

# Πολυτεχνείο Κρήτης

Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων

Αριθμητική προσομοίωση παραγωγής φυσικού αερίου από ταμειευτήρα βιογενούς αερίου

Διπλωματική Εργασία

Ζάρα Κ. Χάιδω

Εξεταστική Επιτροπή

Αγιουτάντης Ζαχαρίας, Καθηγητής (επιβλέπων)

Βαρότσης Νικόλαος, Καθηγητής

Γαγάνης Βασίλειος, Διδάκτωρ

Χανιά

Οκτώβριος, 2014

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις των εξεταστών

## Πρόλογος

Η παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας του προπτυχιακού προγράμματος σπουδών της σχολής Μηχανικών Ορυκτών Πόρων του Πολυτεχνείου Κρήτης.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Αγιουτάντη Ζαχαρία για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε με την ανέθεση του συγκεκριμένου θέματος, για τη βοήθεια του σε κάθε πρόβλημα που παρουσιάστηκε και τη στήριξη του καθόλη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη της εξεταστικής μου επιτροπής, τον καθηγητή κ. Βαρότση Νικόλαο και διδάτωρα του τμήματος κ. Γαγάνη Βασίλειο για τις πολύτιμες διορθώσεις του και για το χρόνο που διέθεσαν.

Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω την επιστημονική συνεργάτιδα του εργαστηρίου μηχανικής πετρωμάτων Φωτεινή Σταθογιάννη για την αμέριστη βοήθεια της και την υποστήριξη της καθόλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Κλείνοντας θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για τη βοήθεια τους και τη στήριξη τους καθόλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους μου που ήταν δίπλα μου και ιδιαίτερα τον κ. Τσόκα Θέμη για τη στήριξη του και την αμέριστη συμπαράσταση του.

## Περιεχόμενα

Πρόλογος .....	iii
Περίληψη .....	vi
Abstract .....	vi
Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή .....	1
1.1 Αντικείμενο .....	1
1.2 Σκοπός .....	2
Κεφάλαιο 2ο: Παραγωγή βιογενούς σχιστολιθικού αερίου .....	3
2.1 Γεωλογικοί σχηματισμοί με βιογενές σχιστολιθικό αέριο .....	3
2.2 Τυπική διαδικασία παραγωγής βιογενούς σχιστολιθικού αερίου .....	4
2.3 Υπολογισμός αποθεμάτων .....	5
2.3.1 Συμβατικός υπολογισμός .....	5
2.3.2 Υπολογισμός με βάση της καμπύλες παραγωγής .....	5
2.4 Πιθανά προβλήματα κατά την εκμετάλλευση βιογενούς σχιστολιθικού αερίου .....	7
2.4.1 Δονήσεις και μικροσεισμοί .....	7
2.4.2 Υδροφόροι ορίζοντες .....	8
Κεφάλαιο 3ο: Υδραυλική ρωγμάτωση .....	11
3.1 Γενική περιγραφή τεχνικής/ βήματα .....	11
3.2 Επίδραση του επιτόπου εντατικού πεδίου .....	12
3.3 Ρευστά θραύσης .....	13
3.4 Έλεγχος διάδοσης ρωγμών .....	15
Κεφάλαιο 4ο: Παράμετροι που επηρεάζουν την παραγωγή του βιογενούς σχιστολιθικού αερίου .....	16
4.1 Ισόθερμη Langmuir .....	16
4.2 Ροή ρευστού μέσα στον ταμιευτήρα (non- Darcy) .....	17
4.3 Μέγεθος Ρωγμών .....	19
4.4 Πίεση Πόρων .....	20
4.5 Διαπερατότητα .....	20
Κεφάλαιο 5ο: Προσομοίωση ταμιευτήρων βιογενούς σχιστολιθικού αερίου .....	23
5.1 Βασικές αρχές λειτουργίας του λογισμικού .....	23
5.2 Παραμετρική Ανάλυση .....	23

5.2.1 Μοντέλο παραμετρικής ανάλυσης <i>M.V. 1</i> .....	23
5.1.2 Μοντέλο παραμετρικής ανάλυσης <i>M.V. 1</i> .....	25
5.1.3 Μοντέλο παραμετρικής ανάλυσης <i>M.V.3</i> .....	26
5.1.4 Μοντέλο παραμετρικής ανάλυσης <i>M.V. 4</i> .....	28
5.1.5 Μοντέλο παραμετρικής ανάλυσης <i>M.V.5</i> .....	29
5.2 Περιγραφή μοντέλων .....	31
5.2.1 Πλέγμα σχεδίασης.....	31
5.2.2 Ιδιότητες .....	32
5.2.3 Εισαγωγή γεωτρήσεων- υδραυλικής ρωγμάτωσης .....	33
5.3 Αποτελέσματα.....	35
5.3.1 Μοντέλο <i>M 1.1</i> .....	35
5.3.2 Μοντέλο <i>M 1.2</i> .....	38
5.3.3 Μοντέλο <i>M 1.3</i> .....	40
5.3.4 Μοντέλο <i>M 2.1</i> .....	42
5.3.5 Μοντέλο <i>M 2.2</i> .....	44
5.3.6 Μοντέλο <i>M 3.1</i> .....	46
5.3.7 Μοντέλο <i>M 3.2</i> .....	48
5.3.8 Μοντέλο <i>M 3.3</i> .....	50
Κεφάλαιο 6ο: Συμπεράσματα- Προτάσεις.....	52
6.1 Συμπεράσματα .....	52
6.2 Προτάσεις .....	52
Βιβλιογραφία .....	53
Ελληνική βιβλιογραφία.....	53
Διεθνής Βιβλιογραφία.....	53
Διαδικτυακή βιβλιογραφία.....	54

## Περίληψη

Η παραγωγή σχιστολιθικού αερίου είναι μια από τις ανερχόμενες πηγές ενέργειας που γνωρίζει ιδιαίτερη άνθηση τα τελευταία χρόνια. Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται μια πρώτη προσέγγιση προσομοίωσης της παραγωγής βιογενούς σχιστολιθικού αερίου (shale gas) με τη χρήση υδραυλικής ρωγμάτωσης. Η προσομοίωση αφορά εκμετάλλευση σχιστολιθικού ταμιευτήρα με πολλαπλές γεωτρήσεις από την ίδια επιφανειακή θέση. Σκοπός της εργασίας είναι να βρεθεί η βέλτιστη διάταξη των γεωτρήσεων για τη μέγιστη παραγωγή αερίου και να μελετηθούν οι τυχόν αλληλεπιδράσεις των διατάξεων των γεωτρήσεων παραγωγής. Για τον σκοπό αυτό δημιουργήθηκε και αναπτύχθηκαν μοντέλα προσομοίωσης ενός συνθετικού ταμιευτήρα με τη χρήση λογισμικού προγράμματος GEM της CMG με τα οποία επιτυγχάνεται παραμετρική διερεύνηση και ανάλυση ευαισθησίας των παραμέτρων του μοντέλου.

## Abstract

Natural gas produced from shale formations constitutes one of the upcoming sources of energy, which has enjoyed tremendous growth in recent years and continues to grow. This diploma thesis presents an initial attempt to model shale gas production using a commercial simulator by employing multiple holes which have been hydraulically fractured. A sensitivity analysis is carried out to determine the effect of hole pattern and geometry as well as hydraulic fracture overlap. Gas production curves are used for these comparisons.

# Κεφάλαιο 1ο: Εισαγωγή

## 1.1 Αντικείμενο

Αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η αριθμητική προσομοίωση παραγωγής φυσικού αερίου από σχιστολιθικούς ταμιευτήρες βιογενούς αερίου.

Αρχικά, γίνεται αναλυτική περιγραφή των χαρακτηριστικών ενός τυπικού ταμιευτήρα σχιστολίθου όπως επίσης και των παραμέτρων που διέπουν την ενδεχόμενη παραγωγή του βιογενούς αερίου. Για παράδειγμα παρατίθενται τυπικά γεωλογικά χαρακτηριστικά των σχιστόλιθων που καθιστούν τους σχηματισμούς αυτούς οικονομικά εκμεταλλεύσιμους όσο αφορά στην παραγωγή βιογενούς αερίου. Επίσης, παραθέτονται τρόποι με τους οποίους γίνεται οι εκτίμηση των αποθεμάτων τόσο σε συμβατικούς ταμιευτήρες φυσικού αερίου όσο και σε αντισυμβατικούς ταμιευτήρες, όπως είναι οι σχιστολιθικοί ταμιευτήρες. Γίνεται αναφορά σε πιθανά προβλήματα που μπορεί να οφείλονται στην εκμετάλλευση αυτών των ταμιευτήρων, τέτοια είναι η μόλυνση των υδροφόρων οριζόντων και δονήσεις ή μικροσεισμοί.

Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην τεχνική της υδραυλικής ρωγμάτωσης, καθώς είναι ο μόνος τρόπος να παραχθεί φυσικό αέριο από αυτούς τους ταμιευτήρες. Η μοντελοποίηση του ταμιευτήρα περιλαμβάνει πολλές περιπτώσεις, όσον αφορά τις διατάξεις των γεωτρήσεων για την παραγωγή του φυσικού αερίου.

Οι ταμιευτήρες σχιστολιθικού αερίου χαρακτηρίζονται ως αντισυμβατικοί ταμιευτήρες. Ο όρος αυτός χρησιμοποιείται εξαιτίας της διαφορετικότητας των χαρακτηριστικών του πορώδους μέσου (πορώδες, διαπερατότητα, μηχανισμός παγίδευσης) από τους κοινούς ταμιευτήρες π.χ. ψαμμίτη. Με βασικό χαρακτηριστικό τους τη σχεδόν μηδενική διαπερατότητα τους.

Οι συνεχώς αυξανόμενες ανάγκες για ενέργεια οδήγησε στην εκμετάλλευση μη συμβατικών (unconventional) ταμιευτήρων. Με τον όρο «μη συμβατικοί ταμιευτήρες» εννοούνται οι ταμιευτήρες με διαπερατότητα από 0 έως 0,001mD. Ένα από τα χαρακτηριστικά της εκμετάλλευσης αυτών των σχηματισμών είναι η χρήση της υδραυλικής ρωγμάτωσης. Όταν η τεχνολογία αυτή ωρίμασε και έγινε προσιτή για βιομηχανική εφαρμογή, εμφανίστηκε ραγδαία αύξηση στην εκμετάλλευση κοιτασμάτων βιογενούς σχιστολιθικού αερίου.

Η τεχνική της υδραυλικής ρωγμάτωσης χρησιμοποιείται για την αύξηση της διαπερατότητας του σχηματισμού με σκοπό να επιτρέψει στο αέριο να διοχετευτεί μέσω των γεωτρήσεων. Με την υδραυλική ρωγμάτωση εισπνέζονται ρευστά με πολύ μεγάλες πιέσεις μέσα στο σχηματισμό ώστε να μπορέσει να τον ρωγματώσει δημιουργώντας έτσι καινούργιους δίαυλους για τη ροή του αερίου. Για να παραμείνουν οι ρωγμές ανοιχτές μέσα στα υγρά ρωγμάτωσεις περιέχονται υποστηρικτικά μέσα (π.χ. κόκκοι άμμου) κατασκευασμένα να αντέχουν στις συνθήκες του ταμιευτήρα.

## **1.2 Σκοπός**

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η παραμετρική διερεύνηση ορισμένων παραμέτρων παραγωγής ώστε να βελτιστοποιηθεί η παραγωγή αερίου με υδραυλική ρωγμάτωση του πετρώματος. Μέσω των προσομοιωμάτων που κατασκευάστηκαν συγκρίνονται σενάρια παραγωγής με και χωρίς υδραυλική ρωγμάτωση του πετρώματος, καθώς και σενάρια με διαφορετική διάταξη γεωτρήσεων και μοτίβων υδραυλικής ρωγμάτωσης.

Η προσομοίωση έγινε μέσω της εκπαιδευτικής έκδοσης του λογισμικού GEM της εταιρείας Computer Modelling Group (CMG).

## Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup>: Παραγωγή βιογενούς σχιστολιθικού αερίου

### 2.1 Γεωλογικοί σχηματισμοί με βιογενές σχιστολιθικό αέριο

Ο σχιστόλιθος είναι ένα λεπτόκοκκο (Σχήμα 1), ιζηματογενές πέτρωμα που σχηματίζεται από τη συμπύκνωση της ιλύος και της αργίλου. Είναι το πιο πλούσιο ιζηματογενές πέτρωμα καθώς μπορεί να περιλαμβάνει μεγάλες ποσότητες οργανικού υλικού, σε σχέση με άλλα πετρώματα άρα μπορεί να είναι μια πλούσια πηγή υδρογονανθράκων.

Σε συμβατικούς ταμιευτήρες υδρογονανθράκων, ο σχιστόλιθος λειτουργεί σαν παγίδα (cap rock) ώστε να μην μπορούν να διαφύγουν. Αυτό που οδήγησε τους ερευνητές στην έρευνα για τον εντοπισμό κοιτασμάτων σχιστολιθικού αερίου ήταν οι διαφυγές αερίου που παρατηρούνταν κατά την όρυξη γεωτρήσεων. Για να χαρακτηριστεί κοιτάσμα σχιστολιθικού αερίου πρέπει ο σχηματισμός να έχει επιθυμητό πάχος, έκταση και την επιθυμητή ποσότητα οργανικής ύλης. Ο μαύρος σχιστόλιθος είναι μία από τις σημαντικότερες πηγές αερίου και πετρελαίου αυτή τη στιγμή στον κόσμο. Το μαύρο του χρώμα οφείλεται στην απόθεση μικροσωματιδίων της οργανικής ύλης. Μετά την απόθεση της οργανικής ύλης ένα μέρος της θάφτηκε και θερμάνθηκε με αποτέλεσμα να μετασχηματιστεί σε πετρέλαιο και αέριο.



Σχήμα 1: Σχιστόλιθος (greenbiz.com)

Έχει παρατηρηθεί ότι ακόμη και σε ταμιευτήρες με παρόμοια χαρακτηριστικά παρουσιάζονται μεγάλες διαφορές στην απόδοσή τους. Η ποικιλομορφία αυτή πιθανολογείται στην ετερογένεια του μητρικού πετρώματος (matrix), στο δίκτυο των ρωγμών, τόσο φυσικών όσο και τεχνητών αλλά και σε γεωχημικές ιδιότητες του σχιστόλιθου. Ο ιστός του πετρώματος επηρεάζει τόσο τη διαπερατότητα των ρωγμών όσο και την αποτελεσματικότητα της ροής μέσα στους μικροπόρους του. Επίσης σημαντικό ρόλο παίζουν οι γεωμηχανικές ιδιότητες των σχηματισμών.

Οι φυσικές ιδιότητες του πετρώματος που επηρεάζουν την παραγωγικότητα των σχιστολιθικών ταμιευτήρων είναι η διαπερατότητα των ρωγμών, του πετρώματος και η απόσταση μεταξύ των ρωγμών. Επίσης, σημαντικό ρόλο κατά το στάδιο της παραγωγής παίζει η θερμοκρασία, η πίεση του ταμιευτήρα, το πορώδες, η δομή των πόρων, το πάχος η πυκνότητα, η συμπιεστότητα, οι παράμετροι Langmuir [Bustin and Bustin, 2012].

## **2.2 Τυπική διαδικασία παραγωγής βιογενούς σχιστολιθικού αερίου**

Η υδραυλική ρωγμάτωση είναι μια τυπική τεχνική η οποία ξεκίνησε από το 1974 προκειμένου να διεγείρει το σχηματισμό περιμετρικά των γεωτρήσεων παραγωγής για να αυξήσει την παραγωγή και την αγωγιμότητα τους. Μια τυπική διαδικασία περιλαμβάνει την έγχυση ρευστού με επαρκή ρυθμό και πίεση για τη ρωγμάτωση του σχηματισμού. Αφού δημιουργηθεί η ρωγμή, το πέτρωμα πρέπει να παραμείνει ανοιχτό. Αυτό επιτυγχάνεται με το κοκκώδες υλικό το οποίο κρατά ανοιχτές τις ρωγμές (proppant) καθώς αντιστέκεται στις δυνάμεις που τείνουν να το κλείσουν. Σκοπός της υδραυλικής ρωγμάτωσης είναι να αυξήσει τη διαπερατότητα του σχηματισμού ώστε να επιτρέπεται η ροή του αερίου ή του πετρελαίου προς τη γεώτρηση παραγωγής [Wu and Wu, 2012].

Η παραγωγή σχιστολιθικού αερίου είναι παρόμοια με την παραγωγή των κοινών ταμιευτήρων με τη διαφορά όμως ότι βασίζεται στις οριζόντιες γεωτρήσεις και την υδραυλική ρωγμάτωση. Μετά την εύρεση του στόχου με τη βοήθεια των σεισμικών μεθόδων εξερεύνησης, διαπραγματεύονται οι συμβάσεις για την εκμετάλλευση του κοιτάσματος. Ακολουθεί η διαδικασία προετοιμασίας και κατασκευής του εργοταξίου, της γεώτρησης και της υδραυλικής ρωγμάτωσης [GAO, 2012].

Όσον αφορά την προετοιμασία και κατασκευή του εργοταξίου η πρώτη ενέργεια είναι ο καθαρισμός του περιβάλλοντος χώρου από τυχόν βλάστηση, βράχων μεγάλου όγκου κ.α. Στη συνέχεια μεταφέρεται ο μηχανολογικός εξοπλισμός και ξεκινά η κατασκευή του εργοταξίου. Σε περιπτώσεις δυσπρόσιτων περιοχών είναι απαραίτητη η διάνοιξη δρόμων. Στο ίδιο στάδιο και λαμβάνοντας πάντα υπόψη τη γεωμορφολογία της περιοχής και τις κλιματολογικές συνθήκες κατασκευάζονται δεξαμενές γλυκού νερού, εγκαταστάσεις για την αποθήκευση υλικών και αγωγοί για τη μεταφορά υλικών.

Επόμενο στάδιο είναι η κατασκευή και διάτρηση της γεώτρησης. Η όρυξη της γεώτρησης είναι συνδυασμός κάθετων και οριζόντιων γεωτρήσεων. Τα οριζόντια τμήματα των γεωτρήσεων κυμαίνονται από τα 2000ft (609.6m) έως τα 6000ft (1828.8m), αν και σε ορισμένες περιπτώσεις έχουν σημειωθεί και 12000 ft (3657.6m).

Το τρίτο και τελευταίο στάδιο, είναι η υδραυλική ρωγμάτωση του ταμιευτήρα. Πριν από τη θραύση του ταμιευτήρα είναι απαραίτητο να εξετασθεί αν η γεώτρηση είναι ικανή να αντέξει την πίεση που ασκείται κατά τη διάρκεια της υδραυλικής ρωγμάτωσης. Αυτό μπορεί να γίνει με τη συλλογή δεδομένων όπως τις τάσεις που ασκούνται στα πετρώματα και τις φυσικές δομές (που είναι απαραίτητες για την ανάπτυξη του μοντέλου, τέτοιες είναι το ύψος, πλάτος και μήκος των ρωγμών). Σκοπός της μοντελοποίησης του ταμιευτήρα είναι ο βέλτιστος σχεδιασμός της υδραυλικής ρωγμάτωσης για την επίτευξη της καλύτερης δυνατής παραγωγής.

Η κατασκευή των τεχνητών ρωγμών γίνεται με τη εισαγωγή μηχανήματος, εντός της γεώτρησης, για τη δημιουργία οπών. Οι οπές βοηθούν στο να εισχωρήσουν τα ρευστά θραύσης με πολύ υψηλές πιέσεις και να ρωγματώσουν το σχηματισμό. Αφού εισπιαστούν τα υγρά ρωγμάτωσης στη γεώτρηση θα δημιουργηθούν καινούργιες ρωγμές και επεκταθούν οι προϋπάρχουσες, με αποτέλεσμα να μειωθεί η πίεση του σχηματισμού. Τα υποστηρικτικά μέσα μένουν στο σχηματισμό ενώ μέρος του ρευστού επιστρέφει στην επιφάνεια (flowback).

Στη διάρκεια εκμετάλλευσης του ταμιευτήρα μπορεί να χρειαστεί να ξαναγίνει υδραυλική ρωγμάτωση αν αυτό κριθεί οικονομικά συμφέρον [GAO, 2012].

## **2.3 Υπολογισμός αποθεμάτων**

### **2.3.1 Συμβατικός υπολογισμός**

Μετά από τον εντοπισμό των ταμιευτήρων σειρά έχει μια γρήγορη εκτίμηση των πιθανών αποθεμάτων που βρίσκονται μέσα. Επειδή όμως η πρώτη εκτίμηση γίνεται από μια ερευνητική γεώτρηση το αποτέλεσμα δε μπορεί παρά να είναι πρόχειρη. Με βάση όμως τα αποτελέσματα που θα δώσει αυτή η γεώτρηση θα αποφασισθεί αν θα ορυχθεί καινούργια για την καλύτερη εκτίμηση των αποθεμάτων και στην ευκρινέστερη εικόνα του ταμιευτήρα. Η πλήρης εικόνα των ταμιευτήρων δίνεται μετά το τέλος της εκμετάλλευσης τους.

Τα αποθέματα διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες στα επιβεβαιωμένα, στα τεχνικώς ανακτήσιμα και στα πιθανά. Τα επιβεβαιωμένα αποθέματα δείχνουν την ποσότητα των πόρων που έχει ανακαλυφθεί και καθορίζονται από γεωτρήσεις και μπορούν να ανακτηθούν οικονομικά μέσα σε σύντομο χρονικό διάστημα. Τα αποθέματα μπορούν αλλάξουν ανάλογα με την παρούσα τεχνολογία και τις ισχύουσες τιμές για την εκάστοτε χρονική στιγμή. Ως πιθανά αποθέματα είναι εκείνα τα οποία προκύπτουν από την εκτίμηση του κορεσμού των δειγμάτων χωρίς να υπάρχουν άλλα δεδομένα που να ενισχύουν το βαθμό βεβαιότητάς τους. Τα τεχνικώς ανακτήσιμα αποθέματα μπορούν να ανακτηθούν σύμφωνα με την παρούσα τεχνολογία. Οι τεχνικά ανακτήσιμοι πόροι είναι δυναμικοί, δηλαδή αντικατοπτρίζει την τις δυνατότητες της τεχνολογίας εξόρυξης και της γεωλογίας της περιοχής.

Σύμφωνα με το Βαρότση (2014) η ποσότητα των ρευστών που περικλείονται μέσα στους ταμιευτήρες μπορεί να προσδιοριστεί είτε με την ογκομετρική μέθοδο είτε με τη μέθοδο ισοζυγίου μάζας (M.I.M). Για τον υπολογισμό των αποθεμάτων σύμφωνα με την ογκομετρική μέθοδο απαιτείται γνώση του πάχους και του πορώδους του κοιτάσματος. Αντίθετα η μέθοδος ισοζυγίων χρειάζεται δεδομένα παραγωγής από κάποιο στάδιο παραγωγής του ταμιευτήρα.

### **2.3.2 Υπολογισμός με βάση της καμπύλες παραγωγής**

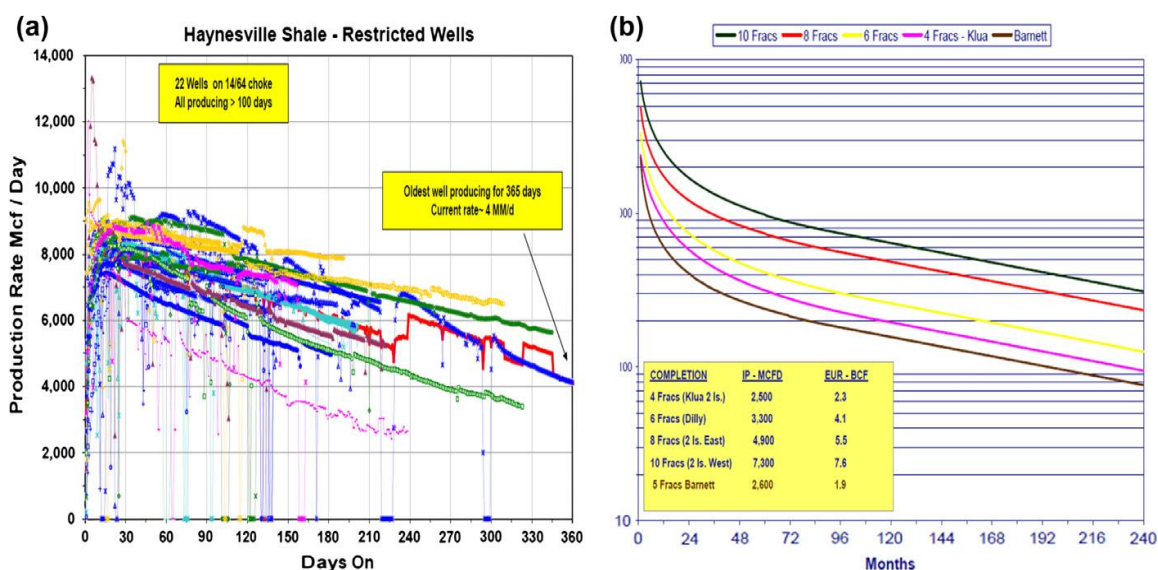
Για τα σχέδια ανάπτυξης του σχιστολιθικού αερίου πρέπει να χρησιμοποιούνται επενδυτικά μοντέλα που βασίζονται σε ρεαλιστικές εκτιμήσεις για την παραγωγή, την αστάθεια των τιμών και του κόστους ώστε να εξασφαλιστεί η θετική ανάπτυξη (χρηματοροή). Οι καινούργιες περιοχές σχιστολιθικού αερίου έχουν μεγάλο βαθμό αβεβαιότητας υπεδάφους με αποτέλεσμα κατά τα πρώτα στάδια εκμετάλλευσης να είναι αναπόφευκτη η κατασκευή γεωτρήσεων με χαμηλή παραγωγικότητα και οριακό οικονομικό κέρδος.

Επομένως, προκειμένου να υπάρξει μια όσο το δυνατόν πλησιέστερη εκτίμηση προς το πραγματικό των αποθεμάτων χρησιμοποιούνται μοντέλα καμπυλών παραγωγής (type curves). Τα μοντέλα αυτά, με παραμέτρους τα βασικά χαρακτηριστικά των ταμιευτήρων αποτυπώνουν μια διαγραμματική απεικόνιση του ρυθμού παραγωγής. Αυτός ο παράγοντας είναι καθοριστικός για το στρατηγικό σχεδιασμό της εκμετάλλευσης.

