



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
Τομέας Γεωτεχνικής

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Επισκόπηση της υδραυλικής διάρρηξης και διερεύνηση
της αύξησης της υδραυλικής αγωγιμότητας κατά την
εκμετάλλευση αερίου**

Δημήτριος Μ. Ράντος

Επιβλέπουσα:

Μαρίνα Πανταζίδου
Αναπληρώτρια καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Συνεπιβλέπων:

Χαράλαμπος Σαρόγλου
Ε.Δι.Π. Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Νοέμβριος 2016



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
Τομέας Γεωτεχνικής

**Επισκόπηση της υδραυλικής διάρρηξης και διερεύνηση
της αύξησης της υδραυλικής αγωγιμότητας κατά την
εκμετάλλευση αερίου**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

Δημήτριου Ράντου

Επιβλέπουσα:

Μαρίνα Πανταζίδου
Αναπληρώτρια καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Συνεπιβλέπων:

Χαράλαμπος Σαρόγλου
Ε.Δι.Π. Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Νοέμβριος 2016

Ευχαριστίες

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω την Αναπληρώτρια Καθηγήτρια του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, κυρία Μαρίνα Πανταζίδου που ήταν και η επιβλέπουσα της διπλωματικής μου εργασίας. Η συνεχής και υποδειγματική της καθοδήγηση μαζί με την άριστη επιστημονική της κατάρτιση, καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της παρούσας εργασίας διαμόρφωσαν τις πιο ευνοϊκές συνθήκες για τη διεξαγωγή της έρευνάς μου. Η διδασκαλία και ο συμβουλευτικός της ρόλος με εφοδίασαν με το απαραίτητο γνωστικό υπόβαθρο για την ενασχόληση με το συγκεκριμένο επιστημονικό πεδίο.

Για την άψογη συνεργασία και την αμέριστη βοήθειά του, καθώς και για τον αστείρευτο ενθουσιασμό του για έρευνα που αποτέλεσε έμπνευση για εμένα, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κύριο Χαράλαμπο Σαρόγλου.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια μου για τη συμπαράσταση, την ενθάρρυνση και την πολύτιμη στήριξη που μου προσέφεραν όλα αυτά τα χρόνια.

Δημήτριος Μ. Ράντος
Νοέμβριος, 2016

Επισκόπηση της υδραυλικής διάρρηξης και διερεύνηση της αύξησης της υδραυλικής αγωγιμότητας κατά την εκμετάλλευση αερίου

Δημήτριος Μ. Ράντος

(Επιβλέπουσα: Μαρίνα Πανταζίδου, Συνεπιβλέπων: Χαράλαμπος Σαρόγλου)

Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται επισκόπηση της υδραυλικής διάρρηξης ως μεθόδου εκμετάλλευσης μη συμβατικών κοιτασμάτων και εξετάζεται η αύξηση της υδραυλικής αγωγιμότητας με τη βοήθεια της μεθόδου αυτής, η οποία έχει ως στόχο την ελεγχόμενη δημιουργία ρωγμών. Η παραμετρική αυτή διερεύνηση απαίτησε το συνδυασμό ενός προσομοιώματος διάδοσης των ρωγμών με μία εξίσωση υπολογισμού της υδραυλικής αγωγιμότητας παράλληλα στις ρωγμές του σχηματισμού. Η ανάγκη για ρεαλιστική επιλογή των παραμέτρων οδήγησε στην εξοικείωση με τη λογική της υδραυλικής διάρρηξης και τις διαδικασίες που την απαρτίζουν. Ως παράμετροι εισήχθησαν τόσο βασικά μεγέθη της μεθόδου, όσο και γεωτεχνικές ιδιότητες των δύο σχηματισμών που εξετάστηκαν, του ψαμμίτη και του αργιλικού σχιστολίθου. Εκτός από τη διερεύνηση της υδραυλικής αγωγιμότητας για διάφορους συνδυασμούς υγρού διάρρηξης και είδους πετρώματος, εξετάσθηκε και η επίδραση της συχνότητας των ρωγμών, η οποία διαδραματίζει σημαίνοντα ρόλο στη βελτιστοποίηση της εφαρμογής. Επίσης, βάσει της χρήσης ενός μεγάλου αριθμού χημικών προσθέτων, αναζητήθηκαν οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της υδραυλικής διάρρηξης και, ειδικότερα, η πιθανότητα της ανθρώπινης έκθεσης σε ρύπους, όπως τα ιξωδορυθμιστικά πρόσθετα που εφαρμόσθηκαν στην παραπάνω διερεύνηση. Ο στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να εντοπίσουμε σε ποιο βαθμό αυξάνεται η υδραυλική αγωγιμότητα ενός σχηματισμού κατά την υδραυλική διάρρηξη, και πώς επηρεάζουν την αύξηση αυτή οι παράμετροι που υπεισέρχονται στον υπολογισμό της υδραυλικής αγωγιμότητας.

