοδοσίας υδρόθειου.

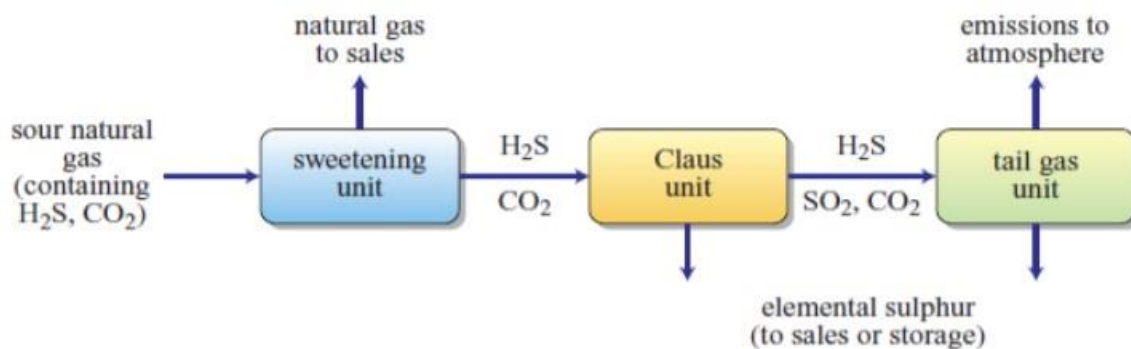
Η μονάδα ανάκτησης θείου (sulfur recovery unit, SRU) βασίζεται στην τροποποιημένη διαδικασία Claus, η οποία είναι μια διεργασία δύο βημάτων: 1) Ένα μέρος του συνολικού H<sub>2</sub>S υπόκειται σε θερμική οξείδωση σε κλίβανο αντίδρασης για να σχηματίσει SO<sub>2</sub>. 2) Το εναπομείναν H<sub>2</sub>S και το SO<sub>2</sub> αντιδρούν καταλυτικά, με βέλτιστη αναλογία 2:1, για να σχηματίσουν στοιχειακό θείο (S<sub>x</sub>) και νερό (αντίδραση Claus). Ο σχηματισμός του στοιχειακού θείου γίνεται σύμφωνα με τις παρακάτω αντιδράσεις:

1.  $\text{H}_2\text{S} + 3/2\text{O}_2 \rightarrow \text{SO}_2 + \text{H}_2\text{O}$
2.  $2 \text{H}_2\text{S} + 3\text{SO}_2 \rightarrow (3/x)\text{S}_x + 2\text{H}_2\text{O}$

Μετά από κάθε καταλυτικό στάδιο, το υγρό θείο ανακτάται στους συμπυκνωτές Claus. Το υπόλοιπο H<sub>2</sub>S και SO<sub>2</sub>, που δεν αντιδρούν, στη συνέχεια προχωρούν στο επόμενο στάδιο, όπου η αντίδραση Claus περιορισμένης ισορροπίας συνεχίζεται παρουσία καταλύτη Claus.

Οι μονάδες επεξεργασίας αερίου και τα διυλιστήρια πετρελαίου υποχρεούνται να ανακτούν μεταξύ 95 και 99,99 % του συνολικού θείου που εισάγεται στην SRU. Μια συμβατική SRU 2

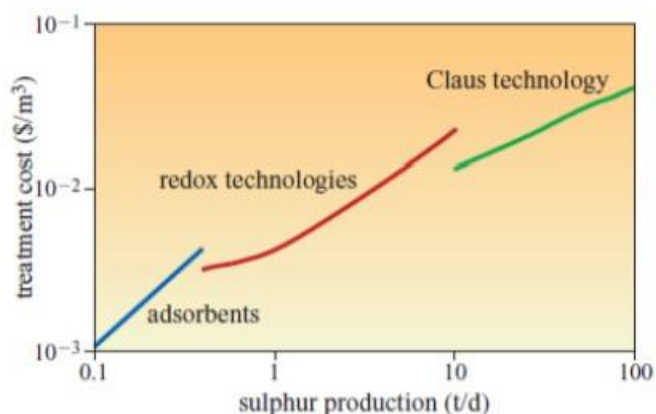
σταδίων, με δύο αντιδραστήρες Claus, αναμένεται συνήθως να ανακτήσει περισσότερο του 96% του υδρόθειου. Για μια SRU 3 σταδίων, το ποσοστό αντίστοιχα εκτιμάται περισσότερο του 98%. Είναι σύνηθες να υπάρχει και μια μονάδα καθαρισμού των απαερίων (Tail Gas Unit, TGPU) (Sulfur Recovery Engineering Inc., 2019). Η επεξεργασία του όξινου αερίου που περιλαμβάνει τη γλύκανση, τη μονάδα Claus και τη μονάδα επεξεργασίας των απαερίων παρουσιάζεται στην Εικόνα 2-2.



Εικόνα 2-2: Διάγραμμα ροής της μετατροπής υδρόθειου σε στοιχειακό θείο (Encyclopedia of hydrocarbons , 2007)

Μόλις το H<sub>2</sub>S μετατραπεί σε θείο, το υπόλοιπο διοξείδιο του άνθρακα συνήθως εκπέμπεται στην ατμόσφαιρα. Οι μονάδες Claus μπορεί να είναι αρκετά αποτελεσματικές, αλλά δυστυχώς εκπέμπουν επίσης σημαντικές ποσότητες ενώσεων θείου. Για παράδειγμα, μια μονάδα Claus που επεξεργάζεται 10 εκατομμύρια κυβικά πόδια υδρόθειου την ημέρα (10 MMSCFD H<sub>2</sub>S) και μετατρέποντας το 99.9% του H<sub>2</sub>S σε στοιχειώδες θείο (το οποίο είναι δυνατό μόνο με την προσθήκη μονάδας καθαρισμού απαερίων) εκπέμπει 0.01 MMSCFD ή περίπου 0.4 τόνους θείου /ημέρα στην ατμόσφαιρα.

Η διαδικασία ανάκτησης θείου με μονάδες Claus, εκτός του ότι έχει περιβαλλοντικό αποτύπωμα, έχει άλλο ένα σημαντικό μειονέκτημα. Σε ταμιευτήρες με μικρές περιεκτικότητες H<sub>2</sub>S (<15%) η χρήση της μετατροπής Claus δεν είναι οικονομική. Στη θέση της εφαρμόζονται άλλες διαδικασίες, όπως διεργασίες οξειδοαναγωγής, χρήση προσροφητικών μέσων ή βακτηρίων και διεργασίες καταλυτικής οξείδωσης. Στο Διάγραμμα 2-3 δίνεται ενδεικτικά η οικονομική εφικτότητα χρήσης της κάθε τεχνολογίας σε σχέση με την αναμενόμενη παραγωγή θείου, όπου αποτυπώνεται ότι η χρήση της τεχνολογίας Claus είναι οικονομική για παραγωγή θείου μεγαλύτερη των 10 t/ημέρα (Carol, 2010).



Εικόνα 2-3: Κόστος αποθείωσης για μια μονάδα παραγωγής φυσικού αερίου (δυναμικότητας 10<sup>6</sup> Sm<sup>3</sup>/d) (Τασιός, 2018)

Η επιλογή της μεθόδου Claus λοιπόν, μπορεί να γίνει μόνο σε περιοχές εκτεταμένων κοιτασμάτων με μεγάλες περιεκτικότητες σε H<sub>2</sub>S (15-80%) και διαχειριζόμενες από μεγάλους παραγωγούς. Οι μικροί παραγωγοί δεν μπορούν να υποστηρίξουν οικονομικά την κατασκευή μιας τέτοια μονάδας ενώ με την τρέχουσα πτώση της τιμής στην αγορά του θείου, ακόμα και οι μεγάλοι παραγωγοί βλέπουν τα κόστη της διαχείρισης του όξινου αερίου να εκτοξεύονται, οδηγώντας στην εξεύρεση εναλλακτικών τεχνικών διαχείρισης του όξινου αερίου.

### 2.2.3 Εισπίεση όξινου αερίου

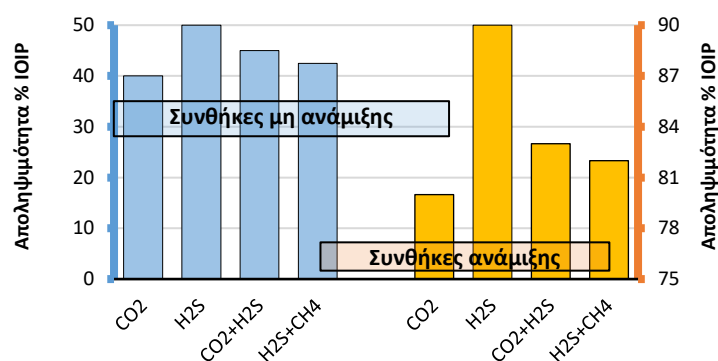
Η εισπίεση όξινου αερίου είναι από τις πιο διαδεδομένες νέες πρακτικές για τη διαχείριση των αερίων αυτών. Το όξινο αέριο συμπιέζεται και εγχέεται, συνήθως σε μη παραγωγικούς σχηματισμούς, για την ασφαλή αποθήκευσή του. Την τελευταία εικοσαετία ωστόσο, έχει χρησιμοποιηθεί εναλλακτικά για τη διατήρηση της πίεσης ενός ταμειυτήρα υδρογονανθράκων σε υψηλά επίπεδα ώστε να παρατείνουν τον παραγωγικό χρόνο ζωής του, αλλά και ως μέθοδος επαύξησης απόληψης πετρελαίου (EOR). Αυτό συμβαίνει με τον τρόπο που λειτουργεί η πιο διαδεδομένη εισπίεση διοξειδίου του άνθρακα, που αποτελεί συνηθισμένη διαδικασία τριτογενούς παραγωγής. Η χρήση του όξινου αερίου, ωστόσο, για την επαύξηση της ανάκτησης του πετρελαίου αποτελεί μια σχετικά πρόσφατη τεχνολογική εξέλιξη η οποία εφαρμόστηκε πρώτα στη Βόρεια Αμερική και σταδιακά κερδίζει έδαφος διεθνώς (η εφαρμογή της έχει προχωρήσει ήδη στον Καναδά και τα Αραβικά Εμιράτα). Αποτελεί εξέλιξη της ώριμης, όπως θεωρείται πλέον, μεθόδου CO<sub>2</sub>-EOR (CO<sub>2</sub> injection for EOR), η οποία έχει εφαρμοστεί με επιτυχία σε έργα μεγάλης κλίμακας τόσο σε συμβατικούς ταμειυτήρες πετρελαίου (Weyburn, Canada), όσο και σε ταμειυτήρες φυσικού αερίου (InSalah, Algeria). Στην Ευρώπη, ωστόσο, δεν υφίσταται ανάλογη εμπειρία παρά το γεγονός ότι αναπτύσσεται μεγάλη ερευνητική

δραστηριότητα, η οποία αποδεικνύει ότι η τεχνική δυνατότητα για επαυξημένη ανάκτηση πετρελαίου είναι πολύ σημαντική.

Η εισπίεση αερίου υπό συνθήκες ανάμιξης έγκειται στην αλληλεπίδραση του αερίου με το σύστημα πετρελαίου – πετρώματος του ταμειυτήρα, ώστε να αναπτυχθούν ευνοϊκές συνθήκες για την επαύξηση της απόληψης του πετρελαίου. Τέτοιες συνθήκες είναι η μείωση των διεπιφανειακών τάσεων μεταξύ του υπολειμματικού πετρελαίου και του πετρώματος του ταμειυτήρα, καθώς και η μείωση του ιξώδους του πετρελαίου και η διόγκωσή του. Η θερμοδυναμική ισορροπία της φάσης πετρελαίου – αερίου στον ταμειυτήρα επηρεάζεται από το εισπιεζόμενο αέριο. Αρχικά, το εισπιεζόμενο αέριο δε βρίσκεται σε ισορροπία με το πετρέλαιο, ενώ η επαφή μεταξύ των φάσεων επιφέρει αλληλομεταφορά μάζας και ως εκ τούτου αλλάζουν οι ιδιότητες των φάσεων. Η εκτόπιση του πετρελαίου φτάνει στη μέγιστη απόδοσή της, όταν οι ιδιότητες των φάσεων γίνουν θερμοδυναμικά παρόμοιες. Αυτό είναι το σημείο όπου η διεπιφάνεια μεταξύ τους εξαφανίζεται και επιτυγχάνεται η πλήρης αναμιξιμότητα τους. Σε επίπεδο πόρων, η έλλειψη της διεπιφάνειας λόγω της αναμιξιμότητας ελαχιστοποιεί το υπολειμματικό πετρέλαιο στους πόρους, επιτυγχάνοντας 100% αποδοτικότητα στην παραγωγή. Το αέριο μπορεί να παραλάβει συστατικά από τη φάση του πετρελαίου με το μηχανισμό αεριοποίησης υδρογονανθράκων και δημιουργία μηχανισμού «οδήγησης» της παραγωγής δια του προκύπτοντος αερίου μετώπου (vaporizing gas drive). Το πετρέλαιο μπορεί να παραλάβει συστατικά από τη φάση του εισπιεζόμενου αερίου με το μηχανισμό συμπύκνωσης υδρογονανθράκων και δημιουργία μηχανισμού «οδήγησης» της παραγωγής δια του προκύπτοντος αερίου μετώπου (condensing gas drive) ή μπορεί να συντρέχουν και οι δύο παραπάνω μηχανισμοί (combined vaporizing and condensing gas drive) (Παππάς, 2019).

Η ελάχιστη πίεση κατά την οποία μπορεί να επιτευχθεί αυτό το φαινόμενο μεταξύ του εισπιεζόμενου ρευστού και του πετρελαίου ονομάζεται ελάχιστη πίεση αναμιξιμότητας (minimum miscibility pressure, MMP). Η ελάχιστη πίεση αναμιξιμότητας εξαρτάται από τη σύσταση του πετρελαϊκού μείγματος και τις συνθήκες του ταμειυτήρα. Επίσης επιδρούν σημαντικά η θερμοκρασία του ταμειυτήρα, τα χαρακτηριστικά του πετρελαίου (ποσοστό πτητικών, ενδιάμεσων και βαρέων συστατικών) και η σύσταση του αερίου εισπίεσης.

Στην Εικόνα 2-6 παρουσιάζεται η διαφορά στην αποληψιμότητα που μπορεί να επιτευχθεί με συνθήκες πλήρους ανάμιξης, έναντι συνθηκών μη ανάμιξης, για διαφορετικά ρευστά εισπίεσης, όπου φαίνεται πως η διαφορά στην απόληψη είναι σχεδόν διπλάσια.



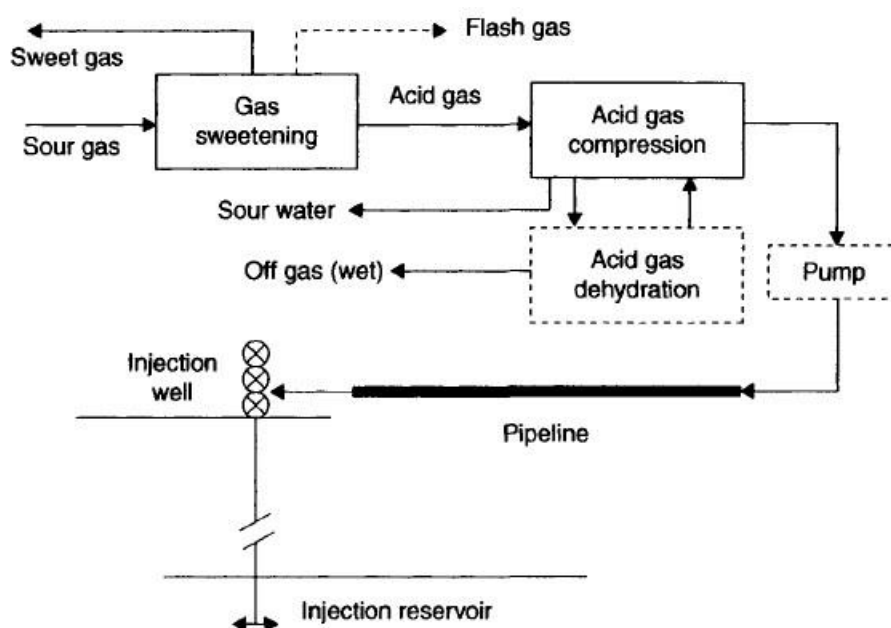
Εικόνα 2-4: Ανάκτηση πετρελαίου για διάφορα σχήματα εισπίεσης αερίου (AlFalahy, et al., 1998)

Η επιτυχία της εισπίεσης όξινου αερίου εξαρτάται άμεσα από την πίεση εισπίεσης. Αυτή θα πρέπει να εξασφαλίζει ότι το αέριο θα φτάσει με την κατάλληλη πίεση στον ταμειυτήρα, ώστε να έχει την απαιτούμενη πίεση αναμιξιμότητας, καθώς και να είναι αρκετά υψηλή ώστε να βρίσκεται το ρευστό σε υπερκρίσιμη κατάσταση για να έχει χαρακτηριστικά ανάμεσα στις δύο φάσεις (υγρή και αέρια). Το ρευστό είναι ανάγκη να βρίσκεται σε υπερκρίσιμη κατάσταση, διότι έχοντας το χαρακτηριστικό της υψηλής πυκνότητας, που παρουσιάζουν τα υγρά συνδυαστικά με το χαρακτηριστικό της υψηλής συμπιεστότητας, που παρουσιάζουν τα αέρια, είναι δυνατή η εισπίεση πολύ μεγαλύτερου όγκου ρευστού, απ' ότι αν το ρευστό βρισκόταν σε υγρή ή αέρια φάση.

Η εισπίεση του αερίου περιλαμβάνει τη λήψη του όξινου αερίου από τη στήλη ανάκτησης αμιμών, τη συμπίεση και την εισπίεσή του σε κατάλληλους ταμειυτήρες. Είναι μια διαδικασία μηδενικών εκπομπών, όπου υπό κανονικές συνθήκες λειτουργίας όλο το όξινο αέριο εισπιάζεται ξανά στον ταμειυτήρα. Το Διάγραμμα 2-6 απεικονίζει ένα διάγραμμα ροής της εισπίεσης όξινου αερίου. Ξεκινώντας από τη γλύκανση του ακατέργαστου φυσικού αερίου (gas sweetening), το παραμένον όξινο αέριο οδηγείται σε μια σειρά διεργασιών:

- 1) Συμπίεση (compression): Το αέριο συμπιέζεται σε κατάλληλη πίεση ώστε βρίσκεται σε υπερκρίσιμη κατάσταση (supercritical). Η συμπίεση γίνεται συνήθως σταδιακά μέχρι να επιτευχθεί η επιθυμητή πίεση.
- 2) Αφύγρανση (dehydration): Το ρευστό υπόκειται σε επιπλέον διαδικασία αφύγρανσης αν και εφόσον, η σχετική αφύγρανση που πραγματοποιείται στα διάφορα στάδια της συμπίεσης δεν είναι ικανοποιητική.
- 3) Μεταφορά: Μέσω σωλήνων (pipeline), το αέριο μεταφέρεται στη γεώτρηση εισπίεσης (injection well), όπου από εκεί εισπιάζεται στον ταμειυτήρα.

Στην περίπτωση που η τελική πίεση του αερίου δεν είναι η επιθυμητή, χρησιμοποιείται επιπλέον και αντλία (rump), ώστε πάντοτε να επιτυγχάνεται η κατάλληλη πίεση εισπίεσης (Caroll, 2010).



Εικόνα 2-5: Διάγραμμα της διαδικασίας εισπίεσης όξινου αερίου (Caroll, 2010)

Το ανωτέρω σύστημα εισπίεσης όξινου αερίου παρόλο που παρουσιάζει πολλές δυσκολίες στη διαχείριση του, οι οποίες θα αναλυθούν σε επόμενα κεφάλαια, παρέχει πολλά πλεονεκτήματα στους παραγωγούς. Πρώτο πλεονέκτημα που προσφέρει η εισπίεση όξινου αερίου είναι η οικονομικότητά της σε σχέση με τις άλλες μεθόδους διαχείρισης του όξινου αερίου. Δεύτερο πλεονέκτημα είναι ότι η εισπίεση του όξινου αερίου εξαλείφει την απελευθέρωση διοξειδίου του άνθρακα και υδρόθειου στην ατμόσφαιρα. Οι μονάδες Claus από την άλλη δεν επεξεργάζονται καθόλου το CO<sub>2</sub>, ενώ ακόμη και οι πιο αποτελεσματικές και σύγχρονες μονάδες εκπέμπουν μικρές ποσότητες SO<sub>x</sub>. Έτσι, πολλοί παραγωγοί, που θέλουν να είναι σύμφωνοι με τους περιβαλλοντικούς στόχους που επιβάλλονται στη λειτουργία των επιχειρήσεών τους, επιλέγουν τη μέθοδο της εισπίεσης του όξινου αερίου. Τέλος, τρίτο πλεονέκτημα που προσφέρει η μέθοδος της εισπίεσης είναι η αύξηση της απόληψης του πετρελαίου (EOR) που επιτυγχάνεται με τη διαδικασία αυτή.

Παράδειγμα πεδίων που έχει εφαρμοστεί η πρακτική της εισπίεσης όξινου αερίου αποτελεί το πεδίο Ζάμα στην Αλμπέρτα του Καναδά και του νοτίου Ομάν στην Μέση Ανατολή.

Στο πεδίο Ζάμα, το 2005, ξεκίνησε η εισπίεση όξινου αερίου περιεκτικότητας 30%(H<sub>2</sub>S)/70%(CO<sub>2</sub>) με παροχή 1.5 MMcf/day. Σύμφωνα με εκτιμήσεις που παρουσίασαν οι Davison et al. (1999), οι εκτίμηση της απόληψης του πετρελαίου που θα προκύψει από την εισπίεση του όξινου αερίου σε ταμειυτήρες του πεδίου θα φτάνει το 41%.

Στο πεδίο του νοτίου Ομάν, αφού παρήχθη το 6% των αρχικών επί τόπου αποθεμάτων πετρελαίου μέσω της πρωτογενούς απόληψης και των μηχανισμών της εκτόνωσης του υπερκείμενου αερίου καλύμματος και του διαλυμένου στο πετρέλαιο αερίου, η πίεση του ταμειυτήρα μειώθηκε από τα 531 στα 420 bar. Αρχικά, έγινε εισπίεση όξινου αερίου μείγματος (1.93% H<sub>2</sub>S, 4.05% CO<sub>2</sub>) και σε δεύτερη φάση πραγματοποιήθηκε εισπίεση όξινου αερίου μείγματος (3.07% H<sub>2</sub>S, 10.72% CO<sub>2</sub>), με το υπόλοιπο μέρος του προς εισπίεση ρευστού να αποτελείται από ελαφρείς υδρογονάνθρακες. Η πίεση του ταμειυτήρα αυξήθηκε και σταθεροποιήθηκε στα 432 bar και η παρατηρούμενη απόληψη ήταν 23.4% (10.4% και 13% αντίστοιχα στην κάθε φάση), αποδεικνύοντας της αποτελεσματικότητα της μεθόδου. (Τασιός, 2018)



# 3

## Θερμοδυναμικά εργαλεία

Η διαχείριση του όξινου αερίου και δη η εισπίεση του σε ένα ταμειυτήρα υδρογονανθράκων προϋποθέτει τη μελέτη της θερμοδυναμικής συμπεριφοράς αυτού αλλά και των θερμοφυσικών ιδιοτήτων του. Η μελέτη της θερμοδυναμικής συμπεριφοράς του ρευστού παρέχει σημαντικές πληροφορίες, όπως για:

- Το φάκελο φάσεων (phase envelope) του υπό μελέτη ρευστού και την ισορροπία φάσεων αυτού.
- Την πυκνότητα και το ιξώδες του ρευστού.

Στην περίπτωση εισπίεσης του όξινου αερίου που πραγματεύεται η παρούσα διπλωματική εργασία, το ρευστό αποτελεί μείγμα υδρόθειου και διοξειδίου του άνθρακα, η σύσταση του οποίου παίζει σημαντικό ρόλο στις θερμοδυναμικές του ιδιότητες και στη συμπεριφορά του ρευστού. Η προσομοίωση της συμπεριφοράς αυτής του ρευστού πραγματοποιείται με χρήση των καταστατικών εξισώσεων (EOS), οι οποίες αποτελούν και σημαντικά εργαλεία των προσομοιωτών της πετρελαϊκής βιομηχανίας όταν αντίστοιχα καλούνται να προβλέψουν τη συμπεριφορά ενός πετρελαϊκού ρευστού στην παραγωγική ζωή ενός ταμειυτήρα.

Στην περίπτωση της εισπίεσης του όξινου αερίου η χρήση των καταστατικών εξισώσεων προσβλέπει στην θερμοδυναμική αποτύπωση της συμπεριφοράς του ρευστού, αναπαράγοντας τον φάκελο φάσεων του ρευστού και οριοθετώντας κατ' επέκταση την υπερκρίσιμη περιοχή του ρευστού, δηλαδή το εύρος των πιέσεων και των θερμοκρασιών που θα πρέπει να επιτευχθούν για να βρίσκεται το ρευστό σε υπερκρίσιμη κατάσταση. Επίσης, προσβλέπει στην πρόρρηση της πυκνότητας του ρευστού, η οποία αποτελεί σημαντική παράμετρο της ροής του ρευστού μέσα στη γεώτρηση εισπίεσης. Πιο συγκεκριμένα, για να επιτευχθούν οι απαραίτητες πιέσεις ελέγχεται η διαφορά πίεσης ( $\Delta P$ ), από την επιφάνεια της γεώτρησης ως τον πυθμένα της, με τις εξισώσεις ροής που θα αναλυθούν στο 4<sup>ο</sup> κεφάλαιο. Στην περίπτωση του όξινου αερίου, η διαφορά πίεσης επηρεάζεται κυρίως από τον όρο που δηλώνει τη συνεισφορά της βαρύτητας. Ο συγκεκριμένος όρος εξαρτάται άμεσα από την πυκνότητα του ρευστού, η οποία λόγω των θερμοκρασιών μεταβάλλεται κατά μήκος της γεώτρησης. Έτσι λοιπόν, ο δεύτερος λόγος χρήσης των καταστατικών εξισώσεων έγκειται στην πρόρρηση της πυκνότητας και κατ' ακολουθία της πτώσης πίεσης  $\Delta P$ .

### 3.1 Καταστατικές εξισώσεις – Equations of state (EoS)

#### 3.1.1 Εισαγωγή στις καταστατικές εξισώσεις

Οι καταστατικές εξισώσεις αποτελούν μαθηματικές σχέσεις μεταξύ της πίεσης, του όγκου και της θερμοκρασίας μίας καθαρής ουσίας, όπου μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σε μείγματα με τη χρήση κατάλληλων κανόνων ανάμειξης. Η χρήση τους έγκειται στον προσδιορισμό των ογκομετρικών ιδιοτήτων και την περιγραφή της συμπεριφοράς φάσης του ρευστού. Κάποιες από τις ιδιότητες που προκύπτουν από τις καταστατικές εξισώσεις είναι:

- Οι πυκνότητες των φάσεων (υγρής και αέριας)
- Οι τάσεις ατμών των καθαρών συστατικών
- Η ισορροπία υγρής – αέριας φάσης
- Οι θερμοδυναμικές ιδιότητες (πχ. ενθαλπία, εσωτερική ενέργεια, κ.α.)

Η πιο γνωστή καταστατική εξίσωση είναι αυτή των ιδανικών αερίων, της μορφής:

$$P \cdot V_m = R \cdot T \quad (3.1.1.1)$$

με το  $V_m$  να είναι ο γραμμομοριακός όγκος και  $R$  η παγκόσμια σταθερά των αερίων. Η καταστατική εξίσωση των ιδανικών αερίων βασίζεται στην υπόθεση πως τα μόρια της ουσίας καταλαμβάνουν αμελητέο χώρο και πως δεν υπάρχουν δυνάμεις αλληλεπίδρασης μεταξύ των μορίων. Όταν πραγματεύονται πραγματικά αέρια η καταστατική εξίσωση λαμβάνει μορφή:

$$P \cdot V_m = Z \cdot R \cdot T \quad (3.1.1.2)$$

Όπου το  $Z$  είναι ο συντελεστής συμπίεστικότητας (ή απόκλισης) και εκφράζει το μέτρο της απόκλισης της συμπεριφοράς ενός πραγματικού αερίου από αυτή του ιδανικού. Ο συντελεστής συμπίεστικότητας σχετίζεται με τον προσδιορισμό του όγκου του ρευστού και κατά συνέπεια με την πυκνότητά του. Γενικότερα, οι καταστατικές εξισώσεις συνδέουν όγκο, πίεση και θερμοκρασία σε μία σχέση της μορφής  $f(P, V_m, T) = 0$ .

Από τις σημαντικότερες καταστατικές εξισώσεις και αυτές που χρησιμοποιούνται κατά κόρον από την πετρελαϊκή βιομηχανία είναι οι κυβικές καταστατικές εξισώσεις. Ο όρος κυβικές δηλώνει πως οι καταστατικές εξισώσεις αυτές αποτελούν πολυώνυμα τρίτου βαθμού ως προς το συντελεστή συμπίεστικότητας ή προς τον γραμμομοριακό όγκο. Οι κυβικές καταστατικές εξισώσεις βασίζονται στην εξίσωση Van der Waals, η οποία προσπαθεί να διορθώσει την καταστατική εξίσωση των ιδανικών αερίων, λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιότητες των πραγματικών ρευστών. Οι δύο αρχές που ακολουθεί είναι οι εξής:

1. Τα μόρια έχουν μη αμελητέο όγκο που δεν είναι προσβάσιμος από άλλα μόρια (αποκλειόμενος όγκος,  $b$ ). Άρα, ο πραγματικός γραμμομοριακός όγκος είναι  $V-b$ .

2. Υπάρχουν ελκτικές διαμοριακές δυνάμεις που ελαττώνουν την πίεση έναντι εκείνης του ιδανικού αερίου και είναι αντιστρόφως ανάλογες του τετραγώνου του γραμμομοριακού όγκου (ενδοπίεση =  $a/V^2$ )

Συνεπώς, το πλεονέκτημα που προσφέρουν οι κυβικές καταστατικές εξισώσεις είναι ότι εκφράζουν το πως επιδρούν οι διαμοριακές δυνάμεις στον καθορισμό της ογκομετρικής συμπεριφοράς ενός ρευστού. Για τις κυβικές εξισώσεις ισχύει ότι:  $P = P_R + P_A$ , όπου ο όρος  $P_R$  εκφράζει τις απωστικές και ο όρος  $P_A$  εκφράζει τις ελκτικές διαμοριακές δυνάμεις. Οι απωστικές διαμοριακές δυνάμεις αυξάνουν την πίεση, ενώ αντίθετα οι ελκτικές τείνουν να τη μειώσουν.

Οι παράμετροι  $a$  και  $b$  του Van der Waals που εισάγονται στα νέα μοντέλα των κυβικών καταστατικών εξαρτώνται άμεσα από την κρίσιμη πίεση ( $P_C$ ) και θερμοκρασία ( $T_C$ ) του συστατικού. Ακόμη, εισαγάζεται και η παράμετρος  $\omega$  που ονομάζεται ακεντρικός παράγοντας, ο οποίος είναι ένα μέτρο της μη σφαιρικότητας των μορίων ενός καθαρού συστατικού και ορίζεται σε σχέση με την τάση ατμών της. Με τη χρήση των παραπάνω παραμέτρων, η εφαρμογή των κυβικών καταστατικών εξισώσεων οδηγεί σε ικανοποιητικά αποτελέσματα για μη πολικές ενώσεις.

Μετά την εξίσωση Van der Waals, πολύ σημαντική ήταν η επινόηση της κυβικής καταστατικής εξίσωσης Redlich – Kwong (RK EOS) και στη συνέχεια η βελτίωσή της από τον Giorgio Soave, ο οποίος δημιούργησε την καταστατική εξίσωση Soave – Redlich – Kwong (SRK EOS). Στην εξίσωση SRK εισέρχεται πρώτη φορά ο ακεντρικός παράγοντας ( $\omega$ ) ως παράμετρος. Η εξίσωση βρίσκει ακόμα χρήση σε πολλούς επιστημονικούς τομείς, ωστόσο λόγω της υποεκτίμησης που δίνει στην τιμή των πυκνοτήτων απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή κατά την εφαρμογή της στην πετρελαϊκή βιομηχανία. Το 1976, οι Peng και Robinson κατά τη μελέτη τους πάνω στην SRK παρατήρησαν την αδυναμία της να προβλέπει πυκνότητες υγρής φάσης και εξήγησαν την ανάγκη βελτίωσής της. Έτσι, πρότειναν την καταστατική εξίσωση Peng – Robinson (PR EOS), που αποτελεί πλέον την εναλλακτική της SRK στη βιομηχανία πετρελαίου.

### 3.1.2 Peng – Robinson και Soave – Redlich – Kwong (PR και SRK EOS)

Οι δύο κυβικές καταστάσεις διέπονται από την εξίσωση:

$$P = \frac{R \cdot T}{v_m - b} - \frac{a}{(v_m + \delta_1 \cdot b)(v_m + \delta_2 \cdot b)} \quad (3.1.2.1)$$

Οι τιμές των παραμέτρων της εξίσωσης 5.3.2.1, για PR και SRK, δίνονται στον παρακάτω Πίνακα 4-1.

| EOS | $\delta_1$ | $\delta_2$ | $\alpha$                        | B                   |
|-----|------------|------------|---------------------------------|---------------------|
| SRK | 0          | 1          | $0,42747\alpha R^2 T_c^2 / P_c$ | $0,08664RT_c / P_c$ |

|    |              |              |                        |                   |
|----|--------------|--------------|------------------------|-------------------|
| PR | $1+\sqrt{2}$ | $1-\sqrt{2}$ | $0,45724aR^2T_c^2/P_c$ | $0,07780RT_c/P_c$ |
|----|--------------|--------------|------------------------|-------------------|

Πίνακας 3-1: Σταθερές κυβικών καταστατικών εξισώσεων (Γαγάνης, 2020)

Η παράμετρος  $a$  στον πίνακα εξαρτάται από την πίεση και είναι:

$$a(T) = \left( 1 + m \left( 1 - \sqrt{\frac{T}{T_c}} \right) \right) \quad (3.1.2.2)$$

Όπου το  $m$  είναι συνάρτηση του ακεντρικού παράγοντα  $\omega$  και βγαίνει από τις εξής εξισώσεις:

$$m = \begin{cases} 0,48 + 1,574\omega - 0,17\omega^2 & SRK \\ 0,37464 + 1,54226\omega - 0,26992\omega^2 & PR, \omega \leq 0,49 \\ 0,3796 + 1,485\omega - 0,1644\omega^2 + 0,01667\omega^3 & PR, \omega > 0,49 \end{cases} \quad (3.1.2.3)$$

Όπου:

P = πίεση

T = θερμοκρασία

R = παγκόσμια σταθερά των αερίων

$v_m$  = γραμμομοριακός όγκος

$a, b$  = παράμετροι της καταστατικής εξίσωσης

$P_c$  = κρίσιμη πίεση

$T_c$  = κρίσιμη θερμοκρασία

Όπως αναφέρθηκε στην εισαγωγή της παραγράφου, οι καταστατικές εξισώσεις έχουν αναπτυχθεί για καθαρές ενώσεις, με τις παραμέτρους  $a, b$  και  $\omega$  να είναι ξεχωριστοί για κάθε καθαρή ένωση. Σε περίπτωση που αντιμετωπίζεται μείγμα συστατικών, χρησιμοποιούνται κανόνες ανάμιξης (mixing rules), που έχουν αναπτυχθεί, ώστε να προσδιοριστούν οι παράμετροι της καταστατικής εξίσωσης για το μείγμα. Ο κλασσικός κανόνας ανάμιξης που χρησιμοποιείται στην περίπτωση μείγματος γνωστής σύστασης  $z_i$  για τον προσδιορισμό των παραμέτρων  $a$  και  $b$ , έχει ως εξής:

$$a_{mix} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n z_i z_j \sqrt{a_i a_j} (1 - k_{ij}) \quad (3.1.2.4)$$

$$b_{mix} = \sum_{i=1}^n z_i b_i \quad (3.1.2.5)$$

Ο συντελεστής δυαδικής αλληλεπίδρασης (BIP)  $k_{ij}$  λαμβάνει υπόψη την αλληλεπίδραση μεταξύ διαφορετικών συστατικών και, ειδικά για την περίπτωση ζευγών υδρογονανθράκων, συχνά εκτιμάται από τη σχέση του Prausnitz:

$$k_{ij} = 1 - \left( \frac{2v_{c_i}^{1/6} v_{c_j}^{1/6}}{v_{c_i}^{1/3} + v_{c_j}^{1/3}} \right)^\theta \quad (3.1.2.6)$$

Ο κρίσιμος γραμμομοριακός όγκος βρίσκεται από τη λύση της καταστατικής εξίσωσης των πραγματικών αερίων σε κρίσιμες συνθήκες:

$$v_c = \frac{Z_c RT_c}{P_c} \quad (3.1.2.7)$$

Όπου, συντελεστής συμπιεστότητας στο κρίσιμο σημείο για την καταστατική εξίσωση PR ισούται με 0.3074 και η παράμετρος  $\theta$  έγκειται στη κρίση του χρήστη, όπου συνήθως θέτεται στην τιμή 1.2. Να σημειωθεί πως η εξίσωση (3.1.2.6) χρησιμοποιείται μόνο για τον προσδιορισμό του  $k_{ij}$  μεταξύ συστατικών υδρογονανθράκων. Ο συντελεστής δυαδικής αλληλεπίδρασης  $k_{ij}$  μεταξύ μη υδρογονανθράκων ή μεταξύ υδρογονανθράκων και μη υδρογονανθράκων λαμβάνεται από πίνακες.

Έχοντας προσδιορίσει όλους τους απαραίτητους συντελεστές για μείγμα γνωστής σύστασης, σε συγκεκριμένη πίεση και θερμοκρασία, οι δύο κυβικές καταστατικές εξισώσεις μπορούν να λυθούν ως προς τον όγκο ( $v_m$ ). Κατά κανόνα, προτιμάται η έκφραση της εξίσωσης στην αδιάστατη μορφή της ως προς τον συντελεστή συμπιεστότητας ( $Z$ ), με  $Z = P \cdot v_m / RT$ . Οπότε οι δύο EOS παίρνουν τη μορφή:

$$Z^3 + ((\delta_1 + \delta_2 - 1)B - 1)Z^2 + (A + \delta_1 \delta_2 B - (\delta_1 + \delta_2)B(B + 1))Z - (AB + \delta_1 \delta_2 B^2(B + 1)) = 0 \quad (3.1.2.8)$$

Με τους αδιάστατους συντελεστές  $A$ ,  $B$  να υπολογίζονται ως εξής:

$$A = \frac{a_{mix} P}{(RT)^2}, \quad B = \frac{b_{mix} P}{(RT)} \quad (3.1.2.9)$$

### 3.1.3 Εξαγωγή τελικών αποτελεσμάτων και διόρθωση όγκου

Λύνοντας την εξίσωση (3.1.2.8) ενδέχεται να προκύψουν πάνω από μια λύσεις για τον συντελεστή συμπιεστότητας ( $Z$ ). Σε αυτές τις περιπτώσεις η λύση με τη μικρότερη τιμή επιλέγεται όταν το ρευστό είναι υγρό, ενώ η λύση με τη μεγαλύτερη τιμή επιλέγεται για την αέρια φάση. Ο γραμμομοριακός όγκος και η πυκνότητα υπολογίζονται ως εξής:

$$v_m = ZRT/P, \quad \rho = M \cdot P/ZRT \quad (3.1.3.1)$$

Όπου,  $M$  = το μοριακό βάρος του ρευστού.

Οι κυβικές καταστατικές εξισώσεις ακόμα και με τις αλλαγές των Peng-Robinson, συνεχίζουν να μην είναι αξιόπιστες για τον υπολογισμό πυκνότητας υγρής φάσης, με αποτέλεσμα να είναι απαραίτητη η τροποποίηση του όγκου σύμφωνα με το volume shift ή volume translation, που προτάθηκε από τον Peneloux. Με την τροποποίηση του όγκου που δίνει η καταστατική εξίσωση ( $v_m^{EOS}$ ), κατά μέγεθος ανάλογο της σύστασης του μείγματος και των χαρακτηριστικών των συστατικών του, οι εκτιμήσεις του όγκου και πυκνότητας που θα ληφθούν θα είναι πολύ πιο κοντά στα πραγματικά. Η τροποποίηση του όγκου δίνεται από την εξίσωση:

$$v_m = v_m^{EOS} - \sum_{i=1}^n z_i c_i \quad (3.1.3.1)$$

Όπου,  $z_i$  η σύσταση και  $c_i$  παράμετρος που είναι συγκεκριμένη για το κάθε συστατικό και δίνεται ως συνάρτηση της παραμέτρου του όγκου  $b$ . Ισχύει ότι:

$$s_i = c_i b_i \quad (3.1.3.2)$$

Όπου, το  $s_i$  είναι ο συντελεστής διόρθωσης γραμμομοριακού όγκου των καθαρών ενώσεων (αδιάστατη παράμετρος) και οι τιμές του δίνονται από κατάλληλους πίνακες.

Με τη διόρθωση του όγκου ( $v_m$ ) με τη διαδικασία του volume shift συνεπάγεται και η αλλαγή του συντελεστή συμπιεστότητας  $Z$ . Ο διορθωμένος συντελεστής συμπιεστότητας δίνεται από την εξίσωση:

$$Z = Z^{EOS} - \frac{P}{RT} \sum_{i=1}^n z_i c_i \quad (3.1.3.3)$$

Γνωρίζοντας, λοιπόν τον διορθωμένο συντελεστή συμπιεστότητας μπορούν εύκολα να βρεθούν οι τιμές της πυκνότητας, με μικρότερο σφάλμα, μέσω της εξίσωσης (3.1.3.1).

Για τους υπολογισμούς που πραγματοποιούνται από τις καταστατικές εξισώσεις απαιτείται η γνώση των κρίσιμων ιδιοτήτων των χημικών συστατικών που συνθέτουν το ρευστό. Η κρίσιμη πίεση ( $P_c$ ) και κρίσιμη θερμοκρασία ( $T_c$ ) για καθαρά συστατικά δίνονται από πειραματικές μετρήσεις, με πλούσια βιβλιογραφία πάνω στο κομμάτι αυτό. Ακόμη, απαραίτητη είναι και η γνώση του ακεντρικού παράγοντα ( $\omega$ ), ο οποίος προτάθηκε από τον Pitzer το 1955 ως μέτρο περιγραφής της ακεντρικότητας των μορίων της κάθε ουσίας. Για σφαιρικά μόρια ο ακεντρικός παράγοντας γίνεται σχεδόν ίσος με το 0, ενώ τα απολύτως μη σφαιρικά μόρια προσεγγίζουν τη τιμή της μονάδας. Τα μόρια των περισσοτέρων ουσιών έχουν τιμές ακεντρικού παράγοντα ανάμεσα στο 0 και στο 1.

Το PIPESIM έχοντας βιβλιοθήκες που περιέχουν τις συγκεκριμένες ιδιότητες ρευστών, δίνει τις τιμές των ιδιοτήτων των συστατικών του όξινου αερίου όπως φαίνονται στον παρακάτω Πίνακα 3-2. Παρατηρείται πως οι τιμές των κρίσιμων ιδιοτήτων είναι ίδιες με αυτές που δίνει ο Πίνακας 2-1 από το βιβλίο του Carroll.

| Χημική Ένωση     | T <sub>c</sub> (°K) | P <sub>c</sub> (bar) | ω     |
|------------------|---------------------|----------------------|-------|
| H <sub>2</sub> S | 373,6               | 89,36                | 0,1   |
| CO <sub>2</sub>  | 304,7               | 73,86                | 0,225 |

Πίνακας 3-2: Κρίσιμες ιδιότητες και ακεντρικός παράγοντας του H<sub>2</sub>S και του CO<sub>2</sub>

## 3.2 Εκτίμηση ιξώδους

Το ιξώδες είναι μια σημαντική φυσική ιδιότητα που ελέγχει τη ροή μέσω πορώδους μέσου και σωλήνων, όπου γενικά, ορίζεται ως η εσωτερική αντίσταση του ρευστού στη ροή. Υπάρχουν πολλές συσχετίσεις για τον υπολογισμό του ιξώδους σε πετρελαϊκά ρευστά, με τις συσχετίσεις που βασίζονται στην σύσταση των ρευστών να είναι οι πιο κατάλληλες για τον υπολογισμό ιξώδους σε μη υδρογονάνθρακες, όπως το όξινο αέριο.