Στο πρώιμο στάδιο της εκμετάλλευσης τα μοντέλα καμπυλών παραγωγής είναι το βασικό εργαλείο τόσο από μηχανικής πλευράς, για τον καλύτερο σχεδιασμό της υδραυλικής ρωγμάτωσης όπου αυτή είναι απαραίτητη, όσο και από οικονομοτεχνικής πλευράς αφού δίνει μια σαφή εικόνα για την πρόγνωση της αξίας του αερίου (gas price forecasting), την ανάλυση κόστους- οφέλους (cost benefit analysis) καθώς και τη διαχείριση της εκτελεσθείσας αξίας (earned value management).

Προηγούμενες μελέτες έδειξαν ότι 1000 γεωτρήσεις παραγωγής σε βάθος πενταετίας θα αποδώσουν 1 τρις. cft για την Ευρώπη. Το 1 τρις. cft / χρόνο θα καλύψει το 5% της ζήτησης αερίου για την Ευρώπη, αν και η υλοποίηση του θα είναι δύσκολο να πραγματοποιηθεί γρήγορα. Η εμπορική επιτυχία από την εκμετάλλευση τέτοιων ταμιευτήρων εξαρτάται από την ικανότητα του ελέγχου του κόστους στον τομέα της ανάπτυξης και τη βελτιστοποίηση των χρηματοροών που γίνεται με την επιλεκτική διάτρηση στις πιο «ελκυστικές» περιοχές [Weijermars, 2013].

Για την εναρμόνιση της αγοράς σχιστολιθικού αερίου με τον υπόλοιπη αγορά, πρέπει να καθοριστεί μια τιμή αναφοράς για κάθε γεώτρηση, που να περιλαμβάνει όλο το κόστος. Εάν δεν καθοριστεί αυτή η σύνδεση κόστους πρέπει να συγχρηματοδοτηθεί από κοινού, κατά προτίμηση, με μια εταιρεία μεταφοράς αερίου.



Σχήμα 2 Τυπικές καμπύλες παραγωγής (type curves) [Weijermars, 2013]

Η ανάλυση των δεδομένων παραγωγής έχει χρησιμοποιηθεί ως μια αποτελεσματική μέθοδος για την πρόβλεψη και τον υπολογισμό των αποθεμάτων παραγωγής σε σχιστολιθικούς ταμιευτήρες. Δεδομένου ότι η διαπερατότητα είναι εξαιρετικά χαμηλή σε αυτούς τους σχηματισμούς, ο μόνος τρόπος για να είναι οικονομικά εκμεταλλεύσιμοι είναι η υδραυλική ρωγμάτωση. Η χαμηλή διαπερατότητα των σχιστολιθικών ταμιευτήρων, σε συνδυασμό με τις ρωγμές μεγάλης αγωγιμότητας, που δημιουργούνται από την υδραυλική ρωγμάτωση, μακροπρόθεσμα εμφανίζουν μια παροδική μειούμενη γραμμική ροή συναρτήσει του χρόνου.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2, οι τυπικές καμπύλες παραγωγής δεν παραμένουν σταθερές κατά τη διάρκεια εκμετάλλευσης των ταμιευτήρων. Ο μέγιστος ρυθμός ροής σημειώνεται μέσα

στις δύο πρώτες μέρες, από την έναρξη της εκμετάλλευσης του ταμιευτήρα. Επίσης από το διάγραμμα φαίνεται πως η μείωση της παραγωγής των γεωτρήσεων γίνεται τον πρώτο χρόνο λειτουργίας τους. Παρόλα αυτά όμως εμφανίζονται κάποιες αυξομειώσεις στην παραγωγή που οφείλονται σε καινούργιες ρωγματώσεις που πραγματοποιούνται στον ταμιευτήρα για τη διατήρηση της παραγωγής σε οικονομικά συμφέρουσες συνθήκες.

Για την κατανόηση της συμπεριφοράς του αερίου μέσα στον ταμιευτήρα έχουν αναπτυχθεί καμπύλες παραγωγής που προσαρμόζονται στις ιδιότητες των ταμιευτήρων. Σε γενικές γραμμές τα διαγράμματα δείχνουν πως στα πρώτα στάδια της εκμετάλλευσης υπάρχει γραμμική και μεταβατική ροή.

Η μέθοδος αυτή θεωρεί τους σχιστολιθικούς ταμιευτήρες, πριν την ρωγμάτωση τους, ως ένα σύστημα διπλού πορώδους. Οι καμπύλες παραγωγής έχουν αναπτυχθεί για την αξιολόγηση των αποθεμάτων των ταμιευτήρων. Μέσα στον σχηματισμό παρουσιάζονται καθεστώτα γραμμικής και μεταβατικής ροής των οποίων η ερμηνεία είναι πολύπλοκότερη απ' ό,τι των ομοιογενών και μη ρωγματομένων ταμιευτήρων. Συμπεραίνεται ότι η συμπεριφορά των σχηματισμών με διπλό πορώδες σε μη ρωγματομένους ταμιευτήρες έχει θετική επίδραση στην παραγωγή, ακόμη και αν η διαπερατότητα της ρωγμάτωσης είναι χαμηλότερη από τη διαπερατότητα του σχηματισμού (matrix) [Xu et al, 2013].

## ***2.4 Πιθανά προβλήματα κατά την εκμετάλλευση βιογενούς σχιστολιθικού αερίου***

### ***2.4.1 Δονήσεις και μικροσεισμοί***

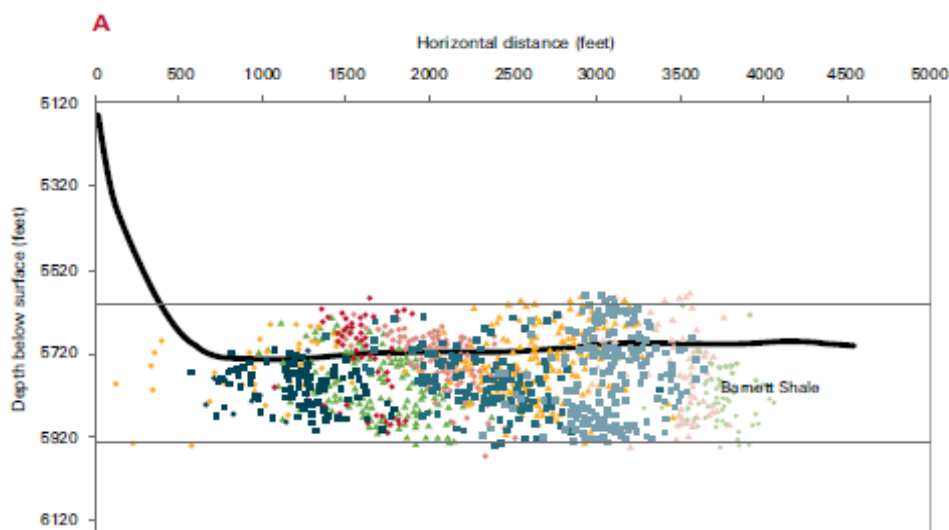
Υπάρχουν δύο τύποι σεισμικότητας που συνδέονται με την παραγωγή βιογενούς σχιστολιθικού αερίου, οι μικροσεισμοί και οι δονήσεις. Οι μικροσεισμοί είναι συνηθισμένο φαινόμενο που εμφανίζεται κατά την υδραυλική ρωγμάτωση και οφείλεται στη διάδοση των μηχανικών ρωγμών. Ένα ρεαλιστικό ανώτατο όριο της προκαλούμενης σεισμικότητας από την υδραυλική ρωγμάτωση είναι τα 3 ML<sup>1</sup>.

Σημαντικός παράγοντας για την προκαλούμενη σεισμικότητα είναι οι ιδιότητες του σχιστόλιθου καθώς περιέχουν φυσικούς περιορισμούς σχετικά με το μέγεθος της σεισμικότητας που προκαλείται. Πρόκειται για ένα σχετικά ασθενές πέτρωμα. Επομένως δεν απαιτούνται μεγάλα ποσά ενέργειας για τη θραύση του, όπως θα απαιτούνταν για άλλα πιο σκληρά πετρώματα. Όσο μεγαλύτερα ποσά ενέργειας απαιτούνται για τη θραύση κάποιου πετρώματος, τόσο πιο έντονη σεισμική δραστηριότητα παρατηρείται. Ακόμη είναι σημαντικό να αναφερθεί πως όσο μεγαλύτερη είναι η επιφάνεια θραύσης τόσο μεγαλύτερη σεισμική δραστηριότητα παρατηρείται [The Royal Society, 2012].

---

<sup>1</sup> Η κλίμακα Μερκάλι δεν μετράει την ενέργεια που απελευθερώνεται από έναν σεισμό, όπως η [κλίμακα Ρίχτερ](#). Αντίθετα ασχολείται με τις επιπτώσεις ενός σεισμού σε μια δεδομένη περιοχή. Συνεπώς ενδείκνυται για την μέτρηση σεισμών σε πυκνοκατοικημένες περιοχές, ενώ δεν είναι αποτελεσματική για αραιοκατοικημένες ή ακατοίκητες (Wikipedia.org).

Στο Σχήμα 3, δίνεται ένα διάγραμμα που απεικονίζει την αποτύπωση μικροσεισμών που σημειώνονται κατά τη διάρκεια εκμετάλλευσης ενός σχιστολιθικού ταμιευτήρα (Barnett Shale) στο οριζόντιο τμήμα μιας γεώτρησης παραγωγής. Η μαύρη γραμμή δείχνει την οριζόντια γεώτρηση και τα σημεία που βρίσκονται κατά μήκος της γεώτρησης δείχνουν κάθε μικροσεισμική δραστηριότητα που σημειώνεται.



**Σχήμα 3: Αποτύπωση μικροσεισμών κατά μήκος της γεώτρησης στη διάρκεια υδραυλικής ρωγμάτωσης [Royal Academy, 2012]**

Σύμφωνα με μελέτες που έχουν δημοσιευθεί, κατά την υδραυλική ρωγμάτωση απελευθερώνονται τεράστια ποσά ενέργειας με σκοπό να θραύσουν το πέτρωμα. Η απελευθερώσιμη ενέργεια όμως δεν είναι σε θέση να προκαλέσει σεισμική δραστηριότητα σε βαθμό που να γίνει αντιληπτή στην επιφάνεια.

Ωστόσο, σύμφωνα με μελέτη που πραγματοποίησε το Γεωλογικό Ινστιτούτο, στην Οκλαχόμα υπάρχει σύνδεση μεταξύ της σεισμικότητας και της υπόγειας έγχυσης υγρών αποβλήτων. Παρόλα αυτά όμως δεν έχει αποδειχθεί επίσημα ότι η σεισμική δραστηριότητα συνδέεται με την υδραυλική ρωγμάτωση πέρα από μικροδονήσεις [GAO, 2012].

#### **2.4.2 Υδροφόροι ορίζοντες**

Η έντονη βιομηχανική δραστηριότητα για την παραγωγή σχιστολιθικού αερίου τα τελευταία χρόνια έφερε στην επιφάνεια περιβαλλοντικά προβλήματα που πιθανόν να οφείλονται στην υδραυλική ρωγμάτωση. Σχετικές μελέτες έδειξαν πως η παραγωγή σχιστολιθικού αερίου μπορεί να αποτελέσει σημαντικό κίνδυνο για τη μόλυνση τόσο των επιφανειακών όσο και των υπόγειων υδάτων. Εξαιτίας των μεγάλων ποσοτήτων νερού που απαιτούνται για την υδραυλική ρωγμάτωση η άντληση νερού γίνεται από τους πλησιέστερους υδροφόρους ορίζοντες. Η υπεράντληση νερού όμως κάνει τους υδροφόρους πιο ευάλωτους σε θερμοκρασιακές αλλαγές π.χ. κατά τους καλοκαιρινούς μήνες έχουμε μεγαλύτερη αύξηση της θερμοκρασίας ενώ το χειμώνα μεγαλύτερη μείωση. Οι ακραίες θερμοκρασιακές μεταβολές επηρεάζουν και τους υδρόβιους οργανισμούς. Επίσης, η μείωση της ροής των υδροφορέων θέτει σε κίνδυνο και την παρόχθια βλάστηση [GAO, 2012].

Η σύσταση των υδροφόρων οριζόντων επηρεάζεται από μια σειρά διαδικασιών καθώς κινείται διαμέσου των πετρωμάτων. Οι διαδικασίες αυτές είναι η έκπλυση, η διάλυση αλάτων και ανόργανων συστατικών από τις διεπιφάνειες πετρώματος- νερού. Αποτέλεσμα των διεργασιών αυτών είναι η απελευθέρωση αερίων, λόγω της διάσπασης του πετρώματος και η αύξηση του βαθμού αποσάθρωσης και θραύσης των πετρωμάτων.

Έχει παρατηρηθεί επίσης, πως σημαντικός παράγοντας για την αλλαγή της σύστασης των υπόγειων υδάτων είναι η τεκτονική δραστηριότητα, που προκαλεί τη θραύση των πετρωμάτων. Το ίδιο ισχύει και σε περιπτώσεις που το πέτρωμα είναι εκτεθειμένο σε δονήσεις π.χ. κατά τη διάρκεια ανατίναξης, όπου διαταράσσεται ο βαθμός ρωγμάτωσης [Thomas, et al., 1997].

Σύμφωνα με τους King et al. (2012), όπως αναφέρεται σε μελέτη που πραγματοποιήθηκε για το GAO μεταβολές στη σύσταση των υπογείων υδάτων έχουν παρατηρηθεί πριν ή και κατά τη διάρκεια σεισμικής δραστηριότητας. Οι διαφοροποιήσεις αυτές παρατηρούνται κυρίως σε βαθιές γεωτρήσεις και θερμές πηγές. Στις περιπτώσεις αυτές έχουν αλλαγή στη συγκέντρωση των διαλελυμένων αερίων [ $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ , He,  $\text{H}_2\text{S}$ , Rn], μεγάλων ιόντων [Na, K, Ca, Mg,  $\text{SO}_4$ , Cl, F,  $\text{HCO}$ ] και ιχνοστοιχείων [Hg, Ra, U, Li, Sr, Ba]. Παρόλο που οι αιτίες των διακυμάνσεων που παρατηρούνται στη χημική σύσταση παραμένουν υποθετικές σε μεγάλο βαθμό έχουν προταθεί διάφορα μοντέλα για τη μελέτη αυτών των υποθέσεων.

Από μελέτη που πραγματοποίησε το πανεπιστήμιο της Νέας Υόρκης, διαπιστώθηκε ότι τα υγρά ρωγμάτωσης περιέχουν διάφορες χημικές και τοξικές ουσίες που εάν έρθουν σε επαφή με τους υδροφόρους ορίζοντες ενέχουν σοβαρούς κινδύνους για τη δημόσια υγεία. Κάποιες από τις τοξικές προσμίξεις που περιέχονται στα υγρά ρωγμάτωσης είναι το βενζόλιο και άλλες αρωματικές ουσίες που χρησιμοποιούνται ως διαλύτες για το μέσο θραύσης του πετρώματος. Σε περίπτωση διαφυγής των τοξικών ουσιών, που περιέχονται στα ρευστά θραύσης, προς κάποιον πόσιμο υδροφόρο ορίζοντα, είναι άγνωστες οι επιδράσεις τους για τη δημόσια υγεία.

Η ποσότητα του νερού που επιστρέφει στην επιφάνεια (flowback) είναι ένας ακόμη σημαντικός παράγοντας μόλυνσης των υδροφορέων. Τα επιστρεφόμενα ύδατα μπορεί να περιέχουν άλατα (χλωρίδια, σουλφίδια ασβεστίου, μαγνησίου και νατρίου), μέταλλα όπως βάριο, μαγνήσιο κ.α., πετρέλαιο, γράσο και διαλελυμένες οργανικές ενώσεις που περιέχουν βενζόλιο τολουένιο κ.α.

Το κέντρο πολιτικής το 2012 διεξήγαγε μια έρευνα η οποία έδειξε ότι η υδραυλική ρωγμάτωση είναι σχεδόν απίθανο να επηρεάσει άμεσα έναν υδροφόρο ορίζοντα γλυκού νερού. Αυτό συμβαίνει διότι οι εκμεταλλεύσεις σχιστολιθικών κοιτασμάτων κυμαίνονται σε βάθος από 6,000-10,000 ft (1828.8- 3048m) ενώ οι υδροφόροι ορίζοντες βρίσκονται το πολύ σε βάθος 1,000 ft (304.8m). Η νομοθεσία περί εκμετάλλευσης κοιτασμάτων προϋποθέτει την ύπαρξη τουλάχιστον δυο σχηματισμών αδιαπέρατων πετρωμάτων μεταξύ των κοιτασμάτων και των υδροφορέων.

Το 2011 στην Πενσυλβάνια των Η.Π.Α., έγιναν χημικές αναλύσεις από 250 ιδιωτικές γεωτρήσεις νερού που απείχαν έως 2500 ft (762m) από το κοίτασμα Marcelous Shale. Από τα αποτελέσματα των αναλύσεων δεν υπήρξαν στατιστικά σημαντικές αλλαγές στη σύσταση

του νερού, όπως διαλελυμένα στερεά, χλώριο, νάτριο, σουλφίδια βάριο και στρόντιο. Στην ίδια περιοχή πραγματοποίησε έρευνα και το πανεπιστήμιο του Duke. Τα αποτελέσματα των δειγμάτων είχαν αυξημένη συγκέντρωση μεθανίου, ωστόσο δεν ανιχνεύθηκαν υγρά ρωγμάτωσης. Τα ίδια αποτελέσματα προέκυψαν και από έρευνα που πραγματοποίησε η Υπηρεσία Προστασίας Υπόγειων Υδάτων κατά τη χρονική περίοδο 1993 έως 2008, στο Τέξας των Η.Π.Α.[GAO, 2012].

## Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>: Υδραυλική ρωγμάτωση

### 3.1 Γενική περιγραφή τεχνικής/ βήματα

Μια τυπική διαδικασία όρυξης μιας γεώτρησης περιλαμβάνει την διάτρηση και απομάκρυνση των θραυσμάτων για την κατασκευή του φρέατος. Η κατασκευή των γεωτρήσεων είναι ένας συνδυασμός τεχνολογιών που έχουν να κάνουν από τις ιδιότητες των πετρωμάτων, την ασφάλεια της γεώτρησης και το συνολικό της κόστος.

Η όρυξη του φρέατος γίνεται με περιστροφική γεώτρηση ασκώντας στο κοπτικό άκρο δύναμη από πάνω προς τα κάτω καθώς αυτό περιστρέφεται. Η περιστροφική κίνηση της γεώτρησης δίνεται από το περιστροφικό τραπέζι (rotary table) που βρίσκεται στην επιφάνεια του εδάφους. Το κατάλληλο βάρος που θα ασκηθεί στο κοπτικό επιτυγχάνεται με την προσθήκη κολάρων (drill collars) και επιλέγεται με βάση τους σχηματισμούς που θα συναντήσει. Τα θραυσμένα υλικά, που προέκυψαν από τη γεώτρηση ανέρχονται στην επιφάνεια με τη βοήθεια του γεωτρητικού πολφού. Η γεωτρητική λάσπη εισέρχεται από το εσωτερικό της γεώτρησης και εξέρχεται από τα ακροφύσια του κοπτικού άκρου με πίεση ικανή να μπορεί να παρασύρει και να μεταφέρει τα θραύσματα στην επιφάνεια.

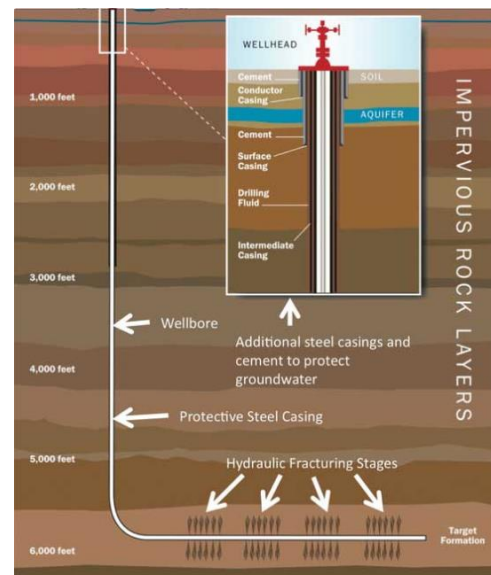
Τη στιγμή που η γεώτρηση έχει φτάσει στο επιθυμητό βάθος, για τη συγκεκριμένη φάση, σειρά έχει η επένδυση της γεώτρησης. Για τη σωλήνωση τοποθετείται ένα μικρό τμήμα κάθε φορά εξαιτίας της επικινδυνότητας και της δυσκολίας της συγκεκριμένης εργασίας, λόγω του μικρού μεγέθους της διατομής. Μετά τη σωλήνωση εισπνέζεται ένεμα από το στόμιο της γεώτρησης το οποίο επιστρέφει μέσω των σωλήνων και του πετρώματος.

Για τη ρωγμάτωση σχιστολιθικών ταμιευτήρων είναι απαραίτητη η όρυξη και οριζόντιων γεωτρήσεων. Η όρυξη του οριζόντιου τμήματος της γεώτρησης ξεκινά μετά την ολοκλήρωση του κατακόρυφου πηγαδιού με γωνία κλίσης που ξεκινά από 0° και μπορεί να φτάσει τις 90°. Όσο για το μήκος του οριζόντιου τμήματος της γεώτρησης μπορεί να κυμαίνεται από μερικά μέτρα έως κάποια χιλιόμετρα. Για την αλλαγή κατεύθυνσης σταματά η περιστροφή της γεώτρησης και γίνεται αλλαγή του κοπτικού άκρου, σε κοπτικό με κεκλιμένο τμήμα [Κελεσίδης, 2008].

Μετά την ολοκλήρωση της γεώτρησης σειρά έχει η επιλογή των περιοχών του ταμιευτήρα που θα εφαρμοστεί η πλευρική διάτρηση της σωλήνωσης (Σχήμα 4α), με τη χρήση ειδικών εκρηκτικών. Στη συνέχεια γίνεται εισπίεση ρευστού ρωγμάτωσης σε αυτές τις περιοχές. Στόχος της διαδικασίας αυτής είναι να θραυστεί το πέτρωμα ώστε να μπορεί να παράγει ποσότητες αερίου σε οικονομικά εκμεταλλεύσιμες ποσότητες. Η ρωγμάτωση του σχηματισμού γίνεται σε πολλαπλά στάδια. Η διαδικασία ξεκινά από το τέλος του οριζόντιου τμήματος της γεώτρησης και συνεχίζει πλησιάζοντας το κατακόρυφο τμήμα της. Μετά τη διάτρηση της σωλήνωσης τοποθετούνται packers ώστε να απομονώνονται τα εκάστοτε τμήματα για την αποφυγή διαρροής παραγόμενου αερίου. Στο Σχήμα 4β φαίνεται μια τυπική διάταξη αυτών των γεωτρήσεων.



**A**



**β**

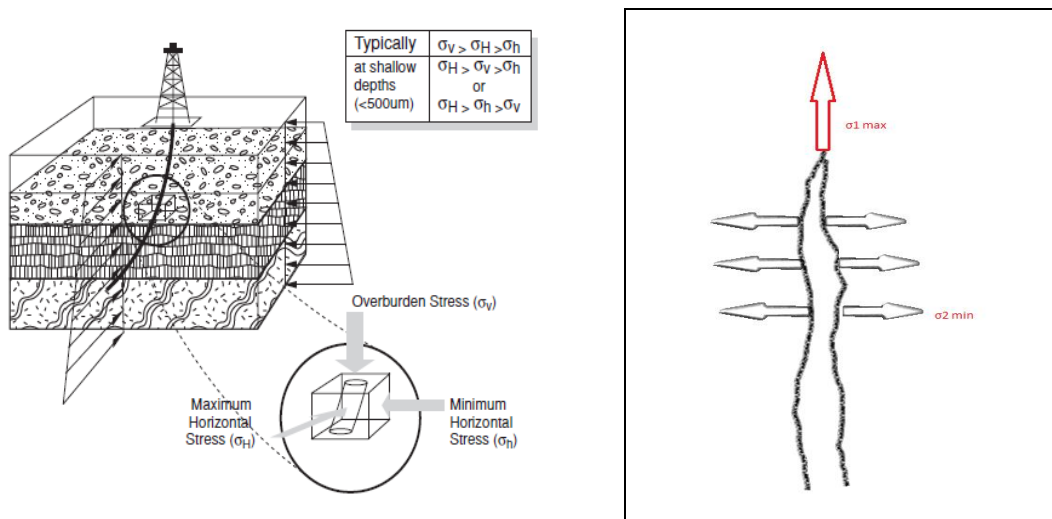
**Σχήμα 4: (α) Προσομοίωση γεώτρησης τη στιγμή της διάτρησης (watersafe.co.za) (β) Διάγραμμα διάταξης γεώτρησης υδραυλικής ρωγμάτωσης (imgarcade.com)**

### 3.2 Επίδραση του επιτόπου εντατικού πεδίου

Τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται για τη διάδοση των ρωγμών υποθέτουν πως τα γεωλογικά στρώματα, μέσα στα οποία διαδίδονται οι ρωγμές είναι ομοιογενείς, απεικονίζοντας έτσι τις ρωγμές σαν ενιαίο επίπεδο σώμα. Ωστόσο, η υπερκείμενη γεωλογία είναι ετερογενής, κάνοντας τη διάδοση των ρωγμών να είναι περίπλοκη. Η πολυπλοκότητα του δικτύου των ρωγμών επάγεται στο γεγονός ότι το επιθυμητό είναι να μεγιστοποιηθεί η επιφάνεια της ρωγμής ώστε να ρέει μεγαλύτερη ποσότητα παραγόμενου αερίου από το σχηματισμό προς τη γεώτρηση. Ο ρυθμός αύξησης της ρωγμής σχετίζεται με το ρυθμό έγχυσης του ρευστού ρωγμάτωσης, καθώς βοηθά στο να παραμείνει η ρωγμή εντός του σχηματισμού. Η πολυπλοκότητα της διάδοσης των ρωγμών έχει να κάνει με τις διαφορετικές ιδιότητες που έχουν τα στρώματα του σχηματισμού όπως είναι η αντοχή και το μέτρο διάτμησης. Σε περιπτώσεις που οι διεπιφάνειες μεταξύ των στρωμάτων είναι αδύναμες η διάδοση των ρωγμών μπορεί να είναι ανεξέλεγκτη, με αποτέλεσμα τη διαφυγή/ διαρροή ρευστών. Για το λόγο αυτό η ρωγμάτωση θα πρέπει να εισέρχεται σε στρώματα με μεγαλύτερη διαπερατότητα που να μπορούν να σταματήσουν την περεταίρω ανάπτυξη των ρωγμών και τη διαρροή ρευστών [Royal Academy, 2012].

