



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΟΛΟΓΩΝ -
ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ

**Μοντελοποίηση εισπίεσης όξινου αερίου σε
γεωτρήσεις**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γιαννακόπουλος Νίκος

Επιβλέπων: Βασίλειος Γαγάνης, Αναπληρωτής Καθηγητής

Αθήνα 2024

Copyright © Γιαννακόπουλος Νικόλαος, 2024. Με επιφύλαξη κάθε
δικαιώματος. All rights reserved.



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΟΛΟΓΩΝ -
ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗΣ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ

**Μοντελοποίηση εισπίεσης όξινου αερίου σε
γεωτρήσεις**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Γιαννακόπουλος Νίκος

Επιβλέπων: Βασίλειος Γαγάνης, Αναπληρωτής Καθηγητής

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή στις 11/03/2024

Β. Γαγάνης, Αναπληρωτής Καθηγητής: (Υπογραφή)

Γ. Αποστολόπουλος, Καθηγητής : (Υπογραφή)

Ε. Βουτσάς, Καθηγητής : (Υπογραφή)

Αθήνα 2024

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω αρχικά τον επιβλέποντα καθηγητή μου τον κ. Γαγάνη Βασίλειο για την επιστημονική του καθοδήγηση καθώς και για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου, αναθέτοντας μου ένα απαιτητικό θέμα. Μέσα από την διδασκαλία των μαθημάτων «Τεχνολογία Γεωτρήσεων», «Μηχανική Πετρελαίων», αλλά και «Παραγωγή Υδρογονανθράκων» μου κέντρισε το ενδιαφέρον να ασχοληθώ με την μελέτη των υδρογονανθράκων και να αγαπήσω τον κλάδο αυτό.

Ακολούθως θα ήθελα να ευχαριστήσω, την κα Σαμνιώτη Άννα, υποψήφια διδάκτορα της Σχολής Μηχανικών Μεταλλειολόγων – Μεταλλουργών, για την άριστη καθοδήγηση, καθώς και για τις χρήσιμες υποδείξεις και συμβουλές της κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ ανήκει δικαιωματικά σε όλους του καθηγητές της σχολής, που καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου ήταν δίπλα μου όταν τους χρειαζόμουν, έτοιμοι να διαθέσουν το χρόνο τους και την εμπειρία τους

Τέλος ένα ιδιαίτερο ευχαριστώ αποδίδεται στην οικογένεια μου και τους φίλους μου για την στήριξη, τόσο ψυχολογική όσο και υλική, που προσέφεραν απλόχερα κατά την διάρκεια των σπουδών μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η αύξηση της παγκόσμιας ενεργειακής ζήτησης ωθεί τις πετρελαϊκές εταιρείες στην εκμετάλλευση διαρκώς «δυσκολότερων» κοιτασμάτων υδρογονανθράκων, όπως εκείνων που περιέχουν σημαντικές ποσότητες θειούχων ενώσεων, κυρίως υδρόθειο (H_2S) ή/και διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), γνωστά ως όξινα κοιτάσματα (sour/acid reservoirs). Όμως, η παρουσία H_2S ή/και CO_2 σε ταμιευτήρες πετρελαίου παρουσιάζει επιπλέον προκλήσεις λόγω της τοξικότητάς τους και των αρνητικών επιπτώσεών τους στην παραγωγική διαδικασία. Το όξινο μείγμα που προκύπτει από τη συνδυασμένη παρουσία τους μπορεί να προκαλέσει αλλοίωση των επιθυμητών χαρακτηριστικών των παραγόμενων υδρογονανθράκων, και, εν τέλει, της ποιότητας των τελικών προϊόντων πετρελαίου.

Για την επιτυχή εκμετάλλευση των όξινων πετρελαϊκών πεδίων, η πετρελαϊκή βιομηχανία έχει εντάξει ένα επιπλέον στάδιο επεξεργασίας υδρογονανθράκων στην επιφάνεια για την απομάκρυνση αυτών των όξινων συστατικών, με σκοπό τη διασφάλιση της ποιότητας του παραγόμενου πετρελαίου, καθώς και της ασφάλειας, της υγείας και του περιβάλλοντος. Το στάδιο αυτό, μέχρι και σήμερα, περιλαμβάνει την απομάκρυνση των όξινων συστατικών με τη χρήση μονάδων αμινών, όπου το παραγόμενο από αυτές όξινο αέριο οδηγείται σε μονάδες ανάκτησης στοιχειακού θείου (μονάδες Claus) με σκοπό τη μετατροπή του H_2S σε στοιχειακό θείο. Λόγω της φθίνουσας ζήτησης σε θείο παγκοσμίως και της συνακόλουθης πτώσης της τιμής πώλησής του, οι μονάδες Claus δεν είναι επικερδείς, ιδιαίτερα για μικρούς παραγωγούς πετρελαίου. Επιπλέον, το κανονιστικό πλαίσιο για τις αέριες εκπομπές γίνεται ολοένα και πιο αυστηρό, αυξάνοντας την οικονομική επιβάρυνση των πετρελαϊκών εταιρειών για την αξιοποίηση όξινων κοιτασμάτων και καθιστά αναγκαία την εφαρμογή εναλλακτικών, οικονομικά αποδοτικών και περιβαλλοντικά συμβατών διαδικασιών για τη βέλτιστη διαχείριση της παραγωγής.

Η επανεισπίεση του παραγόμενου από τις μονάδες αμινών όξινου αερίου μέσα σε εξασθενημένους ταμιευτήρες πετρελαίου (mature reservoirs) μέσω γεωτρήσεων εισπίεσης είναι μια πρακτική που χρησιμοποιείται τα τελευταία χρόνια για τη διαχείριση των όξινων κοιτασμάτων. Ο σκοπός της διαδικασίας αυτής είναι αφενός η κατάργηση της μονάδας Claus, με ταυτόχρονη μείωση των αέριων εκπομπών και του κόστους επεξεργασίας του όξινου αερίου, και αφετέρου η αύξηση της αποληψιμότητας του πεδίου μέσω αλλαγών στις ιδιότητες του ρευστού. Για να πραγματοποιηθεί

αποτελεσματικά η διαδικασία της επανεισπίεσης του όξινου αερίου, είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε, μεταξύ άλλων, τις συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας που επικρατούν κατά μήκος των γεωτρήσεων εισπίεσης. Αυτό απαιτεί την ορθή περιγραφή της θερμοδυναμικής συμπεριφοράς του όξινου ρευστού, καθώς η πίεση και η θερμοκρασία επηρεάζουν τον τρόπο που αυτό συμπεριφέρεται κατά μήκος της γεώτρησης εισπίεσης.

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποσκοπεί στον ποιοτικό έλεγχο των αποτελεσμάτων ενός εμπορικού λογισμικού, συγκεκριμένα του PROSPER της εταιρείας Petroleum Experts, το οποίο, στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής, χρησιμοποιείται με σκοπό το ποιοτικό έλεγχο των αποτελεσμάτων του όσον αφορά τον προσδιορισμό της θερμοδυναμικής συμπεριφοράς του ρευστού μέσα στη γεώτρηση εισπίεσης. Η μελέτη αυτή περιλαμβάνει τη δημιουργία των προφίλ μεταβολής της πίεσης και της θερμοκρασίας του όξινου αερίου συναρτήσει του βάθους (μήκους της γεώτρησης εισπίεσης) που προέκυψαν από τη διερεύνηση των συνθηκών εισπίεσης του όξινου αερίου στη γεώτρηση, προκειμένου να διασφαλίζεται η μονοφασική κατάστασή του (υγρή ή υπερκρίσιμη φάση) στο εσωτερικό της. Για τη θερμοδυναμική περιγραφή της συμπεριφοράς του ρευστού, χρησιμοποιήθηκαν οι κυβικές καταστατικές εξισώσεις (Equations of State, EoS), οι οποίες είναι διαθέσιμες στο λογισμικό.

Τα αποτελέσματα του ποιοτικού ελέγχου είναι πολύ ενθαρρυντικά. Η συμφωνία των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με τη βιβλιογραφία ενισχύει την εγκυρότητα της μεθοδολογικής προσέγγισης της παρούσας διπλωματικής, και επιβεβαιώνει την ακρίβεια του λογισμικού PROSPER. Ωστόσο, είναι επιτακτική ανάγκη να επιδεικνύεται σύνεση σχετικά με τις περιστασιακές ανακρίβειες του λογισμικού στη ερμηνεία συγκεκριμένων θερμοδυναμικών ιδιοτήτων. Ενώ αυτές οι ανακρίβειες φαίνεται να ασκούν ελάχιστη επίδραση στα μακροσκοπικά χαρακτηριστικά της ροής, συμπεριλαμβανομένης της πίεσης και της θερμοκρασίας, η σωστή διαχείρισή τους είναι ζωτικής σημασίας για τη βελτίωση της ακρίβειας του μοντέλου, εξασφαλίζοντας μεγαλύτερη αξιοπιστία των αποτελεσμάτων και αποδοτικότερη εφαρμογή της μεθοδολογίας σε περισσότερες πρακτικές διαδικασίες της πετρελαϊκής βιομηχανίας.

ABSTRACT

The presence of hydrogen sulfide (H₂S) and carbon dioxide (CO₂) in oil reservoirs is concerning due to their toxicity and negative impacts on the production process. The acidic mixture resulting from their combined presence can cause alteration of the desired characteristics of the hydrocarbons produced, such as the quality of the oil. For this reason, the petroleum industry typically incorporates a stage of hydrocarbon trapping and further processing at the surface to remove these acidic components. This process is crucial for personnel safety, environmental protection, as well as ensuring the quality and performance of the produced oil. Reinjecting acidic gas from injection wells is a common practice for managing this type of gas. The purpose is to reduce the costs of processing acidic gas and maintain reservoir pressure. To effectively carry out the acidic gas reinjection process, it is essential to precisely understand the developing pressure and temperature along the injection wells. This requires a correct description of the thermodynamic behavior of the acidic fluid, as pressure and temperature affect how this gas behaves along the drilling. Only then can we take effective measures for managing and reusing acidic gas through injection wells.

This thesis aims to qualitatively test the results of a commercial software, namely PROSPER by Petex, used to determine the pressures, temperatures and properties of the acidic fluid, as well as to analyse the behaviour of its phases in the whole section of the well during the injection process. For the thermodynamic description of the fluid behaviour, cubic equations of state (EoS) are used, which are available in the software mentioned.

The results of the qualitative control are very encouraging. The agreement between the simulation results and the literature enhances the validity of the methodology and accuracy. However, observing the software errors in the detailed examination of the fluid's thermodynamic properties requires attention. Although these errors seem not to significantly affect the macroscopic properties of the flow such as pressure and temperature, it is important to correct them to improve the model's accuracy. This can ensure even greater reliability of the results and the application of the methodology in more practical applications.

Περιεχόμενα

1.Εισαγωγή	1
1.1 Όξινα Αέρια	1
1.1.1 Υδρόθειο (H ₂ S)	1
1.1.2 Διοξείδιο του άνθρακα (CO ₂)	2
1.2 Συμβατική Διαχείριση του όξινου αερίου	3
1.3 Επανεπίεση όξινου αερίου εντός του ταμιευτήρα	5
2. Θερμοδυναμικές ιδιότητες	9
2.1 Εισαγωγή	9
2.2 Θερμοδυναμικές ιδιότητες των H ₂ S και CO ₂	11
2.4 Εκτίμηση ιξώδους μέσω εμπειρικών συσχετίσεων	16
3. Καταστατικές εξισώσεις (Equations Of State)	18
3.1 Εισαγωγή	18
3.2 Καταστατική εξίσωση Van der Waals	19
3.3 Καταστατική εξίσωση Soave – Redlich – Kwong (SRK EOS)	20
3.4 Καταστατική εξίσωση Peng-Robinson (PR EOS)	21
3.5 Διόρθωση Όγκου (Volume Shift)	24
4. Ικανότητα απόληψης γεώτρησης (Well Deliverability)	26
4.1 Εισαγωγή	26
4.2 Μονοφασική ροή (Single Phase flow)	27
4.3 Πολυφασική ροή (Multi-Phase flow)	28
4.3.1 Καθεστώτα ροής (Flow regimes)	28
4.4 Μεταβολή της πίεσης και της θερμοκρασίας του όξινου αερίου σε γεωτρήσεις εισπίεσης	29
4.4.1 Ελάχιστη πίεση αναμιξιμότητας (Minimum Miscibility Pressure)	31
4.4.1 Εκτίμηση της ελάχιστης απαιτούμενης πίεσης εισπίεσης στην κεφαλή της γεώτρησης	32

5. Λογισμικό προσομοίωσης ροής ρευστών σε γεωτρήσεις (PROSPER)	36
5.1 Εισαγωγή	36
5.2 Σχεδιασμός του συστήματος εισπίεσης με την βοήθεια του λογισμικού PROSPER	37
5.3 Ανάλυση Ευαισθησίας (Sensitivity Analysis)	46
6. Εξαγωγή αποτελεσμάτων	48
6.1 Μελέτη περίπτωσης για σύσταση όξινου αερίου (85% H₂S / 14% CO₂ / 1% C₁)	48
6.1.1 Ανάλυση Ευαισθησίας για τον συντελεστή εναλλαγής θερμότητας H	50
6.1.2 Ανάλυση Ευαισθησίας για ρυθμό εισπίεσης του όξινου αερίου AGIR	52
6.1.3 Ανάλυση Ευαισθησίας για την θερμοκρασία εισπίεσης του όξινου αερίου AGIT	53
6.1.4 Ανάλυση Ευαισθησίας για την πίεση στον πυθμένα της γεώτρησης εισπίεσης P _{bh}	54
6.2 Μελέτη περίπτωσης για σύσταση όξινου αερίου (14% H₂S / 85% CO₂ / 1% C₁)	55
6.2.1 Ανάλυση Ευαισθησίας για τον συντελεστή εναλλαγής θερμότητας H	56
6.2.2 Ανάλυση Ευαισθησίας για τον ρυθμό εισπίεσης του όξινου αερίου AGIR	58
6.2.3 Ανάλυση Ευαισθησίας για την θερμοκρασία εισπίεσης του όξινου αερίου AGIT	59
6.2.4 Ανάλυση Ευαισθησίας για την πίεση στον πυθμένα της γεώτρησης εισπίεσης P _{bh}	60
6.3 Μελέτη περίπτωσης για σύσταση όξινου αερίου (50% H₂S / 49% CO₂ / 1% C₁)	61
6.3.1 Ανάλυση Ευαισθησίας για τον συντελεστή εναλλαγής θερμότητας H	62
6.3.2 Ανάλυση Ευαισθησίας για τον ρυθμό εισπίεσης του όξινου αερίου AGIR	64
6.3.3 Ανάλυση Ευαισθησίας για την θερμοκρασία εισπίεσης του όξινου αερίου AGIT	65
6.3.4 Ανάλυση Ευαισθησίας για την πίεση στον πυθμένα της γεώτρησης εισπίεσης P _{bh}	66

6.4 Μελέτη περίπτωσης για σύσταση όξινου αερίου (80% H₂S / 15% CO₂ / 5% C₁)	67
6.4.1 Ανάλυση Ευαισθησίας για τον συντελεστή εναλλαγής θερμότητας H	69
6.4.2 Ανάλυση Ευαισθησίας για τον ρυθμό εισπίεσης του όξινου αερίου AGIR70	
6.4.3 Ανάλυση Ευαισθησίας για την θερμοκρασία εισπίεσης του όξινου αερίου AGIT	71
6.4.4 Ανάλυση Ευαισθησίας για την πίεση στον πυθμένα της γεώτρησης εισπίεσης P _{bh}	72
6.5 Σχολιασμός και ποιοτικός έλεγχος των αποτελεσμάτων	73
7. Συμπεράσματα	78
8. Βιβλιογραφία	80

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1. Απλοποιημένο σχηματικό διάγραμμα διαδικασίας γλύκανσης του φυσικού αερίου με αλκανολαμίνες (Subhasish, 2015).....	4
Εικόνα 2. Σχηματική απεικόνιση συστήματος εισπίεσης του όξινου αερίου (Wu & Carroll, Acid Gas Injection and Related Technologies, 7 March 2011).....	6
Εικόνα 3. Φάκελος φάσεων για μείγμα όξινου αερίου σύστασης 50 % H ₂ S / 50 % CO ₂ (Carroll, Acid Gas Injection and Carbon Dioxide Sequestration, 17 May 2010).....	10
Εικόνα 4. Φάκελοι φάσεων για μείγματα CO ₂ και H ₂ S διαφορετικών συστάσεων ...	11
Εικόνα 5. Φάκελος Φάσεων για καθαρό H ₂ S (EngineeringToolBox, n.d.).....	12
Εικόνα 6. Φάκελος Φάσεων για καθαρό CO ₂ (EngineeringToolBox, χ.χ.).....	12
Εικόνα 7. Διάταξη παραγωγικής γεώτρησης (Yousefi, Groenenberg, Koornneef, Juez - Larre, & Shahi, 2023)	27
Εικόνα 8. Καθεστώτα ροής (Guerrero & Munoz, 2017)	29
Εικόνα 9. Αντίστροφη διαδικασία υπολογισμού για την εκτίμηση της απαιτούμενης πίεσης στην κεφαλή της γεώτρησης (Samnioti, et al., 2023)	33
Εικόνα 10. Περιβάλλον του λογισμικού PROSPER.....	37
Εικόνα 11. Παράθυρο Options Summary	37
Εικόνα 12. Επιλογές στο παράθυρο του Options Summary	38
Εικόνα 13. Παράθυρο του PVT Input Data	39
Εικόνα 14. Επιλογές στο παράθυρο του PVT Input Data.....	39
Εικόνα 15. Συμπληρωμένο PVT Input Data.....	40
Εικόνα 16. Παράθυρο Equipment Data	41
Εικόνα 17. Επιλογές στο Equipment Data.....	41
Εικόνα 18. Deviation Survey	42
Εικόνα 19. Παράθυρο επιλογών Geothermal Gradient	43
Εικόνα 20. Παράθυρο υπολογισμού του Gradient (traverse)	44
Εικόνα 21. Input Data για τον υπολογισμό του Gradient (traverse).....	45
Εικόνα 22. Πίνακας αποτελεσμάτων υπολογισμού των ιδιοτήτων του ρευστού	46
Εικόνα 23. Αναλυτικά αποτελέσματα των ιδιοτήτων του ρευστού από το PROSPER	73
Εικόνα 24. Αναλυτικά αποτελέσματα των ιδιοτήτων του ρευστού από το PROSPER	74

Εικόνα 25. Αναλυτικά αποτελέσματα των ιδιοτήτων του ρευστού από το PROSPER	75
Εικόνα 26, Φάκελος Φάσεων στο λογισμικό PROSPER	76
Εικόνα 27. Αναλυτικά αποτελέσματα των ιδιοτήτων του ρευστού από το PROSPER	77

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1. Θερμοδυναμικές ιδιότητες κορεσμένου υγρού CO ₂ (Carroll, Acid Gas Injection and Carbon Dioxide Sequestration, 17 May 2010).....	13
Πίνακας 2. Θερμοδυναμικές ιδιότητες κορεσμένου ατμού CO ₂ (Carroll, Acid Gas Injection and Carbon Dioxide Sequestration, 17 May 2010).....	14
Πίνακας 3. Ιδιότητες κορεσμένου υγρού H ₂ S (Carroll, Acid Gas Injection and Carbon Dioxide Sequestration, 17 May 2010).....	15
Πίνακας 4. Ιδιότητες κορεσμένου αέριου H ₂ S (Carroll, Acid Gas Injection and Carbon Dioxide Sequestration, 17 May 2010).....	15
Πίνακας 5. Σενάρια μελέτης υψηλής σύστασης σε H ₂ S.....	49
Πίνακας 6. Σενάρια μελέτης υψηλής σύστασης σε CO ₂	55
Πίνακας 7. Σενάρια μελέτης για σύσταση (50% H ₂ S / 49% CO ₂ / 1% C ₁).....	61
Πίνακας 8. Σενάρια μελέτης για σύσταση (80% H ₂ S / 15% CO ₂ / 5% C ₁).....	67
Πίνακας 9. Αποτελέσματα από τον υπολογισμό της μέσης πίεσης εισπίεσης στην κεφαλή της γεώτρησης	73

Κατάλογος Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1. Φάκελος Φάσεων για σύσταση (85% H ₂ S / 14% CO ₂ / 1% C ₁).....	50
Διάγραμμα 2. Συνδυαστικό διάγραμμα προφίλ πίεσης - θερμοκρασίας και Φακέλου Φάσεων για διαφορετικές τιμές του συντελεστή εναλλαγής θερμότητας H για σύσταση (85% H ₂ S / 14% CO ₂ / 1% C ₁)	51
Διάγραμμα 3. Συνδυαστικό διάγραμμα προφίλ πίεσης - θερμοκρασίας και Φακέλου Φάσεων για διαφορετικές τιμές του ρυθμού εισπίεσης του όξινου αερίου AGIR για σύσταση (85% H ₂ S / 14% CO ₂ / 1% C ₁)	52
Διάγραμμα 4. Συνδυαστικό διάγραμμα προφίλ πίεσης - θερμοκρασίας και Φακέλου Φάσεων για διαφορετικές τιμές της θερμοκρασίας εισπίεσης του όξινου αερίου για σύσταση (85% H ₂ S / 14% CO ₂ / 1% C ₁)	53
Διάγραμμα 5. Συνδυαστικό διάγραμμα προφίλ πίεσης - θερμοκρασίας και Φακέλου Φάσεων για διαφορετικές τιμές της πίεσης στον πυθμένα της γεώτρησης εισπίεσης για σύσταση (85% H ₂ S / 14% CO ₂ / 1% C ₁)	54
Διάγραμμα 6. Συνδυαστικό διάγραμμα προφίλ πίεσης - θερμοκρασίας και Φακέλου Φάσεων για διαφορετικές τιμές του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας για σύσταση (85 % CO ₂ / 14 % H ₂ S / 1% C ₁)	57
Διάγραμμα 7. Συνδυαστικό διάγραμμα προφίλ πίεσης - θερμοκρασίας και Φακέλου Φάσεων για διαφορετικές τιμές του ρυθμού εισπίεσης του όξινου αερίου AGIR για σύσταση (85 % CO ₂ / 14 % H ₂ S / 1% C ₁)	58
Διάγραμμα 8. Συνδυαστικό διάγραμμα προφίλ πίεσης - θερμοκρασίας και Φακέλου Φάσεων για διαφορετικές τιμές της θερμοκρασίας εισπίεσης του όξινου αερίου για σύσταση (85 % CO ₂ / 14 % H ₂ S / 1% C ₁)	59
Διάγραμμα 9. Συνδυαστικό διάγραμμα προφίλ πίεσης - θερμοκρασίας και Φακέλου Φάσεων για διαφορετικές τιμές της πίεσης στον πυθμένα της γεώτρησης εισπίεσης για σύσταση (85 % CO ₂ / 14 % H ₂ S / 1% C ₁)	60
Διάγραμμα 10. Φάκελος Φάσεων για σύσταση (50% H ₂ S / 49% CO ₂ / 1% C ₁).....	62
Διάγραμμα 11. Συνδυαστικό διάγραμμα προφίλ πίεσης - θερμοκρασίας και Φακέλου Φάσεων για διαφορετικές τιμές του συντελεστή εναλλαγής θερμότητας H για σύσταση (50% H ₂ S / 49% CO ₂ / 1% C ₁)	63
Διάγραμμα 12. Συνδυαστικό διάγραμμα προφίλ πίεσης - θερμοκρασίας και Φακέλου Φάσεων για διαφορετικές τιμές του ρυθμού εισπίεσης του όξινου αερίου AGIR για σύσταση (50% H ₂ S / 49% CO ₂ / C ₁ 1%)	64

Διάγραμμα 13. Συνδυαστικό διάγραμμα προφίλ πίεσης - θερμοκρασίας και Φακέλου Φάσεων για διαφορετικές τιμές της θερμοκρασίας εισπίεσης του όξινου αερίου για σύσταση (50% H ₂ S / 49% CO ₂ / 1% C ₁)	65
Διάγραμμα 14. Συνδυαστικό διάγραμμα προφίλ πίεσης – θερμοκρασίας και Φακέλου Φάσεων για διαφορετικές τιμές της πίεσης στον πυθμένα της γεώτρησης εισπίεσης για σύσταση (50% H ₂ S / 49 % CO ₂ / 1% C ₁)	66
Διάγραμμα 15. Φάκελος Φάσεων για σύσταση (80% H ₂ S / 15% CO ₂ / 5% C ₁).....	68
Διάγραμμα 16. Συνδυαστικό διάγραμμα προφίλ πίεσης – θερμοκρασίας και Φακέλου Φάσεων για διαφορετικές τιμές του συντελεστή εναλλαγής θερμότητας H για σύσταση (80% H ₂ S / 15% CO ₂ / 5% C ₁)	69
Διάγραμμα 17. Συνδυαστικό διάγραμμα προφίλ πίεσης – θερμοκρασίας και Φακέλου Φάσεων για διαφορετικές τιμές του ρυθμού εισπίεσης του όξινου αερίου AGIR για σύσταση (80% H ₂ S / 15% CO ₂ / 5% C ₁)	70
Διάγραμμα 18. Συνδυαστικό διάγραμμα προφίλ πίεσης - θερμοκρασίας και Φακέλου Φάσεων για διαφορετικές τιμές της θερμοκρασίας εισπίεσης του όξινου αερίου για σύσταση (80% H ₂ S / 15% CO ₂ / 5% C ₁)	71
Διάγραμμα 19. Συνδυαστικό διάγραμμα προφίλ πίεσης – θερμοκρασίας και Φακέλου Φάσεων για διαφορετικές τιμές της πίεσης στον πυθμένα της γεώτρησης εισπίεσης για σύσταση (80% H ₂ S / 15 % CO ₂ / 5% C ₁)	72

1.Εισαγωγή

1.1 Όξινα Αέρια

Τα όξινα αέρια, τα οποία περιλαμβάνουν σημαντικές ποσότητες θειούχων ενώσεων όπως το H_2S ή/και το CO_2 , αποτελούν σημαντική πτυχή των βιομηχανικών και περιβαλλοντικών προβληματισμών καθώς μπορούν να αποτελέσουν πρόκληση λόγω της διαβρωτικής τους φύσης και των δυνητικών δυσμενών επιδράσεων στην ανθρώπινη υγεία. Το H_2S , που αναγνωρίζεται για την έντονη οσμή του ακόμη και σε χαμηλές συγκεντρώσεις, είναι ιδιαίτερα γνωστό για την τοξικότητά του. Το CO_2 , αν και όχι άμεσα επιβλαβές, συμβάλλει σημαντικά στην κλιματική αλλαγή όταν απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα σε υπερβολικές ποσότητες. Ως εκ τούτου, η διαχείριση και ο έλεγχος των όξινων αερίων είναι ζωτικής σημασίας για τη διασφάλιση της ασφάλειας στους χώρους εργασίας, την πρόληψη της διάβρωσης των υποδομών και τον μετριασμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Οι βιομηχανίες χρησιμοποιούν εξελιγμένες τεχνολογίες για την ανίχνευση, την παρακολούθηση και τον μετριασμό των όξινων αερίων, ευθυγραμμίζόμενες με αυστηρούς κανονισμούς και στόχους βιωσιμότητας για να επιτύχουν μια ισορροπία μεταξύ λειτουργικής αποδοτικότητας και υπεύθυνης περιβαλλοντικής διαχείρισης.

1.1.1 Υδρόθειο (H_2S)

Το H_2S είναι ένα άχρωμο, εύφλεκτο, εξαιρετικά επικίνδυνο αέριο με ιδιαίτερη οσμή και εμφανίζεται στο αργό πετρέλαιο αλλά και στο φυσικό αέριο. Είναι πολύ επικίνδυνο για τον ανθρώπινο οργανισμό, διότι απορροφάται γρήγορα από τους πνεύμονες. Ξεχωρίζει λόγω της οσμής του χαλασμένου αυγού που έχει, όταν αυτό βρίσκεται ακόμα και σε μικρή συγκέντρωση στον αέρα. Με τη συνεχόμενη έκθεση, ωστόσο, ο άνθρωπος χάνει την ικανότητα να το μυρίσει, ενώ αυτό συνεχίζει να υπάρχει γύρω του. Αυτή η διαδικασία γίνεται αρκετά γρήγορα και σε υψηλές συγκεντρώσεις όντας σχεδόν άοσμο, μπορεί να επιφέρει μέχρι και θάνατο.

Εκτός από τις αρνητικές επιδράσεις στον άνθρωπο αλλά και στο περιβάλλον, η μη ελεγχόμενη παρουσία του H_2S στον επιφανειακό και υπεδafικό εξοπλισμό (γεώτρηση εισπίεσης), μπορεί να αποβεί καταστροφική λόγω της έντονης διαβρωτικής ικανότητάς του. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα ο σχεδιασμός του εξοπλισμού να πρέπει να γίνεται με

τέτοιο τρόπο έτσι ώστε να διασφαλίζεται η ακεραιότητα του σε οποιοδήποτε συνθήκες λειτουργίας.

Το H_2S μπορεί να σχηματιστεί σε ταμιευτήρες πετρελαίου μέσω διαφόρων βιολογικών και γεωχημικών διεργασιών όπως:

1. Αναγωγή θεικών αλάτων από βακτήρια: Τα βακτήρια χρησιμοποιούν τα θειικά άλατα ως δέκτη ηλεκτρονίων κατά τη διάρκεια του μεταβολισμού, ανάγοντάς τα σε ιόντα θείου. Η διαδικασία αυτή λαμβάνει χώρα σε αναερόβιες συνθήκες όπου η οργανική ύλη είναι διαθέσιμη ως πηγή άνθρακα για τα βακτήρια.
2. Θερμική αποσύνθεση ενώσεων που περιέχουν θείο: Υπό συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας και πίεσης εντός του ταμιευτήρα, ενώσεις όπως σουλφίδια και θειικά άλατα μπορούν να διασπαστούν, απελευθερώνοντας H_2S ως παραπροϊόν.
3. Θειούχα ορυκτά του σιδήρου στα πετρώματα του ταμιευτήρα: Όταν αυτά τα ορυκτά έρχονται σε επαφή με νερό και οργανική ύλη, μπορούν να αντιδράσουν και να απελευθερώσουν H_2S .
4. Ζύμωση της οργανικής ύλης από μικροβιακούς πληθυσμούς: Η διαδικασία αυτή παράγει ενώσεις που περιέχουν θείο, οι οποίες στη συνέχεια υφίστανται περαιτέρω μετασχηματισμούς για την παραγωγή H_2S .

Αυτές οι διεργασίες επηρεάζονται από παράγοντες όπως η θερμοκρασία, η πίεση, η διαθεσιμότητα οργανικής ύλης και η παρουσία ενώσεων θείου στον ταμιευτήρα.

1.1.2 Διοξείδιο του άνθρακα (CO_2)

Το CO_2 είναι μια χημική ένωση που αποτελείται από δύο στοιχεία, τον άνθρακα και το οξυγόνο, σε αναλογία 2 προς 1. Συναντάται στον ατμοσφαιρικό αέρα σε μικρές ποσότητες και διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στο περιβάλλον της Γης. Η ανθρώπινη δραστηριότητα προκαλεί την εκπομπή μεγάλων ποσοτήτων CO_2 , μέσω της καύσης τόσο των ορυκτών καυσίμων, όσο και άλλων υλών που περιέχουν άνθρακα. Το CO_2 έχει μια ελαφριά μυρωδιά χαλασμένου αυγού, είναι άχρωμο και είναι πιο πυκνό από τον αέρα.

Μία διαδικασία διαχείρισης του CO_2 που χρησιμοποιείται από την πετρελαϊκή βιομηχανία για την μείωση των εκπομπών του, είναι η CCS (Carbon Capture and Storage). Κατά τη διαδικασία αυτή, οι εκπομπές CO_2 που παράγονται από τη χρήση

ορυκτών καυσίμων δεσμεύονται, συνήθως από μεγάλες σημειακές πηγές, όπως εργοστάσια ηλεκτροπαραγωγής ή βιομηχανικές εγκαταστάσεις, και στη συνέχεια αποτίθενται υπόγεια σε γεωλογικούς σχηματισμούς, όπως εξαντλημένοι ταμιευτήρες πετρελαίου και φυσικού αερίου. (Smith, 2020)

Επίσης, μία εναλλακτική μέθοδος εκμετάλλευσης του CO₂ αποτελεί η χρήση του για την ενίσχυση της ανάκτησης του πετρελαίου μέσω της εισπίεσής του σε ταμιευτήρες πετρελαίου, συνήθως κάτω από υπερκρίσιμες συνθήκες για να μπορεί να εξασφαλιστεί ο έλεγχος της πυκνότητας, η μείωση του ιξώδους αλλά και να αποφευχθεί η δημιουργία διφασικού ρευστού. Έχει διττή σημασία καθώς λειτουργεί τόσο ως ένα μέσο πίεσης (pressuring agent) όσο και διάλυσης στο «βαρύ» πετρέλαιο, μειώνοντας δραματικά το ιξώδες του. Η μείωση αυτή έχει ως αποτέλεσμα να «ενεργοποιήσει» τη ροή του πετρελαίου προς τις παραγωγικές γεωτρήσεις.