Για την εξυπηρέτηση του στόχου αυτού, μελετήθηκε η επιστημονική βιβλιογραφία αναφορικά με τους μηχανισμούς και τα μεγέθη που συνδέονται με την υδραυλική διάρρηξη. Το διδιάστατο προσομοίωμα που επιλέχθηκε δίνει την χρονική εξέλιξη του ανοίγματος των ρωγμών, χρησιμοποιώντας δεδομένα εισόδου όπως η παροχή και το ιξώδες του υγρού διάρρηξης και το μέτρο διάτμησης του πετρώματος. Στη συνέχεια, τα αποτελέσματα του προσομοιώματος αυτού εισήχθησαν, μαζί με ορισμένες σταθερές και τη συχνότητα των ρωγμών, στην εξίσωση υπολογισμού της υδραυλικής αγωγιμότητας. Έτσι, προέκυψε η χρονική της εξέλιξη κατά τη διάρκεια της υδραυλικής διάρρηξης, για τέσσερις διαφορετικούς συνδυασμούς υγρού διάρρηξης και είδους πετρώματος. Η ορθότητα των αποτελεσμάτων βασίζεται, σε μεγάλο βαθμό, στην εις βάθος αξιολόγηση των παραμέτρων που υπεισέρχονται στη διερεύνηση, αλλά και στην έμφαση που δόθηκε στις σχέσεις αλληλεπίδρασής τους. Νωρίτερα, αξιολογήθηκε επίσης και η ευκολία

δημιουργίας δικτύου ρωγμών στον ψαμμίτη και τον αργιλικό σχιστόλιθο θεωρώντας ως αποκλειστικές παραμέτρους την ψαθυρότητα και την αντοχή τους, οι οποίες δε λαμβάνονται υπόψη από το διδιάστατο προσομοίωμα.

Το κύριο συμπέρασμα που εξάχθηκε είναι ότι η ρύθμιση του ιξώδους των υγρών διάρρηξης διαδραματίζει πρωταρχικό ρόλο στην αύξηση της υδραυλικής αγωγιμότητας κατά την εκμετάλλευση του φυσικού αερίου. Έτσι, δικαιολογείται η έμφαση που εντοπίζεται στη βιβλιογραφία τόσο στα πρόσθετα ρύθμισης του ιξώδους, όσο και στα υπόλοιπα πρόσθετα, τα οποία καθορίζουν την αλληλεπίδραση του υγρού με το περιβάλλον του σχηματισμού. Παράλληλα, παρατηρήθηκε ότι το μέτρο διάτμησης του σχηματισμού και η συχνότητα των ρωγμών επιδρούν σε ένα βαθμό, μικρότερο του ιξώδους, στο εύρος των αποτελεσμάτων, όμως δεν παύουν να θεωρούνται βασικοί παράγοντες για τη βελτιστοποίηση της διαδικασίας. Συμπεραίνεται, επίσης, ότι η επάρκεια του προσομοιώματος εξέλιξης του ανοίγματος των ρωγμών και της εξίσωσης της υδραυλικής αγωγιμότητας του σχηματισμού, παράλληλα σε αυτές, είναι ικανοποιητική για τον υπολογισμό των τελικών τιμών, βάσει διασταύρωσης με στοιχεία από την επιστημονική βιβλιογραφία. Όμως, πρέπει να σημειωθεί ότι η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε δεν μπορεί να λάβει υπόψη διαφορές στις αντοχές σε διαφορετικά είδη σχηματισμών.

Διερευνώντας, τέλος, τις πιθανές επιπτώσεις της ρύπανσης υπόγειων υδροφορέων λόγω διαρροής των χημικών προσθέτων και, ειδικότερα, εκείνων που ρυθμίζουν το ιξώδες, συναντούμε ιδιαίτερα βλαβερές ουσίες για τον άνθρωπο όπως η ακρυλαμίδα, η οποία χαρακτηρίζεται από υψηλή κινητικότητα και τοξικότητα.

Overview of hydraulic fracturing and analysis of the hydraulic conductivity increase upon natural gas production

Dimitrios M. Rantos

(Supervisor: Marina Pantazidou, Co-supervisor: Charalampos Saroglou)

Abstract

This thesis studies the hydraulic fracturing method as a means of gas exploitation in unconventional reservoirs and examines the hydraulic conductivity increase of host rocks with the implementation of this method. A parametric analysis was conducted, which combines a model for hydraulically induced fracture propagation and an equation for calculating the hydraulic conductivity of the reservoir formation, parallel to the fractures. The need to select the analysis parameters led to an in-depth study of the logic behind hydraulic fracturing and its constituent phenomena. Input parameters are both method characteristics and geotechnical properties of the two formations examined herein, i.e. tight sandstone and shale. Besides analyzing hydraulic conductivity for various combinations of fracturing fluids and rock types, the effect of fracture frequency was also explored and, as expected, found to play a significant role in the optimization of the fracturing procedure. Furthermore, based on the considerable quantities of chemical additives that are handled, a search was conducted for the environmental impact of hydraulic fracturing and, in particular, for the potential of human exposure to pollutants, such as the viscosifiers considered in the aforementioned analysis. The aim of the thesis is to evaluate the degree of hydraulic conductivity increase during the implementation of hydraulic fracturing and the extent to which the analysis parameters affect the final outcome.

In order to achieve this goal, a study of the scientific literature was conducted, focusing on the mechanisms and parameters linked to hydraulic fracturing. The chosen two-dimensional simulation model calculates the fracture width growth, based on input values such as the flow rate and viscosity of the fracturing fluid, as well as the shear modulus of the rock. In addition, the model results were inserted, along with certain constants and the fracture frequency, as inputs to the equation for calculating the hydraulic conductivity. Thus, we obtained the increase of hydraulic conductivity with time, for four different combinations of fracturing fluids and rock types. The reliability of the results is based on the evaluation of parameter selection, as well as on the consideration of the interactions among them. Earlier in the thesis, proceeded the evaluation of fracability between the tight sandstone and the shale, taking into account only their brittleness and their strength, two parameters that are not considered by the two-dimensional model.