Όπως είναι γνωστό από τη μηχανική του στερεού σώματος και την μηχανική πετρωμάτων, το τρισδιάστατο εντατικό πεδίο μπορεί να εκφραστεί με τρεις κύριες τάσεις οι οποίες είναι κάθετα προσανατολισμένες μεταξύ τους. Σε περιπτώσεις όμως που υπάρχει έντονος τεκτονισμός, η μέγιστη κύρια τάση παύει να είναι κάθετη ως προς το οριζόντιο επίπεδο και αποκτά κλίση. Ο προσανατολισμός όμως σε σχέση με τις υπόλοιπες κύριες τάσεις παραμένει ίδιος.

Για την περίπτωση όμως της διάδοσης των ρωγμών είναι απαραίτητος ο ακριβής προσανατολισμός των κυρίων τάσεων ώστε να μπορεί να προβλεφθεί η κατεύθυνση τους. Η διάδοση των ρωγμών θα κατευθυνθεί κάθετα προς τη διεύθυνση της ελάχιστης κύριας τάσης (Αρχή ελάχιστης κύριας τάσης). Αυτό συμβαίνει διότι η ελάχιστη κύρια τάση έχει μικρότερη αντοχή, σε σχέση με τη μέγιστη κύρια τάση (Σχήμα 5).



(Hydraulic Fracture)

**Σχήμα 5: Προσανατολισμός κυρίων τάσεων επί των ρωγμών**

Σύμφωνα με τον Αγιουτάντη (2002), για τη θραύση των πετρωμάτων πρέπει να ασκηθεί πίεση ικανή, μέσω των ρευστών θραύσης, ώστε οι εφαπτομενικές τάσεις να μετατραπούν από θλιπτικές σε εφελκυστικές. Αυτό θα έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία ρωγμών, όταν οι τάσεις ξεπεράσουν το όριο αντοχής του πετρώματος σε εφελκυσμό. Οι ρωγμές που προϋπάρχουν στο πέτρωμα και ενδεχομένως να ήταν κλειστές λόγω του θλιπτικού φορτίου θα διασταλούν εξαιτίας των εφελκυστικών τάσεων.

### 3.3 Ρευστά θραύσης

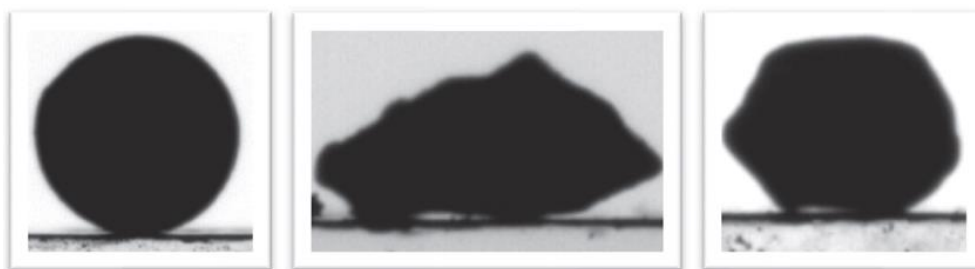
Οι ταμειυτήρες σχιστολιθικού αερίου ενεργοποιούνται με τη χρήση χημικών, θερμικών ή υδραυλικών τεχνικών όπως η υδραυλική ρωγμάτωση. Με την υδραυλική ρωγμάτωση εισπνέζονται στον ταμειυτήρα ρευστά, κατάλληλου ιξώδους, κατά μήκος του οριζόντιου τμήματος της γεώτρησης και εντός του σχηματισμού. Τα ρευστά θραύσης αποτελούνται από κοκκώδη υλικά και κατάλληλα υγρά ρωγμάτωσης τα οποία στη συνέχεια εισπνέζονται στον ταμειυτήρα με πίεση ικανή να θραύσει το σχηματισμό.

Υπάρχουν διάφοροι τύποι υγρών ρωγμάτωσης που έχουν σα βάση τους το νερό (π.χ. νερό με μια μικρή ποσότητα πολυμερούς). Αυτή η κατηγορία ρευστών ρωγμάτωσης είναι ιδιαίτερα δημοφιλής λόγω του χαμηλού κόστους τους, της ευκολίας στη χρήση τους και της υψηλής απόδοσης τους. Η προσθήκη υδατοδιαλυτών πολυμερών αυξάνει το ιξώδες τους ενισχύοντας με αυτόν τον τρόπο τη μεταφορά των υποστηρικτικών μέσων σε βαθύτερα σημεία των ταμειυτήρων. Οι υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται σε βαθύτερα σημεία των ταμειυτήρων επιδρούν αρνητικά στα υγρά ρωγμάτωσης, μειώνοντας το ιξώδες τους. Πιθανά μελλοντικά προβλήματα για τα υγρά με βάση το νερό είναι η καταστροφή των ευαίσθητων

ζωνών, σχηματίζοντας μια βραδύρευστη ζώνη (mud cake) με πολυμερή που οδηγούν στη χρήση μεγαλύτερων ποσοτήτων νερού. Υπάρχουν ειδικές χημικές ουσίες που μπορούν να μειώσουν μερικά από αυτά τα προβλήματα, που έχουν σα βάση τους το πετρέλαιο ή την αλκοόλη [Gaurav et al., 2012].

Συνήθως στην υδραυλική ρωγμάτωση χρησιμοποιούνται υγρά ρωγμάτωσης με υψηλό ιξώδες, που στη βάση τους περιέχονται πολυμερή και μεγάλες ποσότητες κοκκώδους υλικού (proppant). Τα κοκκώδη υλικά χρησιμοποιούνται για την υποστήριξη των ρωγμών για να παραμένουν ανοιχτές ώστε να ενισχύουν την ακτινική ροή περιμετρικά της γεώτρησης. Οι χημικές και ρεολογικές ιδιότητες του ρευστού ρωγμάτωσης προσαρμόζονται για τον εκάστοτε σχηματισμό.

Σε ορισμένες περιπτώσεις σχιστολιθικών ταμιευτήρων υπάρχουν φυσικές ρωγμές που μέσω του ρευστού ρωγμάτωσης (slickwater) συνδέονται με τις ρωγμές που δημιουργούνται από την υδραυλική ρωγμάτωση ώστε να επιτευχθεί μεγαλύτερη παραγωγή από τον ταμιευτήρα. Η χρήση του ρευστού ρωγμάτωσης έχει αυξηθεί τα τελευταία χρόνια λόγω του χαμηλού κόστους του και την αύξηση των αναγκών σε αέριο. Πιθανό πρόβλημα που μπορεί να δημιουργηθεί με τη χρήση του είναι να μην μεταφερθούν στο επιθυμητό βάθος τα υποστηρικτικά υλικά. Πιθανή λύση αυτού του προβλήματος είναι η χρήση υποστηρικτικών υλικών μικρότερου βάρους ώστε να μπορούν να μεταφέρονται ευκολότερα από το ρευστό ρωγμάτωσης [Gaurav et al., 2012].



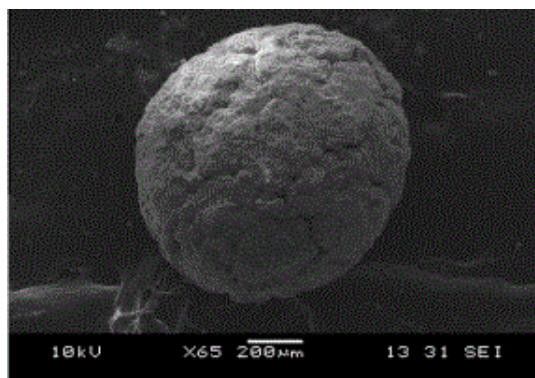
**Σχήμα 6: Σχηματική απεικόνιση υποστηρικτικών υλικών [Gaurav et al., 2012]**

Τα υποστηρικτικά μέσα (proppant) είναι κατασκευασμένα έτσι ώστε να μην αστοχούν στις συνθήκες του ταμιευτήρα όπου οι πιέσεις που επικρατούν και η θερμοκρασία είναι ιδιαίτερα αυξημένες. Η ποιότητα του κοκκώδους υλικού είναι καθοριστικής σημασίας για την επιτυχία της υδραυλικής ρωγμάτωσης. Τα χαρακτηριστικά τα οποία πρέπει να προϋποθέτουν είναι: η υψηλή αντοχή, η χαμηλή πυκνότητα, αντοχή σε όξινα περιβάλλοντα και χαμηλό κόστος.

Τα πιο συνηθισμένα υλικά που χρησιμοποιούνται σαν υποστηρικτικά μέσα είναι η χαλαζιακή άμμος και κεραμικοί κόκκοι. Πειραματικές μετρήσεις που έχουν πραγματοποιηθεί έδειξαν πως η χαλαζιακή άμμος είναι ιδιαίτερα ανθεκτική σε όξινα περιβάλλοντα. Παρόλα αυτά όμως μειώνει την αγωγιμότητα των ρωγμών εξαιτίας της χαμηλής αντοχής και της κακής σφαιρικότητας της. Στο Σχήμα 6 φαίνονται διάφορες μορφές που μπορούν να έχουν τα υποστηρικτικά υλικά που χρησιμοποιούνται.

Τα κεραμικά υλικά, από την άλλη έχουν υψηλή σκληρότητα και θερμοκρασία τήξης, μεγάλη αντοχή στη φθορά και υψηλό επίπεδο χημικής αδράνειας σε διαβρωτικά περιβάλλοντα. Ωστόσο ενώ τα κεραμικά δε διαβρώνονται εύκολα από HCl, διαβρώνονται από HCl-HF όταν

αναμειχθούν σε ορισμένες αναλογίες που τελικά οδηγούν στην κακή αντοχή σε οξύ με αποτέλεσμα να περιορίζεται η χρήση τους στη βιομηχανία πετρελαίου.



Σχήμα 7 [Gaurav et al., 2012]

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 7, η διάβρωση του υποστηρικτικού μέσου από διαλύματα HCl-HF, δημιούργησε μια τραχεία επιφάνεια με κοιλάματα και ρωγμές. Η διάβρωση αυτή φαίνεται να φτάνει μέχρι το βάθος των 3μm από την επιφάνεια.

### 3.4 Έλεγχος διάδοσης ρωγμών

Κατά την εκμετάλλευση σχιστολιθικών κοιτασμάτων είναι απαραίτητη η προσεκτική και συνεχής παρακολούθηση της διάδοσης των ρωγμών ώστε να παραμείνουν εντός των ορίων του σχηματισμού. Στην αντίθετη περίπτωση, που η διάδοση των ρωγμών γίνει ανεξέλεγκτη, η εκμετάλλευση μετατρέπεται σε αντιοικονομική καθώς γίνεται σπατάλη πόρων, χημικών ουσιών, ανθρώπινου δυναμικού και εξοπλισμού. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι παρακολούθησης της διάδοσης των ρωγμών όπως η χρήση χημικών ουσιών που προστίθενται στα υγρά ρωγμάτωσης. Η διάδοση των ρωγμών υπολογίζεται από τη συγκέντρωση, των ειδικών χημικών ουσιών, σε συνάρτηση με το χρόνο ανάκτησης του όγκου του επιστρεφόμενου νερού. Εναλλακτικά, μπορεί να εμπλουτιστεί η επιφάνεια των υποστηρικτικών μέσων με μία ραδιενεργή ουσία ώστε να μπορεί να ανιχνευθεί σε περίπτωση διαρροής.

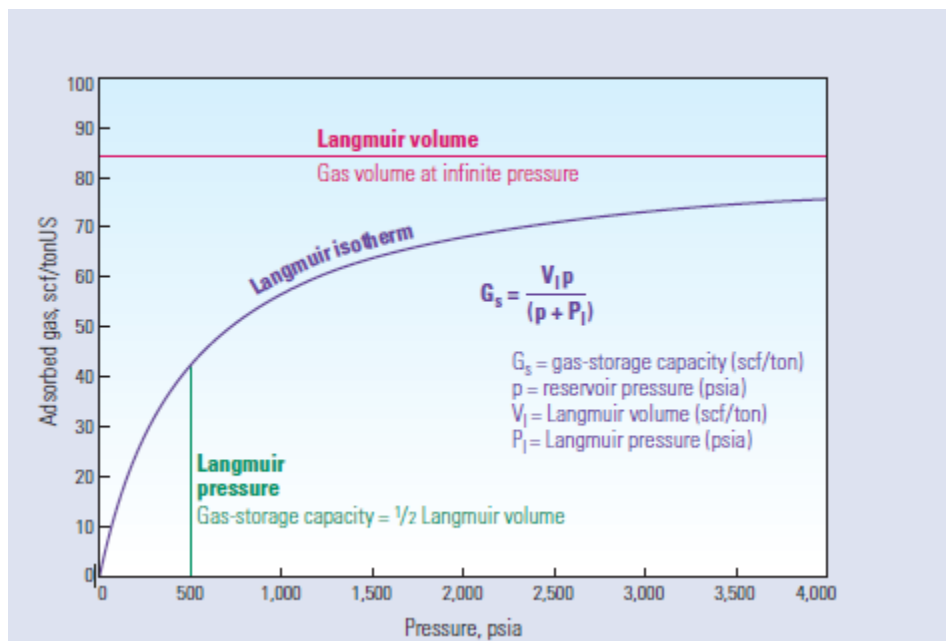
Από τις πιο πετυχημένες τεχνικές είναι οι μετρητές κλίσης (tiltmeters) τα οποία ανιχνεύουν πολύ μικρές παραμορφώσεις στο περιβάλλον πέτρωμα. Οι συσκευές αυτές τοποθετούνται είτε σε ρηχές γεωτρήσεις είτε σε πηγάδια παρακολούθησης της έκτασης και γεωμετρίας της ρωγμής [Royal Academy, 2012].

Με την υδραυλική ρωγμάτωση επιτυγχάνεται αύξηση της παραγωγής και της διαπερατότητας του πετρώματος. Η δημιουργία υψηλών πιέσεων, από την εισπίεση του υγρού ρωγμάτωσης, οδηγεί στην ανάπτυξη ρωγμών κάθετων προς την κατεύθυνση των ελάχιστων κύριων τάσεων. Η δημιουργία ρωγμών οφείλεται στην αστοχία του πετρώματος σε εφελκυστικές και διατμητικές τάσεις. Σύμφωνα με τους Kim and Moridis (2012) με τον τρόπο αυτό αλλάζει η διαπερατότητα καθώς και η ροή που λαμβάνει χώρα μέσα στο σχηματισμό.

## Κεφάλαιο 4ο: Παράμετροι που επηρεάζουν την παραγωγή του βιογενούς σχιστολιθικού αερίου

### 4.1 Ισόθερμη Langmuir

Για την περιγραφή της συμπεριφοράς του αερίου μέσα στο σχηματισμό το συνηθέστερο μοντέλο που χρησιμοποιείται είναι η ισόθερμη καμπύλη προσρόφησης κατά Langmuir. Ο υπολογισμός μιας ισόθερμης βασίζεται στην παραδοχή πως όλες οι επιφάνειες του σχηματισμού είναι ισοδύναμες και η ικανότητα δέσμευσης ενός μορίου στην επιφάνεια δεν εξαρτάται από το αν είναι ή όχι οι παρακείμενες θέσεις κατειλημμένες. Το ποσοστό επικάλυψης μιας επιφάνειας με αέριο είναι ανάλογο της πίεσης του αερίου μέσα στο σχηματισμό (pore pressure), σε σταθερή θερμοκρασία. Πιο συγκεκριμένα, με την αύξηση της πίεσης αυξάνεται και το ποσοστό επικάλυψης το οποίο φτάνει το 100% για πολύ υψηλές πιέσεις, δηλαδή έχει συμπιεστεί πάνω στην επιφάνεια του πετρώματος [Attkins, 2010]. Μια τυπική καμπύλη προσρόφησης κατά Langmuir παρουσιάζεται στο Σχήμα 8.



Σχήμα 8: Τυπική καμπύλη ισόθερμης Langmuir (sclumberger.com)

Από το Σχήμα 8, η μπλε γραμμή δείχνει την ποσότητα αερίου που εκροφάται από το σχηματισμό σε σχέση με την πίεση. Στο ίδιο σχήμα διακρίνεται μια μη γραμμική αύξηση της ισόθερμης καμπύλης Langmuir, σε σχέση με την αύξηση της πίεσης. Για τους σχιστολιθικούς ταμιευτήρες ο παραγόμενος όγκος αερίου που πρόκειται να παραχθεί υπολογίζεται από την εξίσωση

$$G_s = \frac{V_l * p}{p + P_l}$$

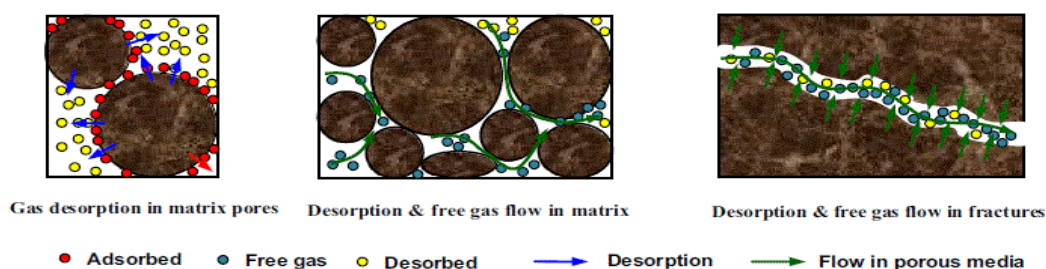
$G_s$  = ικανότητα αποθήκευσης αερίου (scf/ton)

$V_l$  = όγκος Langmuir (scf/ton)

$p$  = πίεση ταμιευτήρα (psia)

$P_i = \text{πίεση Langmuir (psia)}$

Το σχιστολιθικό αέριο βρίσκεται μέσα στο σχηματισμό σε δύο καταστάσεις, το ελεύθερο αέριο και το προσροφημένο (Σχήμα 9). Το προσροφημένο αέριο είναι αποθηκευμένο στους μικρό-πόρους του μητρικού πετρώματος ενώ το ελεύθερο αέριο βρίσκεται στις φυσικές ρωγμές του πετρώματος. Κατά τη διάρκεια της παραγωγής η πίεση των μικρό-πόρων μειώνεται με αποτέλεσμα το αέριο που ήταν προσροφημένο να εκροφάται και να ρέει, ενώ τη θέση του παίρνει το νέο ελεύθερο αέριο. Στο αρχικό στάδιο της παραγωγής, που η πίεση του ταμιευτήρα είναι αυξημένη, η συνεισφορά του εκροφούμενου αερίου προς το ανακτώμενο αέριο είναι αμελητέα. Για την πρόβλεψη όμως της μελλοντικής παραγωγής αερίου είναι αναγκαίο να ληφθούν υπόψη και οι δυο καταστάσεις στις οποίες βρίσκεται το αέριο στο σχηματισμό (Zhao et al., 2013). Αυτό που κάνει το αέριο τελικά να εκροφάται και να ρέει είναι η διατάραξη της πίεσης κατά την παραγωγή που αλλάζει τις θερμοδυναμικές συνθήκες ισορροπίας και οδηγεί στην εκρόφηση των μορίων του αερίου.



Σχήμα 9 Απεικόνιση ροής των μορίων του αερίου μέσα στο σχηματισμό [Zhao et al.,2013].

Προτείνονται δυο ομάδες μεθόδων που αφορούν την μοντελοποίηση των φαινομένων προσρόφησης και εκρόφησης –μέθοδος ισορροπίας και ανισορροπίας. Μέθοδοι ισορροπίας αποτελούν η ισόθερμη Langmuir, η εξίσωση Dubinin Radushkevich / Astakov, το ιδανικό μοντέλο προσρόφησης, το απλοποιημένο μοντέλο τοπικής πυκνότητας και η εξίσωση δύο διαστάσεων. Οι μέθοδοι ισορροπίας δε θεωρούν ενδιάμεσα στάδια για την προσρόφηση και εκρόφηση, δηλαδή το σύστημα προσροφούμενου και ελεύθερου αερίου είναι σε άμεση ισορροπία.

Η εκρόφηση των μορίων του αερίου από το πέτρωμα του ταμιευτήρα συνοδεύεται από τη συμπίεση (συρρίκνωση) του πετρώματος και την αλλαγή της διαπερατότητας του. Οι Palmer και Mansoori ανέπτυξαν ένα θεωρητικό μοντέλο για τη συμπίεστικότητα του πετρώματος συναρτήσει της πίεσης που έπειτα τροποποιήθηκε από τον Clarkson για την προσρόφηση του αερίου σε σχέση με την πίεση του πετρώματος [Qandari et al., 2013].

#### 4.2 Ροή ρευστού μέσα στον ταμιευτήρα (non- Darcy)

Σύμφωνα με το νόμο του Darcy η ροή ενός μονοφασικού ρευστού μέσα σε έναν σχηματισμό

$$Q = \frac{k * A * \Delta P}{\mu * L}.$$

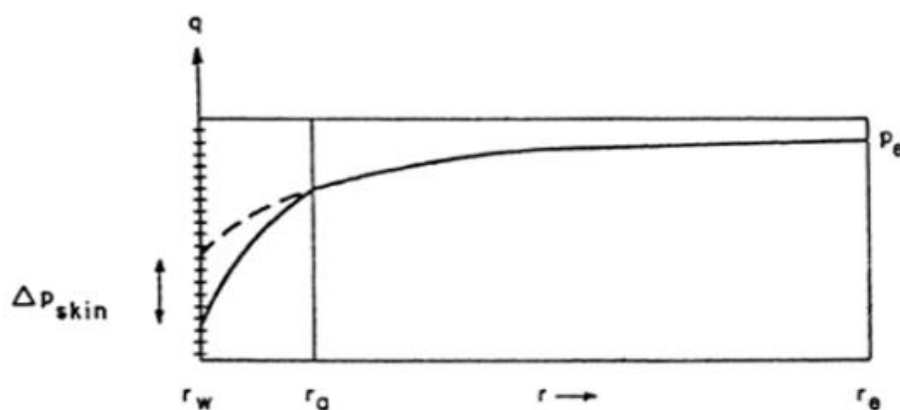
περιγράφεται από την εξίσωση

Για να ισχύει ο νόμος του Darcy πρέπει να μην αντιδρά χημικά το ρευστό με το πέτρωμα, το ρευστό με το οποίο πληρούνται οι πόροι του πετρώματος να είναι μονοφασικό και ο ρυθμός

παραγωγής να παραμείνει σε χαμηλά επίπεδα, ώστε και ο αριθμός Reynolds να μην ξεπεράσει την κρίσιμη τιμή της γραμμικής ροής.

Η ροή του ρευστού μέσα στον ταμιευτήρα χαρακτηρίζεται από το γεγονός ότι δεν υπακούει στο νόμο του Darcy (non Darcy flow), η οποία διαφοροποιείται από τη ροή κατά Darcy που θεωρείται στρωτή ροή. Η στροβιλώδης ή τυρβώδης ροή (non- Darcy flow) παρατηρείται σε πηγάδια και σχηματισμούς υψηλής παραγωγικότητας, όταν δηλαδή η ταχύτητα ροής υπερβεί τον αριθμό Reynolds για στρωτή ροή οδηγείται σε στροβιλώδη ροή. Εφόσον η στροβιλώδης ροή εμφανίζεται κυρίως κοντά στη γεώτρηση, ροή που αντιβαίνει όμως το νόμο Darcy, εξαρτάται κατά ένα ποσοστό και από τον επιδερμικό συντελεστή (skin factor).

Σύμφωνα με τον Βαρότση (2014), κατά την όρυξη της γεώτρησης αναπτύσσονται μεγάλες πιέσεις περιμετρικά της γεώτρησης με αποτέλεσμα τη διεύδυση γεωτρητικού ρευστού στο σχηματισμό. Συνέπεια της αύξησης της πίεσης είναι η διεύδυση αιωρούμενων σωματιδίων μέσα στο σχηματισμό, το βάθος διεύδυσης της ιλύος στο σχηματισμό εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του πετρώματος. Τα αιωρούμενα σωματίδια φράζουν τους ανοιχτούς δίαυλους που υπάρχουν μέσα στο σχηματισμό, με αποτέλεσμα περιμετρικά της γεώτρησης να έχουμε μείωση της διαπερατότητας του σχηματισμού και πτώση πίεσης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 10.



**Σχήμα 10: Τυπική καμπύλη επίδρασης επιδερμικού συντελεστή μέσα στο σχηματισμό [Βαρότσης, 2014]**

Η εισπίεση των ρευστών ρωγμάτωσης οδηγεί στην αύξηση της αγωγιμότητας του ταμιευτήρα, γεγονός που σημαίνει και αύξηση του πλάτους των ρωγμών. Η αύξηση αυτή οδηγεί στη μείωση της ταχύτητας ροής κατά μήκος της ρωγμάτωσης, προκαλώντας σημαντική μείωση της επίδρασης στη στροβιλώδη ροής (non—Darcy). Η διατήρηση του κατάλληλου μεγέθους του πλάτους των ρωγμών επιτυγχάνεται με την προσθήκη κατάλληλου μεγέθους κοκκώδους υλικού (proppant). Η χρήση της κατάλληλης διάστασης του proppant συνεισφέρει στο να αποφεύγεται η αύξηση της ταχύτητας ροής που οδηγεί τελικά σε τυρβώδη ροή.