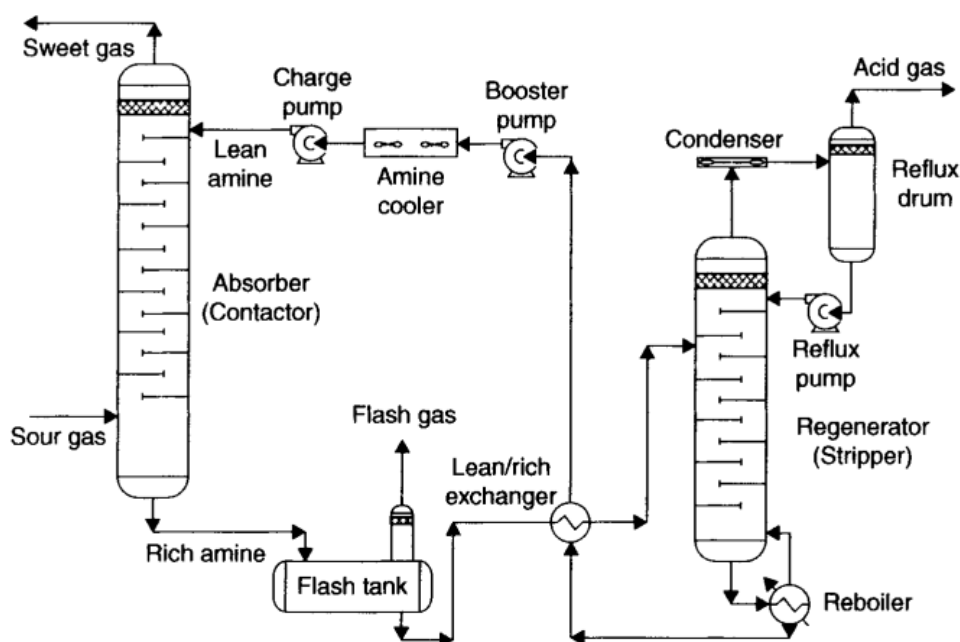
1.2 Συμβατική Διαχείριση του όξινου αερίου

Η πιο συνήθης διαδικασία για την διαχείριση του όξινου αερίου είναι η απομάκρυνσή του από το διαχωριζόμενο από το πετρέλαιο «ξινό» φυσικό αέριο (μείγμα αέριων υδρογονανθράκων και όξινων συστατικών), με τη χρήση αλκανολαμινών και η μετατροπή του σε στοιχειακό θείο από τις μονάδες Claus. Οι μονάδες αυτές περιλαμβάνουν ένα συνδυασμό τεχνικών απορρόφησης και αντίδρασης για την απομάκρυνση του H₂S και άλλων όξινων συστατικών, οι οποίες έχουν ως ακολούθως:

1. Προ επεξεργασία του «ξινού» αερίου: Πριν εισέλθει στη μονάδα απορρόφησης, το ρεύμα «ξινού» αερίου υποβάλλεται σε προ επεξεργασία για την απομάκρυνση τυχόν ρύπων ή σωματιδίων που θα μπορούσαν να επηρεάσουν τη διαδικασία απορρόφησης.
2. Απορρόφηση με αλκανολαμίνες: Το ρεύμα αερίου έρχεται σε επαφή με διάλυμα αλκανολαμινών σε πύργο απορρόφησης. Τα όξινα συστατικά (H₂S και CO₂) στο ρεύμα αερίου αντιδρούν με τις αλκανολαμίνες σχηματίζοντας σταθερά άλατα ή σύμπλοκα, τα οποία είναι διαλυτά στην υγρή φάση του διαλύματος.
3. Εκρόφηση: Το εμπλουτισμένο διάλυμα αλκανολαμίνης, που περιέχει πλέον απορροφημένα όξινα συστατικά, αντλείται στη συνέχεια σε μονάδα ανάκτησης, στην οποία εφαρμόζεται θερμότητα στο διάλυμα προκαλώντας την εκρόφηση (απελευθέρωση) των όξινων συστατικών από αυτό, και την επιστροφή τους στην αέρια κατάσταση.

4. Μονάδα Claus: Τα όξινα αέρια που εκροφώνται, κυρίως H_2S , υποβάλλονται στη συνέχεια σε επεξεργασία μέσω της μονάδας Claus, η οποία αποτελείται από δύο κύρια στάδια: θερμική διάσπαση και καταλυτική μετατροπή. Στο στάδιο της θερμικής αποσύνθεσης το H_2S θερμαίνεται σε υψηλές θερμοκρασίες (850-950°C), παρουσία περίσσειας αέρα ή οξυγόνου, προκαλώντας τη διάσπαση του H_2S σε στοιχειακό θείο (S) και νερό (H_2O). Στη συνέχεια, το διοξείδιο του θείου (SO_2) που προέκυψε από τη θερμική αποσύνθεση περνάει από μια βάση καταλύτη, όπου αντιδρά με πρόσθετο H_2S για να σχηματίσει θείο (Καταλυτική μετατροπή).
5. Ανάκτηση θείου: Το στοιχειακό θείο που παράγεται στη μονάδα Claus ανακτάται και συνήθως μετατρέπεται σε εμπορεύσιμο προϊόν. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει περαιτέρω επεξεργασία για τον καθαρισμό του θείου και την απομάκρυνση τυχόν προσμίξεων.

Συνδυάζοντας αποτελεσματικά την απορρόφηση της αλκανολαμίνης με τη μονάδα Claus, οι φορείς εκμετάλλευσης μπορούν να απομακρύνουν αποτελεσματικά τα όξινα αέρια από ρεύματα «ξινών» αερίων, ανακτώντας παράλληλα στοιχειακό θείο ως παραπροϊόν. Η διαδικασία γλύκανσης του «ξινού αερίου» με αλκανολαμίνες παρουσιάζεται σχηματικά παρακάτω στην Εικόνα 1.



Εικόνα 1. Απλοποιημένο σχηματικό διάγραμμα διαδικασίας γλύκανσης του φυσικού αερίου με αλκανολαμίνες (Subhasish, 2015)

Εξαιτίας της μειωμένης παγκόσμιας ζήτησης σε στοιχειακό θείο, η ανάκτησή του από το όξινο αέριο έχει γίνει αρκετά δυσμενής οικονομικά. Ταυτόχρονα, οι κανονισμοί και τα πρότυπα για τις εκπομπές γίνονται όλο και πιο αυστηρά, αυξάνοντας τα κόστη των πετρελαϊκών εταιρειών που παράγουν αναπόφευκτα στοιχειακό θείο. Όλα αυτά οδήγησαν τις εταιρείες να αναζητήσουν λύσεις πιο φιλικές προς το περιβάλλον, καθώς και πιο προσιτές οικονομικά, για να αντιμετωπίσουν το πρόβλημα αυτό. (Carroll, Acid Gas Injection and Carbon Dioxide Sequestration, 17 May 2010)

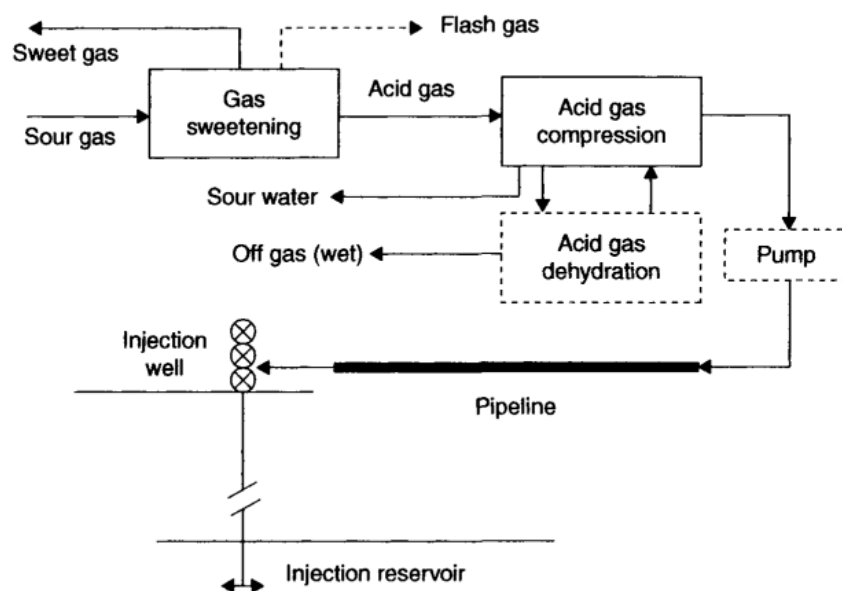
1.3 Επανεισπίεση όξινου αερίου εντός του ταμιευτήρα

Η επανεισπίεση του όξινου αερίου εντός του ταμιευτήρα για την επαύξηση της ανάκτησης πετρελαίου, καθώς και για τη συμμόρφωση με τους περιβαλλοντικούς κανονισμούς, αποτελεί μια σχετικά πρόσφατη τεχνολογική εξέλιξη η οποία εφαρμόστηκε πρώτα στη Βόρεια Αμερική και σταδιακά κερδίζει έδαφος διεθνώς. Αποτελεί εξέλιξη της ώριμης μεθόδου CO₂-EOR (Enhanced Oil Recovery), η οποία έχει εφαρμοστεί με επιτυχία σε έργα μεγάλης κλίμακας τόσο σε συμβατικούς ταμιευτήρες πετρελαίου, όσο και σε ταμιευτήρες φυσικού αερίου.

Το πρώτο πρόγραμμα εισπίεσης πραγματοποιήθηκε το 1989 από την Chevron, στο Acheson του Καναδά. Μετά από αυτό ακολούθησαν άλλα 17 προγράμματα για τα επόμενα επτά χρόνια. Τα προγράμματα αυτά συλλογικά κατάφεραν να εισπιάσουν κάτι λιγότερο από 5 MMSCFD όξινου αερίου και αποτέλεσαν την πρώτη γενιά εισπίεσης. Κατά τη διάρκεια της πραγματοποίησης αυτών των προγραμμάτων, αποκτήθηκαν καινούριες γνώσεις και εμπειρίες οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν σε μελλοντικά προγράμματα.

Αργότερα, έλαβαν χώρα μεγαλύτερα προγράμματα, όπως αυτά στην περιοχή Sleipner West στην Βόρεια Θάλασσα, και στην περιοχή LaBarge στο Wyoming, όπου εισπιάστηκαν περίπου 50 MMSCFD και 65 MMSCFD όξινου αερίου αντίστοιχα. Τα παραδείγματα αυτά αποτελούν τα μεγαλύτερα προγράμματα εισπίεσης, τα οποία βρίσκονται σε λειτουργία και, παρόλο που εισπιάζουν μια αρκετά μεγάλη ποσότητα όξινου αερίου, έχουν αρκετά κοινά με τα αρχικά προγράμματα. (Carroll, Acid Gas Injection and Carbon Dioxide Sequestration, 17 May 2010)

Στην Εικόνα 2 παρουσιάζεται η σχηματική απεικόνιση μιας βασικής διαδικασίας επανεισπίεσης όξινου αερίου. Τα τέσσερα βασικά συστήματα της διαδικασίας αυτής αποτελούν ο συμπιεστής, ο αγωγός, η γεώτρηση εισπίεσης και ο ταμιευτήρας.



Εικόνα 2. Σχηματική απεικόνιση συστήματος εισπίεσης του όξινου αερίου (Wu & Carroll, *Acid Gas Injection and Related Technologies*, 7 March 2011)

Ο σχεδιασμός του συστήματος εισπίεσης αρχίζει από τον κατάλληλο σχεδιασμό των επιφανειακών εγκαταστάσεων. Αρχικά, το όξινο πετρέλαιο που παράγεται μεταφέρεται σε μία πρώτη μονάδα διαχωρισμού (συνήθως πάνω στην εξέδρα), η οποία είναι σχεδιασμένη να διαχωρίζει την ακατέργαστη πολυφασική ροή (πετρέλαιο, αέριο, νερό) που παράγεται από τις γεωτρήσεις. Έπειτα, το αρχικό διαχωριζόμενο πετρέλαιο διέρχεται από μία δεύτερη μονάδα διαχωρισμού (συνήθως κοντά στην κεντρική μονάδα επεξεργασίας), με στόχο την περαιτέρω βελτίωση της διαδικασίας διαχωρισμού και την ενίσχυση της καθαρότητας των εξαγόμενων φάσεων: πετρέλαιο, αέριο και νερό. Αυτό το στάδιο είναι απαραίτητο επειδή ο αρχικός διαχωρισμός τυπικά δεν επιτυγχάνει τα επίπεδα καθαρότητας που απαιτούνται για την πώληση ή για την εκπλήρωση των απαραίτητων προδιαγραφών. Κάποιες φορές μπορεί να ακολουθήσει και μια τρίτη φάση διαχωρισμού, ειδικά όταν οι προδιαγραφές του προϊόντος απαιτούν πολύ χαμηλές αναλογίες αερίου-πετρελαίου (GOR) ή όταν το παραγόμενο νερό πρέπει να είναι σχεδόν απαλλαγμένο από υδρογονάνθρακες και όξινα συστατικά. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η τρίτη φάση μπορεί να περιλαμβάνει εξοπλισμό ειδικά σχεδιασμένο για να χειρίζεται την απομάκρυνση του όξινου αερίου (π.χ., "stripper" ή "stabilizer"), που όχι μόνο αφαιρεί τα τελευταία ίχνη ελαφρών υδρογονανθράκων από το υγρό ρεύμα,

αλλά και απομακρύνει πλήρως τα όξινα συστατικά από αυτό. Το αέριο που παράγεται από όλες τις φάσεις διαχωρισμού περιέχει όλα τα όξινα συστατικά, τα οποία προδίδουν στο διαχωριζόμενο αέριο την ονομασία «ξινό» (sour gas).

Μετά το πέρας της διαδικασίας του διαχωρισμού, το «ξινό» αυτό αέριο οδηγείται μέσω αγωγού στην μονάδα γλύκανσης μέσω αλκανολαμινών, όπου και πραγματοποιείται η γλύκανσή του. Ως αποτέλεσμα, το διαχωριζόμενο πλέον «γλυκό» αέριο (sweet gas) οδηγείται είτε προς κατανάλωση για τις ενεργειακές ανάγκες της εταιρίας, είτε προς πώληση, και το παραγόμενο από τις αμίνες όξινο αέριο (acid gas) οδηγείται μέσω αγωγού προς κατάλληλα διαμορφωμένους συμπιεστές (συνήθως τεσσάρων ή πέντε σταδίων) με σκοπό την μεταφορά και εισπίεσή του μέσα στον ταμιευτήρα.

Όταν το όξινο αέριο απελευθερώνεται από το διάλυμα αμίνης κατά τη διαδικασία ανάκτησης, συχνά περιέχει ποσότητα υδρατμών νερού. Αυτή η παρουσία νερού είναι προβληματική, καθώς μπορεί να οδηγήσει σε διάβρωση του εξοπλισμού σαν αποτέλεσμα τις αντιδράσεις του με τα όξινα αέρια, καθώς και στη δημιουργία υδριτών στις γραμμές μεταφοράς και στην κεφαλή της γεώτρησης. Σε αρκετά συστήματα εισπίεσης, η διαδικασία συμπίεσης από μόνης της είναι επαρκής για την αφύγρανση του όξινου αερίου λόγω εναλλαγών της θερμοκρασίας ανάμεσα στα στάδια συμπίεσης που έχουν ως αποτέλεσμα τη συμπύκνωση και απομάκρυνση του νερού από το ρεύμα του αερίου. Στην περίπτωση που το σύστημα συμπίεσης δεν επαρκεί από μόνο του για την επιτυχή απομάκρυνση του νερού, χρησιμοποιούνται μονάδες αφύγρανσης, όπως η τριαιθυλενογλυκόλη (TEG) ή τα μοριακά κόσκινα (molecular sieves). Οι μονάδες αυτές εγκαθίστανται πριν το τελικό στάδιο της συμπίεσης. (Carmody, 2000)

Στη συνέχεια, έπειτα από τους συμπιεστές, το όξινο αέριο μεταφέρεται μέσω ενός αγωγού στην κεφαλή της γεώτρησης εισπίεσης. Ο σχεδιασμός του αγωγού ακολουθεί κάποιες συγκεκριμένες προδιαγραφές. Ο αγωγός θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο μικρός σε μήκος για τον επιτυχή έλεγχο μίας πιθανής διαρροής του H_2S , και η διάμετρος και το πάχος του τοιχώματός του σχεδιάζονται με βάση τους απαιτούμενους ρυθμούς ροής και τις πιέσεις λειτουργίας. Οι αγωγοί για τη μεταφορά του όξινου αερίου συνήθως κατασκευάζονται από ανθεκτικά στη διάβρωση υλικά, όπως ο ανοξείδωτος χάλυβας, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η αντοχή τους στη διαβρωτική φύση του H_2S και του CO_2 . Συχνά οι αγωγοί αυτοί επικαλύπτονται με ειδικές επιστρώσεις σαν ένα επιπλέον μέτρο ασφαλείας ενάντια στη διάβρωση, που συχνά προκαλείται από

την έκθεση του αγωγού στην υγρασία του περιβάλλοντος και τις χημικές ουσίες που υπάρχουν σε αυτό. Τέλος, οι αγωγοί συχνά θάβονται στο έδαφος με σκοπό την προστασία τους από περιβαλλοντικές και φυσικές ζημιές, τη συμμόρφωση με περιβαλλοντικούς κανονισμούς και την εξασφάλιση της σταθερότητας της θερμοκρασίας μεταφοράς του όξινου αερίου για την αποφυγή σχηματισμού υδριτών (Carroll & Maddocks, Design Considerations of Acid Gas Injection, 1999).

Εάν η πίεση και η θερμοκρασία στον αγωγό πέσουν αρκετά κατά τη μεταφορά του όξινου αερίου προς την κεφαλή της γεώτρησης, η εισπίεσή του μπορεί να καταστεί δύσκολη λόγω της πιθανότητας σχηματισμού υδριτών στην κεφαλή της γεώτρησης (λόγω των πολλών και πολύπλοκων στενώσεων που περιέχει) ή της ανεπαρκούς πίεσης. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η χρήση αντλίας θα μπορούσε να είναι μια λύση. Συγκεκριμένα, μια αντλία υψηλής πίεσης μπορεί να εγκατασταθεί ως πρόσθετο στάδιο πριν από την κεφαλή της γεώτρησης εισπίεσης για την ενίσχυση της πίεσης του αερίου, και, επομένως, την αύξηση της θερμοκρασίας του.

Από την κεφαλή της γεώτρησης εισπίεσης και μέσω της σωλήνωσης (tubing), το όξινο αέριο εισπνέζεται μέχρι τον πυθμένα της γεώτρησης και στη συνέχεια μέσα στον ταμιευτήρα, όπου και πραγματοποιείται η ανάμειξη του με το υπάρχον πετρελαϊκό ρευστό.

Συμπερασματικά, το σύστημα επανεισπίεσης του όξινου αερίου ακολουθεί τα εξής στάδια:

1. Έξοδος από την παραγωγική γεώτρηση (παραγωγή όξινου πετρελαίου)
2. Μεταφορά μέσω αγωγού στις μονάδες διαχωρισμού
3. Μεταφορά του διαχωριζόμενου «ξινού» αερίου (sour gas) προς την μονάδα γλύκανσης με αλκανολαμίνες
4. Μεταφορά του διαχωριζόμενου από τις αμίνες όξινου αερίου (acid gas) προς την μονάδα συμπίεσης
5. Μεταφορά του όξινου αερίου μέσω αγωγού μέχρι την κεφαλή της γεώτρησης εισπίεσης
6. Εισπίεση του όξινου αερίου μέσα στη γεώτρησης εισπίεσης, και, επομένως, μέσα στον ταμιευτήρα.

2. Θερμοδυναμικές ιδιότητες

2.1 Εισαγωγή

Για την αποτελεσματική διαχείριση του όξινου αερίου, είναι αναγκαία η κατανόηση της θερμοδυναμικής συμπεριφοράς του, καθώς και των επιμέρους συστατικών του (H_2S και CO_2), κατά τη διαδικασία εισπίεσης μέσα στη γεώτρηση υπό διάφορες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας. Αξίζει να σημειωθεί ότι για την περίπτωση του CO_2 υπάρχει εκτενής βιβλιογραφία όσον αφορά τη θερμοδυναμική συμπεριφορά του σε ένα μεγάλο εύρος συνθηκών, ενώ στην περίπτωση του H_2S η βιβλιογραφία είναι πιο περιορισμένη εξαιτίας του δύσκολου πειραματικού χειρισμού του λόγω της τοξικότητάς του.

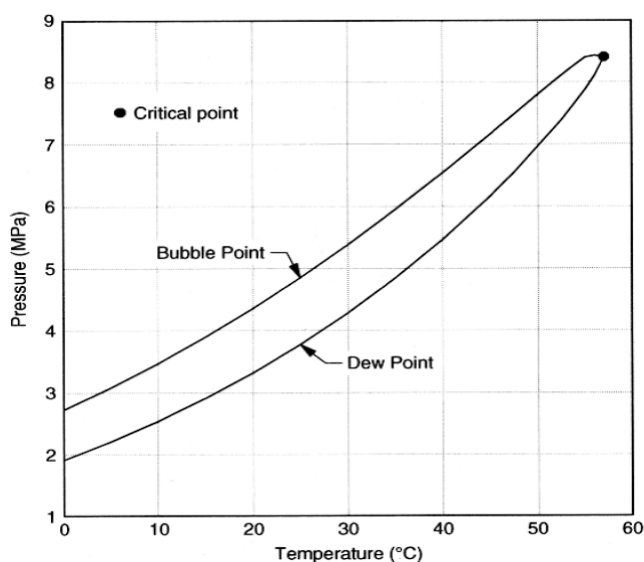
Τα διαγράμματα φάσεων, επίσης γνωστά ως διαγράμματα πίεσης-θερμοκρασίας, είναι θεμελιώδη εργαλεία για την κατανόηση της θερμοδυναμικής συμπεριφοράς διάφορων συστατικών αλλά και μειγμάτων. Στην περίπτωση των καθαρών συστατικών, αυτά τα διαγράμματα αποτελούνται συνήθως από μια ευθεία γραμμή που αντιπροσωπεύει τα σημεία όπου συμπίπτουν δύο φάσεις (υγρή και αέρια). Ωστόσο, σε μείγματα που περιέχουν δύο ή περισσότερα συστατικά, το διάγραμμα εμφανίζει μια ξεχωριστή περιοχή όπου συνυπάρχουν και οι δύο φάσεις, γνωστή ως διφασική περιοχή.

Στα διαγράμματα φάσεων, το σημείο των συνθηκών πίεσης και θερμοκρασίας όπου αρχίζει να σχηματίζεται υγρό λόγω συμπύκνωσης του αερίου ονομάζεται σημείο δρόσου (dew point), και, αντίστοιχα, το σημείο όπου αρχίζει να σχηματίζεται ατμός μέσω της εξάτμισης του υγρού ονομάζεται σημείο φυσαλίδας (bubble point). Ο γεωμετρικός τόπος όλων των σημείων δρόσου, είναι μια καμπύλη (καμπύλη σημείων δρόσου) η οποία υποδεικνύει την πίεση και την θερμοκρασία στην οποία ένα αέριο μείγμα αρχίζει να υγροποιείται. Αντιστοίχως, ο γεωμετρικός τόπος όλων των σημείων φυσαλίδας, είναι μια καμπύλη που ονομάζεται καμπύλη σημείων φυσαλίδας. Επομένως, ο φάκελος φάσεων είναι ο συνδυασμός της καμπύλης δρόσου και της καμπύλης φυσαλίδας, όπου το σημείο τομής τους αποτελεί το κρίσιμο σημείο του μείγματος.

Το κρίσιμο σημείο αναφέρεται στο σημείο της καμπύλης ισορροπίας φάσης όπου οι ιδιότητες της αέριας και της υγρής φάσης ενός συστατικού ή ενός μείγματος γίνονται πανομοιότυπες και σχηματίζουν μια ενιαία φάση γνωστή ως υπερκρίσιμο ρευστό. Αυτό σημαίνει ότι σε θερμοκρασίες και πιέσεις πάνω από το κρίσιμο σημείο (κρίσιμη πίεση

και θερμοκρασία), η διάκριση μεταξύ υγρών και αέριων φάσεων παύει να υφίσταται. Αυτό συμβαίνει διότι σε υψηλές θερμοκρασίες (άνω του κρίσιμου σημείου), η κινητική ενέργεια των μορίων είναι τόσο μεγάλη που υπερβαίνει τις μεταξύ τους δυνάμεις που θα οδηγούσαν σε συμπίκνωση του ρευστού σε υγρή φάση. Από την άλλη πλευρά, σε υψηλές πιέσεις (άνω του κρίσιμου σημείου), οι οποίες υπερβαίνουν την κρίσιμη πίεση, το ρευστό δεν μπορεί να παραμείνει σε καθαρή αέρια κατάσταση. Έτσι προκύπτει μια περιοχή στο διάγραμμα πίεσης και θερμοκρασίας (υπερκρίσιμη περιοχή), όπου επιτυγχάνεται μια ισορροπία μεταξύ των δύο φάσεων και το ρευστό βρίσκεται σε κατάσταση μεταξύ αερίου και υγρού (υπερκρίσιμη κατάσταση).

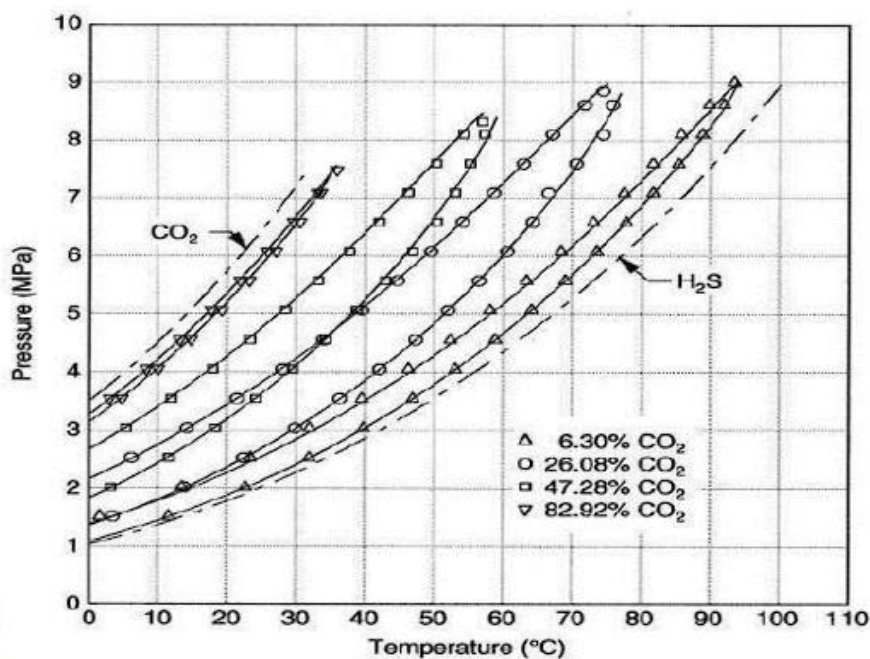
Στην Εικόνα 3 παρουσιάζεται ένας φάκελος φάσεων ενός μείγματος όξινου αερίου με σύσταση 50 % H₂S και 50 % CO₂, όπου κάθε σημείο εντός αυτού του φάκελου, δηλαδή μεταξύ των καμπυλών φυσαλίδας και δρόσου, αντιστοιχεί σε σημείο δύο φάσεων. Αν οι συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας του ρευστού βρίσκονται πάνω από την καμπύλη των σημείων φυσαλίδας, τότε το ρευστό είναι σε υγρή φάση. Αν οι συνθήκες αντιστοιχούν σε σημείο κάτω από την καμπύλη των σημείων δρόσου, το ρευστό βρίσκεται σε αέρια φάση. Επιπλέον, το κρίσιμο σημείο εμφανίζεται στην περιοχή πάνω και δεξιά του διαγράμματος, στην οποία το ρευστό βρίσκεται σε υπερκρίσιμη κατάσταση.



Εικόνα 3. Φάκελος φάσεων για μείγμα όξινου αερίου σύστασης 50 % H₂S / 50 % CO₂ (Carroll, Acid Gas Injection and Carbon Dioxide Sequestration, 17 May 2010)

Επιπλέον, θα πρέπει να σημειωθεί ότι για διαφορετικές τιμές της σύστασης προκύπτουν και διαφορετικοί φάκελοι φάσεων. Η επίδραση της σύστασης στις θερμοδυναμικές

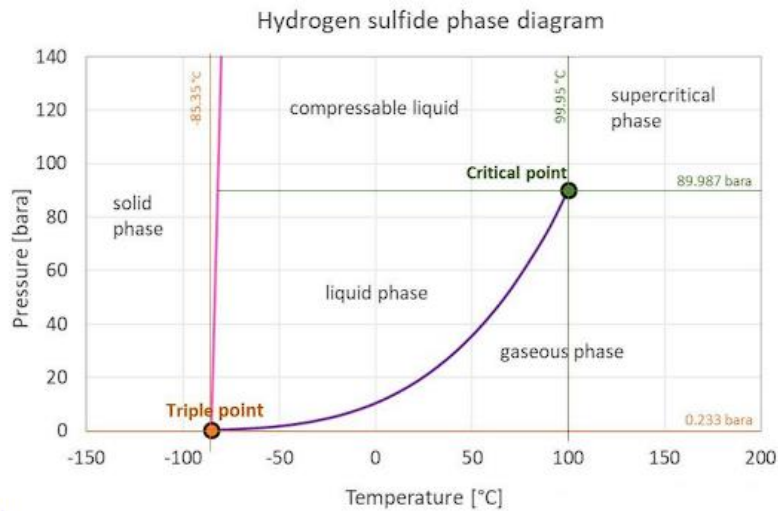
ιδιότητες του ρευστού φαίνεται στην Εικόνα 4, όπου απεικονίζονται φάκελοι φάσεων όξινου αερίου διαφορετικών συστάσεων.



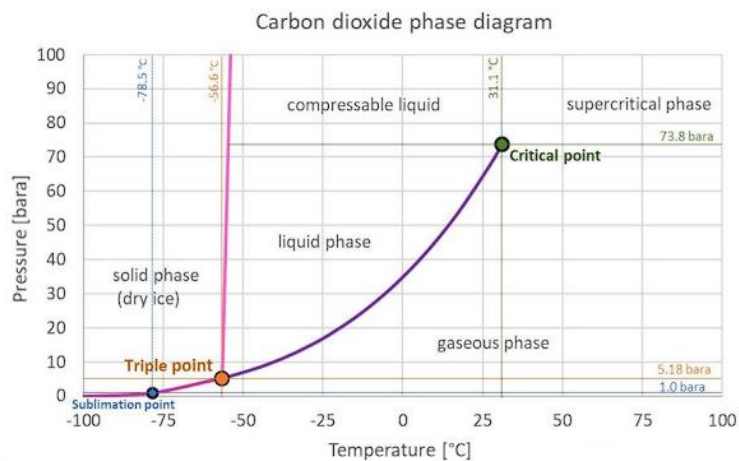
Εικόνα 4. Φάκελοι φάσεων για μείγματα CO₂ και H₂S διαφορετικών συστάσεων

2.2 Θερμοδυναμικές ιδιότητες των H₂S και CO₂

Στις παρακάτω Εικόνες 5 και 6 διακρίνονται οι φάκελοι φάσεων των καθαρών ενώσεων H₂S και CO₂ αντίστοιχα, με την γραφική περιγραφή της αέριας, υγρής και στερεής φάσης τους. Παρουσιάζεται επίσης το κρίσιμο σημείο των δύο συστατικών, όπου για το H₂S είναι σε συνθήκες θερμοκρασίας 99.9°C και πίεσης 89.9 bara, ενώ για το CO₂ βρίσκεται σε συνθήκες θερμοκρασίας 31.1°C και πίεσης 73.8 bara. Πάνω από τα κρίσιμα σημεία βρίσκεται η υπερκρίσιμη περιοχή.



Εικόνα 5. Φάκελος Φάσεων για καθαρό H_2S (EngineeringToolBox, n.d.)



Εικόνα 6. Φάκελος Φάσεων για καθαρό CO_2 (EngineeringToolBox, χ.χ.)

Το ρευστό παρουσιάζει τρεις φάσεις: αέρια, υγρή και υπερκρίσιμη (ή πυκνή) φάση. Η αέρια φάση χαρακτηρίζεται από υψηλή συμπιεστότητα, που σημαίνει ότι οι μεταβολές της πίεσης ή της θερμοκρασίας επηρεάζουν σημαντικά την πυκνότητα του ρευστού. Αντίθετα, η υγρή φάση είναι συγκριτικά ασυμπίεστη, με την πυκνότητά της να παραμένει σχετικά ανεπηρέαστη από την πίεση και από τις αλλαγές θερμοκρασίας. Καθώς προσεγγίζεται το κρίσιμο σημείο, η διάκριση μεταξύ υγρών και αέριων φάσεων μειώνεται: η πυκνότητα του υγρού μειώνεται, ενώ η πυκνότητα του αερίου αυξάνεται, μέχρι να γίνουν ίσες στο κρίσιμο σημείο. Πέρα από αυτό το σημείο, το ρευστό υπάρχει

ως υπερκρίσιμο - μια φάση που διατηρεί τα χαρακτηριστικά υψηλής πυκνότητας ενός υγρού, παράλληλα με τη σημαντική συμπίεστικότητα που σχετίζεται με μια αέρια φάση.

Στους παρακάτω Πίνακες 1 και 2, παρατίθενται οι ιδιότητες των καθαρών συστατικών CO₂ και H₂S, σε κορεσμένη υγρή και κορεσμένη αέρια φάση, δηλαδή όταν οι δύο φάσεις συνυπάρχουν σε ισορροπία. Οι Πίνακες αυτοί είναι χρήσιμοι για την ερμηνεία και αξιολόγηση των τιμών των θερμοδυναμικών ιδιοτήτων του ρευστού (πυκνότητα, ιξώδες κ.α.) που υπολογίζονται σε επόμενο κεφάλαιο με την βοήθεια του λογισμικού PROSPER.

Πίνακας 1. Θερμοδυναμικές ιδιότητες κορεσμένου υγρού CO₂ (Carroll, Acid Gas Injection and Carbon Dioxide Sequestration, 17 May 2010)

Θερμοκρασία (°C)	Πίεση Ατμού (MPa)	Πυκνότητα (kg/m ³)	Θερμοχωρητικότητα (kJ/kg*K)	Ιξώδες (cp)	Θερμική Αγωγιμότητα (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. Θερμοδυναμικές ιδιότητες κορεσμένου ατμού CO₂ (Carroll, Acid Gas Injection and Carbon Dioxide Sequestration, 17 May 2010)

Θερμοκρασία (°C)	Πίεση Ατμού (MPa)	Πυκνότητα (kg/m ³)	Θερμοχωρητικότητα (kJ/kg*K)	Ιξώδες (cp)	Θερμική Αγωγιμότητα (W/m*K)
-10	2.649	71.3	1.55	149	0.0177
-5	3.046	83.5	1.71	152	2.0188
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

Όπως προαναφέρθηκε, τα δεδομένα που υπάρχουν για το H₂S είναι σημαντικά λιγότερα σε σχέση με αυτά του CO₂, εξαιτίας της υψηλής τοξικότητάς του. Το 1983 ο Goodwin προσπάθησε, μέσω μίας αναπτυγμένης καταστατικής εξίσωσης, να καταγράψει σε έναν πίνακα ορισμένες ιδιότητες του H₂S σε ένα εύρος πιέσεων και θερμοκρασιών. Οι ιδιότητες αυτές εκτιμήθηκαν από τους Neuberg et al το 1977. (Carroll, Acid Gas Injection and Carbon Dioxide Sequestration, 17 May 2010)

Στους παρακάτω Πίνακες 3 και 4 παρουσιάζονται οι θερμοδυναμικές ιδιότητες του κορεσμένου υγρού και κορεσμένου ατμού H₂S.