Οι δύο συσχετίσεις ιξώδους που θα αναλυθούν είναι αυτές των Lohrenz – Bray – Clark και της Pedersen, όπου είναι και αυτές που θα χρησιμοποιηθούν στις προσομοιώσεις στο λογισμικό PIPESIM.

### 3.2.1 Συσχέτιση ιξώδους των Lohrenz – Bray – Clark

$$\mu_{ob} = \mu_o + \frac{[\alpha_1 + \alpha_2 \rho_r + \alpha_3 \rho_r^2 + \alpha_4 \rho_r^3 + \alpha_5 \rho_r^4]^4 - 0.0001}{\xi_m} \quad (3.2.1.1)$$

Με τις παραμέτρους α<sub>1</sub> μέχρι α<sub>5</sub> να είναι:

$$\alpha_1 = 0.1023$$

$$\alpha_2 = 0.023364$$

$$\alpha_3 = 0.058533$$

$$\alpha_4 = -0.040758$$

$$\alpha_5 = 0.0093324$$

Με την παράμετρο του ιξώδους του ρευστού, ξ<sub>μ</sub>:

$$\xi_m = \frac{5.4402(T_{pc})^{\frac{1}{6}}}{\sqrt{M_\alpha}(p_{pc})^{\frac{2}{3}}} \quad (3.2.1.2)$$

Με την παράμετρο ιξώδους  $\mu_o$ :

$$\mu_o = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i \mu_i \sqrt{M_i})}{\sum_{i=1}^n (x_i \sqrt{M_i})} \quad (3.2.1.3)$$

Όπου,  $\mu_i$  το ιξώδες του μεμονωμένου συστατικού, το οποίο υπολογίζεται από τις εξής εξισώσεις:

Όταν,

$$T_{ri} \leq 1.5: \mu_i = \frac{34(10^{-5})(T_{ri})^{0.94}}{\xi_i} \quad (3.2.1.4)$$

Όταν,

$$T_{ri} \geq 1.5: \mu_i = \frac{17.78(10^{-5})(T_{ri})^{0.94}[4.58T_{ri}-1.67]^{0.625}}{\xi_i} \quad (3.2.1.5)$$

Όπου,

$T_{ri}$  = μειωμένη θερμοκρασία του συντελεστή  $i$ ;  $\frac{T}{T_{ci}}$

$$\xi_i = \text{παράμετρος ιξώδους του συντελεστή } i; \xi_i = \frac{5.4402(T_{ci})^{\frac{1}{6}}}{\sqrt{M_i} (p_{ci})^{\frac{2}{3}}} \quad (3.2.1.6)$$

Και με την παράμετρο μειωμένης πυκνότητας  $\rho_r$ :

$$\rho_r = \frac{\left( \sum_{\substack{i=1 \\ i \notin C_{7+}}}^n [(x_i M_i V_{ci})] + x_{C_{7+}} V_{C_{7+}} \right) \rho_o}{M_a} \quad (3.2.1.7)$$

Όπου,

$\mu_o$  = παράμετρος ιξώδους υγρού,  $cp$

$\mu_i$  = ιξώδες του συντελεστή  $i$ ,  $cp$

$T_{pc}$  = ψευδροκρίσιμη θερμοκρασία του πετρελαίου, °R

$p_{pc}$  = ψευδροκρίσιμη πίεση του πετρελαίου,  $psia$

$M_a$  = μοριακό βάρος του μίγματος

$\rho_o$  = πυκνότητα υγρού στις επικρατούσες συνθήκες,  $\frac{lb}{ft^3}$

$x_i$  = γραμμομοριακό κλάσμα του συντελεστή  $i$

$M_i$  = μοριακό βάρος του συντελεστή  $i$

$V_{ci}$  = κρίσιμος όγκος του συντελεστή  $i$ ,  $\frac{lb}{ft^3}$

$x_{C_{7+}}$  = γραμμομοριακό κλάσμα του  $C_{7+}$

$V_{C_{7+}}$  = κρίσιμος όγκος του  $C_{7+}$ ,  $ft^3/lb - mol$



$n =$  αριθμός συντελεστών στο μίγμα

### 3.2.2 Συσχέτιση ιξώδους της Pedersen

Το ιξώδες  $\mu_{mix}(P, T)$  ενός ρευστού μείγματος σε συγκεκριμένη πίεση  $P$  και θερμοκρασία  $T$  υπολογίζεται από την σχέση:

$$\mu_{mix}(P, T) = \left(\frac{T_{c,mix}}{T_{co}}\right)^{-\frac{1}{6}} \left(\frac{P_{c,mix}}{P_{co}}\right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{MW_{mix}}{MW_o}\right)^{\frac{1}{2}} \frac{a_{mix}}{a_o} \times \mu_o \left[ \frac{P \cdot P_{co} a_o}{P_{c,mix} a_{mix}}, \frac{T \cdot T_{co} \cdot a_o}{T_{c,mix} a_{mix}} \right] \quad (3.2.2.1)$$

Όπου,

$$T_{c,mix} = \frac{\sum_i \sum_j x_i x_j \left[ \left(\frac{T_{ci}}{P_{ci}}\right)^{\frac{1}{3}} + \left(\frac{T_{cj}}{P_{cj}}\right)^{\frac{1}{3}} \right]^3 [T_{ci} T_{cj}]^{\frac{1}{2}}}{\sum_i \sum_j x_i x_j \left[ \left(\frac{T_{ci}}{P_{ci}}\right)^{\frac{1}{3}} + \left(\frac{T_{cj}}{P_{cj}}\right)^{\frac{1}{3}} \right]^3} \quad (3.2.2.2)$$

$$P_{c,mix} = \frac{8 \sum_i \sum_j x_i x_j \left[ \left(\frac{T_{ci}}{P_{ci}}\right)^{\frac{1}{3}} + \left(\frac{T_{cj}}{P_{cj}}\right)^{\frac{1}{3}} \right]^3 [T_{ci} T_{cj}]^{\frac{1}{2}}}{\left( \sum_i \sum_j x_i x_j \left[ \left(\frac{T_{ci}}{P_{ci}}\right)^{\frac{1}{3}} + \left(\frac{T_{cj}}{P_{cj}}\right)^{\frac{1}{3}} \right]^3 \right)^2} \quad (3.2.2.3)$$

# 4 *Ικανότητα απόληψης γεώτρησης*

## 4.1 *Εισαγωγή*

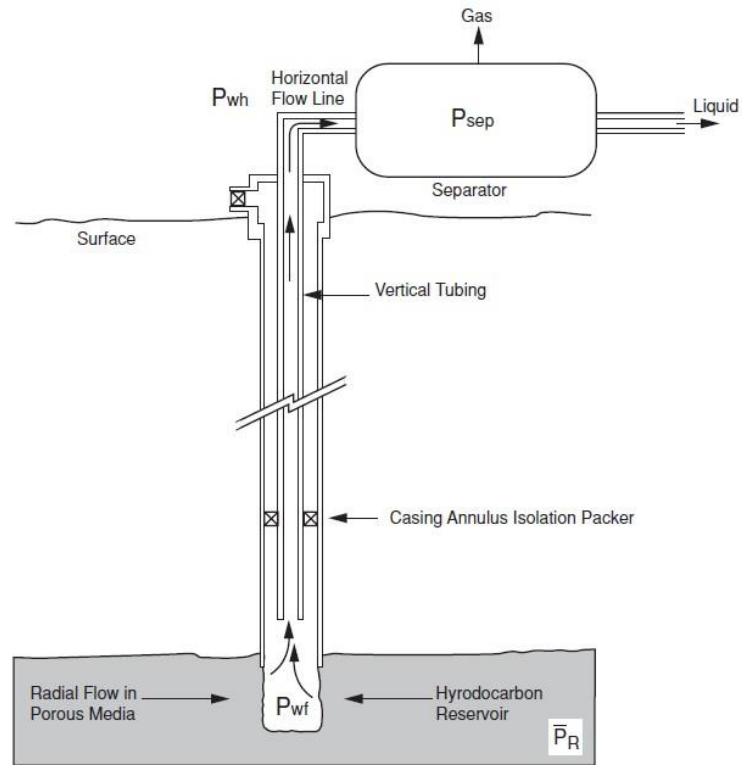
Για την πλήρη κατανόηση της διαδικασίας της εισπίεσης θα πρέπει να αναλυθούν οι τεχνικές με τις οποίες οι μηχανικοί πετρελαίου ελέγχουν και λειτουργούν τις γεωτρήσεις. Το κεφάλαιο της ικανότητας απόληψης της γεώτρησης (well deliverability) παρέχει την απαραίτητη γνώση και τον γενικότερο τρόπο σκέψης, με τον οποίο προσεγγίζεται μηχανικά ένα πρόβλημα που περιέχει κίνηση ρευστών σε ταμειυτήρα και γεώτρηση. Με την χρήση προγραμμάτων, τα οποία επιλύουν τις απαραίτητες εξισώσεις που διέπουν την κίνηση των ρευστών, όπως πχ. το PIPESIM της SCHLUMBERGER, γίνεται η μοντελοποίηση της ροής που λαμβάνει χώρα σε κάθε γεώτρηση και έτσι δίνεται η δυνατότητα της πλήρους εποπτείας των πιέσεων, των θερμοκρασιών, των παροχών και όποιων άλλων απαραίτητων στοιχείων κατά μήκος της γεώτρησης. Η εποπτεία των ανωτέρω παραμέτρων της γεώτρησης είναι απαραίτητη είτε σε συνθήκες παραγωγής είτε σε συνθήκες εισπίεσης.

Η παραγωγή μιας γεώτρησης εξαρτάται από:

- Την ικανότητα απόληψης του ταμειυτήρα και
- Την απόδοση ροής της γεώτρησης.

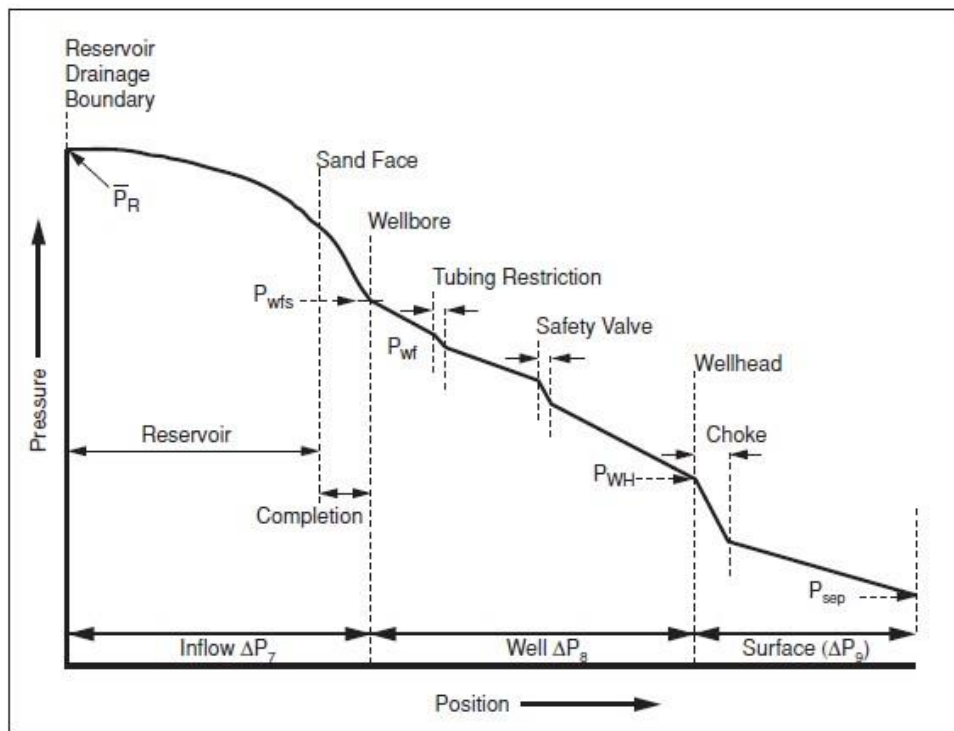
Η ικανότητα απόληψης του ταμειυτήρα εκφράζει τη δυνατότητα του ρευστού να κινηθεί μέσα στον ταμειυτήρα, ενώ η απόδοση ροής της γεώτρησης εκφράζει τη δυνατότητα του ρευστού να κινηθεί μέσα στη σωλήνωση της γεώτρησης.

Το αποτελούμενο από υδρογονάνθρακες ρευστό, λόγω της υψηλής πίεσης του υπεδαφικού σχηματισμού, ρέει από τα όρια του ταμειυτήρα προς τη γεώτρηση και μέσω του παραγωγικού σωλήνα (tubing) φτάνει στους οριζόντιους σωλήνες ροής (horizontal flow line). Στη συνέχεια οδηγείται στους διαχωριστές (separators), για να γίνει ο τελικός διαχωρισμός αερίου-υγρού και να αποκτηθούν τα τελικά προϊόντα παραγωγής σε πρότυπες συνθήκες στο σημείο πώλησης (sales point). Η πίεση των ρευστών, από την υψηλή αρχική πίεση μέσα στο πορώδες πέτρωμα, φτάνει τελικά σε οριοθετημένη από τους μηχανικούς χαμηλή πίεση στους διαχωριστές, μέσω μιας σειράς επιμέρους βημάτων πτώσεων πίεσης, όπως απεικονίζεται σχηματικά στην Εικόνα 4-1. Επομένως, η πίεση είναι η κινητήριος δύναμη του ρευστού προκειμένου να εξέλθει στην επιφάνεια του εδάφους. (Heriot Watt University, 2011)



Εικόνα 4-1: Τοπική διάταξη παραγωγικής γεώτρησης (Heriot Watt University, 2011)

Οι τρεις αυτές κατηγορίες απεικονίζονται στην Εικόνα 4-2 στα ΔΡ 7,8 και 9, αντίστοιχα.



Εικόνα 4-2: Οι πτώσεις πίεσης σε ένα παραγωγικό σύστημα. (Heriot Watt University, 2011)

## 4.2 Ικανότητα απόληψης ταμιευτήρα

Η ικανότητα απόληψης ταμιευτήρα (reservoir deliverability) ορίζεται ως ο ρυθμός παραγωγής πετρελαίου ή φυσικού αερίου ( $q$ ) που μπορεί να επιτευχθεί για δεδομένη πίεση στον πυθμένα της γεώτρησης ( $P_{wf}$ ). Στην πράξη, ωστόσο, δηλώνει το κατά πόσο υπάρχει η δυνατότητα κίνησης του ρευστού μέσα στον ταμιευτήρα. Ειδικότερα, είναι ο όρος που δηλώνει το αν και σε ποιο βαθμό, η πίεση που προωθεί το ρευστό προς τις παραγωγικές γεωτρήσεις μπορεί να υπερβεί τις απώλειες πίεσης λόγω τριβών που συμβαίνουν εξαιτίας της ιξώδους ροής των ρευστών μέσα στο σχηματισμό. Η ικανότητα απόληψης ταμιευτήρα εκφράζει το τελικό αποτέλεσμα από τη σύνθεση των δύο αυτών παραγόντων.

Αποτελεί δε παράγοντα που επηρεάζει σημαντικά την ολική ικανότητα απόληψης της γεώτρησης, ενώ παράλληλα καθορίζει τους τύπους ολοκλήρωσης (completion) και τις μεθόδους τεχνητής ανύψωσης (artificial lift) που θα χρησιμοποιηθούν.

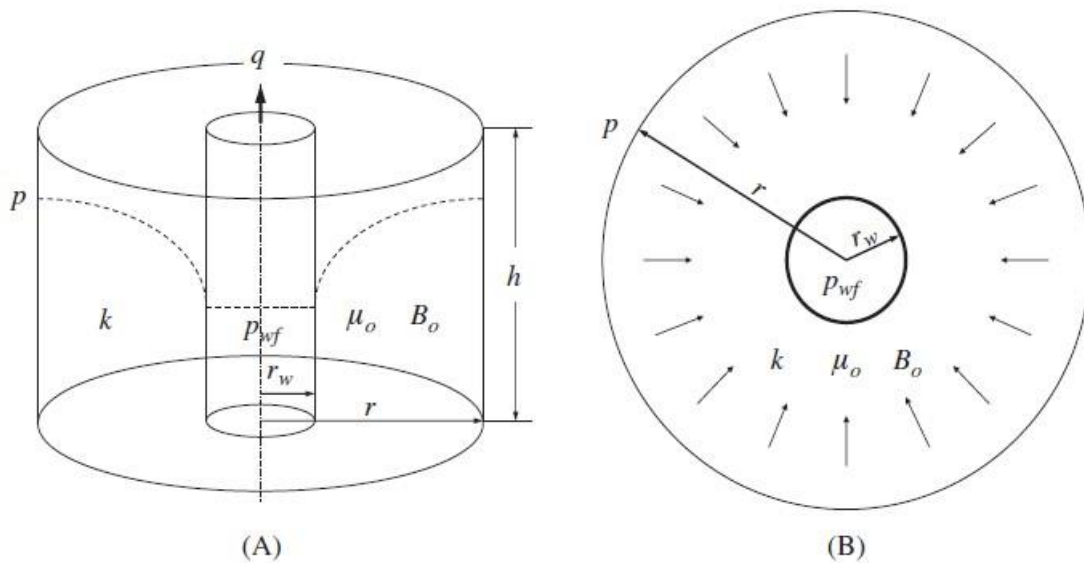
Οι παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται η ικανότητα απόληψης ταμιευτήρα είναι οι εξής:

- Πίεση ταμιευτήρα ( $P$ )
- Πάχος και διαπερατότητα ζώνης πληρωμής ( $h$  και  $k$ )
- Τύπος και απόσταση ορίου ταμιευτήρα ( $r$ )
- Ακτίνα γεώτρησης ( $r_w$ )
- Ιδιότητες ρευστού, όπως ιξώδες, συμπιεστότητα και συντελεστής μεταβολής όγκου του πετρελαίου ( $\mu$ ,  $c$  και  $B_o$ )
- Κατάσταση πετρώματος κοντά στη γεώτρηση (skin factor)
- Σχετικές διαπερατότητες ταμιευτήρα ( $k_r$ )
- Μέθοδος ολοκλήρωσης πηγαδιού (κάθετο, οριζόντιο, πολύπλευρο)

Οι παραπάνω παράγοντες είναι υπεύθυνοι για την παραγωγικότητα του ταμιευτήρα και συνθέτουν τον δείκτη παραγωγικότητας (Productivity Index-PI), ο οποίος αποτελεί ένα απλό βαθμωτό μέγεθος που αντικατοπτρίζει την ικανότητα του ταμιευτήρα να παραδίδει ρευστό στη γεώτρηση. Η χρησιμότητά του δε, έγκειται στη σύγκριση γεωτρήσεων, καθώς συνδυάζει σε μια τιμή όλες τις σχετικές ιδιότητες του πετρώματος, του ρευστού και της γεωμετρίας ώστε να περιγράψει την ικανότητα απόληψης του ταμιευτήρα.

Η ικανότητα απόληψης του ταμιευτήρα μπορεί να μοντελοποιηθεί μαθηματικά με βάση τους τύπους ροής. Οι τρεις τύποι ροής είναι η μεταβατική ροή (transient flow), η ροή σταθερής κατάστασης (steady-state flow) και η ροή ψεύδο-σταθερής κατάστασης (pseudo-state flow). Να σημειωθεί πως σε συνθήκες εισπίεσης παρατηρείται η ροή σταθερής κατάστασης, δηλαδή επικρατεί μια σταθερή πίεση στα άκρα του ταμιευτήρα, καθώς ο όγκος των ρευστών που

παράγονται στην επιφάνεια είναι ίδιος με τον όγκο των ρευστών που εισπνέζονται, διατηρώντας την πίεση του ταμειυτήρα σταθερή. Στην Εικόνα 4-3 απεικονίζεται σχηματικά η ροή σταθερής κατάστασης από τα άκρα του ταμειυτήρα μέχρι την γεώτρηση.



Εικόνα 4-3: Σχηματική απεικόνιση ακτινικής ροής σταθερής κατάστασης από τα άκρα του ταμειυτήρα προς τη γεώτρηση. (A) πλάγια όψη, (B) Κάτοψη (Guo, Liu, & Tan, 2017)

Ο συσχετισμός μεταξύ πίεσης στο κάτω άκρο της γεώτρησης ( $P_{wf}$ ) και του ρυθμού παραγωγής ( $q$ ) μπορεί να διαπιστωθεί γνωρίζοντας τον τύπο ροής που επικρατεί και τον δείκτη παραγωγικότητας. Η σχέση αυτή ονομάζεται σχέση απόδοσης εισροής (IPR – Inflow Performance Relationship) (Guo, Liu, & Tan, 2017)

Για ταμειυτήρες πετρελαίου, η IPR είναι της μορφής

$$q = PI \cdot (\bar{P}_R - P_{wf}) \quad (4.2.1)$$

Όπου,

$q$  = παροχή (sbbl/day)

$\bar{P}_R$  = μέση πίεση στα άκρα του ταμειυτήρα (psia)

$P_{wf}$  = πίεση στον πυθμένα της γεώτρησης (psia)

PI = δείκτης παραγωγικότητας (Productivity Index)

Πολύ σημαντικό εργαλείο στη δημιουργία της IPR είναι ο νόμος του Darcy, ο οποίος αναλύει ροή σε πορώδη μέσα και είναι:

$$q = \frac{k \cdot A}{\mu} \cdot \frac{dP}{dL} \quad (4.3.2)$$

Όπου,

$k$  = διαπερατότητα,

$A$  = επιφάνεια εγκάρσιας διατομής,

$\mu$  = ιξώδες ρευστού,

$dP$  = διαφορά πίεσης,

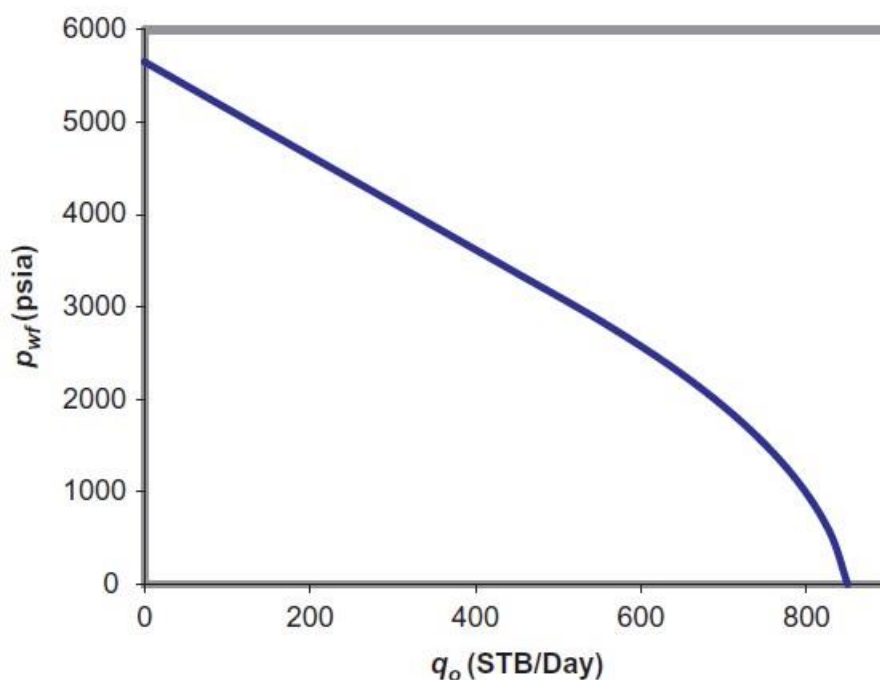
$dL$  = διαφορά ύψους

Για τη γενική περίπτωση ενός απλού γραμμικού και ομοιογενούς ταμειυτήρα, όπου η διατομή  $A$  και το ιξώδες  $\mu$  είναι σταθερά, από την 3.3.2 προκύπτει:

$$q \int dL = \frac{kA}{\mu} \int dp \Rightarrow q L = \frac{kA}{\mu} \Delta p \Rightarrow q = \frac{kA}{\mu} \frac{\Delta p}{L} \quad (4.3.3)$$

Θεωρώντας το  $\Delta P$  ως τη διαφορά της μέσης πίεσης ταμειυτήρα με την πίεση στον πυθμένα της γεώτρησης και τον όρο  $\frac{kA}{\mu L}$  ως το PI, φαίνεται εύκολα πως σχηματίζεται η εξίσωση της IPR μέσω του νόμου του Darcy. Ωστόσο ο νόμος του Darcy, όπως φαίνεται ανωτέρω στην εξίσωση 3.2.2, βρίσκει εφαρμογή σε αρκετά απλοποιημένα συστήματα και σε καμία περίπτωση δεν καλύπτει ταμειυτήρες ακανόνιστης γεωμετρίας και πολυφασικά ρευστά σε διάφορους τύπους ροής. Σε ορισμένες περιπτώσεις, ο νόμος του Darcy έχει εξελιχθεί, με τον όρο του PI να αλλάζει ανάλογα με τις συνθήκες των ρευστών και του ταμειυτήρα, έτσι ώστε να δίνονται λύσεις και σε πιο δύσκολες καταστάσεις, εξυπηρετώντας έτσι τις ανάγκες της πετρελαϊκής βιομηχανίας.

Με τη γνώση της IPR ο μηχανικός έχει στα χέρια του το σημαντικότερο εργαλείο για την εποπτεία του ταμειυτήρα, καθώς γνωρίζει την παροχή στον πυθμένα της γεώτρησης για κάθε πίεση που επικρατεί στον ταμειυτήρα, έχοντας ενσωματώσει στην εξίσωση όλους τους συντελεστές που επηρεάζουν τη ροή. Η εξίσωση IPR σχηματίζεται και γραφικά για την ευκολότερη κατανόησή της. Συνήθως δίνει μια καμπύλη της μορφής που παρουσιάζεται στην Εικόνα 4-4.



Εικόνα 4-4: Τυπική καμπύλη IPR για ταμειυτήρα πετρελαίου (Guo, Liu, & Tan, 2017)

Όταν δεν υπάρχει παροχή, η πίεση στον πυθμένα της γεώτρησης είναι ίση με αυτή του ταμειυτήρα ( $\bar{P}_R$ ). Επιτρέποντας τη ροή του πετρελαίου, υπάρχει πτώση πίεσης μεταξύ της μέσης πίεσης ταμειυτήρα και της πίεσης στον πυθμένα της γεώτρησης (well drawdown). Στο σημείο που η παροχή έχει τη μέγιστη τιμή της επικρατεί και μηδενική πίεση στον πυθμένα της γεώτρησης. Η παροχή στο σημείο αυτό ονομάζεται AOF (Absolute Openhole Factor), όπου αν και αντιπροσωπεύει μια μη ρεαλιστική συνθήκη, είναι μια χρήσιμη παράμετρος για τη σύγκριση γεωτρήσεων εντός του ίδιου πεδίου, καθώς συνδυάζει τον δείκτη παραγωγικότητας PI και την πίεση του ταμειυτήρα σε έναν αριθμό αντιπροσωπευτικό της δυναμικότητας της απόληψης ταμειυτήρα.

#### 4.2.1 IPR σε ταμειυτήρες υποκορεσμένου πετρελαίου

Σε ταμειυτήρα που η πίεση στον πυθμένα της γεώτρησης είναι πάνω από την πίεση φυσαλίδας και για ψεύδο-σταθερή κατάσταση, ο νόμος του Darcy δίνει την εξής IPR:

$$q = PI \cdot (\bar{P}_R - P_{wf}) \quad (4.2.1.1)$$

Όπου,

$\bar{P}_R$  = μέση πίεση στα άκρα του ταμιευτήρα (psia)

$P_{wf}$  = πίεση στον πυθμένα της γεώτρησης (psia)

$$PI = \frac{k \cdot h}{141,2 \cdot B_o \cdot \mu_o \left( \ln \frac{r_e}{r_w} - 0,75 + S \right)} \left( \frac{sbbl}{day} \right) \left( \frac{psia}{psia} \right) \quad (4.2.1.2)$$

Όπου,

h = ύψος ταμιευτήρα (ft)

k = διαπερατότητα (mD)

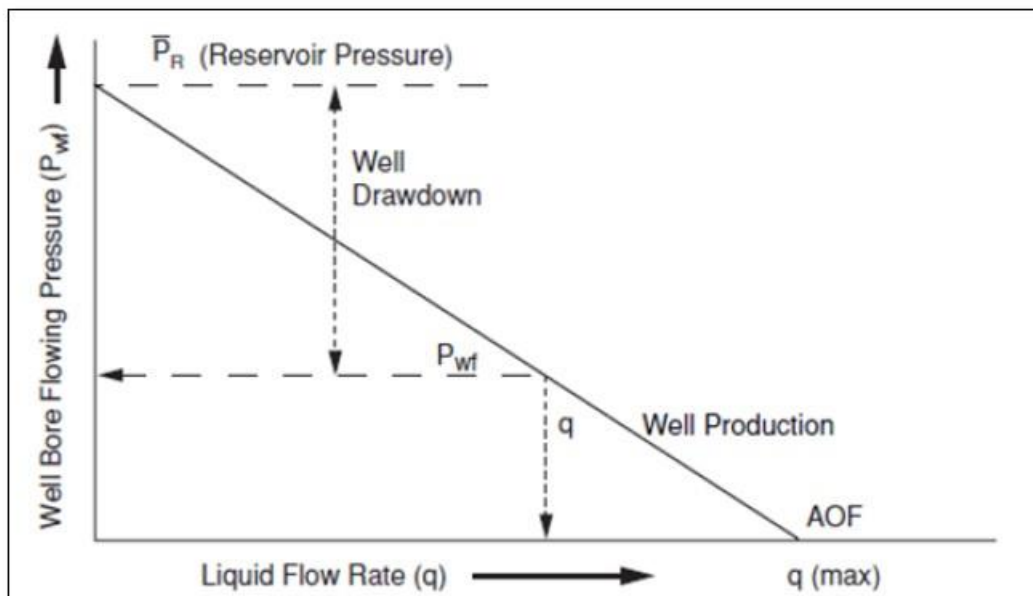
B<sub>o</sub> = συντελεστής μεταβολής όγκου πετρελαίου

S = επιδερμικός παράγοντας

r<sub>e</sub> = εξωτερική ακτίνα του ταμιευτήρα (in)

r<sub>w</sub> = ακτίνα της γεώτρησης (in)

Η γραφική παράσταση της παραπάνω εξίσωσης είναι η καμπύλη IPR, όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 4-5. Στην πραγματικότητα η μορφή της εξίσωσης IPR στην προκειμένη περίπτωση είναι μια ευθεία γραμμή, καθώς επικρατεί μονοφασική ροή πετρελαίου.



Εικόνα 4-5: Τυπική καμπύλη IPR για ταμιευτήρα υποκορεσμένου πετρελαίου (Κωνσταντινόπουλος, 2018)

#### 4.2.2 IPR σε ταμιευτήρες αερίου

Η συμπίεσιμη φύση του αερίου, όπου με την αύξηση της πίεσης επιτρέπει την κατακόρυφη αύξηση των τριβών δυσκολεύοντας τη ροή, έχει ως αποτέλεσμα η IPR του να μην είναι πλέον



ευθεία, με το PI να μεταβάλλεται κατά μήκος της γεώτρησης. Έτσι, η εξίσωση της IPR αλλάζει, και είναι:

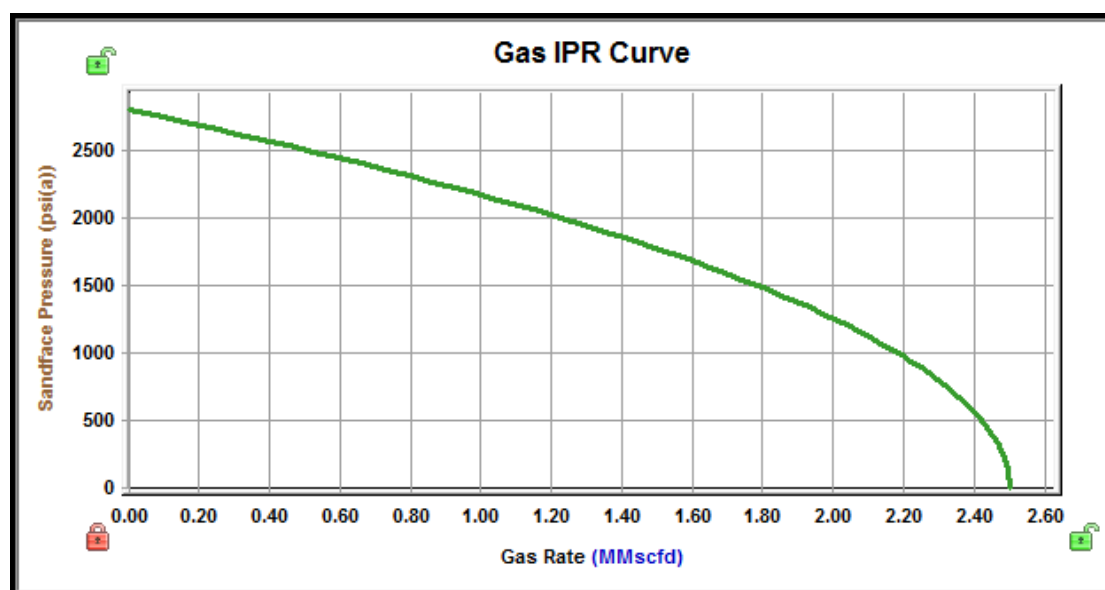
$$q = C(\bar{P}_R^2 - \bar{P}_{wf}^2)^n \quad (4.2.2.1)$$

Όπου,

C = σταθερά

n = συντελεστής ροής που παίρνει τιμές από 0.5 μέχρι 1, ανάλογα με τον τύπο ροής που επικρατεί.

Στην Εικόνα 4-6 παρουσιάζεται μια τυπική καμπύλη IPR για ταμιευτήρα αερίου.



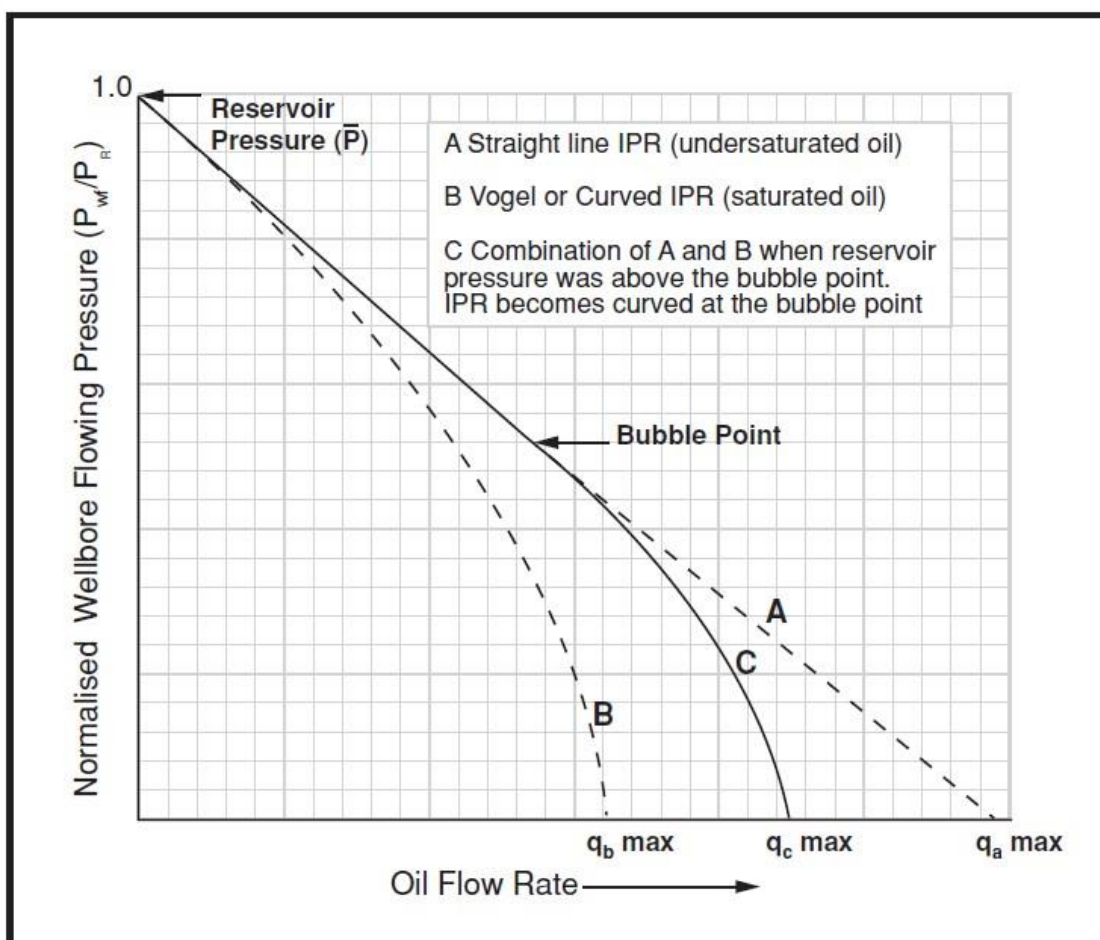
Εικόνα 4-6: Τυπική καμπύλη IPR για ταμιευτήρα αερίου (HIS Markit)

### 4.2.3 IPR σε διφασικούς ταμιευτήρες (αερίου – πετρελαίου)

Το γραμμικό μοντέλο IPR που παρουσιάστηκε στην ενότητα 3.2.1 ισχύει για τιμές πίεσης που αντιστοιχούν στο σημείο φυσαλίδας. Κάτω από το σημείο φυσαλίδας το διαλυμένο στο πετρέλαιο αέριο εκλύεται ως ελεύθερο αέριο. Το αέριο αυτό καταλαμβάνει μέρος του χώρου των πόρων, γεγονός που μειώνει τη ροή του πετρελαίου, μείωση που ποσοτικοποιείται από τη μειωμένη σχετική διαπερατότητα. Επίσης, το ιξώδες του πετρελαίου αυξάνεται, καθώς η περιεκτικότητά του σε διαλυμένο αέριο μειώνεται. Με βάση τα παραπάνω, η IPR πρέπει να τροποποιηθεί έτσι ώστε η αναμενόμενη παροχή σε πιέσεις κάτω από το σημείο φυσαλίδας να είναι μικρότερες από αυτές που δίνει η κλασική IPR για υποκορεσμένα πετρέλαια (βρίσκονται σε πίεση μεγαλύτερη της πίεσης φυσαλίδας).

Υπάρχουν πολλές εμπειρικές εξισώσεις που μοντελοποιούν την πτώση στη ροή των υδρογονανθράκων σε διφασικούς ταμιευτήρες δίνοντας καμπύλη IPR αντί για ευθεία. Πιο

συνηθισμένη από αυτές είναι η εξίσωση του Vogel. Στην Εικόνα 4-7 απεικονίζονται τρεις καμπύλες IPR. Η πρώτη (A) είναι η ευθεία IPR σε ταμιευτήρες υποκορεσμένου πετρελαίου. Η δεύτερη (B) είναι η IPR σε ταμιευτήρες με αρχική πίεση χαμηλότερη του σημείου φυσαλίδας και η καμπύλη IPR που διέπεται από την εξίσωση του Vogel. Τέλος, η τρίτη (C) IPR συναντάται σε ταμιευτήρες όπου κατά τη ροή του πετρελαίου και την πτώση πίεσης που παρατηρείται μέχρι την παραγωγική γεώτρηση, η πίεση πέφτει κάτω από το σημείο φυσαλίδας. Στην προκειμένη περίπτωση μέχρι την πίεση φυσαλίδας η εξίσωση είναι ίδια με την περίπτωση (A) του υποκορεσμένου ταμιευτήρα, ενώ μετά το σημείο φυσαλίδας ισχύει η εξίσωση του Vogel.



Εικόνα 4-7: Σχέσεις απόδοσης εισροής ανάλογα με τη φάση του ρευστού. (Heriot Watt University, 2011)

Μέσω λοιπόν της IPR, ο μηχανικός παραγωγής γνωρίζει την παραγωγή του ταμιευτήρα που επιτυγχάνεται, για οποιαδήποτε πίεση στον πυθμένα της γεώτρησης. Υπάρχουν πολλές ακόμα καταστάσεις όπου η IPR διαφέρει από αυτές που αναφέρθηκαν. Για παράδειγμα, σε ταμιευτήρες που αλλάζει η διαπερατότητά τους, η εύρεση της IPR διέπεται από πιο περίπλοκες εξισώσεις, όπως και σε οριζόντιες γεωτρήσεις όπου η IPR λαμβάνει τελείως διαφορετική

μορφή. Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής, δεδομένου ότι αυτή εμβαθύνει περισσότερο στις σχέσεις ροής εντός του παραγωγικού σωλήνα, δεν θα δοθεί μεγαλύτερη βάση στην ικανότητα απόληψης ταμειυτήρα. Είναι σημαντικό ωστόσο να σημειωθεί πως η σχέση πίεσης στον πυθμένα της γεώτρησης ( $P_{wf}$ ) και ρυθμού παραγωγής ( $q$ ) είναι ένα από τα πιο σημαντικά δομικά στοιχεία της ανάλυσης κόμβων (Nodal analysis) που θα αναλυθεί σε επόμενη παράγραφο.

### 4.3 Απόδοση ροής γεώτρησης

Ο δεύτερος παράγοντας από τον οποίο εξαρτάται η παραγωγή του συστήματος ταμειυτήρας – γεώτρηση είναι η απόδοση ροής της ίδιας της γεώτρησης (Wellbore flow performance). Όπως η ικανότητα απόληψης του ταμειυτήρα, έτσι και η απόδοση ροής της γεώτρησης συνδέει την παροχή του ρευστού με την πίεση. Στην προκειμένη περίπτωση συνδέεται η παροχή με την πίεση που επικρατεί μέσα στη σωλήνωση της γεώτρησης, δηλαδή από τον πυθμένα της γεώτρησης μέχρι την επιφάνεια. Οι παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση ροής της γεώτρησης είναι τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της σωλήνωσης και οι ιδιότητες των ρευστών που περνούν από αυτή.

Σε συνθήκες παραγωγής τα ρευστά συνήθως είναι πετρέλαιο, νερό, αέριο και στερεά, όπως η άμμος, ωστόσο σε συνθήκες εισπίεσης υπάρχει πληθώρα ρευστών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Είναι λοιπόν προφανές πως για κάθε περίπτωση ροής σε γεώτρηση οι εξισώσεις που διέπουν την απόδοση ροής αλλάζουν δραματικά, ανάλογα με το υπάρχον ρευστό.

Η κατανόηση της ροής στην παραγωγική σωλήνωση είναι απαραίτητη για τους μηχανικούς παραγωγής, καθώς σύμφωνα με αυτή γίνεται ο σχεδιασμός και η βελτιστοποίηση του συστήματος της γεώτρησης. Στην παγκόσμια βιομηχανία για την απόδοση ροής γεώτρησης χρησιμοποιείται ο όρος Tubing Performance Relationship – TPR ή Vertical Lift Performance – VLP.