Σε υψηλούς ρυθμούς παραγωγής σε πορώδη μέσα, η πτώση πίεσης δεν είναι ανάλογη της ταχύτητας του ρευστού. Μερικοί ερευνητές συγκρίνουν τη ροή μέσα στον ταμιευτήρα με τη ροή μέσα στις γεωτρήσεις παραγωγής. Ωστόσο, σύμφωνα με τον Geertsma το εύρος ροής που συνήθως παρατηρείται μέσα στους ταμιευτήρες πετρελαίου και αερίου, οφείλεται στην απώλεια ενέργειας που προκαλεί τη στροβιλώδη ροή κάτι που μπορεί να αγνοηθεί και η

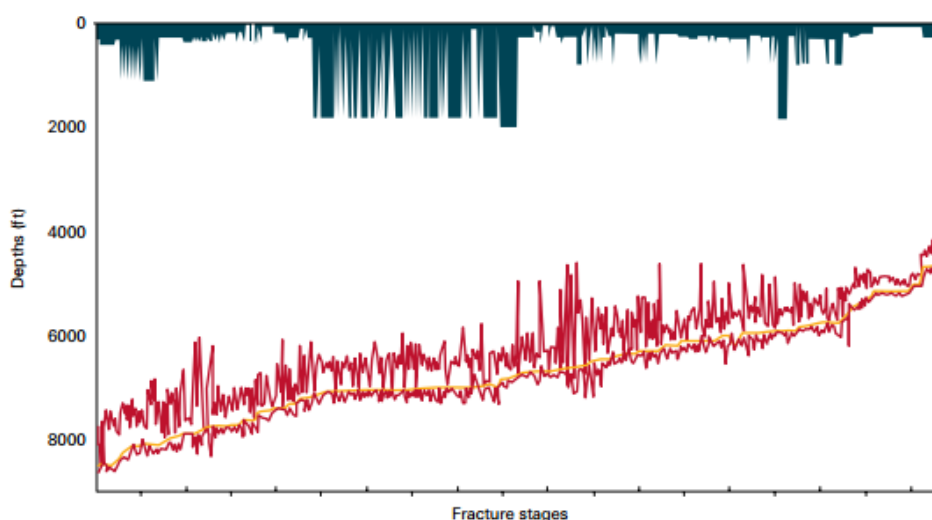
παρατηρούμενη απόκλιση από το νόμο του Darcy να οφείλεται στην επιτάχυνση και επιβράδυνση των ρευστών διαμέσου των πόρων. Οι ερευνητές Hassanizedeh και Gray κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι οι ελκτικές δυνάμεις που αναπτύσσονται μεταξύ των διεπιφανειών μπορεί να οδηγήσουν στην ανάπτυξη της μη γραμμικής συμπεριφοράς της ροής σε υψηλές ταχύτητες. Όσον αφορά την ανάλυση της απόδοσης η πτώση πίεσης, αυξάνει την στροβιλώδη ροή, σε περιοχές υψηλής ταχύτητας, δηλαδή κοντά στη γεώτρηση και κοντά στην υδραυλική ρωγμάτωση. Το φαινόμενο αυτό μπορεί να οδηγήσει στην υποτίμηση της διαπερατότητας του σχηματισμού, αν χρησιμοποιηθεί ο νόμος Darcy [Qanbari et al., 2013].

### 4.3 Μέγεθος Ρωγμών

Το μέγεθος των ρωγμών (μήκος / πλάτος) είναι ανάλογο των ποσοτήτων των υγρών ρωγμάτωσης που εισπνέζονται. Η εισπίεση μεγάλων ποσοτήτων υγρού ρωγμάτωσης οδηγεί στην αύξηση του κόστους και ενδεχομένως στην αύξηση της παραγωγής. Πολλές φορές δεν είναι επιθυμητή η ανεξέλεγκτη ανάπτυξη των ρωγμών

Όπως αναφέρεται και παραπάνω κατά την εκμετάλλευση του ταμιευτήρα στόχος είναι να επιτευχθεί το επιθυμητό μέγεθος ρωγμάτωσης. Στη βιβλιογραφία το επιθυμητό μήκος της ρωγμής ανέρχεται περίπου στα 150m και το επιθυμητό πλάτος ανέρχεται περίπου στα 60m. Οι επιθυμητές διαστάσεις επιτυγχάνονται με την εισπίεση κατάλληλου μεγέθους του κοκκώδους υλικού υποστήριξης (proppant). Ενδεικτικά αναφέρεται πως με αύξηση κατά 50% του όγκου του της άμμου που περιλαμβάνεται στο υλικό υποστήριξης, αυξάνεται κατά 50% και το πλάτος της ρωγμής. Η αύξηση του πλάτους συμβάλλει στη μείωση της επίδρασης της στροβιλώδους ροής.

Στοιχεία (μικροσεισμών) από τις Η.Π.Α. δείχνουν πως είναι απίθανο να υπάρξει κατακόρυφη ανάπτυξη των ρωγμών από υδραυλική ρωγμάτωση παραπάνω από 1 km (Σχήμα 11). Πρόσφατη βρετανική μελέτη εξέτασε την κατακόρυφη ανάπτυξη των ρωγμών, με βάση πρόσφατες καταγραφές από σχιστολιθικούς ταμιευτήρες των Η.Π.Α., της Ευρώπης και της Αφρικής.



Σχήμα 11: Απεικόνιση των ρωγμών κατά μήκος της οριζόντιας γεώτρησης [Royal Academy, 2012].

Οι κόκκινες γραμμές στο Σχήμα 11 δείχνουν την ανάπτυξη των ρωγμών προς τα πάνω και προς τα κάτω. Η κίτρινη γραμμή, δείχνει το βάθος που έχει πραγματοποιηθεί η υδραυλική ρωγμάτωση. Τέλος, η μπλε γραμμή, στο πάνω μέρος του διαγράμματος δείχνει το βάθος στο οποίο φτάνουν οι υδροφόροι ορίζοντες.

Το μεγαλύτερο κατακόρυφο ύψος που εξετάστηκε ήταν μικρότερο των 600m και μόλις το 1% ξεπερνούσε τα 350m. Το μεγαλύτερο ποσοστό κυμαίνονταν από 200-400m. Αυτό που δεν έχει γίνει ακόμη σαφές είναι αν ο τρόπος διάδοσης των φυσικών ρωγμών ακολουθεί τον ίδιο μηχανισμό διάδοσης με τα υδραυλικά ανοίγματα, παρόλο που υπάρχουν ομοιότητες [Royal Academy, 2012].

#### 4.4 Πίεση Πόρων

Σύμφωνα με τον Αγιουτάντη (2002), η θραύση των πόρων, οι οποίοι περιέχουν ρευστά, δεν εξαρτάται μόνο από τις τάσεις του εντατικού πεδίου αλλά και από τις ενεργές τάσεις, οι οποίες ορίζονται από τη σχέση:  $\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - \alpha * p_{ij}$

p= πίεση πόρων

$\alpha$ = συντελεστής υλικού ( $0 < \alpha < 1$ )

Έχει αποδειχθεί πειραματικά ότι η αντοχή των πετρωμάτων σε θλίψη μειώνεται όταν περιέχεται στους πόρους του υγρασία, όπως επίσης μειώνεται και το μέτρο ελαστικότητας του Young [Αγιουτάντης, 2002].

Η πίεση που έχουν οι πόροι των σχηματισμών συνήθως είναι η υδροστατική πίεση. Για ιζηματογενείς σχηματισμούς όμως, όπως είναι ο σχιστόλιθος, τα ρευστά συμπιέζονται μέσα στους πόρους καθώς δε μπορούν να απομακρυνθούν. Εφόσον τα ρευστά δεν μπορούν να διαφύγουν από τους πόρους των πετρωμάτων είναι αναγκασμένα να συκρατήσουν όλο το βάρος των υπερκείμενων στρωμάτων με αποτέλεσμα να αναπτύσσονται τεράστιες πιέσεις στο σχηματισμό.

#### 4.5 Διαπερατότητα

Η διαπερατότητα είναι μια από τις πιο σημαντικές ιδιότητες των πετρωμάτων των ταμιευτήρων. Ως διαπερατότητα ορίζεται η ικανότητα ενός πετρώματος, να επιτρέπει σε ένα ρευστό ή ένα αέριο να κυκλοφορήσει διαμέσου των πόρων του, όταν οι πόροι του συγκοινωνούν.

Το εύρος τιμών που μπορεί να πάρει η διαπερατότητα είναι μεγάλο και μπορεί να ποικίλλει ακόμη για το ίδιο στρώμα σε απόσταση μερικών εκατοστών, τόσο στην οριζόντια διεύθυνση όσο και στην κατακόρυφη [Βαρότης, 2014].

Η μονάδα μέτρησης της διαπερατότητας είναι το 1 Darcy και ορίζεται από την εξίσωση:

$$Q = \frac{k * A * \Delta P}{\mu * L}$$

Q = παροχή ρευστού

$\Delta P$  = διαφορά πίεσης

$k$  = διαπερατότητα του σχηματισμού

$\mu$  = ιζώδες ρευστού

$L$  = απόσταση μεταξύ των σημείων που μετρήθηκαν οι πιέσεις

«Ένα πορώδες μέσο έχει διαπερατότητα 1 Darcy, όταν πρόκειται για μονοφασικό ρευστό ιζώδους 1cP, ρέει διαμέσου πόρων κυκλικής διατομής  $1\text{cm}^2$ , με μια παροχή  $1\text{cm}^3/\text{sec}$ , υφιστάμενο πτώσης πίεσης 1 atm ανά cm διανυθείσας απόστασης».

Στους σχιστολιθικούς ταμιευτήρες η διαπερατότητα είναι ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες παραγωγής διότι στην περίπτωση που δεν επιτευχθεί το κατάλληλο μέγεθος δεν μπορεί να υπάρξει παραγωγή.

Σύμφωνα με τους Qanbari et al. (2013), σε όλους τους ταμιευτήρες, οι αλλαγές πίεσης και θερμοκρασίας που γίνονται κατά τη διαδικασία παραγωγής, συνοδεύονται και από αλλαγές αντοχής. Σε ταμιευτήρες χαμηλής αντοχής, συμπεριλαμβανομένων και των ταμιευτήρων αερίου και πετρελαίου, οι αλλαγές της πίεσης κατά την παραγωγή μπορεί να μειώσει την απόλυτη διαπερατότητα που θα οδηγήσει τελικά και στη μείωση της παραγωγικότητας. Σύμφωνα με την θεωρία της ποροελαστικότητας και θερμοελαστικότητας, που υποστηρίζεται από εργαστηριακές μελέτες, το πορώδες και η διαπερατότητα είναι αποτελεσματικές ιδιότητες που λειτουργούν αποτελεσματικά στην αντοχή. Τα πετρώματα των ταμιευτήρων μπορούν να παρουσιάζουν μια εκθετική ή γραμμική σχέση μεταξύ της απόλυτης διαπερατότητας και της μέσης ενεργής τάσης ή μια σχέση μεταξύ αποτελεσματικής διαπερατότητας και πορώδους. Η εκθετική σχέση που συνδέει την διαπερατότητα και τη μέση ενεργή τάση είναι η:

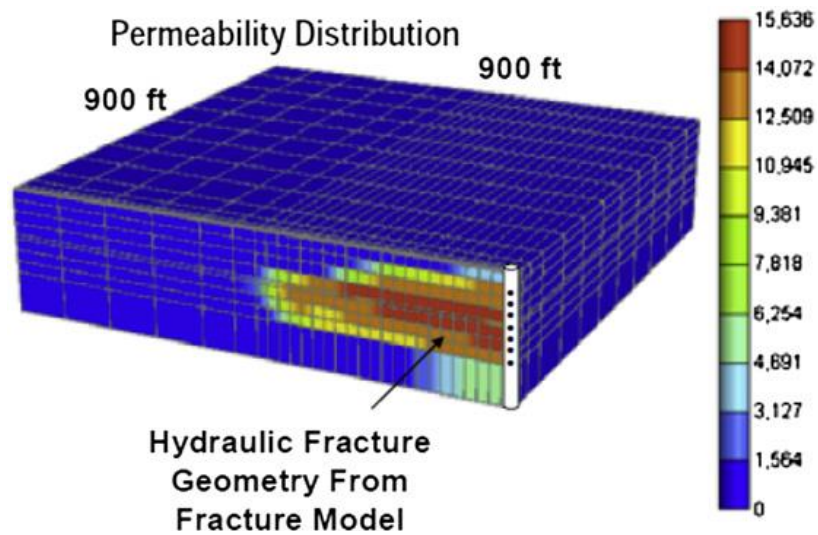
$$k = k_0 * e^{-bk(\sigma'_m - \sigma'_{mo})} \quad (1)$$

$k$  = διαπερατότητα

$b_k$  = παράμετρος βράχου

$k_0$  = διαπερατότητα σε σχέση με τη μέση πίεση ( $\sigma'_{mo}$ )

Η εξίσωση (1) συνήθως χρησιμοποιείται για τη σύνδεση μεταξύ πειραματικών δεδομένων για τη διαπερατότητα σε σχέση με τη μέση ενεργή τάση. Ωστόσο, η σχέση διαπερατότητας και πίεσης πόρων απαιτείται για τη συσχέτιση μοντέλων που χρησιμοποιούνται για τη ροή ρευστών μέσα σε σχιστολιθικούς ταμιευτήρες.



**Σχήμα 12:** Απεικόνιση της κατανομής της διαπερατότητας μετά από υδραυλική ρωγμάτωση [Mohaghegh, 2013].

Η τεχνική της υδραυλικής ρωγμάτωσης έχει καλύτερα αποτελέσματα σε περιοχές κοντά στη γεώτρηση. Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 12, η διαπερατότητα του σχηματισμού είναι μεγαλύτερη κοντά στη γεώτρηση ενώ καθώς αυξάνεται η ακτίνα επίδρασης της υδραυλικής ρωγμάτωσης η διαπερατότητα μειώνεται.

## Κεφάλαιο 5ο: Προσομοίωση ταμιευτήρων βιογενούς σχιστολιθικού αερίου

### 5.1 Βασικές αρχές λειτουργίας του λογισμικού

Το λογισμικό πρόγραμμα GEM της CMG που χρησιμοποιείται για την μελέτη μη συμβατικών ταμιευτήρων (unconventional reservoirs), επιλύει ταυτόχρονα εξισώσεις που αναφέρονται στο νόμο της ροής σε πορώδες μέσω του Darcy και στο νόμο της διάχυσης του Fick για τον υπολογισμό της ποσότητας του ρευστού που κινείται μέσα στον σχηματισμό. Η εκρόφιση του αερίου από το πέτρωμα και η ροή του προς τη γεώτρηση παραγωγής λύνεται σαν μια τυπική ροή Darcy. Ωστόσο, το αέριο του σχηματισμού κινείται από το πέτρωμα στις ρωγμές με διάχυση, για αυτόν τον λόγο χρησιμοποιείται ο νόμος της διάχυσης του Fick που περιγράφει την κίνηση των μορίων του αερίου μέσα στο σχηματισμό. Το λογισμικό επιλύει την εξίσωση

$$q = \sigma \times D_c \times (c - c_f).$$

Παρότι το λογισμικό πρόγραμμα GEM διαθέτει πλειάδα εργαλείων επίλυσης κάτω από διαφορετικές συνθήκες, συνηθέστερα χρησιμοποιείται η εφαρμογή του νόμου του Darcy διότι αναφέρεται σε ομαλή (στρωτή) ροή και όχι τυρβώδη. Τα μοντέλα αυτά επιλύονται σαφώς ταχύτερα από αντίστοιχα μοντέλα τυρβώδους ροής. Ο νόμος του Fick χρησιμοποιείται από τους μηχανικούς για την ερμηνεία

των φαινομένων μεταφοράς μάζας. Η χρήση του στο λογισμικό αναφέρεται στο κομμάτι της διερεύνησης της ροής του αερίου από τη ρωγμή ως τη γεώτρηση. Επίσης, λαμβάνεται υπόψη η ενέργεια Gibbs. Συγκεκριμένα γίνεται από το μοντέλο μια ανάλυση της ενεργείας Gibbs με σκοπό των προσδιορισμό φάσεων και την διατήρηση της σταθερότητας τους.

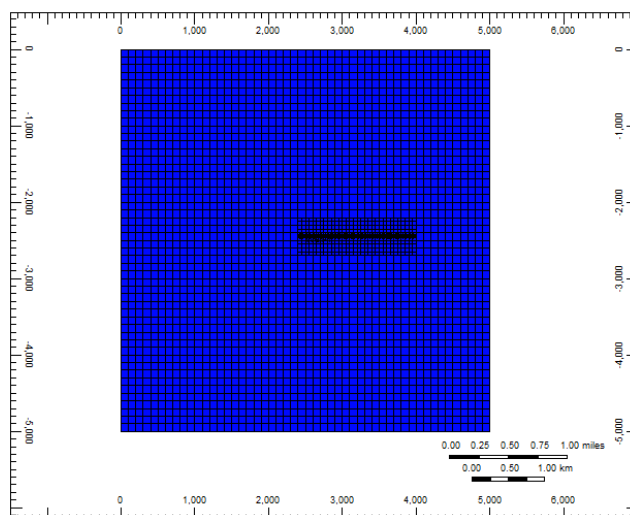
Το GEM συσχετίζει την πίεση στον πυθμένα (Bottom Hole Pressure) με την πίεση επιφανείας της γεώτρησης (Well Head Pressure). Δήλωση αν δεν εισαχθεί χειροκίνητα τιμή για την πίεση του πυθμένα τότε το λογισμικό εισάγει αυτόματα πίεση ίση με 101,3 kPa περίπου ίση με μία ατμόσφαιρα. Κατά τη διάρκεια λειτουργίας της γεώτρησης η πίεση πυθμένα μπορεί να μεταβληθεί αυτό όμως δεν επηρεάζει την πίεση των εκατέρωθεν σχηματισμών. Δηλαδή η πίεση του πυθμένα της γεώτρησης δεν συσχετίζεται άμεσα από το λογισμικό με την πίεση του σχηματισμού.

### 5.2 Παραμετρική Ανάλυση

#### 5.2.1 Μοντέλο παραμετρικής ανάλυσης M.V. 1

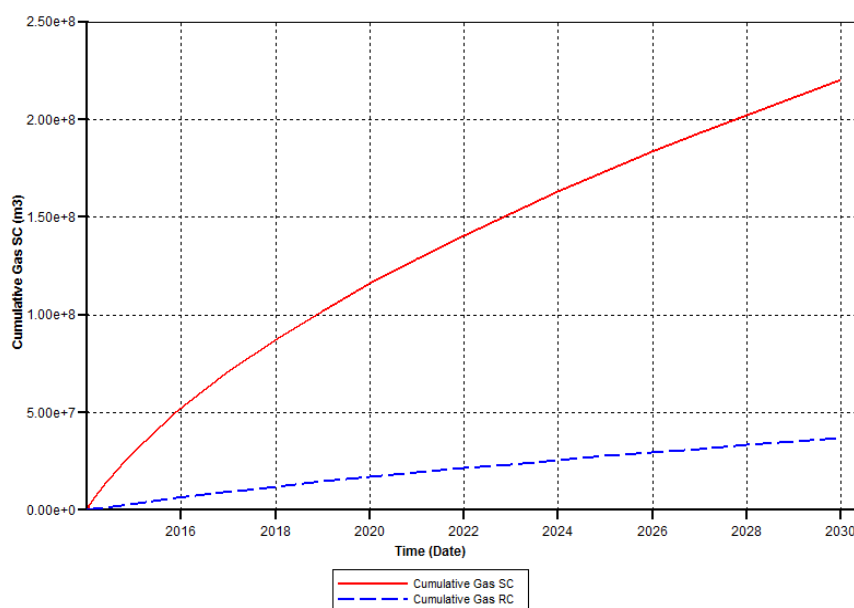
Για την παραμετρική ανάλυση χρειάστηκε να ορισθούν πέντε μοντέλα που επεξηγούν τη λειτουργία των γεωτρήσεων και τα αποτελέσματα της παραγωγής τους.

Αρχικά, εξετάστηκε η περίπτωση που έχει πραγματοποιηθεί υδραυλική ρωγμάτωση σε όλο το μήκος του οριζόντιου τμήματος της γεώτρησης (Σχήμα 13).



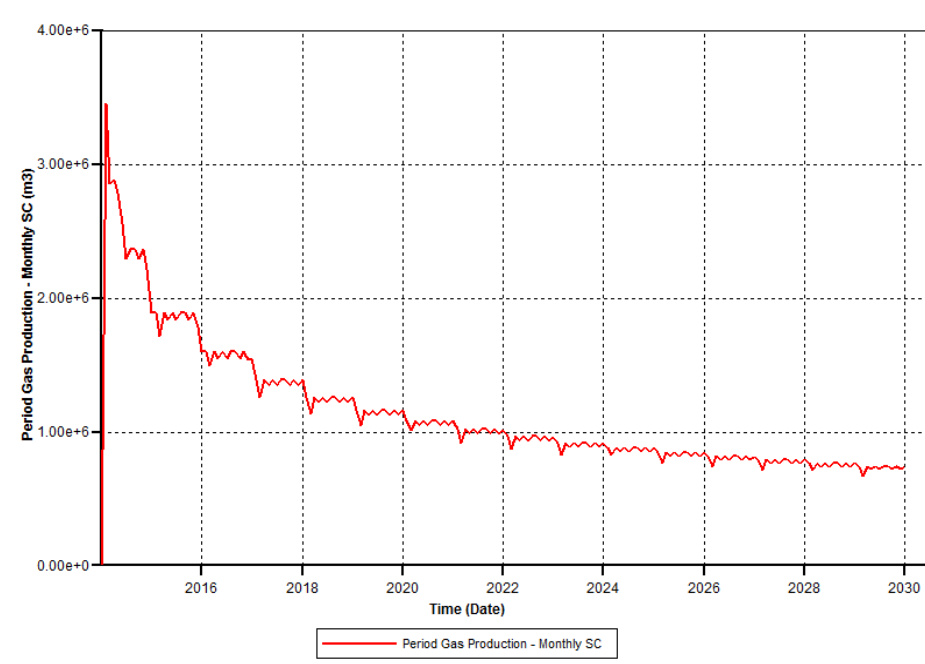
**Σχήμα 13: Κάτοψη μοντέλου με υδραυλική ρωγμάτωση σε όλο το οριζόντιο τμήμα της γεώτρησης.**

Παρακάτω δίνεται το διάγραμμα του συνολικού παραγόμενου αερίου σε κανονικές συνθήκες και σε συνθήκες ταμειυτήρα. Η συνολική παραγωγή της γεώτρησης (Σχήμα 14) για τα 16 χρόνια λειτουργίας της είναι  $2,20 \cdot 10^8$  (m<sup>3</sup>). Η περίπτωση αυτή έβγαλε τα καλύτερα αποτελέσματα όσον αφορά την ποσότητα αερίου που παράχθηκε.



**Σχήμα 14: Διάγραμμα συνολικής ποσότητας παραγόμενου αερίου σε κανονικές συνθήκες και συνθήκες ταμειυτήρα.**

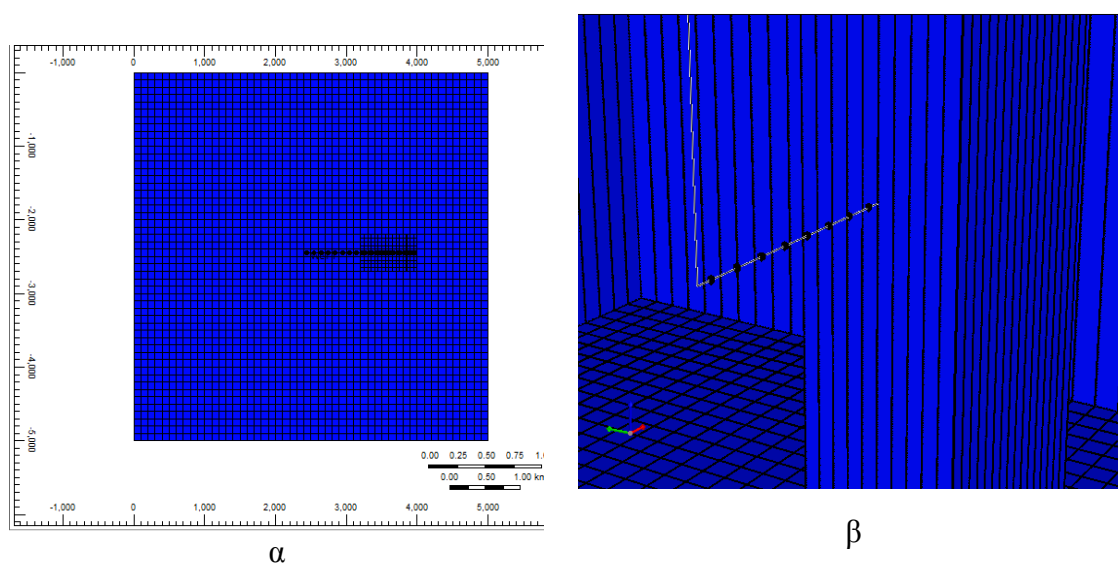
Η μέγιστη ημερήσια παραγωγή (Σχήμα 15) σημειώνεται την 31η μέρα από την έναρξη λειτουργίας της γεώτρησης με  $3,45 \cdot 10^6$  (m<sup>3</sup>).



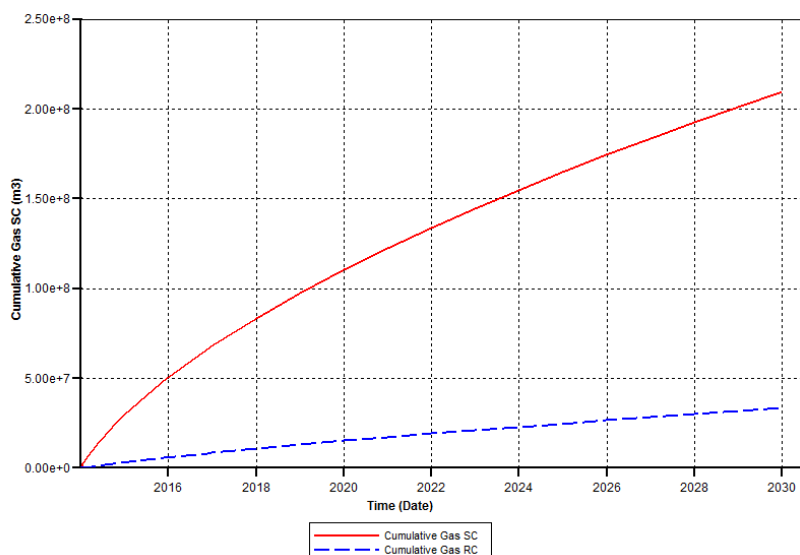
Σχήμα 15: Διάγραμμα μηνιαίας παραγωγής αερίου σε κανονικές συνθήκες.

### 5.1.2 Μοντέλο παραμετρικής ανάλυσης M.V. 1

Στη δεύτερη μοντελοποίηση (Σχήμα 16), πραγματοποιήθηκε υδραυλική ρωγμάτωση στο μισό μήκος του οριζώντιου τμήματος της γεώτρησης, ενώ το υπόλοιπο μήκος της ήταν απλά διάτρητο.