Πίνακας 3. Ιδιότητες κορεσμένου υγρού H₂S (Carroll, Acid Gas Injection and Carbon Dioxide Sequestration, 17 May 2010)

Θερμοκρασία (°C)	Πίεση Ατμού (MPa)	Πυκνότητα (kg/m ³)	Θερμοχωρητικότητα (kJ/kg*K)	Ιξώδες (cp)	Θερμική Αγωγιμότητα (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 4. Ιδιότητες κορεσμένου αέριου H₂S (Carroll, Acid Gas Injection and Carbon Dioxide Sequestration, 17 May 2010)

Θερμοκρασία (°C)	Πίεση Ατμού (MPa)	Πυκνότητα (kg/m ³)	Θερμοχωρητικότητα (kJ/kg*K)	Ιξώδες (cp)	Θερμική Αγωγιμότητα (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

2.4 Εκτίμηση ιξώδους μέσω εμπειρικών συσχετίσεων

Το ιξώδες είναι μια κρίσιμη φυσική ιδιότητα που επηρεάζει τη ροή των ρευστών μέσα σε πορώδη μέσα και σωλήνες. Ορίζεται ως η εσωτερική αντίσταση του ρευστού στη ροή και είναι κρίσιμο για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς των ρευστών σε διάφορες συνθήκες.

Υπάρχουν πολλές συσχετίσεις που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του ιξώδους σε πετρελαϊκά ρευστά. Κατά κανόνα, οι συσχετίσεις που βασίζονται στη σύσταση των ρευστών είναι πιο κατάλληλες για μη υδρογονάνθρακες, όπως το όξινο αέριο.

Ο υπολογισμός του ιξώδους είναι ουσιαστικός για τον σχεδιασμό και την αξιολόγηση διαφόρων διαδικασιών, όπως η εισπίεση και η ανάμειξη, και οι κατάλληλες συσχετίσεις μπορούν να παράσχουν ακριβείς εκτιμήσεις του ιξώδους για το όξινο αέριο.

Η συσχέτιση ιξώδους που θα αναλυθεί είναι αυτή των Lohrenz – Bray – Clark, εφόσον είναι αυτή που χρησιμοποιήθηκε στις προσομοιώσεις του λογισμικού PROSPER, η οποία δίνεται από την εξής σχέση:

$$[(n - n^*) \cdot \xi + 10^{-4}]^{1/4} = \alpha_1 + \alpha_2 \rho_r + \alpha_3 \rho_r^2 + \alpha_4 \rho_r^3 + \alpha_5 \rho_r^4 \quad (2.1)$$

όπου $\alpha_1 = 0.10230$, $\alpha_2 = 0.023364$, $\alpha_3 = 0.0583$, $\alpha_4 = -0.040758$ και $\alpha_5 = 0.0093324$. Η παράμετρος n^* είναι το ιξώδες του μείγματος αερίου σε χαμηλή πίεση και προσδιορίζεται με τη μέθοδο που πρότειναν οι Herning και Zippener:

$$n^* = \frac{\sum_{i=1}^N z_i n_i^* MW_i^{1/2}}{\sum_{i=1}^N z_i MW_i^{1/2}} \quad (2.2)$$

όπου

$$n_i^* = 34 \times 10^{-5} \frac{1}{\xi_i} T_{ri}^{0.94} \quad \text{για } T_{ri}^{0.94} < 1.5 \quad (2.3)$$

και

$$n_i^* = 17.78 \times 10^{-5} \frac{1}{\xi_i} (4.58 T_{ri} - 1.67)^{5/8} \quad \text{για } T_{ri}^{0.94} > 1.5 \quad (2.4)$$

Η παράμετρος ξ είναι η παράμετρος μείωσης του ιξώδους του ρευστού και υπολογίζεται ως εξής:

$$\xi = \left[\sum_{i=1}^N z_{i=1} T_{ci} \right]^{1/6} \left[\sum_{i=1}^N z_i MW_i \right]^{-1/2} \left[\sum_{i=1}^N z_i P_{ci} \right]^{-2/3} \quad (2.5)$$

Στην Εξίσωση 2.1 το ρ_r είναι η πυκνότητα του μείγματος διαιρεμένη με την κρίσιμη πυκνότητα του:

$$\rho_r = \frac{\rho}{\rho_c} \quad (2.6)$$

Η διαφοροποίηση που εισήγαγαν οι Lohrenz et al ήταν στον υπολογισμό της κρίσιμης πυκνότητας. Η μεταβλητή αυτή αναδιατυπώθηκε ως προς τους κρίσιμους όγκους των συστατικών του μείγματος ως εξής:

$$\rho_c = \frac{1}{V_c} = \left(\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq c^{7+}}}^N (z_i V_{ci}) + z_{c^{7+}} V_{c^{7+}} \right)^{-1} \quad (2.7)$$

3. Καταστατικές εξισώσεις (Equations Of State)

3.1 Εισαγωγή

Στην περίπτωση της εισπίεσης όξινου αερίου που μελετάται στην παρούσα εργασία, το ρευστό αποτελείται από ένα μείγμα H_2S και CO_2 , των οποίων η σύνθεση επηρεάζει σημαντικά τις θερμοδυναμικές ιδιότητες και τη συμπεριφορά του ρευστού. Η προσομοίωση της συμπεριφοράς του ρευστού επιτυγχάνεται με τη χρήση καταστατικών εξισώσεων (Equations of State, EOS), οι οποίες αποτελούν σημαντικά εργαλεία των διαθέσιμων λογισμικών της πετρελαϊκής βιομηχανία, όταν αυτά πρέπει να προβλέψουν τη συμπεριφορά ενός ρευστού μέσα στον ταμιευτήρα, καθώς και στις γεωτρήσεις, είτε παραγωγής είτε εισπίεσης.

Κατά την εισπίεση όξινου αερίου, η χρήση καταστατικών εξισώσεων αποσκοπεί στη θερμοδυναμική αναπαράσταση της συμπεριφοράς του ρευστού, αναπαράγοντας το φάκελο φάσεων του και καθορίζοντας την υπερκρίσιμη περιοχή του, δηλαδή το εύρος πιέσεων και θερμοκρασιών που απαιτούνται για να βρεθεί το ρευστό σε υπερκρίσιμη κατάσταση. Επιπλέον, προσδιορίζουν την πυκνότητα του ρευστού, η οποία είναι σημαντική παράμετρος για τη ροή του εφόσον επηρεάζει τη διαφορά πίεσης κατά μήκος μίας γεώτρησης εισπίεσης

Μια EOS είναι μια αναλυτική έκφραση που συσχετίζει την πίεση P με την θερμοκρασία T και τον όγκο V . Η σωστή περιγραφή μίας PVT συσχέτισης για πραγματικά ρευστά υδρογονανθράκων είναι σημαντική για τον προσδιορισμό της ογκομετρικής συμπεριφοράς αλλά και της συμπεριφοράς φάσεων των πετρελαϊκών ρευστών του ταμιευτήρα. Οι περισσότερες EOS απαιτούν μόνο τις κρίσιμες ιδιότητες και τον ακκεντρικό παράγοντα των συστατικών (Gaganis, 2020). Το κύριο πλεονέκτημά τους είναι ότι η ίδια εξίσωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την μοντελοποίηση της συμπεριφοράς όλων των φάσεων. Το πιο γνωστό και πιο απλό παράδειγμα μιας EOS είναι αυτό της καταστατικής εξίσωσης ιδανικών αερίων, η οποία εκφράζεται μαθηματικά ως εξής:

$$P = \frac{RT}{V_m} \quad (3.1)$$

όπου P και T η πίεση και θερμοκρασία του συστήματος αντίστοιχα, V_m ο όγκος του αερίου σε ft^3 για 1 mole αερίου (γραμμομοριακός όγκος) και R η παγκόσμια σταθερά

των αερίων. Η τιμή της σταθεράς R εξαρτάται από το σύστημα μονάδων που χρησιμοποιείται.

Σε πολύ χαμηλές πιέσεις κοντά στην ατμοσφαιρική και θερμοκρασίες κοντά σε αυτή του περιβάλλοντος, η παραπάνω καταστατική των ιδανικών αερίων ισχύει ακόμα και για μείγματα υδρογονανθράκων τα οποία, αν και απέχουν από τον χαρακτηρισμό των ιδανικών αερίων, συμπεριφέρονται σαν ιδανικά κάτω από τις προαναφερθείσες συνθήκες.

Ο περιορισμός της δυνατότητας εφαρμογής της παραπάνω εξίσωσης σε διαφορετικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας οδήγησε σε διάφορες προσπάθειες για την ανάπτυξη μια καταστατικής εξίσωσης η οποία να είναι ικανή να περιγράψει την συμπεριφορά των πραγματικών ρευστών σε ένα διευρυμένο πλαίσιο συνθηκών, πέρα από την ατμοσφαιρική.

3.2 Καταστατική εξίσωση Van der Waals

Σε υψηλότερες πιέσεις η καταστατική εξίσωση των ιδανικών αερίων δεν ισχύει. Τα μόρια των αερίων πλησιάζουν πολύ το ένα το άλλο και οι ελκτικές δυνάμεις μεταξύ αυτών αρχίζουν να αναπτύσσονται. Η καταστατική εξίσωση Van der Waals είναι μια εξίσωση που περιγράφει τη συμπεριφορά των πραγματικών αερίων, λαμβάνοντας υπόψη τον όγκο που καταλαμβάνουν τα μόρια του αερίου και τις ελκτικές δυνάμεις μεταξύ τους. Είναι μια βελτίωση του νόμου των ιδανικών αερίων, ο οποίος υποθέτει ότι τα μόρια αερίου δεν έχουν όγκο και δεν ασκούν ελκτικές δυνάμεις το ένα στο άλλο, υποθέσεις που δεν ισχύουν για τα πραγματικά αέρια, ειδικά υπό υψηλές πιέσεις. Η εξίσωση Van der Waals εκφράζεται ως ακολούθως:

$$P = \frac{RT}{V_m - b} - \frac{a}{V^2} \quad (3.2)$$

όπου η παράμετρος a αντιπροσωπεύει ένα μέτρο της έλξης μεταξύ των μορίων ενώ ο όρος b αντιπροσωπεύει τον όγκο που καταλαμβάνουν τα μόρια του αερίου.

3.3 Καταστατική εξίσωση Soave – Redlich – Kwong (SRK EOS)

Η καταστατική εξίσωση Soave-Redlich-Kwong (SRK) είναι μια τροποποίηση της Redlich-Kwong και έχει σχεδιαστεί για να παρέχει ακριβείς προβλέψεις της θερμοδυναμικής συμπεριφοράς (πίεση, όγκος, θερμοκρασία) των αερίων, ιδιαίτερα κοντά στο κρίσιμο σημείο. Είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για συστήματα υδρογονανθράκων και χρησιμοποιείται ευρέως στις βιομηχανίες πετρελαίου και χημικών για το σχεδιασμό και την προσομοίωση διεργασιών. Η καταστατική εξίσωση SRK δίνεται από την εξής σχέση:

$$P = \frac{RT}{V_m - b} - \frac{a\alpha(T)}{V_m(V_m - b)} \quad (3.3)$$

όπου $\alpha(T)$ ένας αδιάστατος συντελεστής διόρθωσης για να ληφθεί υπόψη η εξαρτώμενη από τη θερμοκρασία έλξη μεταξύ των μορίων. Για θερμοκρασίες διαφορετικές από την κρίσιμη θερμοκρασία, ο διορθωτικός παράγοντας $\alpha(T)$ ορίζεται ως εξής:

$$\alpha(T) = [1 + m(1 - \sqrt{T_r})]^2 \quad (3.4)$$

όπου T_r η ανοιγμένη θερμοκρασία. Ο Soave συσχέτισε την παράμετρο m με τον ακκεντρικό παράγοντα κάθε συστατικού ω για να δώσει την παρακάτω εξίσωση:

$$m = 0.480 + 1.574\omega - 0.176\omega^2 \quad (3.5)$$

Για κάθε καθαρό συστατικό, οι παράμετροι a και b υπολογίζονται βάση των παρακάτω σχέσεων:

$$a = \Omega_a \frac{R^2 T_c^2}{P_c} \quad (3.6)$$

$$b = \Omega_b \frac{RT_c}{P_c} \quad (3.7)$$

όπου $\Omega_a = 0.42747$ και $\Omega_b = 0.08664$ είναι οι Soave-Redlich-Kwong (SRK) αδιάστατοι παράμετροι καθαρών ουσιών.

3.4 Καταστατική εξίσωση Peng-Robinson (PR EOS)

Οι Peng-Robinson (1976) έκαναν μια ολοκληρωμένη μελέτη για την αξιολόγηση της καταστατικής εξίσωσης SRK όσον αφορά την πρόβλεψη της συμπεριφοράς διαφόρων συστημάτων υδρογονανθράκων. Ισχυρίστηκαν ότι υπάρχει ανάγκη για βελτίωση της ικανότητας της συγκεκριμένης καταστατικής στο να προβλέπει τις πυκνότητες αλλά και άλλες ιδιότητες των ρευστών, ιδιαίτερα στην κρίσιμη περιοχή (Ahmed, 2007). Το παρακάτω μοντέλο, θεωρήθηκε ως βάση για την δημιουργία ενός βελτιωμένου μοντέλου από τους Peng-Robinson:

$$P = \frac{RT}{V_m - b} - \frac{a\alpha(T)}{(V_m + b)^2 - cb^2} \quad (3.8)$$

όπου a , b και $\alpha(T)$ έχουν την ίδια σημασία όπως στο μοντέλο SRK. Η παράμετρος c είναι ένας αριθμός που βελτιστοποιήθηκε αναλύοντας τις τιμές των όρων Z_c και b/V_c όπως προκύπτουν από την εξίσωση.

Βασιζόμενοι σε αυτή την τιμή για το c , οι Peng-Robinson πρότειναν την παρακάτω καταστατική εξίσωση, γνωστή και ως PR EOS:

$$P = \frac{RT}{V_m - b} - \frac{a\alpha(T)}{V_m(V_m + b) + b(V_m - b)} \quad (3.9)$$

Με αντικατάσταση στην παραπάνω εξίσωση των τιμών του κρίσιμου σημείου και λύνοντας ως προς τις παραμέτρους a και b προκύπτει ότι:

$$a = \Omega_a \frac{R^2 T_c^2}{P_c} \quad (3.10)$$

$$b = \Omega_b \frac{R T_c}{P_c} \quad (3.11)$$

όπου $\Omega_a = 0.45724$ και $\Omega_b = 0.07780$. Επίσης, οι Peng-Robinson υιοθέτησαν την εξίσωση του Soave για τον υπολογισμό της παραμέτρου $\alpha(T)$, όπως δίνεται από την Εξίσωση 3.4, παρόλα αυτά τροποποίησαν την παράμετρο m ως εξής:

$$m = 0.379642 + 1.54226\omega - 0.2699\omega^2 \quad (3.12)$$

Ακόμη, οι Peng-Robinson (1978) πρότειναν μια τροποποίηση της έκφρασης για το m για τα βαριά συστατικά ενός μείγματος, για τα οποία ισχύει $\omega > 0.49$:

$$m = 0.379642 + 1.48503\omega - 0.1644\omega^2 + 0.016667\omega^3 \quad (3.13)$$

Για να χρησιμοποιηθεί η καταστατική των Peng – Robinson για την πρόβλεψη της θερμοδυναμικής συμπεριφοράς των μειγμάτων, θα πρέπει να παρέχετε η κρίσιμη πίεση, η κρίσιμη θερμοκρασία και ο ακκεντρικός παράγοντας για κάθε συστατικό του μείγματος. Για καθαρές ουσίες, οι απαιτούμενες ιδιότητες είναι καλά ορισμένες και γνωστές. Όμως, συνήθως, τα περισσότερα πετρελαϊκά ρευστά περιέχουν και βαριά κλάσματα τα οποία δεν είναι καλά ορισμένα. Αυτά τα κλάσματα, θεωρούνται όλα μαζί σαν ένα κλάσμα C_{7+} . Το πρόβλημα που έγκειται σε τέτοιες περιπτώσεις είναι πως χαρακτηρίζεται ένα κλάσμα ως C_{7+} , καθώς έστω και οι μικρές διαφοροποιήσεις μπορεί να έχουν τεράστια επίδραση στις ιδιότητες PVT και στις ισορροπίες των φάσεων ενός συστήματος υδρογονανθράκων, όπως προβλέπεται από την καταστατική εξίσωση Peng – Robinson (Ahmed, 2007).

Συνήθως, η προσέγγιση που πραγματοποιείται σε τέτοιες περιπτώσεις είναι να «ρυθμιστούν» («tuning») οι παράμετροι της καταστατικής εξίσωσης για να αυξηθεί η ακρίβεια της πρόβλεψης. Κατά την διάρκεια αυτής της διαδικασίας, οι κρίσιμες ιδιότητες του C_{7+} κλάσματος και οι δυαδικοί συντελεστές αλληλεπίδρασης προσαρμόζονται με σκοπό να αποκτηθεί μια λογική αντιστοίχιση με τα πειραματικά δεδομένα του μείγματος υδρογονανθράκων.

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

$$\alpha_{mix} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n z_i z_j \sqrt{\alpha_i \alpha_j} (1 - k_{ij}) \quad (3.14)$$

$$b_{mix} = \sum_{i=1}^n z_i b_i \quad (3.15)$$

όπου k_{ij} είναι οι συντελεστές δυαδικής αλληλεπίδρασης (Binary Interaction Parameters, BIPs), οι οποίοι λαμβάνουν υπόψη την αλληλεπίδραση μεταξύ

διαφορετικών συστατικών και, ειδικά για την περίπτωση ζευγών υδρογονανθράκων, συχνά εκτιμάται από τη σχέση του Prausnitz:

$$k_{ij} = 1 - \left(\frac{2V_{c_i}^{1/6} V_{c_j}^{1/6}}{V_{c_i}^{1/3} + V_{c_j}^{1/3}} \right)^\theta \quad (3.16)$$

Ο κρίσιμος γραμμομοριακός όγκος V_c μπορεί να υπολογιστεί από τη λύση της καταστατικής εξίσωσης των πραγματικών αερίων σε κρίσιμες συνθήκες:

$$V_c = \frac{Z_c R T_c}{P_c} \quad (3.17)$$

όπου ο συντελεστής συμπιεστότητας στο κρίσιμο σημείο για την καταστατική εξίσωση PR ισούται με 0.3074 και η παράμετρος θ έγκειται στη κρίση του χρήστη (συνήθως 1.2). Να σημειωθεί πως η εξίσωση (3.16) χρησιμοποιείται μόνο για τον προσδιορισμό του k_{ij} για συστατικά υδρογονανθράκων. Ο συντελεστής δυαδικής αλληλεπίδρασης μεταξύ μη υδρογονανθράκων ή μεταξύ υδρογονανθράκων και μη υδρογονανθράκων λαμβάνεται από πίνακες (Ahmed, 2007).

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 $Z = P \frac{V_m}{RT}$. Επομένως, οι δύο EOS παίρνουν τη μορφή:

$$Z^3 + [(\delta_1 + \delta_2 - 1) \cdot (B - 1) \cdot Z^2 + (A + \delta_1 \cdot \delta_2 \cdot B - (\delta_1 + \delta_2) \cdot B \cdot (B + 1))] \cdot Z - [AB + \delta_1 \cdot \delta_2 \cdot B^2 \cdot (B+1)] = 0 \quad (3.16)$$

με τους αδιάστατους συντελεστές A , B και να υπολογίζονται ως εξής:

$$A = \frac{\alpha_{mix} P}{(RT)^2} \quad \text{και} \quad B = \frac{b_{mix} P}{(RT)} \quad (3.17)$$

3.5 Διόρθωση Όγκου (Volume Shift)

Λύνοντας την εξίσωση (3.16) ενδέχεται να προκύψουν πάνω από μια λύσεις για τον συντελεστή συμπίεστικότητας 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:

$$V_m = \frac{ZRT}{P} \quad \text{και} \quad \rho = \frac{PMW}{ZRT} \quad (3.18)$$

όπου MW το μοριακό βάρος του ρευστού.

Ακόμα και με τις τροποποιήσεις των Peng-Robinson, οι κυβικές καταστατικές εξισώσεις παραμένουν ανεπαρκείς για τον υπολογισμό της πυκνότητας της υγρής φάσης. Ως αποτέλεσμα, απαιτείται η τροποποίηση του όγκου σύμφωνα με την έννοια της μετατόπισης του όγκου (volume shift) που προτάθηκε από τον Peneloux. Με την εφαρμογή αυτής της τροποποίησης (V_m^{EOS}), η οποία εξαρτάται από τη σύνθεση του μείγματος και τα χαρακτηριστικά των συστατικών του, οι εκτιμήσεις του όγκου και της πυκνότητας προσεγγίζουν περισσότερο τις πραγματικές τιμές. Η τροποποίηση του όγκου δίνεται από την εξίσωση:

$$V_m = V_m^{EOS} = \sum_{i=1}^n z_i c_i \quad (3.19)$$

όπου z_i η σύσταση και c_i μία παράμετρος συγκεκριμένη για το κάθε συστατικό, η οποία δίνεται ως συνάρτηση της παραμέτρου του όγκου b . Ισχύει ότι:

$$s_i = c_i b_i \quad (3.20)$$

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

Με την τροποποίηση του όγκου μέσω της παραπάνω διαδικασίας, συνεπάγεται επίσης και η τροποποίηση του συντελεστή συμπίεστικότητας Z . Ο διορθωμένος συντελεστής υπολογίζεται με βάση την ακόλουθη εξίσωση:

$$Z = Z^{EOS} - \frac{P}{RT} \sum_{i=1}^n z_i c_i \quad (3.21)$$

Γνωρίζοντας τον διορθωμένο συντελεστή συμπίεστικότητας, μπορούν εύκολα να βρεθούν οι τιμές της πυκνότητας, με μικρότερο σφάλμα, μέσω της εξίσωσης (3.19).

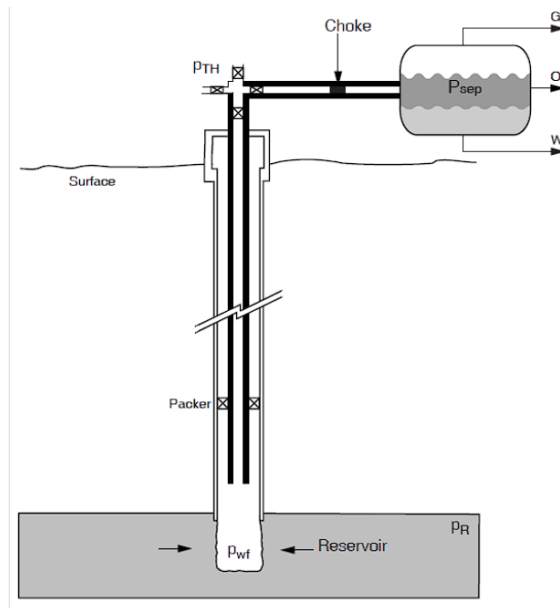
Για την εφαρμογή των καταστατικών εξισώσεων απαιτείται η γνώση των κρίσιμων ιδιοτήτων των συστατικών που απαρτίζουν το ρευστό. Η κρίσιμη πίεση (P_c) και θερμοκρασία (T_c) για τα καθαρά συστατικά καθορίζονται μέσω πειραματικών μετρήσεων, για τις οποίες υπάρχει εκτενής βιβλιογραφία. Επιπλέον, απαιτείται η γνώση του ακκεντρικού παράγοντα (ω), που εισήχθη από τον Pitzer το 1955 ως μέτρο που περιγράφει την ακκεντρικότητα των μορίων των συστατικών. Για σφαιρικά μόρια, ο ακκεντρικός παράγοντας πλησιάζει το 0, ενώ για απόλυτα μη σφαιρικά μόρια πλησιάζει τη μονάδα. (Ahmed, 2007)

4. Ικανότητα απόληψης γεώτρησης (Well Deliverability)

4.1 Εισαγωγή

Για να κατανοηθεί πλήρως η διαδικασία της εισπίεσης μέσα σε μία γεώτρηση, πρέπει να αναλυθούν οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο και τη λειτουργία των γεωτρήσεων. Το κεφάλαιο αυτό παρέχει την απαραίτητη γνώση και προσέγγιση για το πώς αντιμετωπίζεται μηχανικά ένα πρόβλημα που περιλαμβάνει τη ροή των ρευστών μέσα σε μία γεώτρηση. Μέσω της χρήσης του λογισμικού PROSPER της Petex, το οποίο επιλύει τις αντίστοιχες εξισώσεις που διέπουν τη ροή των ρευστών, γίνεται μοντελοποίηση της ροής που λαμβάνει χώρα μέσα στη γεώτρηση, επιτρέποντας παράλληλα την πλήρη επίβλεψη των πιέσεων, των θερμοκρασιών, των ροών και άλλων σημαντικών παραμέτρων κατά μήκος αυτής. Η παρακολούθηση αυτών των παραμέτρων είναι ουσιώδης, είτε κατά την παραγωγή είτε κατά την εισπίεση.

Το ρευστό, που συνήθως αποτελείται από υδρογονάνθρακες (περιπτώσεις παραγωγής), ρέει από τα όρια του ταμιευτήρα προς τη γεώτρηση λόγω της υψηλής πίεσης του υπεδαφικού σχηματισμού. Στη συνέχεια, μέσω του παραγωγικού σωλήνα φτάνει στους οριζόντιους σωλήνες ροής της επιφάνειας. Ακολούθως, κατευθύνεται στους διαχωριστές για να γίνει ο διαχωρισμός αερίου-υγρού και να παραχθούν τα τελικά προϊόντα παραγωγής σε πρότυπες συνθήκες στο σημείο πώλησης. Η πίεση των ρευστών, από την αρχική υψηλή πίεση μέσα στο πορώδες πέτρωμα, φτάνει στους διαχωριστές μέσω μιας σειράς επιμέρους βημάτων πτώσεων πίεσης, όπως φαίνεται σχηματικά στην Εικόνα 7. Επομένως, η πίεση είναι η κινητήρια δύναμη του ρευστού για την έξοδό του στην επιφάνεια του εδάφους.



Εικόνα 7. Διάταξη παραγωγικής γεώτρησης (Yousefi, Groenenberg, Koornneef, Juez - Larre, & Shahi, 2023)

4.2 Μονοφασική ροή (Single Phase flow)

Η μονοφασική ροή εμφανίζεται όταν η πίεση στην κεφαλή της γεώτρησης υπερβαίνει την πίεση κορεσμού του ρευστού. Σε αυτήν την περίπτωση, το ρευστό διατηρείται συνήθως σε υγρή κατάσταση. Ως προς την πτώση πίεσης στη γεώτρηση, αυτή αποτελείται από τρεις κύριες συνιστώσες:

1. Πτώση πίεσης λόγω τριβής (ΔP_f): Αυτή η πτώση πίεσης οφείλεται στην τριβή του ρευστού με την εσωτερική επιφάνεια της σωλήνωσης της γεώτρησης και άλλων εμποδίων που μπορεί να υπάρχουν στην ροή του ρευστού.
2. Πτώση πίεσης λόγω μεταβολών της δυναμικής ενέργειας (ΔP_g): Αυτή η πτώση πίεσης προκύπτει από αλλαγές στο ύψος της στήλης του ρευστού.
3. Πτώση πίεσης λόγω μεταβολών της κινητικής ενέργειας (ΔP_k): Αυτή η πτώση πίεσης συνδέεται με την αλλαγή της ταχύτητας του ρευστού και την ανακατανομή της πίεσης που συμβαίνει όταν η ταχύτητά του αλλάζει. Συνήθως είναι αμελητέα συγκριτικά με τις 2 προηγούμενες.

Όλες οι παραπάνω πτώσεις πίεσης συνδέονται με την παρακάτω μαθηματική εξίσωση που εκφράζει την συνολική πτώση πίεσης μέσα στην γεώτρηση.

$$\Delta P = \Delta P_f + \Delta P_g + \Delta P_k \quad (4.1)$$

Η συνολική πτώση πίεσης στη γεώτρηση εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως ο διάμετρος και το μήκος των σωλήνων παραγωγής, η ταχύτητα του ρευστού και οι φυσικές ιδιότητες αυτού. (Heriot Watt University, 2011)

4.3 Πολυφασική ροή (Multi-Phase flow)

Η πολυφασική ροή είναι συνηθισμένη σε πολλές φυσικές και χημικές διεργασίες και εμφανίζεται σε διάφορα περιβάλλοντα, από την παραγωγή πετρελαίου έως την επεξεργασία λυμάτων. Καθώς η πολυφασική ροή περιλαμβάνει δύο ή περισσότερες φάσεις του ρευστού (συνήθως υγρό και αέριο), οι εξισώσεις που περιγράφουν αυτήν τη ροή είναι πιο πολύπλοκες σε σύγκριση με τη μονοφασική ροή.

Κάθε φάση ενός πολυφασικού ρευστού επηρεάζεται από τις δικές της ιδιότητες και συνθήκες. Επιπλέον, η αλληλεπίδραση μεταξύ των φάσεων κάνει το σύστημα ακόμη πιο πολύπλοκο. Ενώ η μονοφασική ροή μπορεί να περιγραφεί από σχετικά απλές εξισώσεις, οι οποίες βασίζονται σε βασικές φυσικές αρχές όπως ο νόμος του Bernoulli και σε εξισώσεις της μεταφοράς μάζας και ορμής, οι εξισώσεις της πολυφασικής ροής απαιτούν την εφαρμογή πιο περίπλοκων μαθηματικών και φυσικών μοντέλων.

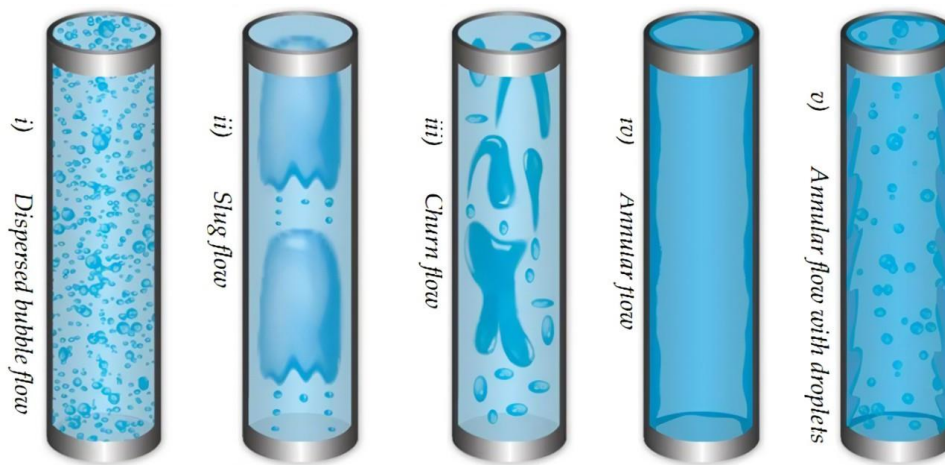
Η κατανόηση και η ανάλυση της πολυφασικής ροής απαιτούν συνήθως χρήση υπολογιστικών μοντέλων και προσομοιώσεων, καθώς και πειραματικών μεθόδων, για να μπορέσουν να ληφθούν υπόψη όλες οι παράμετροι και οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των φάσεων.

4.3.1 Καθεστώτα ροής (Flow regimes)

Στην Εικόνα 8 παρουσιάζονται τα πιο σημαντικά καθεστώτα ροής που μπορεί να σχηματιστούν κατά τη πολυφασική ροή. Αυτά περιγράφονται ως εξής:

- i. Ροή διασκορπισμένων φυσαλίδων (Dispersed bubble flow): Η αέρια φάση είναι διασκορπισμένη στη συνεχόμενη υγρή φάση του πετρελαίου
- ii. Ροή σφαιριδίων (Slug flow): Οι φυσαλίδες αερίου συγχωνεύονται σε μεγαλύτερες, όπου σε κάποιο σημείο αρχίζουν να καταλαμβάνουν το μεγαλύτερο μέρος της διατομής των σωληνώσεων.

- iii. Τυρβώδης Ροή (Churn flow): Οι μεγαλύτερες φυσαλίδες αερίου γίνονται ασταθείς και καταρρέουν, με αποτέλεσμα να δημιουργείται τυρβώδης ροή.
- iv. Δακτυλιοειδής ροή (Annular flow): Η αέρια φάση γίνεται κυρίαρχη και συνεχής, ενώ το υγρό ρέει σε έναν δακτύλιο που επικαλύπτει την επιφάνεια της σωλήνωσης, με τα σταγονίδια του υγρού να παρασύρονται στην αέρια φάση.
- v. Δακτυλιοειδής ροή με σταγονίδια (Annular flow with droplets): Σε υπερβολικά υψηλές ταχύτητες της στήλης αερίου, η διατμητική δύναμη στη διεπιφάνεια αερίου-πετρελαίου οδηγεί στη διασπορά του πετρελαίου στο αέριο σχηματίζοντας μια κατάσταση "ομίχλης". Το μοτίβο αυτό εμφανίζεται μόνο σε πολύ υψηλές ταχύτητες ροής και σε συστήματα με υψηλό GOR.



Εικόνα 8. Καθεστώτα ροής (Guerrero & Munoz, 2017)

4.4 Μεταβολή της πίεσης και της θερμοκρασίας του όξινου αερίου σε γεωτρήσεις εισπίεσης

Η εισπίεση ρευστών μέσα από μια γεώτρηση είναι μια πολύπλοκη διαδικασία που επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες, συμπεριλαμβανομένων της θερμοκρασίας, της πίεσης και των ιδιοτήτων των ρευστών.