#### 4.3.1 Μονοφασική ροή πετρελαίου

Ο πρώτος νόμος της θερμοδυναμικής (διατήρηση της συνολικής ενέργειας του ρευστού) όσον αφορά την πτώση πίεσης για ροή μονοφασικού ρευστού, όπως υποκορεσμένο πετρέλαιο, από σημείο A σε σημείο B, μέσα σε σωλήνα διαμέτρου D, μήκους L, ύψους  $\Delta z$  όπως ενδεικτικά παρουσιάζεται στην Εικόνα 3-3, δίνει:

$$\Delta P = P_A - P_B = \frac{g}{g_c} \cdot \rho \cdot \Delta z + \frac{\rho}{2g_c} \cdot \Delta u^2 + \frac{2f_F \cdot \rho \cdot u^2 \cdot L}{g_c \cdot D} \quad (4.3.1.1)$$

Όπου,

$\Delta P$  = πτώση πίεσης, lb<sub>f</sub>/ft<sup>2</sup>

$P_A$  = πίεση στο σημείο A, lb<sub>f</sub>/ft<sup>2</sup>

$P_B$  = πίεση στο σημείο B, lb<sub>f</sub>/ft<sup>2</sup>

$g$  = επιτάχυνση βαρύτητας, 32.17 ft/s<sup>2</sup>

$g_c$  = συντελεστής μετατροπής μονάδας, 32.17 lb<sub>m</sub>-ft/lb<sub>f</sub>-s<sup>2</sup>

$\rho$  = πυκνότητα ρευστού, lb<sub>m</sub>/ft<sup>3</sup>

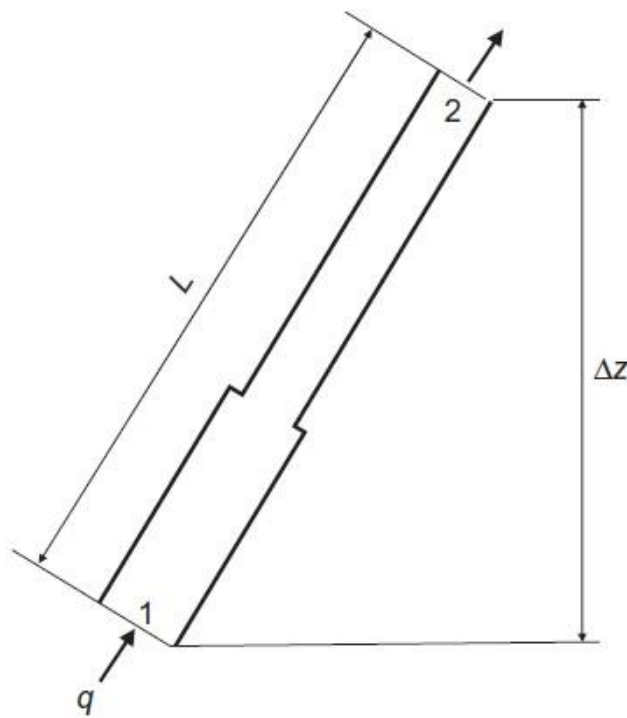
$\Delta z$  = ανύψωση, ft

$u$  = ταχύτητα ρευστού, ft/s

$f_F$  = συντελεστής τριβής Fanning

$L$  = μήκος σωλήνα, ft

$D$  = διάμετρος σωλήνα, ft



Εικόνα 4-8: Ροή σε σωλήνα (Guo, Liu, & Tan, 2017)

Ο πρώτος όρος της εξίσωσης δηλώνει την πτώση πίεσης λόγω της βαρύτητας κατά την άνοδο του ρευστού στη σωλήνωση, ο δεύτερος λόγω της μεταβολής της κινητικής ενέργειας η οποία, με τη σειρά της, οφείλεται στην επιτάχυνση ή την επιβράδυνση του ρευστού και ο τρίτος όρος δηλώνει την πτώση πίεσης λόγω της τριβής. Στο σημείο αυτό πρέπει να ξεκαθαριστεί, πως η ύπαρξη μονοφασικής ροής πετρελαίου μέσα σε παραγωγικό σωλήνα είναι σπάνια, καθώς θα πρέπει η πίεση να διατηρείται πάνω από το σημείο φυσαλίδας. Αντίθετα, αυτό που αποτελεί το

σύνηθες στην πράξη είναι η πίεση του πετρελαίου να πέφτει κάτω από την πίεση φυσαλίδας, καθώς αυτό ρέει από τη γεώτρηση προς την επιφάνεια. Το αποτέλεσμα αυτού είναι ότι από ένα σημείο εντός της γεώτρησης και μετά δημιουργείται διφασική ροή αερίου – πετρελαίου. Η μονοφασική ροή πετρελαίου, παρόλο που δεν συναντάται ευρέως, δίνει τις εξισώσεις που θέτουν τις βάσεις για την κατανόηση των πιο πολύπλοκων ροών.

















Οι ροές που συναντώνται συχνότερα εντός ένα παραγωγικού σωλήνα είναι η πολυφασική, στην περίπτωση ταμειυτήρα πετρελαίου και η μονοφασική ροή αερίου σε ταμειυτήρες που έχουν μόνο υδρογονάνθρακες ξηρού αερίου.

#### **4.3.2 Πολυφασική ροή πετρελαίου**

Τα παραγωγικά συστήματα γεωτρήσεων εκτός από πετρέλαιο και αέριο παράγουν νερό και ενίοτε άμμο. Η ροή στα πολυφασικά συστήματα διέπεται από μια TPR εξίσωση πολύ διαφορετική από αυτή που αναλύθηκε παραπάνω για τα μονοφασικά. Για τη σωστή ανάλυση της TPR των γεωτρήσεων αυτών χρειάζεται η ανάπτυξη πολυφασικού μοντέλου ροής.

Η πολυφασική ροή διέπεται από πολλά διαφορετικά μοτίβα ροής (flow patterns) με αποτέλεσμα να διαφέρει σε μεγάλο βαθμό από τη μονοφασική ροή. Αυτό που αλλάζει δραστικά στην πολυφασική ροή είναι η αύξηση των τριβών με αποτέλεσμα τη μεγαλύτερη μείωση της πίεσης.

Τα κύρια καθεστώτα ροής είναι τέσσερα: Το dispersed ή bubble, το intermittent ή slug, το wavy ή churn και το annular. Στην dispersed ροή, η αέρια φάση διασκορπίζεται στο ρευστό σε μορφή μικρών φυσαλίδων μέσα σε συνεχή υγρή φάση. Στη ροή slug, οι φυσαλίδες αερίου ενώνονται σε μεγαλύτερες φυσαλίδες που τελικά γεμίζουν ολόκληρη τη διατομή του σωλήνα. Μεταξύ των μεγάλων φυσαλίδων υπάρχουν τμήματα υγρού που περιέχουν μικρότερες φυσαλίδες παρασυρόμενου αερίου. Στην wavy ροή, οι μεγαλύτερες φυσαλίδες αερίου γίνονται ασταθείς και καταρρέουν, με αποτέλεσμα ένα πολύ ταραχώδες μοτίβο ροής με τις δύο φάσεις να διασκορπίζονται. Στην annular ροή, το αέριο γίνεται συνεχής φάση, με το υγρό να ρέει σε ένα δακτύλιο, καλύπτοντας την επιφάνεια του σωλήνα και με σταγονίδια παρασυρμένα στην αέρια φάση. Τα καθεστώτα αυτά ροής απεικονίζονται στην Εικόνα 4-9.

|                                                                                   |                                                                                   | FLOW REGIMES                                                                       |                                                                                    |                                                                                     |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
|                                                                                   |                                                                                   | Annular                                                                            | Wavy                                                                               | Intermittent                                                                        | Dispersed |
| Flow Patterns                                                                     |  |   |  |  |           |
|                                                                                   | Mist Flow                                                                         | Discrete Wave (0)                                                                  | Slug Flow                                                                          | Bubbly Flow                                                                         |           |
|                                                                                   |  |   |  |  |           |
|                                                                                   | Annular Ring                                                                      | Discrete Wave (1)                                                                  | Slug Flow                                                                          | Bubbly Flow                                                                         |           |
|                                                                                   |  |   |  |  |           |
| Wave Ring                                                                         | Discrete Wave (2)                                                                 | Plug Flow                                                                          | Bubbly Flow                                                                        |                                                                                     |           |
|  |  |  |                                                                                    |                                                                                     |           |
| Wave Packet                                                                       | Disperse Wave (3)                                                                 | Plug Flow                                                                          |                                                                                    |                                                                                     |           |
|  | <b>Note:</b> Numbers above denote intensity of secondary waves                    |                                                                                    |                                                                                    |                                                                                     |           |
| Annular Film                                                                      |                                                                                   |                                                                                    |                                                                                    |                                                                                     |           |

Εικόνα 4-9: Ταξινόμηση καθεστώτων ροής (Nema, Garimella, & Fronk, 2014)

Η πληθώρα καθεστώτων ροής (flow regimes) που παρουσιάζονται σε έναν παραγωγικό σωλήνα κάνουν τη δημιουργία του πολυφασικού μοντέλου ροής και μετέπειτα της TPR μια πολυσύνθετη διαδικασία η οποία δεν αποτελεί αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής.

### 4.3.3 Μονοφασική ροή αερίου

Σε ταμειυτήρες φυσικού αερίου η κατασκευή της TPR διαφέρει ελάχιστα σαν διαδικασία σε σχέση με τη μονοφασική ροή πετρελαίου. Η μόνη διαφορά έγκειται στο ότι ο όρος που αφορά την αλλαγή της κινητικής ενέργειας θεωρείται αμελητέος, καθώς δεν υπάρχουν σημαντικές επιταχύνσεις και επιβραδύνσεις στη ροή του ρευστού. Έτσι, ο πρώτος νόμος της θερμοδυναμικής όσον αφορά την πτώση πίεσης για ροή ρευστού από σημείο A σε σημείο B, μέσα σε σωλήνα διατομής L, ύψους Δz, δίνει την εξής εξίσωση:

$$\frac{dP}{\rho} + \frac{g}{g_c} dZ + \frac{fm \cdot V^2 \cdot dL}{2g_c \cdot Di} = 0 \quad (4.3.3.1)$$

Επειδή,

$$\Delta Z = \cos \theta \cdot dL,$$

$$\rho = \frac{29 \cdot \gamma_g \cdot P}{Z \cdot R \cdot T} \text{ και}$$

$$v = \frac{4q_{sc} \cdot Z \cdot P_{sc} \cdot T}{\pi \cdot D_i^2 \cdot T_{sc} \cdot P}, \text{ η παραπάνω εξίσωση γράφεται:}$$

$$\frac{zRT}{29\gamma_g} \cdot \frac{dP}{P} + \left\{ \frac{g}{g_c} \cos \theta + \frac{8f_M \cdot Q_{sc}^2 \cdot P_{sc}^2}{\pi^2 \cdot g_c \cdot D_i^5 \cdot T_{sc}^2} \cdot \left[ \frac{zT}{P} \right]^2 \right\} dL = 0 \quad (4.3.3.2)$$

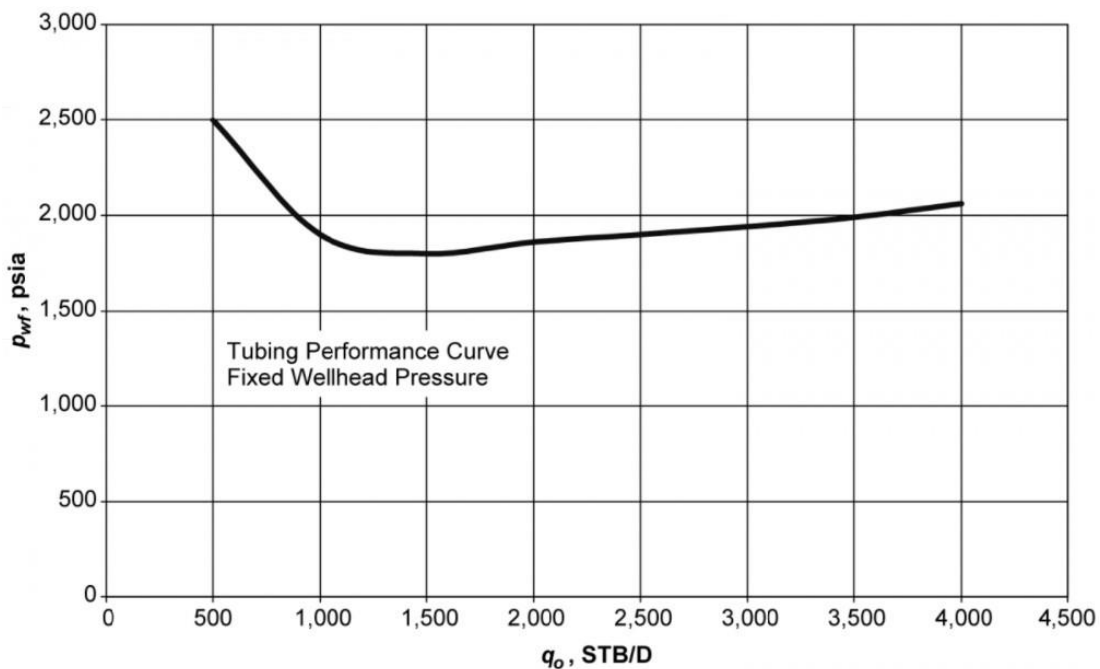
Η Εξίσωση 3.3.3.2 είναι μια απλή διαφορική εξίσωση που αφορά τη ροή αερίου σε σωλήνα. Αν και η θερμοκρασία T μπορεί να εκφραστεί περίπου ως γραμμική συνάρτηση του μήκους L μέσω της γεωθερμικής βαθμίδας, ο συντελεστής συμπιεστότητας z είναι συνάρτηση της πίεσης P και της θερμοκρασίας T. Το γεγονός αυτό δίνει μια δυσκολία στην αναλυτική λύση της εξίσωσης, ωστόσο η βιομηχανία έχει βρει προσεγγιστικούς τρόπους για τη λύση της με πολύ καλά αποτελέσματα.

Ένας τρόπος αναλυτικής λύσης προκύπτει θεωρώντας τις μέσες τιμές της θερμοκρασίας T και του συντελεστή συμπιεστότητας z σε όλο το μήκος του σωλήνα. Κατόπιν χωρισμού μεταβλητών και μετατροπής μονάδων για q<sub>sc</sub> σε Mscf/d, η Εξίσωση 3.3.3.2 γράφεται ως εξής:

$$P_{wf}^2 = \text{Exp}(s) P_{hf}^2 + \frac{6.67 \cdot 10^4 [\text{Exp}(s) - 1] \cdot f_M \cdot q_{sc}^2 \cdot \bar{z}^2 \cdot \bar{T}^2}{d_i^5 \cdot \cos \theta} \quad (4.3.3.3)$$

Όπου,  $S = \frac{0,0375 \gamma_g \cdot L \cdot \cos \theta}{\bar{z} \cdot \bar{T}}$

Όπως η IPR, έτσι και η εξίσωση TPR απεικονίζεται γραφικά σε διάγραμμα με άξονες την παροχή και την πίεση, για την καλύτερη παρακολούθηση και εποπτεία του συστήματος της γεώτρησης από τους μηχανικούς. Με αυτό τον τρόπο σχηματίζεται η καμπύλη TPR, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 4-10.



Εικόνα 4-10: Καμπύλη TPR για σταθερή πίεση στην κεφαλή της γεώτρησης (PetroWiki, n.d.)

#### 4.3.4 Θερμικό προφίλ

Όπως αναφέρθηκε στην Παράγραφο 4.3.1 και ειδικότερα όπως αποτυπώθηκε στην Εξίσωση 4.3.1.1 για μονοφασικό ρευστό, η πτώση πίεσης εξαρτάται από τη βαρύτητα, την τριβή και την κινητική ενέργεια. Στα αέρια η πτώση πίεσης εξαρτάται μόνο από τη βαρύτητα και την τριβή. Η πτώση πίεσης ( $\Delta P$ ) λόγω βαρύτητας είναι  $\rho \cdot g \cdot \Delta Z$ , όπου  $\rho$  η πυκνότητα,  $g$  η επιτάχυνση της βαρύτητας και  $\Delta Z$  η υψομετρική διαφορά. Η πτώση πίεσης ( $\Delta P$ ) λόγω τριβής εξαρτάται από το ιξώδες του ρευστού. Το πρόβλημα στην εισπίεση ρευστού, έγκειται στο ότι το ιξώδες και η πυκνότητα είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας, που σημαίνει ότι η αλλαγή της θερμοκρασίας μέσα στη γεώτρηση επηρεάζει άμεσα τα δύο μεγέθη. Όταν αλλάζει το ιξώδες επηρεάζονται οι δυνάμεις τριβής που ασκούνται μεταξύ αερίου και σωλήνα, οπότε αλλάζει και η πτώση πίεσης ( $\Delta P$ ). Με την ίδια λογική η πτώση πίεσης λόγω βαρύτητας επηρεάζεται κατά μήκος της γεώτρησης λόγω της αλλαγής της πυκνότητας. Έτσι, η ακριβής θερμοκρασία σε κάθε σημείο της γεώτρησης τίθεται ως απαραίτητη γνώση και ο υπολογισμός του θερμικού προφίλ κατά μήκος της γεώτρησης είναι αναγκαίος, με τον υπολογισμό της μέσης θερμοκρασίας να μην αποτελεί την ιδανική πρακτική, ειδικά σε περιπτώσεις που απαιτείται λεπτομερή καταγραφή των ιδιοτήτων, όπως κατά την εισπίεση όξινου αερίου.

Το αίτιο της αλλαγής της θερμοκρασίας κατά μήκος του συστήματος της γεώτρησης είναι η μεταφορά θερμότητας από το υψηλής θερμοκρασίας ρευστό προς το χαμηλότερης θερμοκρασίας περιβάλλον πέτρωμα. Η μετάδοση της θερμότητας γίνεται κατά κύριο λόγο μέσω του μηχανισμού της αγωγής από το ρευστό πρώτα στον σωλήνα παραγωγής, έπειτα στο ρευστό ανάμεσα στον σωλήνα παραγωγής και τη σωλήνωση, από εκεί στη σωλήνωση της γεώτρησης, στο τσιμέντο και τελικά στο περιβάλλον πέτρωμα.

Ο κανόνας που διέπει τη μεταφορά θερμότητας με αγωγή δηλώνει πως το ποσό της θερμότητας  $Q$ , που θα μεταφερθεί από ζεστό σε κρύο σώμα καθώς διέρχεται από εμπόδιο δεδομένου μήκους, εξαρτάται από την αγωγιμότητα του εμποδίου, πολλαπλασιασμένο με τη μεταβολή της θερμοκρασίας ( $\Delta T$ ). Η αγωγιμότητα του μέσου που συνδέει τα δυο σώματα, δηλαδή στην προκειμένη περίπτωση τον σωλήνα παραγωγής, το ρευστό ολοκλήρωσης, τη σωλήνωση και το τσιμέντο με το πέτρωμα δηλώνεται με έναν συνολικό συντελεστή αγωγιμότητας που ονομάζεται  $U$  με μονάδες (BTU/(h·ft<sup>2</sup>·F)). Γνωρίζοντας λοιπόν τη διαφορά θερμοκρασίας ( $\Delta T$ ) μεταξύ ρευστού και ταμειυτήρα και τον συντελεστή αγωγιμότητας ( $U$ ) βρίσκεται η μεταβολή της θερμότητας ( $\Delta Q$ ). Στη συνέχεια με τον όρο της θερμοχωρητικότητας που δηλώνει τον λόγο της θερμότητας ( $\Delta Q$ ) που προσφέρεται σε ένα σώμα προς την αντίστοιχη ανύψωση της θερμοκρασίας του ( $\Delta T$ ), βρίσκεται η μεταβολή θερμοκρασίας του ρευστού, άρα και η τελική του θερμοκρασία. Ο μαθηματικός τύπος της θερμοχωρητικότητας είναι

$$C = \Delta Q / \Delta T \text{ ,σε (BTU/(lbm·F)).}$$



Με τη διαδικασία εύρεσης της θερμοκρασίας του ρευστού, όπως αναλύθηκε παραπάνω, σε επιμέρους τμήματα της γεώτρησης κατά το ύψος της, βρίσκεται τελικά το συνολικό θερμικό προφίλ. Τα προγράμματα μοντελοποίησης ροών όπως το PIPESIM, δίνοντας την κατάλληλη θερμοχωρητικότητα του ρευστού (C), τη διαφορά θερμοκρασίας ρευστού και πετρώματος ( $\Delta T$ ) και τον συντελεστή θερμοχωρητικότητας του μέσου (U), εκτιμούν άμεσα το θερμικό προφίλ της γεώτρησης. Το (U) είναι γνωστή μεταβλητή, ενώ το ( $\Delta T$ ) βρίσκεται εύκολα με μετρήσεις στο πεδίο.

Η δυσκολία της παραπάνω διαδικασίας όταν εφαρμόζεται στην εισπίεση όξινου αερίου έγκειται στο ότι το ρευστό είναι διφασικό μείγμα δυο ενώσεων, οπότε πρέπει να ληφθούν υπόψη οι θερμοχωρητικότητες (C) και των δύο ενώσεων. Το ρευστό εισπνέζεται σε υπερκρίσιμη κατάσταση που δυσκολεύει ακόμα πιο πολύ την εύρεση των δύο θερμοχωρητικότητων, ενώ το θερμοδυναμικό εργαλείο που αποτελούν οι κυβικές καταστατικές εξισώσεις δεν δίνουν έμπιστα αποτελέσματα για τις (C). Ο ικανοποιητικός υπολογισμός λοιπόν των θερμοχωρητικότητων είναι ένα σημαντικό πρόβλημα για την εύρεση του προφίλ θερμοκρασίας στην εισπίεση όξινου αερίου που επιδρά σημαντικά στη σωστή λειτουργία του συστήματος εισπίεσης.

#### **4.4 Ανάλυση κόμβων – Nodal analysis**

Η ανάλυση συστημάτων είναι η διαδικασία της μελέτης μιας δραστηριότητας, τυπικά με μαθηματικά μέσα, προκειμένου να καθοριστούν οι στόχοι ή οι σκοποί της και να ανακαλυφθούν λειτουργίες και διαδικασίες για την αποτελεσματικότερη επίτευξή τους. Στη βιομηχανία πετρελαίου, η διαδικασία αυτή ονομάζεται *ανάλυση κόμβων (nodal analysis)*. Πρακτικά, η ανάλυση κόμβων συνθέτει την ικανότητα απόληψης της γεώτρησης (συστήματος ταμειυτήρα – γεώτρησης) προβλέποντας την παραγωγή, συνδυάζοντας την ικανότητα απόληψης του ταμειυτήρα με την απόδοση ροής της γεώτρησης

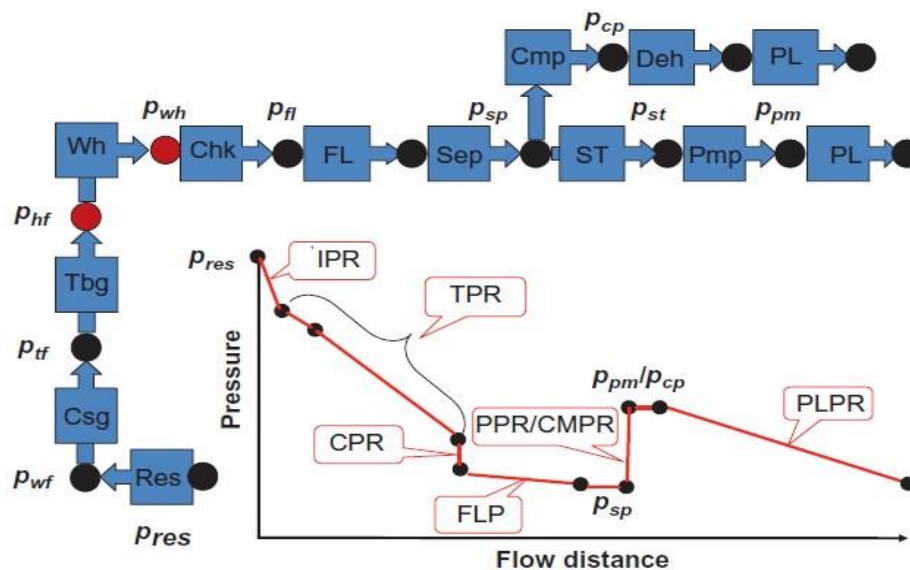
Για την εφαρμογή της μεθόδου ανάλυσης κόμβων, επιλέγεται ένα σημείο (κόμβος) ανάμεσα στα δύο άκρα του συστήματος (ταμειυτήρας – γεώτρηση) και στη συνέχεια αναπτύσσονται εξισώσεις για τη σχέση παροχής – πτώσης πίεσης τόσο για το σύστημα που ακολουθεί το επιλεγμένο σημείο (outflow) όσο και για το σύστημα που προηγείται πριν το συγκεκριμένο σημείο (inflow).

Η πίεση και η παροχή στον επιλεγμένο κόμβο έχουν μία και μοναδική τιμή είτε προσδιοριστούν ξεκινώντας από το inflow τμήμα είτε από το outflow. Ακόμη, η πίεση στα ακραία σημεία του συστήματος είναι σταθερή και ίση με την πίεση στους διαχωριστές ( $P_{sep}$ ) και την πίεση στο άκρο του ταμειυτήρα ( $P_R$ ) Οπότε, ισχύει ότι:

- $P_R$  - πτώση πίεσης στο σύστημα εισροής =  $P_{node}$
- $P_{Sep} +$  πτώση πίεσης στο σύστημα εκροής =  $P_{node}$

Εφόσον και οι δύο εξισώσεις έχουν ίσο δεξιό μέλος, τότε η παροχή θα πρέπει να είναι τόση ώστε να ισούνται επίσης τα αριστερά τους μέλη. Επομένως, η ζητούμενη παροχή είναι αυτή που επιβεβαιώνει ταυτόχρονα τις δύο εξισώσεις.

Στην Εικόνα 4-11 παρουσιάζονται όλοι οι κόμβοι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην ανάλυση κόμβων, όπως το σημείο του πυθμένα της γεώτρησης, της κεφαλής της γεώτρησης, των διαχωριστών, κ.α.



Εικόνα 4-11: Κόμβοι που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία (Guo, Liu, & Tan, 2017)

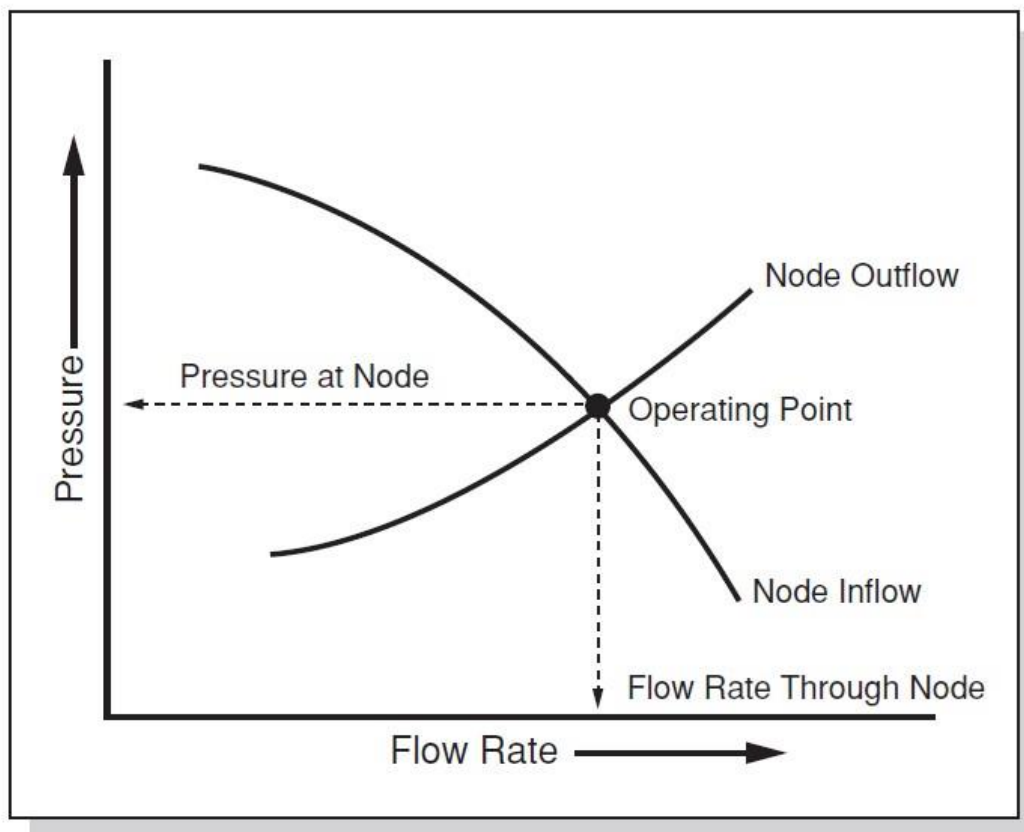
Εφόσον και οι δύο εξισώσεις έχουν ίσο δεξιό μέλος, τότε η παροχή θα πρέπει να είναι τόση ώστε να ισούνται επίσης τα αριστερά τους μέλη. Επομένως, η ζητούμενη παροχή είναι αυτή που επιβεβαιώνει ταυτόχρονα τις δύο εξισώσεις

Ο κόμβος που χρησιμοποιείται κατά κόρον από τους μηχανικούς παραγωγής είναι το σημείο στον πυθμένα της γεώτρησης ( $P_{wf}$ ). Όταν χρησιμοποιείται ο πυθμένας της γεώτρησης ως κόμβος στην ανάλυση κόμβων, το σύστημα εισροής (inflow) είναι η σχέση απόδοσης εισροής ή IPR. Το σύστημα εκροής (outflow) είναι η απόδοση ροής του πηγαδιού ή TPR. Οι σχέσεις IPR και TPR κατασκευάζονται με πληθώρα τρόπων, πολλοί από τους οποίους συζητήθηκαν παραπάνω, στο παρόν Κεφάλαιο.

Παραδοσιακά, η ανάλυση κόμβων στον πυθμένα της γεώτρησης δεν επιλύεται αναλυτικά, όπως αναφέρθηκε παραπάνω αλλά γραφικά, σχεδιάζοντας τις δυο καμπύλες (IPR και TPR) με το σημείο τομής τους (σημείο λειτουργίας, operating point) να δηλώνει την πίεση και την παροχή που θα λειτουργεί το σύστημα στο βάθος αυτό (Εικόνα 4-12). Με τη σημερινή υπολογιστική

τεχνολογία, ωστόσο το σημείο τομής των δυο καμπυλών μπορεί να υπολογιστεί εύκολα μόνο με την επίλυση των εξισώσεων, χωρίς τον σχεδιασμό των καμπυλών. Παρ' όλα αυτά, οι καμπύλες εξακολουθούν να σχεδιάζονται για οπτική επαλήθευση.

Συμπερασματικά, η ανάλυση κόμβων είναι μια μεθοδολογία που δίνει την πλήρη περιγραφή μιας γεώτρησης με δεδομένα τα χαρακτηριστικά της, τα χαρακτηριστικά του ταμειυτήρα και των ρευστών του. Με τη γνώση των παραπάνω, η ανάλυση κόμβων παρέχει πληροφορίες για την κατανομή της πίεσης και της θερμοκρασίας μέσα στη γεώτρηση. Έτσι, βρίσκεται η πίεση που θα δημιουργηθεί στον κόμβο για την παροχή που απαιτείται.



Εικόνα 4-12: Γραφική παράσταση IPR και TPR (Heriot Watt University, 2011)

Το λογισμικό PIPESIM, έχει τη δυνατότητα επίλυσης των δύο εξισώσεων και της γραφικής αναπαράστασης αυτών, εφόσον λάβει ως δεδομένα όλους τους συντελεστές που επηρεάζουν τις IPR και TPR.

#### 4.4.1 Nodal analysis σε γεωτρήσεις εισπίεσης

Στην περίπτωση των γεωτρήσεων εισπίεσης, η ανάλυση κόμβων είναι δέουσα σημασίας, διότι προσδιορίζει την πίεση με την οποία το ρευστό φτάνει στον ταμειυτήρα. Όπως αναφέρθηκε στο δεύτερο κεφάλαιο, το ρευστό πρέπει να διατηρείται στην υπερκρίσιμη κατάσταση, οπότε πρέπει να διατηρούνται και οι κατάλληλες πιέσεις που επιτυγχάνουν αυτή την κατάσταση.

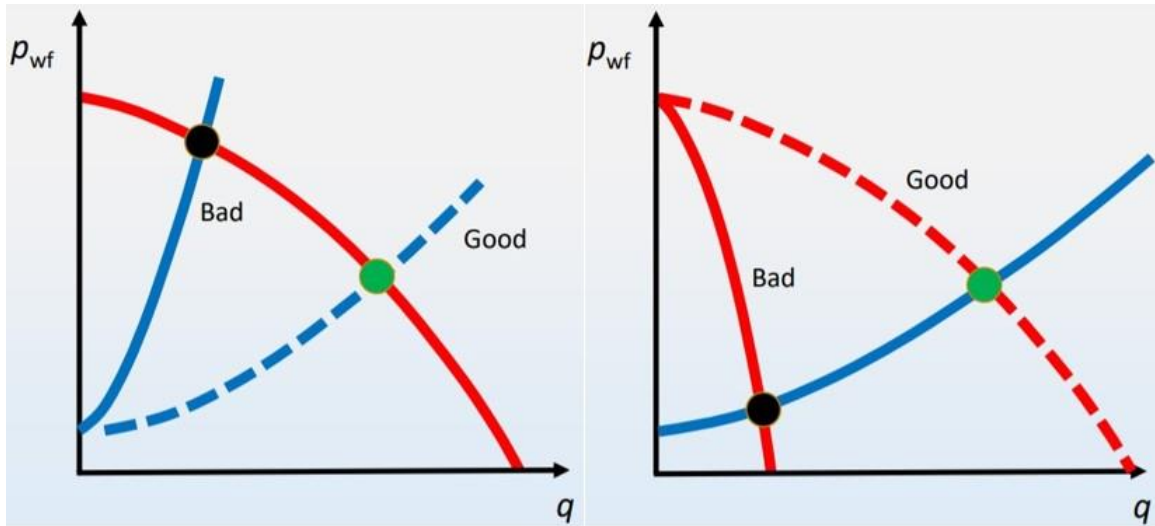
Είναι πολλές οι φορές, ωστόσο, που αντί της πλήρους ανάλυσης κόμβων μελετάται τμηματικά μόνο η TPR ή η IPR. Αυτό συμβαίνει όταν αντί να είναι γνωστές οι πιέσεις στα δύο άκρα και να ζητείται η παροχή, είναι γνωστή η παροχή και η πίεση μόνο στο ένα άκρο με την πίεση στο άλλο άκρο να πρέπει να προσδιοριστεί. Αυτό ακριβώς είναι που συμβαίνει συνήθως σε γεωτρήσεις εισπίεσης, όπου η παροχή του ρευστού μπορεί να ρυθμιστεί και η τιμή που πρέπει να φτάσει η πίεση του ρευστού στον πυθμένα της γεώτρησης είναι γνωστή, με μοναδικό άγνωστο την πίεση στην κεφαλή της γεώτρησης. Σε ένα τέτοιο πρόβλημα συνήθως πραγματοποιείται η τμηματική μελέτη της TPR και η οποία παρέχει αυτή τη λύση.

Σχετικά με τη μαθηματική προσέγγιση των εξισώσεων IPR και TPR, η διαδικασία είναι παρόμοια. Η IPR διέπεται από την ίδια εξίσωση που αφορά και τις γεωτρήσεις παραγωγής. Η διαφορά έγκειται στην TPR όπου σε συνθήκες εισπίεσης η δύναμη της βαρύτητας δρα βοηθητικά στο σύστημα και όχι ανασταλτικά, όπως στα συστήματα παραγωγής.

## ***4.5 Sensitivity analysis***

Μια ακόμη πολύ χρήσιμη λειτουργία της ανάλυσης κόμβων είναι η δυνατότητα υλοποίησης ανάλυσης ευαισθησίας (sensitivity analysis). Κατά την ανάλυση κόμβων υπάρχει η δυνατότητα μεταβολής πολλών από τις παραμέτρους του συστήματος και παρατήρησης των άμεσων επιδράσεων των μεταβολών αλλά και η δυνατότητα της βελτιστοποίησης του προς μελέτη συστήματος. Οι παράμετροι που μπορούν να εξεταστούν είναι αρκετοί και ανάλυση ευαισθησίας μπορεί να γίνει σε οποιαδήποτε στιγμή ενός έργου. Επιπλέον επιλέγοντας τις παραμέτρους που αφορούν είτε στη γεώτρηση είτε στον ταμιευτήρα, δύναται οι επιδράσεις και οι μεταβολές να υφίστανται μόνο στην TPR ή στην IPR αντίστοιχα. Εάν εντοπίζεται κάποιο πρόβλημα στον ταμιευτήρα, η αύξηση της πίεσής του με εισπίεση ρευστού ή η αύξηση της διαπερατότητας του σχηματισμού πέριξ της γεώτρησης με χρήση χημικών είναι καλές λύσεις. Σε περίπτωση προβλήματος της γεώτρησης μπορεί να χρειαστεί η μεταβολή των διαστάσεων του παραγωγικού σωλήνα ή η υποβοήθηση της ανύψωσης του ρευστού (air/gas lift). Όπως αναφέρθηκε ωστόσο υπάρχουν ακόμα πολλές εναλλακτικές.

Στην παρακάτω Εικόνα 4-13 φαίνεται το πως η αλλαγή κάποιου συντελεστή του συστήματος αλλάζει την TPR και την IPR, αυξάνοντας την πίεση στον πυθμένα της γεώτρησης και βελτιώνοντας την παραγωγή.



Εικόνα 4-13 Αλλαγές στην TPR και IPR αντίστοιχα

# 5

## *Λογισμικό προσομοίωσης ροής ρευστών σε γεωτρήσεις (PIPESIM)*

Το λογισμικό PIPESIM της εταιρείας Schlumberger είναι ένας προσομοιωτής ροής ρευστών πολλαπλών φάσεων σε σταθερή κατάσταση που χρησιμοποιείται για το σχεδιασμό αλλά και τη διαγνωστική ανάλυση συστημάτων παραγωγής πετρελαίου και φυσικού αερίου. Διαθέτει μια μεγάλη ποικιλία συσχετίσεων πολυφασικής ροής που θεωρούνται πρότυπες για τη βιομηχανία που επιτρέπουν την εκτίμηση του καθεστώτος ροής (flow regime), των χαρακτηριστικών της (liquid holdup, slug characteristics), και των απωλειών πίεσης για όλους τους κόμβους κατά μήκος των μονοπατιών παραγωγής οποιασδήποτε κατεύθυνσης; κρίσιμες πληροφορίες για το σχεδιασμό αλλά και τη λειτουργία συστημάτων παραγωγής, δικτύων συλλογής και διανομής.

Τα εργαλεία του λογισμικού μοντελοποιούν τη ροή πολλαπλών φάσεων από τον ταμειυτήρα μέχρι την κεφαλή της γεώτρησης. Το λογισμικό PIPESIM μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση της απόδοσης των επιφανειακών εγκαταστάσεων παραγωγής και επεξεργασίας. Με προηγμένους αλγόριθμους μοντελοποίησης πολυφασικών ροών για ανάλυση κόμβων (nodal analysis), συμπεριφοράς ρευστών (προσδιορισμός συμπεριφοράς φάσεων και ιδιοτήτων του ρευστού, Fluid behavior), μεταφοράς θερμότητας (heat transfer), τεχνητής ανύψωσης (artificial lift) και υπολογισμού διάβρωσης (corrosion) που παρατηρείται στην σωλήνωση και το πώς αυτή επηρεάζει τη ροή, το λογισμικό PIPESIM βοηθά στη βελτιστοποίηση των διεργασιών παραγωγής και εισπίεσης.

Η προσομοίωση των πολυφασικών ροών σε σωληνώσεις όπως προαναφέρθηκε, θεωρούνται σταθερής κατάστασης. Αυτό σημαίνει ότι η εκτίμηση των παραμέτρων - ιδιοτήτων των ρευστών σε κάθε σημείο της γεώτρησης γίνεται μη λαμβάνοντας υπόψη την παράμετρο του χρόνου. Οι παράμετροι αυτές είναι η πίεση, η θερμοκρασία, η ταχύτητα του ρευστού και ο ρυθμός ροής της μάζας.

Για την μοντελοποίηση της ροής πρέπει να δοθούν:

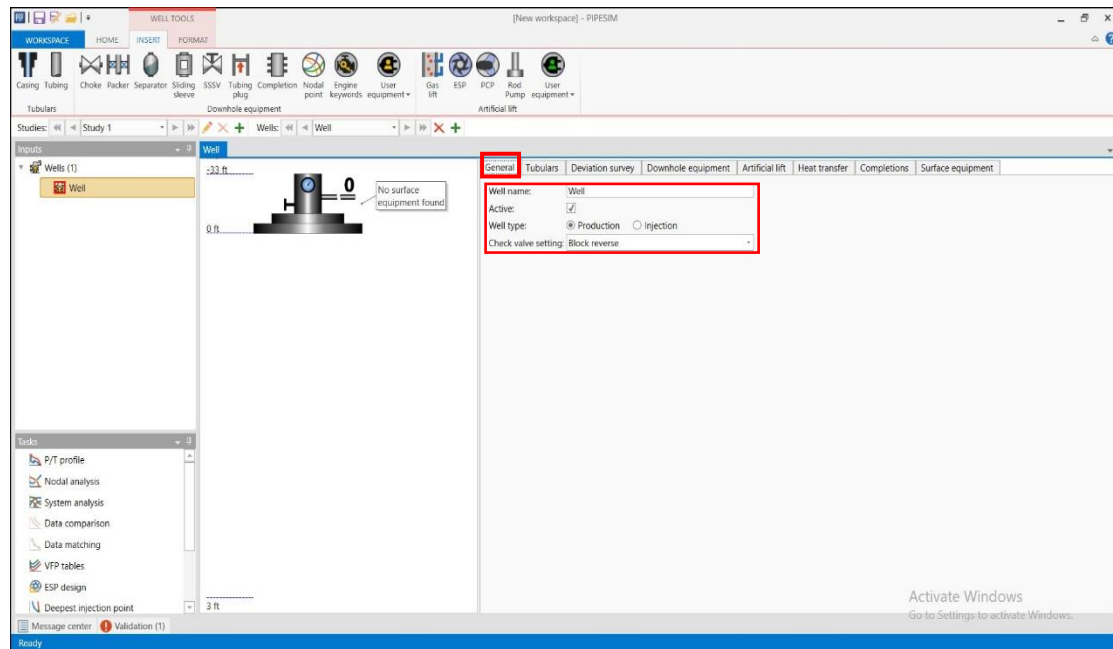
1. Στοιχεία τις γεώτρησης. Αρχικά, δίνονται στοιχεία για τη μορφή της γεώτρησης στον τρισδιάστατο χώρο, ώστε το λογισμικό να μπορεί να προσδιορίσει σωστά τις επιπτώσεις των τριβών (που είναι ανάλογες του

- μήκους του παραγωγικού σωλήνα) και της βαρύτητας (που εξαρτάται από τη διαφορά στάθμης των άκρων της γεώτρησης).
2. Πληροφορίες για τις σωληνώσεις, όπως η διατομή τους και η τραχύτητά τους, παράμετροι που επηρεάζουν άμεσα την TPR της γεώτρησης.
  3. Πληροφορίες για απαραίτητο εξοπλισμό είτε στην επιφάνεια (για τις επιφανειακές επεξεργασίες) είτε κατά μήκος της γεώτρησης (για τη λειτουργία της γεώτρησης και τον έλεγχο της TPR).
  4. Πληροφορίες για τον ταμιευτήρα, όπως πίεση και θερμοκρασία αλλά και για το ρευστό σχετικά με τη θερμοδυναμική συμπεριφορά αλλά και τις ιδιότητες αυτού, όπως το ιξώδες. Ο συνδυασμός των δεδομένων του ταμιευτήρα και του ρευστού θα δώσει το PI του ταμιευτήρα και την τελική IPR.
  5. Τα θερμικά δεδομένα των περιβαλλόντων πετρωμάτων, σχηματίζοντας το θερμικό προφίλ του σχηματισμού, ώστε να μπορέσει το λογισμικό να υπολογίσει σωστά τις επιπτώσεις των μεταβολών της θερμοκρασίας (π.χ. αλλαγές στο ιξώδες και στην πυκνότητα του ρευστού) στην TPR.

Στη συνέχεια του κεφαλαίου αυτού θα αναλυθεί βήμα προς βήμα η ανάπτυξη του μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε στο PIPESIM, για την ανάπτυξη μιας γεώτρησης και την ενσωμάτωση του ρευστού που τη διαρρέει. Επίσης, θα αναλυθούν οι επιλογές προσομοιώσεων P/T profile και Nodal analysis, καθώς επίσης και η επιλογή διερεύνησης Phase envelope.