Σχήμα 16: (α) Κάτοψη του μοντέλου (β) Απεικόνιση του εσωτερικού του μοντέλου και των (ανοιχτών) διατρήσεων (PERF) της γεώτρησης.

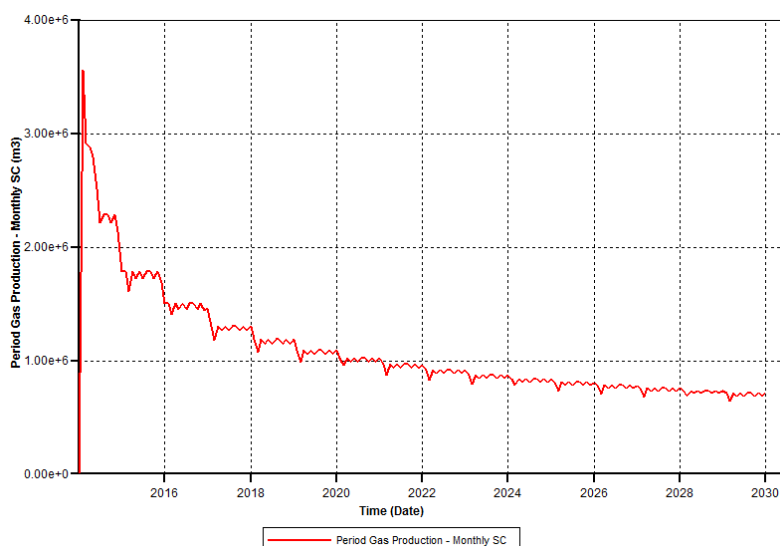


**Σχήμα 17: Διάγραμμα συνολικής ποσότητας παραγόμενου αερίου σε κανονικές συνθήκες και συνθήκες ταμειυτήρα.**

Από το διάγραμμα της συνολικής ποσότητας παραγόμενου αερίου (Σχήμα 17), παρατηρείται μια μικρή μείωση στην παραγόμενη ποσότητα αερίου σε σχέση με την προηγούμενη περίπτωση. Σε αυτήν την περίπτωση η μέγιστη ποσότητα που παράγει η γεώτρηση είναι  $2,09 \cdot 10^8 \text{ (m}^3\text{)}$ .

Από το διάτρητο τμήμα της γεώτρησης παράγεται μια μικρή ποσότητα αερίου καθώς οι διατρήσεις είναι ανοιχτές (PERF).

Η μέγιστη παραγωγή που επιτυγχάνεται από τη γεώτρηση είναι  $3,56 \cdot 10^6 \text{ (m}^3\text{)}$  (Σχήμα 18).

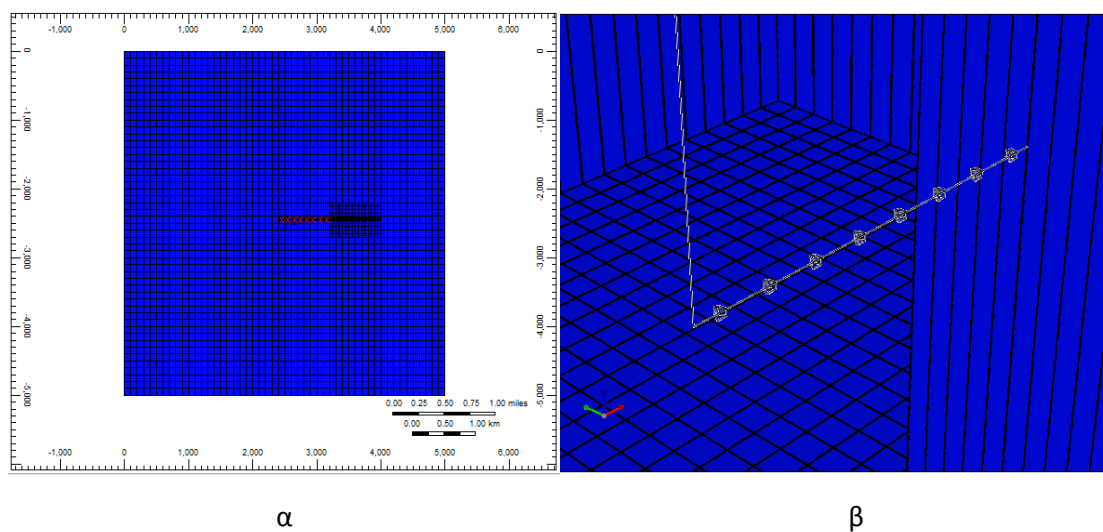


**Σχήμα 18: Διάγραμμα μηνιαίας παραγωγής αερίου σε κανονικές συνθήκες.**

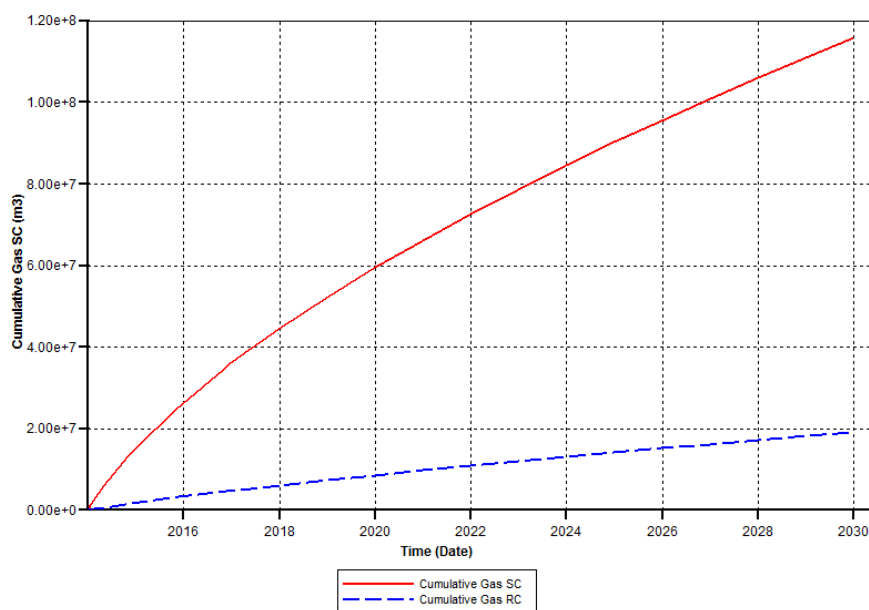
### **5.1.3 Μοντέλο παραμετρικής ανάλυσης M.V.3**

Στο τρίτο μοντέλο της παραμετρικής ανάλυσης, οι διατρήσεις (PERF) που υπάρχουν στο οριζόντιο τμήμα της γεώτρησης (Σχήμα 19), πριν από το τμήμα που έχει πραγματοποιηθεί υδραυλική ρωγμάτωση, ήταν κλειστές. Όπως ήταν αναμενόμενο, παρατηρήθηκε μείωση

στην ποσότητα του αερίου που παράγεται στην επιφάνεια με τη συνολική ποσότητα παραγόμενου αερίου (Σχήμα 20) να ανέρχεται στα  $1,16 \cdot 10^8 \text{ (m}^3\text{)}$ .

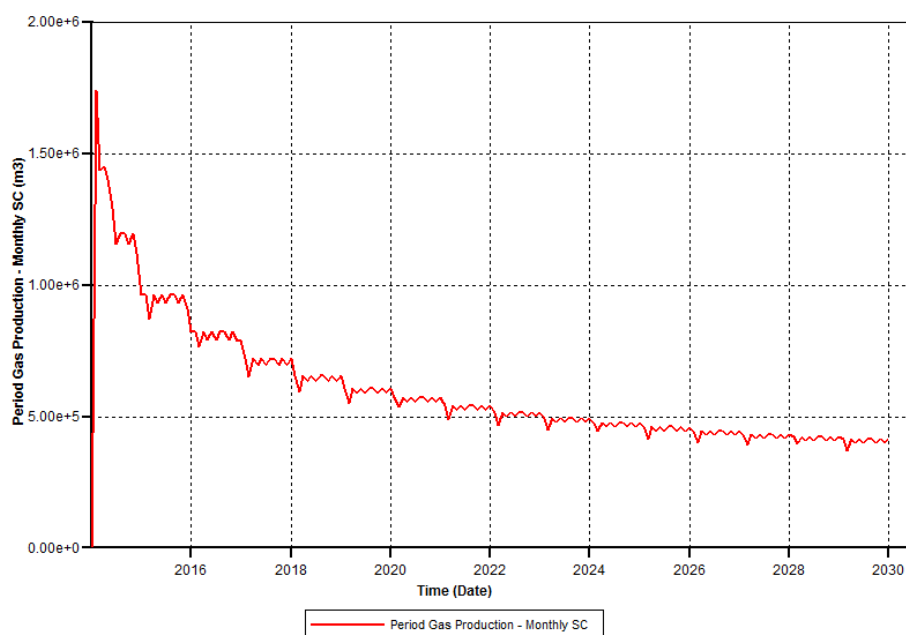


**Σχήμα 19: (α) Κάτοψη μοντέλου (β) Απεικόνιση του εσωτερικού του μοντέλου και των (κλειστών) διατρήσεων (PERF) της γεώτρησης.**



**Σχήμα 20: Διάγραμμα συνολικής ποσότητας παραγόμενου αερίου σε κανονικές συνθήκες και συνθήκες ταμειυτήρα.**

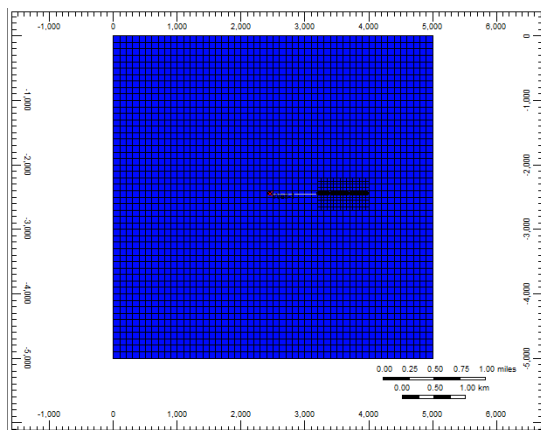
Από το Σχήμα 21, φαίνεται πως η μέγιστη ημερήσια παραγωγή που επιτυγχάνεται στην περίπτωση αυτή ανέρχεται στα  $1,74 \cdot 10^6 \text{ (m}^3\text{)}$ .



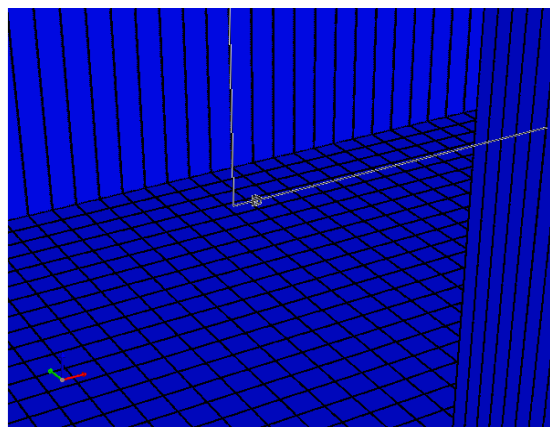
Σχήμα 21: Διάγραμμα μηνιαίας παραγωγής αερίου σε κανονικές συνθήκες.

#### 5.1.4 Μοντέλο παραμετρικής ανάλυσης M.V. 4

Στο τέταρτο μοντέλο εξετάστηκε η περίπτωση το οριζόντιο τμήμα της γεώτρησης να μην έχει καθόλου διάτρητο τμήμα, πέρα από τη ζώνη που πραγματοποιείται η υδραυλική ρωγμάτωση (Σχήμα 22).



A

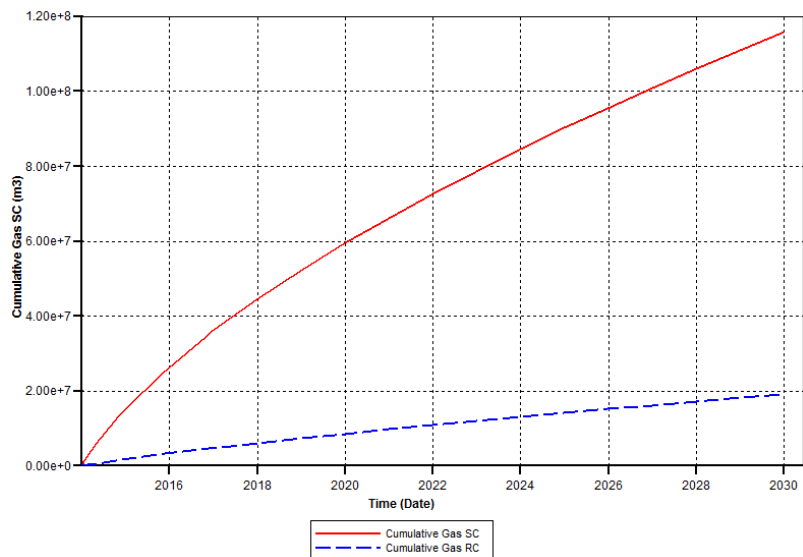


β

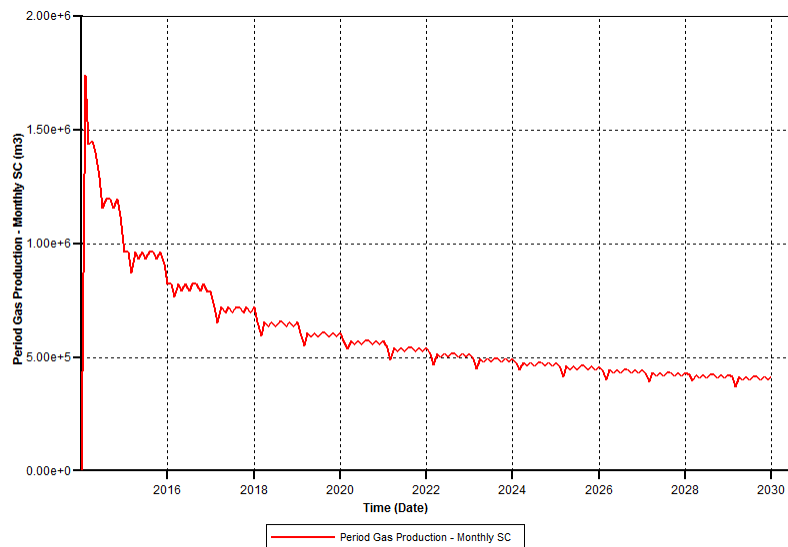
Σχήμα 22: (α) Κάτοψη μοντέλου (β) Εσωτερική απεικόνιση μοντέλου.

Με βάση το διάγραμμα της συνολικής παραγόμενης ποσότητας αερίου σε κανονικές συνθήκες (Σχήμα 23) η γεώτρηση παράγει  $1,16 \cdot 10^8$  (m<sup>3</sup>). Ακριβώς την ίδια ποσότητα δηλαδή με την προηγούμενη περίπτωση, που η γεώτρηση το διάτρητο τμήμα της γεώτρησης ήταν κλειστό.

Επομένως, όπως είναι λογικό και το διάγραμμα της μηνιαίας παραγωγής (Σχήμα 24) δίνει τα ίδια ακριβώς αποτελέσματα με την προηγούμενη περίπτωση.



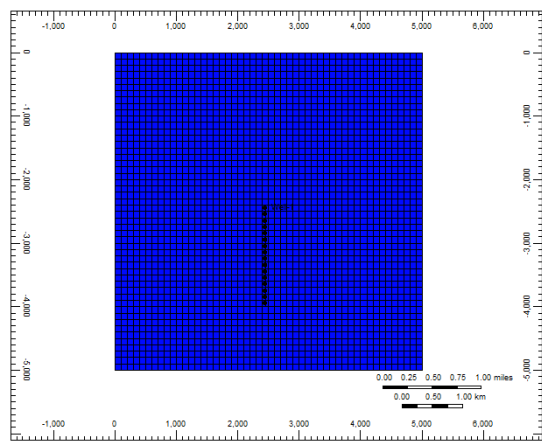
**Σχήμα 23: Διάγραμμα συνολικής ποσότητας παραγόμενου αερίου σε κανονικές συνθήκες και συνθήκες ταμειυτήρα.**



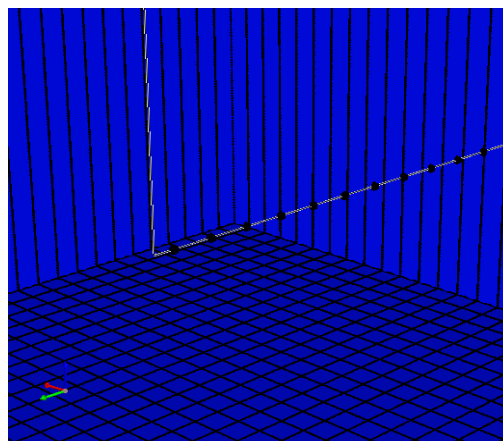
**Σχήμα 24: Διάγραμμα μηνιαίας παραγωγής αερίου σε κανονικές συνθήκες.**

### 5.1.5 Μοντέλο παραμετρικής ανάλυσης M.V.5

Στην τελευταία περίπτωση παραμετρικής ανάλυσης, το μοντέλο αποτελούνταν από μια διάτρητη οριζόντια γεώτρηση αλλά χωρίς υδραυλική ρωγμάτωση (Σχήμα 25).



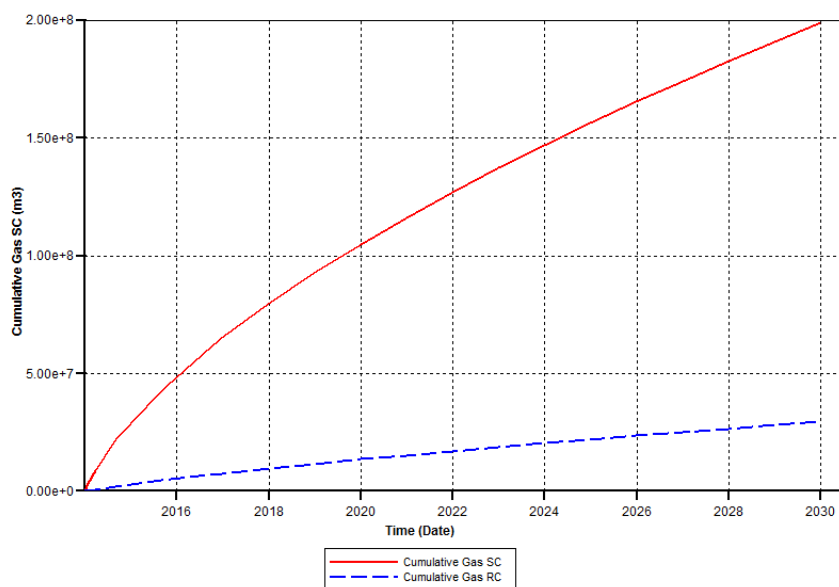
α



β

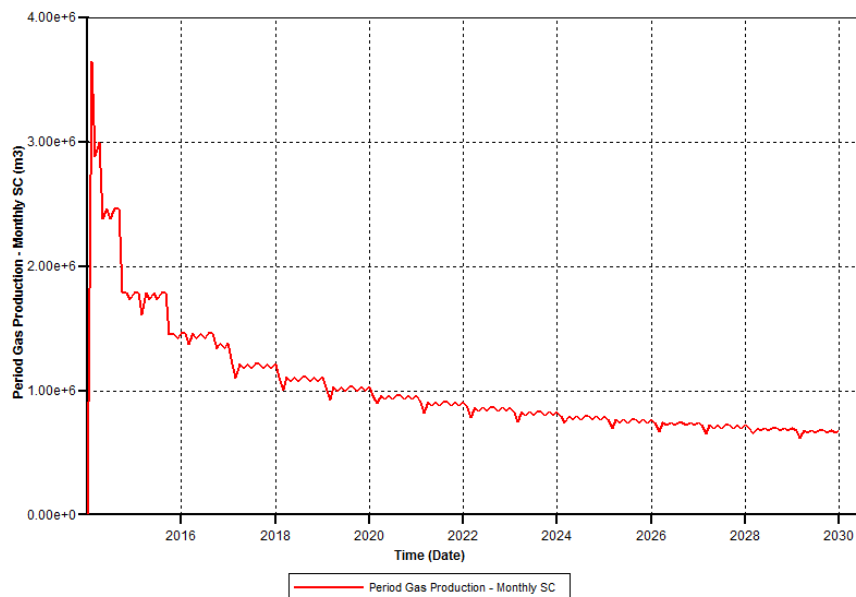
Σχήμα 25: (α) Κάτοψη μοντέλου (β) Εσωτερική απεικόνιση του μοντέλου

Αξίζει να σημειωθεί πως η συγκεκριμένη γεώτρηση, που δεν παράγει σε ρωγματωμένη ζώνη, δίνει συνολική ποσότητα αερίου  $1,99 \cdot 10^8 \text{ (m}^3\text{)}$  (Σχήμα 26), ενώ η γεώτρηση στην πρώτη περίπτωση, που έχει υποστεί υδραυλική ρωγμάτωση σε όλο το μήκος της δίνει συνολική ποσότητα αερίου  $2,20 \cdot 10^3 \text{ (m}^3\text{)}$ .



Σχήμα 26: Διάγραμμα συνολικής ποσότητας παραγόμενου αερίου σε κανονικές συνθήκες και συνθήκες ταμειυτήρα.

Στο Σχήμα 27, δίνεται πως η μηνιαία παραγωγή αερίου είναι  $3,65 \cdot 10^6 \text{ (m}^3\text{)}$ . Ενώ, σε σύγκριση και πάλι με την πρώτη περίπτωση της παραμετρικής ανάλυσης, σημειώνει μεγαλύτερη παραγωγή για την ίδια χρονική στιγμή.

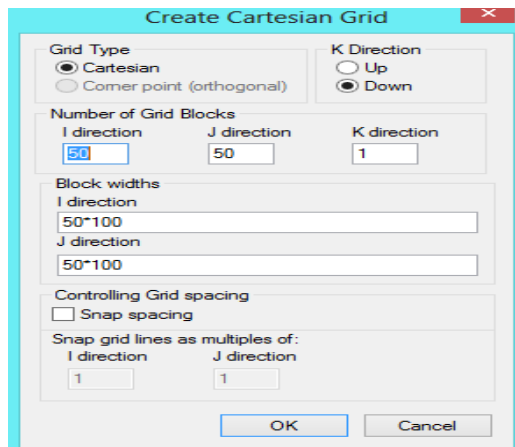


Σχήμα 27: Διάγραμμα μηνιαίας παραγωγής αερίου σε κανονικές συνθήκες.

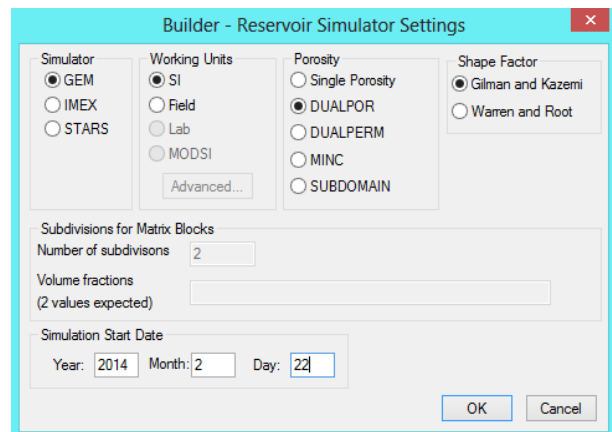
## 5.2 Περιγραφή μοντέλων

### 5.2.1 Πλέγμα σχεδίασης

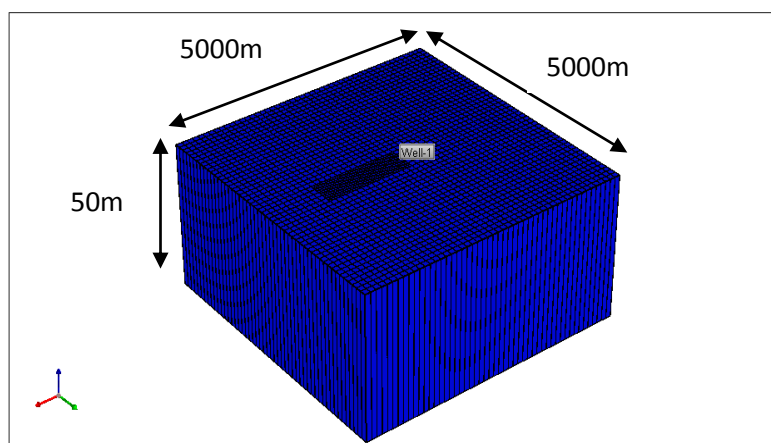
Επιλέχθηκε καρτεσιανό πλέγμα σχεδίασης με ακρίβεια κανάβου 50 x 50m (Σχήμα 28). Το μοντέλο αναφέρεται σε σχιστολιθικό πέτρωμα με σύστημα διπλού πορώδους (dual porosity system) (Σχήμα 29). Οι διαστάσεις του μοντέλου είναι 5000 x 5000 x 50 (m) και βρίσκεται σε βάθος 2000m από την επιφάνεια του εδάφους (Σχήμα 30).



Σχήμα 28: Σύστημα συντεταγμένων



Σχήμα 29: Επιλογές προσομοίωσης



Σχήμα 30: Απεικόνιση μοντέλου σχεδίασης

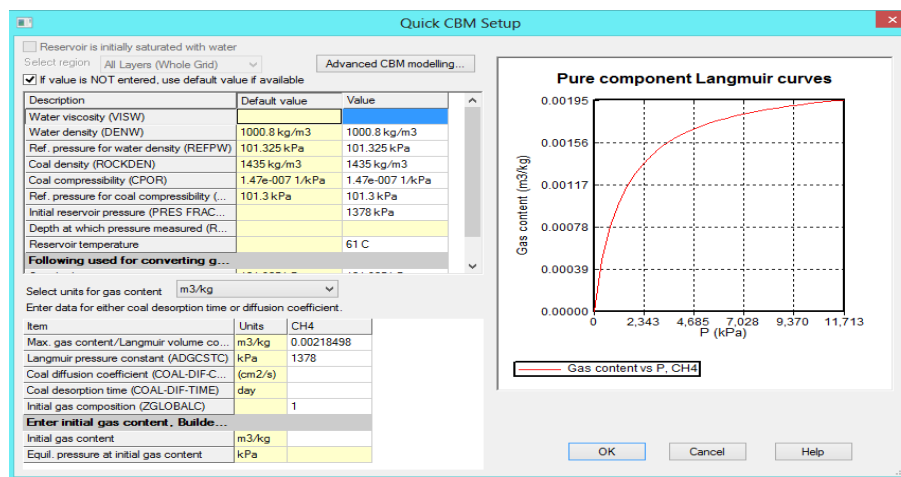
### 5.2.2 Ιδιότητες

Όλες οι ιδιότητες του μοντέλου δίνονται και για τους τρεις άξονες διεύθυνσης (K, I, J). Στο πρώτο στάδιο της κατασκευής του μοντέλου δόθηκαν οι φυσικές ιδιότητες του, το πορώδες του πετρώματος (porosity), η διαπερατότητα του πετρώματος (permeability) και των ρωγμών (permeability fracture), το κενό μεταξύ των ρωγμών (fracture spacing), η πίεση του ταμιευτήρα (pressure) και των ρωγμών (pressure- fracture) και η πυκνότητα του πετρώματος (rock density) (Πίνακας 1).