Ο προσδιορισμός των συνθηκών ροής, καθώς και ο υπολογισμός της πίεσης του ρευστού κατά μήκος μίας γεώτρησης είναι κρίσιμος για την αξιολόγηση της συμπεριφοράς του εισπιεζόμενου ρευστού και των φάσεων του σε οποιοδήποτε συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας. Η ακρίβεια αυτών των υπολογισμών επηρεάζει την απόδοση της γεώτρησης και την αποτελεσματικότητα της εισπίεσης. Ο

υπολογισμός της πίεσης της στήλης του ρευστού ξεκινάει από την οριακή πίεση και θερμοκρασία στην κεφαλή της γεώτρησης και υπολογίζει με ολοκλήρωμα την απώλεια πίεσης σε όλο το μήκος της γεώτρησης:

$$P(D) = \int_0^P \frac{dP}{dL} dL \quad (4.1)$$

όπου $\frac{dP}{dL} = \left(\frac{dP}{dL}(\rho)\right)_g + \left(\frac{dP}{dL}(\mu)\right)_f + \left(\frac{dP}{dL}\right)_m$ είναι οι τρεις παράγοντες που αντιπροσωπεύουν την απώλεια πίεσης που οφείλεται στη βαρύτητα, την τριβή και την ορμή ή την επιτάχυνση του ρευστού, αντίστοιχα. Βέβαια, η απώλεια πίεσης υφίσταται μόνο σε παραγωγικές γεωτρήσεις, καθώς σε γεωτρήσεις εισπίεσης κατά μήκος της γεώτρησης από την κεφαλή προς τον ταμιευτήρα, δεν υπάρχει τέτοια αλλά όφελος σε πίεση που οφείλεται στη βαρύτητα. (Samnioti, et al., 2023).

Όσο για την θερμοκρασία, η ακριβής καταγραφή της σε κάθε σημείο της γεώτρησης είναι σημαντική για τον υπολογισμό του θερμικού προφίλ και την κατανόηση των διαφορετικών παραγόντων που επηρεάζουν τη ροή. Η πολύπλοκη φύση της επίδρασης της θερμοκρασίας στις ιδιότητες των ρευστών καθιστά απαραίτητη τη χρήση προσεγγιστικών μεθόδων για τον υπολογισμό των απαιτούμενων παραμέτρων, προκειμένου να εξασφαλιστεί η αποτελεσματική λειτουργία του συστήματος παραγωγής.

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 εισπίεσης, έπειτα στο ρευστό ανάμεσα στον σωλήνα εισπίεσης και τη σωλήνωση, από εκεί στη σωλήνωση της γεώτρησης, στο τσιμέντο και τελικά στο περιβάλλον πέτρωμα.

Ο κανόνας που περιγράφει τη μεταφορά θερμότητας με αγωγή λέει ότι το ποσό της θερμότητας που μεταφέρεται από ένα ζεστό σε ένα κρύο σώμα καθώς διέρχεται από ένα εμπόδιο, όπως ένας σωλήνας, εξαρτάται από την αγωγιμότητα του εμποδίου και τη μεταβολή της θερμοκρασίας (ΔT). Η αγωγιμότητα του μέσου που συνδέει τα δύο σώματα ονομάζεται συντελεστής αγωγιμότητας (H) και έχει μονάδες $BTU/(h \cdot ft^2 \cdot ^\circ F)$. Γνωρίζοντας το ΔT και το H , μπορεί να γίνει υπολογισμός της μεταβολής της θερμότητας (ΔQ).

Επιπλέον, χρησιμοποιώντας τον όρο της θερμοχωρητικότητας, που δηλώνει το ποσό της θερμότητας (ΔQ) που προσφέρεται σε ένα σώμα για να αυξηθεί η θερμοκρασία του κατά μία μονάδα μεταβολής της θερμοκρασίας (ΔT), μπορεί να υπολογιστεί η μεταβολή της θερμοκρασίας του ρευστού και, κατά συνέπεια, η τελική του θερμοκρασία. Ο μαθηματικός τύπος της θερμοχωρητικότητας ορίζεται ως εξής:

$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta T} \quad (\text{BTU/lbm}^\circ\text{F}) \quad (4.2)$$

Με τη διαδικασία εύρεσης της θερμοκρασίας του ρευστού στα επιμέρους τμήματα της γεώτρησης, είναι δυνατόν να προσδιοριστεί το συνολικό θερμοκρασιακό προφίλ της. Λογισμικά μοντελοποίησης ροών, όπως το PROSPER, μπορούν να εκτιμήσουν το θερμοκρασιακό προφίλ χρησιμοποιώντας τις κατάλληλες παραμέτρους. Αυτές περιλαμβάνουν τη θερμοχωρητικότητα του ρευστού (C), τη διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ του ρευστού και του πετρώματος (ΔT) και τον συντελεστή θερμοχωρητικότητας του μέσου (U). Το U είναι γνωστή μεταβλητή, ενώ το ΔT μπορεί να μετρηθεί εύκολα στο πεδίο.

4.4.1 Ελάχιστη πίεση αναμιξιμότητας (Minimum Miscibility Pressure)

Απαραίτητη προϋπόθεση για την ανάμιξη του όξινου αερίου με το υπάρχον πετρέλαιο του ταμειυτήρα είναι η επίτευξη ομοιογενούς ανάμειξης, η οποία έχει σημαντικές επιπτώσεις στις ιδιότητες του πετρελαίου και στην απαιτούμενη πίεση εισπίεσης.

Κατά την ανάμειξη του όξινου αερίου με το πετρέλαιο, προκαλείται μεταβολή της πυκνότητας, του ιξώδους και της κινητικότητάς του. Η MMP ορίζεται ως η ελάχιστη πίεση στην οποία το αέριο και το πετρέλαιο αναμιγνύονται πλήρως σε ομοιογενή φάση, χωρίς την ύπαρξη διεπιφάνειας. Ο ακριβής καθορισμός της MMP είναι κρίσιμος για τον σχεδιασμό της εισπίεσης του όξινου αερίου, καθώς επηρεάζει την αποτελεσματικότητα της ανάμειξης και την πίεση εισπίεσης που απαιτείται στην κεφαλή της γεώτρησης.

Ο προσδιορισμός της MMP είναι σημαντικός για τον σχεδιασμό των διαδικασιών εισπίεσης. Οι μέθοδοι για τον προσδιορισμό της MMP, όταν δεν υπάρχουν διαθέσιμες εργαστηριακές μετρήσεις, είναι οι εξής:

1. Χρήση καθιερωμένων συσχετίσεων για συστήματα πλούσια σε H₂S: Αυτή η μέθοδος βασίζεται σε εμπειρικές συσχετίσεις που έχουν αναπτυχθεί για παρόμοια συστήματα και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για εκτίμηση της MMP.
2. Προσομοίωση του πειράματος του λεπτού σωλήνα (slim tube experiment): Αυτή η μέθοδος περιλαμβάνει την χρήση μαθηματικών μοντέλων για την προσομοίωση της ανάμειξης, ή μη, μεταξύ αερίου και πετρελαίου σε ένα λεπτό σωλήνα, και την εκτίμηση της MMP.
3. Αξιοποίηση αξιόπιστων πειραματικών μετρήσεων από τη βιβλιογραφία: Η χρήση δεδομένων από προηγούμενες μελέτες και πειράματα που έχουν δημοσιευθεί στη βιβλιογραφία για παρόμοια συστήματα μπορεί να παρέχει αξιόπιστες εκτιμήσεις της MMP.
4. Χρήση υπολογιστικής μεθόδου από κελί σε κελί (cell to cell method): Αυτή η μέθοδος αφορά την ανάπτυξη μαθηματικών μοντέλων που μιμούνται την συμπεριφορά του συστήματος από κελί σε κελί και την χρήση τους για τον υπολογισμό της MMP.

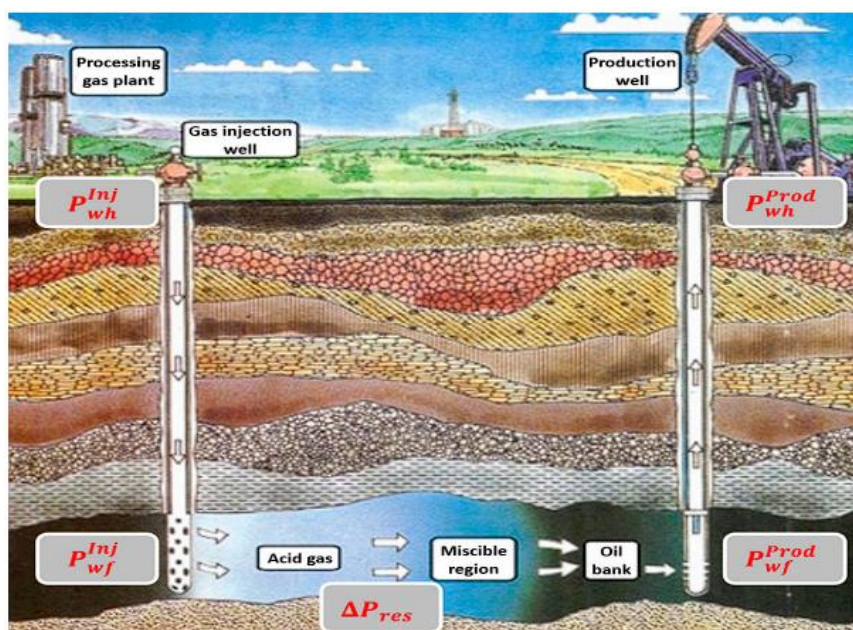
Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι διαθέσιμοι συσχετισμοί για την εκτίμηση της ελάχιστης πίεσης αναμιξιμότητας (MMP) συχνά αφορούν αέρια πλούσια σε CO₂. Έτσι, η χρήση συσχετίσεων που βασίζονται στο CO₂ μπορούν να παρέχουν μια αρχική εκτίμηση της MMP, αλλά πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η παρουσία του H₂S και η επίδρασή του στις ιδιότητες ανάμειξης των ρευστών. Οι εκτιμήσεις που προκύπτουν μπορεί να είναι υψηλότερες από τις πραγματικές τιμές λόγω της επίδρασης του H₂S.

4.4.1 Εκτίμηση της ελάχιστης απαιτούμενης πίεσης εισπίεσης στην κεφαλή της γεώτρησης

Η διαδικασία για τον προσδιορισμό της ελάχιστης απαιτούμενης πίεσης εισπίεσης στην κεφαλή της γεώτρησης (P_{wh}^{inj}) είναι κρίσιμη για τη σωστή λειτουργία της διαδικασίας εισπίεσης του όξινου αερίου. Η διαδικασία υπολογισμού της P_{wh}^{inj} ξεκινά από τον ταμιευτήρα και αναπτύσσεται αντίστροφα προς την κεφαλή της γεώτρησης. Αυτό

σημαίνει ότι υπολογίζονται οι απώλειες πίεσης κατά μήκος της γεώτρησης από τον ταμιευτήρα μέχρι την κεφαλή της, λαμβάνοντας υπόψη τις αντιστάσεις που προκαλούνται από την ροή του εισπνεζόμενου αερίου μέσα στις σωληνώσεις και τα εμπόδια που υπάρχουν κατά μήκος της διαδρομής του. Η P_{wh}^{Inj} πρέπει να είναι επαρκής για να εξασφαλιστεί η ομαλή ροή του όξινου αερίου μέχρι τον πυθμένα της γεώτρησης και να διασφαλιστεί η αποτελεσματική ανάμειξη με το πετρέλαιο. Η ανάπτυξη της διαδικασίας υπολογισμού γίνεται με γνώμονα τις συνθήκες λειτουργίας του συστήματος εισπίεσης και τις προδιαγραφές του εξοπλισμού που χρησιμοποιείται, όπως φαίνεται στην Εικόνα 8.

Η διατήρηση της πλήρους αναμιξιμότητας μεταξύ του όξινου αερίου και του πετρελαίου εντός του ταμιευτήρα είναι ουσιώδης για την αποτελεσματική λειτουργία του συστήματος εισπίεσης. Αυτό επιτυγχάνεται διασφαλίζοντας ότι η επικρατούσα πίεση (P^{MMP}) σε κάθε σημείο του ταμιευτήρα είναι υψηλότερη από την MMP.



Εικόνα 9. Αντίστροφη διαδικασία υπολογισμού για την εκτίμηση της απαιτούμενης πίεσης στην κεφαλή της γεώτρησης (Samnioti, et al., 2023)

Επειδή η εκτίμηση της MMP είναι συχνά μη ακριβής, ορίζεται ένα περιθώριο ασφαλείας ΔP^{MMP} . Έτσι, η πίεση εντός του ταμιευτήρα πρέπει να υπερβαίνει το όριο $P^{MMP} + \Delta P^{MMP}$ για να εξασφαλιστεί η πλήρης αναμιξιμότητα.

Επιπλέον, είναι σημαντικό να ληφθεί υπόψη η ελάχιστη πίεση στο εσωτερικό του ταμιευτήρα, η οποία αναμένεται να εμφανιστεί στον πυθμένα της γεώτρησης

παραγωγής λόγω της καθίζησης του πετρελαίου στο εσωτερικό του κατά τη διάρκεια της ροής. Επομένως, συμπεραίνεται ότι:

$$P_{wf}^{Prod} \geq P^{MMP} + \Delta P^{MMP} \quad (4.3)$$

όπου P_{wf}^{Prod} είναι η πίεση στον πυθμένα της γεώτρησης παραγωγής υπό συνθήκες ροής (Samnioti, et al., 2023).

Η πίεση στον πυθμένα της γεώτρησης εισπίεσης (P_{wf}^{inj}) πρέπει να είναι επαρκώς υψηλή ώστε να αντισταθμίσει την πτώση πίεσης (ΔP_{res}) που παρουσιάζεται μέσα στον σχηματισμό. Αυτό εξασφαλίζει ότι η πίεση σε όλο το μήκος της γεώτρησης είναι επαρκής για την ανάμειξη του όξινου αερίου με το πετρέλαιο. Αυτή η συνθήκη εκφράζεται από την μαθηματική εξίσωση:

$$P_{wf}^{Inj} \geq P_{wf}^{Prod} + \Delta P_{res} = P^{MMP} + \Delta P^{MMP} + \Delta P_{res} \quad (4.4)$$

Τέλος, η απαιτούμενη πίεση εισπίεσης στην κεφαλή της γεώτρησης P_{wf}^{Inj} , ορίζεται εφόσον έχει συνυπολογιστεί η πτώση πίεσης ΔP_{inj} , κατά μήκος της γεώτρησης εισπίεσης, έτσι ώστε:

$$P_{wf}^{Inj} = P_{wf}^{Inj} + \Delta P_{inj} \geq P^{MMP} + \Delta P^{MMP} + \Delta P_{res} + \Delta P_{inj} \quad (4.5)$$

Κατά τη διάρκεια της ροής του όξινου αερίου από την κεφαλή της γεώτρησης προς τον πυθμένα, η πίεση αυξάνεται λόγω της επίδρασης της βαρύτητας. Για να διατηρηθεί η απλότητα των μαθηματικών εκφράσεων, μπορεί να τεθεί ένα αρνητικό πρόσημο πριν από τον όρο ΔP_{inj} , ενώ ο ίδιος ο όρος τίθεται σε θετική απόλυτη τιμή. Αυτό διατηρεί την απλότητα των μαθηματικών εκφράσεων ενώ αντιπροσωπεύει τη φυσική διαδικασία που συμβαίνει κατά τη ροή του όξινου αερίου μέσα γεώτρηση εισπίεσης. Με βάση τα ανωτέρω, η τελικά προσδιοριζόμενη ελάχιστη απαιτούμενη P_{wf}^{Inj} είναι η εξής:

$$P_{wf}^{Inj} \geq P^{MMP} + \Delta P^{MMP} + \Delta P_{res} - \Delta P_{inj} \quad (4.6)$$

Γίνεται αντιληπτό πως η διαφορά πίεσης στο εσωτερικό της γεώτρησης, ΔP_{inj} , πρέπει να υπολογιστεί και να αξιολογηθεί προσεκτικά για τον επιτυχή προσδιορισμό της ελάχιστης απαιτούμενης πίεσης στην κεφαλή της γεώτρησης. Η διαφορά αυτή είναι κρίσιμη για να εξασφαλιστεί η ομαλή ροή του όξινου αερίου και η αποτελεσματική

ανάμειξή του με το υπάρχον πετρέλαιο εντός του ταμιευτήρα. Επομένως, η δημιουργία των προφίλ εισπίεσης επιτρέπει τον προσδιορισμό αυτής της διαφοράς πίεσης και είναι κρίσιμη για τη σωστή λειτουργία του συστήματος εισπίεσης. (Samnioti, et al., 2023)

5. Λογισμικό προσομοίωσης ροής ρευστών σε γεωτρήσεις (PROSPER)

5.1 Εισαγωγή

Το PROSPER κυκλοφόρησε στην αγορά στις αρχές της δεκαετίας του '90 και αποτελεί αντικείμενο διαρκούς έρευνας και ανάπτυξης για περισσότερο από δύο δεκαετίες. Έχει εξελιχθεί σε πρότυπο του κλάδου για τη μοντελοποίηση γεωτρήσεων και αγωγών, χάρη στην αξεπέραστη τεχνική βάση και τις μοναδικές δυνατότητες μοντελοποίησης.

Η ποικιλία των συσχετίσεων πολυφασικής ροής που είναι διαθέσιμες είναι κρίσιμη για τη βιομηχανία, καθώς επιτρέπουν την εκτίμηση των χαρακτηριστικών της ροής μέσα σε σωληνώσεις, καθώς και των απωλειών πίεσης σε διάφορα μέρη του συστήματος εισπίεσης.

Το λογισμικό PROSPER είναι ένα ισχυρό εργαλείο μοντελοποίησης που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση της ροής πολλαπλών φάσεων από τον ταμιευτήρα έως την κεφαλή της γεώτρησης. Μέσω αυτών των λειτουργιών, το PROSPER βοηθά στη βελτιστοποίηση των διεργασιών παραγωγής και εισπίεσης σε περιβάλλοντα με πολλαπλές φάσεις.

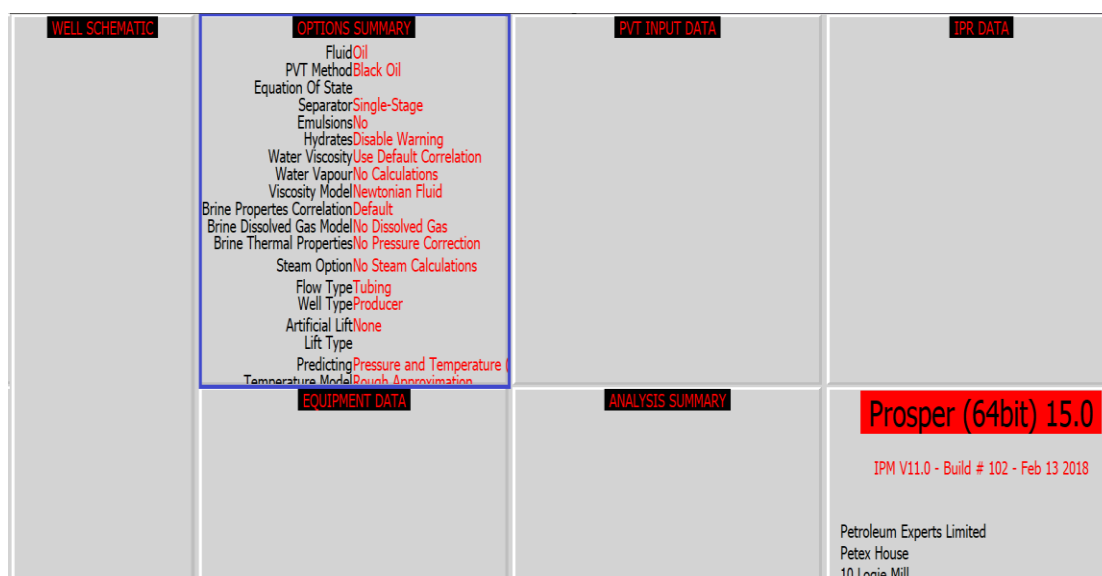
Κατά την προσομοίωση των πολυφασικών ροών σε σωληνώσεις υποθέτουμε συνήθως ότι επικρατεί σταθερή κατάσταση. Αυτό σημαίνει ότι οι παράμετροι και οι ιδιότητες των ρευστών εκτιμώνται σε κάθε σημείο της γεώτρησης χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η εξέλιξη του χρόνου. Οι παράμετροι που εξετάζονται συνήθως περιλαμβάνουν την πίεση, τη θερμοκρασία, την ταχύτητα του ρευστού και το ρυθμό ροής της μάζας.

5.2 Σχεδιασμός του συστήματος εισπίεσης με την βοήθεια του λογισμικού PROSPER

Ανοίγοντας το λογισμικό PROSPER, ο χρήστης συναντάει τα παρακάτω παράθυρα όπως φαίνεται στην Εικόνα 10.



Εικόνα 10. Περιβάλλον του λογισμικού PROSPER



Εικόνα 11. Παράθυρο Options Summary

Στο παράθυρο Options Summary, όπως φαίνονται στην Εικόνα 11 και 12, ζητούνται από τον χρήστη οι παρακάτω πληροφορίες.

Εικόνα 12. Επιλογές στο παράθυρο του Options Summary

Στο παράθυρο Option Summary, ορίστηκε ως ρευστό (fluid) να είναι συμπύκνωμα (Retrograde Condensate), καθώς οι άλλες επιλογές όπως πετρέλαιο και νερό (Oil and Water) αλλά και ξηρό και υγρό αέριο (Dry and Wet gas) δεν απασχολούν την παρούσα μελέτη. Η μέθοδος που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της πυκνότητας του ρευστού είναι αυτή των καταστατικών εξισώσεων (EOS) και συγκεκριμένα αυτή των Peng - Robinson, τις οποίες έχει το PROSPER διαθέσιμες από την βάση των δεδομένων του. Ο διαχωριστής που χρησιμοποιείται είναι Multi-Stage Separator.

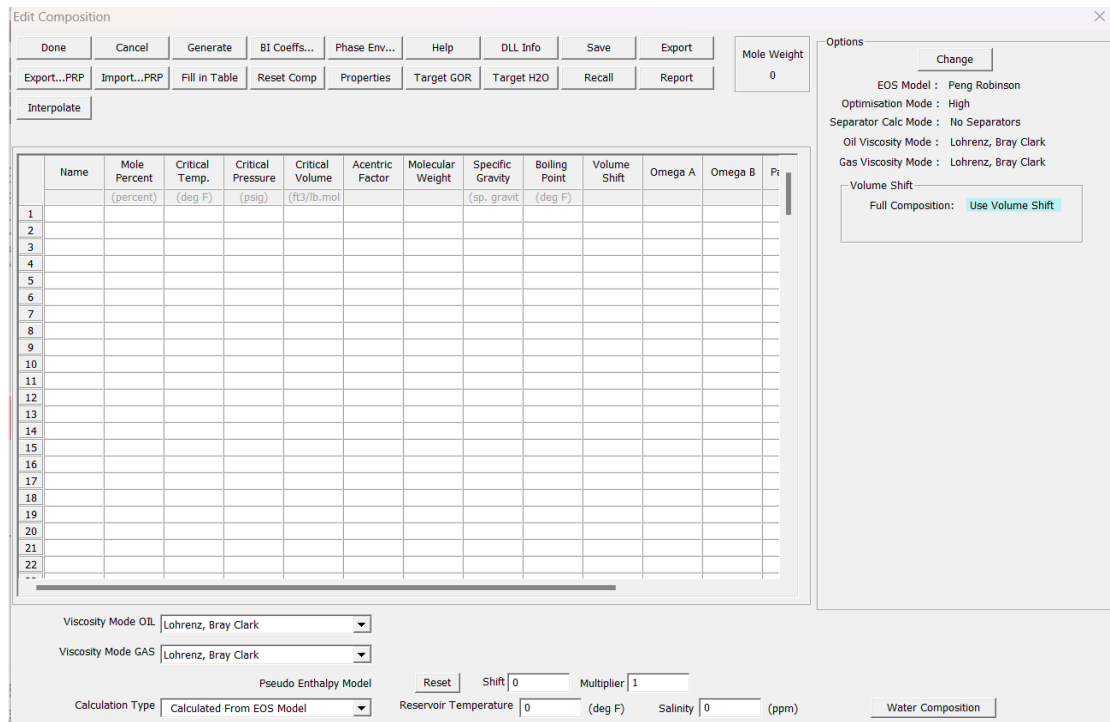
Για την γεώτρηση, ορίζεται ως τύπος ροής (flow type) να είναι ροή σωληνώσεων (tubing flow) και ο τύπος της γεώτρησης να είναι αυτός της εισπίεσης (injector). Οι υπόλοιπες επιλογές μένουν στην προεπιλογή τους (default), χωρίς να διορθωθεί κάτι.

Στην συνέχεια, η επόμενη επιλογή που κάνει ο χρήστης είναι στο παράθυρο του PVT Input Data, το οποίο φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 13. Παράθυρο του PVT Input Data

Σε αυτό το παράθυρο, δίνεται η δυνατότητα στον χρήστη να επιλέξει την σύνθεση και τις ιδιότητες των συστατικών του ρευστού που θα εισαχθούν στην γεώτρηση εισπίεσης.



Εικόνα 14. Επιλογές στο παράθυρο του PVT Input Data

Σε αυτό το παράθυρο, εισάγονται τα τρία συστατικά του όξινου αερίου (H_2S , CO_2 , C_1), με όλες τις απαραίτητες πληροφορίες που απαιτούνται. Όπως θα αναλυθεί και στο Κεφάλαιο 6, πραγματοποιήθηκε μελέτη για τέσσερις διαφορετικές συστάσεις, μια

υψηλή σε H₂S, μια υψηλή σε CO₂, μια με 50% H₂S και 50% CO₂ και μια που περιέχει αρκετό και υπολογίσιμο ποσοστό μεθανίου).

Όλες οι απαιτούμενες πληροφορίες για τα τρία συστατικά, όπως η κρίσιμη θερμοκρασία και πίεση, είναι βασισμένες σε βιβλιογραφικές πηγές. Επίσης, το μοντέλο που χρησιμοποιεί το λογισμικό για τον υπολογισμό του ιξώδους είναι αυτό των Lohrenz, Bray Clark τόσο για την υγρή φάση, όσο και για την αέρια. Εφόσον συμπληρωθούν όλες αυτές οι πληροφορίες, το PROSPER υπολογίζει και προβάλλει τον φάκελο φάσεων για κάθε σύσταση ρευστού που του ορίζει ο χρήστης.

	Name	Mole Percent (percent)	Critical Temp. (deg F)	Critical Pressure (psig)	Critical Volume (ft ³ /lb.mol)	Acentric Factor	Molecular Weight	Specific Gravity (sp. gravit)	Boiling Point (deg F)	Volume Shift	Omega A	Omega B	Pi
1	CO2		87.692	1058.26	1.50409	0.239	44.01	1.101	-109.21	---	0.45724	0.077796	
2	H2S		212.396	1291.34	1.57938	0.081	34.1	1.1895	-75.37	-0.10356	0.45724	0.077796	
3	C1		-116.518	658.381	1.58899	0.011	16.04	0.415	-258.79	-0.1595	0.45724	0.077796	
4													
5													
6													
7													
8													
9													
10													
11													
12													
13													
14													
15													
16													
17													
18													
19													
20													
21													
22													
--													

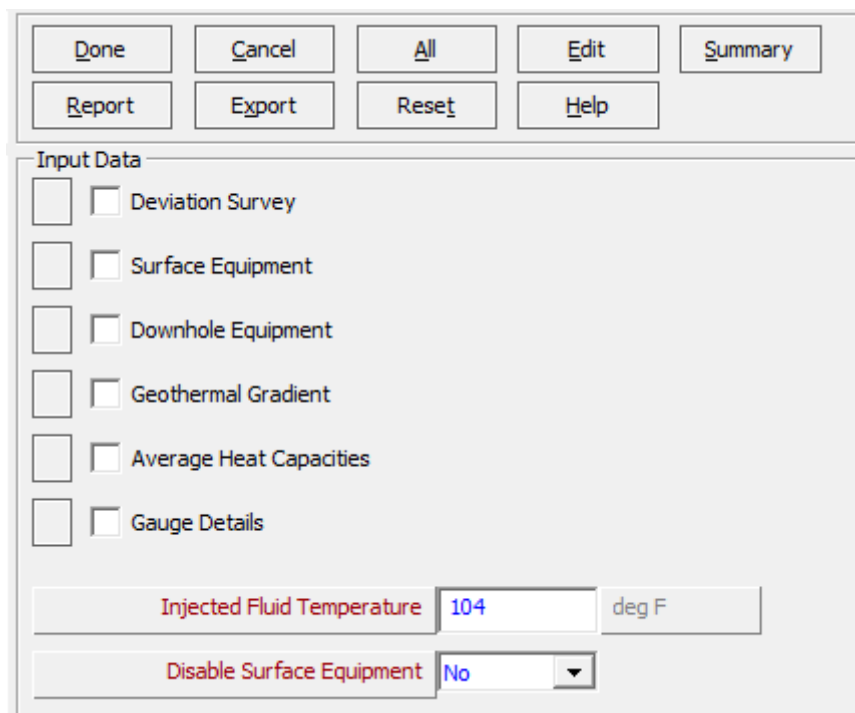
Εικόνα 15. Συμπληρωμένο PVT Input Data

Έπειτα, ο χρήστης μεταφέρεται στο παράθυρο του Equipment Data, μία ενότητα η οποία χρησιμοποιείται για τον καθορισμό του εξοπλισμού των γεωτρήσεων και του θερμοκρασιακού προφίλ του σχηματισμού.



Εικόνα 16. Παράθυρο Equipment Data

Οι επιλογές που δίνονται στον χρήστη είναι οι εξής:



Εικόνα 17. Επιλογές στο Equipment Data

Στην παρούσα διπλωματική, τα τμήματα που χρειάστηκαν να συμπληρωθούν είναι το Deviation Survey, το Downhole Equipment, το Geothermal Gradient (γεωθερμική βαθμίδα) και το Average Heat Capacities (μέση θερμοχωρητικότητα).

Στο Deviation Survey ορίστηκαν κάποια χαρακτηριστικά της γεώτρησης, η οποία είναι μια κατακόρυφη γεώτρηση μήκους 2,900 m.

Done
Cancel
Main
Help
Filter
Plot

MD <-> TVD

Point	Measured Depth	True Vertical Depth	Cumulative Displacement	Angle
	(feet)	(feet)	(feet)	(degrees)
1	0	0	0	0
2	2900	2900	0	0
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
11				
12				
13				
14				
15				
16				
17				
18				
19				
20				

Εικόνα 18. Deviation Survey

Στο Downhole Equipment, ορίστηκε ο εξοπλισμός της γεώτρησης, όπου επιλέχθηκε ένα χριστουγεννιάτικο δέντρο (Christmas Tree) στην κεφαλή της γεώτρησης και σωλήνωση (Tubing) μήκους ίδιου με αυτό της γεώτρησης (2,900 m). Για την σωλήνωση (Tubing) συγκεκριμένα, επιλέχθηκε μια εσωτερική διάμετρος 2.875 ιντσών και εσωτερική τραχύτητα της ίση με 0.0018 ίντσες (tubing inside roughness).

Η θερμοκρασία της επιφάνειας ορίζεται στα 60 °F και η θερμοκρασία του σχηματισμού στα 245 °F. Επίσης, δίνεται η δυνατότητα στον χρήστη να ορίσει τον συνολικό συντελεστής μεταφοράς θερμότητας (Overall Heat Transfer Coefficient).

Done
Cancel
Main
Import
Export
Plot
Help

Overall Heat Transfer Coefficient

BTU/h/ft²/F

Formation Gradient

Depth Reference
RKB
Enter Measured Depth
▼

Point	Formation TVD	Formation Measured Depth	Formation Temperature
	(feet)	(feet)	(deg F)
1	0	0	60
2	2900	2900	245
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			
13			
14			
15			
16			
17			
18			
19			
20			

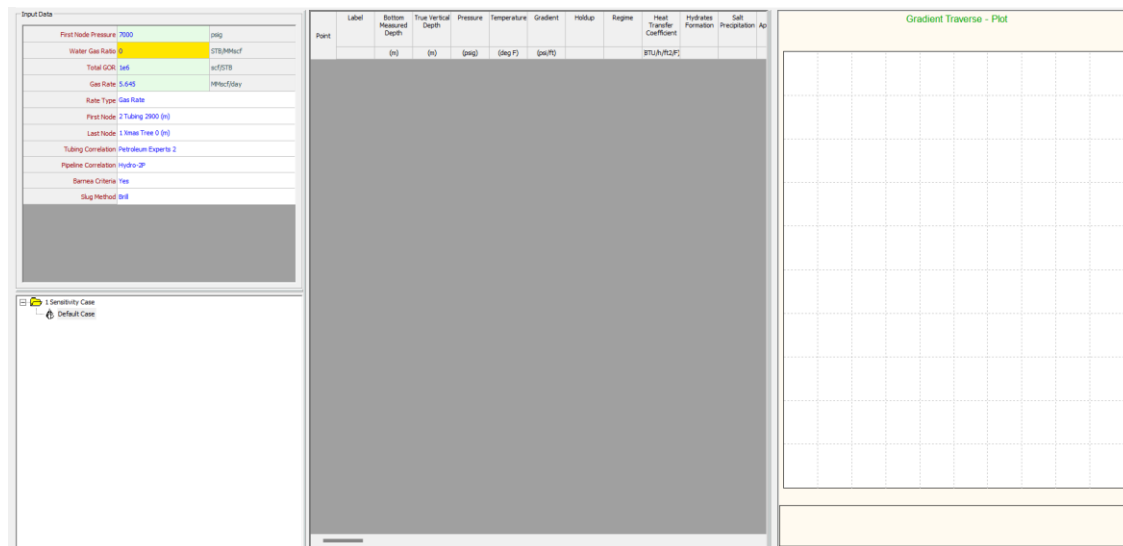
Εικόνα 19. Παράθυρο επιλογών Geothermal Gradient

Με την συμπλήρωση και του Equipment Data, έχουν ολοκληρωθεί όλες οι απαραίτητες προϋποθέσεις για να προχωρήσει ο χρήστης στους υπολογισμούς που επιθυμεί.