The main conclusion was that, regulating the fracturing fluid viscosity is the most important factor in hydraulic conductivity increase during the natural gas exploitation.

Thus, the scientific literature focuses on viscosifiers, as well as, every other additive that affects the interaction between the fracturing fluid and the reservoir formation. In addition, both the shear modulus of the rock and the fracture frequency were shown to affect, to a lesser extent, the range of the results, though still being considered as essential factors for the optimization of the fracturing process. Furthermore, it is concluded that the fracture propagation model and the equation used to calculate the hydraulic conductivity of the formation (parallel to the fractures), provide adequate estimations, as verified by comparisons with measured values reported in scientific literature. However, the applicability of the results is limited by the inability of the method to take into account differences in strength for different reservoir rock types.

Finally, in studying the possible implications of groundwater pollution due to spills of chemical additives and, specifically, those that regulate fluid viscosity, we find particularly harmful substances like acrylamide, which has high mobility and toxicity.

Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη.....	v
Abstract.....	vii
Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή.....	1
1.1 Ιστορική αναδρομή της υδραυλικής διάρρηξης	1
1.2 Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας	2
1.3 Οργάνωση κειμένου	3
Κεφάλαιο 2 Εξόρυξη αερίου με χρήση της υδραυλικής διάρρηξης.....	5
2.1 Γεωλογική μελέτη και σχεδιασμός.....	5
2.2 Κατασκευή γεώτρησης	6
2.3 Υδραυλική διάρρηξη.....	7
2.4 Αναρροή υγρών	8
2.5 Παραγωγή αερίου	8
2.6 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις της υδραυλικής διάρρηξης	10
Κεφάλαιο 3 Κοιτάσματα μη συμβατικών ορυκτών καυσίμων....	11
3.1 Αργιλικός σχιστόλιθος και φυσικό αέριο	11
3.1.1 Διαγένεση πετρώματος και οργανικό υλικό.....	11
3.1.2 Παραγωγή φυσικού αερίου	12
3.1.3 Χαρακτηριστικά ενός ποιοτικού σχιστολιθικού κοιτάσματος.....	13
3.2 Ψαμμίτης και φυσικό αέριο	14
3.2.1 Διαγένεση πετρώματος.....	15
3.2.2 Είδη ψαμμιτικών κοιτασμάτων	15
3.2.3 Μηχανισμός παγίδευσης του αερίου	17
3.2.4 Χαρακτηριστικά ενός ποιοτικού ψαμμιτικού κοιτάσματος	18
3.3 Αξιολόγηση ψαμμιτικών και σχιστολιθικών κοιτασμάτων με βάση την ευκολία ρωγμάτωσης.....	19

3.3.1 Διαφορές και ομοιότητες σχηματισμών	19
3.3.2 Διαπερατότητα	20
3.3.3 Πορώδες	21
3.3.4 Ψαθυρότητα	21
3.3.5 Βαθμός ευκολίας δημιουργίας δικτύου ρωγμών (fracability)	22
3.3.6 Συμπερασματικά σχόλια.....	23

Κεφάλαιο 4 Αύξηση της υδραυλικής αγωγιμότητας σε αργιλικό σχιστόλιθο και ψαμμίτη 25

4.1 Η διαδικασία εφαρμογής της υδραυλικής διάρρηξης.....	25
4.1.1 Προγραμματισμός και περιμετρική διάτρηση	26
4.1.2 Στάδια της διαδικασίας	27
4.1.3 Παράγοντες που επηρεάζουν την υδραυλική διάρρηξη	28
4.2 Διερεύνηση παραμέτρων που συνδέονται με την υδραυλική διάρρηξη.....	29
4.2.1 Υδραυλική αγωγιμότητα.....	29
4.2.2 Προσομοίωμα εξέλιξης του ανοίγματος των ρωγμών	31
4.2.3 Συχνότητα ρωγμών	34
4.2.4 Ιξώδες υγρών διάρρηξης	35
4.2.5 Χρόνος από την έναρξη της ρωγμάτωσης.....	38
4.2.6 Τασικό πεδίο των σχηματισμών	38
4.2.7 Αντοχή ψαμμίτη και αργιλικού σχιστόλιθου	41
4.2.8 Προσανατολισμός των ρωγμών	41
4.2.9 Εξέλιξη των πιέσεων	41

Κεφάλαιο 5 Παραμετρική διερεύνηση της αύξησης της υδραυλικής αγωγιμότητας 45

5.1 Παράμετροι διερεύνησης της υδραυλικής αγωγιμότητας.....	45
5.1.1 Στάδια ανάλυσης και παράμετροι.....	45
5.1.2 Τασικό πεδίο ψαμμίτη και αργιλικού σχιστόλιθου	46
5.1.3 Αντοχή του ψαμμίτη και του αργιλικού σχιστόλιθου	46
5.1.4 Πιέσεις κατά την υδραυλική διάρρηξη	47
5.1.5 Χρόνος από την έναρξη της ρωγμάτωσης.....	48