	Porosity	Porosity Fracture	Permeability I (mD)	Permeability J (mD)	Permeability K (mD)	Permeability I Fracture (mD)	Permeability J Fracture (mD)	Permeability K Fracture (mD)	Fracture Spacing I (m)	Fracture Spacing J (m)	Fracture Spacing K (m)	Pressure (kPa)	Rock Density (kg/m <sup>3</sup> )	Rock Density- Fracture (kg/m <sup>3</sup> )
example length 550m 150m	0,02	0,1	0,02	0,02	0,02	1	1	1	1	1	1	1378	1435	1435
example length 550m 200m	0,02	0,1	0,02	0,02	0,02	1	1	1	1	1	1	1378	1435	1435
overlap 100m	0,02	0,1	0,02	0,02	0,02	1	1	1	1	1	1	1378	1435	1435
overlap 200m	0,02	0,1	0,02	0,02	0,02	1	1	1	1	1	1	1378	1435	1435
example half length 100m	0,02	0,1	0,02	0,02	0,02	1	1	1	1	1	1	1378	1435	1435
example half length 150m	0,02	0,1	0,02	0,02	0,02	1	1	1	1	1	1	1378	1435	1435
example half length 200m	0,02	0,1	0,02	0,02	0,02	1	1	1	1	1	1	1378	1435	1435
example v1	0,02	0,1	0,02	0,02	0,02	1	1	1	1	1	1	1378	1435	1435
example v2	0,02	0,1	0,02	0,02	0,02	1	1	1	1	1	1	1378	1435	1435
example v3	0,02	0,1	0,02	0,02	0,02	1	1	1	1	1	1	1378	1435	1435
example v4	0,02	0,1	0,02	0,02	0,02	1	1	1	1	1	1	1378	1435	1435
example v5	0,02	0,1	0,02	0,02	0,02	1	1	1	1	1	1	1378	1435	1435

Πίνακας 1: Φυσικές ιδιότητες ταμιευτήρα

Σε επόμενο στάδιο εισάγονται η θερμοκρασία του ταμιευτήρα και οι ιδιότητες των παραγόμενων ρευστών (Σχήμα 31). Στην προκειμένη περίπτωση έχει επιλεχθεί μονοφασικό ρευστό (CH<sub>4</sub>).



Σχήμα 31: Παράθυρο διαλόγου για την εισαγωγή ιδιοτήτων των ρευστών.

### 5.2.3 Εισαγωγή γεωτρήσεων- υδραυλικής ρωγμάτωσης

Η εισαγωγή γεωτρήσεων γίνεται με την επιλογή well completions (PERF) όπου η εισάγονται οι συντεταγμένες των γεωτρήσεων (Σχήμα 32). Επίσης, από το ίδιο παράθυρο διαλόγου είναι δυνατή η επιλογή της ενεργοποίησης ή απενεργοποίησης των διατρήσεων (PERF). Το οριζόντιο τμήμα των γεωτρήσεων είναι 1550m ενώ το κάθετο τμήμα φτάνει μέχρι το μέσο του μοντέλου, που έχει οριστεί από ένα μόνο επίπεδο (layer), δηλαδή μέχρι τα 25m.

#	User Block Address	Connect to	Form factor FF	Status	Ref Layer	WI (m <sup>2</sup> /m)	Length (m)	Block Top (m)	Block Bottom (m)
1	25 25 1	Surface	1	Open	117.994	100.0	2000.0	2050.0	
2	26 25 1	1	1	Open	117.994	100.0	2000.0	2050.0	
3	27 25 1	2	1	Open	117.994	100.0	2000.0	2050.0	
4	28 25 1	3	1	Open	117.994	100.0	2000.0	2050.0	
5	29 25 1	4	1	Open	117.994	100.0	2000.0	2050.0	
6	30 25 1	5	1	Open	117.994	100.0	2000.0	2050.0	
7	31 25 1	6	1	Open	117.994	100.0	2000.0	2050.0	
8	32 25 1	7	1	Open	117.994	100.0	2000.0	2050.0	
9	33 25 1 / 1 2 1	8	1	Open	69.075	49.695	2000.0	2050.0	
10	33 25 1 / 2 2 1	9	1	Open	34.902	0.61	2000.0	2050.0	
11	33 25 1 / 3 2 1	10	1	Open	69.075	49.695	2000.0	2050.0	
12	34 25 1 / 1 2 1	11	1	Open	69.075	49.695	2000.0	2050.0	
13	34 25 1 / 2 2 1	12	1	Open	34.902	0.61	2000.0	2050.0	
14	34 25 1 / 3 2 1	13	1	Open	69.075	49.695	2000.0	2050.0	
15	35 25 1 / 1 2 1	14	1	Open	69.075	49.695	2000.0	2050.0	
16	35 25 1 / 2 2 1	15	1	Open	34.902	0.61	2000.0	2050.0	
17	35 25 1 / 3 2 1	16	1	Open	69.075	49.695	2000.0	2050.0	
18	36 25 1 / 1 2 1	17	1	Open	69.075	49.695	2000.0	2050.0	
19	36 25 1 / 2 2 1	18	1	Open	34.902	0.61	2000.0	2050.0	
20	36 25 1 / 3 2 1	19	1	Open	69.075	49.695	2000.0	2050.0	
21	37 25 1 / 1 2 1	20	1	Open	69.075	49.695	2000.0	2050.0	
22	37 25 1 / 2 2 1	21	1	Open	34.902	0.61	2000.0	2050.0	
23	37 25 1 / 3 2 1	22	1	Open	69.075	49.695	2000.0	2050.0	

Σχήμα 32: Συντεταγμένες γεώτρησης

Επόμενο βήμα είναι η εισαγωγή των παραμέτρων της υδραυλικής ρωγμάτωσης από την επιλογή Hydraulically Fractured Wells.

Αφού ορίστηκε η διεύθυνση τους εισήχθησαν και οι παράμετροι που χρειάζονται για την υδραυλική ρωγμάτωση (primary fracture width, primary fracture permeability, orientation, half length) (Σχήμα 33). Το Σχήμα 34 είναι μια εσωτερική απεικόνιση του μοντέλου με τις οριζόντιες γεωτρήσεις.

Hydraulically Fractured Wells

Fractures Non-Darcy Option

Well/Date/Fracture

Well-1

2014-01-01

Well-1 - Frac 1

Well-1 - Frac 2

Well-1 - Frac 3

Well-1 - Frac 4

Well-1 - Frac 5

Well-1 - Frac 6

Well-1 - Frac 7

Well-1 - Frac 8

Well-1 - Frac 9

Well-1 - Frac 10

Well-1 - Frac 11

Well-1 - Frac 12

Well-1 - Frac 13

Well-1 - Frac 14

Well-1 - Frac 15

Well-1 - Frac 16

Tools

Number of refined blocks in each direction

I=3

J=3

K=1

Well: 'Well-1' at 2014-01-01 1 fracture selected

Name of Fracture	Well-1 - Frac 1
Date of Fracture	2014-01-01
Fracture parameters:	
primary fracture width	0.00245 m
primary fracture permeability	10000 md
Grid refinement:	
orientation	J axis
half length	200 m
Grid refinement for horizontal wells:	
number of refined layers up	1
number of refined layers down	1

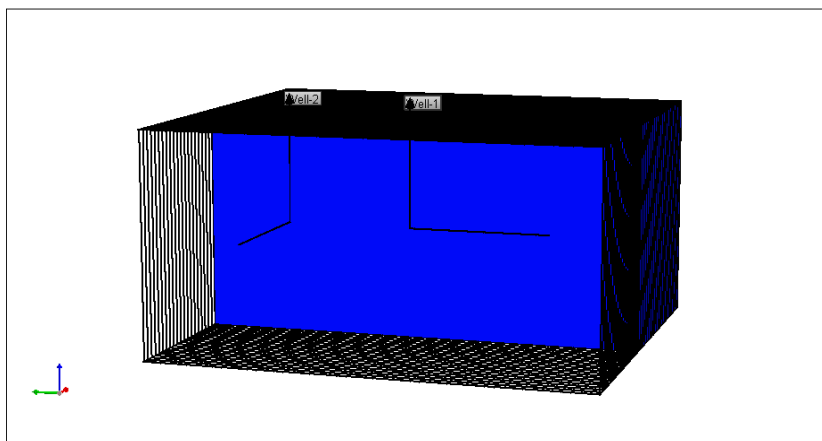
Stimulated Reservoir Volume: 2.5e+006 m3

Apply

NONDARCY not defined

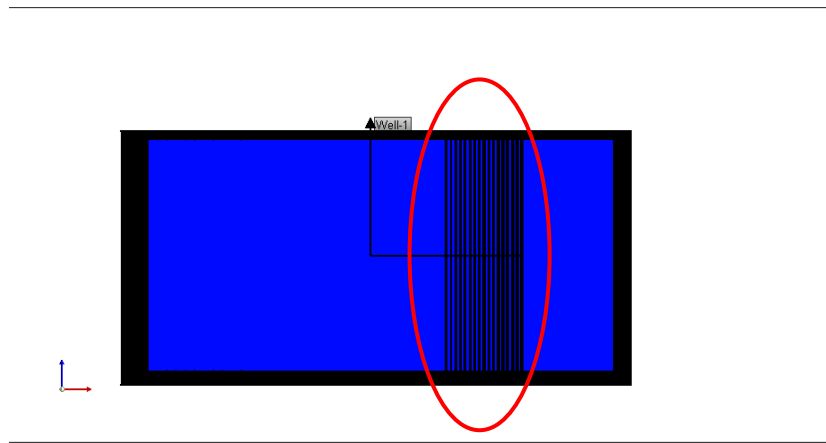
OK Cancel

Σχήμα 33 Παράμετροι υδραυλικής ρωγμάτωσης.

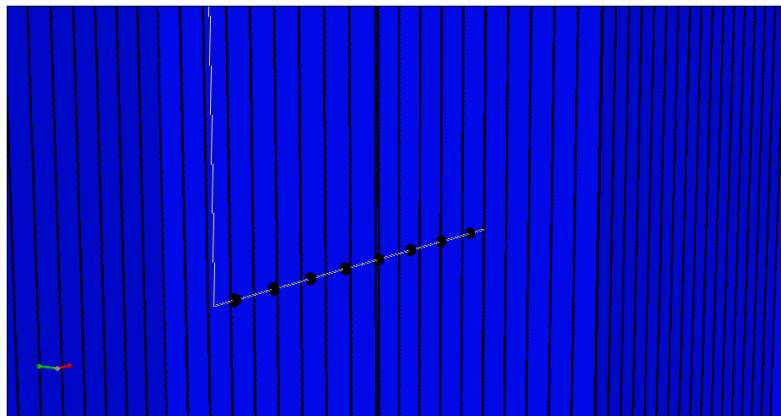


Σχήμα 34: Απεικόνιση κεκλιμένων γεωτρήσεων απο το εσωτερικό του μοντέλου.

Το πύκνωμα του κανάβου (περικλείεται με κόκκινο κύκλο) στο Σχήμα 35, που ορίστηκε αυτόματα από το πρόγραμμα προσομοίωσης (CMG), δείχνει σε προσομοίωση την περιοχή που έχει πραγματοποιηθεί η υδραυλική ρωγμάτωση. Στη συνέχεια, το Σχήμα 36, δείχνει διατρήσεις που έχουν πραγματοποιηθεί στη γεώτρηση.



Σχήμα 35: Απεικόνιση περιοχής υδραυλικής ρωγμάτωσης

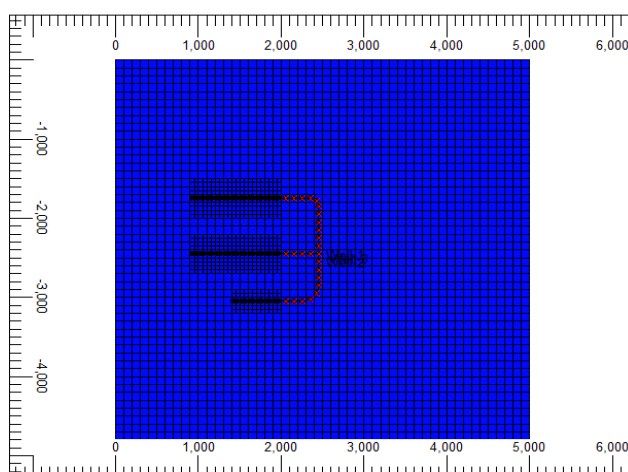


Σχήμα 36: Διατρήσεις (perforations) της γεώτρησης

### 5.3 Αποτελέσματα

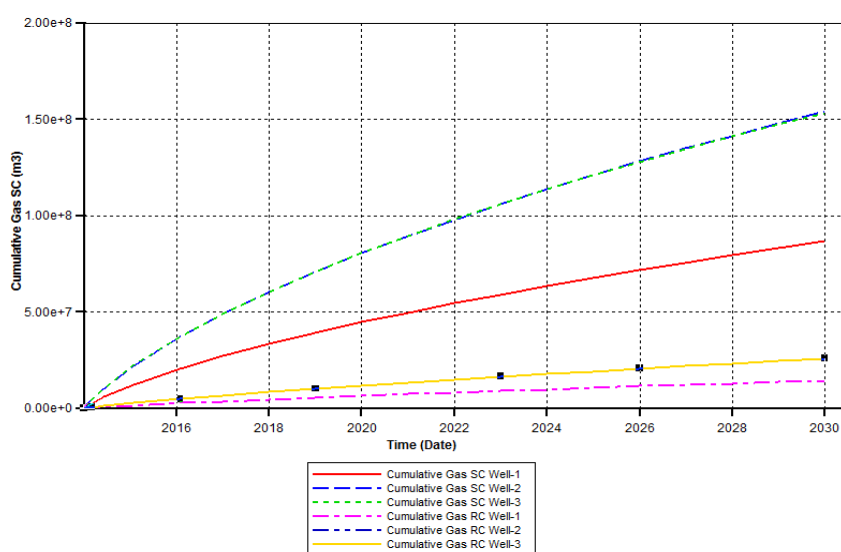
#### 5.3.1 Μοντέλο M 1.1

Στο μοντέλο αυτό μειώθηκε το μήκος του οριζόντιου τμήματος (length) μιας γεώτρησης (well 1) από τα 1550m στα 1050m. Η μείωση αυτή έγινε από το τμήμα που είχε πραγματοποιηθεί ρωγμάτωση, δηλαδή από τα 500m μειώθηκε στα 275m. Επίσης μειώθηκε στο μισό η επιφάνεια εκατέρωθεν της γεώτρησης (half length) από τα 200m μειώθηκε στα 100m (Σχήμα 37).



Σχήμα 37: Κάτοψη μοντέλου M 1.1

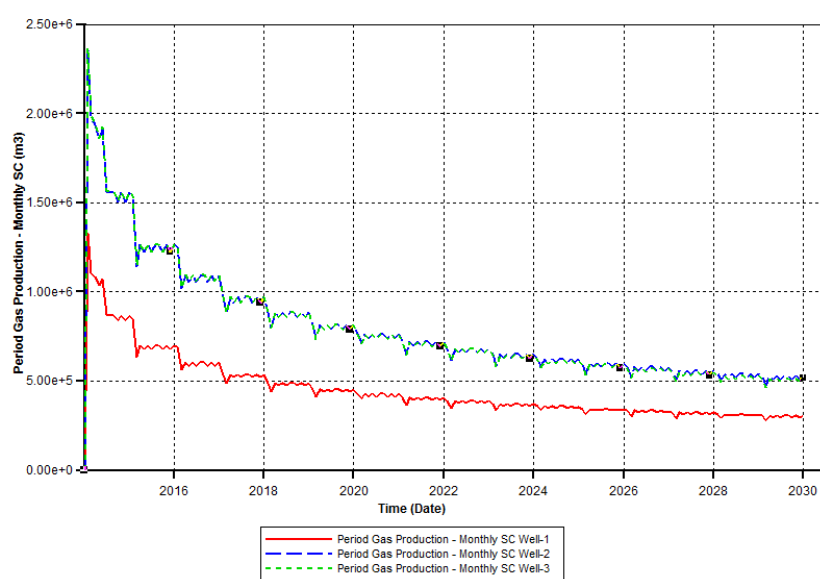
Στο Σχήμα 38 απεικονίζεται η ποσότητα του παραγόμενου αερίου από κάθε γεώτρηση τόσο σε κανονικές συνθήκες όσο και σε συνθήκες ταμειυτήρα. Η κόκκινη καμπύλη δείχνει την ποσότητα του αερίου που παράγει η γεώτρηση 1 (well 1), η μέγιστη ποσότητα παραγόμενου αερίου αυτής της γεώτρησης είναι πολύ μικρότερη σε σχέση με τις άλλες δυο. Αυτό οφείλεται στη μείωση του μήκους του οριζόντιου τμήματος της γεώτρησης και στη μείωση της ρωγματομένης επιφάνειας. Για τις γεωτρήσεις 1 και 2 (well 1 και well 2) παρατηρείται ταύτιση των δυο καμπυλών καθώς έχουν τις ίδιες ιδιότητες και φαίνεται πως η παραγωγή της μίας δεν επηρεάζει την παραγωγή της άλλης.



Σχήμα 38: Διάγραμμα συνολικής ποσότητας παραγόμενου αερίου σε κανονικές συνθήκες και συνθήκες ταμειυτήρα.

Στο Σχήμα 39 φαίνεται η μηνιαία παραγωγή αερίου και πως αυτή μεταβάλλεται στην πάροδο του χρόνου. Η μέγιστη παραγωγή για τις γεωτρήσεις 2 και 3 είναι της τάξης των  $2,36 \cdot 10^6$  ( $\text{m}^3$ ). Για τη γεώτρηση 1 η μέγιστη παραγωγή είναι της τάξης των  $1,32 \cdot 10^6$  ( $\text{m}^3$ ). Η μέγιστη παραγωγή σημειώνεται την 31<sup>η</sup> μέρα από την έναρξη της παραγωγής. Η ταύτιση των καμπυλών παραγωγής οφείλεται στο γεγονός ότι η υδραυλική ρωγμάτωση γίνεται

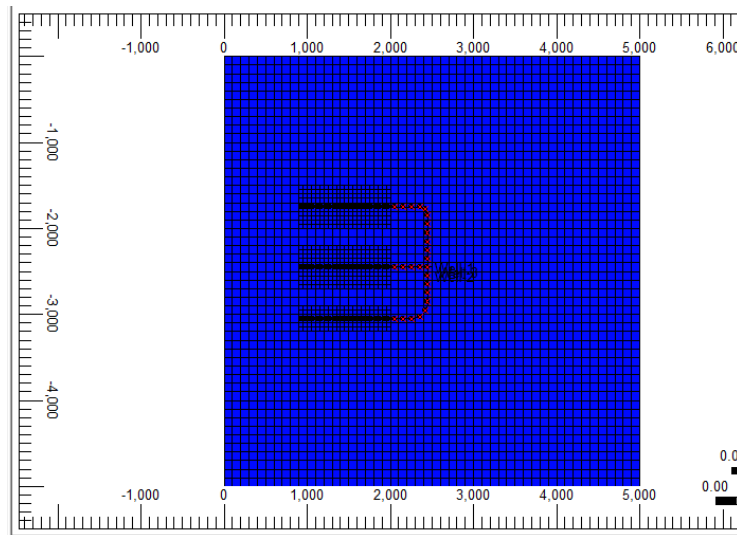
ταυτόχρονα και για τις τρεις γεωτρήσεις, κάτι που σε πραγματικές συνθήκες δε μπορεί να συμβεί.



Σχήμα 39: Διάγραμμα μηνιαίας παραγωγής αερίου σε κανονικές συνθήκες.

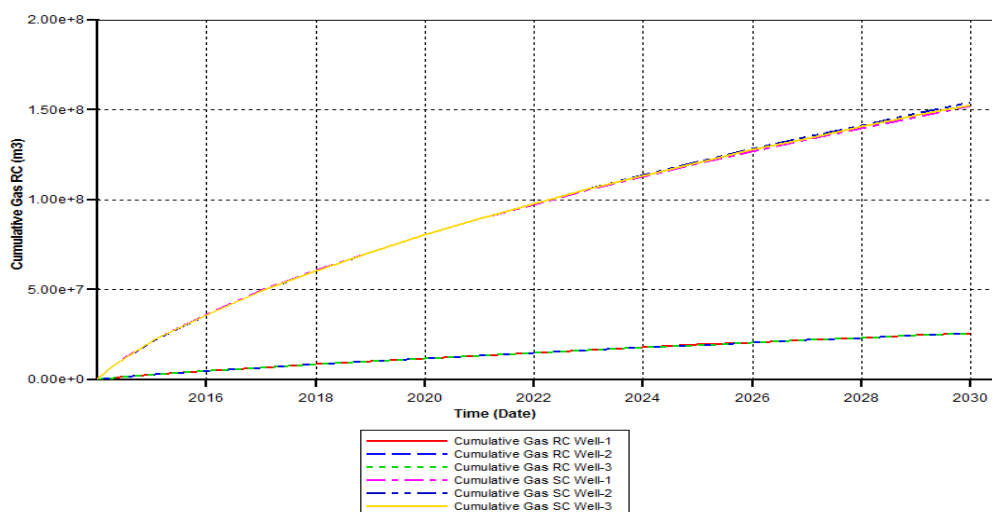
### 5.3.2 Μοντέλο M 1.2

Στο μοντέλο αυτό (Σχήμα 40) και οι τρεις γεωτρήσεις έχουν το ίδιο οριζόντιο μήκος (1550m) με τη διαφορά ότι η γεώτρηση 1 (well 1) έχει πλάτος ρωγμάτωσης (half length) 100m ενώ οι γεωτρήσεις 2 και 3 έχουν 200m.



Σχήμα 40: Κάτοψη μοντέλου M 1.2.

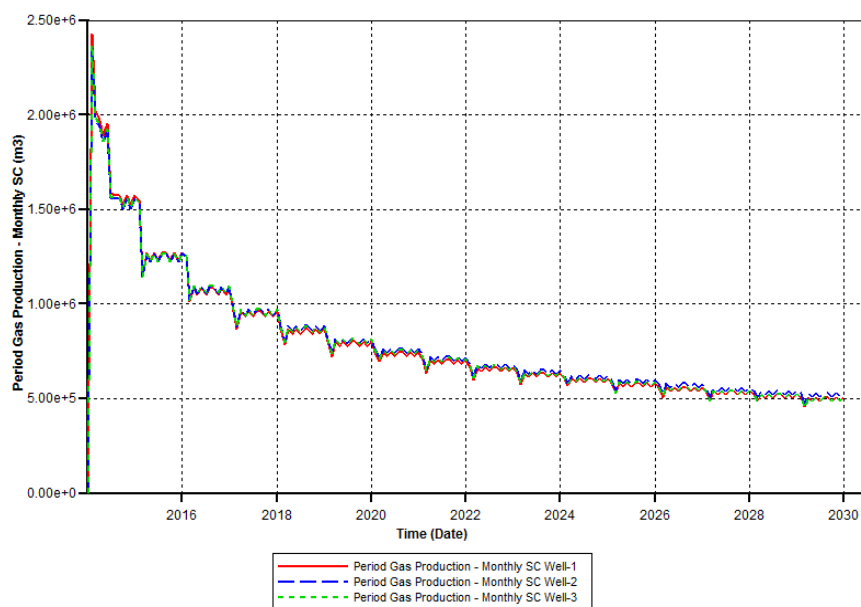
Στο Σχήμα 41, φαίνεται πως η συνολική παραγόμενη ποσότητα αέριου για κάθε γεώτρηση είναι σχεδόν το ίδιο. Οι γεωτρήσεις 2 και 3, που έχουν ίδιο μήκος και πλάτος ρωγμάτωσης, παράγουν ακριβώς την ίδια ποσότητα  $1,54 \cdot 10^8 \text{ (m}^3\text{)}$ . Από την άλλη μεριά η γεώτρηση 1, που έχει το μισό πλάτος ρωγμάτωσης σε σχέση με τις άλλες δυο, παρουσιάζει μια απειροελάχιστη διαφορά στην ποσότητα αερίου που παράγει η οποία ανέρχεται στα  $1,52 \cdot 10^8 \text{ (m}^3\text{)}$ .



Σχήμα 41: Συνολικό αέριο από κάθε γεώτρηση σε κανονικές συνθήκες (cumulative gas SC) και σε συνθήκες ταμειυήρα (cumulative gas RS).

Σε συνθήκες ταμιευτήρα (Σχήμα 41), το συνολικό αέριο για την κάθε γεώτρηση ανέρχεται στα  $2,58 \cdot 10^7 \text{ (m}^3\text{)}$ .