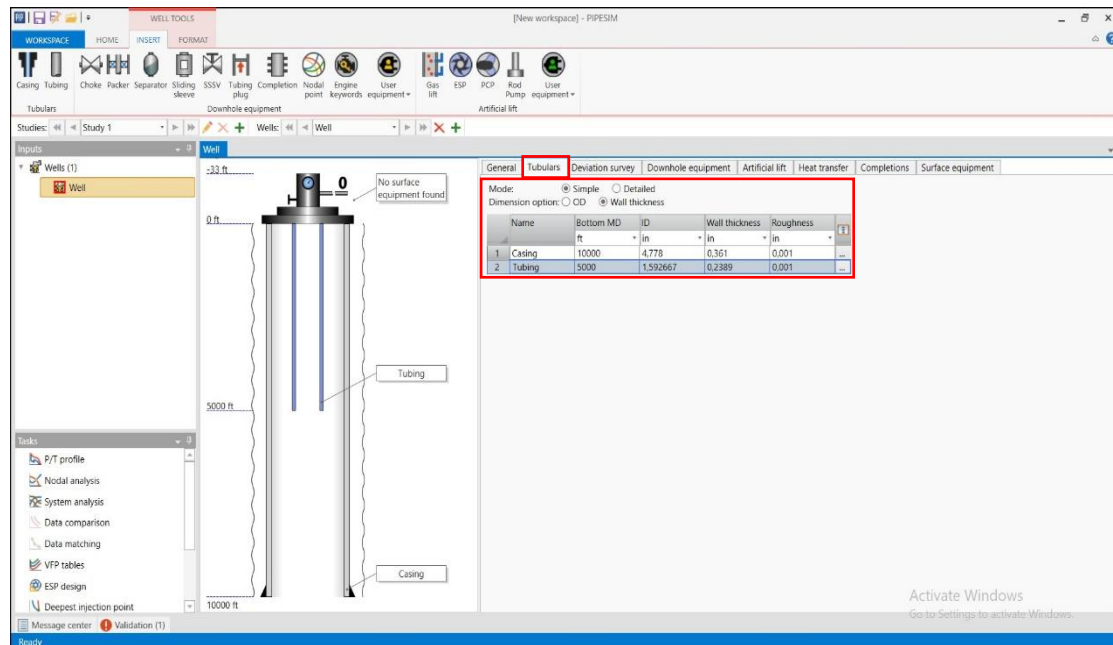
## ***5.1 Εισαγωγή στο PIPESIM***

Ανοίγοντας το PIPESIM για τη δημιουργία νέας γεώτρησης, η πρώτη πληροφορία που πρέπει να εισαχθεί στην καρτέλα «General» είναι το αν η γεώτρηση είναι παραγωγική (production) ή θα χρησιμοποιηθεί για εισπίεση (injection) (Εικόνα 5-1).



Εικόνα 5-1: Η καρτέλα "General" του PIPESIM

Στη συνέχεια στην καρτέλα «Tubulars» (Εικόνα 5-2) συμπληρώνονται τα στοιχεία των σωληνώσεων που θα χρησιμοποιηθούν (σωλήνες παραγωγής (tubing) και σωληνώσεις (casing)) καθώς και οι διαστάσεις τους, που περιλαμβάνουν το μήκος, το πάχος τους και την τραχύτητά τους.

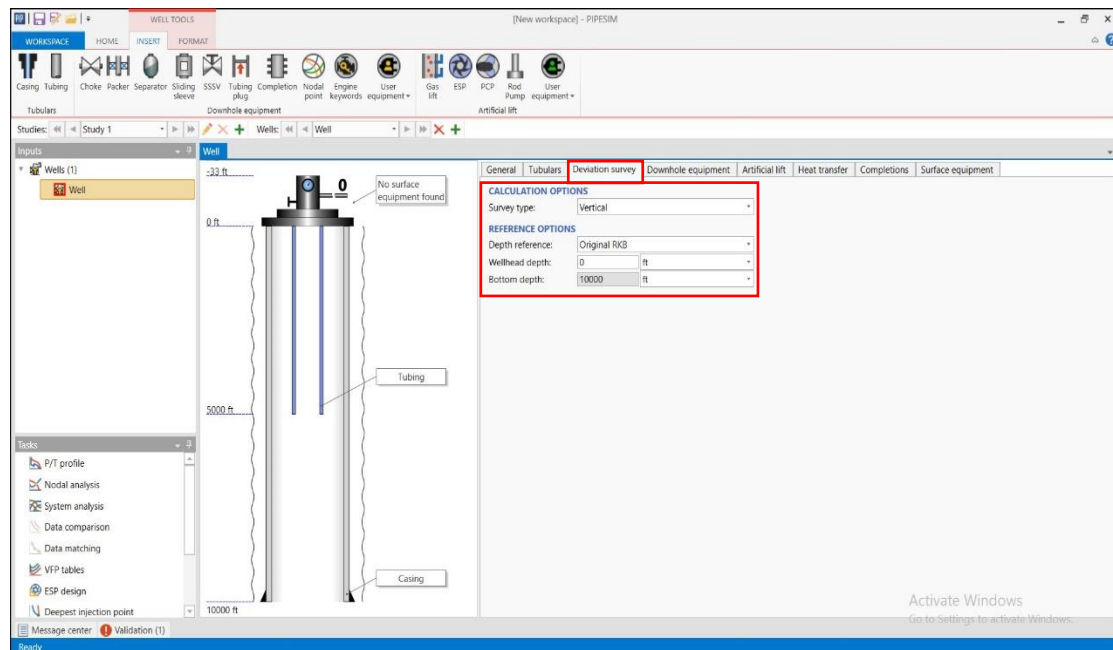


Εικόνα 5-2: Η καρτέλα "Tubulars" του PIPESIM

Στην καρτέλα «Deviation survey» (Εικόνα 5-3) εισάγεται η γεωμετρία της γεώτρησης. Υπάρχει η επιλογή της κατακόρυφης γεώτρησης, της γεώτρησης δύο διαστάσεων και της γεώτρησης

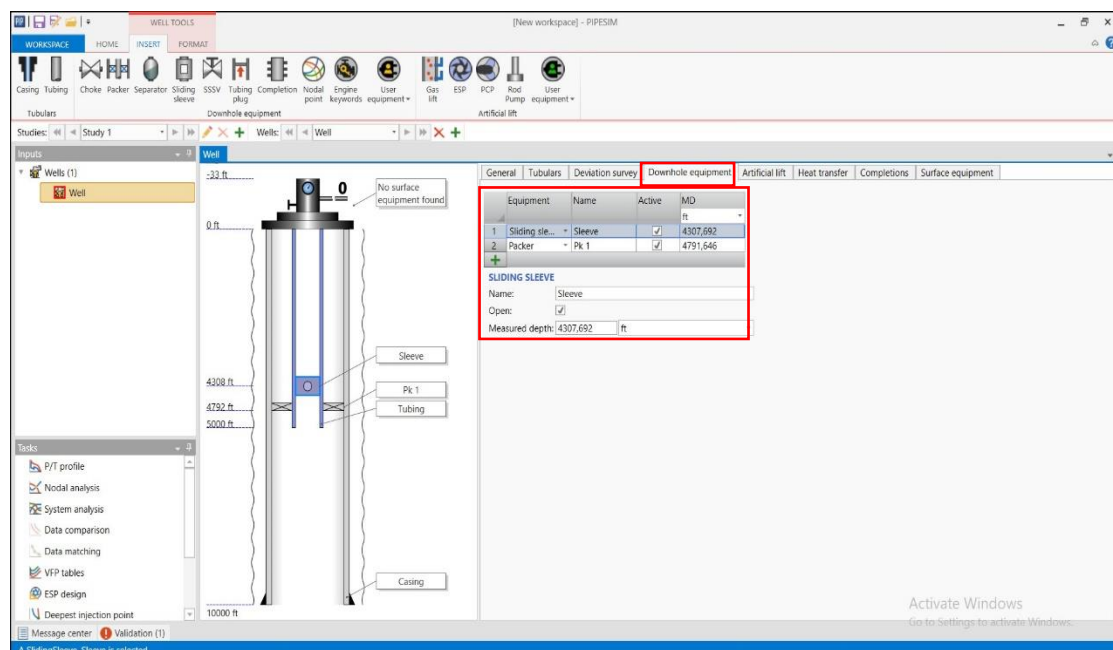


τριών διαστάσεων, όπου μπορεί να προστεθεί οποιαδήποτε παρέκκλιση είναι απαραίτητη από την απλή κατακόρυφη γεώτρηση, δημιουργώντας οποιαδήποτε μορφή κεκλιμένης γεώτρησης.



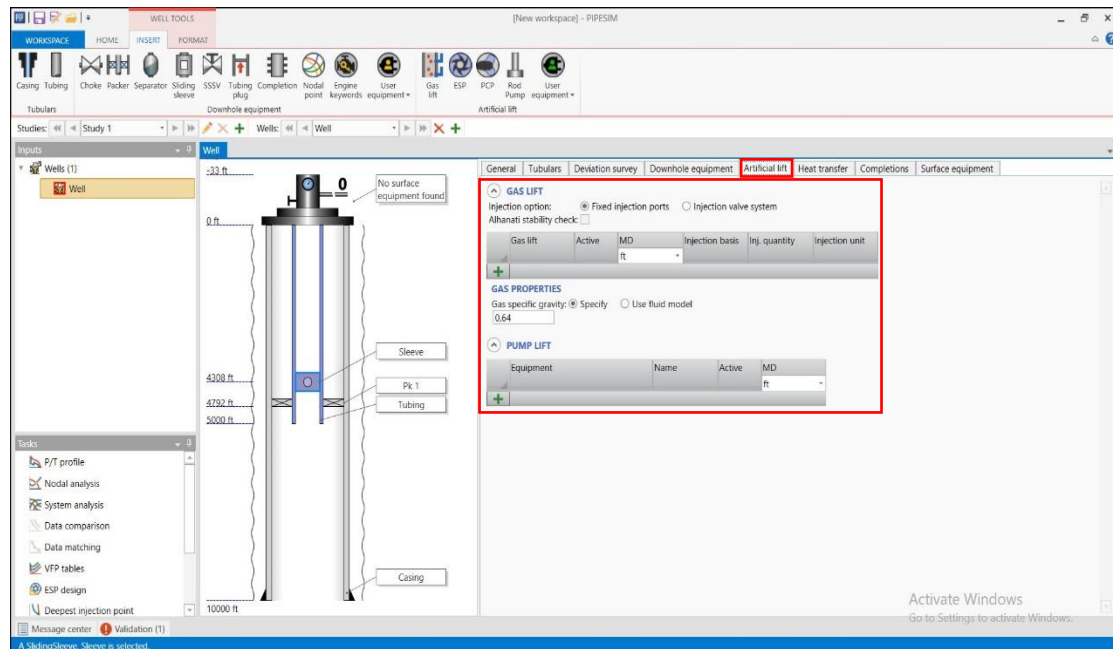
Εικόνα 5-3: Η καρτέλα "Deviation survey" του PIPESIM

Στην καρτέλα «Downhole equipment» (Εικόνα 5-4) μπορεί να προστεθεί οποιοσδήποτε εξοπλισμός έχει εγκατασταθεί κατά μήκος της γεώτρησης, όπως packers και sliding sleeves, σε όποιο σημείο της γεώτρησης χρειάζεται.



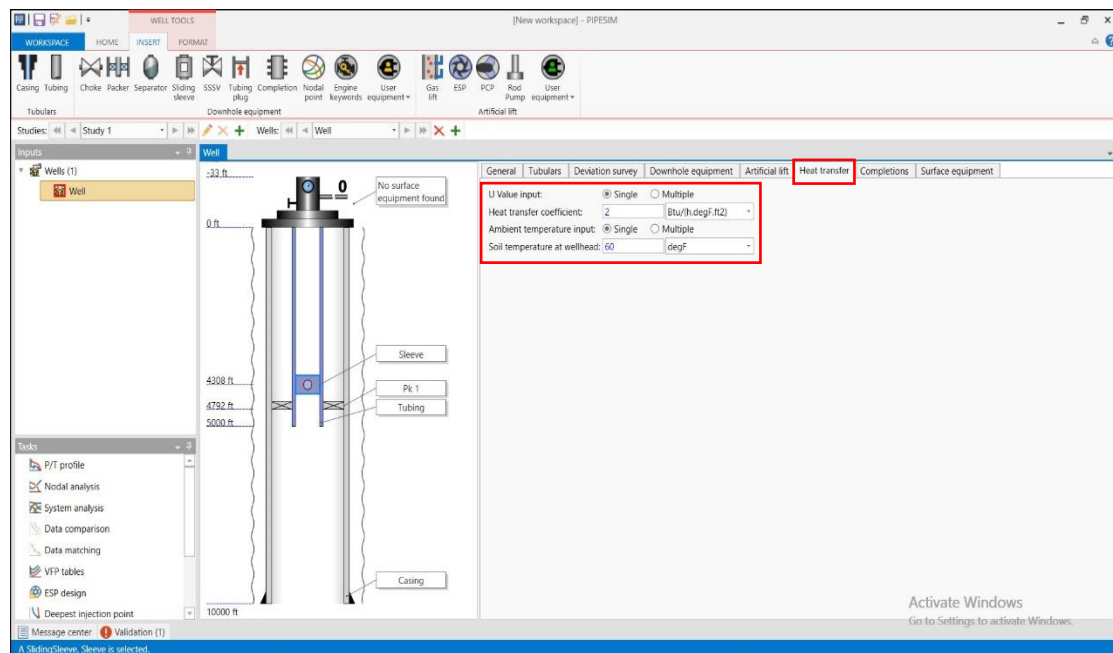
Εικόνα 5-4: Η καρτέλα "Downhole equipment" του PIPESIM

Στην καρτέλα «Artificial lift» (Εικόνα 5-5) δίνεται η δυνατότητα προσθήκης συστήματος τεχνητής ανύψωσης, όπως ανύψωση με τη βοήθεια αερίου (gas lift) ή με τη βοήθεια αντλίας (pump lift).



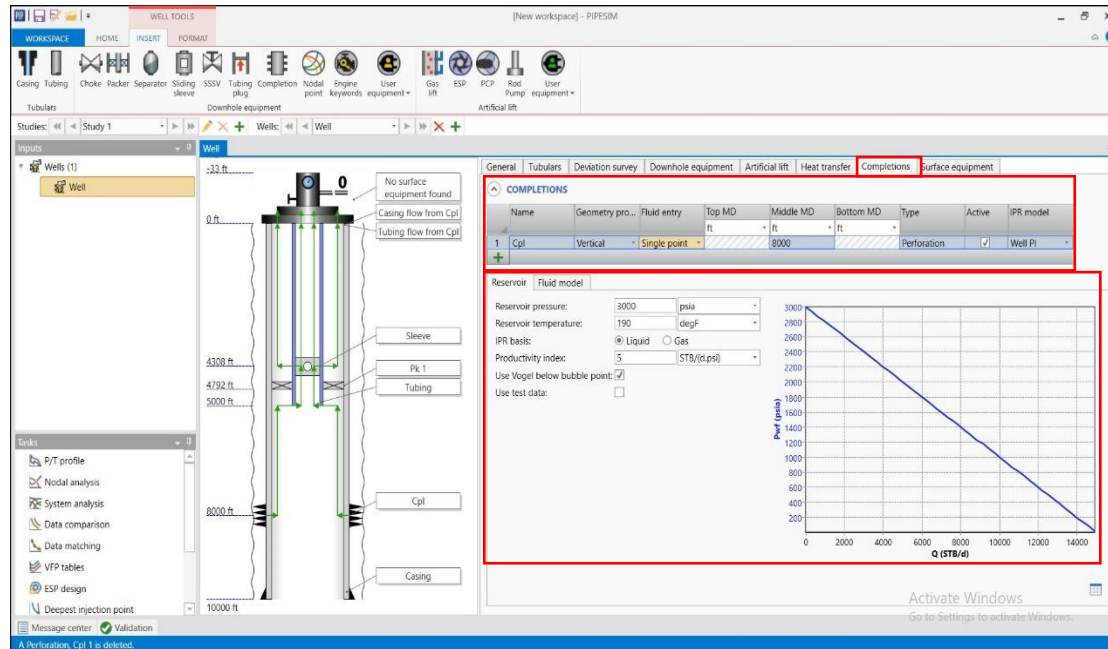
Εικόνα 5-5: Η καρτέλα "Artificial lift" του PIPESIM

Από την καρτέλα «Heat transfer» (Εικόνα 5-6) δίνεται το θερμοκρασιακό προφίλ των σχηματισμών πέριξ της γεώτρησης, εισάγοντας τον συντελεστή αγωγιμότητας U και θερμοκρασιακές τιμές του πετρώματος σε διάφορα βάθη.



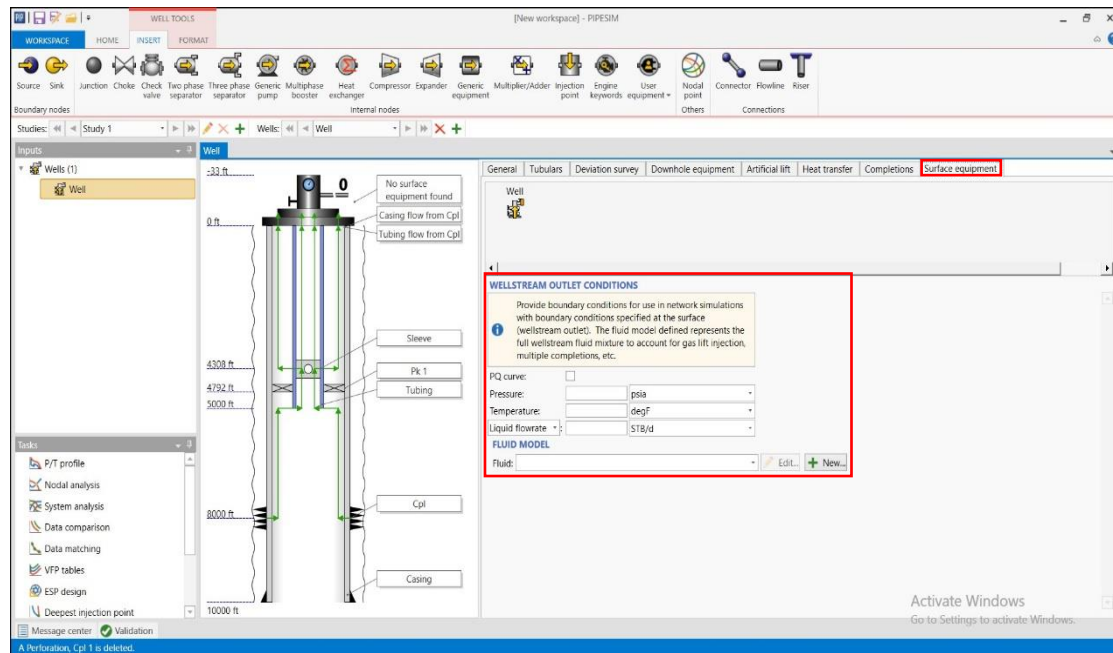
Εικόνα 5-6: Η καρτέλα "Heat transfer" του PIPESIM

Στην επόμενη καρτέλα, αυτή των «Completions» (Εικόνα 5-7), δηλώνεται το βάθος των διατρήσεων (perforations), τα χαρακτηριστικά του ταμειυτήρα και το μοντέλο του προς ρευστού που ρέει στη γεώτρηση, έτσι ώστε το λογισμικό να αντιληφθεί σωστά την καμπύλη IPR που διέπει τη ροή στον ταμειυτήρα.



Εικόνα 5-7: Η καρτέλα "Completions" του PIPESIM

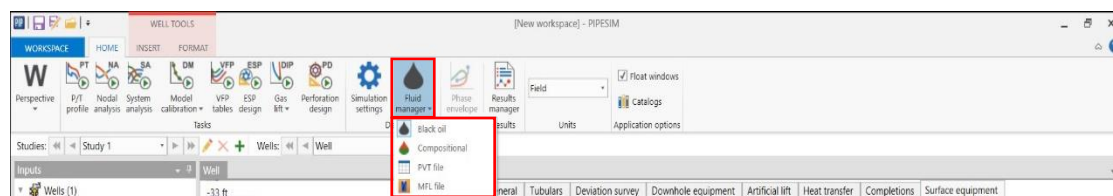
Τέλος, στην καρτέλα «Surface equipment» (Εικόνα 5-8) εισάγονται οι συνθήκες στην κεφαλή της γεώτρησης, δηλαδή η πίεση, η θερμοκρασία και η παροχή που επικρατεί στο σημείο αυτό. Ακόμη, μπορεί να προστεθεί οποιοσδήποτε μηχανικός εξοπλισμός επιφάνειας χρειάζεται, όπως βαλβίδες, αντλίες κ.α.



Εικόνα 5-8: Η καρτέλα "Surface equipment" του PIPESIM

## 5.2 Μοντέλο ρευστού και θερμοδυναμικά εργαλεία

Η εισαγωγή του μοντέλου ρευστού στο PIPESIM γίνεται στην κύρια καρτέλα «HOME» και από την υποκαρτέλα «Fluid manager» (Εικόνα 5-9). Οι κύριες επιλογές που υπάρχουν είναι τέσσερις. Πρώτη επιλογή είναι το «Black Oil» μοντέλο, που αποτελεί το πιο απλό μοντέλο προσομοίωσης συμπεριφοράς ρευστού ενώ βρίσκει χρήση μόνο σε υδρογονάνθρακες με βαριά συστατικά. Δεύτερη επιλογή αποτελεί το «Compositional» μοντέλο το οποίο βασίζεται στη χρήση καταστατικών εξισώσεων για την προσομοίωση της συμπεριφοράς του ρευστού. Τέλος, με τις επιλογές «PVT file» και «MFL file» δίνεται η δυνατότητα εισαγωγής δεδομένων αναλύσεων PVT ρευστού από άλλα διαδομένα λογισμικά που προσομοιώνουν PVT δεδομένα, όπως HYSYS, το PVTsim κ.α.

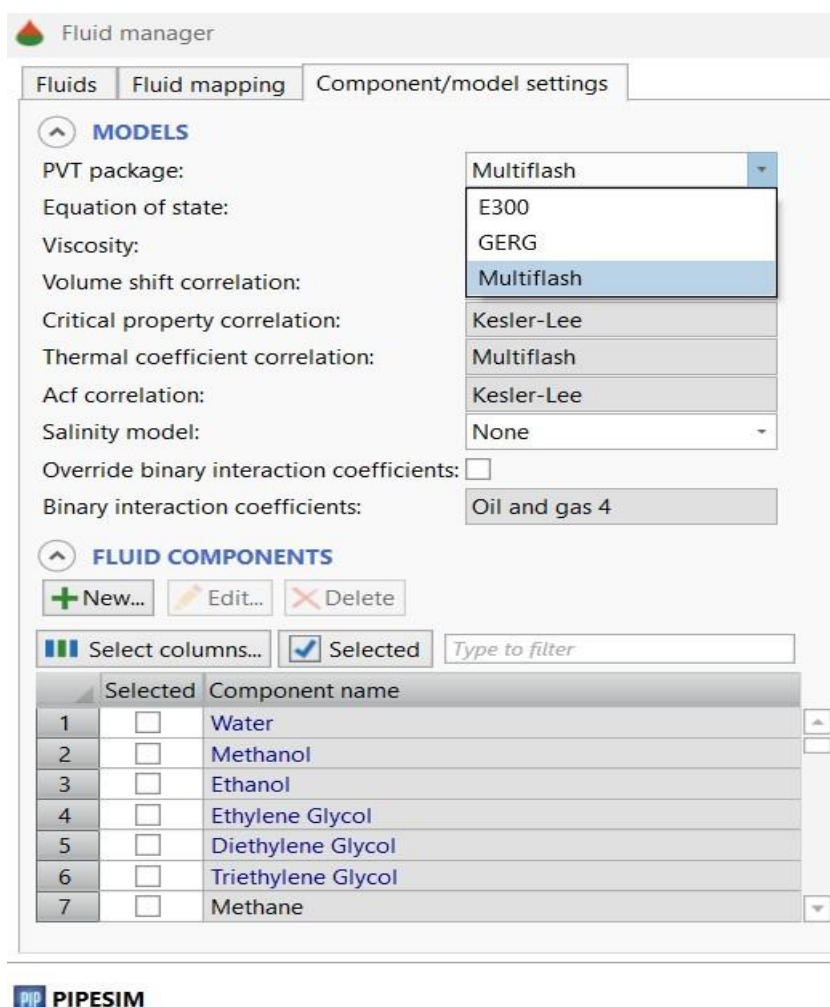


Εικόνα 5-9: Η καρτέλα "Fluid manager" του PIPESIM

### 5.2.1 «Compositional» μοντέλο ρευστού

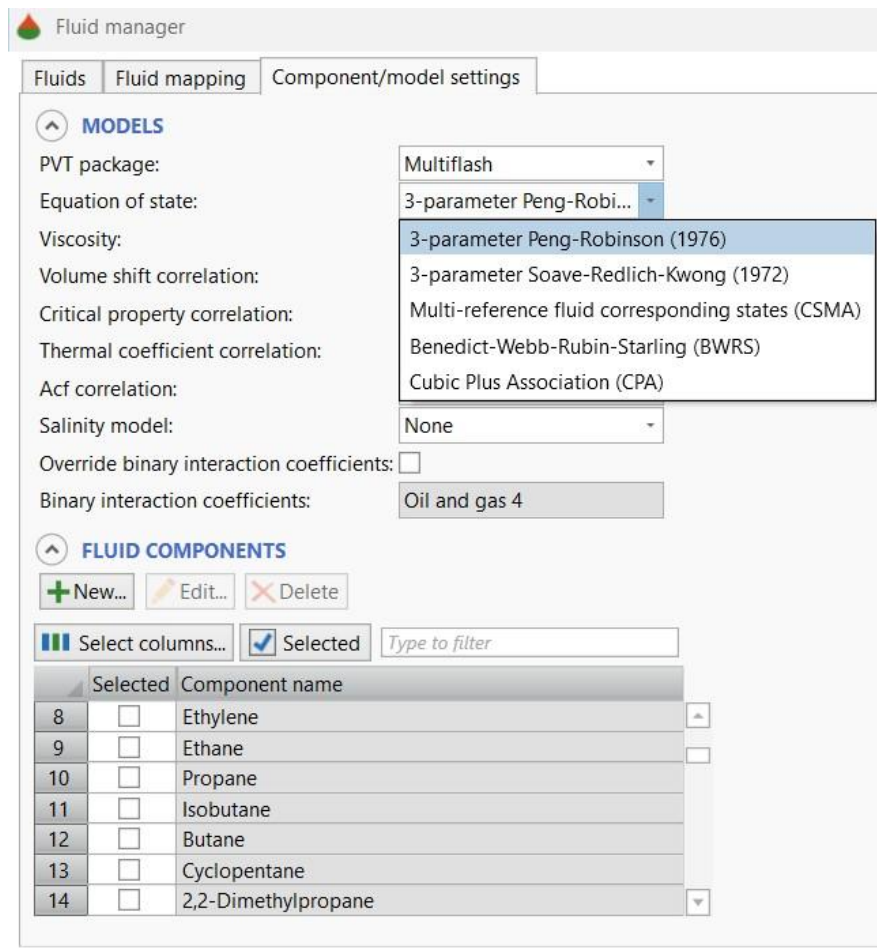
Επιλέγοντας το «compositional» μοντέλο, ανοίγει η καρτέλα των επιλογών με τις οποίες θα αναπτυχθεί το μοντέλο του ρευστού. Αρχικά πρέπει να επιλεγεί το PVT πακέτο (PVT

package) που θα χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων και της συμπεριφοράς φάσεων του ρευστού (Εικόνα 5-10). Οι επιλογές που παρέχονται είναι το E300, το GERG και το Multiflash. Τα δύο PVT πακέτα που θα χρησιμοποιηθούν στις προσομοιώσεις είναι το Multiflash και το E300. Το πακέτο Multiflash αναπτύχθηκε από την εταιρία KBC, την οποία εξαγόρασε η και ενσωμάτωσε το PVT πακέτο στο λογισμικό PIPESIM. Το E300 είναι το compositional PVT πακέτο που χρησιμοποιεί το λογισμικό προσομοίωσης ταμειυτήρα υδρογονανθράκων ECLIPSE της Schlumberger. Το PVT πακέτο GERG βασίζεται στη χρήση της ομώνυμης καταστατικής εξίσωσης και έχει πάρει το όνομά του από τον οργανισμό European Gas Research Group (GERG), ο οποίος έχει υιοθετήσει την χρήση του GERG PVT πακέτου από το 2004.



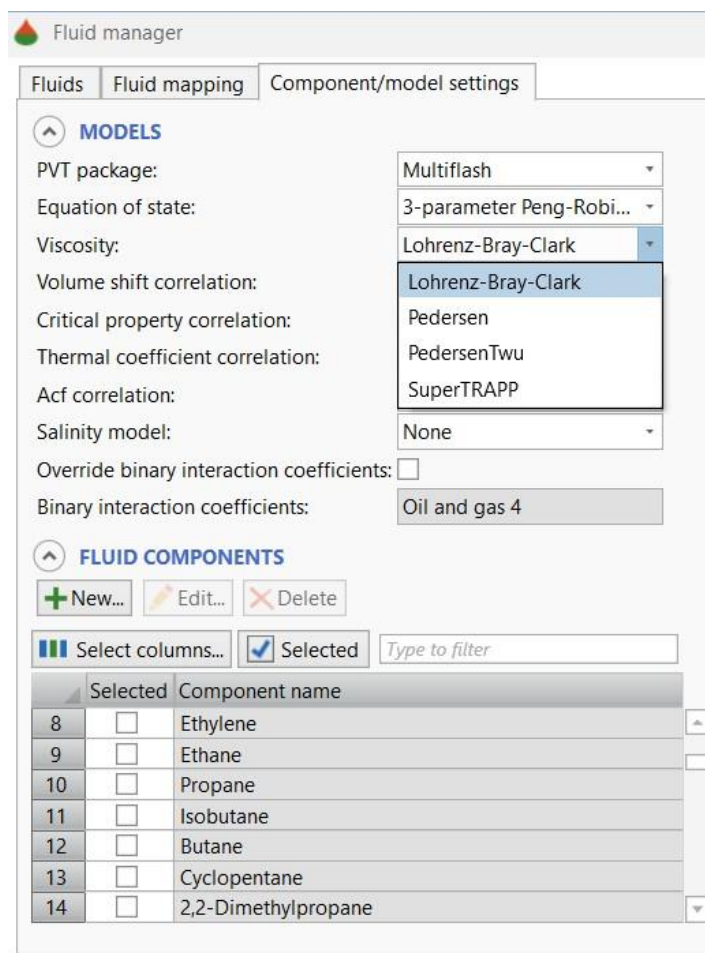
Εικόνα 5-10: Επιλογές για το PVT package

Στη συνέχεια επιλέγεται η καταστατική εξίσωση (Equation of state) που θα χρησιμοποιηθεί για τους υπολογισμούς των ιδιοτήτων και του φάκελου φάσεων του ρευστού. Το κάθε πακέτο PVT συνοδεύεται από τις δικές του καταστατικές εξισώσεις με το Multiflash να έχει τη μεγαλύτερη γκάμα επιλογών (Εικόνα 5-11).



Εικόνα 5-11: Επιλογές για τις καταστατικές εξισώσεις (EOS)

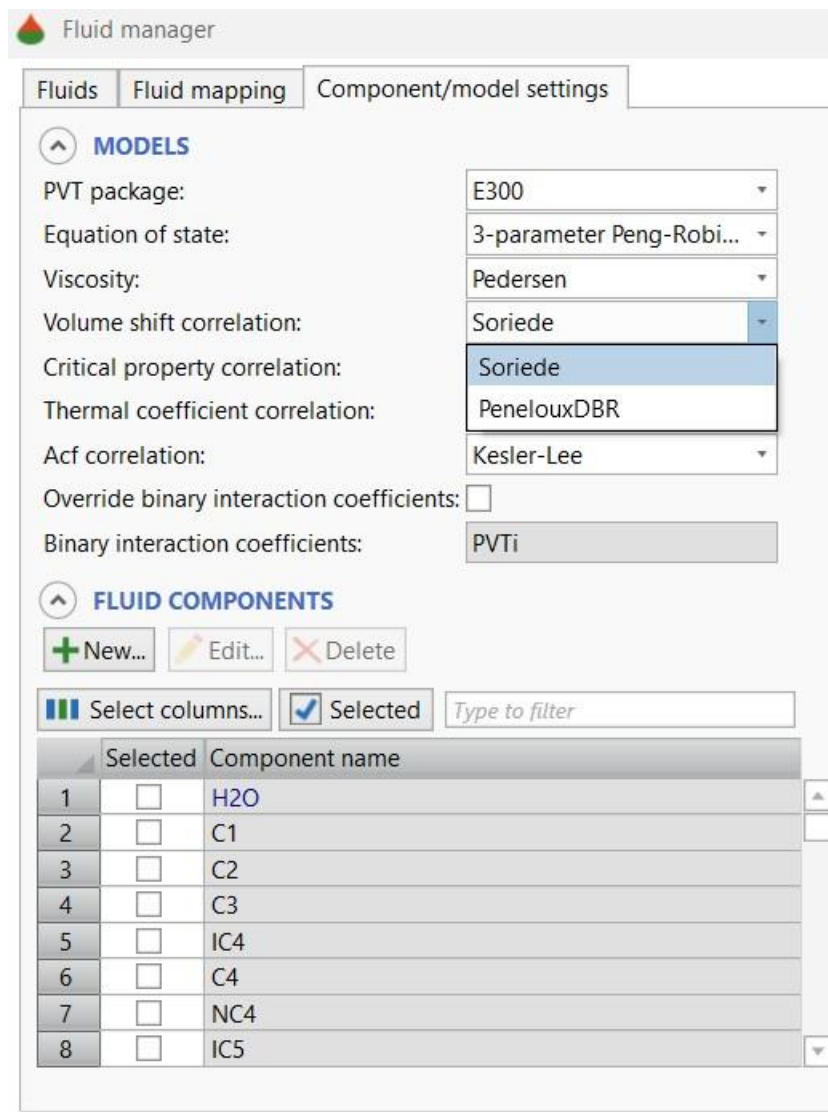
Ακολουθεί η επιλογή των συσχετίσεων για τον προσδιορισμό του ιξώδους (viscosity) (Εικόνα 5-12). Όπως στις καταστατικές εξισώσεις, έτσι και σε αυτή την περίπτωση, το κάθε πακέτο PVT συνοδεύεται από τις δικές του συσχετίσεις. Οι πιο διαδεδομένες ωστόσο είναι η συσχέτιση της Pedersen και των Lohrenz – Bray – Clark. Και οι δύο προσδιορίζουν το ιξώδες της κάθε φάσης ως συνάρτηση της σύστασης, της πίεσης και της θερμοκρασίας του ρευστού.



PIP PIPESIM

Εικόνα 5-12: Επιλογές για τις συσχετίσεις του ιξώδους

Ακόμη, υπάρχει η δυνατότητα επιλογής για τη συσχέτιση που διέπει το volume shift που αφορά στη χρήση συντελεστή διόρθωσης του γραμμομοριακού όγκου των συστατικών του ρευστού (π.χ. Peneloux, Soriede, κλπ.), ώστε να ληφθούν ακριβέστερες εκτιμήσεις της πυκνότητας (Εικόνα 5-13).

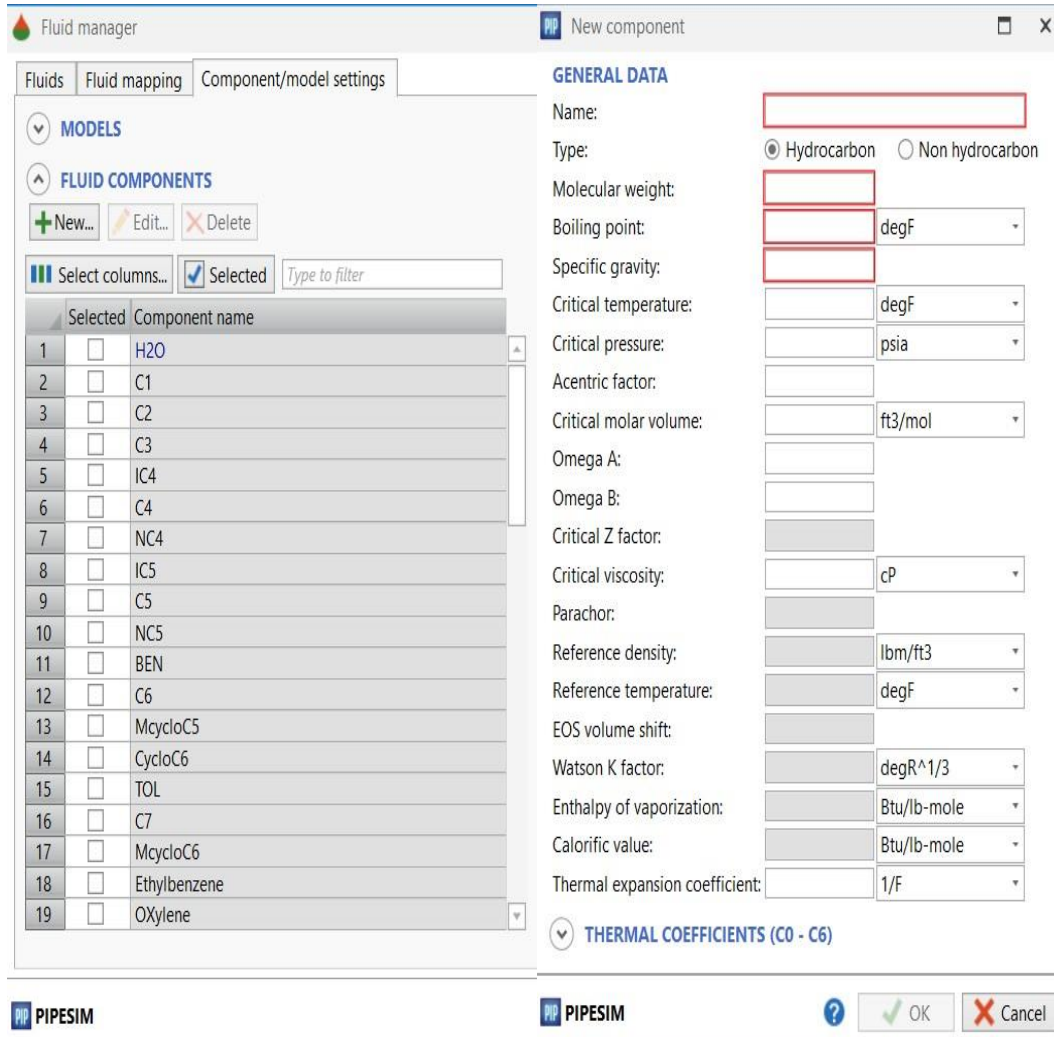


PIP PIPESIM

Εικόνα 5-13: Επιλογές για τις συσχετίσεις του Volume shift

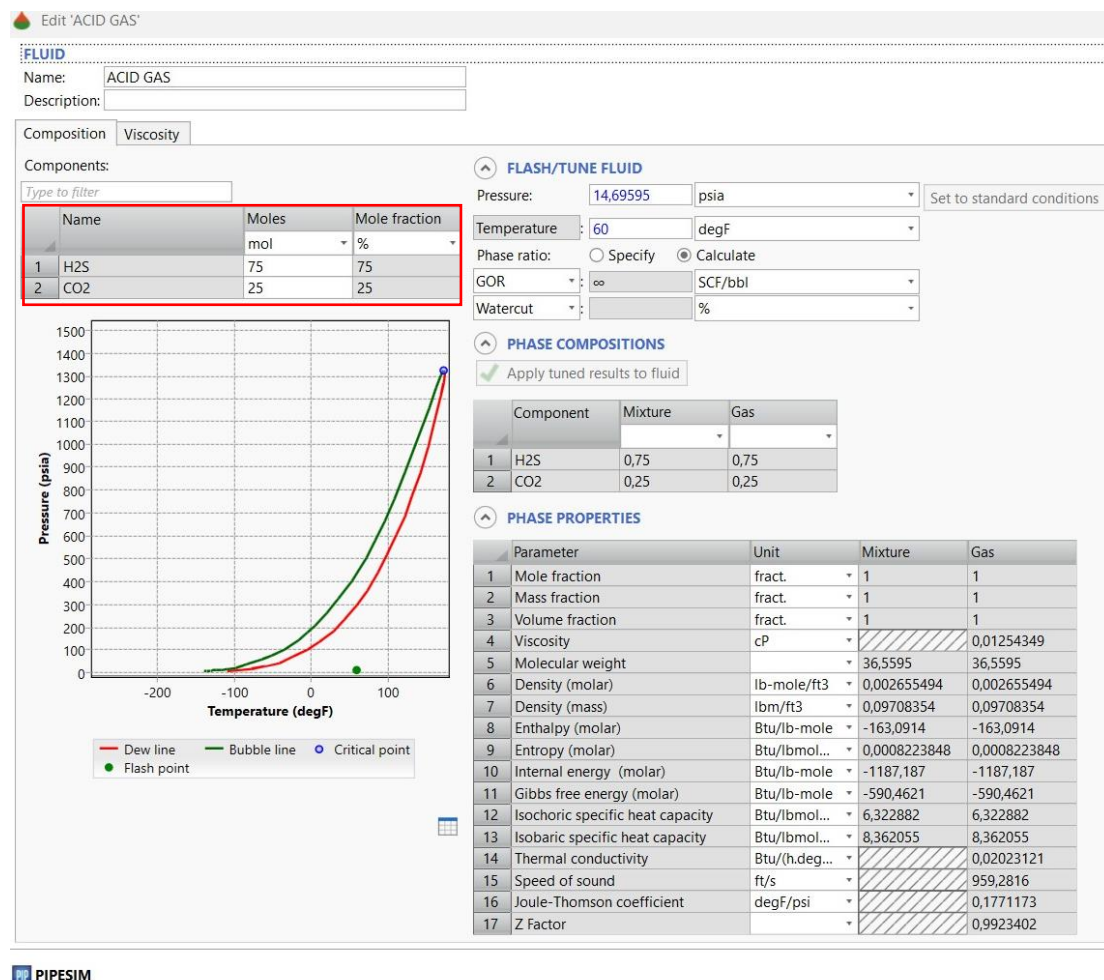


Επόμενο βήμα αποτελεί η επιλογή των συστατικών του ρευστού, όπου υπάρχει η δυνατότητα προσθήκης οποιουδήποτε συστατικού, είτε από τον κατάλογο αυτών που ήδη υπάρχουν στη βιβλιοθήκη του PIPESIM, είτε προσθέτοντας ένα νέο συστατικό και ορίζοντας τα χαρακτηριστικά του, όπως για παράδειγμα το βαρύ κλάσμα ενός πετρελαϊκού ρευστού (Εικόνα 5-14).



Εικόνα 5-14: Επιλογή συστατικών ρευστού

Αφού λοιπόν έχουν δηλωθεί τα συστατικά του ρευστού πρέπει να οριστεί και η ποσοστιαία σύσταση του ρευστού εισάγοντας τα % γραμμομόρια (% moles) του κάθε συστατικού (Εικόνα 5-15).



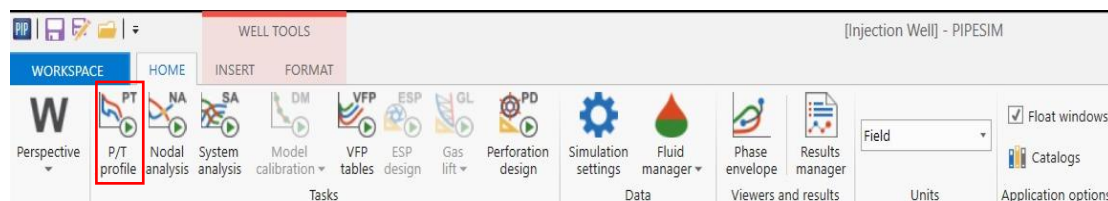
Εικόνα 5-15: Εισαγωγή ποσοστιαίας σύστασης του ρευστού

Με βάση τα εισαχθέντα δεδομένα, εμφανίζεται ο φάκελος φάσεων του ορισμένου ρευστού, δίπλα από τον πίνακα εισαγωγής της σύστασης στην καρτέλα με τίτλο «FLASH/TUNE FLUID». Στην καρτέλα «PHASE COMPOSITIONS» δίνεται η σύσταση που έχει το μείγμα σε υγρή και αέρια φάση στις δοθείσες συνθήκες. Τέλος, στην καρτέλα «PHASE PROPERTIES» εμφανίζονται σε πίνακα οι ιδιότητες των φάσεων του ρευστού, όπως η πυκνότητα, το ιζώδες, η ενθαλπία κ.α., στις ίδιες δοθείσες συνθήκες.