Η δυνατότητα Calculation Gradient (traverse) επιτρέπει στο χρήστη να υπολογίζει καμπύλες βαθμίδας πίεσης ροής σε καθορισμένο ρυθμό ροής για διαφορετικές συστάσεις του μείγματος του ρευστού που εισπίζεται.

Τα βήματα που ακολουθούνται για τον υπολογισμό αυτής της καμπύλης είναι τα εξής:

1. Επιλογή **Calculation | Gradient (traverse)** για να εισέλθει ο χρήστης στην οθόνη υπολογισμού όπως φαίνεται στην Εικόνα 19



Εικόνα 20. Παράθυρο υπολογισμού του Gradient (traverse)

2. Εισαγωγή των δεδομένων στο παράθυρο Input Data (Εικόνα 20). Στην συγκεκριμένη περίπτωση που μελετάται, το πρώτο σημείο υπολογισμού είναι ο πυθμένας της γεώτρησης στα 2,900 m ενώ το τελευταίο, και ζητούμενο, είναι η κεφαλή της γεώτρησης εισπίεσης.

Input Data		
First Node Pressure	7000	psig
Water Gas Ratio	0	STB/MMscf
Total GOR	1e6	scf/STB
Gas Rate	5.645	MMscf/day
Rate Type	Gas Rate	
First Node	2 Tubing 2900 (m)	
Last Node	1 Xmas Tree 0 (m)	
Tubing Correlation	Petroleum Experts 2	
Pipeline Correlation	Hydro-2P	
Barnea Criteria	Yes	
Slug Method	Brill	

Εικόνα 21. Input Data για τον υπολογισμό του Gradient (traverse)

- Εφόσον πραγματοποιηθεί ο υπολογισμός, τα αποτελέσματα για τις διαφορετικές ιδιότητες που έχουν υπολογισθεί παρουσιάζονται στην κεντρική οθόνη του χρήστη, όπως φαίνεται στην Εικόνα 21.

Point	Label	Bottom Measured Depth	True Vertical Depth	Pressure	Temperature	Gradient	Holdup	Regime	Heat Transfer Coefficient	Hydrates Formation	Salt Precipitation
		(m)	(m)	(psig)	(deg F)	(psi/ft)			(BTU/h/ft ² /F)		
1		2900.0	2900.0	7000.00	242.10						
2		2825.6	2825.6	6926.13	237.36	0.30279	0	Gas	100.0000		
3		2751.3	2751.3	6851.86	232.62	0.30444	0	Gas	100.0000		
4		2676.9	2676.9	6777.19	227.87	0.3061	0	Gas	100.0000		
5		2602.6	2602.6	6702.10	223.13	0.30778	0	Gas	100.0000		
6		2528.2	2528.2	6626.60	218.38	0.30948	0	Gas	100.0000		
7		2453.8	2453.8	6550.68	213.64	0.3112	0	Gas	100.0000		
8		2379.5	2379.5	6474.34	208.90	0.31292	0	Gas	100.0000		
9		2305.1	2305.1	6397.57	204.15	0.31466	0	Gas	100.0000		
10		2230.8	2230.8	6320.38	199.41	0.3164	0	Gas	100.0000		
11		2156.4	2156.4	6242.77	194.67	0.31816	0	Gas	100.0000		
12		2082.1	2082.1	6164.72	189.92	0.31993	0	Gas	100.0000		
13		2007.7	2007.7	6086.23	185.18	0.32171	0	Gas	100.0000		
14		1933.3	1933.3	6007.41	180.44	0.32309	1.000	Bubble	100.0000		
15		1859.0	1859.0	5928.15	175.69	0.32489	1.000	Bubble	100.0000		
16		1784.6	1784.6	5848.45	170.95	0.3267	1.000	Bubble	100.0000		
17		1710.3	1710.3	5768.30	166.21	0.32852	1.000	Bubble	100.0000		
18		1635.9	1635.9	5687.71	161.46	0.33035	1.000	Bubble	100.0000		
19		1561.5	1561.5	5606.67	156.72	0.33219	1.000	Bubble	100.0000		
20		1487.2	1487.2	5525.18	151.97	0.33403	1.000	Bubble	100.0000		
21		1412.8	1412.8	5443.24	147.23	0.33587	1.000	Bubble	100.0000		
22		1338.5	1338.5	5360.85	142.49	0.33772	1.000	Bubble	100.0000		
23		1264.1	1264.1	5278.01	137.74	0.33957	1.000	Bubble	100.0000		
24		1189.7	1189.7	5194.71	133.00	0.34143	1.000	Bubble	100.0000		
25		1115.4	1115.4	5110.96	128.26	0.3433	1.000	Bubble	100.0000		
26		1041.0	1041.0	5026.75	123.51	0.34517	1.000	Bubble	100.0000		
27		966.7	966.7	4942.10	118.77	0.34697	1.000	Bubble	100.0000		
28		892.3	892.3	4857.00	114.03	0.34885	1.000	Bubble	100.0000		
29		817.9	817.9	4771.44	109.28	0.35073	1.000	Bubble	100.0000		
30		743.6	743.6	4685.42	104.54	0.3526	1.000	Bubble	100.0000		
31		669.2	669.2	4598.94	99.79	0.35446	1.000	Bubble	100.0000		
32		594.9	594.9	4512.01	95.05	0.35632	1.000	Bubble	100.0000		
33		520.5	520.5	4424.63	90.31	0.35817	1.000	Bubble	100.0000		
34		446.2	446.2	4336.81	85.57	0.36	1.000	Bubble	100.0000		
35		371.8	371.8	4248.15	80.83	0.36342	1.000	Bubble	100.0000		
36		297.4	297.4	4159.88	76.14	0.36181	1.000	Bubble	100.0000		
37		223.1	223.1	4071.17	71.68	0.36364	1.000	Bubble	100.0000		
38		148.7	148.7	3982.10	68.36	0.3651	1.000	Bubble	100.0000		
39		74.4	74.4	3893.13	70.97	0.36468	1.000	Bubble	100.0000		
40		0	0	3805.90	104.00	0.35758	1.000	Bubble	100.0000		
41		0	0	3805.90	104.00	0.35758		WellHead	100.0000		

Εικόνα 22. Πίνακας αποτελεσμάτων υπολογισμού των ιδιοτήτων του ρευστού

5.3 Ανάλυση Ευαισθησίας (Sensitivity Analysis)

Με την ανάλυση ευαισθησίας, οι μπορεί εύκολα να εκτιμηθεί ποιες παράμετροι είναι κρίσιμες για την απόδοση του συστήματος και πώς μια αλλαγή σε αυτές επηρεάζει το αποτέλεσμα. Το γεγονός αυτό επιτρέπει τη λήψη στρατηγικών αποφάσεων για τη βελτίωση του συστήματος, τη μείωση του κινδύνου ή την αντιμετώπιση πιθανών προβλημάτων εγκαίρως. Οι παράμετροι που μπορούν να εξεταστούν είναι αρκετοί και ανάλυση ευαισθησίας μπορεί να γίνει σε οποιαδήποτε στιγμή ενός έργου.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας προκειμένου να γίνει κατανοητό αν και πώς συγκεκριμένοι παράμετροι επηρεάζουν τη συμπεριφορά των ρευστών στη γεώτρηση. Η προτεινόμενη μέθοδος ανάλυσης ευαισθησίας είναι η "ένα βήμα κάθε φορά", όπου μελετάται η μεταβολή μιας παραμέτρου εισόδου και εξετάζεται η επίδρασή της στο τελικό αποτέλεσμα. Συγκεκριμένα, για κάθε μια περίπτωση όλες οι παράμετροι μένουν σταθερές, εκτός

από μια παράμετρο η οποία μεταβάλλεται κάθε φορά μέσα στα πλαίσια τα οποία θα εξεταστούν. Με αυτόν τον τρόπο, η ανάλυση ευαισθησίας θα υποδείξει την επιρροή που έχει κάθε μια παράμετρος στο προφίλ εισπίεσης, είτε αυτή είναι σημαντική είτε αμελητέα.

Ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας εξαρτάται από τις συνθήκες του υπεδάφους, τα υλικά που χρησιμοποιούνται στη γεώτρηση, τη θερμοκρασία, την υγρασία και άλλους παράγοντες. Οι τιμές που επιλέχθηκαν είναι οι 2 BTU/h/ft²/°F, 6 BTU/h/ft²/°F, 8 BTU/h/ft²/°F, οι οποίες φαίνεται να σχηματίζουν ένα αδιαβατικό προφίλ θερμοκρασίας του ρευστού. Η τιμή 100 BTU/h/ft²/°F αντιπροσωπεύει μια άμεση εναλλαγή θερμότητας του ρευστού μέσα στην γεώτρηση με το περιβάλλον του.

Οι τιμές για τον ρυθμό εισπίεσης του όξινου αερίου (AGIR) που επιλέχθηκαν είναι τυπικές όπως 1.5 MMscf/day, 3 MMscf/day και 5.645 MMscf/day, με σκοπό όλοι οι ρυθμοί να είναι αρκετά χαμηλοί ώστε η θερμοκρασία του ρευστού να ταυτίζεται γρήγορα με εκείνη του σχηματισμού και επομένως να διατηρούνται σχεδόν σταθερές τιμές πυκνότητας

Για τιμές της θερμοκρασίας εισπίεσης του όξινου αερίου, επιλέχθηκε ένα εύρος τιμών από 70 °F έως 180 °F, για την πιθανή θέρμανση του όξινου αερίου από τους συμπιεστές (compressors) ή τις αντλίες (pumps) στην επιφάνεια.

Τελικά, για την πίεση στον πυθμένα της γεώτρησης εισπίεσης, επιλέχθηκε ένα εύρος τιμών με την τιμή 4,000 psi να είναι η πιο χαμηλή και η τιμή 8,000 psi να είναι η υψηλότερη.

6. Εξαγωγή αποτελεσμάτων

Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε μια μελέτη για τον υπολογισμό της κατάλληλης πίεσης εισπίεσης στην κεφαλή της γεώτρησης εισπίεσης (P_{inj}^{wh}) έτσι ώστε να εξασφαλιστεί μονοφασική ροή κατά μήκος της και να επιτευχθεί η αναμιξιμότητα του με τα ρευστά του ταμιευτήρα.

Το ρευστό που χρησιμοποιήθηκε για τους υπολογισμούς ήταν μείγμα H_2S , CO_2 και μεθανίου (C_1) για 4 διαφορετικές συστάσεις:

- 1) Υψηλότερη σύσταση σε H_2S έναντι των άλλων 2 συστατικών
- 2) Υψηλότερη σύσταση σε CO_2 έναντι των άλλων 2 συστατικών
- 3) Ίσο ποσοστό σύστασης H_2S και CO_2
- 4) Αρκετό και υπολογίσιμο ποσοστό C_1

Στις 3 παραπάνω πρώτες συστάσεις, το ποσοστό σε μεθάνιο (C_1) είναι 1% και αντιπροσωπεύει την πιθανότητα της παρουσίας του στο μείγμα που εισπιέζεται, εφόσον η γλύκανση του φυσικού αερίου είναι αδύνατον να είναι 100% αποτελεσματική για την επιτυχή απομάκρυνσή του. Η περίπτωση 4, αναφέρεται σε έντονη πλέον παρουσία του μεθανίου στο μείγμα, οπότε πρέπει να υπάρξει μεγαλύτερη προσοχή στον υπολογισμό του προφίλ πίεσης και θερμοκρασίας για την κάθε παράμετρο.

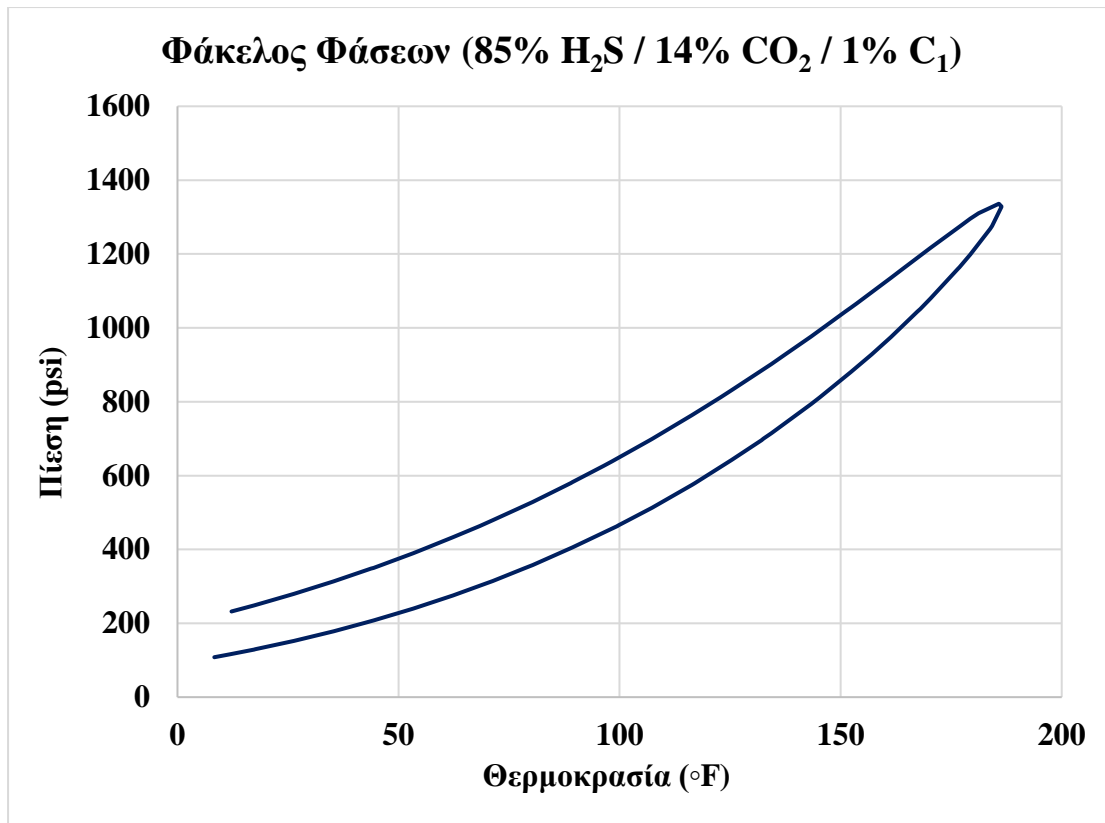
6.1 Μελέτη περίπτωσης για σύσταση όξινου αερίου (85% H_2S / 14% CO_2 / 1% C_1)

Σε αυτή την περίπτωση, το μείγμα που εισπιέζεται έχει υψηλή σύσταση σε H_2S . Σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα, επιλέχθηκαν 5 διαφορετικά σενάρια για να πραγματοποιηθεί η ανάλυση ευαισθησίας.

Πίνακας 5. Σενάρια μελέτης υψηλής σύστασης σε H₂S

Σενάρια	1	2	3	4
Παράμετροι				
Σύσταση όξινου αερίου (%) H₂S/CO₂/C₁	85/14/1	85/14/1	85/14/1	85/14/1
Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας (BTU/h/ft²/°F)	$\frac{2}{6}$ $\frac{8}{100}$	100	100	100
Ρυθμός εισπίεσης όξινου αερίου (MMscf/day)	5.645	$\frac{1.5}{3}$ 5.645	5.645	5.645
Θερμοκρασία εισπιεζόμενου όξινου αερίου (F)	104	104	$\frac{70}{104}$ $\frac{140}{176}$	104
Πίεση πυθμένα γεώτρησης εισπίεσης (psi)	7000	7000	7000	$\frac{4000}{6000}$ $\frac{7000}{8000}$

Με την βοήθεια του λογισμικού PROSPER, για την σύσταση που μελετάται, υπολογίστηκε ο φάκελος φάσεων.

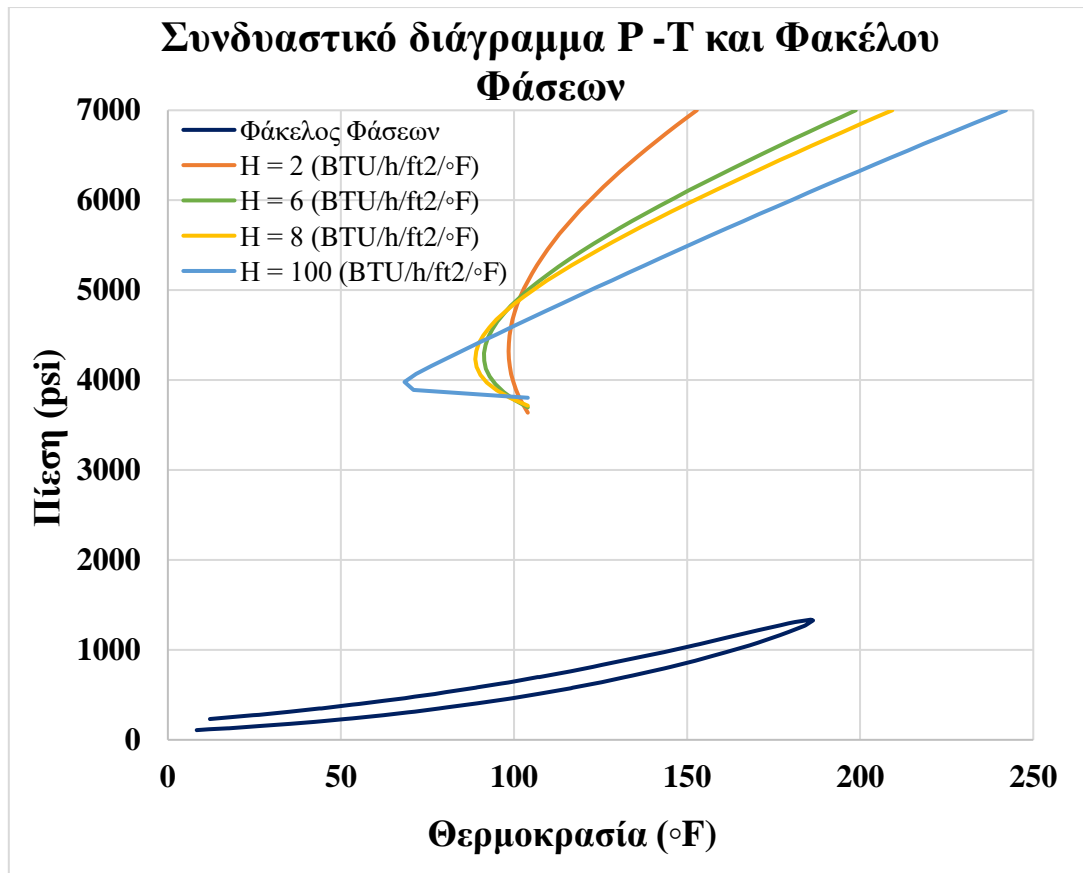


Διάγραμμα 1. Φάκελος Φάσεων για σύσταση (85% H₂S / 14% CO₂ / 1% C₁)

Από τον φάκελο φάσεων, παρατηρείται ότι η κρίσιμη θερμοκρασία του ρευστού είναι ίση με 185.807 °F και η κρίσιμη του πίεση είναι ίση με 1,341.9 psi.

6.1.1 Ανάλυση Ευαισθησίας για τον συντελεστή εναλλαγής θερμότητας H

Με την βοήθεια του λογισμικού PROSPER, υπολογίστηκε το προφίλ της πίεσης και θερμοκρασίας για κάθε μια τιμή του συντελεστή εναλλαγής θερμότητας.

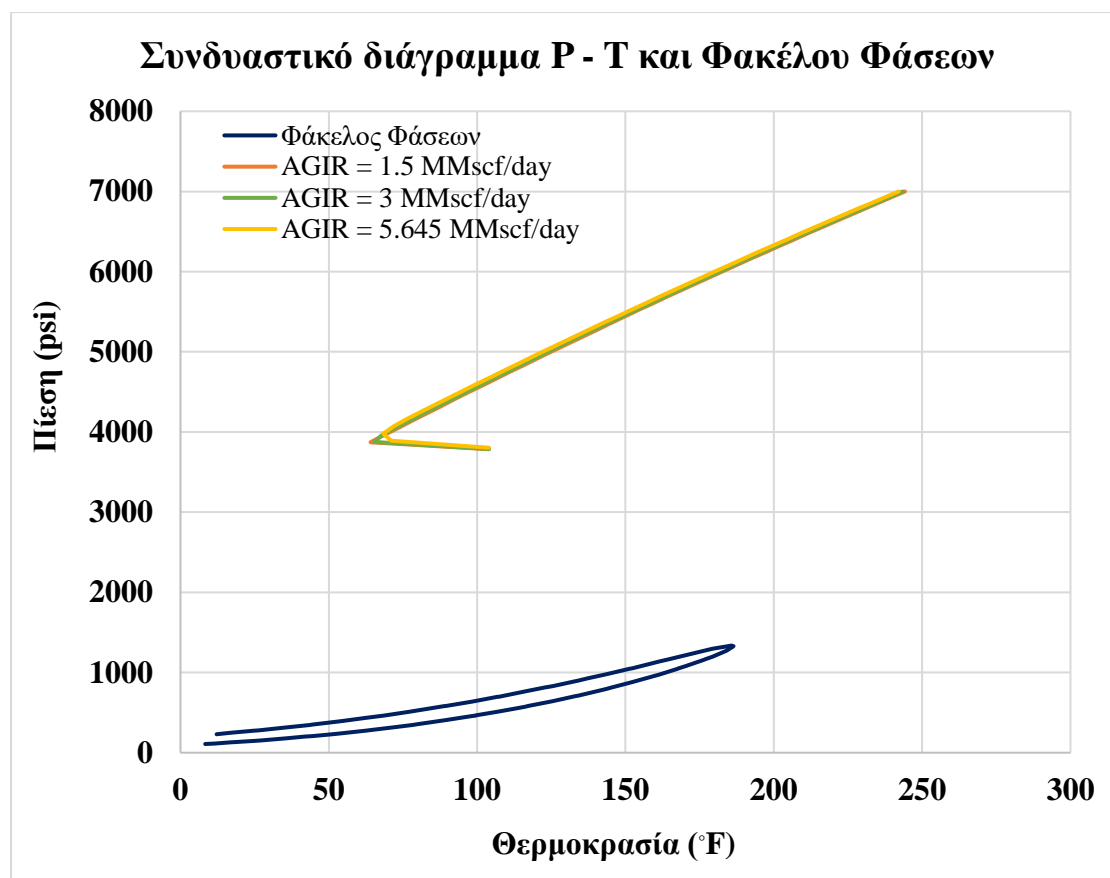


Διάγραμμα 2. Συνδυαστικό διάγραμμα προφίλ πίεσης - θερμοκρασίας και Φακέλου Φάσεων για διαφορετικές τιμές του συντελεστή εναλλαγής θερμότητας H για σύσταση (85% H₂S / 14% CO₂ / 1% C₁)

Παρατηρείται ότι η αύξηση του συντελεστή εναλλαγής θερμότητας δεν έχει σημαντική επιρροή, ακόμα και αν δεν υπάρχει μεταβολή της θερμοκρασίας. Για τις δύο τιμές του συντελεστή εναλλαγής θερμότητας, την ελάχιστη και την μέγιστη, οι αντίστοιχες για την πίεση στην κεφαλή της γεώτρησης είναι πανομοιότυπες (3,633.32 psi για την ελάχιστη τιμή και 3,798.34 psi για την μέγιστη), άρα οι διαφορετικές αυτές τιμές, δεν επιφέρουν κάποια ουσιαστική διαφορά, αν αναλογιστεί κανείς ότι έχουν μεγάλη διαφορά μεταξύ τους. Η απότομη εναλλαγή της θερμοκρασίας για την μέγιστη τιμή του συντελεστή εναλλαγής θερμότητας, έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της πυκνότητας του ρευστού και επομένως την αύξηση της πίεσης λόγω της βαρύτητας.

6.1.2 Ανάλυση Ευαισθησίας για ρυθμό εισπίεσης του όξινου αερίου AGIR

Με την βοήθεια του λογισμικού PROSPER, υπολογίστηκε το προφίλ της πίεσης και θερμοκρασίας για κάθε μια τιμή του ρυθμού εισπίεσης του όξινου αερίου (AGIR).

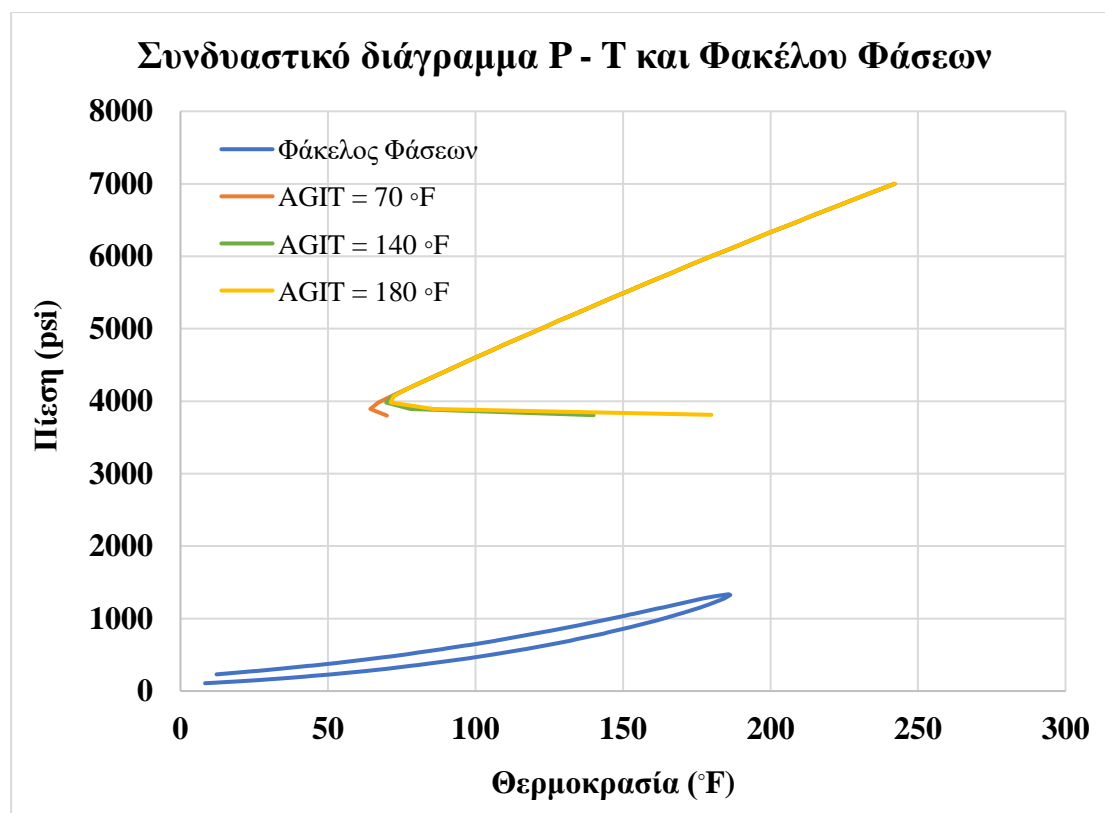


Διάγραμμα 3. Συνδυαστικό διάγραμμα προφίλ πίεσης - θερμοκρασίας και Φακέλου Φάσεων για διαφορετικές τιμές του ρυθμού εισπίεσης του όξινου αερίου AGIR για σύσταση (85% H₂S / 14% CO₂ / 1% C₁)

Σε αυτήν την περίπτωση, όπως και αναμενόταν, η αύξηση του ρυθμού της εισπίεσης του όξινου αερίου, δεν επιφέρει κάποια ουσιαστική διαφορά στην πίεση της κεφαλής της γεώτρησης εισπίεσης, αφού για την ελάχιστη και την μέγιστη τιμή του, οι τιμές της πίεσης είναι οριακά ίδιες (3,777.91 psi για την ελάχιστη τιμή και 3,798.34 psi για την μέγιστη τιμή). Το γεγονός αυτό, δικαιολογείται, επειδή οι τιμές του ρυθμού εισπίεσης είναι αρκετά μικρές, με αποτέλεσμα το κυκλοφορούν ρευστό να μην προλαβαίνει να αποκτήσει την θερμοκρασία του περιβάλλοντος σχηματισμού, άρα να μην έχει εναλλαγές στις τιμές της πυκνότητάς του και κατ' επέκταση στον βαρυντικό όρο υπολογισμού της πίεσης.

6.1.3 Ανάλυση Εναισθησίας για την θερμοκρασία εισπίεσης του όξινου αερίου AGIT

Με την βοήθεια του λογισμικού PROSPER, υπολογίστηκε το προφίλ της πίεσης και θερμοκρασίας για κάθε μια τιμή της θερμοκρασίας εισπίεσης του όξινου αερίου AGIT.

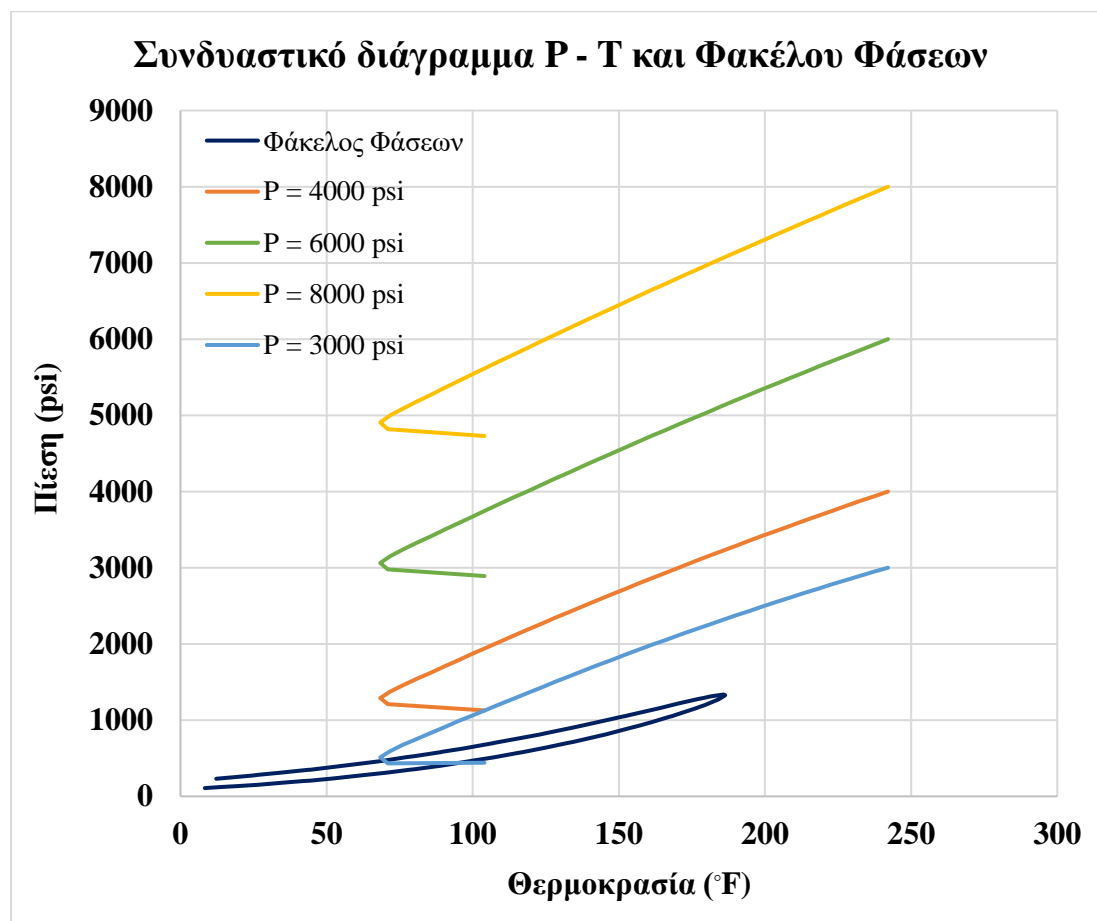


Διάγραμμα 4. Συνδυαστικό διάγραμμα προφίλ πίεσης - θερμοκρασίας και Φακέλου Φάσεων για διαφορετικές τιμές της θερμοκρασίας εισπίεσης του όξινου αερίου για σύσταση (85% H₂S / 14% CO₂ / 1% C₁)

Σε αυτήν την περίπτωση, οι διαφορετικές θερμοκρασίες με τις οποίες εισπιέστηκε το όξινο αέριο, δεν επέφεραν κάποια ουσιαστική διαφορά στην πίεση στην κεφαλή της γεώτρησης, αφού για την ελάχιστη θερμοκρασία (70 °F) και την μέγιστη θερμοκρασία (180 °F), οι τιμές της πίεσης ήταν αντίστοιχα 3,795.79 psi και 3,806.39 psi. Το αποτέλεσμα αυτό, δικαιολογείται από το γεγονός ότι το κυκλοφορούν ρευστό φτάνει πολύ γρήγορα στην θερμοκρασία του σχηματισμού, ανεξάρτητα από την θερμοκρασία με την οποία εισπιέστηκε.

6.1.4 Ανάλυση Ευαισθησίας για την πίεση στον πυθμένα της γεώτρησης εισπίεσης P_{bh}

Με την βοήθεια του λογισμικού PROSPER, υπολογίστηκε το προφίλ της πίεσης και θερμοκρασίας για κάθε μια τιμή της πίεσης της γεώτρησης εισπίεσης P_{bh} .



Διάγραμμα 5. Συνδυαστικό διάγραμμα προφίλ πίεσης - θερμοκρασίας και Φακέλου Φάσεων για διαφορετικές τιμές της πίεσης στον πυθμένα της γεώτρησης εισπίεσης για σύσταση (85% H_2S / 14% CO_2 / 1% C_1)

Σε αυτή την περίπτωση, όπως φαίνεται από το παραπάνω διάγραμμα, υπάρχει ουσιαστική μεταβολή στην πίεση στην κεφαλή της γεώτρησης για την αντίστοιχη στον πυθμένα της. Επίσης, για πίεση ίση με 4,000 psi, έγινε αντιληπτό ότι το προφίλ της πίεσης – θερμοκρασίας ήταν αρκετά πιθανό να εισέλθει στην διφασική περιοχή του φακέλου φάσεων, χωρίς όμως αυτό να συμβαίνει. Για αυτό τον λόγο, έγινε μια παραπάνω δοκιμή που αφορούσε πίεση στον πυθμένα της γεώτρησης ίση με 3,000 psi. Σε αυτήν την περίπτωση, το προφίλ της πίεσης – θερμοκρασίας, τέμνει τον φάκελο φάσεων και το κυκλοφορούν ρευστό αποκτά διφασική ροή, γεγονός ανεπιθύμητο για την μελέτη.