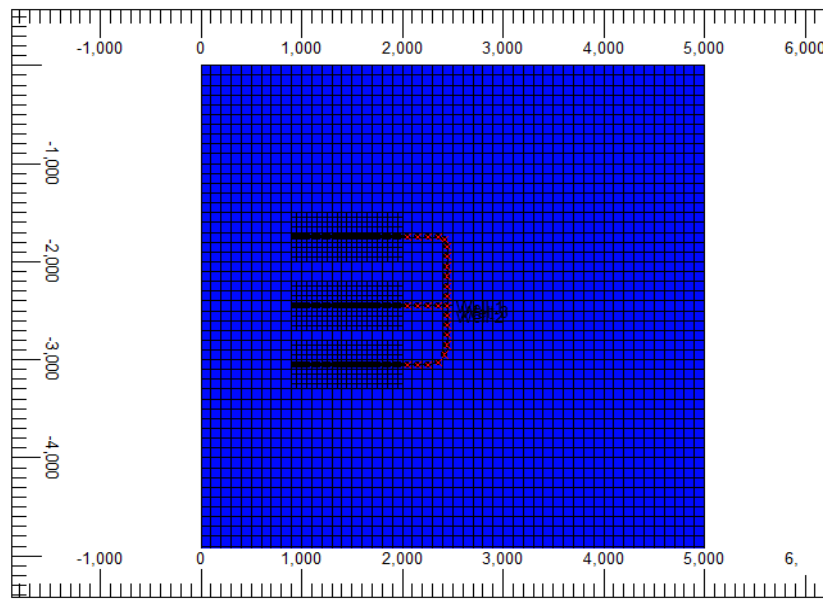
Από το διάγραμμα της μηνιαίας παραγωγής (Σχήμα 42), φαίνεται ότι η παραγωγή της γεώτρησης 1 (κόκκινη καμπύλη) σημειώνει μέγιστη παραγωγή  $2,43 \cdot 10^6 \text{ (m}^3\text{)}$  ενώ οι άλλες δυο γεωτρήσεις έχουν μέγιστη παραγωγή  $2,37 \cdot 10^6 \text{ (m}^3\text{)}$ . Η διαφορά τους καλύπτεται κατά τη διάρκεια εκμετάλλευσης του ταμιευτήρα, δηλαδή μετά το 2018 που παρατηρείται μια μικρή βαθμιαία μείωση της παραγωγής για τη γεώτρηση 1 σε σχέση με τις άλλες δυο που όπως αναφέρθηκε και παραπάνω έχουν μεγαλύτερη ζώνη ρωγμάτωσης άρα αναμένεται και μεγαλύτερη παραγωγή.



Σχήμα 42: Διάγραμμα μηνιαίας παραγωγής αερίου σε κανονικές συνθήκες

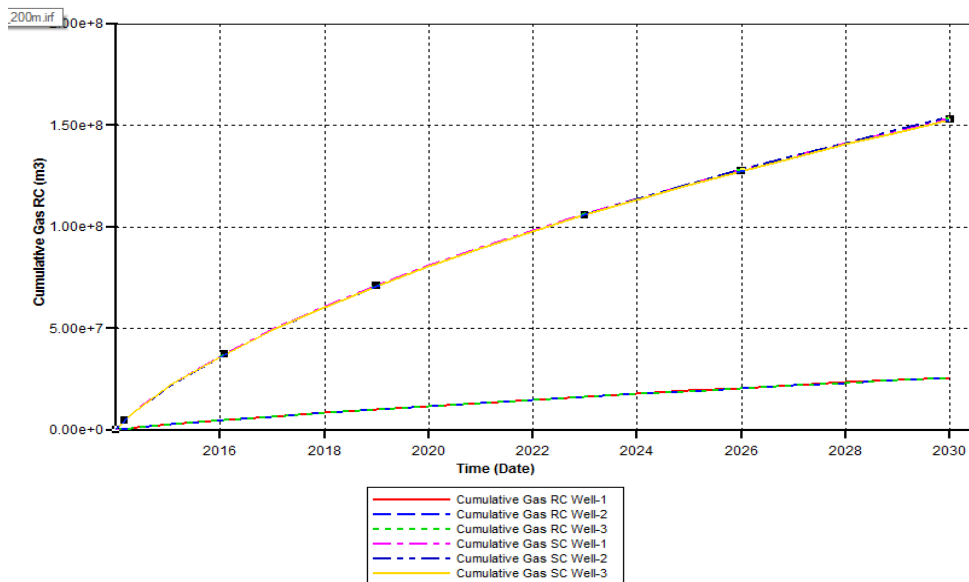
### 5.3.3 Μοντέλο M 1.3

Στην περίπτωση αυτή (Σχήμα 43) εξετάσθηκαν γεωτρήσεις με ακριβώς τις ίδιες παραμέτρους, δηλαδή μήκος ρωγμάτωσης 500m και πλάτος 200m. Η γεώτρηση 3, που βρίσκεται ανάμεσα στην 1 και τη 2, απέχει από τη γεώτρηση 2, 600m και από τη γεώτρηση 1, 500m.



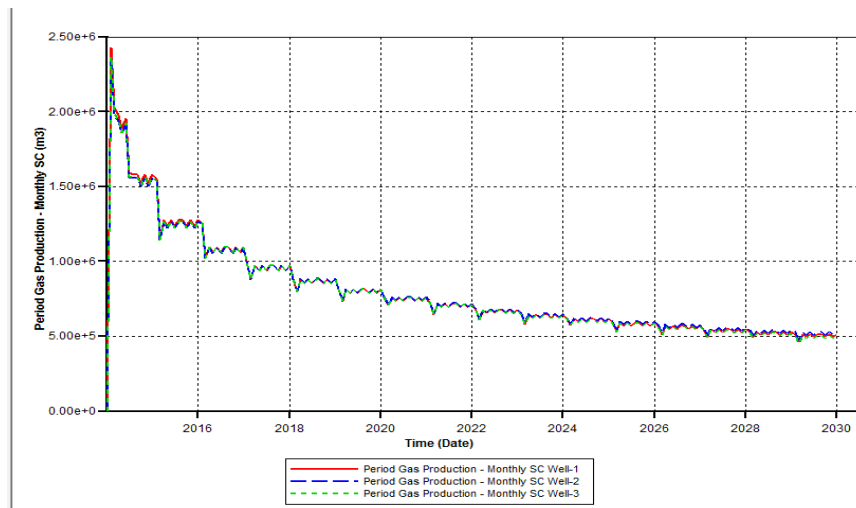
Σχήμα 43: Κάτοψη μοντέλου M 1. 3.

Στο Σχήμα 44, φαίνεται πως το συνολικό αέριο που παράγει η κάθε γεώτρηση σε κανονικές συνθήκες ανέρχεται στα  $1,54 \cdot 10^8$  ( $\text{m}^3$ ). Η καμπύλη αυξάνεται μη γραμμικά όπως φαίνεται και στο διάγραμμα. Η απόσταση μεταξύ των γεωτρήσεων φαίνεται πως δεν επηρεάζει την ποσότητα που θα παραχθεί στο τέλος αλλά την ταχύτητα με την οποία θα ανακτηθεί το αέριο στην επιφάνεια. Σε συνθήκες ταμειευτήρα, το συνολικό αέριο για τις γεωτρήσεις είναι  $2,57 \cdot 10^7$  ( $\text{m}^3$ ).



**Σχήμα 44: Διάγραμμα συνολικής ποσότητας παραγόμενου αερίου σε κανονικές συνθήκες και συνθήκες ταμειυτήρα.**

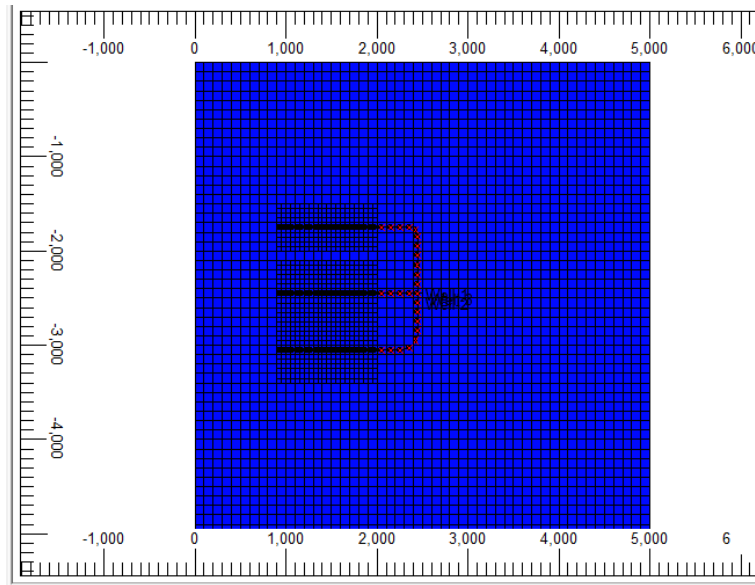
Στη μηνιαία παραγωγή όμως φαίνεται (Σχήμα 45) πως η γεώτρηση 1 παράγει κατά τι περισσότερο ( $2,43 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ ) από τη γεώτρηση 3 που παράγει  $2,37 \cdot 10^6 \text{ (m}^3\text{)}$ . Η γεώτρηση 2, που βρίσκεται 100m πιο μακριά (σε σχέση με τη μεταξύ τους απόσταση των 1 και 3) παράγει  $2,37 \cdot 10^6 \text{ (m}^3\text{)}$ , όσο δηλαδή και στις προηγούμενες περιπτώσεις. Αυτό υποδηλώνει πως σε ταμειυτήρες με αυτά τα χαρακτηριστικά, οι αποστάσεις ίσες ή και μεγαλύτερες των 200m η παραγωγή της κάθε γεώτρησης δεν επηρεάζει την παραγωγή γειτονικών γεωτρήσεων.



**Σχήμα 45: Διάγραμμα μηνιαίας παραγωγής αερίου σε κανονικές συνθήκες.**

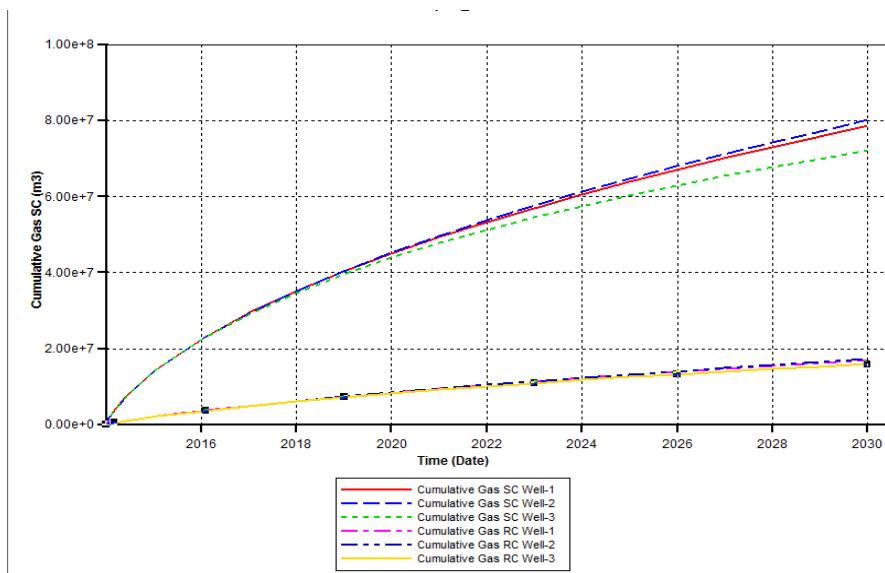
### 5.3.4 Μοντέλο M 2.1

Στην περίπτωση αυτή εξετάσθηκε πως θα επηρεαζόταν η παραγωγή αερίου αν η ζώνη ρωγμάτωσης μεταξύ δυο γεωτρήσεων αλληλεπικαλύπτονταν (overlap). Όπως φαίνεται στο Σχήμα 46, το εύρος των ρωγματωμένων περιοχών από τις γεωτρήσεις 1 και 3 επικαλύπτονται μεταξύ τους κατά 100m.



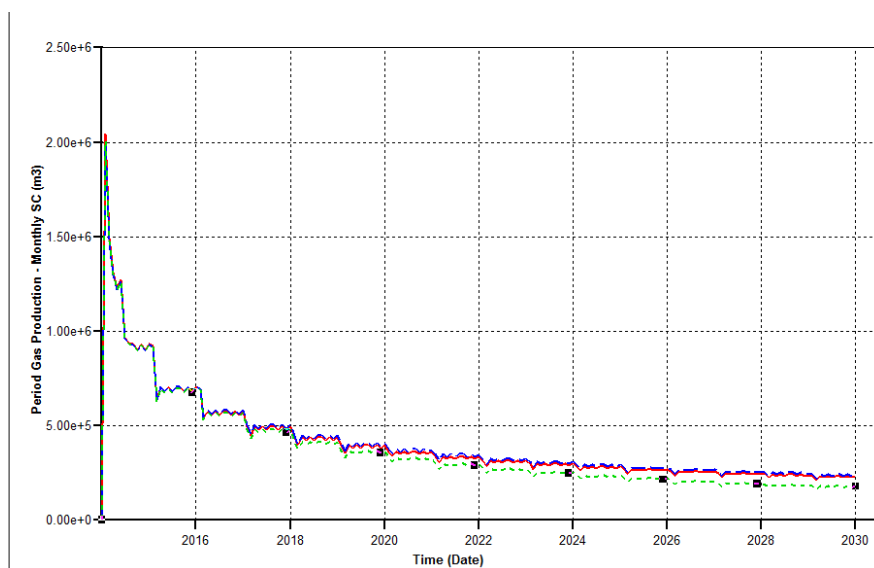
Σχήμα 46: Κάτοψη μοντέλου M 2.1.

Στο Σχήμα 47, δίνεται το διάγραμμα του συνολικού παραγόμενου αερίου σε κανονικές συνθήκες επιφανείας και σε συνθήκες ταμιευτήρα. Η καμπύλη για τη γεώτρηση 2 (μπλε καμπύλη) δείχνει να παράγει τη μεγαλύτερη ποσότητα αερίου σε σχέση με τις άλλες δυο γεωτρήσεις (well 1 και well 3). Δεύτερη σε συνολική παραγωγή αερίου είναι η γεώτρηση 1 (κόκκινη καμπύλη) ενώ η γεώτρηση με τη μικρότερη παραγωγή είναι η γεώτρηση 3. Η γεώτρηση 1 παράγει μεγαλύτερη ποσότητα αερίου σε σχέση με τη γειτονική γεώτρηση 3 διότι προλαβαίνει να πάρει το αέριο που παράγεται από τη ζώνη επικάλυψης μεταξύ των δύο γεωτρήσεων.



**Σχήμα 47: Διάγραμμα συνολικής ποσότητας παραγόμενου αερίου σε κανονικές συνθήκες και συνθήκες ταμειυτήρα.**

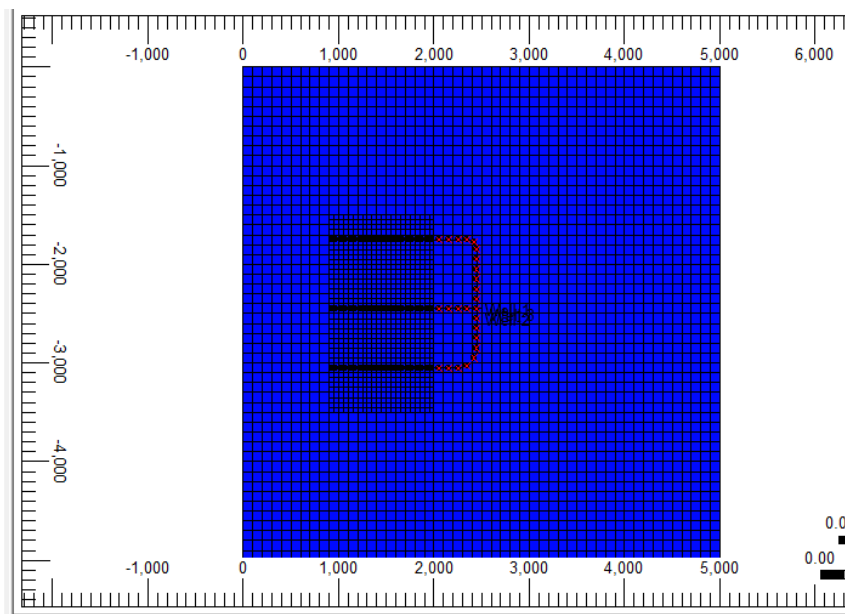
Στο διάγραμμα της μηνιαίας παραγωγής (Σχήμα 48) η μέγιστη παραγωγή επιτυγχάνεται από τη γεώτρηση 1 (κόκκινη καμπύλη) με  $2,046 \cdot 10^6 \text{ (m}^3\text{)}$  ενώ για τις άλλες δυο γεωτρήσεις η μέγιστη ποσότητα είναι  $2,0 \cdot 10^6 \text{ (m}^3\text{)}$ . Με την πάροδο του χρόνου παρατηρείται ότι η παραγωγή για τη γεώτρηση 3 μειώνεται περισσότερο σε σχέση την παραγωγή των άλλων δύο γεωτρήσεων.



**Σχήμα 48: Διάγραμμα μηνιαίας παραγωγής αερίου σε κανονικές συνθήκες.**

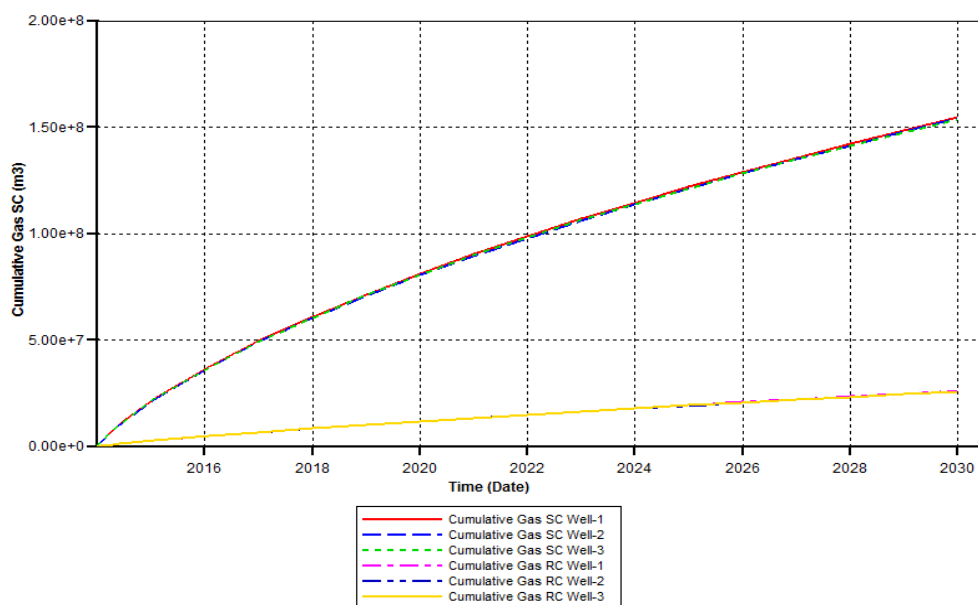
### 5.3.5 Μοντέλο M 2.2

Σε αυτήν την περίπτωση διευρύνθηκε η ζώνη επικάλυψης της ρωγματομένης περιοχής στα 200m, ανάμεσα σε δύο γεωτρήσεις (well 1 και well 3). Όπως φαίνεται στο Σχήμα 49 εξαιτίας της αύξησης του πλάτους ρωγμάτωσης για τη γεώτρηση 3 υπάρχει επικάλυψη ρωγμάτωσης και με τη δίπλα γεώτρηση (well 2), χωρίς όμως να αυξηθεί το πλάτος ρωγμάτωσης της γεώτρησης 2.



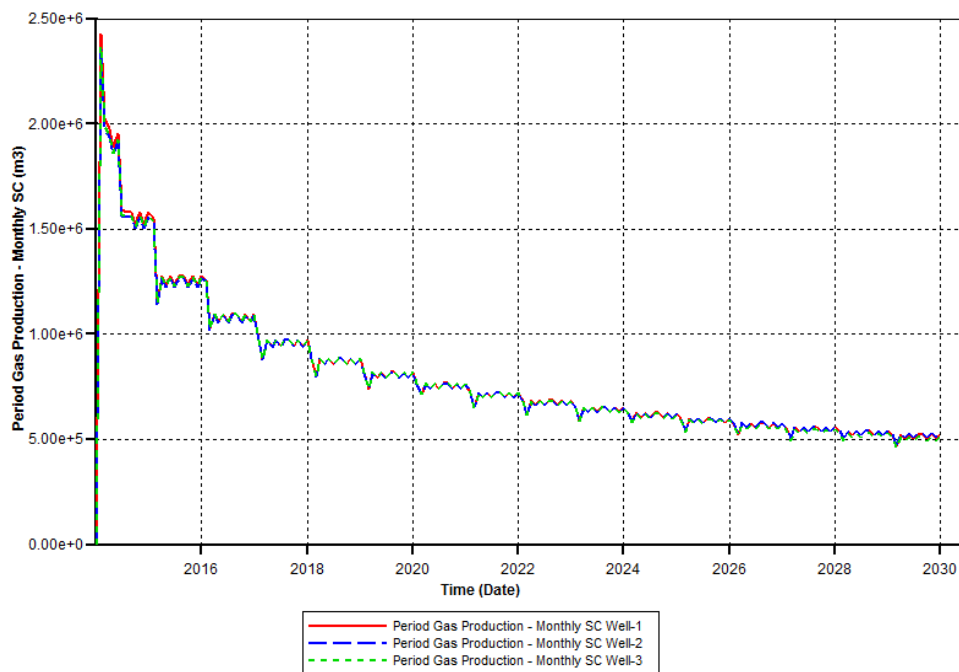
Σχήμα 49: Κάτοψη μοντέλου M 2.2

Στο διάγραμμα της συνολικής ποσότητας παραγόμενου αερίου (Σχήμα 50) και οι τρεις γεωτρήσεις δίνουν από  $1,54 \cdot 10^8$  (m<sup>3</sup>) η κάθε μια.



Σχήμα 50: Διάγραμμα συνολικής ποσότητας παραγόμενου αερίου σε κανονικές συνθήκες και συνθήκες ταμειυτήρα.

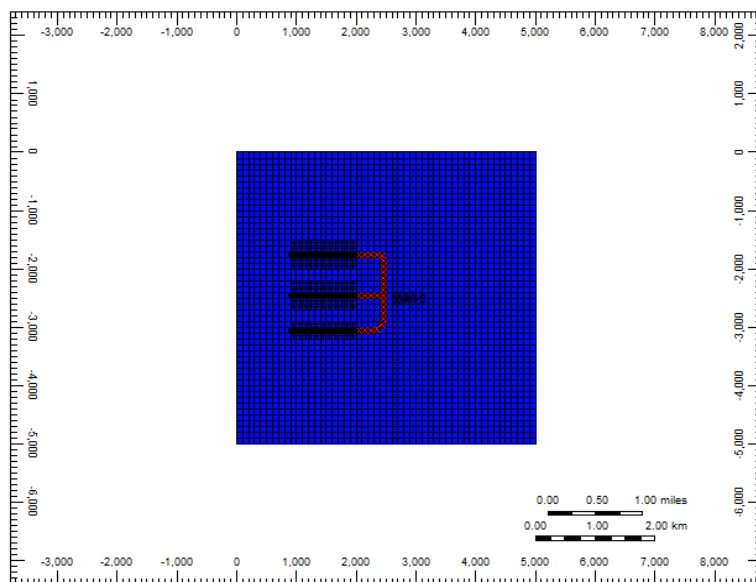
Με βάση το διάγραμμα της μηνιαίας παραγωγής (Σχήμα 51), η γεώτρηση 1 τον πρώτο χρόνο εκμετάλλευσης είναι κατά τι μεγαλύτερη έναντι των άλλων δυο γεωτρήσεων. Η μέγιστη ποσότητα που παράγεται είναι  $2,43 \cdot 10^6$  (m<sup>3</sup>) ενώ για τις γεωτρήσεις 2 και 3 είναι  $2,36 \cdot 10^6$  (m<sup>3</sup>). Μετά τον πρώτο χρόνο όμως παρατηρείται ταύτιση στην παραγωγή και για τις τρεις γεωτρήσεις.



Σχήμα 51: Διάγραμμα μηνιαίας παραγωγής αερίου σε κανονικές συνθήκες.

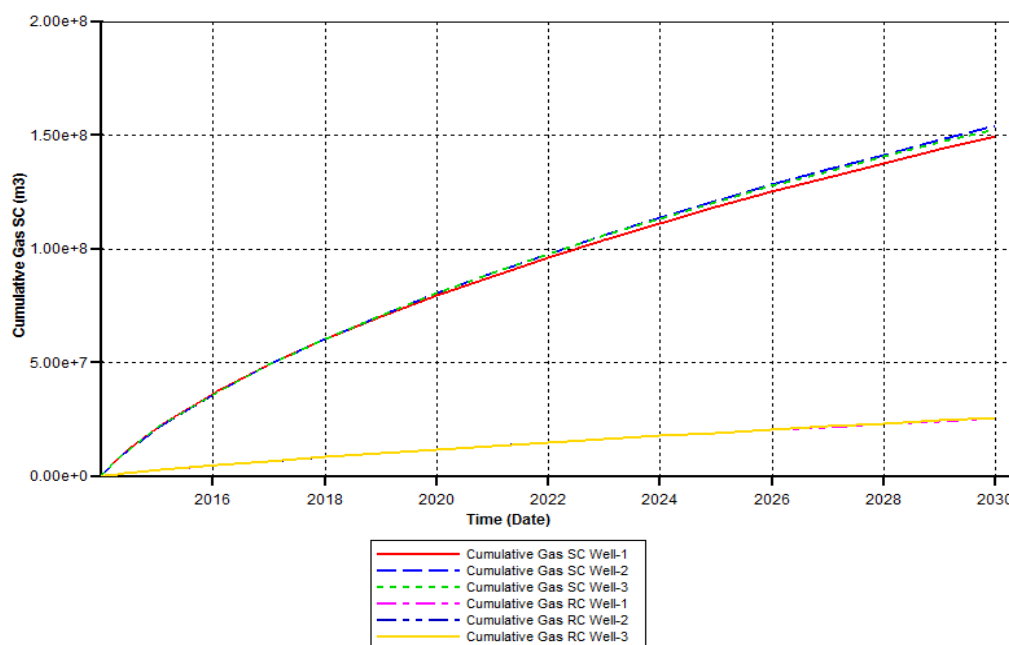
### 5.3.6 Μοντέλο M 3.1

Εξετάσθηκε η περίπτωση το πλάτος ρωγμάτωσης για μια γεώτρηση από τις τρείς να είναι στα 100m ενώ των άλλων δύο γεωτρήσεων να είναι στα 200m (Σχήμα 52).



Σχήμα 52: Κάτοψη μοντέλου M 3.1.