### 5.3 Προφίλ Πιέσεων και Θερμοκρασιών (P/T profile)

Με την εισαγωγή των δεδομένων για τη γεώτρηση αλλά τον καθορισμό του μοντέλου που θα χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση της συμπεριφοράς του ρευστού, επόμενη κίνηση είναι

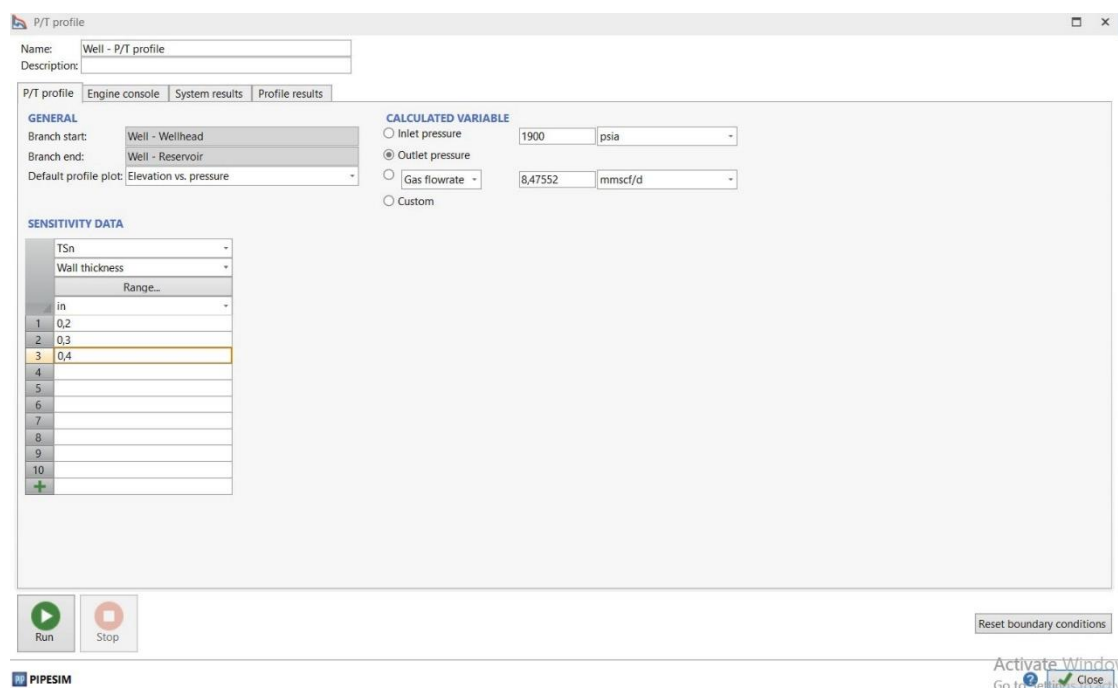
να ενεργοποιηθεί η επιλογή «P/T profile» που βρίσκεται πάνω στην καρτέλα «HOME» (Εικόνα 5-16).



Εικόνα 5-16: Η επιλογή «P/T profile» του PIPESIM

Στο παράθυρο του P/T profile (Εικόνα 5-17), στο σημείο που αναγράφει «CALCULATED VARIABLE», συμπληρώνονται τα δεδομένα που είναι γνωστά και επιλέγεται η μεταβλητή που χρειάζεται υπολογισμό. Για παράδειγμα, σε γεώτρηση εισπίεσης, η πίεση στην κεφαλή της γεώτρησης (Inlet pressure, όταν πραγματοποιείται εισπίεση) και η παροχή (flowrate) ρυθμίζονται από την επιφάνεια, άρα θεωρούνται γνωστές. Η πίεση που πρέπει να προσδιοριστεί είναι αυτή στον πυθμένα της γεώτρησης (Outlet pressure, όταν πραγματοποιείται εισπίεση).

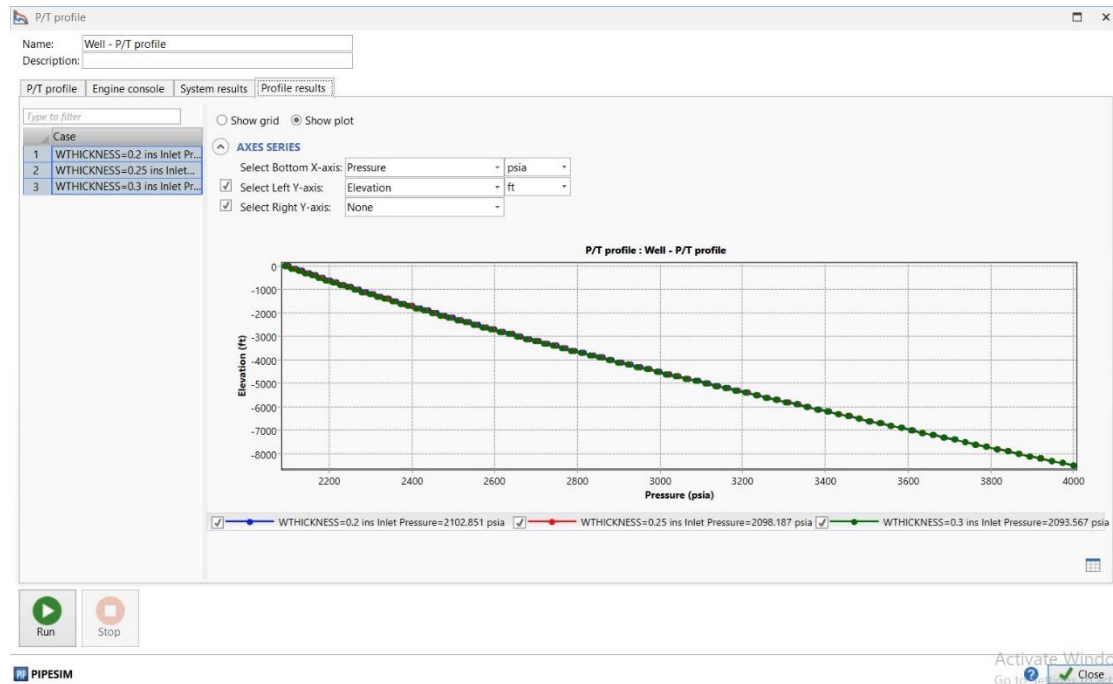
Επιπρόσθετα, παρέχεται και η επιλογή του sensitivity analysis, όπου μπορεί να ελεγχθεί η επίδραση οποιαδήποτε μεταβολής. Στην Εικόνα 5-17, για παράδειγμα, έχει επιλεγθεί να εκτελεστεί η προσομοίωση με τρία διαφορετικά πάχη του σωλήνα παραγωγής, για να αναλυθεί η επίδραση της συγκεκριμένης μεταβλητής στη ροή.



Εικόνα 5-17: Το εισαγωγικό παράθυρο του P/T profile

Στο σημείο αυτό μπορεί να εκτελεστεί η προσομοίωση της ροής πατώντας το πράσινο κουμπί «Run», στο κάτω μέρος του παραθύρου. Τα αποτελέσματα του P/T profile της γεώτρησης

δίνονται σε μορφή διαγράμματος (Εικόνα 5-18) και σε μορφή πίνακα (Εικόνα 5-19), στην καρτέλα «Profile results».



Εικόνα 5-18: Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης σε διάγραμμα

| Case | Equipment | Type   | Total distance (ft) | Elevation (ft) | Pressure (psia) | Temperature (degF) | Fluid mean... (ft/s) | Liquid holdup (EV) | G-L Pattern   |
|------|-----------|--------|---------------------|----------------|-----------------|--------------------|----------------------|--------------------|---------------|
| 1    | TSn       | Tubing | 0                   | 0              | 2102.851        | 200                | 6.301635             | 0                  | 0.30540812... |
| 2    |           | Tubing | 100                 | -100           | 2118.751        | 199.7611           | 6.22521              | 0                  | 0.30355051... |
| 3    |           | Tubing | 200                 | -200           | 2134.859        | 199.5427           | 6.150336             | 0                  | 0.30171951... |
| 4    |           | Tubing | 300                 | -300           | 2151.173        | 199.3446           | 6.077699             | 0                  | 0.29993252... |
| 5    |           | Tubing | 400                 | -400           | 2167.692        | 199.1668           | 6.007205             | 0                  | 0.29818801... |
| 6    |           | Tubing | 500                 | -500           | 2184.415        | 199.0096           | 5.938765             | 0                  | 0.29648453... |
| 7    |           | Tubing | 600                 | -600           | 2201.339        | 198.8728           | 5.872297             | 0                  | 0.29482070... |
| 8    |           | Tubing | 700                 | -700           | 2218.464        | 198.7565           | 5.807723             | 0                  | 0.29319523... |
| 9    |           | Tubing | 800                 | -800           | 2235.788        | 198.6608           | 5.744968             | 0                  | 0.29160688... |
| 10   |           | Tubing | 900                 | -900           | 2253.309        | 198.5857           | 5.683962             | 0                  | 0.29005447... |
| 11   |           | Tubing | 1000                | -1000          | 2271.027        | 198.5313           | 5.624641             | 0                  | 0.28853690... |
| 12   |           | Tubing | 1100                | -1100          | 2288.939        | 198.4976           | 5.56694              | 0                  | 0.28705309... |
| 13   |           | Tubing | 1200                | -1200          | 2307.045        | 198.4848           | 5.510801             | 0                  | 0.28560205... |
| 14   |           | Tubing | 1300                | -1300          | 2325.342        | 198.493            | 5.456167             | 0                  | 0.28418281... |
| 15   |           | Tubing | 1400                | -1400          | 2343.83         | 198.5221           | 5.402987             | 0                  | 0.28279447... |
| 16   |           | Tubing | 1500                | -1500          | 2362.506        | 198.4615           | 5.352027             | 0                  | 0.28145768... |
| 17   |           | Tubing | 1600                | -1600          | 2381.364        | 198.2689           | 5.302565             | 0                  | 0.28018050... |
| 18   |           | Tubing | 1700                | -1700          | 2400.4          | 198.0938           | 5.256425             | 0                  | 0.27893256... |
| 19   |           | Tubing | 1800                | -1800          | 2419.613        | 197.9361           | 5.210556             | 0                  | 0.27771288... |
| 20   |           | Tubing | 1900                | -1900          | 2439            | 197.796            | 5.16591              | 0                  | 0.27652053... |
| 21   |           | Tubing | 2000                | -2000          | 2458.561        | 197.6737           | 5.12244              | 0                  | 0.27535463... |

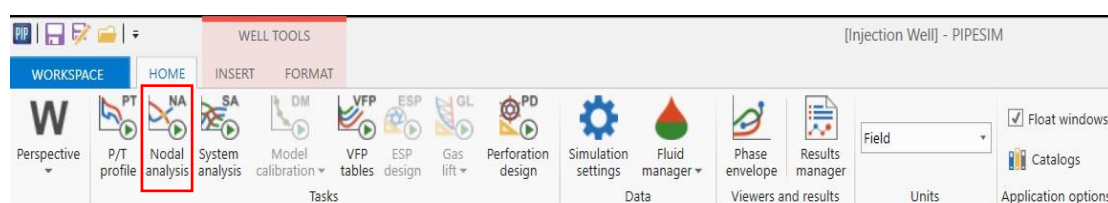
Εικόνα 5-19: Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης σε πίνακα

Με την εκτέλεση της προσομοίωσης του P/T profile, πραγματοποιείται η μοντελοποίηση της ροής του ρευστού στη γεώτρηση με βάση τις δοσμένες συνθήκες, κατασκευάζοντας το προφίλ των πιέσεων και των θερμοκρασιών κατά μήκος της γεώτρησης. Τόσο στο διάγραμμα, όσο και

στον πίνακα, πέρα από τις τιμές της πίεσης και της θερμοκρασίας, μπορούν να ζητηθούν πληθώρα πληροφοριών, όπως το ιξώδες, η πυκνότητα, η ταχύτητα κ.α. του ρευστού σε οποιοδήποτε σημείο κατά μήκος της γεώτρησης. Το P/T profile αποτελεί σημαντικότερο εργαλείο μελέτης της ροής, καθώς παρέχει την πληροφορία για όλες τις σημαντικές ιδιότητες σε κάθε σημείο της γεώτρησης.

## 5.4 Ανάλυση Κόμβων (Nodal Analysis)

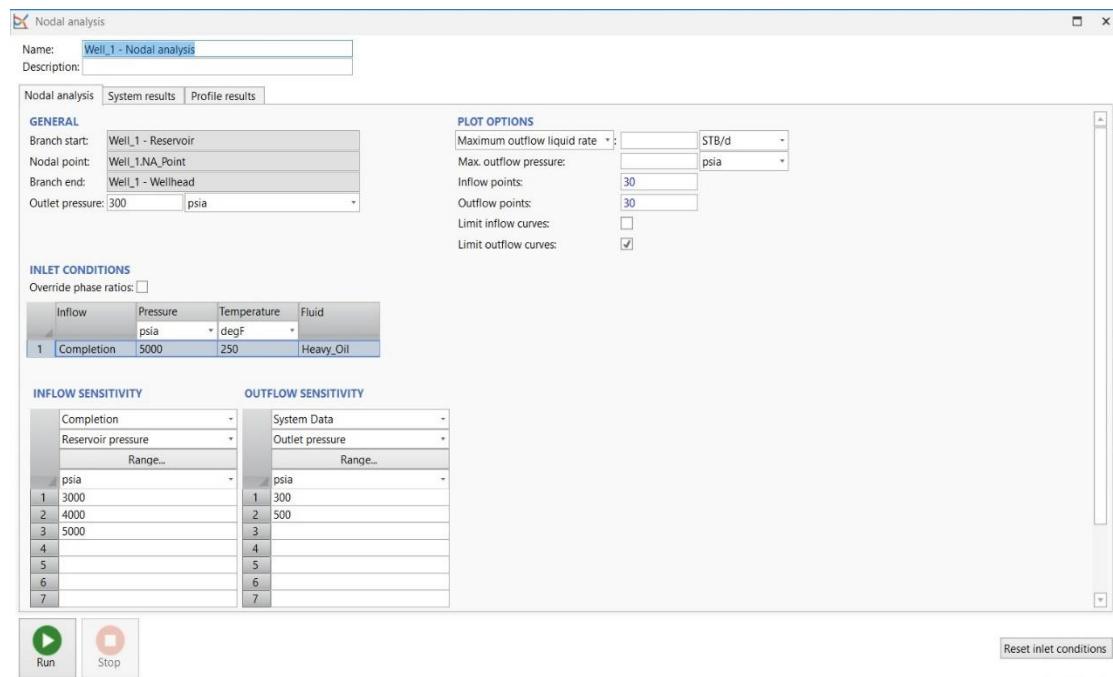
Πολύ σημαντική δυνατότητα που προσφέρει το λογισμικό PIPESIM είναι η ανάλυση κόμβων. Με την επιλογή του «Nodal analysis», από την καρτέλα «HOME» (Εικόνα 5-20), μπορούν να κατασκευαστούν οι IPR και TPR που διέπουν τη ροή στο σύστημα ταμειυτήρας – γεώτρηση.



Εικόνα 5-20: Η επιλογή «Nodal analysis» του PIPESIM

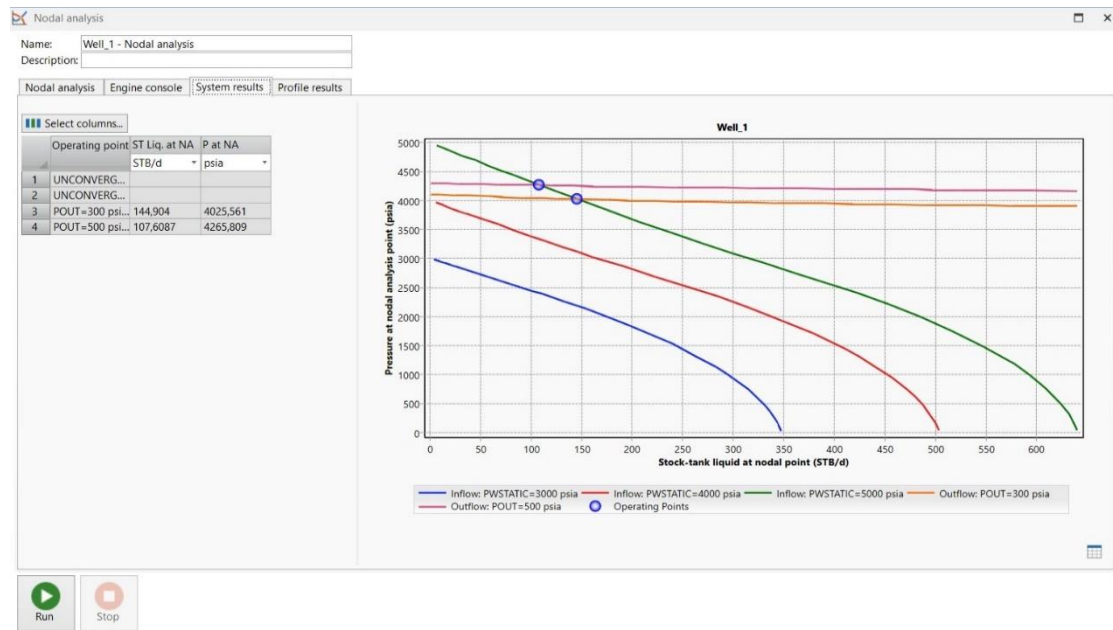
Στο εισαγωγικό παράθυρο του nodal analysis (Εικόνα 5-21), για γεώτρηση παραγωγής, οι συνθήκες του ρευστού στην κεφαλή της γεώτρησης (Outlet conditions) είναι αυτές που έχουν δοθεί στην καρτέλα «Surface equipment», ενώ οι συνθήκες που επικρατούν στον ταμειυτήρα (Inlet conditions), λαμβάνονται κατευθείαν από την καρτέλα «Completions», όπου και είχαν εισαχθεί, με τη διαφορά ότι μπορούν να τροποποιηθούν άμεσα από το παράθυρο του nodal analysis. Παρέχεται, επίσης, η επιλογή του sensitivity analysis, αυτή τη φορά όμως ξεχωριστά για τις ιδιότητες του καθενός από τα δύο συστήματα εισροής και εκροής (inflow και outflow). Για παράδειγμα, είναι εφικτός ο προσδιορισμός της ευαισθησίας της υπολογιζόμενης παροχής ως προς τον επιδερμικό συντελεστή (skin factor), που αποτελεί στοιχείο της IPR. Επίσης, είναι εφικτή η ανάλυση ευαισθησίας ως προς το πάχος της σωλήνωσης παραγωγής που αποτελεί στοιχείο της TPR.

Στο σημείο αυτό, πρέπει να σημειωθεί πως για γεωτρήσεις εισπίεσης οι συνθήκες στην κεφαλή της γεώτρησης ονομάζονται «inlet conditions» και οι συνθήκες στο ταμειυτήρα ονομάζονται «outlet conditions». Αντίθετα, σε γεωτρήσεις παραγωγής, οι συνθήκες στην κεφαλή της γεώτρησης ονομάζονται «outlet conditions», ενώ οι συνθήκες στον ταμειυτήρα «inlet conditions». Αυτό έχει να κάνει με το ποιο σύστημα, ταμειυτήρα ή γεώτρηση, θεωρεί το λογισμικό ως σύστημα εισροής και ποιο σύστημα εκροής.



Εικόνα 5-21: Εισαγωγικό παράθυρο του Nodal analysis για παραγωγική γεώτρηση

Με την εκτέλεση της ανάλυσης κόμβων «κουμπί Run», τα αποτελέσματα που δίνει η ανάλυση κόμβων είναι οι γραφικές παραστάσεις των IPR και TPR, σε κοινό διάγραμμα πίεσης – παροχής, ώστε να προσδιοριστεί το σημείο λειτουργίας, όπως αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 4. Η παροχή και η πίεση στα σημεία λειτουργίας αναγράφονται σε πίνακα, δίπλα από το διάγραμμα (Εικόνα 5-22).

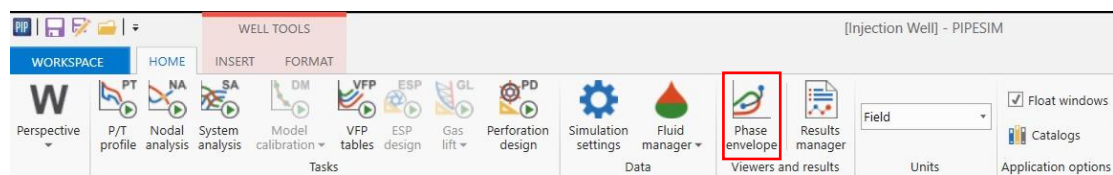


Εικόνα 5-22: Αποτελέσματα του nodal analysis

Στο συγκεκριμένο παράδειγμα, έχουν κατασκευαστεί τρεις IPR για τρεις διαφορετικές πιέσεις ταμιευτήρα και δύο TPR για δύο διαφορετικές πιέσεις στην κεφαλή της γεώτρησης, δεδομένα που ζητήθηκαν στο sensitivity analysis, όπως φαίνεται στο κάτω μέρος της Εικόνας 5-21. Οι τρεις τιμές πίεσης ταμιευτήρα οδηγούν σε τρεις IPR, ενώ οι δύο τιμές πίεσης κεφαλής οδηγούν σε δύο TPR, όπως φαίνεται στην Εικόνα.

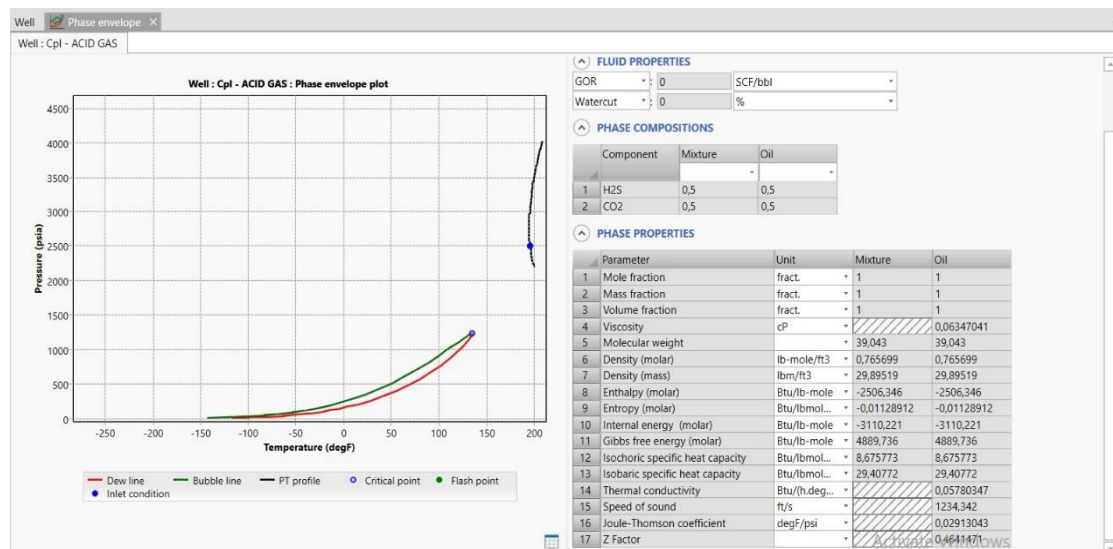
## 5.5 Διερεύνηση Φάκελου Φάσεων (Phase envelope)

Με την εκτέλεση της προσομοίωσης για τον προσδιορισμό των P/T προφίλ, ένα εργαλείο αξιολόγησης των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης αποτελεί η επιλογή «Phase envelope».



Εικόνα 5-23: Επιλογή «Phase envelope» του PIPESIM

Στο παράθυρο του phase envelope παρουσιάζονται τόσο ο φάκελος φάσεων όσο και το P/T προφίλ του ορισμένου ρευστού, στο ίδιο διάγραμμα πίεσης θερμοκρασίας. Ακόμη, με την καρτέλα «CONDITION» επιτρέπεται ο έλεγχος των φάσεων του ρευστού σε οποιοδήποτε συνδυασμό πίεσης και θερμοκρασίας είναι επιθυμητό. Κάτι τέτοιο, βοηθά σε μεγάλο βαθμό τη διερεύνηση των αποτελεσμάτων, καθώς μπορεί να πραγματοποιηθεί ο άμεσος έλεγχος των ιδιοτήτων του ρευστού σε κάθε συνδυασμό πίεσης – θερμοκρασίας του P/T προφίλ. Οι ιδιότητες του ρευστού εμφανίζονται σε πίνακα στην καρτέλα «PHASE PROPERTIES» (Εικόνα 5-24).

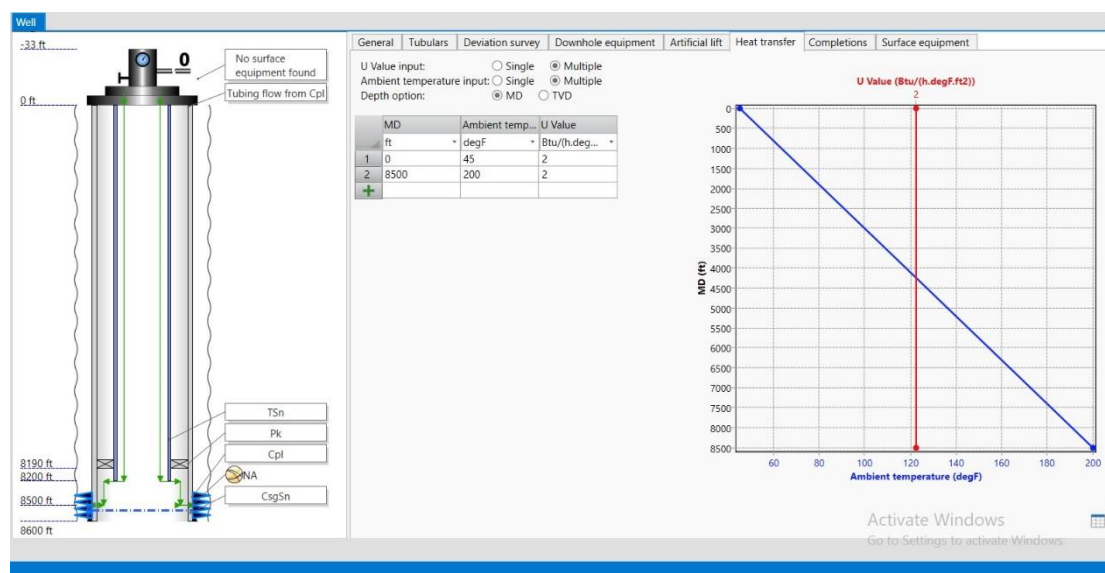


Εικόνα 5-24: Το εισαγωγικό παράθυρο του Phase envelope

# 6 Προσομοιώσεις

Στην παρούσα διπλωματική εργασία τα δεδομένα της γεώτρησης στην οποία έγινε η μοντελοποίηση της εισπίεσης όξινου αερίου είναι τα εξής:

- Κατακόρυφη γεώτρηση εισπίεσης
- Σωλήνωση (casing) σε βάθος 8,600 πόδια (ft) με πάχος 0.317 ίντσες (in).
- Σωλήνας παραγωγής σε βάθος 8,200 πόδια (ft) με πάχος 0.226 ίντσες (in).
- Packer σε βάθος 8,190 πόδια (ft).
- Χωρίς χρήση τεχνικής υποβοήθησης ανύψωσης.
- Διατρήσεις σε βάθος 8,500 πόδια (ft).
- Η θερμοκρασία του πετρώματος (εδάφους) στην επιφάνεια (0 ft) είναι 45 °F, ενώ στο βάθος των διατρήσεων (8,500 ft) φτάνει τα 200 °F, με τον συντελεστή αγωγιμότητας U σταθερό στα 2 BTU/(h·ft<sup>2</sup>·F).



Εικόνα 6-1: Δεδομένα γεώτρησης των προσομοιώσεων

Το ρευστό εισπίεσης που χρησιμοποιήθηκε στις προσομοιώσεις είναι μείγμα υδρόθειου (H<sub>2</sub>S) και διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) και εξετάστηκαν τρεις διαφορετικές συστάσεις:

- 50% H<sub>2</sub>S - 50% CO<sub>2</sub>,
- 75% H<sub>2</sub>S - 25% CO<sub>2</sub> και
- 25% H<sub>2</sub>S - 75% CO<sub>2</sub>.



Τα PVT πακέτα που εξετάστηκαν ήταν τα:

- Multiflash της KBC και
- E300 της Schlumberger.

Οι καταστατικές εξισώσεις που χρησιμοποιήθηκαν ήταν οι:

- Peng – Robinson (PR) (του 1976 στο Multiflash και του 1978 στο E300)
- Soave – Redlich – Kwong (SRK).

Οι συσχετίσεις εκτίμησης του ιξώδους που εξετάστηκαν ήταν:

- Pedersen και
- Lohrenz – Bray – Clark.

Τέλος, εξετάστηκε και η χρήση των συντελεστών διόρθωσης γραμμομοριακού όγκου (volume shift) των:

- Peneloux,
- Soriede και
- της ενσωματωμένης στο πακέτο Multiflash, που χρησιμοποιεί αυτή του Peneloux.

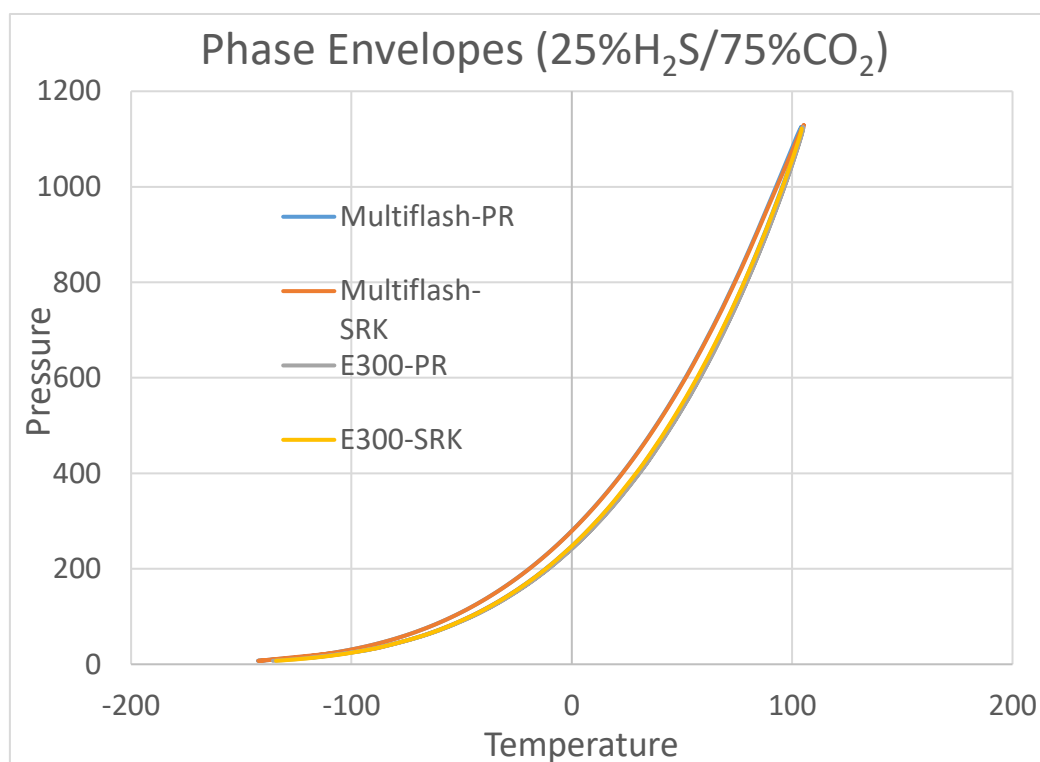
Για τη μοντελοποίηση της ροής (εισπίεσης) του όξινου αερίου στον ταμειυτήρα θεωρήθηκε πως η ελάχιστη πίεση αναμιξιμότητας (MMP), για το συγκεκριμένο συνδυασμό εισπιεζόμενου αερίου και ρευστού στον ταμειυτήρα, φτάνει τα 3,500 psia. Η τιμή των 3,500 psia έχει ληφθεί ως μια αντιπροσωπευτική, ρεαλιστική τιμή, καθώς η πραγματική ελάχιστη πίεση αναμιξιμότητας δίνεται από πειραματικές μετρήσεις και ασφαλώς εξαρτάται από τη συγκεκριμένη σύσταση του όξινου αερίου και του πετρελαϊκού ρευστού.

Η δεύτερη θεώρηση που έγινε ήταν πως η διαφορά πίεσης από το κατώτερο σημείο της γεώτρησης εισπίεσης έως το κατώτερο σημείο της παραγωγικής γεώτρησης, που αποτελεί το σημείο ελάχιστης πίεσης, είναι 700 psia έτσι ώστε από αυτή τη διαφορά πίεσης να εξασφαλιστεί η ροή του εισπιεζόμενου ρευστού μέσα στον ταμειυτήρα. Συμπεραίνεται, επομένως πως η πίεσης στο βάθος της γεώτρησης εισπίεσης θα πρέπει να βρίσκεται πάνω από τα 4,200 psia, ώστε η πίεση του ταμειυτήρα να παραμένει πάνω από την ελάχιστη πίεση αναμιξιμότητας καθ' όλη την έκτασή του. Η τελευταία θεώρηση, αφορά τη θερμοκρασία του ρευστού στην κεφαλή της γεώτρησης, η οποία θεωρήθηκε στην τιμή των 200 °F. Μια τέτοια υψηλή τιμή θερμοκρασίας είναι συνηθισμένη σε καταστάσεις εισπίεσης, όπου το ρευστό περνάει από το στάδιο της συμπίεσης χωρίς να προηγηθεί ψύξη. Οι συμπιεστές που χρησιμοποιούνται λειτουργούν αδιαβατικά, με αποτέλεσμα ένα μέρος της συνολικής ενέργειας που προσφέρεται για την αύξηση της πίεσης, να μετατρέπεται σε θερμότητα.

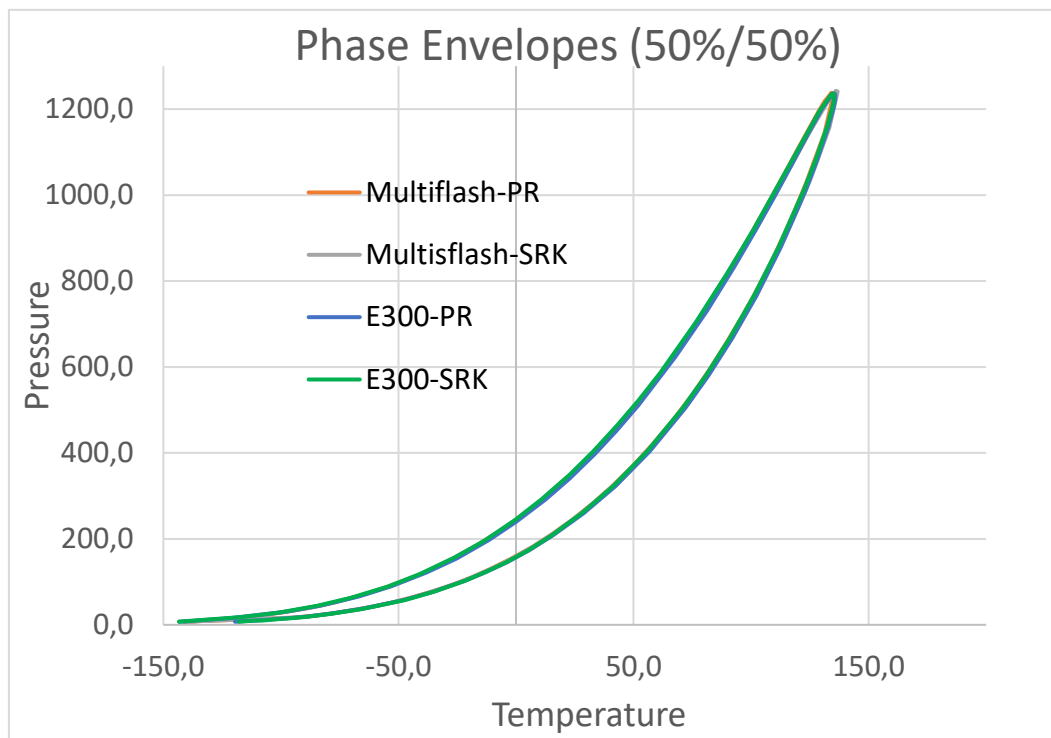
Ακόμη, οι προσομοιώσεις για όλους τους συνδυασμούς των μοντέλων ρευστού που δημιουργήθηκαν, πραγματοποιήθηκαν μία φορά για παροχή  $Q = 2,500 \text{ m}^3/\text{h}$  και μία δεύτερη για παροχή  $Q = 10,000 \text{ m}^3/\text{h}$ . Η πρώτη παροχή επιλέχθηκε με σκοπό τη μοντελοποίηση μιας τυπικής γεώτρησης εισπίεσης, ενώ η δεύτερη επιλέχθηκε με σκοπό την εξέταση του σεναρίου της περαιτέρω αύξησης της πρώτης παροχής. Να σημειωθεί επίσης πως καθώς το PIPESIM δεν παρέχει τη δυνατότητα καθορισμού της πίεσης στο βάθος της γεώτρησης (κι επομένως τον αυτόματο υπολογισμό της πίεσης στην κεφαλή), η πίεση στην κεφαλή της γεώτρησης μεταβαλλόταν χειροκίνητα μέσω δοκιμών έως ότου η πίεση στο βάθος προσδιοριζόταν από το λογισμικό λίγο πάνω από 4,200 psia.

## 6.1 Ανάλυση των φακέλων φάσεων

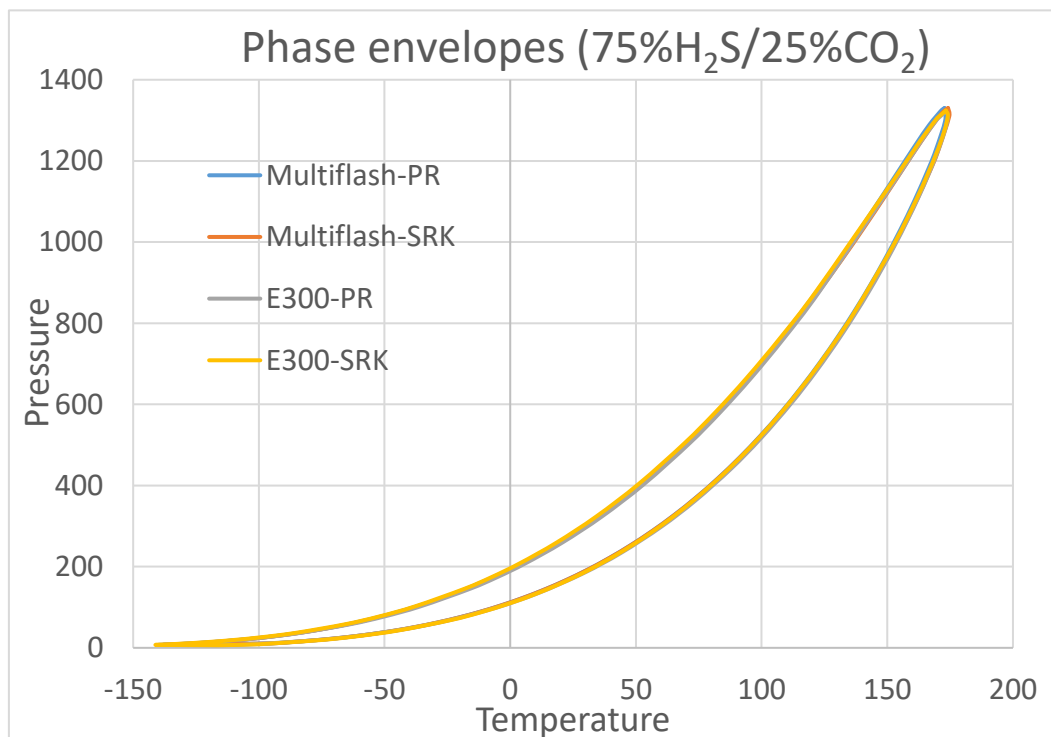
Προκειμένου να μελετηθεί πώς αντιλαμβάνεται το λογισμικό PIPESIM τα δεδομένα του μοντέλου EoS που διέπει το όξινο αέριο, αρχικά, ελέγχθηκαν οι φάκελοι φάσεων που προκύπτουν από το κάθε μοντέλο ρευστού που ερευνήθηκε. Να σημειωθεί πως στα διαγράμματα των φακέλων φάσεων δεν λήφθηκαν υπ' όψη οι συσχετίσεις του ιξώδους και του volume shift, καθώς αυτές οι επιλογές δεν προκαλούν μεταβολές στους φάκελους φάσεων. Ερευνήθηκαν τα μοντέλα ρευστού για τα δύο διαθέσιμα PVT πακέτα και τις δύο καταστατικές εξισώσεις που το PIPESIM υποστηρίζει.



Διάγραμμα 6-1: Φάκελοι φάσεων για ρευστό σύστασης 25%/(H<sub>2</sub>S)/75%(CO<sub>2</sub>)



Διάγραμμα 6-2: Φάκελοι φάσεων για ρευστό σύστασης 50%/(H<sub>2</sub>S)/50%(CO<sub>2</sub>)

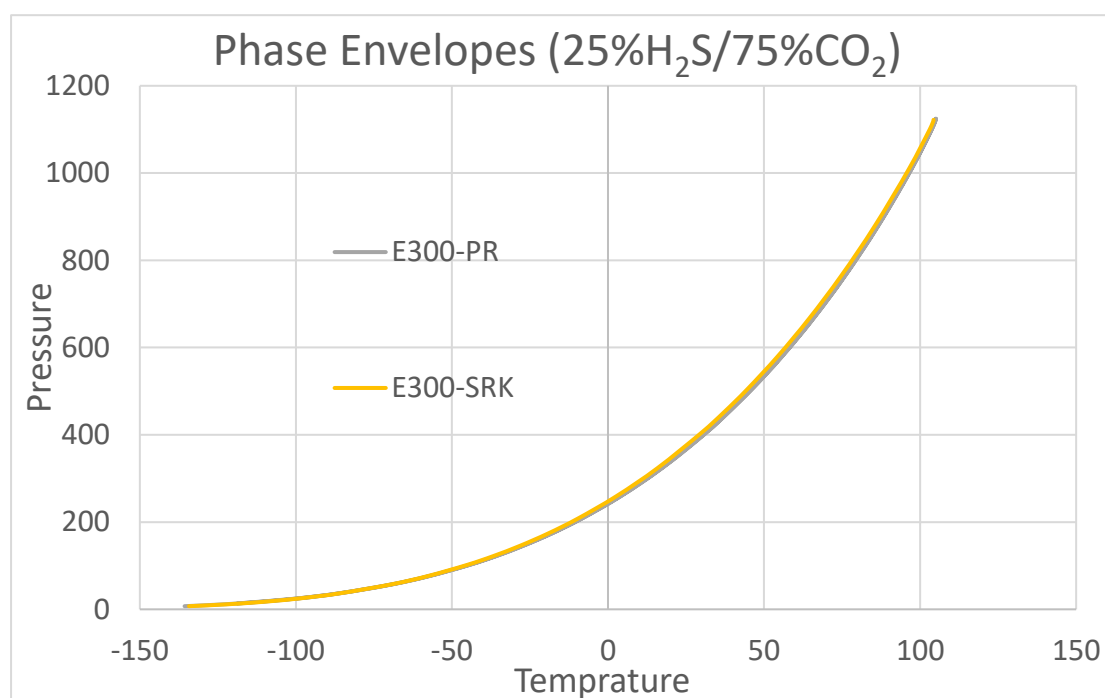


Διάγραμμα 6-3: Φάκελοι φάσεων για ρευστό σύστασης 75%/(H<sub>2</sub>S)/25%(CO<sub>2</sub>)

Ένα πρώτο συμπέρασμα που μπορεί να εξαχθεί από τα παραπάνω Διαγράμματα 6-1, 6-2 και 6-3 είναι πως τα διαφορετικά μοντέλα ρευστού, με κάποιες εξαιρέσεις, παρουσιάζουν ελάχιστες διαφορές στους φάκελους φάσεων που κατασκευάζουν.

Φαίνεται, ακόμη, πως και στις τρεις συστάσεις, οι φάκελοι φάσεων ακολουθούν τις βιβλιογραφικές αναφορές και ειδικότερα το διάγραμμα 4-3.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα μοντέλα ρευστού του PVT πακέτου E300, για ρευστό σύστασης 25%/(H<sub>2</sub>S)/75%(CO<sub>2</sub>) που φαίνονται στο Διάγραμμα 6-4. Τα δύο μοντέλα του συγκεκριμένου πακέτου, είτε με την καταστατική εξίσωση PR είτε με την καταστατική εξίσωση SRK, παράγουν φάκελους φάσεων καθαρού συστατικού, δηλαδή μόνο καμπύλη τάσης ατμών, χωρίς να εμφανίζουν διφασική περιοχή. Κάτι τέτοιο, αποτελεί ελάττωμα του συγκεκριμένου PVT πακέτου στο να επεξεργαστεί σωστά τα δεδομένα του ρευστού στη συγκεκριμένη σύσταση. Παρ' όλα αυτά, στην προκειμένη περίπτωση, δηλαδή σε διαδικασία εισπίεσης όξινου αερίου, όπου το ρευστό θα πρέπει να βρίσκεται στην υπερκρίσιμη περιοχή, μακριά από τον φάκελο φάσεων, το σφάλμα αυτό δεν έχει καμία επίπτωση.