5.1.6	Ιξώδες των υγρών διάρρηξης	48
5.1.7	Ιδιότητες των σχηματισμών και παράμετροι του προσομοιώματος του ανοίγματος των ρωγμών	49
5.1.8	Συχνότητα των ρωγμών κατά μήκος της γεώτρησης	50
5.1.9	Υδραυλική αγωγιμότητα των σχηματισμών	51
5.1.10	Συγκεντρωτικός πίνακας παραμέτρων	54
5.1.11	Παραδοχές και αβεβαιότητες	54
5.2	Παραμετρική ανάλυση της υδραυλικής αγωγιμότητας μη συμβατικών κοιτασμάτων.....	56
5.2.1	Χρονική εξέλιξη του ανοίγματος των ρωγμών	56
5.2.2	Υδραυλική αγωγιμότητα	62
5.2.3	Συζήτηση των αποτελεσμάτων	65
5.2.4	Σύγκριση αποτελεσμάτων με δεδομένα από τη βιβλιογραφία	67
5.2.5	Συμπερασματικά σχόλια	68

Κεφάλαιο 6 Επιπτώσεις της υδραυλικής διάρρηξης στους υπόγειους υδροφορείς..... 71

6.1	Μηχανισμοί ρύπανσης του υπόγειου νερού λόγω της υδραυλικής διάρρηξης	71
6.1.1	Άντληση υδάτων	72
6.1.2	Ανάμιξη υγρού διάρρηξης	72
6.1.3	Εισπίεση υγρού διάρρηξης	72
6.1.4	Διαχείριση του υγρού αναρροής	73
6.1.5	Συμπερασματικά σχόλια	73
6.2	Κατηγορίες χημικών προσθέτων	74
6.2.1	Οξέα καθαρισμού (Acids)	75
6.2.2	Γαλακτωματοποιητές (Emulsifiers).....	75
6.2.3	Παράγοντες σταθεροποίησης της αργίλου (Clay controlling agents).....	75
6.2.4	Αναστολείς διάβρωσης (Corrosion inhibitors)	75
6.2.5	Αναστολείς καθαλατώσεων (Scale inhibitors).....	76
6.2.6	Παράγοντες ρύθμισης του pH (pH controlling agents)	76
6.2.7	Βιοκτόνα (Biocides)	76

6.2.8	Επιφανειοδραστικές ουσίες (Surfactants)	76
6.2.9	Πρόσθετα ελέγχου διαρροής στο σχηματισμό (Fluid loss additives)	77
6.2.10	Πρόσθετα μείωσης της τριβής (Friction reducers).....	77
6.2.11	Πηκτωματογόνα ή Ιξωδοαυξητικά (Gelling agents ή Viscosifiers)	77
6.2.12	Δικτυωτές (Crosslinkers)	78
6.2.13	Σταθεροποιητές ζελατίνης (Gel stabilizers)	78
6.2.14	Απογαλακτωματοποιητές (Non-emulsifiers).....	78
6.2.15	Παράγοντες διάσπασης (Breakers)	78
6.2.16	Καταγραφή των χημικών προσθέτων.....	79
6.3	Διερεύνηση επικινδυνότητας των ιξωδοαυξητικών προσθέτων	79
6.3.1	Τα είδη των ιξωδοαυξητικών προσθέτων	79
6.3.2	Πλαίσιο διερεύνησης της πιθανότητας ανθρώπινης έκθεσης	80
6.3.3	Συμπερασματικά σχόλια.....	81
Κεφάλαιο 7 Σύνοψη και συμπεράσματα		83
Βιβλιογραφία.....		85
Κατάλογος συμβόλων		93
Γλωσσάρι τεχνικών όρων		95
Glossary of technical terms		97
Παράρτημα. Συγκεντρωτικός πίνακας με τα χημικά πρόσθετα της υδραυλικής διάρρηξης ανάλογα με το σκοπό χρήσης τους.....		99

Λίστα πινάκων

Πίνακας 2-1: Διεργασίες που σχετίζονται με την υδραυλική διάρρηξη, με χρονολογική σειρά εφαρμογής από τα αριστερά προς τα δεξιά	5
Πίνακας 3-1: Βέλτιστο εύρος των χαρακτηριστικών ενός σχιστολιθικού σχηματισμού προς εκμετάλλευση και στοιχεία σχηματισμών των Η.Π.Α. (Jarvie, 2012)	14
Πίνακας 3-2: Χαρακτηριστικά των πιο γνωστών ψαμμιτικών κοιτασμάτων σε λεκάνες της Κίνας και της Αμερικής.....	19
Πίνακας 4-1: Εύρος τιμών της υδραυλικής αγωγιμότητας K για διάφορους σχηματισμούς (Freeze and Cherry, 1979)	31
Πίνακας 5-1: Επιτόπου τασικό πεδίο σχηματισμών ψαμμίτη και αργιλικού σχιστόλιθου στο βάθος των δύο χιλιομέτρων (Haimson, 1978)	46
Πίνακας 5-2: Εφελκυστική αντοχή και αντοχή σε θραύση των σχηματισμών	47
Πίνακας 5-3: Οι πιέσεις ρωγμάτωσης και κλεισίματος των ρωγμών των σχηματισμών ..	47
Πίνακας 5-4: Τυπικές τιμές μεγεθών για την εκτίμηση του ιξώδους των υγρών ρωγμάτωσης.....	49
Πίνακας 5-5: Οι τιμές του ιξώδους των υγρών που θα χρησιμοποιηθούν στη διερεύνηση	49
Πίνακας 5-6: Τιμές μεγεθών για τον υπολογισμό του ανοίγματος των ρωγμών	50
Πίνακας 5-7: Ποσοστό του ανοίγματος μεμονωμένης ρωγμής, το οποίο αντιστοιχεί σε σειρά άπειρων ρωγμών, με βάση το λόγο της απόστασης των ρωγμών προς το ύψος τους (Britt and Smith, 2009)	51
Πίνακας 5-8: Συγκεντρωτικός πίνακας τιμών για την παραμετρική ανάλυση της αύξησης της υδραυλικής αγωγιμότητας με τη βοήθεια της υδραυλικής διάρρηξης.....	54
Πίνακας 5-9: Χρονική εξέλιξη του ανοίγματος των ρωγμών για 4 συνδυασμούς διαφορετικών σχηματισμών και υγρών διάρρηξης	57
Πίνακας 5-10: Άνοιγμα των ρωγμών ανάλογα με την απόσταση μεταξύ τους, για δεδομένο ύψος ρωγμών, που αντιστοιχεί στο συνδυασμό «Αργιλικός σχιστόλιθος και νερό με πρόσθετα πολυμερή»	58