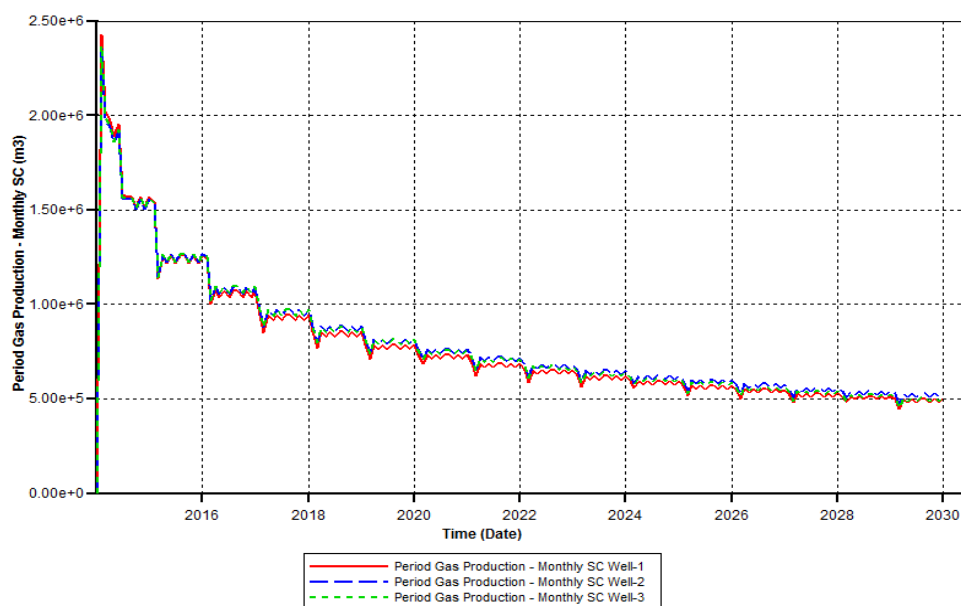
Όπως είναι λογικό το συνολικό αέριο που παράγεται από τη γεώτρηση 1 (Σχήμα 53) σε κανονικές συνθήκες, είναι λιγότερο σε σχέση με τις γεωτρήσεις 2 και 3 που έχουν τις ίδιες ιδιότητες.



Σχήμα 53: Διάγραμμα συνολικής ποσότητας παραγόμενου αερίου σε κανονικές συνθήκες και συνθήκες ταμειωτήρα.

Παρόλο που η γεώτρηση 1 έχει μικρότερο πλάτος ρωγμάτωσης στο Σχήμα 54 φαίνεται να σημειώνει τη μεγαλύτερη ποσότητα αερίου τη 31<sup>η</sup> μέρα από την έναρξη της παραγωγής. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το αέριο που παράγεται από τη συγκεκριμένη περιοχή έχει να διανύσει μικρότερη απόσταση σε σχέση με τις περιοχές ρωγμάτωσης των άλλων δύο γεωτρήσεων που είναι ευρύτερες.

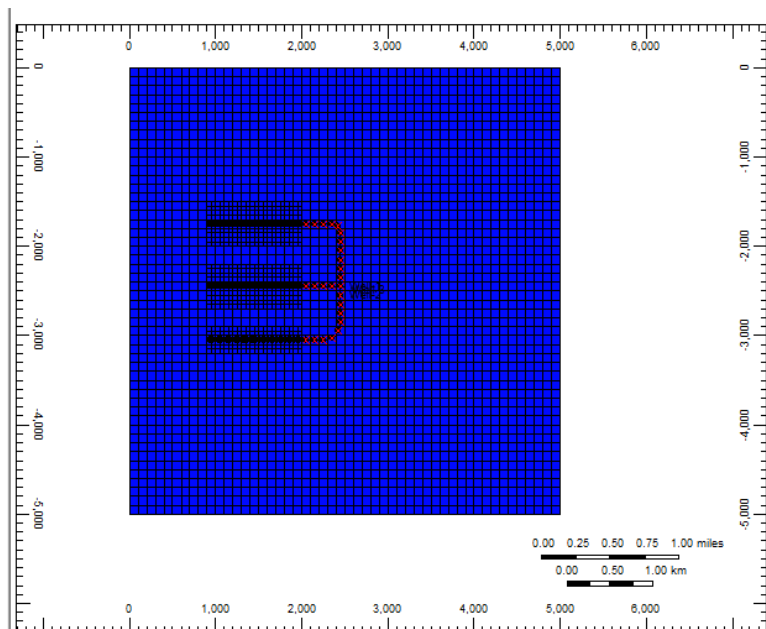
Πιο αναλυτικά, στη μηνιαία παραγωγή (Σχήμα 54) φαίνεται αυτό που αναφέρθηκε παραπάνω, ότι η γεώτρηση 1 στο πρώιμο στάδιο της παραγωγής εμφανίζει ελάχιστα μεγαλύτερη παραγόμενη ποσότητα αερίου αλλά με την πάροδο του χρόνου η παραγωγή της είναι μικρότερη σε σχέση με τις γεωτρήσεις 2 και 3.



Σχήμα 54: Διάγραμμα μηνιαίας παραγωγής αερίου σε κανονικές συνθήκες.

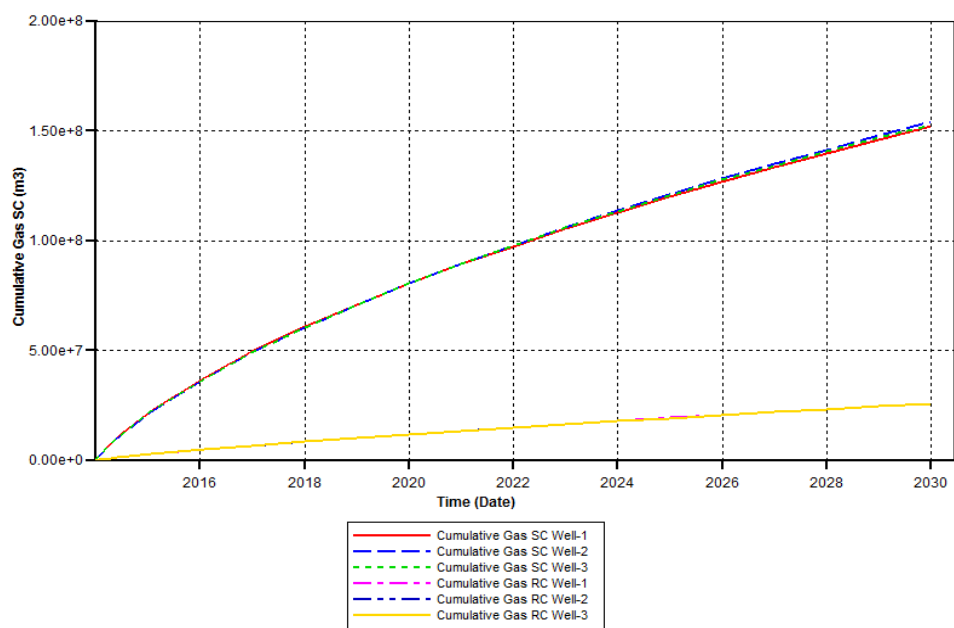
### 5.3.7 Μοντέλο M 3.2

Στη συνέχεια εξετάστηκε η περίπτωση το πλάτος ρωγμάτωσης μιας εκ των τριών γεωτρήσεων να είναι στα 150m, διατηρώντας όλες τις άλλες ιδιότητες των γεωτρήσεων ίδιες (Σχήμα 55).

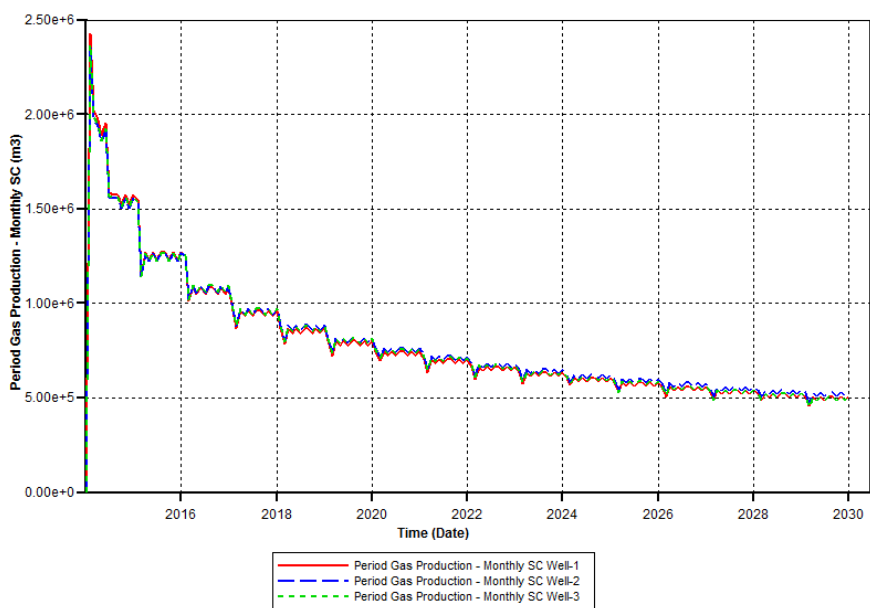


Σχήμα 55: Κάτοψη μοντέλου M 3.2.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 56, οι ποσοτικές καμπύλες του παραγόμενου αερίου και για τις 3 γεωτρήσεις είναι σχεδόν ταυτόσημες, με την καμπύλη για τη γεώτρηση 1 να είναι ελάχιστα μικρότερη. Το ίδιο φαινόμενο παρατηρείται και στο διάγραμμα της μηνιαίας παραγωγής (Σχήμα 57).



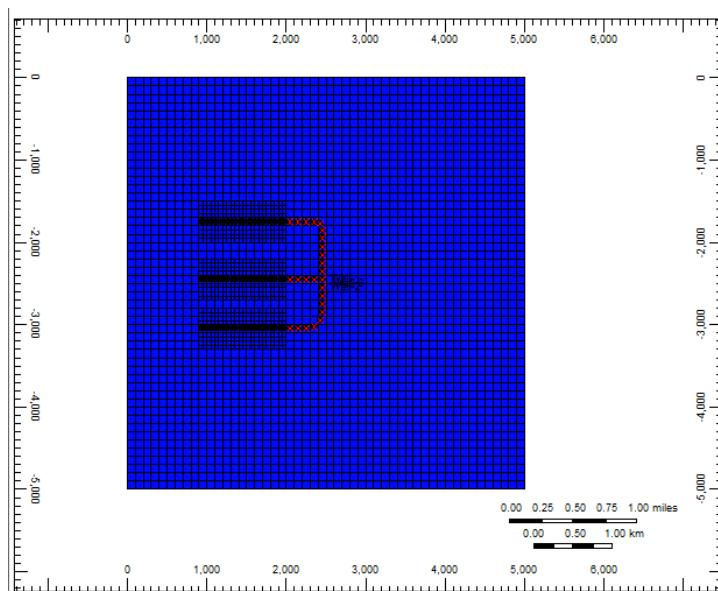
**Σχήμα 56: Διάγραμμα συνολικής ποσότητας παραγόμενου αερίου σε κανονικές συνθήκες και συνθήκες ταμειυτήρα.**



**Σχήμα 57: Διάγραμμα μηνιαίας παραγωγής αερίου σε κανονικές συνθήκες.**

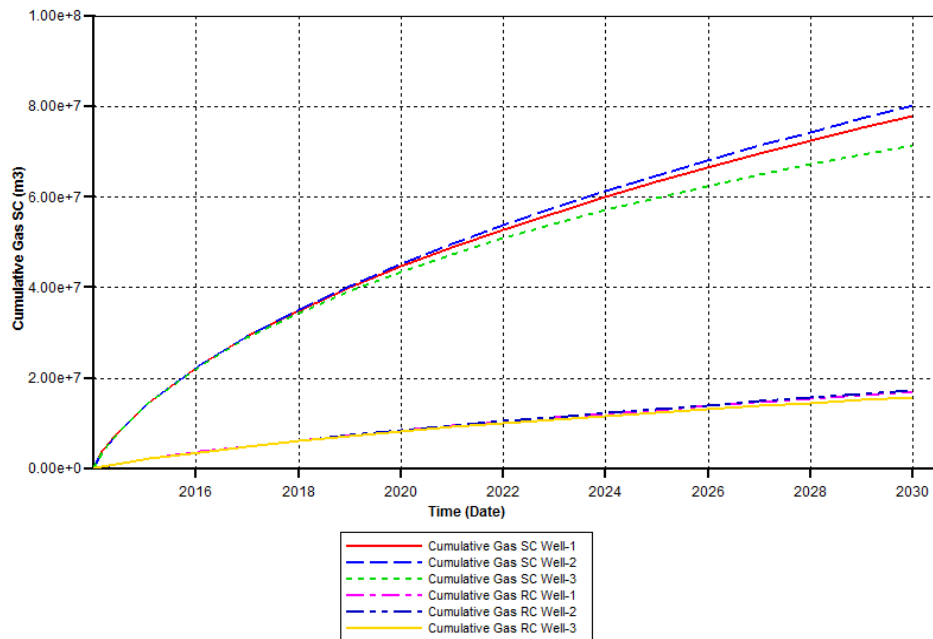
### 5.3.8 Μοντέλο M 3.3

Η τελευταία περίπτωση που εξετάσθηκε, αφορούσε πάλι τρεις γεωτρήσεις που αυτή τη φορά όμως είχαν ίδιες διαστάσεις για τη ζώνη ρωγμάτωσης, δηλαδή 550m μήκος και 200m πλάτος ρωγμάτωσης (Σχήμα 58).



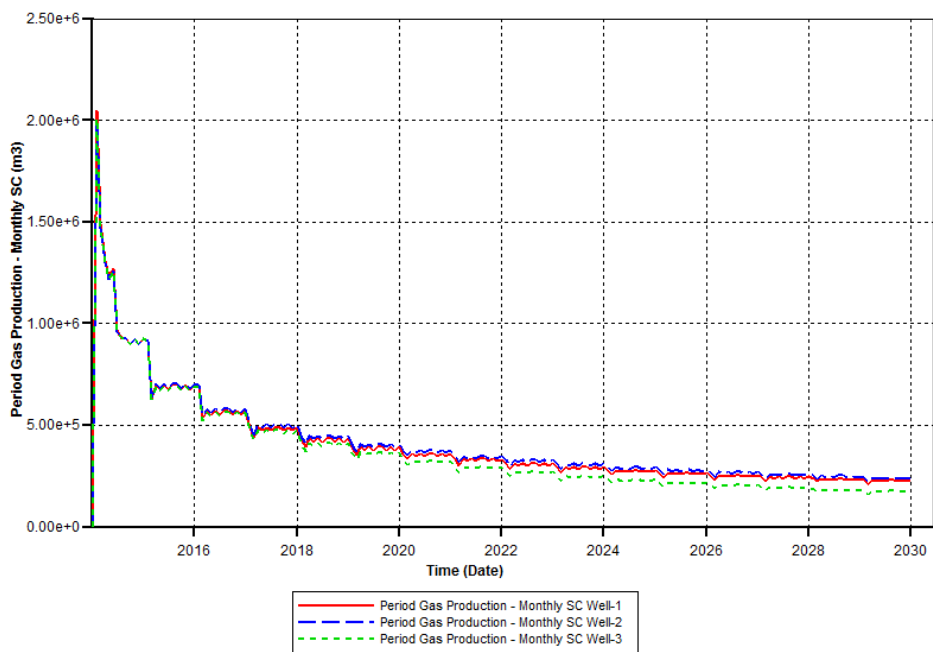
Σχήμα 58: Κάτοψη μοντέλου M 3.3.

Στο Σχήμα 59, φαίνεται ότι η μεγαλύτερη ποσότητα αερίου παράγεται από τη γεώτρηση 2 και φτάνει τα  $8,00 \cdot 10^7$  (m<sup>3</sup>). Ακολουθεί η γεώτρηση 1 με  $7,79 \cdot 10^7$  (m<sup>3</sup>) και τέλος η γεώτρηση 3 με  $7,15 \cdot 10^7$  (m<sup>3</sup>). Οι γεωτρήσεις παρόλο που έχουν ορισθεί με τα ίδια χαρακτηριστικά δεν παράγουν τις ίδιες ποσότητες αερίου. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, όταν οι ζώνες ρωγμάτωσης γειτονικών γεωτρήσεων είναι σε κοντινές αποστάσεις μεταξύ τους, τότε επηρεάζεται η παραγωγή και των δύο γεωτρήσεων. Για να επηρεάζεται η παραγωγή των γεωτρήσεων δεν είναι απαραίτητο η ζώνες ρωγμάτωσης να εφάπτονται μεταξύ τους.



**Σχήμα 59: Διάγραμμα συνολικής ποσότητας παραγόμενου αερίου σε κανονικές συνθήκες και συνθήκες ταμειυτήρα.**

Στο διάγραμμα της μηνιαίας παραγωγής (Σχήμα 60), στα δυο πρώτα χρόνια της εκμετάλλευσης φαίνεται οι γεωτρήσεις να παράγουν σχεδόν το ίδιο. Από το 2016 και μετά όμως φαίνεται η γεώτρηση 3 ότι αρχίζει να εμφανίζει λίγο μεγαλύτερη μείωση στην παραγωγή της σε σχέση με τις άλλες δύο γεωτρήσεις.



**Σχήμα 60: Διάγραμμα μηνιαίας παραγωγής αερίου σε κανονικές συνθήκες.**

## **Κεφάλαιο 6ο: Συμπεράσματα- Προτάσεις**

### **6.1 Συμπεράσματα**

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η παραμετρική διερεύνηση μη συμβατικών ταμιευτήρων φυσικού αερίου με χρήση κατάλληλου αριθμητικών προσομοιωμάτων (μοντέλων). Για την διερεύνηση αυτή χρησιμοποιήθηκαν βιβλιογραφικές ιδιότητες που αντιστοιχούν σε πραγματικούς σχηματισμούς στην Β. Αμερική.

Από την παραμετρική ανάλυση προέκυψε ότι οι φυσικές ιδιότητες αυτών σχηματισμών, όπως είναι η διαπερατότητα, το πορώδες, η πυκνότητα, η πίεση, το βάθος και η απόσταση μεταξύ των φυσικών ρωγμών επηρεάζουν άμεσα την ευαισθησία των μοντέλων.

Η κινητικότητα του αερίου μέσα στο σχηματισμό καθώς και η ερμηνεία της είναι μια περίπλοκη διαδικασία η οποία ερμηνεύεται με τη βοήθεια της ισόθερμης Langmuir. Τα αποτελέσματα των μοντέλων έδειξαν πως τόσο οι φυσικές ιδιότητες όσο και η ισόθερμη Langmuir εμφανίζουν μεγάλη ευαισθησία σε οποιαδήποτε αλλαγή.

Ακόμη, η ευαισθησία των μοντέλων έδειξε να επηρεάζεται και από τα τεχνικά χαρακτηριστικά των γεωτρήσεων όπως είναι το μήκος του οριζόντιου τμήματος της γεώτρησης, το πλάτος της ζώνης ρωγμάτωσης και το μήκος των τεχνητών ρωγμών. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον εμφανίζουν τα χαρακτηριστικά για τη ζώνη ρωγμάτωσης, αφού όσο αυξάνονται τα όρια της αυξάνεται και η παραγωγή. Επίσης, διαπιστώθηκε πως όταν πρόκειται για γειτονικές γεωτρήσεις με τις ζώνες ρωγμάτωσης να βρίσκονται πολύ κοντά η μία με την άλλη ή να αλληλεπικαλύπτονται τότε η παραγόμενη ποσότητα αερίου μειώνεται. Στην περίπτωση αυτή φαίνεται η μία εκ των δύο γεωτρήσεων να υπολειμатурεί, αφού το αέριο από την ζώνη ρωγμάτωσης παράγεται από τη γειτονική της γεώτρηση.

Από τα διαγράμματα της μηνιαίας παραγωγής είναι δυνατό να αξιολογηθεί και να σχεδιαστεί η βέλτιστη δυνατή εκμετάλλευση των ταμιευτήρων. Αυτό συμβαίνει διότι με βάση της καμπύλες παραγωγής γίνεται ο στρατηγικός σχεδιασμός για τη μελλοντική εκμετάλλευση. Αποφασίζεται αν είναι απαραίτητη η εκ νέου ρωγμάτωση του ταμιευτήρα καθώς και η περιοχή στην οποία θα χρειαστεί να γίνει.

### **6.2 Προτάσεις**

Για μελλοντική έρευνα προτείνεται η μελέτη μοντέλων με μεγαλύτερη ευαισθησία στις μεταβολές των φυσικών ιδιοτήτων του σχηματισμού. Επίσης, μπορούν να μελετηθούν οι ιδιότητες των ρευστών ρωγμάτωσης και η επίδραση τους στο περιβάλλον. Σημαντικό θα ήταν να μελετηθεί ο ρόλος των υποστηρικτικών υλικών για τη μελλοντική εκμετάλλευση αυτών των ταμιευτήρων, δηλαδή αν το μέγεθος τους θα επηρέαζε την παραγωγή του ταμιευτήρα.

# Βιβλιογραφία

## Ελληνική βιβλιογραφία

1. Αγιουτάντης, Ζ (2002). *Στοιχεία Γεωμηχανικής - Μηχανική Πετρωμάτων*. Χανιά.
2. Βαρότσης, Ν (2014). *Εκμετάλλευση Ταμιευτήρων*. Χανιά.
3. Κελεσίδης, Β. (2008). *Τεχνική Γεωτρήσεων*. Χανιά.

## Διεθνής Βιβλιογραφία

1. Bustin A.M.M., Bustin R.M. (2012). *Importance of rock properties on the producibility of gas shales*. The University of British Columbia, Ocean Sciences, Vancouver, Canada.
2. Reinicke, A., Erik Rybacki, Sergei Stanchits, Ernst Huenges, Georg Dresen. (2010). *Hydraulic fracturing stimulation techniques and formation damage mechanisms—Implications from laboratory testing of tight and stone— proppant systems*. GFZ German Research Centre for Geosciences, Potsdam, Germany
3. Carter, B.J., J. Desroches, A.R. Ingraffea, P.A. Wawrzynek. *Simulating Fully 3D Hydraulic Fracturing*. Cornell University, Ithaca, New York.
4. Xu, B., Manouchehr Haghighi, Xiangfang Li, Dennis Cooke. (2013). *Development of new type curves for production analysis in naturally fractured shale gas/tight gas reservoirs*. China University of Petroleum, Beijing, China
5. Clarkson C.R. (2012). *Production data analysis of unconventional gas wells: Workflow*. University College London (UCL) Institute for Sustainable Resources and Energy Institute, London, UK
6. Qanbari, F., Christopher R. Clarkson. (2013). *A new method for production data analysis of tight and shale gas reservoirs during transient linear flow period*. University of Calgary, Calgary, Alberta, Canada
7. Gracceva, F., Peter Zeniewski. (2013). *Exploring the uncertainty around potential shale gas development - A global energy system analysis based on TIAM (TIMES Integrated Assessment Model)*. Institute for Energy and Transport (IET), Energy Security Unit, Petten, The Netherlands
8. Asche, F., Atle Oglend, Petter Osmundsen. (2012). *Gas versus oil prices the impact of shale gas*. University of Stavanger, Norway.
9. Gaurav, A., Dao, E.K. Mohanty K.K. (2012). *Evaluation of ultra-light-weight proppants for shale fracturing* The University of Texas at Austin, USA
10. Gu, M., Mohanty, K.K.. (2013). *Effect of foam quality on effectiveness of hydraulic fracturing in shales*. University of Texas at Austin, Austin, USA
11. Hu Y., Guolong, C., Cheng Weiping, Yang Zhenjun. (2013). *Simulation of hydraulic fracturing in rock mass using a smeared crack model*. Zhejiang University, Hangzhou, China
12. J. Adachia, E. Siebritsb, A. Peircec, J. Desrochesd (2006). *Computer simulation of hydraulic fractures*. Schlumberger Data and Consulting Services, Houston, Texas, USA

13. J.G. Wang, Jishan Liu, Akim Kabir. (2013). *Combined effects of directional compaction, non-Darcy flow and anisotropic swelling on coal seam gas extraction*. Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China
14. Kim, J., Moridis, G.J. (2012). *Development of the T+M coupled flow–geomechanical simulator to describe fracture propagation and coupled flow–thermal–geomechanical processes in tight/ shale gas systems*. Earth Sciences Division, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, USA
15. M. D. Zoback, F. Rummel, R. Jungi, C. B. Raleigh. *Laboratory Hydraulic Fracturing Experiments in Intact and Pre-fractured Rock*. Great Britain
16. M. S. Bruno, F. M. Nakawa (1991). *Pore Pressure Influence on Tensile Fracture Propagation in Sedimentary Rock*. Great Britain
17. Matteo Marongiu-Porcu, Michael J. Economides, Stephen A. Holditch (2013). *Economic and physical optimization of hydraulic fracturing*. Economides Consultants Inc., Houston, USA
18. Mc Glade C., Speirs J., Sorrell S. (2013). *Methods of estimating shale gas resources - Comparison, evaluation and implications*. University College London (UCL), London, UK.
19. Jiang, Q., Rentschler, J., Roger Perrone, Kunlei Liu. (2012). *Application of ceramic membrane and ion-exchange for the treatment of the flowback water from Marcellus shale gas production*. University of Kentucky, Lexington, USA
20. Weijermars, R., (2013). *Economic appraisal of shale gas plays in Continental Europe*. Delft University of Technology, Delft, Netherlands
21. Mohaghegh, S. D. (2013). *Reservoir modeling of shale formations*. Intelligent Solutions, Inc. & West Virginia University, Morgantown, United States.
22. Smith, M.B., NSI Technologies, Bale A., Stat Oil, Britt, L. K., Cunningham, L. E.(2004). *An Investigation of Non-Darcy Flow Effects on Hydraulic Fractured Oil and Gas Well Performance*.
23. Yu, W., Sepehrnoori, K., (2013). *Simulation of gas desorption and geomechanics effects for unconventional gas reservoirs*. Petroleum and Geosystems Engineering, The University of Texas at Austin, Austin, TX, United States
24. Ding, W., Zhu, D., Cai, J., Gong, M., Chen F., (2013). *Analysis of the developmental characteristics and major regulating factors of fractures in marine -continental transitional shale-gas reservoirs: A case study of the Carboniferous Permian strata in the southeastern Ordos Basin, central China*. China University of Geosciences, Beijing, China
25. Wu T., Wu B. (2012). *Corrosion resistance of ceramic proppant in BaO– CaO– P2O5– Al2O3 system*. Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi, China

### **Διαδικτυακή βιβλιογραφία**

1. [https://royalsociety.org/~media/Royal\\_Society\\_Content/policy/projects/shale-gas/2012-06-28-Shale-gas.pdf](https://royalsociety.org/~media/Royal_Society_Content/policy/projects/shale-gas/2012-06-28-Shale-gas.pdf) (2012)
2. <http://i2.cdn.turner.com/cnn/2012/images/06/15/induced.seismicity.prepublication.pdf> (2012).