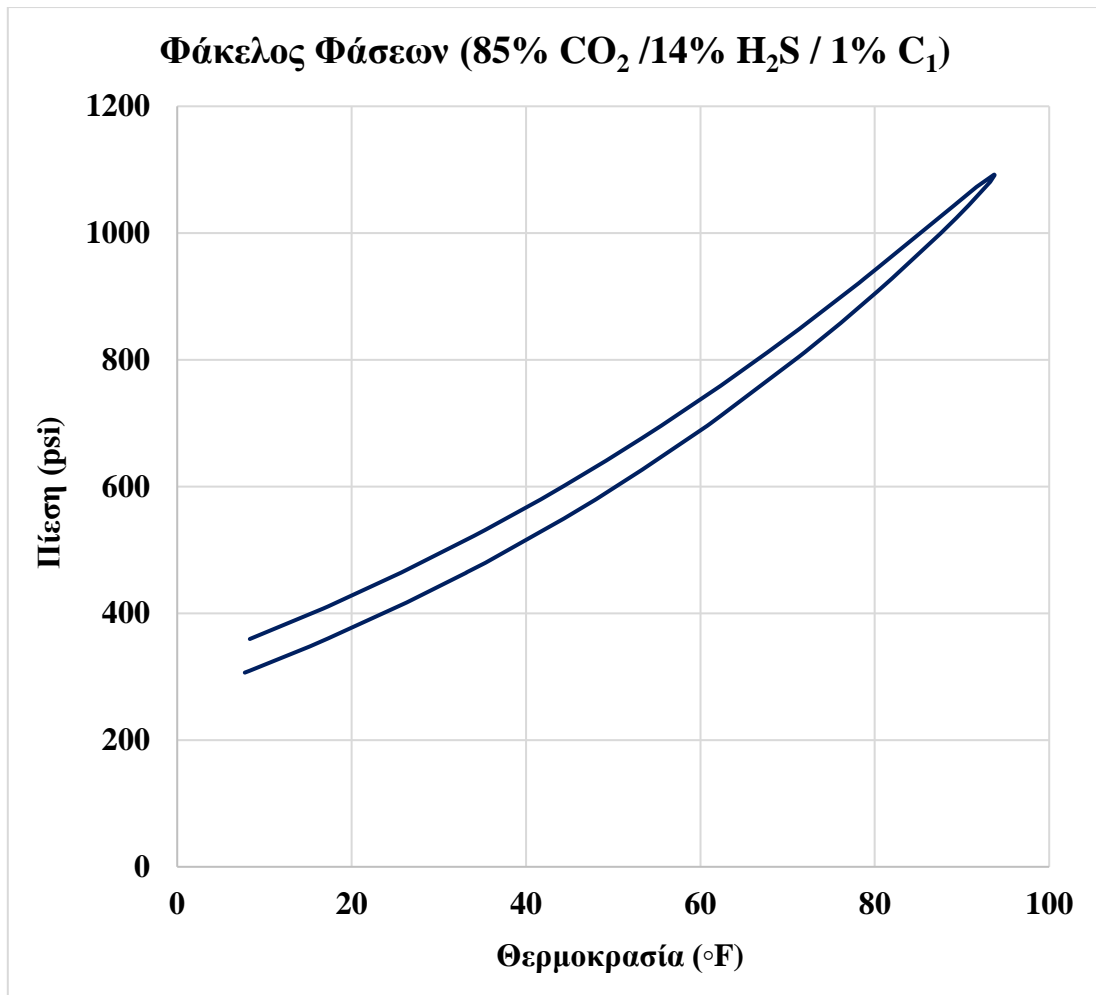
6.2 Μελέτη περίπτωσης για σύσταση όξινου αερίου (14% H₂S / 85% CO₂ / 1% C₁)

Σε αυτή την περίπτωση, το μείγμα που εισπνέζεται έχει υψηλή σύσταση σε CO₂. Σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα, επιλέχθηκαν 5 διαφορετικά σενάρια για να πραγματοποιηθεί η ανάλυση ευαισθησίας, με την ίδια λογική που επιλέχθηκαν και στην προηγούμενη περίπτωση, αυτή με την υψηλότερη σύσταση σε H₂S.

Πίνακας 6. Σενάρια μελέτης υψηλής σύστασης σε CO₂

Σενάρια	1	2	3	4
Παράμετροι				
Σύσταση όξινου αερίου (%) H ₂ S/CO ₂ /C ₁	14/85/1	14/85/1	14/85/1	14/85/1
Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας (BTU/h/ft ² /°F)	2	100	100	100
	6			
	8			
	100			
Ρυθμός εισπνέσεως όξινου αερίου (MMscf/day)	5.645	1.5	5.645	5.645
		3		
		5.645		
Θερμοκρασία εισπνέζόμενου όξινου αερίου (F)	104	104	70	104
			104	
			140	
			176	
Πίεση πυθμένα γεώτρησης εισπνέσεως (psi)	7000	7000	7000	4000
				6000
				7000
				8000

Με την βοήθεια του λογισμικού PROSPER, για την σύσταση που μελετάται, υπολογίστηκε ο φάκελος φάσεων.

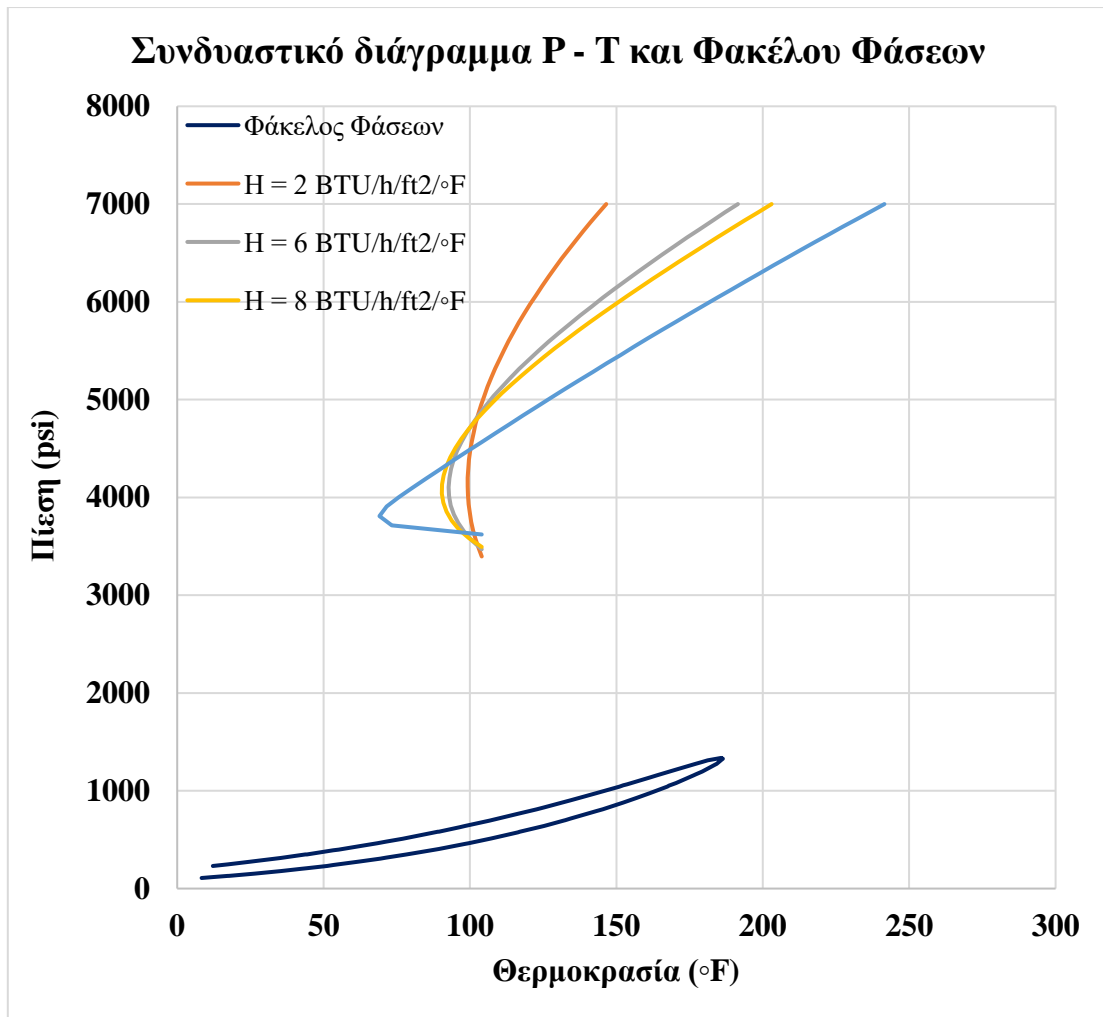


Διάγραμμα 6. Φάκελος Φάσεων για σύσταση (85% CO₂ / 14 % H₂S / 1% C₁)

Από τον φάκελο φάσεων, παρατηρείται ότι η κρίσιμη θερμοκρασία του ρευστού είναι ίση με 93.45 °F και η κρίσιμη του πίεση είναι ίση με 1,088.26 psi.

6.2.1 Ανάλυση Ευαισθησίας για τον συντελεστή εναλλαγής θερμότητας H

Με την βοήθεια του λογισμικού PROSPER, υπολογίστηκε το προφίλ της πίεσης και θερμοκρασίας για κάθε μια τιμή του συντελεστή εναλλαγής θερμότητας.

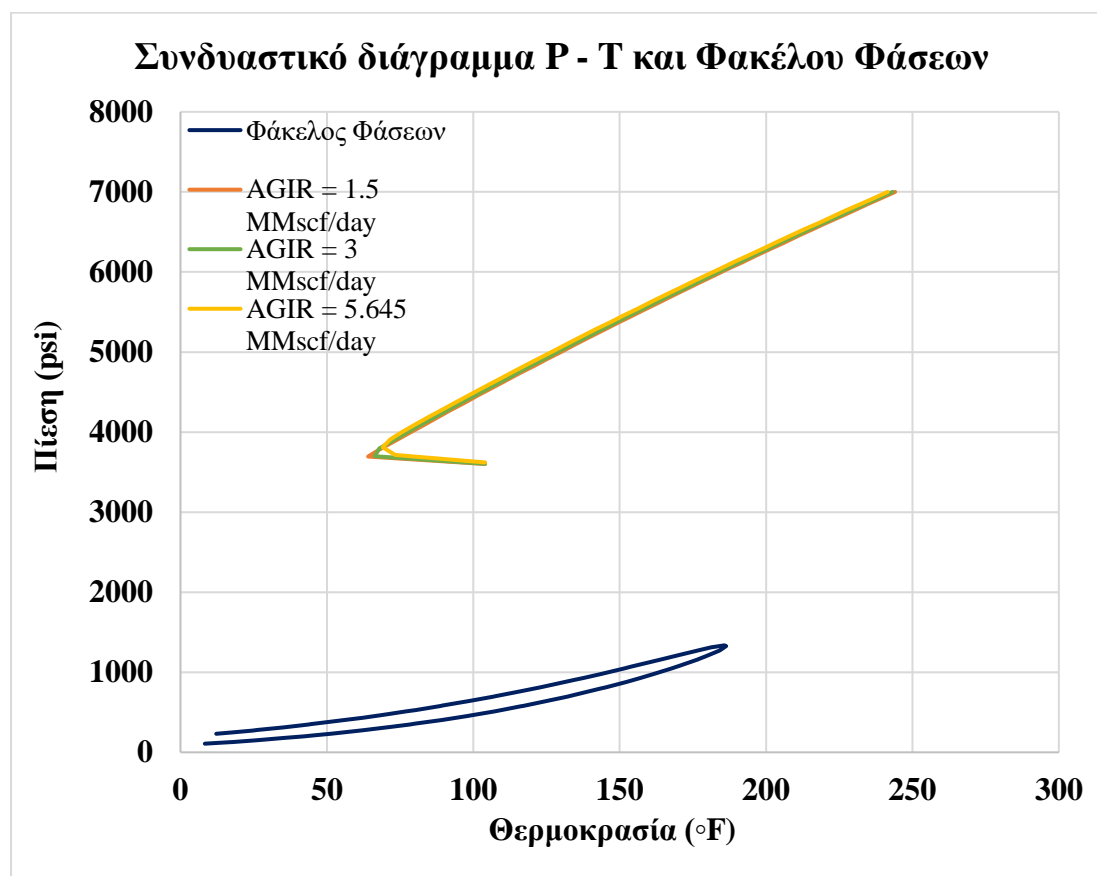


Διάγραμμα 7. Συνδυαστικό διάγραμμα προφίλ πίεσης - θερμοκρασίας και Φακέλου Φάσεων για διαφορετικές τιμές του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας για σύσταση (85 % CO₂ / 14 % H₂S / 1% C₁)

Από το παραπάνω διάγραμμα, συμπεραίνεται ότι οι διαφορετικές τιμές στον συντελεστή εναλλαγής θερμότητας, δεν επιφέρουν κάποια ουσιαστική μεταβολή στην πίεση στην κεφαλή της γεώτρησης. Για την ελάχιστη και την μέγιστη τιμή του συντελεστή εναλλαγής θερμότητας, οι αντίστοιχες για την πίεση στην κεφαλή της γεώτρησης είναι αρκετά ίδιες με τιμές 3,380.59 psi και 3,606.80 psi. Άρα, ενώ η θερμοκρασία επηρεάζεται σημαντικά, η μέση θερμοκρασία κατά μήκος της γεώτρησης μοιάζει σταθερή και δεν επηρεάζει την πυκνότητα του ρευστού και επομένως την αύξηση της πίεσης λόγω της βαρύτητας.

6.2.2 Ανάλυση Ευαισθησίας για τον ρυθμό εισπίεσης του όξινου αερίου AGIR

Με την βοήθεια του λογισμικού PROSPER, υπολογίστηκε το προφίλ της πίεσης και θερμοκρασίας για κάθε μια τιμή του ρυθμού εισπίεσης του όξινου αερίου (AGIR).

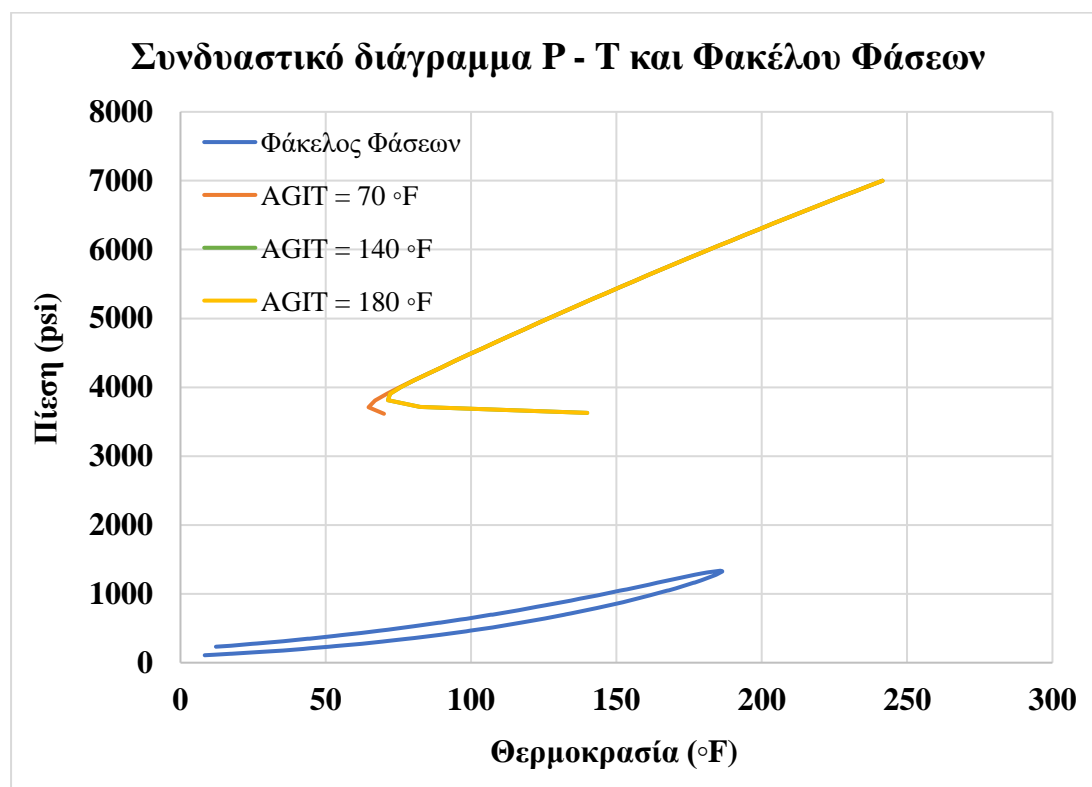


Διάγραμμα 8. Συνδυαστικό διάγραμμα προφίλ πίεσης - θερμοκρασίας και Φακέλου Φάσεων για διαφορετικές τιμές του ρυθμού εισπίεσης του όξινου αερίου AGIR για σύσταση (85 % CO₂ / 14 % H₂S / 1% C₁)

Στην συγκεκριμένη περίπτωση, όπως και στην προηγούμενη με υψηλότερη σύσταση σε H₂S, ο ρυθμός εισπίεσης του όξινου αερίου είναι αρκετά μικρός, οπότε είναι αναμενόμενο το ρευστό που ρέει μέσα στην γεώτρηση, να μην προλαβαίνει να αλλάξει την θερμοκρασία του με το περιβάλλοντα σχηματισμό και με αυτό τον τρόπο να μένει πρακτικά σταθερή η πυκνότητά του. Άρα, οι τιμές της πίεσης στην κεφαλή της γεώτρησης για την ελάχιστη και μέγιστη τιμή του ρυθμού εισπίεσης του όξινου αερίου είναι 3,587.11 psi και 3,606.80 psi αντίστοιχα.

6.2.3 Ανάλυση Εναισθησίας για την θερμοκρασία εισπίεσης του όξινου αερίου AGIT

Με την βοήθεια του λογισμικού PROSPER, υπολογίστηκε το προφίλ της πίεσης και θερμοκρασίας για κάθε μια τιμή της θερμοκρασίας εισπίεσης του όξινου αερίου AGIT.

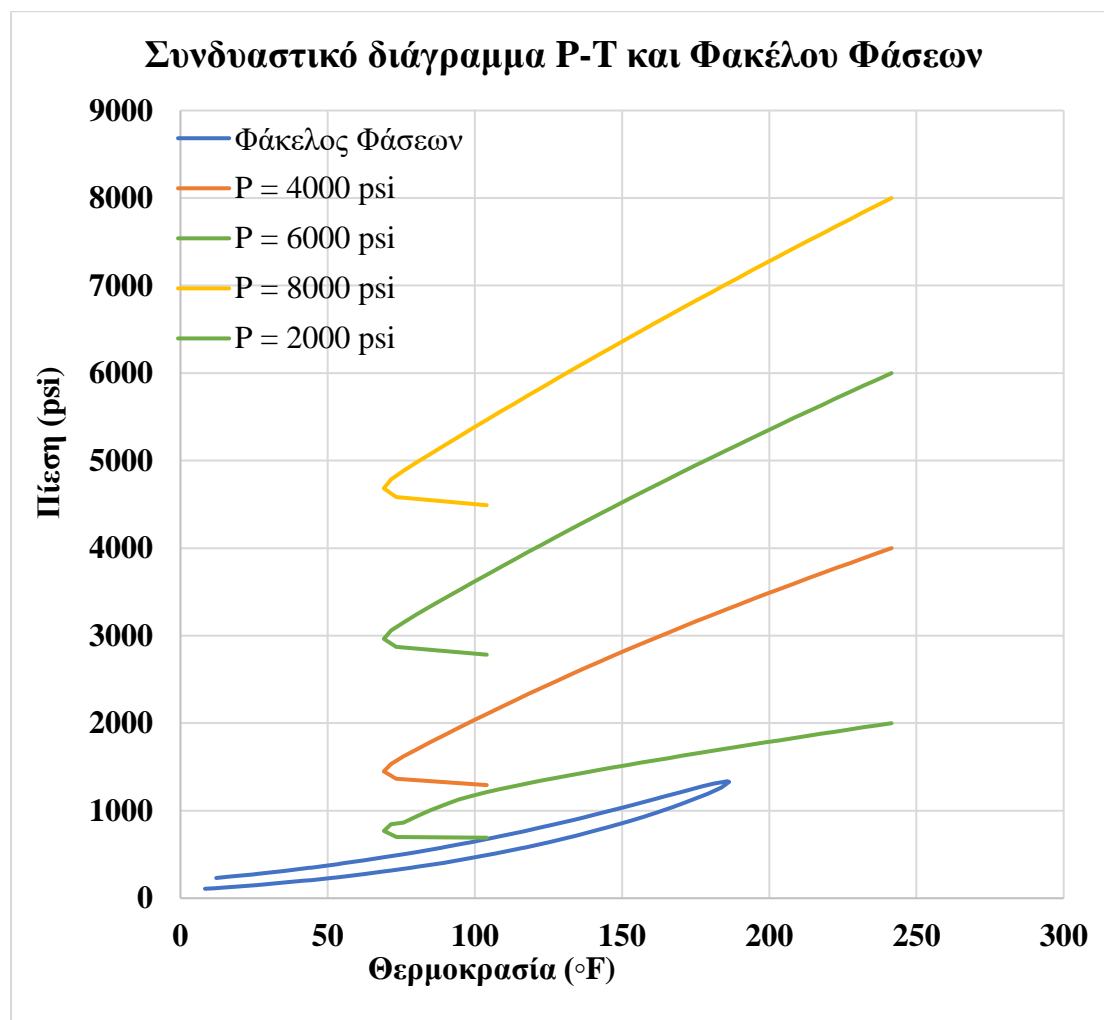


Διάγραμμα 9. Συνδυαστικό διάγραμμα προφίλ πίεσης - θερμοκρασίας και Φακέλου Φάσεων για διαφορετικές τιμές της θερμοκρασίας εισπίεσης του όξινου αερίου για σύσταση (85 % CO₂ / 14 % H₂S / 1% C₁)

Στο παραπάνω διάγραμμα, παρατηρείται, όπως και στην προηγούμενη περίπτωση με την υψηλότερη σύσταση σε H₂S, ότι το κυκλοφορούν ρευστό φτάνει πολύ γρήγορα στην θερμοκρασία του σχηματισμού, ανεξάρτητα από αυτήν με την οποία εισπιάστηκε στην κεφαλή της γεώτρησης εισπίεσης. Για την ελάχιστη και μέγιστη θερμοκρασία, οι αντίστοιχες τιμές για την πίεση στην κεφαλή της γεώτρησης είναι 3,600.43 psi και 3,622.06 psi αντίστοιχα.

6.2.4 Ανάλυση Ευαισθησίας για την πίεση στον πυθμένα της γεώτρησης εισπίεσης P_{bh}

Με την βοήθεια του λογισμικού PROSPER, υπολογίστηκε το προφίλ της πίεσης και θερμοκρασίας για κάθε μια τιμή της πίεσης στον πυθμένα της γεώτρησης.



Διάγραμμα 10. Συνδυαστικό διάγραμμα προφίλ πίεσης - θερμοκρασίας και Φακέλου Φάσεων για διαφορετικές τιμές της πίεσης στον πυθμένα της γεώτρησης εισπίεσης για σύσταση (85 % CO₂ / 14 % H₂S / 1% C₁)

Όπως και στην περίπτωση με την υψηλότερη σύσταση σε H₂S, υπάρχει ουσιαστική μεταβολή στην πίεση στην κεφαλή της γεώτρησης για την αντίστοιχη στον πυθμένα της. Επίσης, όπως και προηγουμένως, έγινε μια παραπάνω δοκιμή που αφορούσε πίεση στον πυθμένα της γεώτρησης ίση με 3,000 psi, με αποτέλεσμα το προφίλ πίεσης – θερμοκρασίας να τέμνει το φάκελο φάσεων και το κυκλοφορούν ρευστό να αποκτά διφασική ροή, γεγονός που είναι ανεπιθύμητο.

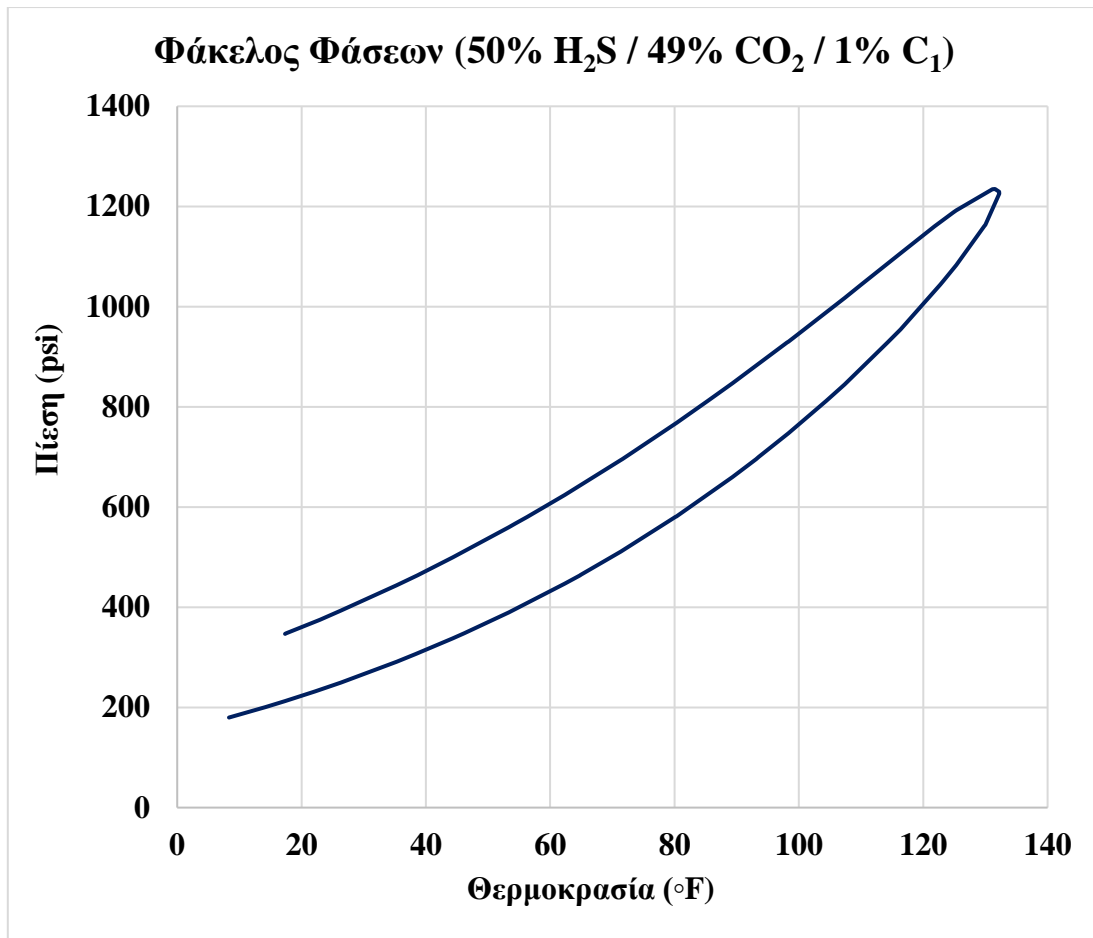
6.3 Μελέτη περίπτωσης για σύσταση όξινου αερίου (50% H₂S / 49% CO₂ / 1% C₁)

Σε αυτή την περίπτωση, το μείγμα που εισπνέζεται έχει ίση σύσταση σε H₂S και CO₂. Σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα, επιλέχθηκαν 5 διαφορετικά σενάρια για να πραγματοποιηθεί η ανάλυση ευαισθησίας, με την ίδια λογική που επιλέχθηκαν και στις δύο προηγούμενες περιπτώσεις.

Πίνακας 7. Σενάρια μελέτης για σύσταση (50% H₂S / 49% CO₂ / 1% C₁)

Σενάρια	1	2	3	4
Παράμετροι				
Σύσταση όξινου αερίου (%) H ₂ S/CO ₂ /C ₁	50/49/1	50/49/1	50/49/1	50/49/1
Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας (BTU/h/ft ² /°F)	2 6 8 100	100	100	100
Ρυθμός εισπνέσεως όξινου αερίου (MMscf/day)	5.645	1.5 3 5.645	5.645	5.645
Θερμοκρασία εισπνέζόμενου όξινου αερίου (F)	104	104	70 104 140 176	104
Πίεση πυθμένα γεώτρησης εισπνέσεως (psi)	7000	7000	7000	4000 6000 7000 8000

Με την βοήθεια του λογισμικού PROSPER, για την σύσταση που μελετάται, υπολογίστηκε ο φάκελος φάσεων.

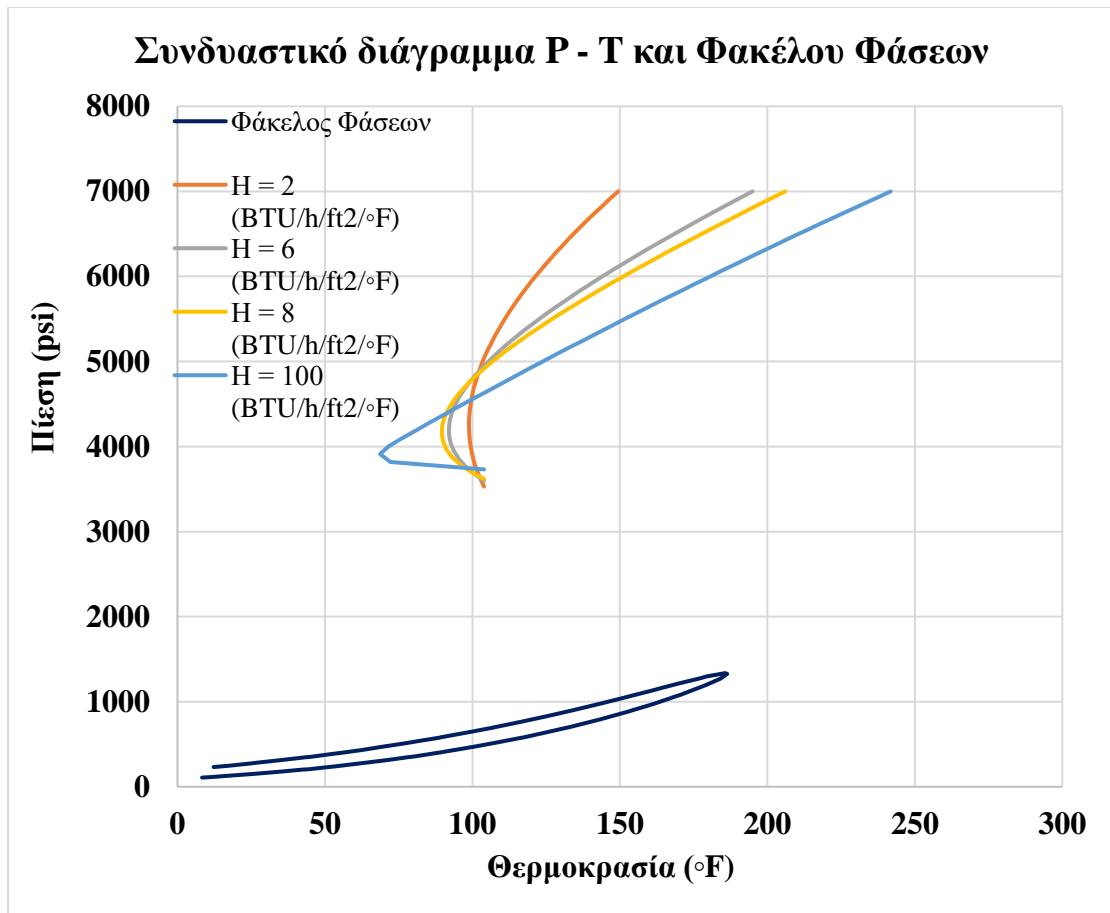


Διάγραμμα 11. Φάκελος Φάσεων για σύσταση (50% H₂S / 49% CO₂ / 1% C₁)

Από τον φάκελο φάσεων, παρατηρείται ότι η κρίσιμη θερμοκρασία του ρευστού είναι ίση με 130.85 °F και η κρίσιμη του πίεση είναι ίση με 1,231.83 psi.

6.3.1 Ανάλυση Ευαισθησίας για τον συντελεστή εναλλαγής θερμότητας *H*

Με την βοήθεια του λογισμικού PROSPER, υπολογίστηκε το προφίλ της πίεσης και θερμοκρασίας για κάθε μια τιμή του συντελεστή εναλλαγής θερμότητας.