Πίνακας 5-11: Χρονική εξέλιξη του διορθωμένου ανοίγματος των ρωγμών ε' για 4 συνδυασμούς διαφορετικών σχηματισμών και υγρών διάρρηξης, με συνυπολογισμό της επίδρασης της απόστασης ανάμεσα στις ρωγμές.....	60
Πίνακας 5-12: Χρονική εξέλιξη της υδραυλικής αγωγιμότητας για 4 συνδυασμούς διαφορετικών σχηματισμών και υγρών διάρρηξης, με συνυπολογισμό της επίδρασης της απόστασης ανάμεσα στις ρωγμές	62
Πίνακας 5-13: Χρονική εξέλιξη της υδραυλικής αγωγιμότητας ανάλογα με την απόσταση των ρωγμών, για δεδομένο ύψος, που αντιστοιχεί στο συνδυασμό «Αργιλικός σχιστόλιθος και νερό με πρόσθετα πολυμερή»	64
Πίνακας 5-14: Δεδομένα τελικής υδραυλικής αγωγιμότητας των ρωγμών μετά την υδραυλική διάρρηξη σε ψαμμίτη και αργιλικό σχιστόλιθο, βάσει της βιβλιογραφίας και της παρούσας διερεύνησης	68
Πίνακας 7-1: Οι κατηγορίες των χημικών προσθέτων που χρησιμοποιούνται σε κάθε στάδιο της υδραυλικής διάρρηξης, ο σκοπός που επιτελούν και οι συχνότερες χημικές ουσίες ανά κατηγορία.....	99

Λίστα σχημάτων

Σχήμα 2-1: Παράδειγμα σύστασης ενός υγρού διάρρηξης με ποσόστωση, από δεδομένα εφαρμογών της υδραυλικής διάρρηξης στο σχιστολιθικό κοίτασμα Fayetteville (US DoE, 2009)	7
Σχήμα 2-2: Καμπύλες παροχής (MMscf/d) και συνολικής παραγωγής αερίου (διακεκομμένες), για περίοδο παραγωγής 30 ετών, γεώτρησης εξόρυξης αερίου στο κοίτασμα Barnett (Yu and Sepehrnoori, 2014)	9
Σχήμα 3-1: Μεταβατική ζώνη του ψαμμιτικού στρώματος, από κορεσμένο με αέριο σε κορεσμένο με νερό. Το νερό αποτελεί το άνω σύνορο στο κοίτασμα για το φυσικό αέριο λόγω της πολύ μικρής διαπερατότητας του πετρώματος (Masters, 1979).....	16
Σχήμα 3-2: Απεικόνιση μιας εδαφικής τομής της λεκάνης Piceance στο Colorado των Η.Π.Α.. Τα κόκκινα βέλη αντιστοιχούν στην μετακίνηση του αερίου από τα μητρικά προς τα ψαμμιτικά πετρώματα είτε μέσω ρωγμών, είτε ρηγμάτων. Η κόκκινη γραμμή σηματοδοτεί το άνω όριο της μετακίνησης αυτής. Πέρα από αυτήν υφίσταται η εξωτερική ζώνη όπου παρατηρούνται συμβατικά κοιτάσματα (Fall et al., 2012).....	18
Σχήμα 3-3: Απεικόνιση και κατανομή μεγέθους των πόρων των σχηματισμών (Rezaee et al., 2012).....	21
Σχήμα 3-4: Τριαξονικές δοκιμές για γνωστούς σχιστολιθικούς και ψαμμιτικούς σχηματισμούς (σε παρένθεση βρίσκονται οι πλευρικές τάσεις) (Bai, 2016).....	22
Σχήμα 3-5: Βαθμός ευκολίας δημιουργίας δικτύου ρωγμών σε ένα σχηματισμό (fracability) και συσχέτιση αντοχής σε θραύση με το δείκτη ψαθυρότητας (Bai, 2016).....	23
Σχήμα 4-1: Σχηματική απεικόνιση της μικρορωγμής κατά τη διάτρηση, όπου φαίνονται οι αλλοιωμένες ζώνες του σχηματισμού, λόγω της γεώτρησης και της ίδιας της διάτρησης (με κόκκινο συμβολίζεται η ροή των υπολειμμάτων διάτρησης) (Cosad, 1992)	26
Σχήμα 4-2: Σχηματική απεικόνιση της μικρορωγμής μετά την απομάκρυνση των υπολειμμάτων διάτρησης (με κόκκινο συμβολίζεται η ροή του αερίου) (Cosad, 1992)	27
Σχήμα 4-3: Επιτυχής ρωγμάτωση με εγκάρσια ανάπτυξη (Crosby et al., 2001)	29
Σχήμα 4-4: Ανεπιτυχής ρωγμάτωση με διαμήκης ανάπτυξη (Crosby et al., 2001)	29
Σχήμα 4-5: Απεικόνιση της διάδοσης της ρωγμής από κατακόρυφη γεώτρηση κατά το προσομοίωμα GdK (Geertsma and de Klerk, 1969).....	33