Διάγραμμα 6-4: Ελαττωματικοί φάκελοι φάσεων του PVT πακέτου E300

## 6.2 Ανάλυση των P/T προφίλ

### 6.2.1 Πίεση κεφαλής και θερμοκρασία πυθμένα

Με τα δεδομένα της γεώτρησης και του μοντέλου του ρευστού, όπως αναλύθηκαν στην εισαγωγή του κεφαλαίου, από τις προσομοιώσεις για κάθε μια από τις τρεις συστάσεις που εξετάστηκαν, εξήχθησαν οι παρακάτω πίνακες που περιέχουν τις πιέσεις και τις θερμοκρασίες στην κορυφή και στο βάθος της γεώτρησης, όπως αυτές εκτιμήθηκαν από το λογισμικό:

| 25%-75%               |             |     |           |              |                        |                      |                        |                      |
|-----------------------|-------------|-----|-----------|--------------|------------------------|----------------------|------------------------|----------------------|
| Q (m <sup>3</sup> /h) | PVT package | EOS | Viscosity | Volume Shift | P <sub>wh</sub> (psia) | T <sub>wh</sub> (°F) | P <sub>bh</sub> (psia) | T <sub>bh</sub> (°F) |
| 2,500                 | Multiflash  | PR  | Pedersen  | Multiflash   | 1,925                  | 200                  | 4,200                  | 178                  |
| 2,500                 | Multiflash  | PR  | LBC       | Multiflash   | 1,925                  | 200                  | 4,200                  | 178                  |
| 2,500                 | Multiflash  | SRK | Pedersen  | Multiflash   | 1,950                  | 200                  | 4,200                  | 178                  |
| 2,500                 | Multiflash  | SRK | LBC       | Multiflash   | 1,950                  | 200                  | 4,200                  | 178                  |
| 2,500                 | E300        | PR  | Pedersen  | Soriede      | 1,915                  | 200                  | 4,200                  | 179                  |
| 2,500                 | E300        | PR  | Pedersen  | Peneloux     | 1,915                  | 200                  | 4,200                  | 179                  |
| 2,500                 | E300        | PR  | LBC       | Soriede      | 1,915                  | 200                  | 4,200                  | 179                  |
| 2,500                 | E300        | PR  | LBC       | Peneloux     | 1,915                  | 200                  | 4,200                  | 179                  |
| 2,500                 | E300        | SRK | Pedersen  | Soriede      | 1,931                  | 200                  | 4,200                  | 179                  |
| 2,500                 | E300        | SRK | Pedersen  | Peneloux     | 1,931                  | 200                  | 4,200                  | 179                  |
| 2,500                 | E300        | SRK | LBC       | Soriede      | 1,931                  | 200                  | 4,200                  | 179                  |
| 2,500                 | E300        | SRK | LBC       | Peneloux     | 1,931                  | 200                  | 4,200                  | 179                  |
| Q (m <sup>3</sup> /h) | PVT package | EOS | Viscosity | Volume Shift | P <sub>wh</sub>        | T <sub>wh</sub>      | P <sub>bh</sub>        | T <sub>bh</sub>      |
| 10,000                | Multiflash  | PR  | Pedersen  | Multiflash   | 2,290                  | 200                  | 4,200                  | 206                  |
| 10,000                | Multiflash  | PR  | LBC       | Multiflash   | 2,290                  | 200                  | 4,200                  | 206                  |
| 10,000                | Multiflash  | SRK | Pedersen  | Multiflash   | 2,305                  | 200                  | 4,200                  | 206                  |
| 10,000                | Multiflash  | SRK | LBC       | Multiflash   | 2,305                  | 200                  | 4,200                  | 206                  |
| 10,000                | E300        | PR  | Pedersen  | Soriede      | 2,280                  | 200                  | 4,200                  | 206                  |
| 10,000                | E300        | PR  | Pedersen  | Peneloux     | 2,280                  | 200                  | 4,200                  | 206                  |
| 10,000                | E300        | PR  | LBC       | Soriede      | 2,280                  | 200                  | 4,200                  | 206                  |
| 10,000                | E300        | PR  | LBC       | Peneloux     | 2,280                  | 200                  | 4,200                  | 206                  |
| 10,000                | E300        | SRK | Pedersen  | Soriede      | 2,295                  | 200                  | 4,200                  | 206                  |
| 10,000                | E300        | SRK | Pedersen  | Peneloux     | 2,295                  | 200                  | 4,200                  | 206                  |
| 10,000                | E300        | SRK | LBC       | Soriede      | 2,295                  | 200                  | 4,200                  | 206                  |
| 10,000                | E300        | SRK | LBC       | Peneloux     | 2,295                  | 200                  | 4,200                  | 206                  |

Πίνακας 6-1: Αρχικές και τελικές πιέσεις και θερμοκρασίες για το μείγμα με σύσταση 25% (H<sub>2</sub>S) - 75% (CO<sub>2</sub>)

Όπου,

P<sub>wh</sub> = Η πίεση στην κεφαλή της γεώτρησης (wellhead pressure)

T<sub>wh</sub> = Η θερμοκρασία στην κεφαλή της γεώτρησης (wellhead temperature)

P<sub>bh</sub> = Η πίεση στο βάθος της γεώτρησης (bottom-hole pressure)

T<sub>bh</sub> = Η θερμοκρασία στο βάθος της γεώτρησης (bottom-hole temperature)

| 50%-50%               |             |     |           |              |                        |                      |                        |                      |
|-----------------------|-------------|-----|-----------|--------------|------------------------|----------------------|------------------------|----------------------|
| Q (m <sup>3</sup> /h) | PVT package | EOS | Viscosity | Volume Shift | P <sub>wh</sub> (psia) | T <sub>wh</sub> (°F) | P <sub>bh</sub> (psia) | T <sub>bh</sub> (°F) |
| 2,500                 | Multiflash  | PR  | Pedersen  | Multiflash   | 1,860                  | 200                  | 4,200                  | 178                  |
| 2,500                 | Multiflash  | PR  | LBC       | Multiflash   | 1,860                  | 200                  | 4,200                  | 178                  |
| 2,500                 | Multiflash  | SRK | Pedersen  | Multiflash   | 1,875                  | 200                  | 4,200                  | 177                  |
| 2,500                 | Multiflash  | SRK | LBC       | Multiflash   | 1,875                  | 200                  | 4,200                  | 177                  |
| 2,500                 | E300        | PR  | Pedersen  | Soriede      | 1,844                  | 200                  | 4,200                  | 178                  |
| 2,500                 | E300        | PR  | Pedersen  | Peneloux     | 1,844                  | 200                  | 4,200                  | 178                  |
| 2,500                 | E300        | PR  | LBC       | Soriede      | 1,844                  | 200                  | 4,200                  | 178                  |
| 2,500                 | E300        | PR  | LBC       | Peneloux     | 1,844                  | 200                  | 4,200                  | 178                  |
| 2,500                 | E300        | SRK | Pedersen  | Soriede      | 1,863                  | 200                  | 4,200                  | 178                  |
| 2,500                 | E300        | SRK | Pedersen  | Peneloux     | 1,863                  | 200                  | 4,200                  | 178                  |
| 2,500                 | E300        | SRK | LBC       | Soriede      | 1,863                  | 200                  | 4,200                  | 178                  |
| 2,500                 | E300        | SRK | LBC       | Peneloux     | 1,863                  | 200                  | 4,200                  | 178                  |
| Q (m <sup>3</sup> /h) | PVT package | EOS | Viscosity | Volume Shift | P <sub>wh</sub>        | T <sub>wh</sub>      | P <sub>bh</sub>        | T <sub>bh</sub>      |
| 10,000                | Multiflash  | PR  | Pedersen  | Multiflash   | 2,210                  | 200                  | 4,200                  | 204                  |
| 10,000                | Multiflash  | PR  | LBC       | Multiflash   | 2,210                  | 200                  | 4,200                  | 204                  |
| 10,000                | Multiflash  | SRK | Pedersen  | Multiflash   | 2,217                  | 200                  | 4,200                  | 204                  |
| 10,000                | Multiflash  | SRK | LBC       | Multiflash   | 2,217                  | 200                  | 4,200                  | 204                  |
| 10,000                | E300        | PR  | Pedersen  | Soriede      | 2,190                  | 200                  | 4,200                  | 204                  |
| 10,000                | E300        | PR  | Pedersen  | Peneloux     | 2,190                  | 200                  | 4,200                  | 204                  |
| 10,000                | E300        | PR  | LBC       | Soriede      | 2,190                  | 200                  | 4,200                  | 204                  |
| 10,000                | E300        | PR  | LBC       | Peneloux     | 2,190                  | 200                  | 4,200                  | 204                  |
| 10,000                | E300        | SRK | Pedersen  | Soriede      | 2,205                  | 200                  | 4,200                  | 204                  |
| 10,000                | E300        | SRK | Pedersen  | Peneloux     | 2,205                  | 200                  | 4,200                  | 204                  |
| 10,000                | E300        | SRK | LBC       | Soriede      | 2,205                  | 200                  | 4,200                  | 204                  |
| 10,000                | E300        | SRK | LBC       | Peneloux     | 2,205                  | 200                  | 4,200                  | 204                  |

Πίνακας 6-2: Αρχικές και τελικές πιέσεις και θερμοκρασίες για το μείγμα με σύσταση 50% - 50%

| 75%-25%               |             |     |           |              |                 |                 |                 |                 |
|-----------------------|-------------|-----|-----------|--------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Q (m <sup>3</sup> /h) | PVT package | EOS | Viscosity | Volume Shift | P <sub>wh</sub> | T <sub>wh</sub> | P <sub>bh</sub> | T <sub>bh</sub> |
| 2,500                 | Multiflash  | PR  | Pedersen  | Multiflash   | 1,729           | 200             | 4,200           | 177             |
| 2,500                 | Multiflash  | PR  | LBC       | Multiflash   | 1,729           | 200             | 4,200           | 177             |
| 2,500                 | Multiflash  | SRK | Pedersen  | Multiflash   | 1,732           | 200             | 4,200           | 177             |
| 2,500                 | Multiflash  | SRK | LBC       | Multiflash   | 1,732           | 200             | 4,200           | 177             |
| 2,500                 | E300        | PR  | Pedersen  | Soriede      | 1,702           | 200             | 4,200           | 177             |
| 2,500                 | E300        | PR  | Pedersen  | Peneloux     | 1,702           | 200             | 4,200           | 177             |
| 2,500                 | E300        | PR  | LBC       | Soriede      | 1,702           | 200             | 4,200           | 177             |
| 2,500                 | E300        | PR  | LBC       | Peneloux     | 1,702           | 200             | 4,200           | 177             |
| 2,500                 | E300        | SRK | Pedersen  | Soriede      | 1,721           | 200             | 4,200           | 177             |

|                            |                    |            |                  |                     |                       |                       |                       |                       |
|----------------------------|--------------------|------------|------------------|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 2,500                      | E300               | SRK        | Pedersen         | Peneloux            | 1,721                 | 200                   | 4,200                 | 177                   |
| 2,500                      | E300               | SRK        | LBC              | Soriede             | 1,721                 | 200                   | 4,200                 | 177                   |
| 2,500                      | E300               | SRK        | LBC              | Peneloux            | 1,721                 | 200                   | 4,200                 | 177                   |
| <b>Q (m<sup>3</sup>/h)</b> | <b>PVT package</b> | <b>EOS</b> | <b>Viscosity</b> | <b>Volume Shift</b> | <b>P<sub>wh</sub></b> | <b>T<sub>wh</sub></b> | <b>P<sub>bh</sub></b> | <b>T<sub>bh</sub></b> |
| 10,000                     | Multiflash         | PR         | Pedersen         | Multiflash          | 2,026                 | 200                   | 4,200                 | 196                   |
| 10,000                     | Multiflash         | PR         | LBC              | Multiflash          | 2,026                 | 200                   | 4,200                 | 196                   |
| 10,000                     | Multiflash         | SRK        | Pedersen         | Multiflash          | 2,031                 | 200                   | 4,200                 | 196                   |
| 10,000                     | Multiflash         | SRK        | LBC              | Multiflash          | 2,031                 | 200                   | 4,200                 | 196                   |
| 10,000                     | E300               | PR         | Pedersen         | Soriede             | 1,998                 | 200                   | 4,200                 | 197                   |
| 10,000                     | E300               | PR         | Pedersen         | Peneloux            | 1,998                 | 200                   | 4,200                 | 197                   |
| 10,000                     | E300               | PR         | LBC              | Soriede             | 1,998                 | 200                   | 4,200                 | 197                   |
| 10,000                     | E300               | PR         | LBC              | Peneloux            | 1,998                 | 200                   | 4,200                 | 197                   |
| 10,000                     | E300               | SRK        | Pedersen         | Soriede             | 2,020                 | 200                   | 4,200                 | 196                   |
| 10,000                     | E300               | SRK        | Pedersen         | Peneloux            | 2,020                 | 200                   | 4,200                 | 197                   |
| 10,000                     | E300               | SRK        | LBC              | Soriede             | 2,020                 | 200                   | 4,200                 | 197                   |
| 10,000                     | E300               | SRK        | LBC              | Peneloux            | 2,020                 | 200                   | 4,200                 | 197                   |

Πίνακας 6-3: Αρχικές και τελικές πιέσεις και θερμοκρασίες για το μείγμα με σύσταση 75% (H<sub>2</sub>S) - 25% (CO<sub>2</sub>)

Ένα άμεσο συμπέρασμα από τη μελέτη των Πινάκων 6-1, 6-2 και 6-3 είναι πως οι αλλαγές των μοντέλων (στα PVT πακέτα, στις καταστατικές εξισώσεις, στις συσχετίσεις ιξώδους και στις συσχετίσεις volume shift) που διέπουν το ρευστό, για όμοια παροχή, επηρεάζουν σε πολύ μικρό βαθμό τις καταληκτικές τιμές των προφίλ των πιέσεων και θερμοκρασιών (P/T profiles). Ειδικότερα, οι αλλαγές που παρατηρήθηκαν στην πίεση ήταν οι εξής:

- Με διαφορετικές καταστατικές εξισώσεις ήταν της τάξης των λίγων δεκάδων psia.
- Με διαφορετικές συσχετίσεις ιξώδους ήταν μικρότερες της μονάδας.
- Με διαφορετικές συσχετίσεις volume shift (Soriede και Peneloux στο PVT πακέτο E300) δεν παρατηρήθηκαν καθόλου μεταβολές

Διαπιστώνεται, λοιπόν, πως η εναλλαγή των καταστατικών εξισώσεων, το εργαλείο που προσδιορίζει την πυκνότητα, επηρεάζει σε πολύ μεγαλύτερο βαθμό την πίεση, από την αλλαγή της συσχέτισης του ιξώδους, εργαλείο προσδιορισμού του ιξώδους του ρευστού. Σημειώνεται ότι η πυκνότητα είναι η ιδιότητα του ρευστού που ευθύνεται για την πτώση πίεσης λόγω βαρύτητας, ενώ το ιξώδες η ιδιότητα που ευθύνεται για την πτώση πίεσης λόγω τριβών. Συμπέρασμα των παραπάνω είναι πως ο μηχανισμός της βαρύτητας επηρεάζει σε πολύ μεγαλύτερο βαθμό την πίεση απ' ότι ο μηχανισμός των τριβών, γεγονός που μπορεί να επιβεβαιωθεί και από τα λεπτομερή αποτελέσματα που παρέχει το λογισμικό. Τέλος, οι διαφορετικές συσχετίσεις των volume shift, όπου επηρεάζουν την πυκνότητα, θα αναμενόταν να προκαλούν διαφορές στην πίεση, γεγονός που δεν συμβαίνει. Το πρόβλημα αυτό ερευνήθηκε περαιτέρω και θα αναλυθεί σε παρακάτω παράγραφο.



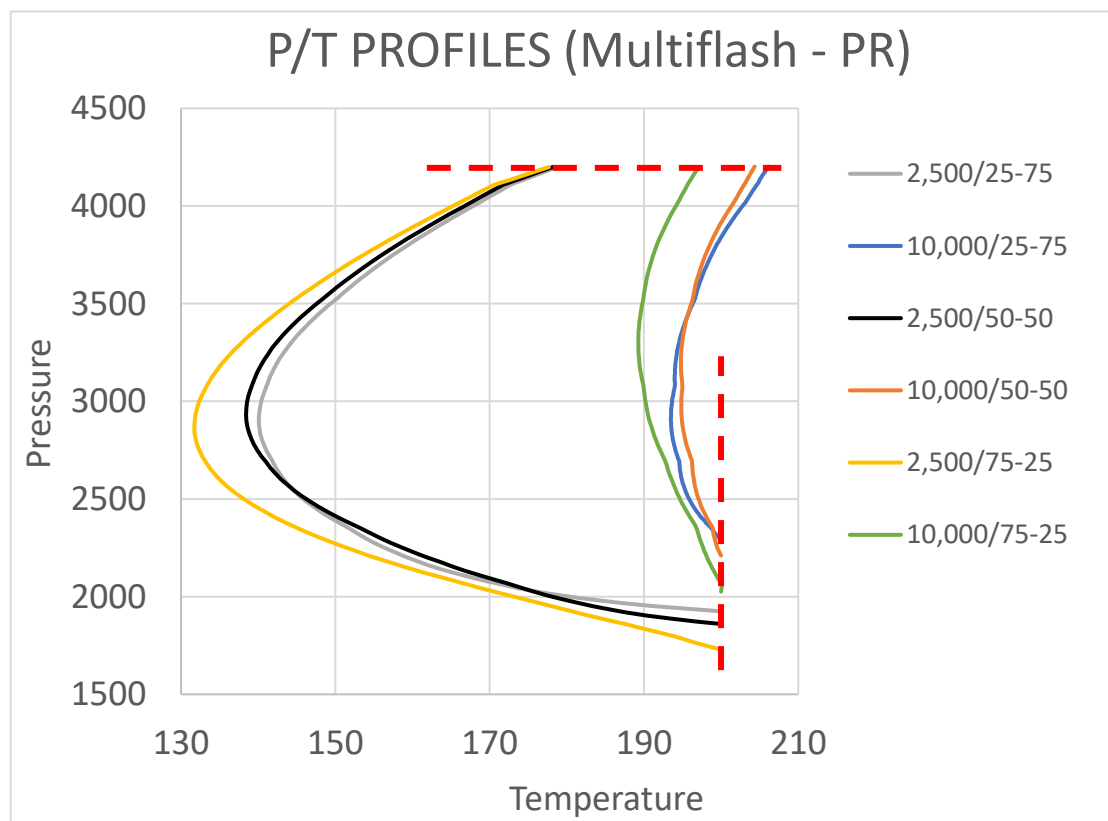
Εκεί που παρατηρήθηκαν σημαντικές αλλαγές ήταν μεταξύ των διαφορετικών συστάσεων. Στον παρακάτω Πίνακα 6-4, φαίνονται οι μέσοι όροι των πιέσεων και των θερμοκρασιών των μοντέλων του ρευστού για κάθε σύσταση.

| z%                        | 25%(H <sub>2</sub> S)/75%(CO <sub>2</sub> ) |        | 50%(H <sub>2</sub> S)/50%(CO <sub>2</sub> ) |        | 75%(H <sub>2</sub> S)/25%(CO <sub>2</sub> ) |        |
|---------------------------|---------------------------------------------|--------|---------------------------------------------|--------|---------------------------------------------|--------|
| Q                         | 2,500                                       | 10,000 | 2,500                                       | 10,000 | 2,500                                       | 10,000 |
| P <sub>wh</sub> (average) | 1,927.8                                     | 2,290  | 1,858                                       | 2,202  | 1,717                                       | 2,015  |
| T <sub>bh</sub> (average) | 179                                         | 206    | 178                                         | 204    | 177                                         | 196    |

Πίνακας 6-4: Μέσοι όροι πίεσης και θερμοκρασίας για τις διαφορετικές συστάσεις

Από τους μέσους όρους πίεσης και θερμοκρασίας, διαπιστώνεται πως με την αύξηση της περιεκτικότητας του ρευστού σε υδρόθειο, η πίεση που απαιτείται στην κεφαλή της γεώτρησης είναι μικρότερη (παρατηρείται μεγαλύτερη πτώση πίεσης μέσα στη σωλήνωση) και η θερμοκρασία στο βάθος της γεώτρησης είναι επίσης λίγο μικρότερη.

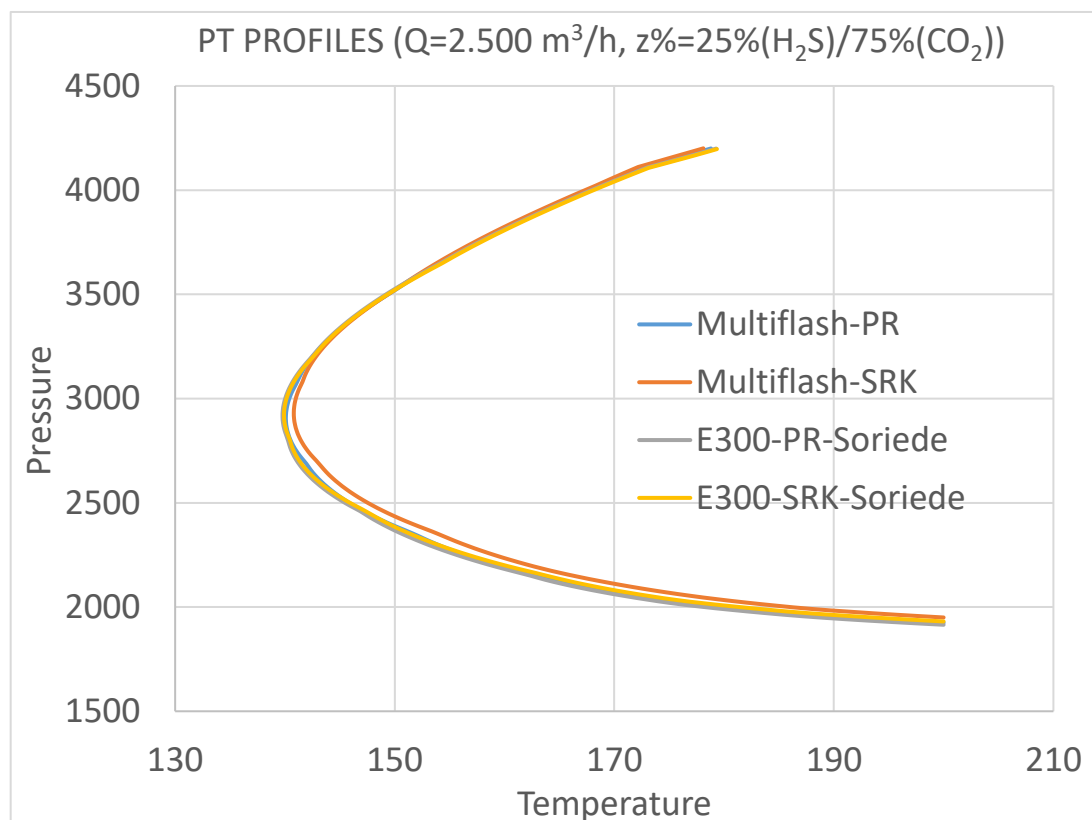
Ενδιαφέρον παρουσιάζει και η σύγκριση των P/T προφίλ για τις διαφορετικές συστάσεις και παροχές, ενός μοντέλου ρευστού στο ίδιο διάγραμμα, αποτελώντας τη συνέχεια της διερεύνησης της μεταβολής που προκαλούν οι τρεις συστάσεις στα P/T προφίλ. Στο παρακάτω διάγραμμα έχουν πλοταριστεί τα P/T προφίλ των τριών συστάσεων, σε κάθε παροχή, για το μοντέλο ρευστού Multiflash – PR. Οι κόκκινες γραμμές προστέθηκαν για να προσδιορίζουν την αρχική θερμοκρασία και την τελική πίεση, ώστε να τονίζεται η διαφορά στην αρχική πίεση και στην τελική θερμοκρασία μεταξύ των διαφόρων προφίλ.



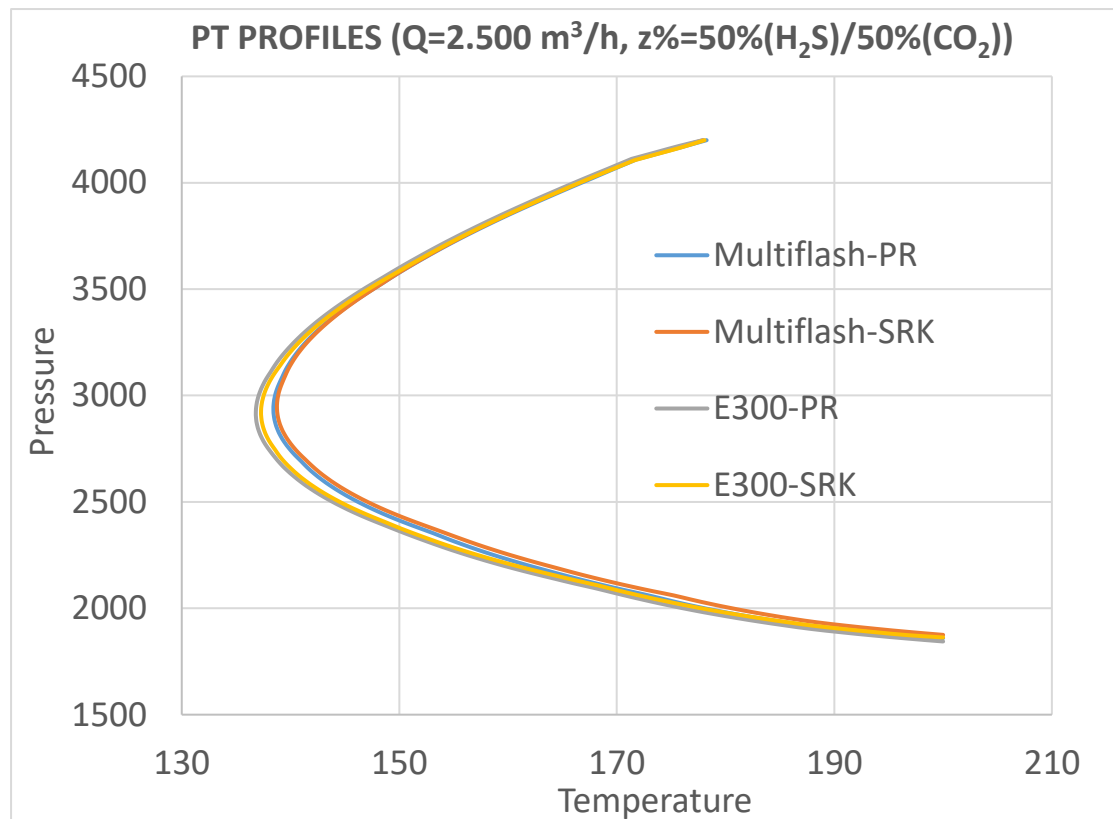
Διάγραμμα 6-5: Τα προφίλ P/T του μοντέλου Multiflash-PR

### 6.2.2 Αναλυτικά P/T προφίλ

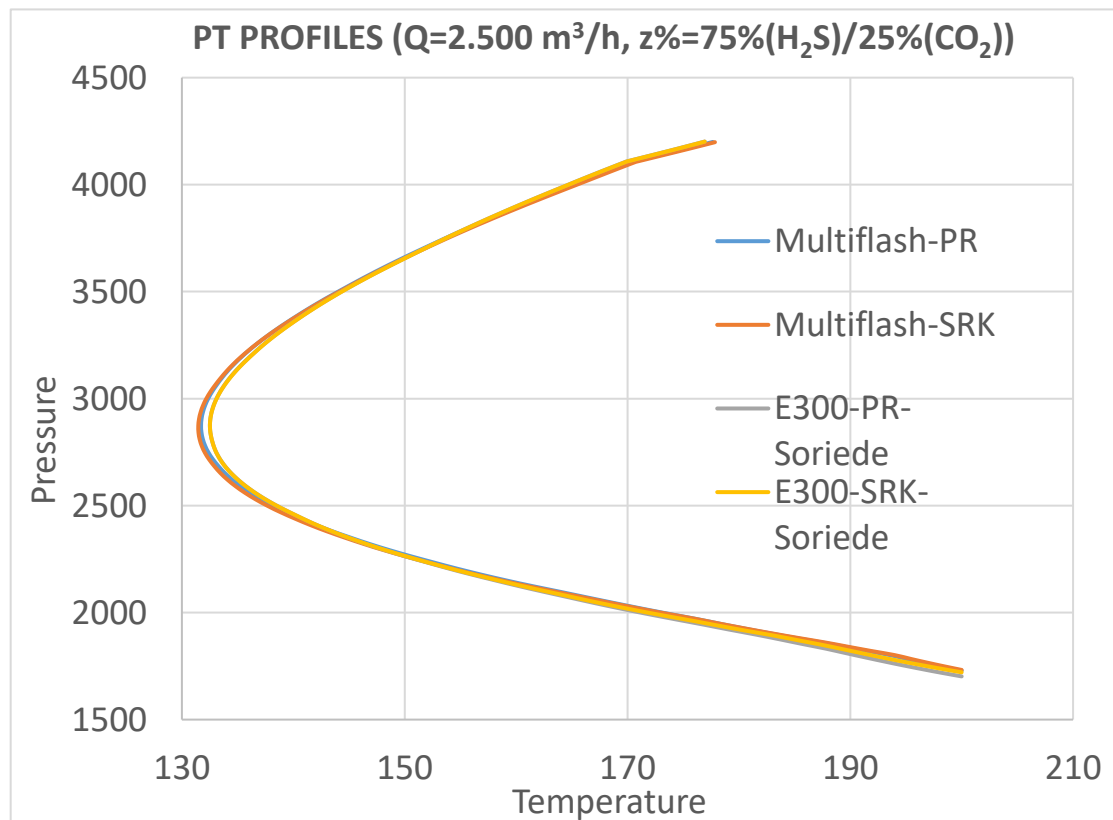
Η μικρή επίδραση που είχαν τα διαφορετικά μοντέλα ρευστού φαίνεται αρκετά καλά και στα Διαγράμματα 6-6, 6-7, 6-8, 6-9, 6-10 και 6-11, όπου έχουν πλοταριστεί γραφικά τα P/T προφίλ για όλα τα μοντέλα του ρευστού. Όπως αναφέρθηκε, οι αλλαγές της συσχέτισης του ιξώδους και του volume shift επηρεάζουν ελάχιστα τα P/T προφίλ, οπότε, για λόγους απλούστευσης, στα παρακάτω διαγράμματα έχει ληφθεί μόνο η συσχέτιση ιξώδους της Pedersen. Όσον αφορά το volume shift, για το PVT πακέτο Multiflash χρησιμοποιήθηκε η συσχέτιση volume shift του Multiflash, ενώ για το PVT πακέτο E300 η συσχέτιση του Soriede. Μελετήθηκαν, λοιπόν, οι μεταβολές που παρουσιάζονται μεταξύ των δύο PVT πακέτων και καταστατικών εξισώσεων για διάφορες συστάσεις και παροχές εισπιεζόμενου όξινου αερίου.



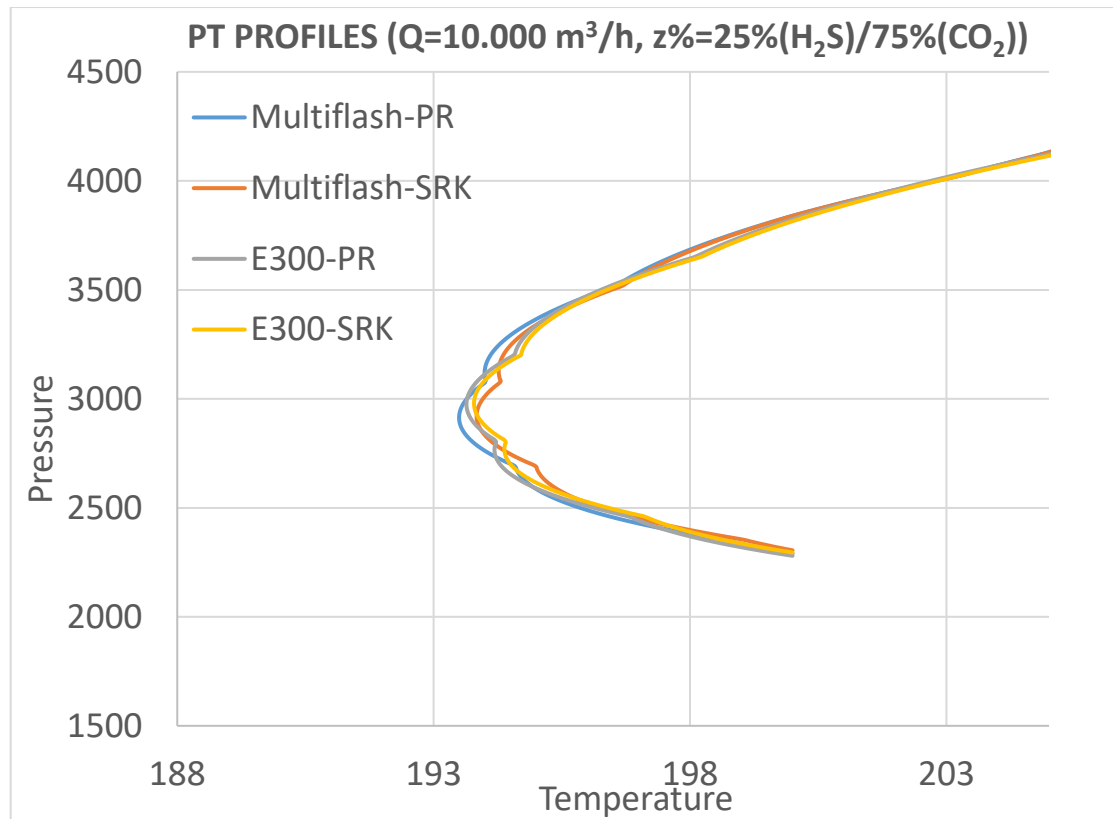
Διάγραμμα 6-6: Προφίλ P/T για σύσταση 25%(H<sub>2</sub>S)/75%(CO<sub>2</sub>) και παροχή 2,500 m<sup>3</sup>/h



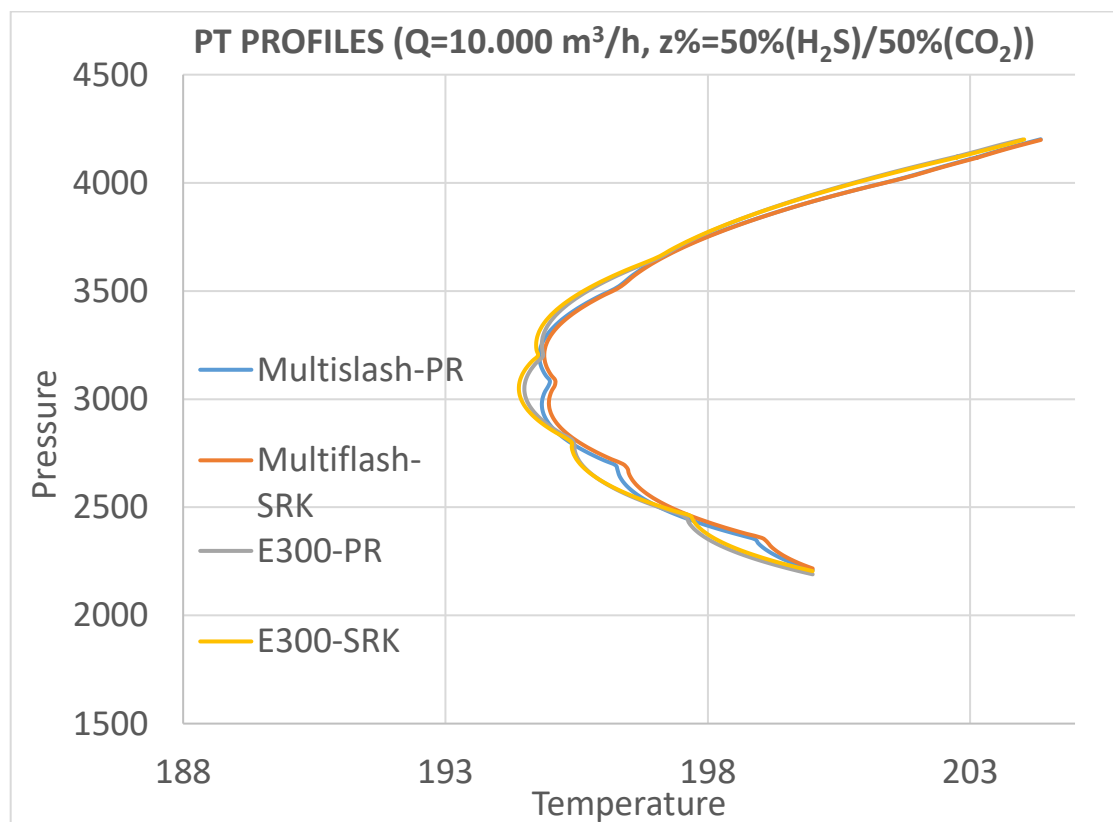
Διάγραμμα 6-7: Προφίλ P/T για σύσταση 50%(H<sub>2</sub>S)/50%(CO<sub>2</sub>) και παροχή 2,500 m<sup>3</sup>/h



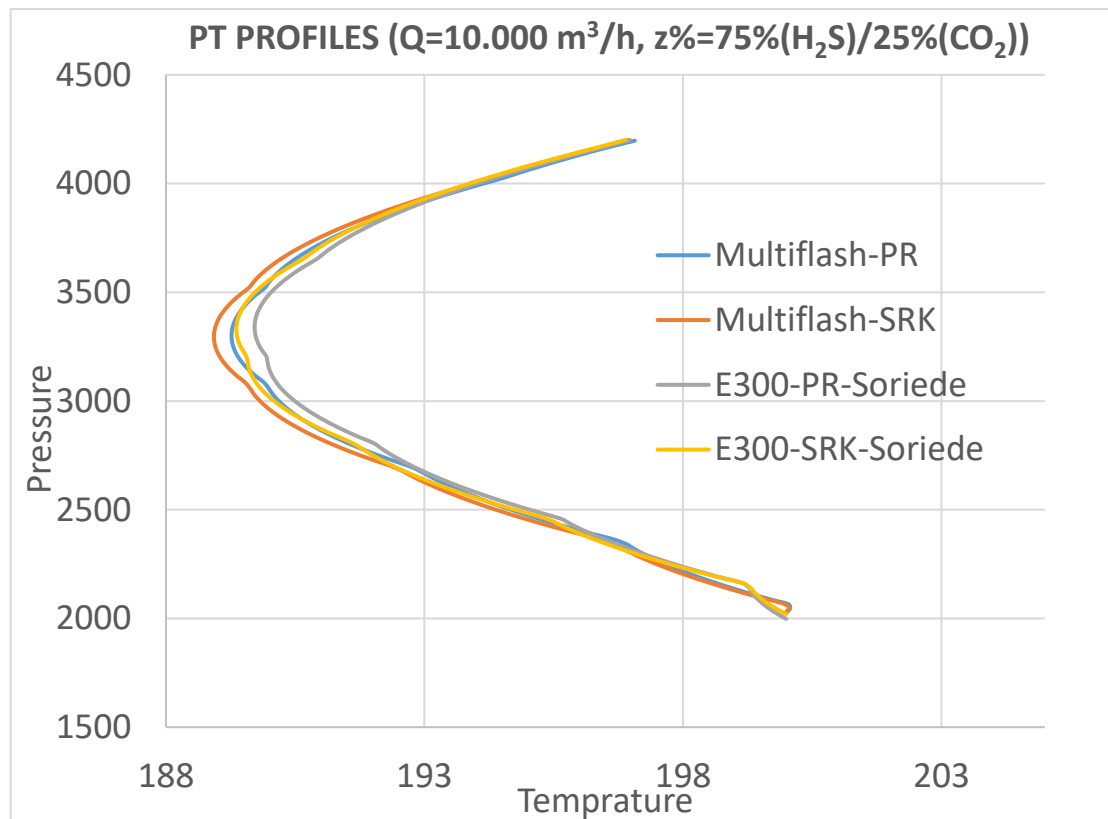
Διάγραμμα 6-8: Προφίλ P/T για σύσταση 75%(H<sub>2</sub>S)/25%(CO<sub>2</sub>) και παροχή 2,500 m<sup>3</sup>/h



Διάγραμμα 6-9: Προφίλ P/T για σύσταση 50%(H<sub>2</sub>S)/50%(CO<sub>2</sub>) και παροχή 10,000 m<sup>3</sup>/h



Διάγραμμα 6-10: Προφίλ P/T για σύσταση 50%(H<sub>2</sub>S)/50%(CO<sub>2</sub>) και παροχή 10,000 m<sup>3</sup>/h



Διάγραμμα 6-11: Προφίλ P/T για σύσταση 75%(H<sub>2</sub>S)/25%(CO<sub>2</sub>) και παροχή 10,000 m<sup>3</sup>/h

Όπως αναμενόταν, δεδομένης της κλίσης της γεώτρησης που είναι κατακόρυφη, ο βαρυτικός όρος υπερισχύει των τριβών με αποτέλεσμα η πίεση να αυξάνεται καθώς το ρευστό κατεβαίνει. Επιπρόσθετα, λόγω του μήκους της στήλης της γεώτρησης, καθώς και της πυκνότητας του ρευστού, η πίεση αυξάνεται σημαντικά, περίπου κατά 2,000 psia για συνολικό βάθος 8,500 ft οδηγώντας σε μία μέση κλίση 0.24 psia/ft, δηλαδή μεταξύ των συνήθων τιμών αερίων και υγρών, επιβεβαιώνοντας την υπερκρίσιμη κατάσταση του εισπιεζόμενου ρευστού.

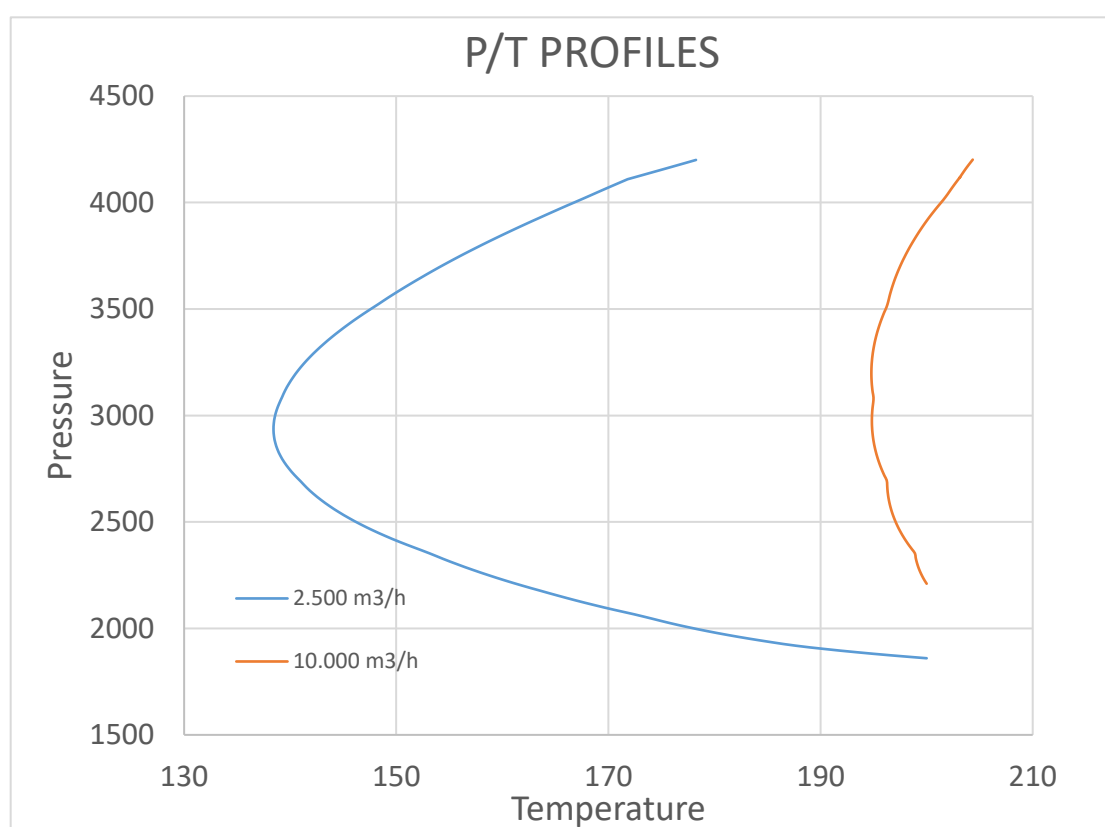
Όσον αφορά τη θερμοκρασία, αναφέρθηκε στην εισαγωγή του κεφαλαίου πως η εισπίεση γίνεται με αρχική τιμή θερμοκρασίας τα 200 °F, λόγω της διαδικασίας της συμπίεσης του ρευστού πριν την εισαγωγή του. Κατά τη διάρκεια της ροής, λόγω της μεταφοράς θερμότητας του ρευστού από και προς το ψυχρότερο περιβάλλον πέτρωμα μέσω αγωγής, η θερμοκρασία του ρευστού μειώνεται. Μετά από κάποιο βάθος, η θερμοκρασία του πετρώματος πλέον υπερβαίνει τη θερμοκρασία του ρευστού, με αποτέλεσμα η μεταφορά θερμότητας να αλλάζει φορά και πλέον να αυξάνεται η θερμοκρασία του ρευστού.