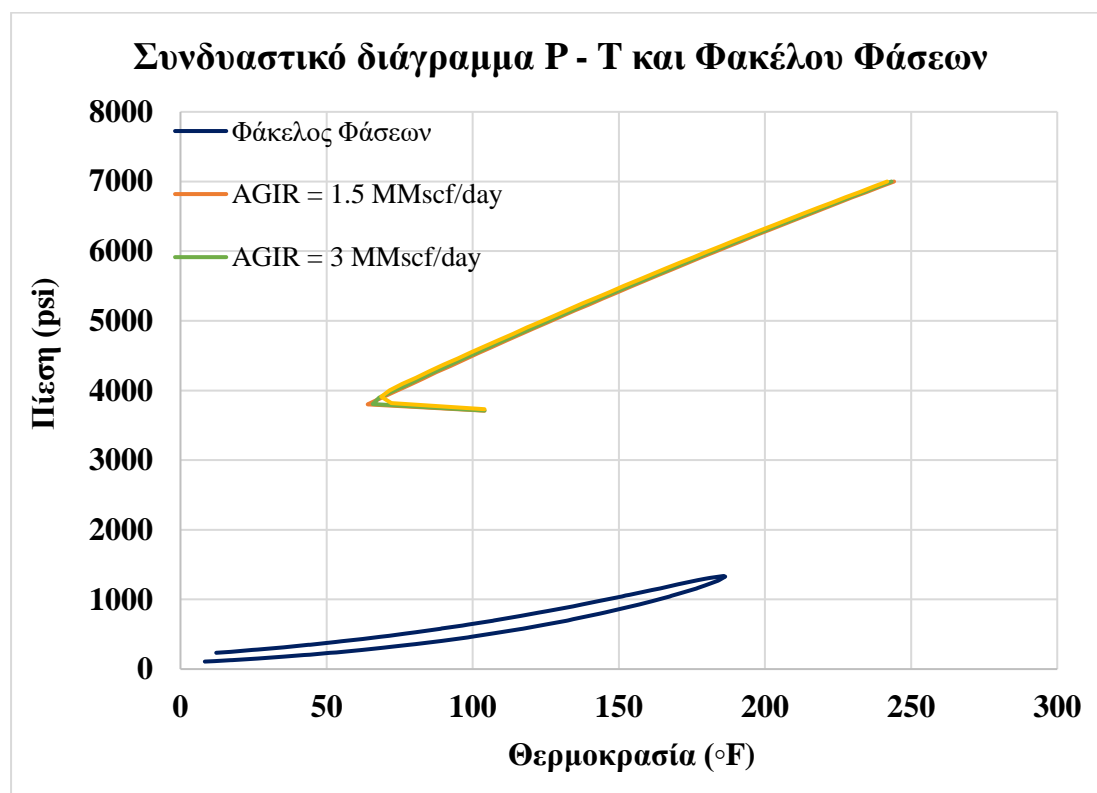


Διάγραμμα 12. Συνδυαστικό διάγραμμα προφίλ πίεσης - θερμοκρασίας και Φακέλου Φάσεων για διαφορετικές τιμές του συντελεστή εναλλαγής θερμότητας H για σύσταση (50% H_2S / 49% CO_2 / 1% C_1)

Όπως και στις προηγούμενες συστάσεις που μελετήθηκαν, έτσι και σε αυτήν, οι διαφορετικές τιμές στον συντελεστή εναλλαγής θερμότητας, δίνουν πανομοιότυπες πιέσεις στην κεφαλή της γεώτρησης, με την ελάχιστη και την μέγιστη τιμή, να δίνουν 3,516.63 psi και 3,715.38 psi αντίστοιχα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως παρότι το ρευστό αλλάζει θερμοκρασία κατά μήκος της γεώτρησης, η μέση θερμοκρασία μοιάζει να είναι σταθερή και δεν επηρεάζει την πυκνότητα του ρευστού και επομένως την αύξηση της πίεσης λόγω της βαρύτητας.

6.3.2 Ανάλυση Ευαισθησίας για τον ρυθμό εισπίεσης του όξινου αερίου AGIR

Με την βοήθεια του λογισμικού PROSPER, υπολογίστηκε το προφίλ της πίεσης και θερμοκρασίας για κάθε μια τιμή του ρυθμού εισπίεσης του όξινου αερίου (AGIR).

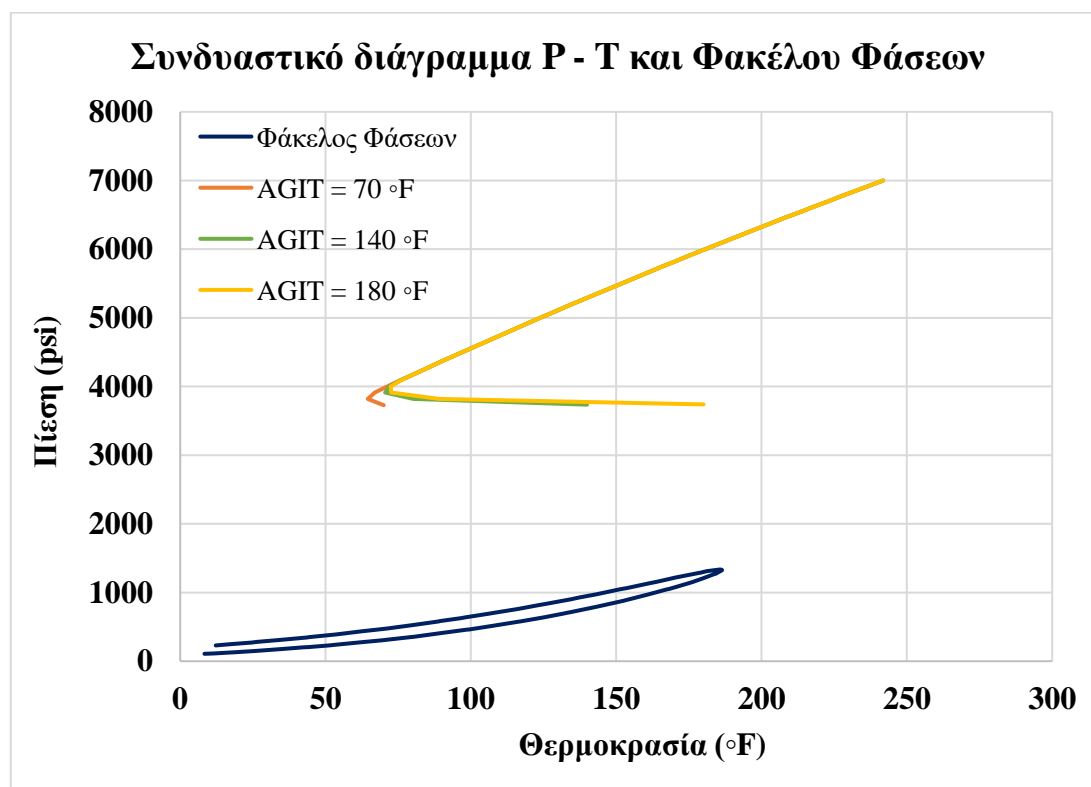


Διάγραμμα 13. Συνδυαστικό διάγραμμα προφίλ πίεσης - θερμοκρασίας και Φακέλου Φάσεων για διαφορετικές τιμές του ρυθμού εισπίεσης του όξινου αερίου AGIR για σύσταση (50% H₂S / 49% CO₂ / C₁ 1%)

Σε αυτή την περίπτωση, όπως και στις άλλες δυο προηγούμενες, οι τιμές του ρυθμού εισπίεσης, είναι αρκετά μικρές, με αποτέλεσμα το κυκλοφορούν ρευστό να μην προλαβαίνει να αποκτήσει την θερμοκρασία του περιβάλλοντος σχηματισμού. Επομένως, καθ' όλη την διάρκεια της εισπίεσής του, έχει σχετικά σταθερή πυκνότητα, άρα και η μεταβολή της πίεσής του είναι αμελητέα, με τιμές για την ελάχιστη και μέγιστη τιμή του ρυθμού εισπίεσης να είναι 3,696.49 psi και 3,715.38 psi αντίστοιχα.

6.3.3 Ανάλυση Εναισθησίας για την θερμοκρασία εισπίεσης του όξινου αερίου AGIT

Με την βοήθεια του λογισμικού PROSPER, υπολογίστηκε το προφίλ της πίεσης και θερμοκρασίας για κάθε μια τιμή της θερμοκρασίας εισπίεσης του όξινου αερίου AGIT.



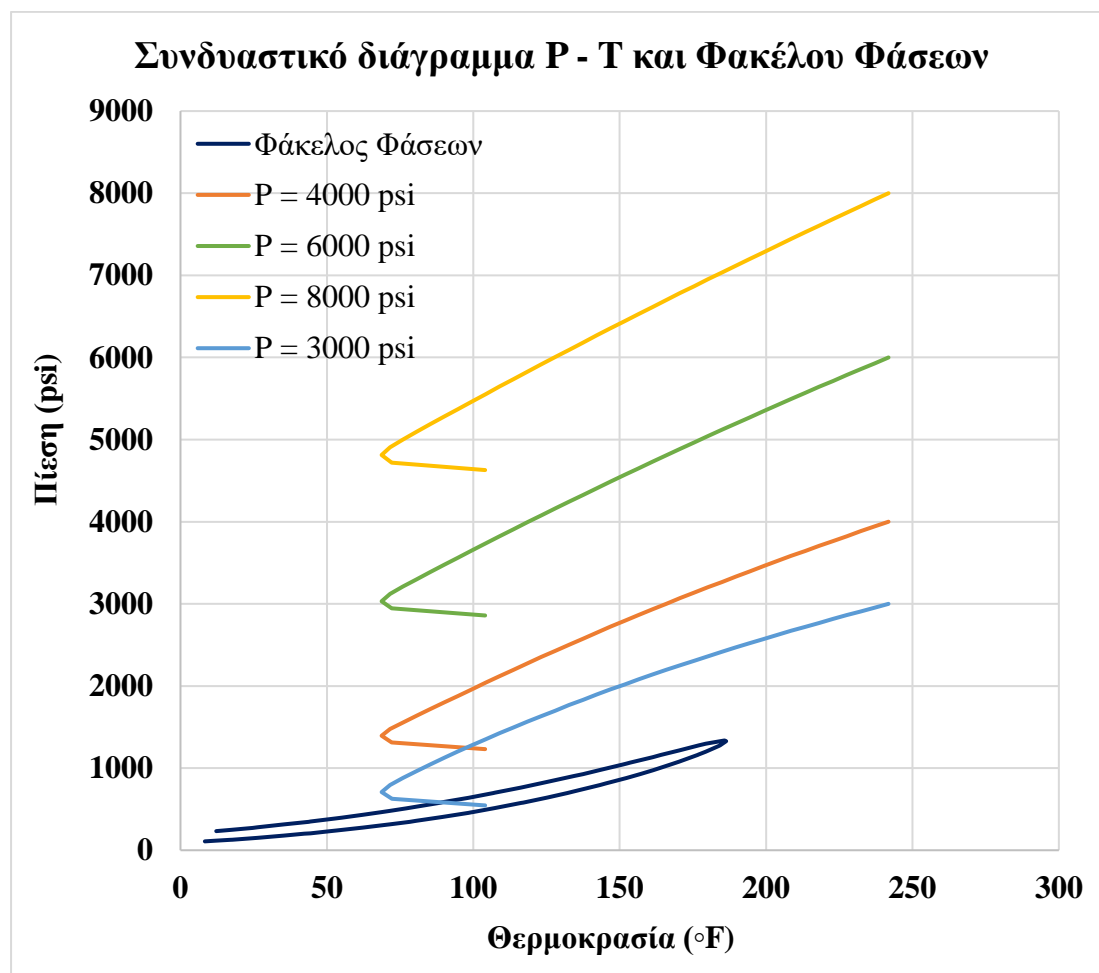
Διάγραμμα 14. Συνδυαστικό διάγραμμα προφίλ πίεσης - θερμοκρασίας και Φακέλου Φάσεων για διαφορετικές τιμές της θερμοκρασίας εισπίεσης του όξινου αερίου για σύσταση (50% H₂S / 49% CO₂ / 1% C₁)

Στο παραπάνω διάγραμμα, παρατηρείται, ότι το κυκλοφορούν ρευστό φτάνει πολύ γρήγορα στην θερμοκρασία του σχηματισμού, ανεξάρτητα από αυτήν με την οποία εισπύεστηκε στην κεφαλή της γεώτρησης εισπίεσης. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, η πυκνότητά του να είναι πρακτικά σταθερή, άρα και η μεταβολή της πίεσης του. Για την ελάχιστη και μέγιστη θερμοκρασία, οι αντίστοιχες τιμές για την πίεση στην κεφαλή της γεώτρησης είναι 3,710.72 psi και 3,726.57 psi αντίστοιχα.

6.3.4 Ανάλυση Ευαισθησίας για την πίεση στον πυθμένα της γεώτρησης εισπίεσης

P_{bh}

Με την βοήθεια του λογισμικού PROSPER, υπολογίστηκε το προφίλ της πίεσης και θερμοκρασίας για κάθε μια τιμή της πίεσης στον πυθμένα της γεώτρησης.



Διάγραμμα 15. Συνδυαστικό διάγραμμα προφίλ πίεσης – θερμοκρασίας και Φακέλου Φάσεων για διαφορετικές τιμές της πίεσης στον πυθμένα της γεώτρησης εισπίεσης για σύσταση (50% H₂S / 49 % CO₂ / 1% C₁)

Όπως ακριβώς και τις δύο προηγούμενες περιπτώσεις, υπάρχει ουσιαστική μεταβολή στην πίεση στην κεφαλή της γεώτρησης για την αντίστοιχη στον πυθμένα της. Ακόμη, έγινε μια παραπάνω δοκιμή που αφορούσε πίεση στον πυθμένα της γεώτρησης ίση με 3,000 psi, με αποτέλεσμα το προφίλ πίεσης – θερμοκρασίας να τέμνει το φάκελο φάσεων και το κυκλοφορούν ρευστό να αποκτά διαφασική ροή, γεγονός που είναι ανεπιθύμητο.

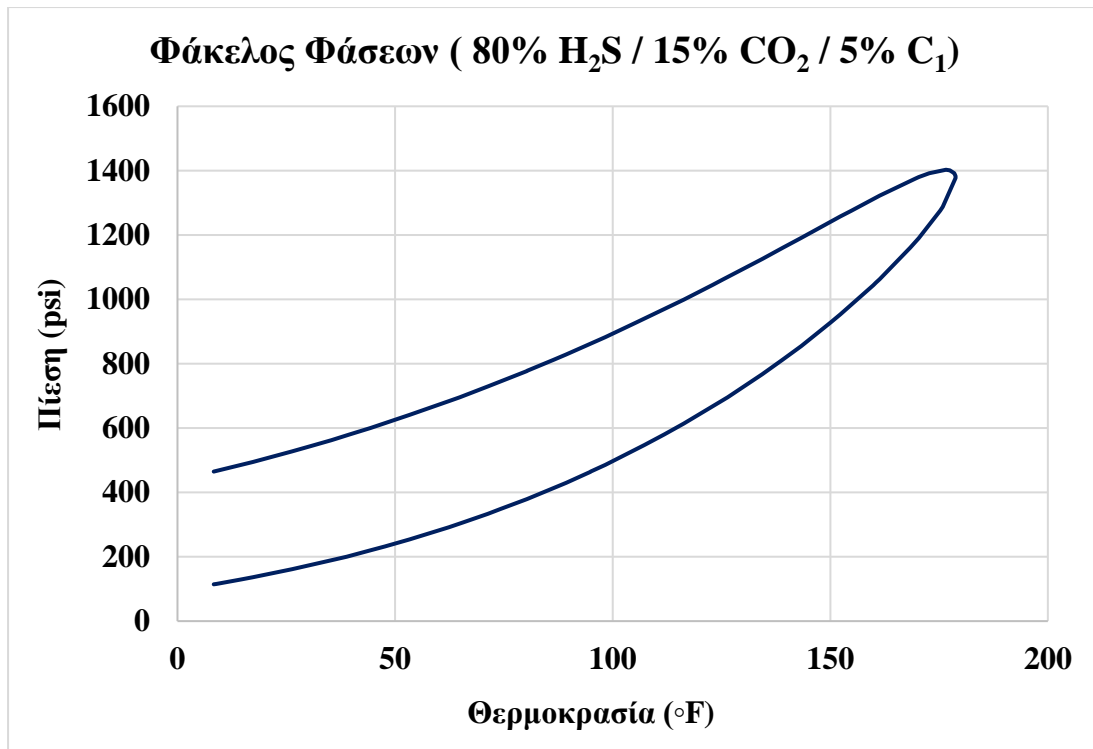
6.4 Μελέτη περίπτωσης για σύσταση όξινου αερίου (80% H₂S / 15% CO₂ / 5% C₁)

Σε αυτή την περίπτωση, το μείγμα που εισπνέζεται έχει σύσταση 80 % H₂S / 15% CO₂ / 5% C₁. Αυτή η σύσταση αναφέρεται στην περίπτωση που η γλύκανση του φυσικού αερίου δεν είναι τόσο αποτελεσματική με αποτέλεσμα το όξινο αέριο που προκύπτει να έχει υπολογίσιμη ποσότητα σε C₁. Σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα, επιλέχθηκαν 5 διαφορετικά σενάρια για να πραγματοποιηθεί η ανάλυση ευαισθησίας, με την ίδια λογική που επιλέχθηκαν και της προηγούμενες περιπτώσεις.

Πίνακας 8. Σενάρια μελέτης για σύσταση (80% H₂S / 15% CO₂ / 5% C₁)

Σενάρια	1	2	3	4
Παράμετροι				
Σύσταση όξινου αερίου (%) H₂S/CO₂/C₁	80/15/5	80/15/5	80/15/5	80/15/5
Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας (BTU/h/ft²/°F)	2 6 8 100	100	100	100
Ρυθμός εισπνέσης όξινου αερίου (MMscf/day)	5.645	1.5 3 5.645	5.645	5.645
Θερμοκρασία εισπνέζόμενου όξινου αερίου (F)	104	104	70 104 140 176	104
Πίεση πυθμένα γεώτρησης εισπνέσης (psi)	7000	7000	7000	4000 6000 7000 8000

Με την βοήθεια του λογισμικού PROSPER, για την σύσταση που μελετάται, υπολογίστηκε ο φάκελος φάσεων.



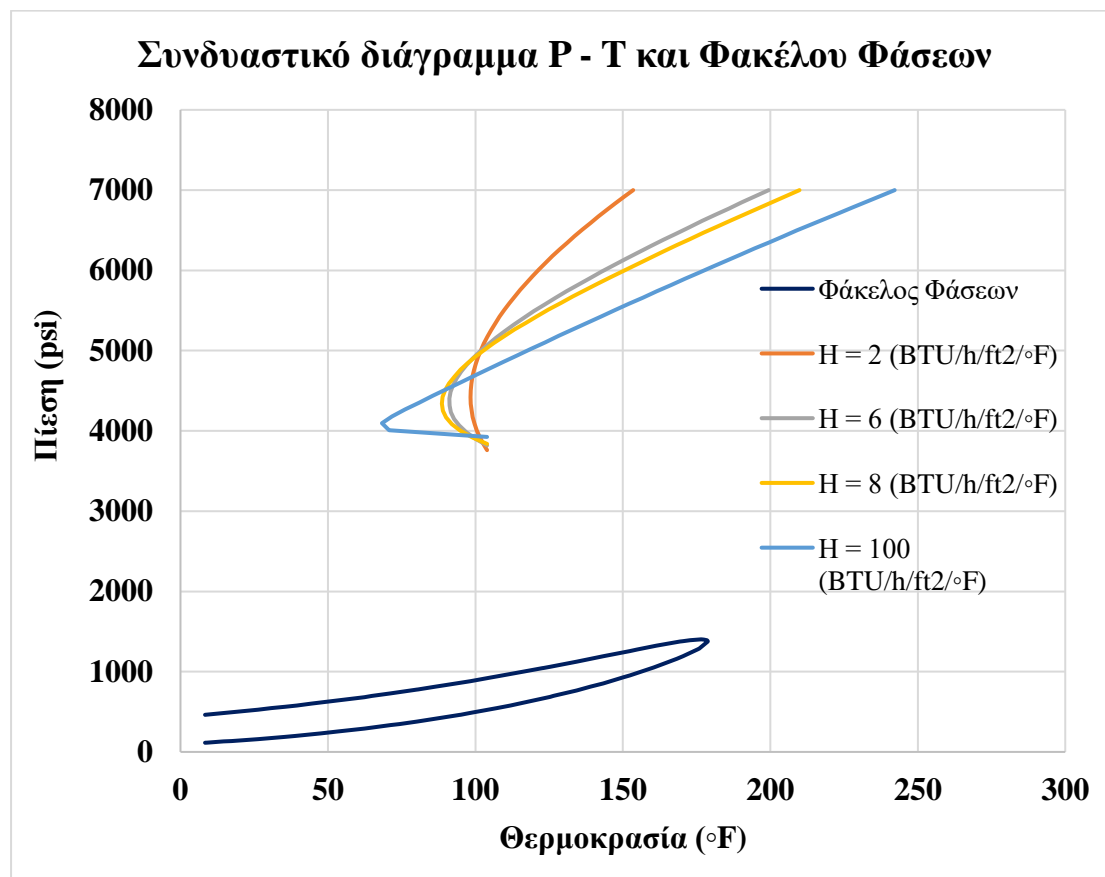
Διάγραμμα 16. Φάκελος Φάσεων για σύσταση (80% H₂S / 15% CO₂ / 5% C₁)

Από το Διάγραμμα 15, παρατηρείται ότι ο φάκελος φάσεων, για την δεδομένη σύσταση, έχει περισσότερο εμβαδόν στην διφασική του περιοχή, με αποτέλεσμα το προφίλ πίεσης και θερμοκρασίας που θα μελετηθεί παρακάτω, να έχει μεγαλύτερη πιθανότητα να βρεθεί στην διφασική περιοχή από ότι της προηγούμενες συστάσεις.

Επίσης, για το μείγμα που εισπνέζεται, η κρίσιμή του θερμοκρασία είναι 177.46 °F ενώ η κρίσιμή του πίεση είναι 1,401.54 psi.

6.4.1 Ανάλυση Ευαισθησίας για τον συντελεστή εναλλαγής θερμότητας H

Με την βοήθεια του λογισμικού PROSPER, υπολογίστηκε το προφίλ της πίεσης και θερμοκρασίας για κάθε μια τιμή του συντελεστή εναλλαγής θερμότητας.

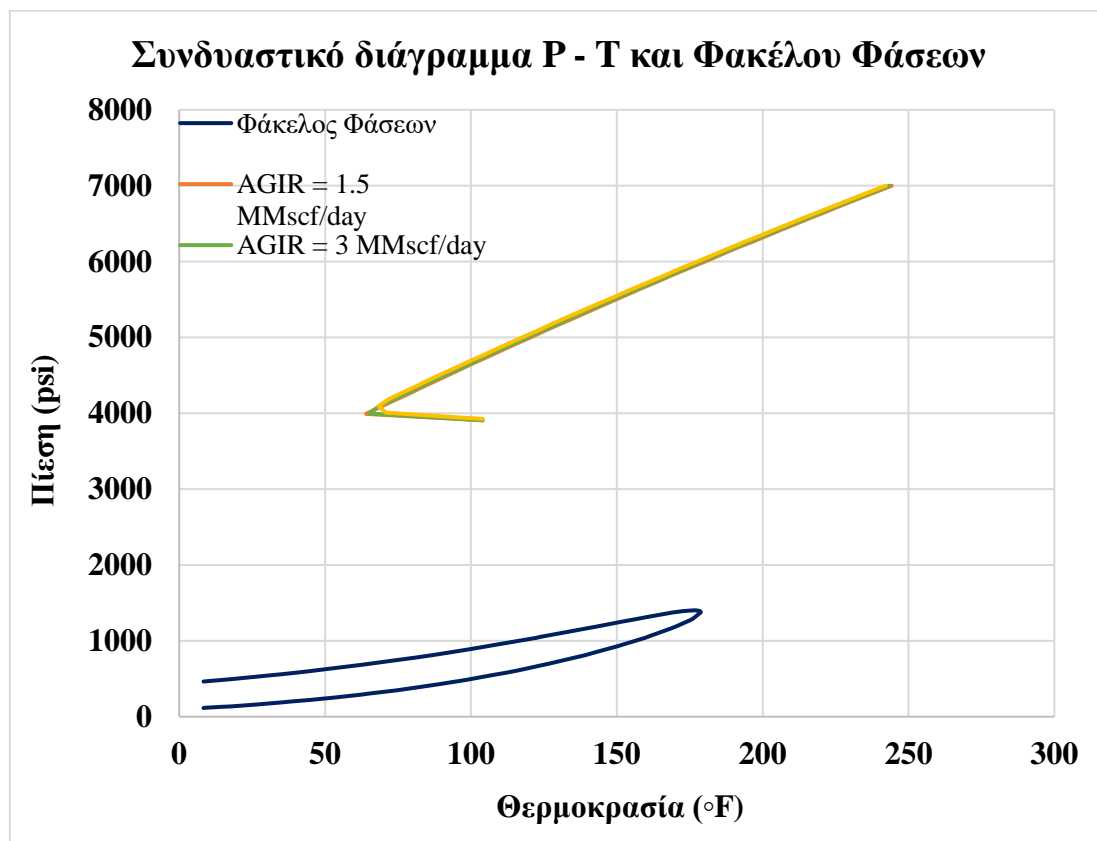


Διάγραμμα 17. Συνδυαστικό διάγραμμα προφίλ πίεσης – θερμοκρασίας και Φακέλου Φάσεων για διαφορετικές τιμές του συντελεστή εναλλαγής θερμότητας H για σύσταση (80% H_2S / 15% CO_2 / 5% C_1)

Παρά το γεγονός πως για την δεδομένη σύσταση, ο φάκελος φάσεων, είναι πιο διευρυμένος, οι διαφορετικές τιμές στον συντελεστή εναλλαγής θερμότητας, δίνουν πανομοιότυπες πιέσεις στην κεφαλή της γεώτρησης, με την ελάχιστη και την μέγιστη τιμή, να δίνουν 3,760.21 psi και 3,731.19 psi αντίστοιχα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως παρότι το ρευστό αλλάζει θερμοκρασία κατά μήκος της γεώτρησης, η μέση θερμοκρασία μοιάζει να είναι σταθερή και δεν επηρεάζει την πυκνότητα του ρευστού και επομένως την αύξηση της πίεσης λόγω της βαρύτητας.

6.4.2 Ανάλυση Ευαισθησίας για τον ρυθμό εισπίεσης του όξινου αερίου AGIR

Με την βοήθεια του λογισμικού PROSPER, υπολογίστηκε το προφίλ της πίεσης και θερμοκρασίας για κάθε μια τιμή του ρυθμού εισπίεσης του όξινου αερίου (AGIR).

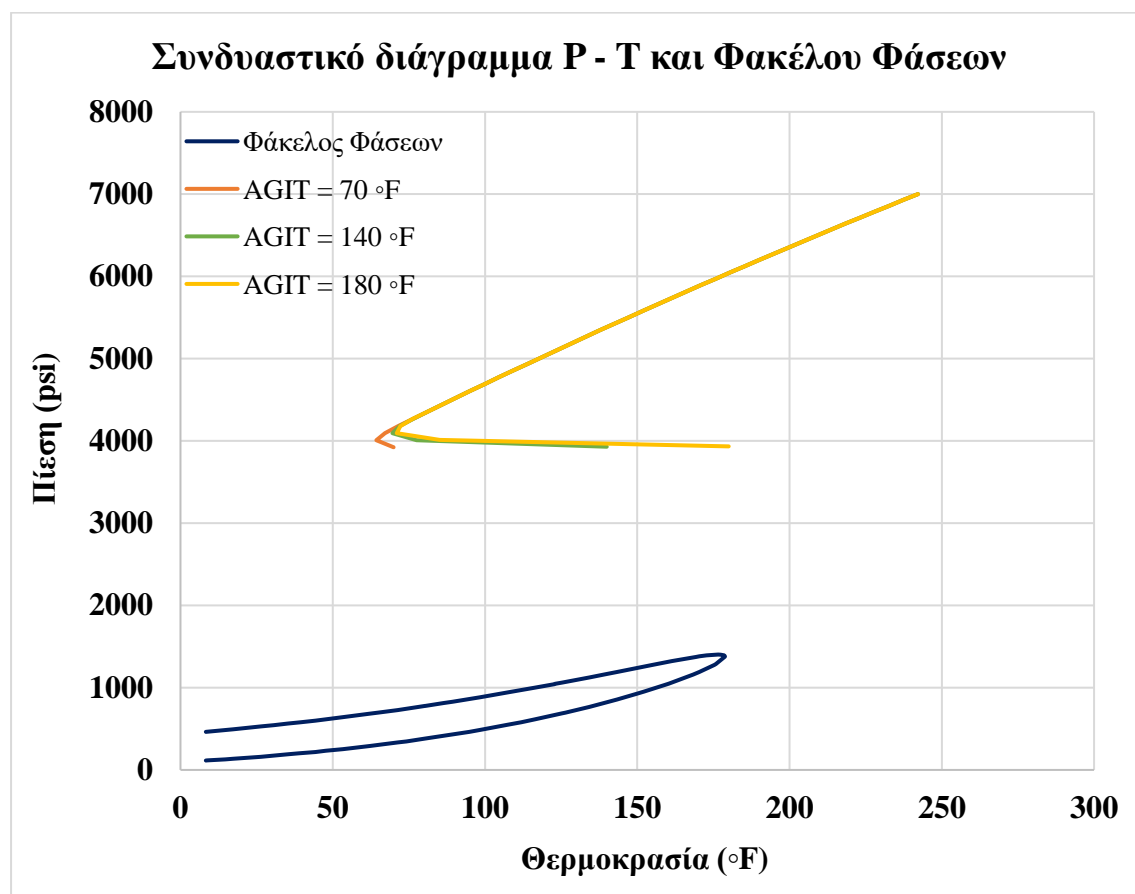


Διάγραμμα 18. Συνδυαστικό διάγραμμα προφίλ πίεσης – θερμοκρασίας και Φακέλου Φάσεων για διαφορετικές τιμές του ρυθμού εισπίεσης του όξινου αερίου AGIR για σύσταση (80% H₂S / 15% CO₂ / 5% C₁)

Όπως και σε όλες τις προηγούμενες συστάσεις, έτσι και σε αυτήν, το εισπιεζόμενο ρευστό δεν προλαβαίνει να ανταλλάξει θερμοκρασία με τον περιβάλλοντα σχηματισμό εξαιτίας του μικρού ρυθμού εισπίεσης στην κεφαλή της γεώτρησης. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, η μέση θερμοκρασία του να μένει πρακτικά σταθερή, άρα να μην επηρεάζεται ουσιαστικά η πυκνότητά του και κατ' επέκταση οι τιμές της πίεσης στην κεφαλή της γεώτρησης να είναι πανομοιότυπες, για την ελάχιστη και την μέγιστη τιμή του ρυθμού εισπίεσης, με αυτές να είναι 3,906.52 psi και 3,925.1 psi αντίστοιχα.

6.4.3 Ανάλυση Εναισθησίας για την θερμοκρασία εισπίεσης του όξινου αερίου AGIT

Με την βοήθεια του λογισμικού PROSPER, υπολογίστηκε το προφίλ της πίεσης και θερμοκρασίας για κάθε μια τιμή της θερμοκρασίας εισπίεσης του όξινου αερίου AGIT.

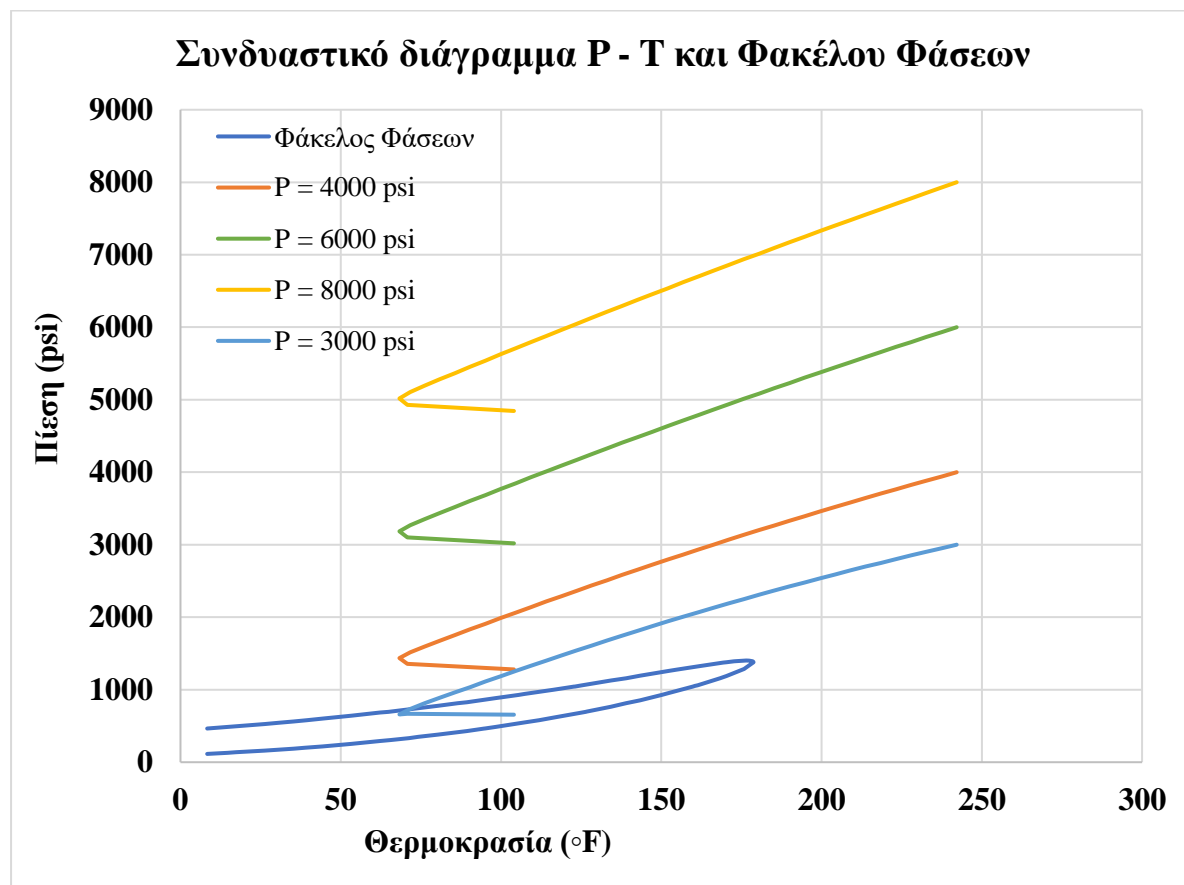


Διάγραμμα 19. Συνδυαστικό διάγραμμα προφίλ πίεσης - θερμοκρασίας και Φακέλου Φάσεων για διαφορετικές τιμές της θερμοκρασίας εισπίεσης του όξινου αερίου για σύσταση (80% H₂S / 15% CO₂ / 5% C₁)

Στο παραπάνω διάγραμμα, παρατηρείται, ότι το κυκλοφορούν ρευστό φτάνει πολύ γρήγορα στην θερμοκρασία του σχηματισμού, ανεξάρτητα από αυτήν με την οποία εισπύεστηκε στην κεφαλή της γεώτρησης εισπίεσης. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, η πυκνότητά του να είναι πρακτικά σταθερή, άρα και η μεταβολή της πίεσης του. Για την ελάχιστη και μέγιστη θερμοκρασία, οι αντίστοιχες τιμές για την πίεση στην κεφαλή της γεώτρησης είναι 3,922.51 psi και 3,933.33 psi αντίστοιχα.