Σχήμα 4-6: Η επίδραση της συχνότητας των ρωγμών στο άνοιγμά τους και την απαιτούμενη πίεση ρωγμάτωσης (Britt and Smith, 2009).....	34
Σχήμα 4-7: Η επίδραση της ταχύτητας διάτμησης και της θερμοκρασίας στο δυναμικό ιξώδες υδατικού μείγματος 4.8 kg/m ³ HPG (Guillot and Dunand, 1985).....	36
Σχήμα 4-8: Η επίδραση της συγκέντρωσης των πολυμερών για δύο διαφορετικές ταχύτητες διάτμησης στο δυναμικό ιξώδες υδατικού μείγματος HPG, στους 27 °C (τα δεδομένα προέκυψαν από μετρήσεις της Dowell Schlumberger με ιξωδόμετρο Couette στο Houston, το 1984) (Schlumberger, 1984)	36
Σχήμα 4-9: Επίδραση του χρόνου υπό πίεση, της θερμοκρασίας και του pH στο δυναμικό ιξώδες υδατικού μείγματος HPG (τα δεδομένα δόθηκαν από τον S.K. Knoll, με άδεια της Aqualon Co., Houston, (1984)) (Gidley et al., 1989)	37
Σχήμα 4-10: Κατανομές των κύριων τάσεων (σε bar) με το βάθος στις Η.Π.Α., με βάση μετρήσεις υδραυλικής διάρρηξης (Haimson, 1978).....	40
Σχήμα 4-11: Παράδειγμα καμπύλης πίεσης – χρόνου (International Society for Rock Mechanics Commission On Testing Methods, 1987).....	43
Σχήμα 5-1: Απεικόνιση της υδραυλικής αγωγιμότητας του άρρηκτου πετρώματος K ₀ και της υδραυλικής αγωγιμότητας του σχηματισμού παράλληλα στις ρωγμές K στο προσομοίωμα που θα χρησιμοποιηθεί στη διερεύνηση	52
Σχήμα 5-2: Χρονική εξέλιξη του ανοίγματος των ρωγμών για 4 συνδυασμούς διαφορετικών σχηματισμών και υγρών διάρρηξης	57
Σχήμα 5-3: Άνοιγμα των ρωγμών ανάλογα με την απόσταση μεταξύ τους (dX), για δεδομένο ύψος ρωγμών, που αντιστοιχεί στο συνδυασμό «Αργιλικός σχιστόλιθος και νερό με πρόσθετα πολυμερή»	59
Σχήμα 5-4: Χρονική εξέλιξη του ανοίγματος των ρωγμών για 4 συνδυασμούς διαφορετικών σχηματισμών και υγρών διάρρηξης, με συνυπολογισμό της επίδρασης της απόστασης ανάμεσα στις ρωγμές	61
Σχήμα 5-5: Χρονική εξέλιξη του ανοίγματος των ρωγμών για 4 συνδυασμούς διαφορετικών σχηματισμών και υγρών διάρρηξης, με θεώρηση μεμονωμένης και άπειρων ρωγμών	61

Σχήμα 5-6: Χρονική εξέλιξη της υδραυλικής αγωγιμότητας για 4 συνδυασμούς διαφορετικών σχηματισμών και υγρών διάρρηξης, με συνυπολογισμό της επίδρασης της απόστασης ανάμεσα στις ρωγμές	63
Σχήμα 5-7: Λεπτομέρεια των δύο συνδυασμών του Διαγράμματος 5 με την χαμηλότερη υδραυλική αγωγιμότητα.....	63
Σχήμα 5-8: Χρονική εξέλιξη της υδραυλικής αγωγιμότητας ανάλογα με την απόσταση των ρωγμών (dX), για δεδομένο ύψος, που αντιστοιχεί στο συνδυασμό «Αργιλικός σχιστόλιθος και νερό με πρόσθετα πολυμερή»	65

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

Το φυσικό αέριο αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους ορυκτούς πόρους ενέργειας. Ο «καθαρός» χαρακτήρας καύσης του σε σχέση με το πετρέλαιο και το γαιάνθρακα, καθώς και η μεγάλη διαθεσιμότητά του, συντέλεσαν στην καθιέρωση του ως την κύρια πηγή ηλεκτρικής ενέργειας σε πολλές χώρες ανά τον κόσμο (π.χ. Η.Π.Α. και Ρωσία). Πρόκειται, ουσιαστικά, για ένα συνδυασμό αερίων με κύριο συστατικό το μεθάνιο (CH₄) και μικρότερα ποσοστά από βουτάνιο, αιθάνιο, προπάνιο και άλλα, κάποια από τα οποία διαχωρίζονται και χρησιμοποιούνται ξεχωριστά. Το φυσικό αέριο εξορύσσεται, ως γνωστόν, από υπόγεια κοιτάσματα, τα οποία, σε κάποιο βαθμό, έχουν συνδεθεί και με πόρους πετρελαίου. Η ευρεία αυτή χρήση του φυσικού αερίου οδηγεί, αναπόφευκτα, προς την εξάντληση των αποθεμάτων και, ταυτόχρονα, στην άνοδο της τιμής του.