Από τα παραπάνω διαγράμματα επιβεβαιώνεται το αρχικό συμπέρασμα, πως οι διαφορετικές επιλογές των μοντέλων των ρευστών δίνουν πολύ μικρές αποκλίσεις στα P/T προφίλ. Έμφαση δίνεται στον άξονα των θερμοκρασιών των διαγραμμάτων για παροχή 10,000 m<sup>3</sup>/h, όπου αν και αρχικά φαίνεται τα P/T προφίλ να έχουν σημαντικές διαφορές σε ενδιάμεσα σημεία της σωλήνωσης, αυτές τελικά αναιρούνται στα άκρα της γεώτρησης, καταλήγοντας σε διαφορές

τιμών θερμοκρασίας κοντά στη μονάδα μεταξύ των διαφορετικών μοντέλων. Συμπεραίνεται, επομένως, και από τα διαγράμματα της παροχής των 10,000 psia πως τα διαφορετικά μοντέλα έχουν ελάχιστες διαφορές στα P/T προφίλ τους.

Ιδιαιτερότητα παρουσιάζει η θερμοκρασία στη ροή με παροχές 10,000 m<sup>3</sup>/h, στα ρευστά σύστασης 50%(H<sub>2</sub>S)/50%(CO<sub>2</sub>) και 25%(H<sub>2</sub>S)/75%(CO<sub>2</sub>). Παρατηρείται πως στο βάθος του ταμιευτήρα (8,500 ft) το ρευστό φτάνει με θερμοκρασία άνω των 200 °F, που είναι η θερμοκρασία του ταμιευτήρα. Αυτό σημαίνει πως για την αύξηση της θερμοκρασίας επιδρά και άλλος μηχανισμός πέραν της αγωγής. Πιθανή ερμηνεία αποτελεί το γεγονός πως η συμπύκνωση του ρευστού λόγω των υψηλών πιέσεων, επηρεάζει την πυκνότητά του, η οποία με τη σειρά της, προκαλεί μεταβολή στην ενθαλπία του και τελικώς στη θερμοκρασία του. Μέρος της θερμότητας λόγω της συμπίεσης διαχέεται στον σχηματισμό, ενώ η υπόλοιπη θερμότητα αυξάνει την θερμοκρασία του ρευστού λίγο πάνω από τα 200 °F.

Ενδιαφέρον έχει η σύγκριση των P/T προφίλ των δύο παροχών (2,500 και 10,000 m<sup>3</sup>/h). Διαπιστώνεται, όπως αναμενόταν, πως οι πτώσεις πίεσης είναι μεγαλύτερες στην παροχή των 10,000 m<sup>3</sup>/h, καθώς σε κάθε σύσταση απαιτείται πίεση εισπίεσης περίπου 300 μονάδες πάνω από την πίεση εισπίεσης στην παροχή 2,500 m<sup>3</sup>/h, ώστε τα ρευστά να φτάσουν στον ταμειυτήρα με την ίδια τελική των 4,200 psia. Ακόμη, η θερμοκρασιακή μεταβολή του ρευστού κατά την εισπίεση με την υψηλή παροχή, κατά μήκος της γεώτρησης, είναι πολύ μικρότερη από αυτή που παρατηρήθηκε με τη χαμηλότερη πίεση εισπίεσης. Οι διαφορές αυτές φαίνονται στο διάγραμμα 6-5, όπου παρατηρούνται τα P/T προφίλ των δύο διαφορετικών παροχών στο μοντέλο ρευστού Multiflash – PR. Στο παρακάτω διάγραμμα, έχουν απομονωθεί τα P/T προφίλ της σύστασης 50%/50% για την καλύτερη οπτική σύγκριση των διαφορών που παρουσιάζουν οι δύο παροχές.



Διάγραμμα 6-12: Σύγκριση P/T προφίλ για τις διαφορετικές παροχές.

Η διαφορά στη θερμοκρασιακή μεταβολή στα P/T προφίλ των δύο παροχών, έγκειται στη διαφορά της ταχύτητας που έχει το ρευστό στα δύο σενάρια. Με τετραπλάσια παροχή και ίδια διατομή σωλήνα, η ταχύτητα του ρευστού τετραπλασιάζεται, με αποτέλεσμα η μεταφορά θερμότητας να μην έχει την ίδια επίδραση με αυτή στην πιο αργή ροή αλλά να είναι κι αυτή με τη σειρά της πιο αργή, κι επομένως να είναι μικρότερες οι μεταβολές στη θερμοκρασία του εισπιεζόμενου ρευστού.

Απόρροια της παραπάνω διαφοράς, είναι και η διαφορά της αύξησης της πίεσης κατά μήκος

της γεώτρησης που παρατηρείται στα δύο σενάρια. Με τη διατήρηση της υψηλότερης θερμοκρασίας στο σενάριο της υψηλής παροχής, το ρευστό θα έχει και μικρότερη πυκνότητα που συνεπάγεται την εξασθένηση του βαρυντικού όρου. Επιπρόσθετα, με την υψηλότερη θερμοκρασία, το ιξώδες του ρευστού μειώνεται, με αποτέλεσμα τη μείωση της επίδρασης των τριβών. Οπότε, με τη συνδυαστική επίδραση και των δύο μηχανισμών, είναι απολύτως λογική η παρατήρηση της μειωμένης αύξησης πίεσης στο σενάριο της παροχής των 10,000 m<sup>3</sup>/h.

Η εξασθένηση του βαρυντικού όρου, σε συνθήκες παραγωγής, είναι ευπρόσδεκτο γεγονός, καθώς μεταφράζεται ως ευκολότερη ροή του ρευστού (καλύτερη IPR) προς την επιφάνεια. Σε διαδικασία εισπίεσης ισχύει ακριβώς το αντίθετο, διότι η μειωμένη αύξηση της πίεσης προϋποθέτει την συμπίεση του ρευστού σε υψηλότερη αρχική πίεση εισπίεσης, για την αναπλήρωση της πίεσης που χάνεται λόγω της μείωσης του βαρυντικού όρου. Για την συμπίεση σε υψηλότερες πιέσεις απαιτείται περισσότερη ενέργεια και ίσως ισχυρότερος συμπιεστής, όπου και οι δύο απαιτήσεις ανεβάζουν το κόστος της διαδικασίας.

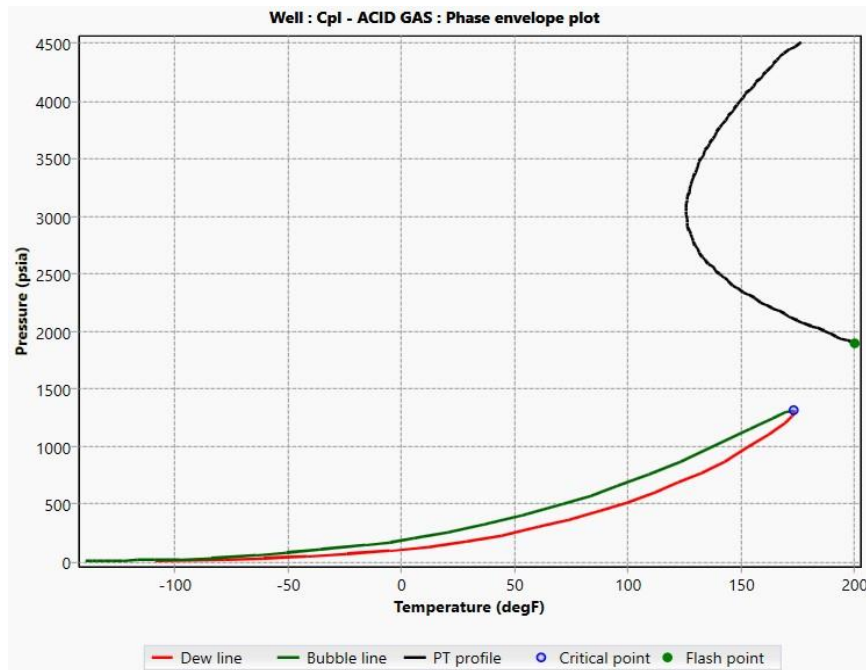
### **6.2.3 Συνδυαστικός έλεγχος φάκελου φάσεων και P/T προφίλ**

Αφού εξετάστηκαν τα διαγράμματα φάκελων φάσεων και P/T προφίλ, ακολουθεί η συνδυαστική τους διερεύνηση. Έχει γίνει γνωστό, πως το ρευστό στην διαδικασία εισπίεσης του όξινου αερίου πρέπει να βρίσκεται σε υπερκρίσιμη κατάσταση. Στο παράθυρο «Phase envelope» δίνεται η δυνατότητα του ελέγχου του φάκελου φάσεων στο ίδιο διάγραμμα με το P/T προφίλ. Πλοτάροντας και τα δύο σχήματα στο ίδιο διάγραμμα, διαπιστώνεται εάν το ρευστό παραμένει στην υπερκρίσιμη περιοχή, δηλαδή όταν ολόκληρο το P/T προφίλ του βρίσκεται πάνω και δεξιά από το κρίσιμο σημείο του φάκελου φάσεων.

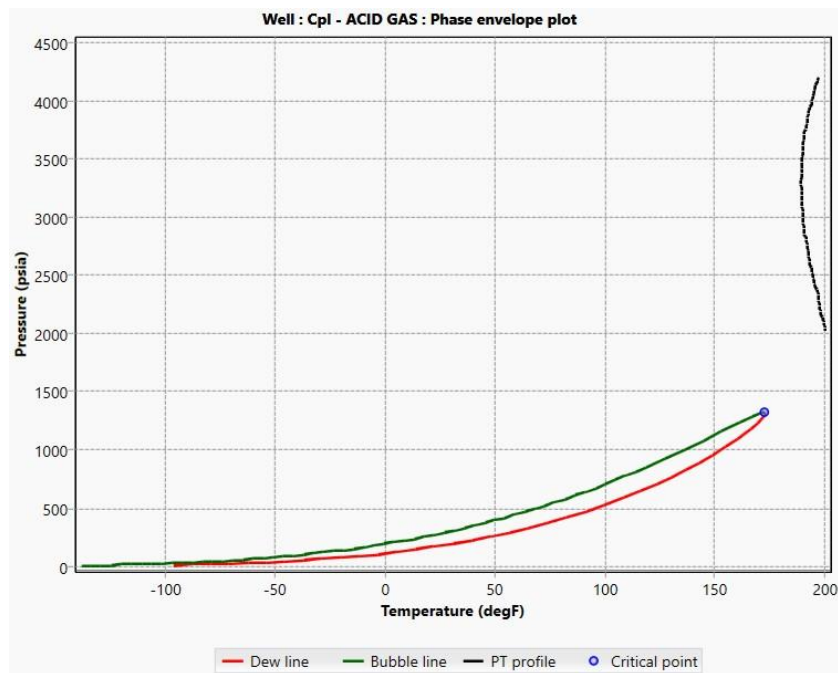
Στις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία, διαπιστώθηκε πως τα P/T προφίλ για κάποια από τα ελεγμένα μοντέλα ρευστών, από ένα βάθος και μετά, εξέρχονταν από την υπερκρίσιμη περιοχή και τα ρευστά περνούσαν στην υγρή φάση. Κάτι τέτοιο συνέβαινε στο σύνολο των μοντέλων του ρευστού σύστασης 75%/(H<sub>2</sub>S)/25%(CO<sub>2</sub>) για το σενάριο εισπίεσης με παροχή 2.500 m<sup>3</sup>/h. Αντίθετα, με την παροχή των 10.000 m<sup>3</sup>/h το P/T προφίλ του ρευστού βρίσκεται στην υπερκρίσιμη περιοχή σε όλο το μήκος της γεώτρησης. Ωστόσο, παρόλο που το P/T προφίλ οδηγεί το ρευστό εκτός της υπερκρίσιμης περιοχής, γεγονός που από θερμοδυναμική άποψη φαίνεται προβληματικό, παρατηρήθηκε πως δεν υπήρχαν ιδιαίτερες διαφορές στις ιδιότητες του ρευστού και δεν θα αναμενόταν κάποιο πρόβλημα στη διαδικασία εισπίεσης.



Στις παρακάτω εικόνες φαίνεται ο φάκελος φάσεων και τα P/T προφίλ του ρευστού για τις δύο παροχές, σε κοινό διάγραμμα, όπως εμφανίζονται στο παράθυρο Phase envelope του PIPESIM. Η πρώτη εικόνα αφορά το ρευστό με παροχή 2,500 m<sup>3</sup>/h και η δεύτερη το ρευστό με παροχή 10,000 m<sup>3</sup>/h.



Εικόνα 6-2: Φάκελος φάσεων και P/T προφίλ ρευστού σύστασης 75%/(H<sub>2</sub>S)/25%(CO<sub>2</sub>), με παροχή 2,500 m<sup>3</sup>/h



Εικόνα 6-3: Φάκελος φάσεων και P/T προφίλ ρευστού σύστασης 75%/(H<sub>2</sub>S)/25%(CO<sub>2</sub>), με παροχή 10,000 m<sup>3</sup>/h

### 6.3 Λεπτομερής ανάλυση των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων

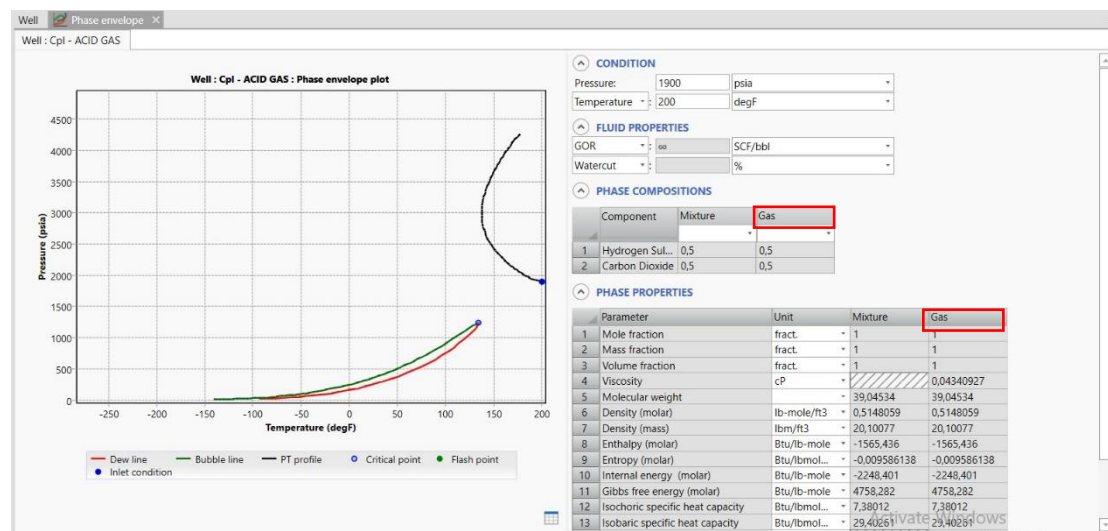
Αφού αναλύθηκαν τα γενικά αποτελέσματα των προσομοιώσεων, που αφορούν την πίεση και τη θερμοκρασία, η λεπτομερής διερεύνηση της ροής, στη συνέχεια, εμβάθυνε στην ανάλυση των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων του ρευστού. Ο έλεγχος των ιδιοτήτων έγινε μέσα από δύο εργαλεία διερεύνησης:

- Το παράθυρο «Phase envelope» και ιδιαίτερα τον πίνακα «PHASE PROPERTIES».
- Τα διαγράμματα και τους πίνακες των αποτελεσμάτων του παραθύρου «P/T profile».

#### 6.3.1 Διερεύνηση μέσω Phase envelope και Phase properties

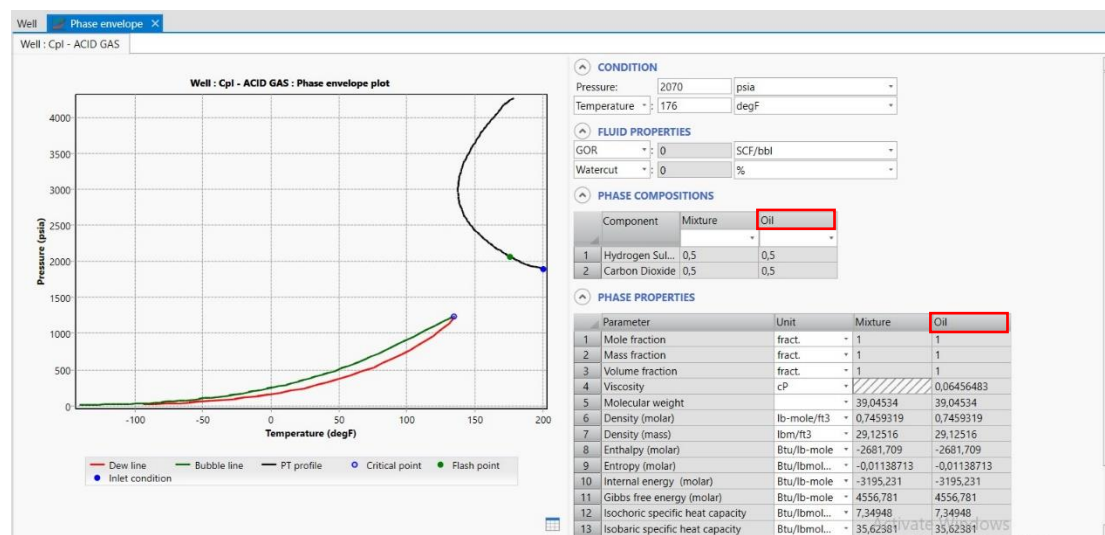
Οι πίνακες των ιδιοτήτων που λαμβάνονται από το Phase envelope λειτουργούν ως βοηθητικό, διαγνωστικό εργαλείο, το οποίο δίνει την δυνατότητα του εύκολου και άμεσου ελέγχου του μοντέλου του ρευστού που επιλέχθηκε. Το κύριο εργαλείο διερεύνησης, που θα αξιοποιηθεί από τους μηχανικούς, είναι τα αποτελέσματα του P/T profile, τα οποία θα αναλυθούν σε επόμενη παράγραφο.

Εκτελώντας τις προσομοιώσεις και ελέγχοντας τον πίνακα «PHASE PROPERTIES», διαπιστώθηκε πως το λογισμικό PIPESIM δεν ανιχνεύει την υπερκρίσιμη φάση ξεχωριστά από την υγρή και την αέρια. Κάτι τέτοιο φαίνεται στην Εικόνα 6-4, όπου παρουσιάζεται το παράθυρο του «Phase envelope» για τη προσομοίωση ρευστού μοντέλου Multiflash πακέτου, καταστατικής εξίσωσης PR, συσχέτισης ιξώδους Pedersen και συσχέτισης volume shift Multiflash. Η εισπίεσή του έγινε με 1,900 psia, θερμοκρασία 200 °F και παροχή 2,500 m<sup>3</sup>/h.



Εικόνα 6-4: Διερεύνηση με το «Phase envelope»

Διακρίνεται πως παρότι οι συνθήκες ελέγχου (το πράσινο σημείο στο διάγραμμα) βρίσκονται στην υπερκρίσιμη περιοχή, όπως και όλο το P/T προφίλ, το λογισμικό θεωρεί το ρευστό ως αποκλειστικά αέρια φάση. Ακόμη πιο αξιοσημείωτο, είναι το γεγονός πως κατά την κίνηση του ρευστού πάνω στην καμπύλη του P/T προφίλ του, από ένα σημείο και μετά η αέρια φάση αναγνωρίζεται ως υγρή. Αυτό φαίνεται στην Εικόνα 6-5, όπου ελέγχεται το ίδιο μοντέλο ρευστού με τα ίδια δεδομένα γεώτρησης, σε διαφορετικό σημείο του P/T προφίλ του.



Εικόνα 6-5: Διερεύνηση με το «Phase envelope» (2)

Η αδυναμία του λογισμικού PIPESIM να «διαβάξει» σωστά τη φάση του ρευστού στην υπερκρίσιμη περιοχή, θα μπορούσε να θεωρηθεί αποτρεπτική συνθήκη για την χρήση του λογισμικού στη διαδικασία της εισπίεσης όξινου αερίου. Ωστόσο, διαπιστώθηκε πως η θεώρηση του ρευστού μόνο ως υγρή και αέρια φάση αποτελεί, κατά μείζονα λόγο, πρόβλημα ονομασίας και μόνο. Ενδιαφέρον, έχει ο παρακάτω Πίνακας 6-5, στον οποίο φαίνονται οι ιδιότητες των ρευστών σε δύο πολύ κοντινές συνθήκες πριν και μετά την αλλαγή της φάσης.

Η πρώτη κόκκινη στήλη αντιστοιχεί σε συνθήκες πίεσης 2,050 psia και θερμοκρασίας 177 °F, όπου το ρευστό χαρακτηρίζεται ως αέριο, ενώ η δεύτερη σε πίεση 2,060 psia και θερμοκρασία 176 °F, όπου το ρευστό χαρακτηρίζεται ως υγρό.

| Parameter        | Unit                    | Gas (2,050 psi) | Oil (2,060 psi) |
|------------------|-------------------------|-----------------|-----------------|
| Mole fraction    | fract.                  | 1               | 1               |
| Mass fraction    | fract.                  | 1               | 1               |
| Volume fraction  | fract.                  | 1               | 1               |
| Viscosity        | cP                      | 0.0636          | 0.0643          |
| Molecular weight |                         | 39              | 39              |
| Density (molar)  | lb-mole/ft <sup>3</sup> | 0.73            | 0.74            |
| Density (mass)   | lbm/ft <sup>3</sup>     | 28.52           | 28.96           |
| Enthalpy (molar) | Btu/lb-mole             | -2,618          | -2,668          |

|                                  |                 |         |         |
|----------------------------------|-----------------|---------|---------|
| Entropy (molar)                  | Btu/lbmole.F    | -0.0113 | -0.0113 |
| Internal energy (molar)          | Btu/lb-mole     | -3137   | -3182   |
| Gibbs free energy (molar)        | Btu/lb-mole     | 4,563   | 4,554   |
| Isochoric specific heat capacity | Btu/lbmole.F    | 7.35    | 7.34    |
| Isobaric specific heat capacity  | Btu/lbmole.F    | 36.09   | 35.86   |
| Thermal conductivity             | Btu/(h.degF.ft) | 0.0334  | 0.0345  |
| Speed of sound                   | ft/s            | 1,181   | 1,193   |
| Joule-Thomson coefficient        | degF/psi        | 0.038   | 0.037   |
| Z Factor                         |                 | 0.41    | 0.407   |

Πίνακας 6-5: Ιδιότητες ρευστών από τον πίνακα «PHASE PROPERTIES»

Από τη σύγκριση των δύο πινάκων διακρίνεται πως η διαφορά στις τιμές των ιδιοτήτων είναι ελάχιστη, όπως αναμενόταν, ανάμεσα σε δύο τόσο κοντινές συνθήκες. Εξάγεται, λοιπόν το συμπέρασμα πως όσον αφορά τις ιδιότητες του ρευστού υπάρχει μια συνέχεια των τιμών τους, χωρίς να γίνεται κάποιο λογικό σφάλμα λόγω της φαινομενικής αλλαγής φάσης. Το πρόβλημα έγκειται σε λάθος ονομασίας και μόνο.

Ένα δεύτερο σημείο που κίνησε περιέργεια, ήταν το γεγονός ότι το λογισμικό PIPESIM δεν λάμβανε καθόλου υπόψη τις διαφορετικές συσχετίσεις του volume shift. Ειδικότερα, στο PVT πακέτο E300, οι συσχετίσεις volume shift του Peneloux και του Soriede, οι οποίες ελέγχθηκαν, δεν έδωσαν καμία διαφορά στα αποτελέσματα της πυκνότητας. Εξετάστηκαν δύο εκδοχές για τον προσδιορισμό της αιτίας που το λογισμικό δεν «διαβάζει» τις διαφορετικές συσχετίσεις volume shift. Η πρώτη εκδοχή ήταν ότι ενδεχομένως οι δύο συσχετίσεις να λαμβάνουν από πίνακες την τιμή του volume shift όταν εφαρμόζονται σε μη υδρογονάνθρακες και να δίνουν διαφορετικές τιμές μόνο σε συστατικά υδρογονανθράκων. Η δεύτερη εκδοχή ήταν ότι ενδεχομένως η μη μεταβολή της πυκνότητας με τις διαφορετικές συσχετίσεις volume shift να απορρέει από κάποιο σφάλμα στον προγραμματισμό του λογισμικού.

Για τον περαιτέρω έλεγχο του προβλήματος προστέθηκε στα συστατικά του ρευστού μεθάνιο, δημιουργώντας τελικό ρευστό σύστασης 45% H<sub>2</sub>S, 45% CO<sub>2</sub> και 10% CH<sub>4</sub>. Παρατηρήθηκε πως και με την προσθήκη υδρογονάνθρακα στο ρευστό, τα μοντέλα διαφορετικών συσχετίσεων δεν παρουσίαζαν καμία μεταβολή στην τιμή της πυκνότητάς τους. Συμπεραίνεται, λοιπόν, πως κατά πάσα πιθανότητα, το πρόβλημα που συζητήθηκε είναι σφάλμα του προγραμματισμού.

Συμπερασματικά, η δυνατότητα διερεύνησης που παρέχει το Phase envelope, αποτελεί σημαντικό βοηθητικό εργαλείο για τον έλεγχο ενός συστήματος εισπίεσης όξινου αερίου. Ο

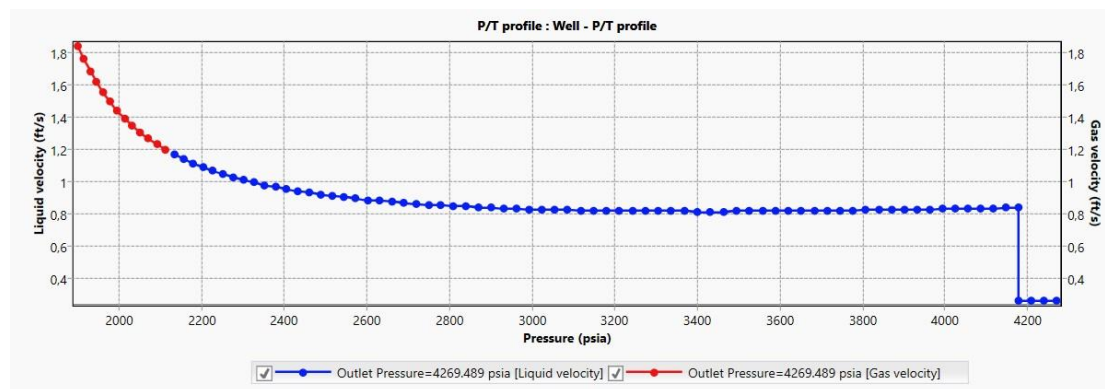
πίνακας των ιδιοτήτων, αν και με μερικά προβλήματα, προσφέρει αμεσότητα στον έλεγχο και πλαισιώνει τα αποτελέσματα του P/T προφίλ στην βαθύτερη διερεύνηση μιας ροής

### 6.3.2 Διερεύνηση μέσω αποτελεσμάτων των P/T profile

Τα αποτελέσματα που δίνει το P/T προφίλ αποτελούν το κύριο εργαλείο διερεύνησης της ροής και του μοντέλου του ρευστού. Δίνοντας την εντολή πύκνωσης των μετρήσεων ανά 100 ft γεώτρησης, παράγεται μια ακριβής και αντιπροσωπευτική εικόνα της μεταβολής των ιδιοτήτων κατά μήκος της σωλήνωσης.

Εκτελώντας τις προσομοιώσεις, διαπιστώθηκε πως και στο συγκεκριμένο μέσο διερεύνησης, το λογισμικό PIPESIM δεν αντιλαμβάνεται το ρευστό ως υπερκρίσιμο, χαρακτηρίζοντάς το σε είτε αέρια είτε υγρή φάση. Μελετώντας τα διαγράμματα των αποτελεσμάτων του P/T προφίλ, διαπιστώθηκε πως η αλλαγή της φάσης φαίνεται καθαρά όταν ζητούνται οι ταχύτητες του αερίου και του υγρού, όπως στην Εικόνα 6-6. Αξίζει επιπλέον, να αναφερθεί πως το σημείο αλλαγής της φάσης που δίνουν τα αποτελέσματα του P/T προφίλ είναι διαφορετικό από το σημείο που γίνεται η αλλαγή στον πίνακα Phase properties, δηλώνοντας πως δεν υπάρχει ταύτιση των δύο εργαλείων, γεγονός που θα πρέπει να αποδοθεί σε ατέλεια του λογισμικού.

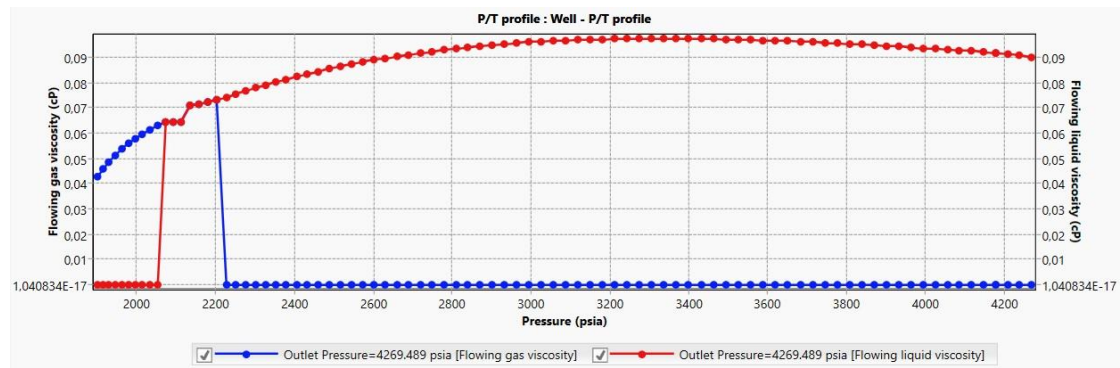
Επισημαίνεται πως το συγκεκριμένο μοντέλο ρευστού είναι το Multiflash-PR-Pedersen-Multiflash, με σύσταση 50%-50% και παροχή εισπίεσης 2,500 m<sup>3</sup>/h.



Εικόνα 6-6: Διάγραμμα ταχύτητας αερίου και υγρού

Στην Εικόνα 6-7, φαίνεται πως το ρευστό αλλάζει φάση ακαριαία, κάπου στα 2100 psia, καθώς η ταχύτητα του αερίου συνεχίζει ως ταχύτητα υγρού. Να σημειωθεί πως η κατακόρυφη πτώση της ταχύτητας του ρευστού, που συμβαίνει λίγο πριν τα 4200 psia, είναι λογική, διότι στο σημείο εκείνο ο παραγωγικός σωλήνας σταματάει και το ρευστό εξέρχεται στην παραγωγική σωλήνωση, όπου η μεγαλύτερη διατομή του επιφέρει την πτώση της ταχύτητας.

Ελέγχοντας, αντί για τις ταχύτητες, τα ιξώδη της υγρής και αέριας φάσης λήφθηκε μια ακόμη πιο αξιοπερίεργη Εικόνα.



Εικόνα 6-7: Διάγραμμα ιξώδους αερίου και υγρού

Στην Εικόνα 6-8 φαίνεται πως το ρευστό, όπως και στο διάγραμμα των ταχυτήτων, ξεκινάει ως αέριο, με το ιξώδες του αερίου να έχει λογικές τιμές, ενώ το ιξώδες του υγρού να είναι πρακτικά μηδενικό. Στην συνέχεια, ωστόσο, το ιξώδες του υγρού αποκτά μη μηδενικές τιμές και υπάρχει μια περιοχή ανάμεσα στις πιέσεις 2,050 psia και 2,200 psia, που τα δύο ιξώδη συνυπάρχουν και μάλιστα με την ίδια τιμή. Μάλιστα, στο σημείο που παρατηρήθηκε η αλλαγή της φάσης μέσω των ταχυτήτων, στα 2,100 psia, παρατηρείται μια απότομη αύξηση του ιξώδους, η οποία δεν μπορεί να ερμηνευτεί.

Οι παραπάνω διαπιστώσεις, αναδεικνύονται καλύτερα όταν εξετάζεται ο αναλυτικός πίνακας των αποτελεσμάτων του P/T προφίλ. Ο πίνακας διαμορφώθηκε, ώστε να εμφανίζονται μόνο μεγέθη που παρουσιάζουν ενδιαφέρον, όπως οι ταχύτητες του υγρού και του αερίου, τα ιξώδη τους, η συσσώρευση υγρού (liquid holdup) κ.α. μεταξύ των πολύ περισσότερων που το λογισμικό προσφέρει

|    | Total distance | Pressure | Temperature | Fluid mean... | Liquid holdup | G-L Pattern | Liq. velocity | Gas vel. | Flowing liqu... | FL Gas visc. | FL Liq. visc. |
|----|----------------|----------|-------------|---------------|---------------|-------------|---------------|----------|-----------------|--------------|---------------|
|    | ft             | psia     | degF        | ft/s          | %             |             | ft/s          | ft/s     | lbm/ft3         | cP           | cP            |
| 1  | 0              | 1900     | 200         | 1,84299       | 0             | Gas         | 1,84299       | 0,0001   | 0,04264943      | 0,0001       |               |
| 2  | 100            | 1914,229 | 196,6694    | 1,760993      | 0             | Gas         | 1,760993      | 0,0001   | 0,04576031      | 0,0001       |               |
| 3  | 200            | 1929,109 | 193,5422    | 1,686436      | 0             | Gas         | 1,686436      | 0,0001   | 0,0486961       | 0,0001       |               |
| 4  | 300            | 1944,631 | 190,6115    | 1,61897       | 0             | Gas         | 1,61897       | 0,0001   | 0,0514317       | 0,0001       |               |
| 5  | 400            | 1960,785 | 187,8864    | 1,557424      | 0             | Gas         | 1,557424      | 0,0001   | 0,05395974      | 0,0001       |               |
| 6  | 500            | 1977,583 | 185,6234    | 1,497723      | 0             | Gas         | 1,497723      | 0,0001   | 0,05601256      | 0,0001       |               |
| 7  | 600            | 1995,034 | 183,4736    | 1,443386      | 0             | Gas         | 1,443386      | 0,0001   | 0,05795356      | 0,0001       |               |
| 8  | 700            | 2013,127 | 181,4345    | 1,393721      | 0             | Gas         | 1,393721      | 0,0001   | 0,0597854       | 0,0001       |               |
| 9  | 800            | 2031,849 | 179,5032    | 1,348146      | 0             | Gas         | 1,348146      | 0,0001   | 0,06151109      | 0,0001       |               |
| 10 | 900            | 2051,19  | 177,6771    | 1,306175      | 0             | Gas         | 1,306175      | 0,0001   | 0,06313377      | 0,0001       |               |
| 11 | 1000           | 2071,136 | 175,7212    | 1,267786      | 0             | Dense Phase | 1,267786      | 29,18819 | 0,06434793      | 0,06434793   |               |
| 12 | 1100           | 2091,678 | 173,6742    | 1,231786      | 0             | Dense Phase | 1,231786      | 30,04124 | 0,06434793      | 0,06434793   |               |
| 13 | 1200           | 2112,803 | 171,6934    | 1,198814      | 0             | Dense Phase | 1,198814      | 30,86748 | 0,06434793      | 0,06434793   |               |
| 14 | 1300           | 2134,493 | 169,777     | 1,168536      | 100           | Dense Phase | 1,168536      | 31,66729 | 0,07100716      | 0,07100716   |               |
| 15 | 1400           | 2156,73  | 167,9236    | 1,140664      | 100           | Dense Phase | 1,140664      | 32,44108 | 0,07164101      | 0,07164101   |               |
| 16 | 1500           | 2179,496 | 166,1315    | 1,114951      | 100           | Dense Phase | 1,114951      | 33,18924 | 0,0723715       | 0,0723715    |               |
| 17 | 1600           | 2202,773 | 164,3997    | 1,091183      | 100           | Dense Phase | 1,091183      | 33,91215 | 0,07319701      | 0,07319701   |               |
| 18 | 1700           | 2226,545 | 162,6512    | 1,06901       | 100           | Liquid      | 1,06901       | 34,61555 | 1E-08           | 0,07439016   |               |
| 19 | 1800           | 2250,798 | 160,9463    | 1,048456      | 100           | Liquid      | 1,048456      | 35,29417 | 1E-08           | 0,0756461    |               |
| 20 | 1900           | 2275,513 | 159,3087    | 1,029428      | 100           | Liquid      | 1,029428      | 35,94654 | 1E-08           | 0,07686234   |               |
| 21 | 2000           | 2300,673 | 157,7376    | 1,011791      | 100           | Liquid      | 1,011791      | 36,57316 | 1E-08           | 0,07803945   |               |
| 22 | 2100           | 2326,26  | 156,2321    | 0,9954228     | 100           | Liquid      | 0,9954228     | 37,17453 | 1E-08           | 0,07917796   |               |

Εικόνα 6-8: Πίνακας αποτελεσμάτων P/T προφίλ

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η στήλη του G-L Pattern (flow pattern, gas – liquid), όπου σε ένα τμήμα της αναγράφει πυκνή φάση (dense phase). Διαπιστώνεται, επίσης, πως στο ενδιάμεσο αυτού του τμήματος είναι το σημείο που συμβαίνει η αλλαγή της φάσης, όπως φαίνεται από τις ταχύτητες (σταματάει η ταχύτητα αερίου και επικρατεί η ταχύτητα του υγρού) και τη συσσώρευση υγρού (από μηδενική ξεκινάει να παίρνει τιμές). Ελέγχοντας τα ιξώδη αέρια και υγρής φάσης, διαπιστώνεται αυτό που φαινόταν στο διάγραμμα, ότι στο τμήμα της πυκνής φάσης, τα δύο ιξώδη έχουν τις ίδιες τιμές. Στο μέσο του τμήματος, στην αλλαγή της φάσης σύμφωνα με τις ταχύτητες και την συσσώρευση υγρού, παρατηρείται και η απότομη άνοδος του ιξώδους που αναφέρθηκε παραπάνω.

Παρ' όλες τις ιδιαιτερότητες που παρουσιάζει ο παραπάνω πίνακας των ιδιοτήτων, με την φαινομενική αλλαγή φάσης που συμβαίνει, διαπιστώνεται ότι οι τιμές έχουν μια λογική συνέχεια, που σημαίνει πως και στην περίπτωση της διερεύνησης της ροής με τα αποτελέσματα του P/T προφίλ, το πρόβλημα που παρατηρείται είναι λάθος ονομασίας των φάσεων και μόνο. Ακόμη, φαίνεται πως η ζώνη που το G-L Pattern δηλώνει την ροή ως πυκνή φάση, αποτελεί μια μεταβατική ζώνη μεταξύ αέριας και υγρής φάσης, στην οποία οι τιμές των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων συμπίπτουν.

Ένα σημαντικό πρόβλημα, ωστόσο στη διερεύνηση των ιδιοτήτων μέσω του P/T προφίλ αποτελεί το γεγονός ότι δεν παρέχεται επιλογή της ένδειξης της πυκνότητας του αερίου. Από τον πίνακα των αποτελεσμάτων, στην Εικόνα 6-8, φαίνεται πως η πυκνότητα του υγρού ξεκινάει να υφίσταται ως μέγεθος από τη ζώνη της πυκνής φάσης και μετά, με αποτέλεσμα να μην δίνονται δεδομένα για την πυκνότητα στο τμήμα της γεώτρησης που το ρευστό θεωρείται αέρια φάση.

### **6.3.3 Αλλαγές μεταξύ των μοντέλων ρευστού**

Η παραπάνω παράγραφος αφορά τη διερεύνηση ενός από τα πολλά μοντέλα των οποίων μοντελοποιήθηκε η ροή. Μεταξύ των διαφορετικών μοντέλων παρατηρήθηκαν διαφορές στο σημείο που το λογισμικό θεωρούσε την ζώνη του Dense Phase και στο σημείο που θεωρούσε την αλλαγή φάσης. Στην συνέχεια του κεφαλαίου θα αναλυθούν τα δεδομένα των προσομοιώσεων για κάθε σενάριο που δοκιμάστηκε, χωρίς να ληφθούν υπ' όψη οι διαφορετικές συσχετίσεις ιξώδους και volume shift.

Όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο 6.1, το ιξώδες και η πυκνότητα δεν επηρεάζουν καθόλου τους φάκελους φάσεων του ρευστού. Στην Παράγραφο 6.2 αναφέρθηκε ότι, όπως διαπιστώθηκε, οι διαφορετικές συσχετίσεις του ιξώδους επηρεάζουν ελάχιστα το P/T προφίλ. Οι διαφορές του volume shift, μεταβάλλοντας την πυκνότητα του ρευστού, θα έπρεπε να επιφέρουν κάποιες μεταβολές στο P/T προφίλ. Ωστόσο, το PVT πακέτο Multiflash έχει μία μόνο συσχέτιση volume shift, ενώ στο PVT πακέτο E300, όπως παρατηρήθηκε στην

διερεύνηση από τον πίνακα Phase properties και επιβεβαιώθηκε από τα αποτελέσματα των P/T προφίλ, λόγω πιθανού προγραμματιστικού λάθους, οι δύο συσχετίσεις (Soriede και Peneloux) δίνουν όμοια αποτελέσματα. Για τους παραπάνω λόγους θα αναλυθούν οι προσομοιώσεις θεωρώντας ως παραμέτρους ελέγχου τις διαφορετικές συστάσεις, τις παροχές, τα PVT πακέτα και τις καταστατικές εξισώσεις.

#### 6.3.3.1 Σύσταση ρευστού 25%(H<sub>2</sub>S)/75%(CO<sub>2</sub>)

##### Για παροχή 2,500 m<sup>3</sup>/h:

Με PVT πακέτο Multiflash και καταστατική εξίσωση PR, η ζώνη του Dense Phase ξεκινάει στα 1,300 ft και τελειώνει στο βάθος των 2,100 ft. Η αλλαγή φάσης παρατηρείται ανάμεσα στα 1,800 και 1,900 ft. Το ρευστό συνεχίζει ως υγρή φάση.

Με PVT πακέτο Multiflash και καταστατική εξίσωση SRK, η ζώνη του Dense Phase ξεκινάει στα 1,400 ft και τελειώνει στο βάθος των 2,300 ft. Η αλλαγή φάσης παρατηρείται ανάμεσα στα 1,900 και 2,000 ft. Το ρευστό συνεχίζει ως υγρή φάση.

Με PVT πακέτο E300 και καταστατική εξίσωση PR, η ζώνη του Dense Phase ξεκινάει στα 300 ft και τελειώνει στο βάθος των 1,200 ft. Η αλλαγή φάσης παρατηρείται ανάμεσα στα 600 και 700 ft. Το ρευστό συνεχίζει ως υγρή φάση.

Με PVT πακέτο Multiflash και καταστατική εξίσωση SRK, η ζώνη του Dense Phase ξεκινάει στα 300 ft και τελειώνει στο βάθος των 1,200 ft. Η αλλαγή φάσης παρατηρείται ανάμεσα στα 600 και 700 ft. Το ρευστό συνεχίζει ως υγρή φάση.