6.4.4 Ανάλυση Ευαισθησίας για την πίεση στον πυθμένα της γεώτρησης εισπίεσης P_{bh}

Με την βοήθεια του λογισμικού PROSPER, υπολογίστηκε το προφίλ της πίεσης και θερμοκρασίας για κάθε μια τιμή της πίεσης στον πυθμένα της γεώτρησης.



Διάγραμμα 20. Συνδυαστικό διάγραμμα προφίλ πίεσης – θερμοκρασίας και Φακέλου Φάσεων για διαφορετικές τιμές της πίεσης στον πυθμένα της γεώτρησης εισπίεσης για σύσταση (80% H₂S / 15 % CO₂ / 5% C₁)

Όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 20, σε αυτήν την περίπτωση, έχουμε ουσιαστική μεταβολή της πίεσης στην κεφαλή της γεώτρησης για τις διαφορετικές αυτές στον πυθμένα της. Επίσης, έγινε μια παραπάνω δοκιμή για πίεση πυθμένα ίση με 3,000 psi, με αποτέλεσμα το προφίλ πίεσης και θερμοκρασίας να τέμνει τον φάκελο και το κυκλοφορούν ρευστό να εισέρχεται στην διφασική περιοχή, γεγονός ανεπιθύμητο.

6.5 Σχολιασμός και ποιοτικός έλεγχος των αποτελεσμάτων

Στον Πίνακα 9, παρακάτω, παρουσιάζεται η τιμή της μέσης πίεσης στην κεφαλή της γεώτρησης εισπίεσης για κάθε μια παράμετρο που έγινε ανάλυση ευαισθησίας. Γίνεται αντιληπτό πως για τις διαφορετικές συστάσεις που πραγματοποιήθηκε η ανάλυση ευαισθησίας η διαφορά στην μέση πίεση είναι της τάξεως των μερικών εκατοντάδων psi.

Πίνακας 9. Αποτελέσματα από τον υπολογισμό της μέσης πίεσης εισπίεσης στην κεφαλή της γεώτρησης

Σύσταση όξινου αερίου (%) H ₂ S/CO ₂ /C ₁	85/14/1	14/85/1	50/49/1	80/15/5
Μέση πίεση στην κεφαλή της γεώτρησης (psi)	3,802.37	3,614.43	3,720.98	3,863.21

Ένα σημαντικό πρόβλημα που έδειξε να έχει το λογισμικό PROSPER, είναι πως δεν έχει την δυνατότητα να χαρακτηρίσει το ρευστό που εισπνέζεται ως υπερκρίσιμο (supercritical).

Bottom Measured Depth	True Vertical Depth	Pressure	Temperature	Gradient	Holdup	Regime	Heat Transfer Coefficient
(m)	(m)	(psig)	(deg F)	(psi/ft)			(BTU/h/ft ² /F)
2900.0	2900.0	7000.00	242.10				
2825.6	2825.6	6926.13	237.36	0.30279	0	Gas	100.0000
2751.3	2751.3	6851.86	232.62	0.30444	0	Gas	100.0000
2676.9	2676.9	6777.19	227.87	0.3061	0	Gas	100.0000
2602.6	2602.6	6702.10	223.13	0.30778	0	Gas	100.0000
2528.2	2528.2	6626.60	218.38	0.30948	0	Gas	100.0000
2453.8	2453.8	6550.68	213.64	0.3112	0	Gas	100.0000
2379.5	2379.5	6474.34	208.90	0.31292	0	Gas	100.0000
2305.1	2305.1	6397.57	204.15	0.31466	0	Gas	100.0000
2230.8	2230.8	6320.38	199.41	0.3164	0	Gas	100.0000
2156.4	2156.4	6242.77	194.67	0.31816	0	Gas	100.0000
2082.1	2082.1	6164.72	189.92	0.31993	0	Gas	100.0000
2007.7	2007.7	6086.23	185.18	0.32171	0	Gas	100.0000
1933.3	1933.3	6007.41	180.44	0.32309	1.000	Bubble	100.0000
1859.0	1859.0	5928.15	175.69	0.32489	1.000	Bubble	100.0000
1784.6	1784.6	5848.45	170.95	0.3267	1.000	Bubble	100.0000
1710.3	1710.3	5768.30	166.21	0.32852	1.000	Bubble	100.0000
1635.9	1635.9	5687.71	161.46	0.33035	1.000	Bubble	100.0000
1561.5	1561.5	5606.67	156.72	0.33219	1.000	Bubble	100.0000
1487.2	1487.2	5525.18	151.97	0.33403	1.000	Bubble	100.0000
1412.8	1412.8	5443.24	147.23	0.33587	1.000	Bubble	100.0000
1338.5	1338.5	5360.85	142.49	0.33772	1.000	Bubble	100.0000
1264.1	1264.1	5278.01	137.74	0.33957	1.000	Bubble	100.0000
1189.7	1189.7	5194.71	133.00	0.34143	1.000	Bubble	100.0000
1115.4	1115.4	5110.96	128.26	0.3433	1.000	Bubble	100.0000
1041.0	1041.0	5026.75	123.51	0.34517	1.000	Bubble	100.0000
966.7	966.7	4942.10	118.77	0.34697	1.000	Bubble	100.0000
892.3	892.3	4857.00	114.03	0.34885	1.000	Bubble	100.0000
817.9	817.9	4771.44	109.28	0.35073	1.000	Bubble	100.0000
743.6	743.6	4685.42	104.54	0.3526	1.000	Bubble	100.0000
669.2	669.2	4598.94	99.79	0.35446	1.000	Bubble	100.0000
594.9	594.9	4512.01	95.05	0.35632	1.000	Bubble	100.0000
520.5	520.5	4424.63	90.31	0.35817	1.000	Bubble	100.0000
446.2	446.2	4336.81	85.57	0.36	1.000	Bubble	100.0000
371.8	371.8	4248.15	80.83	0.36342	1.000	Bubble	100.0000
297.4	297.4	4159.88	76.14	0.36181	1.000	Bubble	100.0000
223.1	223.1	4071.17	71.68	0.36364	1.000	Bubble	100.0000
148.7	148.7	3982.10	68.36	0.3651	1.000	Bubble	100.0000
74.4	74.4	3893.13	70.97	0.36468	1.000	Bubble	100.0000
0	0	3805.90	104.00	0.35758	1.000	Bubble	100.0000
0	0	3805.90	104.00	0.35758		Well-head	100.0000

Εικόνα 23. Αναλυτικά αποτελέσματα των ιδιοτήτων του ρευστού από το PROSPER

Στην Εικόνα 23, παραπάνω, φαίνεται ένα παράδειγμα του παραπάνω ισχυρισμού και αφορά την περίπτωση του ρευστού με σύσταση 85 % H₂S / 14 % CO₂ / 1% C₁ , συντελεστή εναλλαγής θερμότητας 100 BTU/h/ft²/°F , ρυθμό εισπίεσης του όξινου αερίου 5.645 MMscf/day , θερμοκρασία εισπίεσης του όξινου αερίου 104 °F και πίεση στον πυθμένα της γεώτρησης.

Παρατηρείται πως στην στήλη που αναγράφονται τα αποτελέσματα για το καθεστώς της ροής (flow regime) στην γεώτρηση , το ρευστό φαίνεται να έχει διφασική ροή αφού αναγράφεται πως υπάρχει στη ροή του φυσαλίδα (bubble). Αν ήταν σωστός αυτός ο υπολογισμός, τότε υπήρχε λάθος στην μελέτη του υπολογισμού της πίεσης στην κεφαλή της γεώτρησης, καθώς δεν εξασφαλίζεται μονοφασική ροή κατά μήκος όλης της γεώτρησης εισπίεσης.

Oil Density	Gas Density	Water Density	Liquid Density	Mixture Density	Oil Viscosity	Water Viscosity	Gas Viscosity	Liquid Viscosity
(Kg/m3)	(Kg/m3)	(Kg/m3)	(Kg/m3)	(Kg/m3)	(centipoise)	(centipoise)	(centipoise)	(centipoise)
704.468	704.468	956.481	704.468		1e-6	0.24602	0.085713	1e-6
708.214	708.214	958.330	708.214	708.214	1e-6	0.25337	0.086584	1e-6
711.998	711.998	960.159	711.998	711.998	1e-6	0.26106	0.087485	1e-6
715.820	715.820	961.969	715.820	715.820	1e-6	0.26909	0.088419	1e-6
719.680	719.680	963.758	719.680	719.680	1e-6	0.27749	0.089386	1e-6
723.576	723.576	965.526	723.576	723.576	1e-6	0.28629	0.090388	1e-6
727.509	727.509	967.272	727.509	727.509	1e-6	0.2955	0.091425	1e-6
731.461	731.461	968.995	731.461	731.461	1e-6	0.30516	0.092496	1e-6
735.436	735.436	970.695	735.436	735.436	1e-6	0.31529	0.093602	1e-6
739.440	739.440	972.371	739.440	739.440	1e-6	0.32592	0.094746	1e-6
743.471	743.471	974.022	743.471	743.471	1e-6	0.33709	0.09593	1e-6
747.531	747.531	975.647	747.531	747.531	1e-6	0.34883	0.097157	1e-6
751.614	0.001	977.246	751.614	7.5161e-8	0.098426	0.36119	1e-6	0.098426
755.722	0.001	978.818	755.722	755.722	0.09974	0.3742	1e-6	0.09974
759.852	0.001	980.361	759.852	759.852	0.1011	0.38791	1e-6	0.1011
764.017	0.001	981.876	764.017	764.017	0.10251	0.40238	1e-6	0.10251
768.199	0.001	983.361	768.199	768.199	0.10397	0.41766	1e-6	0.10397
772.395	0.001	984.815	772.395	772.395	0.10549	0.43381	1e-6	0.10549
776.604	0.001	986.237	776.604	776.604	0.10705	0.4509	1e-6	0.10705
780.824	0.001	987.627	780.824	780.824	0.10866	0.469	1e-6	0.10866
785.052	0.001	988.984	785.052	785.052	0.11033	0.48819	1e-6	0.11033
789.287	0.001	990.306	789.287	789.287	0.11206	0.50856	1e-6	0.11206
793.544	0.001	991.593	793.544	793.544	0.11385	0.5302	1e-6	0.11385
797.825	0.001	992.844	797.825	797.825	0.11571	0.55324	1e-6	0.11571
802.108	0.001	994.058	802.108	802.108	0.11764	0.57778	1e-6	0.11764
806.228	0.001	995.234	806.228	806.228	0.11954	0.60395	1e-6	0.11954
810.535	0.001	996.372	810.535	810.535	0.1216	0.63192	1e-6	0.1216
814.839	0.001	997.471	814.839	814.839	0.12374	0.66183	1e-6	0.12374
819.136	0.001	998.532	819.136	819.136	0.12594	0.69388	1e-6	0.12594
823.422	0.001	999.550	823.422	823.422	0.12821	0.72828	1e-6	0.12821
827.693	0.001	1000.524	827.693	827.693	0.13054	0.76524	1e-6	0.13054
831.944	0.001	1001.450	831.944	831.944	0.13295	0.80504	1e-6	0.13295
836.167	0.001	1002.328	836.167	836.167	0.13543	0.84796	1e-6	0.13543
843.881	0.001	1003.155	843.881	843.881	0.14025	0.89433	1e-6	0.14025
848.330	0.001	1003.927	848.330	848.330	0.14313	0.94444	1e-6	0.14313
844.584	0.001	1004.638	844.584	844.584	0.14051	0.99827	1e-6	0.14051
848.633	0.001	1005.258	848.633	848.633	0.14314	1.0539	1e-6	0.14314
851.283	0.001	1005.648	851.283	851.283	0.1449	1.0981	1e-6	0.1449
846.684	0.001	1005.101	846.684	846.684	0.1418	1.0631	1e-6	0.1418
808.405	0.001	998.514	808.405	808.405	0.12021	0.73234	1e-6	0.12021
808.405	0.001	998.514	808.405	808.405	0.12021	0.73234	1e-6	0.12021

Εικόνα 24. Αναλυτικά αποτελέσματα των ιδιοτήτων του ρευστού από το PROSPER

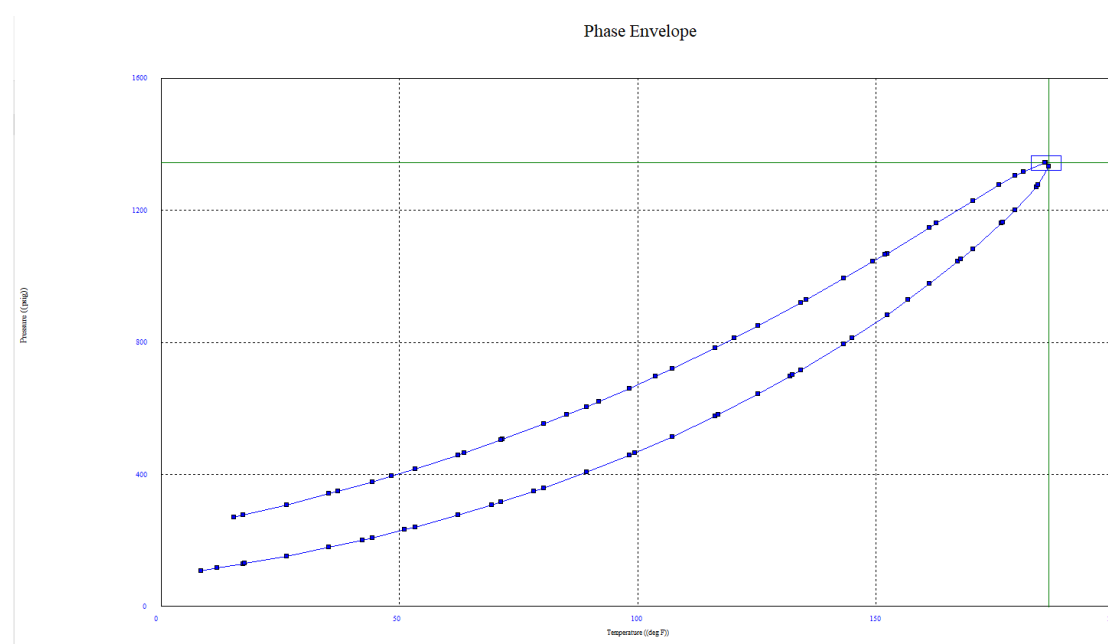
Παρόλα αυτά, όπως φαίνεται παραπάνω στην Εικόνα 24, στα αναλυτικά αποτελέσματα υπολογισμού των ιδιοτήτων του ρευστού, παρατηρείται πως το ρευστό εισπίζεται είτε ως υγρό είτε σε υπερκρίσιμη κατάσταση, καθώς η πυκνότητα του αερίου είναι αμελητέα για το τμήμα της γεώτρησης όπου αναφέρθηκε ότι υπάρχει διφασική ροή (φυσάλιδα). Επίσης, η πυκνότητα τόσο του αερίου όσο και του υγρού, όπως φαίνεται στην Εικόνα 25 παρακάτω, έχουν ακριβώς τις ίδιες τιμές, γεγονός που υποδηλώνει πως το ρευστό είναι σε υπερκρίσιμη κατάσταση.

Oil Density	Gas Density	Water Density	Liquid Density	Mixture Density	Oil Viscosity	Water Viscosity	Gas Viscosity	Liquid Viscosity
(Kg/m3)	(Kg/m3)	(Kg/m3)	(Kg/m3)	(Kg/m3)	(centipoise)	(centipoise)	(centipoise)	(centipoise)
704.468	704.468	956.481	704.468		1e-6	0.24602	0.085713	1e-6
708.214	708.214	958.330	708.214	708.214	1e-6	0.25337	0.086584	1e-6
711.998	711.998	960.159	711.998	711.998	1e-6	0.26106	0.087485	1e-6
715.820	715.820	961.969	715.820	715.820	1e-6	0.26909	0.088419	1e-6
719.680	719.680	963.758	719.680	719.680	1e-6	0.27749	0.089386	1e-6
723.576	723.576	965.526	723.576	723.576	1e-6	0.28629	0.090388	1e-6
727.509	727.509	967.272	727.509	727.509	1e-6	0.2955	0.091425	1e-6
731.461	731.461	968.995	731.461	731.461	1e-6	0.30516	0.092496	1e-6
735.436	735.436	970.695	735.436	735.436	1e-6	0.31529	0.093602	1e-6
739.440	739.440	972.371	739.440	739.440	1e-6	0.32592	0.094746	1e-6
743.471	743.471	974.022	743.471	743.471	1e-6	0.33709	0.09593	1e-6
747.531	747.531	975.647	747.531	747.531	1e-6	0.34883	0.097157	1e-6
751.614	0.001	977.246	751.614	7.5161e-8	0.098426	0.36119	1e-6	0.098426
755.722	0.001	978.818	755.722	755.722	0.09974	0.3742	1e-6	0.09974
759.852	0.001	980.361	759.852	759.852	0.1011	0.38791	1e-6	0.1011
764.017	0.001	981.876	764.017	764.017	0.10251	0.40238	1e-6	0.10251
768.199	0.001	983.361	768.199	768.199	0.10397	0.41766	1e-6	0.10397
772.395	0.001	984.815	772.395	772.395	0.10549	0.43381	1e-6	0.10549
776.604	0.001	986.237	776.604	776.604	0.10705	0.4509	1e-6	0.10705
780.824	0.001	987.627	780.824	780.824	0.10866	0.469	1e-6	0.10866
785.052	0.001	988.984	785.052	785.052	0.11033	0.48819	1e-6	0.11033
789.287	0.001	990.306	789.287	789.287	0.11206	0.50856	1e-6	0.11206
793.544	0.001	991.593	793.544	793.544	0.11385	0.5302	1e-6	0.11385
797.825	0.001	992.844	797.825	797.825	0.11571	0.55324	1e-6	0.11571
802.108	0.001	994.058	802.108	802.108	0.11764	0.57778	1e-6	0.11764
806.228	0.001	995.234	806.228	806.228	0.11954	0.60395	1e-6	0.11954
810.535	0.001	996.372	810.535	810.535	0.1216	0.63192	1e-6	0.1216
814.839	0.001	997.471	814.839	814.839	0.12374	0.66183	1e-6	0.12374
819.136	0.001	998.532	819.136	819.136	0.12594	0.69388	1e-6	0.12594
823.422	0.001	999.550	823.422	823.422	0.12821	0.72828	1e-6	0.12821
827.693	0.001	1000.524	827.693	827.693	0.13054	0.76524	1e-6	0.13054
831.944	0.001	1001.450	831.944	831.944	0.13295	0.80504	1e-6	0.13295

Εικόνα 25. Αναλυτικά αποτελέσματα των ιδιοτήτων του ρευστού από το PROSPER

Το παραπάνω πρόβλημα, εντοπίστηκε και σε άλλες περιπτώσεις για τις υπόλοιπες συστάσεις και παραμέτρους όπου έγινε η μελέτη. Για κάθε μια από αυτές, όμως η εξήγηση μέσω των αναλυτικών αποτελεσμάτων ήταν όπως αυτή που αναφέρθηκε.

Σε περαιτέρω μελέτη που έγινε στο λογισμικό του PROSPER, έγινε αντιληπτό πως το λογισμικό χαρακτηρίζει το καθεστώς ροής του ρευστού με βάση την κρίσιμη θερμοκρασία της κάθε σύστασης του ρευστού, όπως αυτή προκύπτει από τον φάκελο φάσεων του.



Εικόνα 26, Φάκελος Φάσεων στο λογισμικό PROSPER

Για παράδειγμα, για την ίδια περίπτωση που προαναφέρθηκε, ο φάκελος φάσεων της σύστασης όπως αυτός προβάλλεται από το λογισμικό PROSPER φαίνεται παραπάνω στην Εικόνα 25. Σύμφωνα με αυτόν τον φάκελο, η κρίσιμη θερμοκρασία του ρευστού είναι ίση με 185.81 °F. Το λογισμικό PROSPER, λοιπόν, για θερμοκρασίες του ρευστού οι οποίες είναι μικρότερες από την κρίσιμη, υποδεικνύει πως επικρατεί διαφασική ροή.

Πράγματι, ο ισχυρισμός αυτός είναι ορθός όπως αποδεικνύεται στην Εικόνα 26, από τα αναλυτικά αποτελέσματα του υπολογισμού των ιδιοτήτων του ρευστού.

Bottom Measured Depth	True Vertical Depth	Pressure	Temperature	Gradient	Holdup	Regime	Heat Transfer Coefficient
(m)	(m)	(psig)	(deg F)	(psi/ft)			(BTU/h/ft ² /F)
2900.0	2900.0	7000.00	242.10				
2825.6	2825.6	6926.13	237.36	0.30279	0	Gas	100.0000
2751.3	2751.3	6851.86	232.62	0.30444	0	Gas	100.0000
2676.9	2676.9	6777.19	227.87	0.3061	0	Gas	100.0000
2602.6	2602.6	6702.10	223.13	0.30778	0	Gas	100.0000
2528.2	2528.2	6626.60	218.38	0.30948	0	Gas	100.0000
2453.8	2453.8	6550.68	213.64	0.3112	0	Gas	100.0000
2379.5	2379.5	6474.34	208.90	0.31292	0	Gas	100.0000
2305.1	2305.1	6397.57	204.15	0.31466	0	Gas	100.0000
2230.8	2230.8	6320.38	199.41	0.3164	0	Gas	100.0000
2156.4	2156.4	6242.77	194.67	0.31816	0	Gas	100.0000
2082.1	2082.1	6164.72	189.92	0.31993	0	Gas	100.0000
2007.7	2007.7	6086.23	185.18	0.32171	0	Gas	100.0000
1933.3	1933.3	6007.41	180.44	0.32309	1.000	Bubble	100.0000
1859.0	1859.0	5928.15	175.69	0.32489	1.000	Bubble	100.0000
1784.6	1784.6	5848.45	170.95	0.3267	1.000	Bubble	100.0000
1710.3	1710.3	5768.30	166.21	0.32852	1.000	Bubble	100.0000
1635.9	1635.9	5687.71	161.46	0.33035	1.000	Bubble	100.0000
1561.5	1561.5	5606.67	156.72	0.33219	1.000	Bubble	100.0000
1487.2	1487.2	5525.18	151.97	0.33403	1.000	Bubble	100.0000
1412.8	1412.8	5443.24	147.23	0.33587	1.000	Bubble	100.0000
1338.5	1338.5	5360.85	142.49	0.33772	1.000	Bubble	100.0000
1264.1	1264.1	5278.01	137.74	0.33957	1.000	Bubble	100.0000
1189.7	1189.7	5194.71	133.00	0.34143	1.000	Bubble	100.0000
1115.4	1115.4	5110.96	128.26	0.3433	1.000	Bubble	100.0000
1041.0	1041.0	5026.75	123.51	0.34517	1.000	Bubble	100.0000
966.7	966.7	4942.10	118.77	0.34697	1.000	Bubble	100.0000
892.3	892.3	4857.00	114.03	0.34885	1.000	Bubble	100.0000
817.9	817.9	4771.44	109.28	0.35073	1.000	Bubble	100.0000
743.6	743.6	4685.42	104.54	0.3526	1.000	Bubble	100.0000
669.2	669.2	4598.94	99.79	0.35446	1.000	Bubble	100.0000
594.9	594.9	4512.01	95.05	0.35632	1.000	Bubble	100.0000
520.5	520.5	4424.63	90.31	0.35817	1.000	Bubble	100.0000
446.2	446.2	4336.81	85.57	0.36	1.000	Bubble	100.0000
371.8	371.8	4248.15	80.83	0.36342	1.000	Bubble	100.0000
297.4	297.4	4159.88	76.14	0.36181	1.000	Bubble	100.0000
223.1	223.1	4071.17	71.68	0.36364	1.000	Bubble	100.0000
148.7	148.7	3982.10	68.36	0.3651	1.000	Bubble	100.0000
74.4	74.4	3893.13	70.97	0.36468	1.000	Bubble	100.0000
0	0	3805.90	104.00	0.35758	1.000	Bubble	100.0000
0	0	3805.90	104.00	0.35758		WellHead	100.0000

Εικόνα 27. Αναλυτικά αποτελέσματα των ιδιοτήτων του ρευστού από το PROSPER

7. Συμπεράσματα

Η εισπίεση του όξινου αερίου, υπό συνθήκες πλήρους ανάμειξης, αποτελεί μια οικονομικά βιώσιμη διαδικασία, κατά την οποία επιτυγχάνεται σημαντική αύξηση στην ανάκτηση πετρελαίου. Η σχεδίαση της διαδικασίας απαιτεί λεπτομερή εξέταση της συμπεριφοράς των φάσεων και της θερμοδυναμικής συμπεριφοράς των καθαρών ενώσεων και των μειγμάτων τους, από τα οποία αποτελείται το όξινο αέριο.

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτέλεσε ο ποιοτικός έλεγχος των αποτελεσμάτων ενός εμπορικού λογισμικού, δηλαδή του PROSPER της εταιρίας Petroleum Experts.

Σημαντικό πόρισμα είναι πως το λογισμικό PROSPER, δεν έχει την δυνατότητα να χαρακτηρίσει το ρευστό που εισπιέζεται ως υπερκρίσιμο. Αυτό δημιούργησε μια απόκλιση στον υπολογισμό των προφίλ πίεσης και θερμοκρασίας, διότι παρότι για την κάθε περίπτωση, δεν φαινόταν αυτό να τέμνει τον φάκελο φάσεων και να εισέρχεται στην διφασική περιοχή, στα αναλυτικά αποτελέσματα του λογισμικού φαινόταν να υπάρχει διφασική ροή μέσα στην γεώτρηση. Με περαιτέρω μελέτη των ιδιοτήτων του ρευστού όπως η πυκνότητα και το ιξώδες, παρατηρήθηκε πως δεν υπάρχει κάποια απόκλιση και οι τιμές ήταν λογικές με βάση την βιβλιογραφία. Επίσης, μετά από έρευνα, παρατηρήθηκε πως το λογισμικό χαρακτηρίζει το ρευστό, αν έχει διφασική ή μονοφασική ροή, με βάση τον φάκελο φάσεων και ανάλογα την κρίσιμη θερμοκρασία που έχει, οπότε για θερμοκρασίες μικρότερες από την κρίσιμη, αναφέρει ότι υπάρχει διφασική ροή. Οπότε, η απόκλιση αυτή δεν επηρεάζει την ορθότητα των υπολογισμών, αλλά είναι μια αδυναμία του λογισμικού να ονομάσει το ρευστό υπερκρίσιμο.

Για την περίπτωση που έγινε ανάλυση ευαισθησίας για την πίεση στον πυθμένα της γεώτρησης εισπίεσης, παρατηρήθηκε ωστόσο πως υπάρχει ουσιαστική διαφορά στις τιμές στην κεφαλή της γεώτρησης. Επίσης, έγινε αντιληπτό πως όσο μειωνόταν η πίεση στον πυθμένα, τόσο το προφίλ της πίεσης και θερμοκρασίας μετατοπιζόταν προς τον φάκελο φάσεων, με αποτέλεσμα να γίνει μια παραπάνω δοκιμή για πίεση πυθμένα ίση με 3,000 psi. Για αυτήν την πίεση, το προφίλ πίεσης και θερμοκρασίας, τέμνει τον φάκελο φάσεων, για όλες τις συστάσεις. Άρα, για να μπορέσει να αποφευχθεί αυτή η κατάσταση, θα πρέπει η πίεση στον πυθμένα, για τις περιπτώσεις που μελετήθηκαν, να διατηρείται πάνω από 3,000 psi ή η πίεση στην κεφαλή της γεώτρησης να είναι υψηλότερη από 7,000 psi. Βέβαια, αυτό ίσως να είναι ένα δαπανηρό εγχείρημα για την

όλη διαδικασία, διότι απαιτείται παραπάνω δαπάνη ενέργειας στους συμπιεστές στην επιφάνεια για την περαιτέρω αύξηση της πίεσης εισπίεσης.

Κλείνοντας, για όλες τις διαφορετικές τιμές στις παραμέτρους που έγινε η ανάλυση ευαισθησίας, η πίεση στην κεφαλή της γεώτρησης, για την ελάχιστη και την μέγιστη τιμή αυτών, είχε πολύ μικρή απόκλιση της τάξεως των λίγων δεκάδων psi. Συμπεραίνεται, λοιπόν, πως οι αλλαγές των μοντέλων του ρευστού έχουν ελάχιστη επίδραση στην μακροσκοπική λειτουργία της διαδικασίας της εισπίεσης και στον υπολογισμό αυτής.

8. Βιβλιογραφία

- Ahmed, T. (2007). *Equations of state and PVT analysis : applications for improved reservoir modeling*. Houston, Texas: Gulf Publishing Company.
- Boyle, T., B., & Carroll, J. (2002). Study determines best methods for calculating acid-gas density. *Oil and Gas Journal*, 45-53.
- Carmody, P. (2000). "Glycol Pre-Dehydration of Gas Before a Contactor. *Proceedings of the 50th Laurance Reid Gas Conditioning Conference*. Norman, Oklahoma, USA.
- Carroll, J. (17 May 2010). *Acid Gas Injection and Carbon Dioxide Sequestration*. Scrivener Publishing LLC. doi:10.1002/9780470893210
- Carroll, J., & Maddocks, J. (1999). *Design Considerations of Acid Gas Injection*. Calgary, Alberta, Canada: Gas Liquids Engineering Ltd.
- Congge, H., Zifei, F., Chenshuo, Z., Anzhu, X., Lun, Z., Erhui, L., & Xing, Z. (2020). A new empirical correlation of. *Energy Exploration & Exploitation*, σσ. 867-883. doi:10.1177/0144598719898572
- De Angelis, A. (2012). Natural gas removal of hydrogen sulphide and mercaptans. Στο *Applied Catalysis B: Environmental* (σσ. 37-42). doi:10.1016/j.apcatb.2011.11.026
- EngineeringToolBox*. (χ.χ.). Ανάκτηση από https://www.engineeringtoolbox.com/hydrogen-sulfide-H2S-properties-d_2034.html
- Gaganis, V. (2020). Phase behavior calculations using Equations of State models. Στο *Perturbation Theory and Phase Behavior Calculations Using Equation of State Models*. doi:10.5772/intechopen.93736
- Guerrero, E., & Munoz, F. (2017). Comparison between eulerian and vof models for two-phase flow assessment in vertical pipes. *CT y F - Ciencia, Tecnologia y Futuro*, 73-84. doi:10.29047/01225383.66
- Guo, B., Liu, & X. (2017). *Petroleum Production Engineering*. Gulf Proffessional Publishing.

- Guo, B., Lyons, W. C., & Ghalambor, A. (February 2007). *Petroleum Production Engineering : A Computer - Assisted Approach*. Elsevier Science & Technology Books. doi:10.1016/B978-0-7506-8270-1.X5000-2
- Heriot Watt University. (2011). *Production Technology*. Heriot Watt Institute of Petroleum Engineering.
- https://wiki.pengtools.com/images/thumb/1/12/Vertical_Lift_Performance_curve.png/600px-Vertical_Lift_Performance_curve.png. (χ.χ.).
- <https://www.petex.com/products/ipm-suite/prosper/>. (2024). Ανάκτηση από <https://www.petex.com/products/ipm-suite/prosper/>
- Jamaluddin, A., Bennion, D., Thomas, F., & Clark, M. (November, 1998). Acid/Sour Gas Management in the Petroleum Industry. *Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference*. Abu Dhabi, United Arab Emirates. doi:10.2118/49522-MS
- Jossi, J., Stiel, L., & Thodos, G. (1962). *The Viscosity of Pure Substances in the Dense Gaseous and Liquid Phases*. AIChE J.
- Lohrenz, Bray, & Clark. (1964). *Calculating Viscosities of Reservoir Fluids from Their Compositions*. J. Pet. Technol.
- Nema, G., Garimella, S.S., Fronk, & B.M. (2014). Flow regime transitions during condensation in microchannels. *International Journal of Refrigeration- revue Internationale Du Froid*, 227-240. doi:10.1016/J.IJREFRIG.2013.11.018
- [pengtools.com](https://wiki.pengtools.com). (χ.χ.).
- Samnioti, A., Kanakaki, E., Koffa, E., Dimitrellou, I., Tomos, C., Kiomourtzi, P., . . . Stamatakis, S. (2023). Wellbore and Reservoir Thermodynamic Appraisal in Acid Gas Injection for EOR Operations. *Energies*, 16(2392), 1-26. doi:10.3390/en16052392
- Smith, J. (2020). Carbon Capture and Storage in the Oil Industry: A Comprehensive Review. *Journal of Petroleum Technology*, 237-254.
- Subhasish, M. (2015). *A technical report on gas sweetening system*. doi:10.13140/RG.2.1.2061.9360

- Tassios, G. (2018). *Εισπίεση Οξίνου Αερίου σε Ταμειυτήρες Πετρελαίου*. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Wu, Y., & Carroll, J. (7 March 2011). *Acid Gas Injection and Related Technologies*. Scrivener Publishing Collections Editors. doi:10.1002/9781118094273
- Wu, Y., Carroll, J., & Hu, Y. (20 May 2019). *The Three Sisters: Acid Gas Injection, Carbon Capture and Sequestration, and Enhanced Oil Recovery*. 2019 Scrivener Publishing LLC. doi:10.1002/9781119510079
- Yousefi, S. H., Groenenberg, R., Koornneef, J., Juez - Larre, J., & Shahi, M. (2023). Techno-economic analysis of developing an underground hydrogen storage facility in depleted gas field: A Dutch case study. *International Journal of Hydrogen Energy*. doi:10.1016/j.ijhydene.2023.04.090
- Zhou, F. (2013). *Research on heat transfer in geothermal wellbore and* . Technical University of Berlin.
- Παππάς, Α. (2019). *Αξιολόγηση συσχετίσεων για τον προσδιορισμό της ελάχιστης πίεσης αναμιξιμότητας κατά την εισπίεση CO₂/αερίων σε κοιτάσματα πετρελαίου*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Σταματάκη, Σ., & Αυλωνίτης, Γ. (2004). Κεφάλαιο 10 : Τριτογενής παραγωγή - Μέθοδοι επαύξησης της απόληψης του πετρελαίου. Στο *Μηχανική Πετρελαίων*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.