Το μεγάλο ενδιαφέρον της βιομηχανίας και των μηχανικών για ανεύρεση νέων πηγών φυσικού αερίου έφερε στο προσκήνιο κοιτάσματα, τα οποία μέχρι πρότινος θεωρούνταν αντικοινωνικά και δύσκολα στην εκμετάλλευσή τους. Τα κοιτάσματα αυτά χαρακτηρίστηκαν μη συμβατικά, για το διαχωρισμό τους από τα συνήθη (συμβατικά), καθώς παρουσιάζουν χαρακτηριστικά όπως η χαμηλή διαπερατότητα και η λεπτή στρωμάτωση, που καθιστούν αδύνατη την παραγωγή φυσικού αερίου με εφαρμογή των συμβατικών μεθόδων εξόρυξης, δηλαδή την κατακόρυφη γεώτρηση. Καθοριστικό ρόλο στην υπέρβαση αυτού του εμποδίου έπαιξε ο συνδυασμός των τεχνολογιών της υδραυλικής διάρρηξης και της οριζόντιας γεώτρησης. Πιο συγκεκριμένα, η πρώτη παρείχε λύση στο πρόβλημα της αύξησης της διαπερατότητας των κοιτασμάτων, ενώ η δεύτερη βοήθησε στην αύξηση της επαφής των γεωτρήσεων παραγωγής με τον όγκο του κοιτάσματος. Η συνεχής ανάπτυξη των τεχνολογιών αυτών, σε συνδυασμό με την ανακάλυψη μη συμβατικών κοιτασμάτων παγκοσμίως, έδωσε νέα πνοή στη παραγωγή φυσικού αερίου.

Παρ' ότι η λογική της υδραυλικής διάρρηξης είναι απλή να κατανοηθεί, οι μηχανισμοί που εμπλέκονται στην εφαρμογή της θεωρούνται πολύπλοκοι και μελετώνται από την επιστημονική κοινότητα μέχρι και σήμερα. Με λίγα λόγια, πρόκειται για μία τεχνική ρωγμάτωσης του πετρώματος με την εισπίεση υγρού, συνήθως νερού, και την τοποθέτηση ενός υλικού για τη συγκράτηση των ρωγμών, που έχει ως απώτερο στόχο την αύξηση της διαπερατότητας για την ροή του περιεχόμενου αερίου μέσα από τις ρωγμές προς την επιφάνεια. Οφείλει να σημειωθεί ότι μεγάλο ποσοστό της αποτελεσματικότητας της μεθόδου αυτής αποδίδεται στα χημικά πρόσθετα που περιέχονται στο υγρό διάρρηξης, τα οποία συμβάλλουν ποικιλοτρόπως στην ομαλή διεξαγωγή της υδραυλικής διάρρηξης.

Από την άλλη πλευρά, η εισπίεση στο υπέδαφος σημαντικών ποσοτήτων χημικών ουσιών που χρησιμοποιούνται κατά την υδραυλική διάρρηξη γεννά ερωτήματα αναφορικά με τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις μιας πιθανής ρύπανσης. Ιδιαίτερη σημασία δίνεται στη ρύπανση των υπόγειων υδροφορέων, η οποία, ήδη, αριθμεί πολλά καταγεγραμμένα περιστατικά παγκοσμίως (US EPA, 2015b).

1.1 Ιστορική αναδρομή της υδραυλικής διάρρηξης

Η υδραυλική διάρρηξη χρησιμοποιήθηκε, αρχικά, για την ενίσχυση της παραγωγής κατακόρυφων γεωτρήσεων εξόρυξης από συμβατικά κοιτάσματα. Η πρώτη, ιστορικά, εφαρμογή της εντοπίζεται τον Ιούλιο του 1947, στη γεώτρηση Kelpper Well 1, στην κομητεία Grant του Kansas, στις Η.Π.Α., όπου χρησιμοποιήθηκαν περίπου 45 m³ βενζίνης ως υγρό