##### Για παροχή 10,000 m<sup>3</sup>/h:

Με PVT πακέτο Multiflash και καταστατική εξίσωση PR, η πρώτη ζώνη του Dense Phase ξεκινάει στα 5,900 ft και τελειώνει στο βάθος των 7,100 ft, χωρίς να αλλάξει φάση από αέρια σε υγρή. Στην συνέχεια το ρευστό συνεχίζει ως αέρια φάση μέχρι να μπει στην δεύτερη ζώνη του Dense Phase, όπου ξεκινάει στα 7,800 ft και φτάνει μέχρι το βάθος της γεώτρησης, τα 8,500 ft.

Με PVT πακέτο Multiflash και καταστατική εξίσωση SRK, η ζώνη του Dense Phase ξεκινάει στα 5,900 ft και τελειώνει στο βάθος των 7,100 ft, χωρίς να αλλάξει φάση από αέρια σε υγρή. Το ρευστό συνεχίζει ως αέρια φάση.

Με PVT πακέτο E300 και καταστατική εξίσωση PR, η ζώνη του Dense Phase ξεκινάει στα 0 ft και τελειώνει στο βάθος των 2,700 ft. Η αλλαγή φάσης παρατηρείται ανάμεσα στα 1,300 ft και 1,400 ft. Το ρευστό συνεχίζει ως υγρή φάση.

Με PVT πακέτο Multiflash και καταστατική εξίσωση SRK, η ζώνη του Dense Phase ξεκινάει στα 0 ft και τελειώνει στο βάθος των 2,700 ft. Η αλλαγή φάσης παρατηρείται ανάμεσα στα 1,400 ft και 1,500 ft. Το ρευστό συνεχίζει ως υγρή φάση.



### 6.3.3.2 Σύσταση ρευστού 50%(H<sub>2</sub>S)/50%(CO<sub>2</sub>)

#### Για παροχή 2,500 m<sup>3</sup>/h:

Με PVT πακέτο Multiflash και καταστατική εξίσωση Peng – Robinson, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 6-8, η ζώνη του Dense Phase ξεκινάει στο βάθος των 1,000 ft και τελειώνει στα 1,600 ft. Η αλλαγή της φάσης του ρευστού γίνεται ανάμεσα στα 1,200 και 1,300 ft. Το ρευστό συνεχίζει ως υγρή φάση.

Με PVT πακέτο Multiflash και καταστατική εξίσωση Soave – Redlich – Kwong, η ζώνη του Dense Phase ξεκινάει στα 500 ft και τελειώνει στο βάθος των 1000 ft. Η αλλαγή φάσης παρατηρείται ανάμεσα στα 700 και 800 ft. Το ρευστό συνεχίζει ως υγρή φάση.

Με PVT πακέτο E300 και καταστατική εξίσωση PR, η ζώνη του Dense Phase ξεκινάει από την κεφαλή της γεώτρησης (0 ft) και τελειώνει στο βάθος των 400 ft. Η αλλαγή φάσης παρατηρείται ανάμεσα στα 200 και 300 ft. Το ρευστό συνεχίζει ως υγρή φάση.

Με PVT πακέτο E300 και καταστατική εξίσωση SRK, η ζώνη του Dense Phase ξεκινάει από την κεφαλή της γεώτρησης (0 ft) και τελειώνει στο βάθος των 400 ft. Η αλλαγή φάσης παρατηρείται ανάμεσα στα 100 και 200 ft. Το ρευστό συνεχίζει ως υγρή φάση.

#### Για παροχή 10,000 m<sup>3</sup>/h:

Με PVT πακέτο Multiflash και καταστατική εξίσωση PR, η ζώνη του Dense Phase ξεκινάει στα 600 ft και τελειώνει στο βάθος των 3900 ft. Η αλλαγή φάσης παρατηρείται ανάμεσα στα 2,500 και 2,600 ft. Το ρευστό συνεχίζει ως υγρή φάση.

Με PVT πακέτο Multiflash και καταστατική εξίσωση SRK, η ζώνη του Dense Phase ξεκινάει στα 600 ft και τελειώνει στο βάθος των 3900 ft. Η αλλαγή φάσης παρατηρείται ανάμεσα στα 2,600 και 2,700 ft. Το ρευστό συνεχίζει ως υγρή φάση.

Με PVT πακέτο E300 και καταστατική εξίσωση PR, το ρευστό θεωρείται υγρό από την αρχή μέχρι το τέλος της ροής του.

Με PVT πακέτο E300 και καταστατική εξίσωση SRK, το ρευστό θεωρείται υγρό από την αρχή μέχρι το τέλος της ροής του.

### 6.3.3.3 Σύσταση ρευστού 75%(H<sub>2</sub>S)/25%(CO<sub>2</sub>)

#### Για παροχή 2,500 m<sup>3</sup>/h:

Με PVT πακέτο Multiflash και καταστατική εξίσωση PR, η ζώνη του Dense Phase ξεκινάει στα 0 ft και τελειώνει στο βάθος των 200 ft. Δεν παρατηρείται αλλαγή φάσης, με την ταχύτητα υγρής φάσης να έχει τιμές από τα 0 ft. Το ρευστό συνεχίζει ως υγρή φάση.

Με PVT πακέτο Multiflash και καταστατική εξίσωση SRK, η ζώνη του Dense Phase ξεκινάει στα 0 ft και τελειώνει στο βάθος των 200 ft. Δεν παρατηρείται αλλαγή φάσης, με την ταχύτητα υγρής φάσης να έχει τιμές από τα 0 ft. Το ρευστό συνεχίζει ως υγρή φάση.

Με PVT πακέτο E300 και καταστατική εξίσωση PR, το ρευστό θεωρείται υγρό από την αρχή μέχρι το τέλος της ροής του.

Με PVT πακέτο E300 και καταστατική εξίσωση SRK, το ρευστό θεωρείται υγρό από την αρχή μέχρι το τέλος της ροής του.

Για παροχή 10,000 m<sup>3</sup>/h:

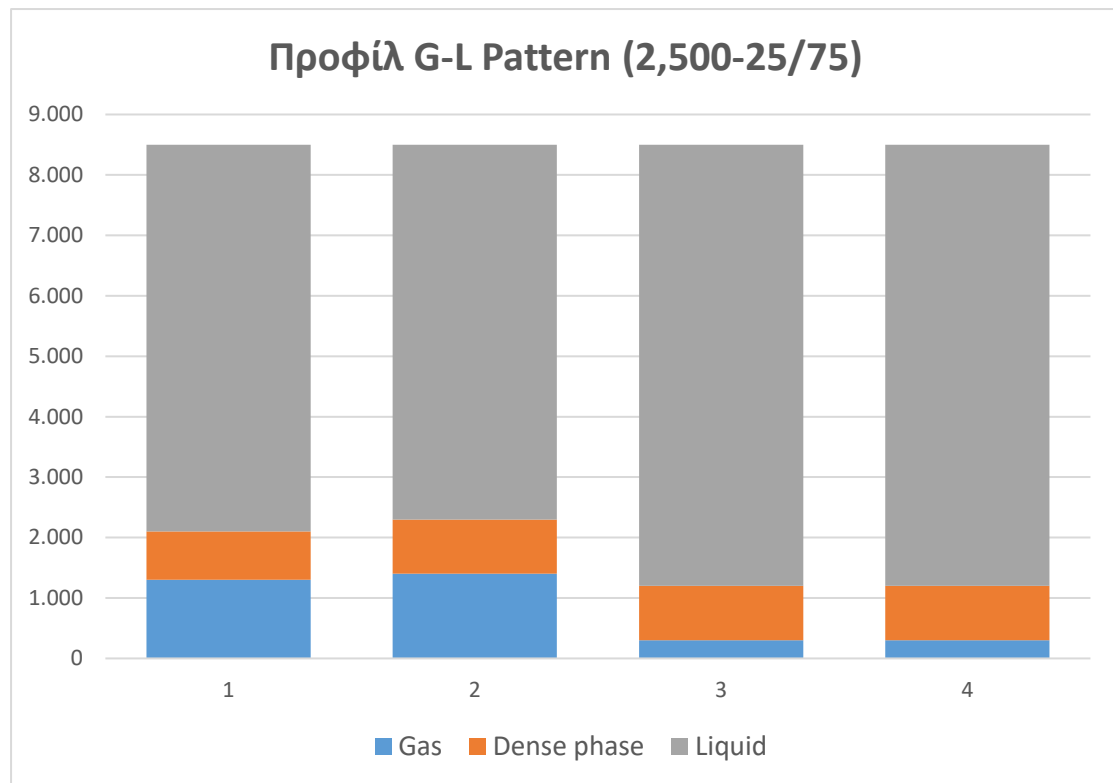
Με PVT πακέτο Multiflash και καταστατική εξίσωση PR, η ζώνη του Dense Phase παρατηρείται ανάμεσα στα 0 και 100 ft. Δεν παρατηρείται αλλαγή φάσης, με την ταχύτητα υγρής φάσης να έχει τιμές από τα 0 ft. Το ρευστό συνεχίζει ως υγρή φάση.

Με PVT πακέτο Multiflash και καταστατική εξίσωση PR, η ζώνη του Dense Phase παρατηρείται ανάμεσα στα 0 και 100 ft. Δεν παρατηρείται αλλαγή φάσης, με την ταχύτητα υγρής φάσης να έχει τιμές από τα 0 ft. Το ρευστό συνεχίζει ως υγρή φάση.

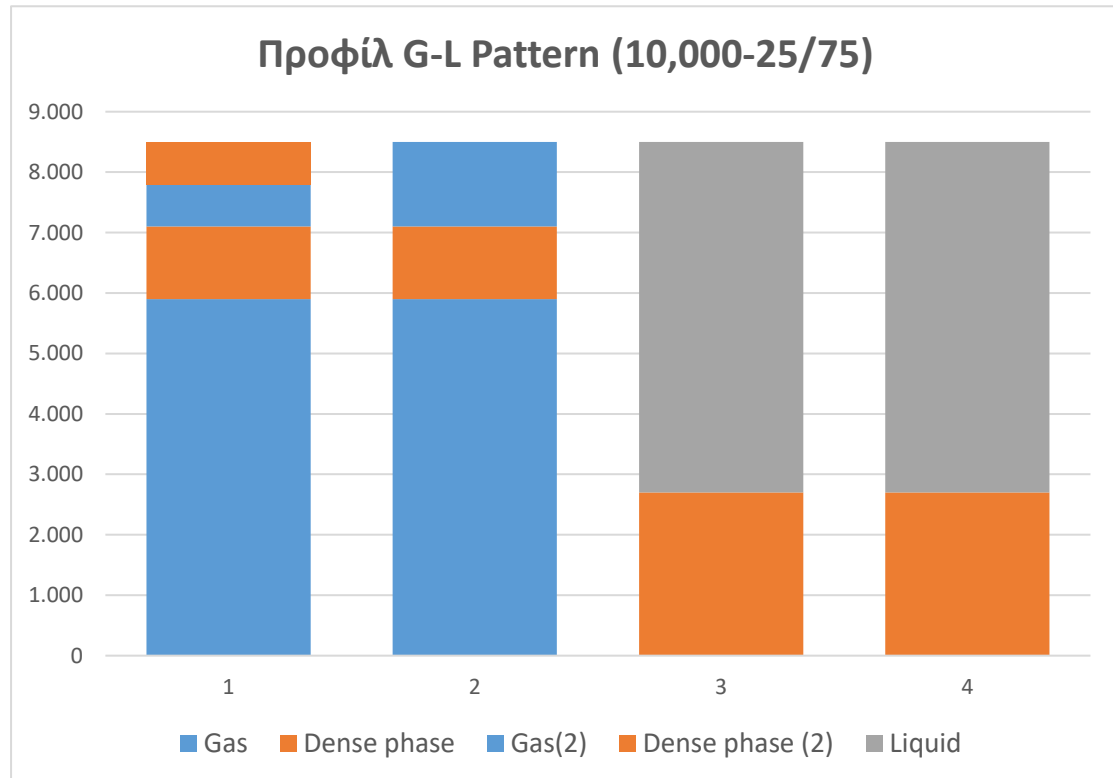
Με PVT πακέτο E300 και καταστατική εξίσωση PR, το ρευστό θεωρείται υγρό από την αρχή μέχρι το τέλος της ροής του.

Με PVT πακέτο E300 και καταστατική εξίσωση SRK, το ρευστό θεωρείται υγρό από την αρχή μέχρι το τέλος της ροής του.

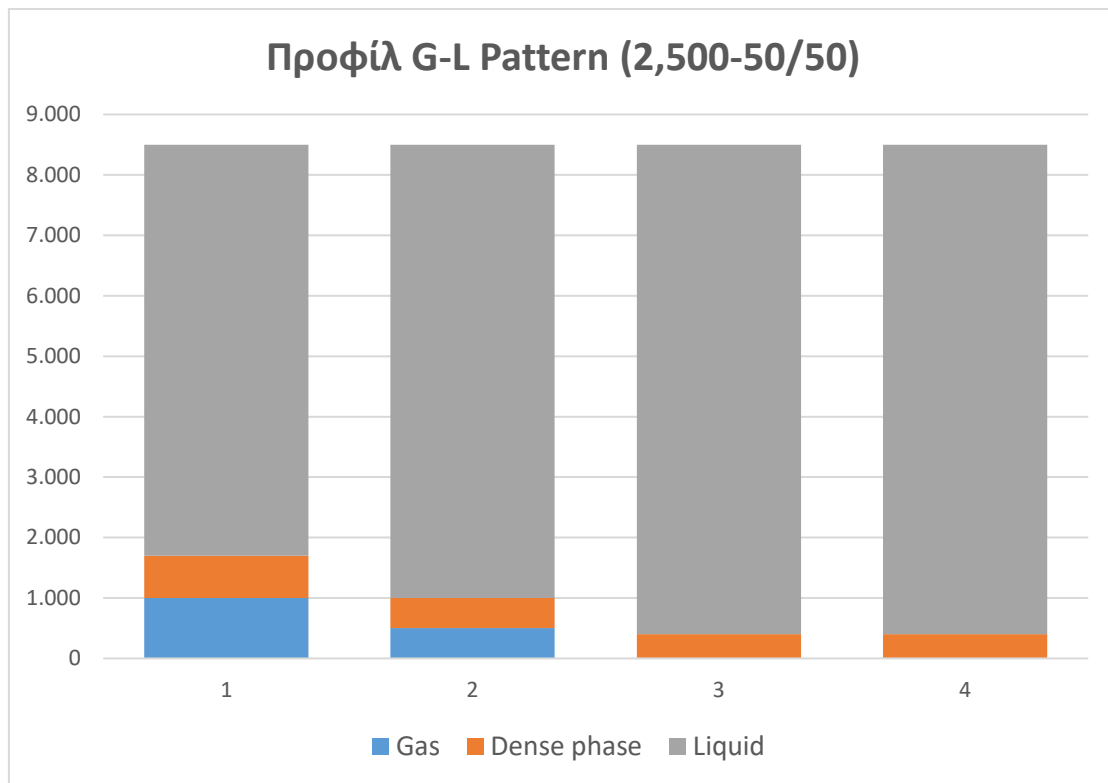
Στα παρακάτω Διαγράμματα 6-13, 6-14, 6-15, 6-16, 6-17, 6-18 φαίνονται οι αλλαγές των φάσεων γραφικά, με τον κατακόρυφο άξονα να είναι το βάθος σε ft και τον οριζόντιο να περιλαμβάνει τα τέσσερα μοντέλα του κάθε συνδυασμού σύστασης και παροχής. Όπου, το 1 είναι το μοντέλο Multiflash-PR, το 2 είναι το Multiflash-SRK, το 3 είναι το E300-PR και το 4 είναι το E300-SRK.



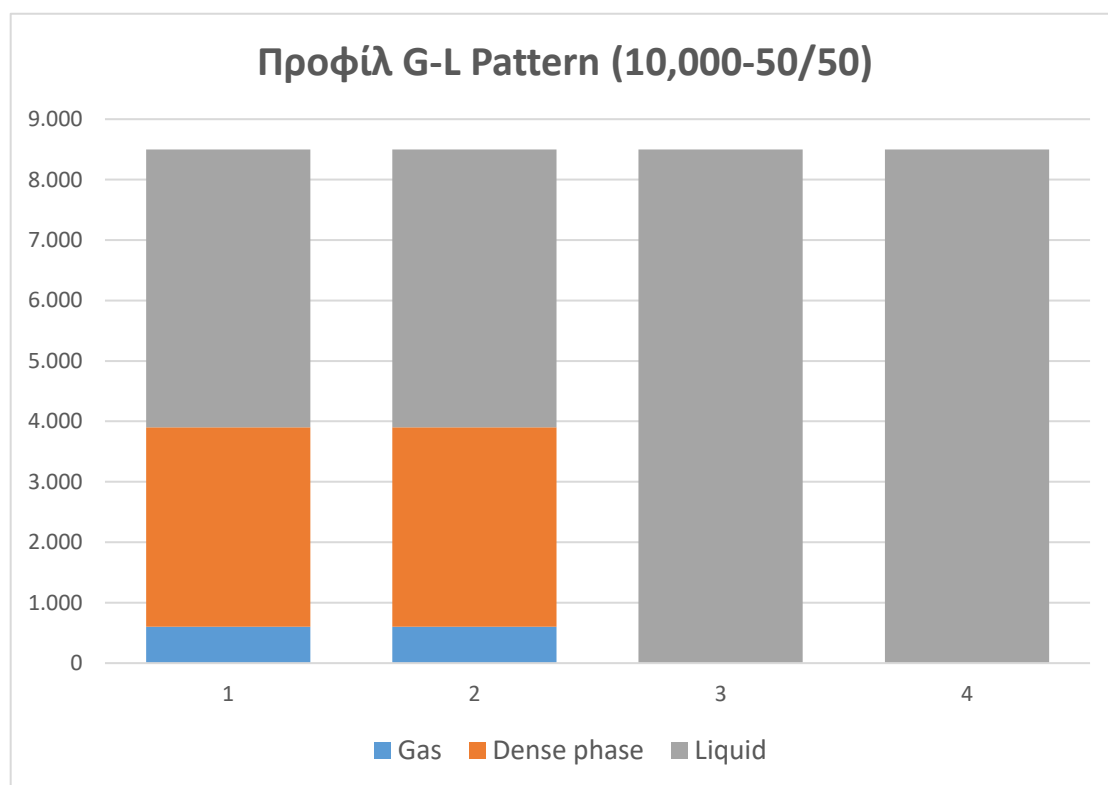
Διάγραμμα 6-13: Προφίλ G-L Pattern για ρευστό σύστασης 25%(H<sub>2</sub>S)/75%(CO<sub>2</sub>) για παροχή 2,500 m<sup>3</sup>/h



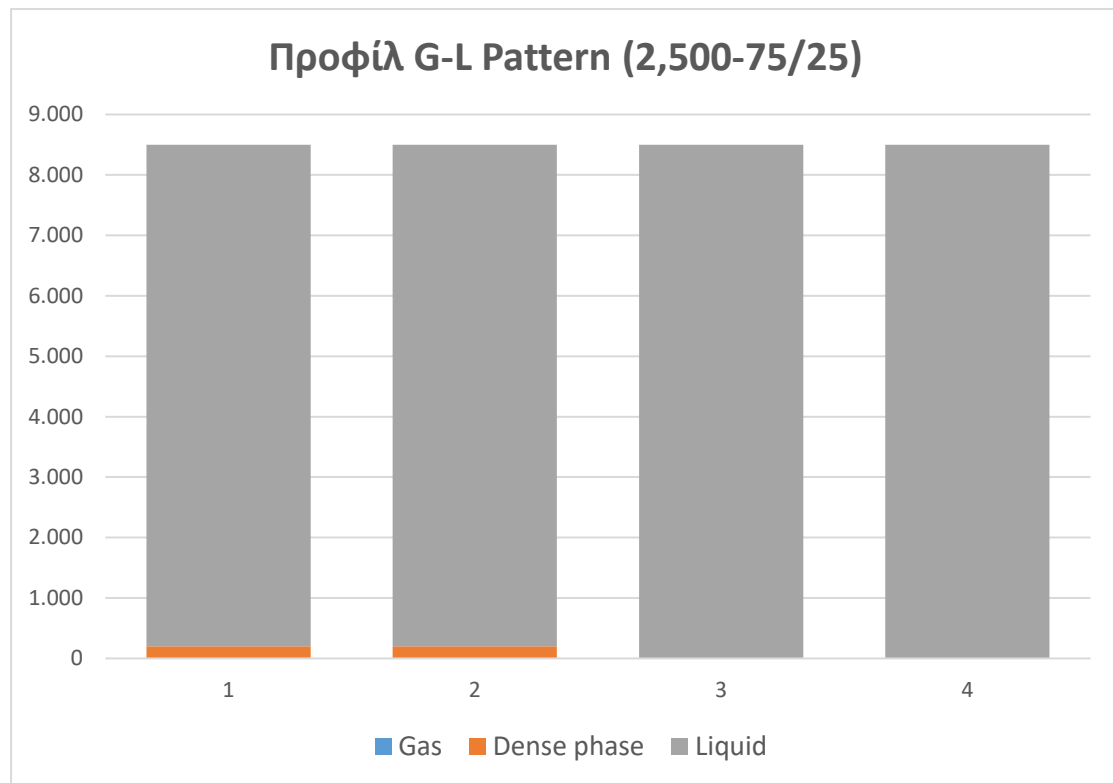
Διάγραμμα 6-14: Προφίλ G-L Pattern για ρευστό σύστασης 25%(H<sub>2</sub>S)/75%(CO<sub>2</sub>) για παροχή 10,000 m<sup>3</sup>/h



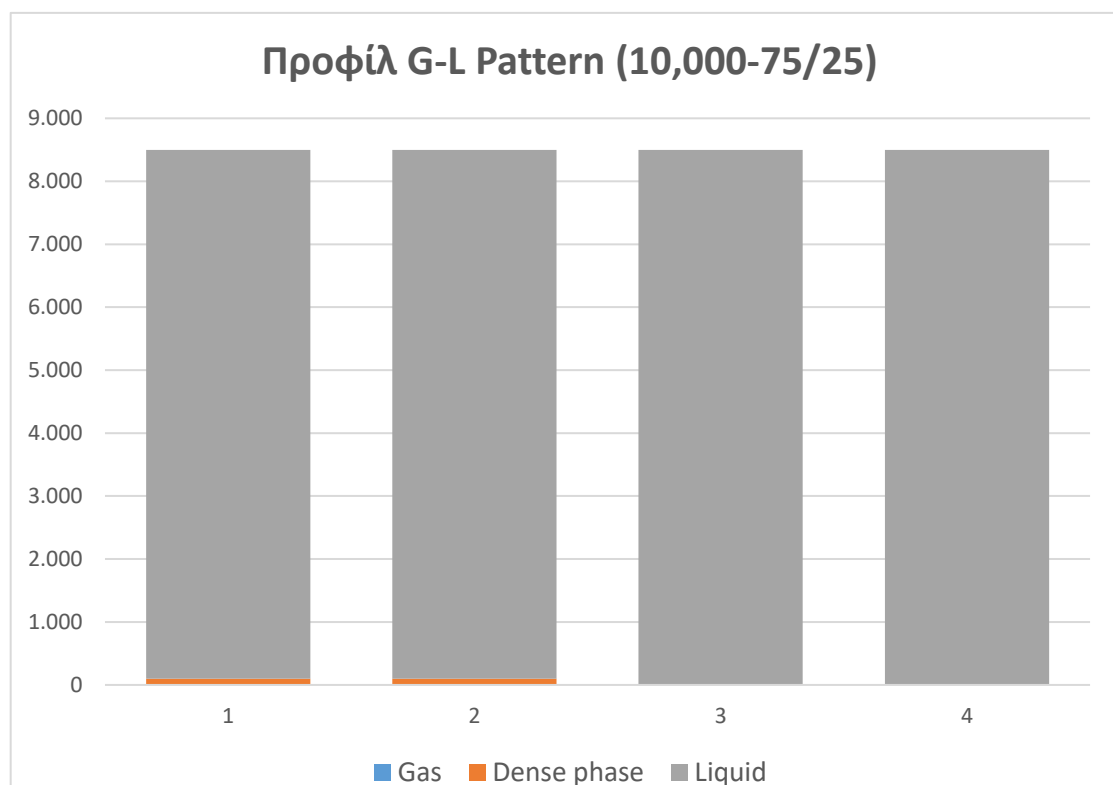
Διάγραμμα 6-15: Προφίλ G-L Pattern για ρευστό σύστασης 50%(H<sub>2</sub>S)/50%(CO<sub>2</sub>) για παροχή 2,500 m<sup>3</sup>/h



Διάγραμμα 6-16: Προφίλ G-L Pattern για ρευστό σύστασης 50%(H<sub>2</sub>S)/50%(CO<sub>2</sub>) για παροχή 10,000 m<sup>3</sup>/h



Διάγραμμα 6-17: Προφίλ G-L Pattern για ρευστό σύστασης 75%(H<sub>2</sub>S)/25%(CO<sub>2</sub>) για παροχή 2,500 m<sup>3</sup>/h

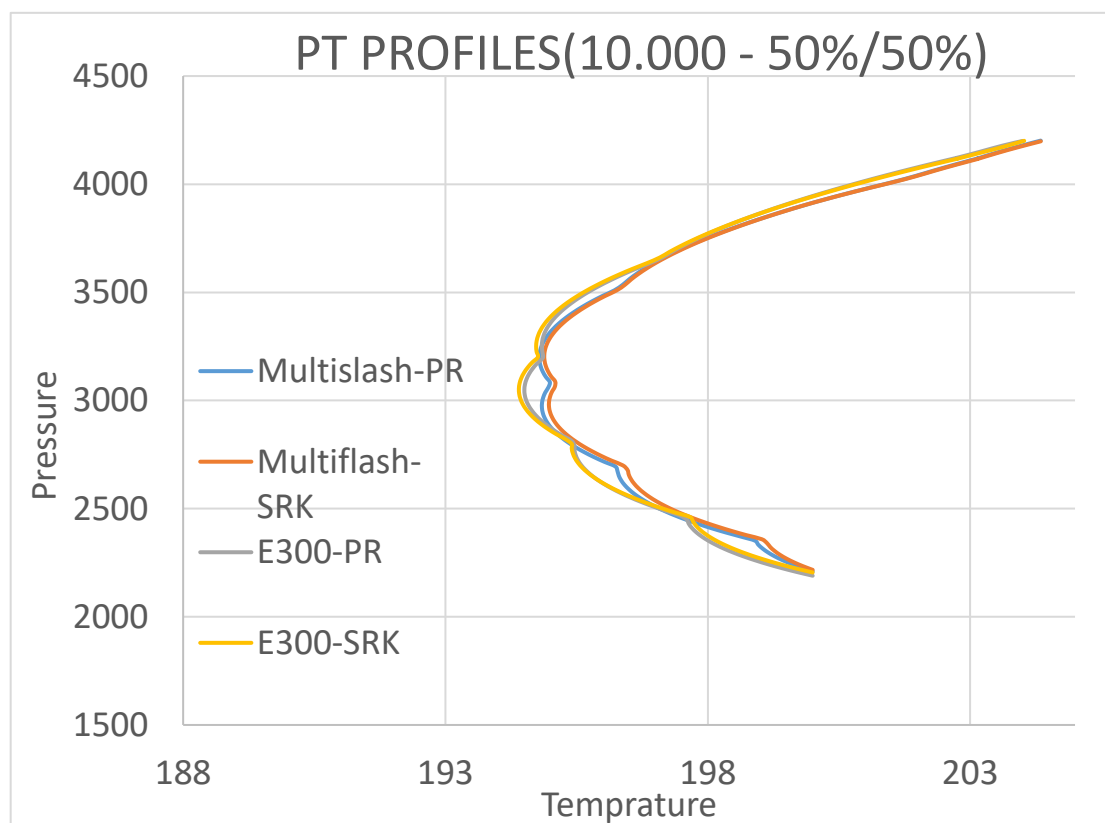


Διάγραμμα 6-18: Προφίλ G-L Pattern για ρευστό σύστασης 75%(H<sub>2</sub>S)/25%(CO<sub>2</sub>) για παροχή 10,000 m<sup>3</sup>/h

Διαπιστώνεται πως το PVT πακέτο Multiflash τείνει να δίνει πιο έντονες αλλαγές φάσεων από το PVT πακέτο E300, ενώ οι καταστατικές εξισώσεις, όπως έχει αναφερθεί, παρουσιάζουν πολύ μικρές μεταβολές. Με τη μείωση της περιεκτικότητας του υδρόθειου παρουσιάζονται λιγότερες αλλαγές φάσης, με τη σύσταση 25%(H<sub>2</sub>S)/75%(CO<sub>2</sub>) να έχει την πιο πολύπλοκη ροή όσον αφορά την αλλαγή φάσεων, ενώ αντίστοιχα στην σύσταση 75%(H<sub>2</sub>S)/25%(CO<sub>2</sub>) παρατηρείται σχεδόν μονοφασική ροή υγρής φάσης.

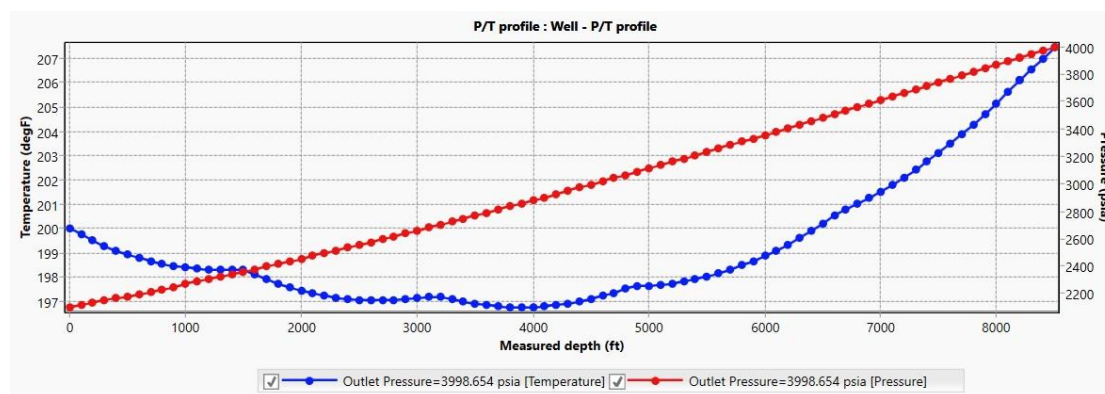
#### 6.3.4 Διερεύνηση του P/T προφίλ της παροχής 10,000 m<sup>3</sup>/h

Όπως φάνηκε στα διαγράμματα των P/T προφίλ, εκείνα που αντιστοιχούσαν στις υψηλές παροχές παρουσίαζαν κάποιες έντονες διακυμάνσεις. Για την οπτική επαλήθευση παρακάτω παρατίθενται τα P/T προφίλ για ρευστό σύστασης 50%(H<sub>2</sub>S)/50%(CO<sub>2</sub>), για παροχή 10,000 m<sup>3</sup>/h.



Διάγραμμα 6-19: Προφίλ P/T για σύσταση 50%(H<sub>2</sub>S)/50%(CO<sub>2</sub>) και παροχή 10,000 m<sup>3</sup>/h

Διαπιστώθηκε πως οι διακυμάνσεις στα P/T προφίλ οφείλονται σε διακυμάνσεις στην θερμοκρασιακή μεταβολή του ρευστού και όχι στην πίεση, όπως φαίνεται στην παρακάτω Εικόνα από το σχετικό διάγραμμα των αποτελεσμάτων του P/T προφίλ.



Εικόνα 6-9: Διάγραμμα προφίλ πίεσης και θερμοκρασίας του ρευστού σε σχέση με το βάθος της γεώτρησης

Κατά τον έλεγχο του αίτιου που προκαλεί την διακύμανση των θερμοκρασιών, διαπιστώθηκε πως ο όρος της θερμοχωρητικότητας  $C$  παρουσιάζει αλλαγές στην κλίση του, στα σημεία που παρατηρούνται οι διακυμάνσεις της θερμοκρασίας. Ο όρος της θερμοχωρητικότητας επηρεάζεται άμεσα από τον συντελεστή συμπίεστικότητας  $z$ . Από τον έλεγχο της κλίσης του συντελεστή συμπίεστικότητας, στα συγκεκριμένα σημεία, διαπιστώθηκε πως και σε αυτόν τον όρο παρατηρούνται μεταβολές της κλίσης. Ωστόσο, ο συντελεστής συμπίεστικότητας επηρεάζεται από τη θερμοκρασία, οπότε το πρόβλημα καταλήγει στο ότι δεν μπορεί να διαγνωστεί σε ποιον όρο παρουσιάζει αδυναμία υπολογισμού το λογισμικό. Πρώτο πιθανό αίτιο αποτελεί η λανθασμένη εκτίμηση της μεταφοράς θερμότητας  $Q$ , όπου επηρεάζει τον όρο της θερμοχωρητικότητας  $C$  και επομένως τη μεταβολή της θερμοκρασίας  $\Delta T$ , όπου αυτή τελικώς επηρεάζει τον συντελεστή συμπίεστικότητας  $z$ . Δεύτερο πιθανό αίτιο αποτελεί η αδυναμία του λογισμικού στην ακριβή εκτίμηση του συντελεστή συμπίεστικότητας  $z$ , ο οποίος επηρεάζει την θερμοχωρητικότητα  $C$  και αυτή προκαλεί τις μεταβολές στην θερμοκρασία. Τέλος, τα σημεία αλλαγής της κλίσης δεν σχετίζονται με τις αλλαγές φάσης, γεγονός που ενδεχομένως να ερμήνευε την αστοχία των υπολογισμών, κάνοντας την ερμηνεία ακόμη πιο δύσκολη. Το παραπάνω πρόβλημα χρήζει περαιτέρω διερεύνησης.

# 7

## Συμπεράσματα

Η εισπίεση υπό συνθήκες πλήρους ανάμιξης είναι μια αποδεδειγμένα οικονομικά βιώσιμη διαδικασία, όπου αυξάνει σε μεγάλο βαθμό την απόληψη του πετρελαίου με την εκτόπισή του υπό πλήρη αναμιξιμότητα και την μείωση του ιξώδους του. Ο σχεδιασμός της διαδικασίας απαιτεί την διεξοδική μελέτη της συμπεριφοράς φάσεων και της θερμοδυναμικής συμπεριφοράς των καθαρών ενώσεων και των μιγμάτων τους που συνιστούν το όξινο αέριο.

Αποτελεί, λοιπόν, μια σύνθετη διαδικασία, την οποία η παρούσα εργασία κλήθηκε να διερευνήσει αποκλειστικά με τη χρήση ενός λογισμικού μοντελοποίησης ροών σταθερής κατάστασης, το PIPESIM της Schlumberger, που κατά κύριο λόγο χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με άλλα προγράμματα ανάλυσης ροών σε γεωτρήσεις.

Με την εκτέλεση και την μετέπειτα διερεύνηση των προσομοιώσεων εξήχθησαν κάποια συμπεράσματα για την καταλληλότητα του λογισμικού PIPESIM ως εργαλείο μοντελοποίησης μιας γεώτρησης με σκοπό την εισπίεση όξινου αερίου.

Αρχικά, οι φάκελοι φάσεων δεν φαίνεται να παρουσιάζουν κάποια αστοχία, δίνοντας τα αποτελέσματα που αναμενόταν, κοντά σε αυτά που παρουσιάζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές. Εξαιρέσεις αποτελούν οι φάκελοι φάσεων για το ρευστό σύστασης 25% (H<sub>2</sub>S)/75%(CO<sub>2</sub>), όταν επιλέχθηκε το PVT πακέτο E300, όπου πρόκυπταν φάκελοι φάσεων για καθαρό συστατικό, δίνοντας μόνο καμπύλη τάσης ατμών. Από αυτό συμπεραίνεται πως το PVT πακέτο E300 παρουσιάζει αδυναμία υπολογισμού στην συγκεκριμένη σύσταση με αποτέλεσμα το PVT πακέτο Multiflash να χρίζεται καταλληλότερο σε μελέτη ρευστών χαμηλής περιεκτικότητας σε υδρόθειο.

Τα P/T προφίλ των μοντέλων των ρευστών που δοκιμάστηκαν, ούτε αυτά φαίνεται να παρουσιάζουν κάποια φανερή αστοχία. Η πίεση αυξάνεται με το βάθος, γεγονός που αναμενόταν, ενώ οι μεταβολές τις θερμοκρασίας έχουν και αυτές την σωστή και λογική τους πορεία, με εξαίρεση κάποιες ανεξήγητες διακυμάνσεις στην θερμοκρασία των ρευστών με παροχή 10,000 m<sup>3</sup>/h, οι οποίες μπορούν να παραληφθούν στον μακροσκοπικό έλεγχο του συστήματος.

Ακόμη, με την σύγκριση των P/T προφίλ των διαφορετικών παροχών, 2,500 m<sup>3</sup>/h και 10,000 m<sup>3</sup>/h, παρατηρήθηκε πως η αύξηση πίεσης στο σενάριο της μικρότερης παροχής είναι μεγαλύτερη απ' ότι στο σενάριο με την μεγαλύτερη παροχή. Απόρροια του συμπεράσματος



είναι πως το ρευστό στο σενάριο της παροχής των 10,000 m<sup>3</sup>/h, θα πρέπει να εισπιαστεί με υψηλότερη αρχική πίεση, αυξάνοντας την δαπάνη ενέργειας στους συμπιεστές, άρα και το κόστος της διαδικασίας.

Σημαντικό πόρισμα του ελέγχου των φάκελων φάσεων και των P/T προφίλ, αποτελεί η παρατήρηση των πολύ μικρών μεταβολών που παρουσιάζουν σε αυτά τα διαφορετικά μοντέλα ρευστών. Διαπιστώθηκε πως οι αλλαγές στα μοντέλα των ρευστών (PVT πακέτο, καταστατική εξίσωση, συσχέτιση ιξώδους και συσχέτιση volume shift) παρουσίαζαν μέγιστες διαφορές της τάξης των λίγων δεκάδων psia και μερικών °F. Συμπεραίνεται, λοιπόν, πως οι αλλαγές των μοντέλων του ρευστού έχουν ελάχιστη επίδραση στην μακροσκοπική λειτουργία της διαδικασίας της εισπίεσης.

Κατά τον λεπτομερή έλεγχο των υπολοίπων θερμοδυναμικών ιδιοτήτων, όπως η πυκνότητα και το ιξώδες, παρατηρήθηκε πως ενώ οι διαφορετικές συσχετίσεις του ιξώδους έχουν τις αναμενόμενες διαφορές, οι συσχετίσεις του volume shift δεν επέφεραν καμία διαφορά στις τιμές της πυκνότητας. Πιθανολογείται πως το πρόβλημα αυτό του λογισμικού έγκειται σε κάποιο λάθος στον προγραμματισμό της μοντελοποίησης του ρευστού.

Το φαινομενικά σοβαρότερο πρόβλημα που συναντήθηκε κατά την διερεύνηση αποτελεί το γεγονός πως το λογισμικό PIPESIM, παρόλο που τα P/T προφίλ των ρευστών ήταν μέσα στην υπερκρίσιμη περιοχή, δεν χαρακτήριζε τα ρευστά ως υπερκρίσιμα. Αντιθέτως, είτε από τον πίνακα Phase properties του παραθύρου Phase envelope είτε από τα αποτελέσματα των P/T προφίλ, τα ρευστά δηλώνονταν ως αέρια ή υγρή φάση. Το πρόβλημα, ωστόσο, θεωρήθηκε ως φαινομενικό, καθώς η αρχική ανησυχία πως το λογισμικό μη μπορώντας να «διαβάσει» την υπερκρίσιμη κατάσταση θα χρησιμοποιούσε εσφαλμένες τιμές των ιδιοτήτων, δεν ίσχυε. Παρά τις αλλαγές φάσεων από αέριο σε υγρό που θεωρούσε το λογισμικό, όλες οι ιδιότητες είχαν λογική ακολουθία στις τιμές τους, με αποτέλεσμα να εξαχθεί το συμπέρασμα πως οι θεωρούμενες αλλαγές φάσεων μπορούν να αντιμετωπιστούν ως σφάλμα στην ονομασία της κάθε φάσης που δεν επηρεάζει την ορθότητα των υπολογισμών.

# 8

## *Βιβλιογραφία*

- Ahmed, T. (2016). «*Equations of State and PVT Analysis*». Gulf Professional Publishing.
- AlFalahy, M.A. et al. (1998) «Sour gas processing, disposal and utilization as applied in UAE reservoirs». SPE 49504.
- Boyle, T.B., & Carroll, J.J. (2002). «Study determines best methods for calculating acid-gas density». OIL & GAS JOURNAL.
- Carroll, J.J. (2010). «*Acid Gas Injection and Carbon Dioxide Sequestration*». Wiley-Scrivener Publishing.
- Duissenov, D. (2013). «Production and processing of sour crude and natural gas». Trondheim: NTNU.
- Encyclopedia of hydrocarbons (2007), «*VOLUME III / NEW DEVELOPMENTS: ENERGY, TRANSPORT, SUSTAINABILITY*», Istituto della Enciclopedia italiana in collaboration with ENI.
- EngineeringToolBox. [https://www.engineeringtoolbox.com/hydrogen-sulfide-H2S-properties-d\\_2034.html](https://www.engineeringtoolbox.com/hydrogen-sulfide-H2S-properties-d_2034.html).
- Gabitto, J. (2003). «*Experimental and theoretical determination of heavy oil viscosity under reservoir conditions*». Texas A&M University.
- Gaganis, V. (...). «*Phase behavior calculations using Equation of State models*». In A Collection of Papers on Chaos Theory and Its Applications, Paul Bracken and Dimo I. Uzunov (Editors), Intech.
- Guo, B., Liu, X., & Tan, X. (2017). «*Petroleum Production Engineering*». Gulf Professional Publishing.
- Heriot Watt University. (2011). «*Production Technology*». Heriot Watt Institute of Petroleum Engineering.
- IHS Markit. (2017). <https://ihsmarkit.com/research-analysis/can-you-determine-production-back-out-for-a-gathering-system-without-ipsr.html>

- IPCC. (2005). «*IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage*». Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Metz, B., O. Davidson, H. C. de Coninck, M. Loos, and L. A. Meyer (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 442 pp.
- Konstantinopoulos, M. (2018). «*SENSITIVITY ANALYSIS OF AN ARTIFICIAL LIFT SYSTEM*». Πολυτεχνείο Κρήτης.
- Mohsen-Nia, M. et al. (1994). «Sour natural gas and liquid equations of state». *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Volume 12, Pages 127-136.
- Nazeri Ghogh, M., Chapoy, A., Burgass, RW. & Tohidi Kalorazi, B. (2018). «*Viscosity of CO<sub>2</sub> -rich mixtures from 243 K to 423 K at pressures up to 155 MPa: new experimental viscosity data and modelling*», *Journal of Chemical Thermodynamics*, vol. 118, pp. 100-114.
- Nema, G., Garimella, S., & Fronk, B. (2014). «*Flow regime transitions during condensation in microchannels*». Elsevier, *International Journal of Refrigeration*, Volume 40, Pages 227-240
- Pappas, A. (2019). «*Αξιολόγηση συσχετίσεων για τον προσδιορισμό της ελάχιστης πίεσης αναμιξιμότητας κατά την εισπίεση CO<sub>2</sub>/αερίων σε κοιτάσματα πετρελαίου*». Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο.
- Pedersen, K.S. et al. (1983). «*Viscosity of crude oils*». *Chemical Engineering Science* Vol. 39, No. 6, pp. 1011-1016.
- Perez et al. (2016). «*Experimental and modelling study of the densities of the hydrogen sulphide + methane mixtures at 253, 273 and 293 K and pressures up to 30 Mpa*». *Fluid Phase Equilibria*, Volume 427, Pages 371-383.
- PetroWiki (2016). [https://petrowiki.spe.org/Sour\\_gas](https://petrowiki.spe.org/Sour_gas).
- Tassios, G. (2018). «*Εισπίεση Όξινου Αερίου σε Ταμειυτήρες Πετρελαίου*». Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο.
- Verma, M.K. (2015). «*Fundamentals of carbon dioxide-enhanced oil recovery (CO<sub>2</sub>-EOR)*». U.S. Geological Survey.
- Zhou, F. (2013). «*Research on heat transfer in geothermal wellbore and surroundings*». Technical University of Berlin.