διάρρηξης. Σύμφωνα με τον Gidley et al. (1989), η ενίσχυση της παραγωγής μέσω της υδραυλικής διάρρηξης είχε καθιερωθεί, έως τα μέσα της δεκαετίας του 1960. Η πρώιμη μορφή της διακρινόταν από μεγάλους όγκους υγρού διάρρηξης υδατικής βάσης, το οποίο εισπιέζονταν με μεγάλη παροχή. Η μεταμόρφωση της μεθόδου στη σημερινή της μορφή, δηλαδή μικρότεροι όγκοι υγρού και παροχή, ξεκίνησε τη δεκαετία του 1970, κατά την οποία επικεντρώθηκε το ενδιαφέρον της βιομηχανίας και των κρατών στην εξόρυξη μη συμβατικών πηγών φυσικού αερίου. Όπως προαναφέρθηκε, η εξέλιξή της συνδυάζεται με εκείνη της οριζόντιας γεώτρησης, η οποία τοποθετείται στα μέσα της δεκαετίας του 1980. Η πολυπλοκότητα των συνδυασμένων μεθόδων, καθώς και οι αντιξοότητες που αντιμετώπιζαν οι εφαρμογές στα μη συμβατικά κοιτάσματα, καθυστέρησαν την οικονομική παραγωγή από αυτά, η οποία εντοπίζεται, τελικά, το 2001 στο σχιστολιθικό κοιτάσμα Barnett των Η.Π.Α.. Έως το 2003, στο ίδιο κοιτάσμα είχαν κατασκευαστεί άλλες 55 οριζόντιες γεωτρήσεις, οι οποίες παρήγαγαν περισσότερο φυσικό αέριο από όλες τις υπόλοιπες σε σχιστολιθικά κοιτάσματα των Η.Π.Α., όπως σημειώνεται στην έρευνα του US DoE (2011). Οι εφαρμογές της υδραυλικής διάρρηξης για την ενίσχυση της παραγωγής φυσικού αερίου έχουν επεκταθεί σε πολλές χώρες όπως ο Καναδάς, η Αυστραλία, η Κίνα, ενώ σε πειραματικό στάδιο βρίσκονται και η Αγγλία, η Πολωνία, η Ινδία, η Γαλλία και άλλες. Πρέπει, από την άλλη πλευρά, να τονισθεί ότι η υδραυλική διάρρηξη τυγχάνει απαγόρευσης, σήμερα, σε πλήθος χωρών, εξαιτίας των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της ρύπανσης που δύναται να προκαλέσει η χρήση της.

1.2 Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας

Η παρούσα διπλωματική έχει ως αντικείμενο τη διερεύνηση της αύξησης της υδραυλικής αγωγιμότητας σχηματισμών, με τη βοήθεια της υδραυλικής διάρρηξης. Η παραμετροποίηση της εξίσωσης υπολογισμού της περιλαμβάνει σταθερές και μεταβλητές που σχετίζονται τόσο με το είδος του σχηματισμού, όσο και με την διαδικασία εφαρμογής της μεθόδου. Ανάμεσα στα εμπλεκόμενα μεγέθη υφίστανται, επίσης, σχέσεις αλληλεπίδρασης, οι οποίες μεταβάλλουν ή περιορίζουν τις τιμές τους κατά τη διερεύνηση. Από την άλλη πλευρά, εντοπίζονται παράγοντες, όπως η πλευρική τάση και η ψαθυρότητα, οι οποίοι δεν υπεισέρχονται στις εξισώσεις υπολογισμού της υδραυλικής αγωγιμότητας, αλλά θεωρείται βέβαιο ότι διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στο τελικό αποτέλεσμα της υδραυλικής διάρρηξης. Γεννιέται, λοιπόν, το ερώτημα της επάρκειας της διερεύνησης στην αποτύπωση της αύξησής της. Η κατανόηση των φαινομένων αυτών και η αναζήτηση της επίδρασης των παραγόντων που εντοπίστηκαν είχαν ως προαπαιτούμενο την επισκόπηση της υδραυλικής διάρρηξης.

Η αξιοπιστία της απάντησης στο πιο πάνω ερώτημα βασίζεται στο βαθμό εξοικείωσης με την εν λόγω μέθοδο. Έτσι, προέκυψε η ρεαλιστική παραμετροποίηση των εξισώσεων και ο συνυπολογισμός των αλληλεπιδράσεων για τον υπολογισμό της τελικής τιμής της υδραυλικής αγωγιμότητας. Στη διερεύνηση θεωρούνται τέσσερις διαφορετικοί συνδυασμοί υγρού διάρρηξης και είδους σχηματισμού και, επιπρόσθετα, διάφορες τιμές της συχνότητας των ρωγμών. Τα αποτελέσματά της συγκρίνονται, επίσης, με δεδομένα από την επιστημονική βιβλιογραφία. Σε μικρότερο βαθμό, εξετάζεται και η επίδραση των παραγόντων που δεν συναξιολογούνται στην μεθοδολογία που ακολουθήθηκε στην ευκολία ρωγμάτωσης των σχηματισμών.

Τέλος, η ενασχόληση με τα ιξωδορυθμιστικά χημικά πρόσθετα του υγρού διάρρηξης, στη διάρκεια της πιο πάνω διερεύνησης, αποτέλεσε το κίνητρο για την αναζήτηση των επιπτώσεων της ρύπανσης των υπόγειων υδροφορέων και της πιθανότητας έκθεσης του ανθρώπου στους ρύπους αυτούς.

1.3 Οργάνωση κειμένου

Στο *Κεφάλαιο 2* παρουσιάζονται όλες οι διεργασίες που απαρτίζουν την εξόρυξη φυσικού αερίου με τη βοήθεια της υδραυλικής διάρρηξης, από τη γεωλογική μελέτη έως την παραγωγή. Επίσης, παρατίθενται οι διάφορες περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την εφαρμογή της υδραυλικής διάρρηξης.

Το *Κεφάλαιο 3* εμβαθύνει στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των μη συμβατικών κοιτασμάτων του αργιλικού σχιστόλιθου και του ψαμμίτη. Γίνεται, στη συνέχεια, μία προσπάθεια σύνδεσης των μηχανισμών της διαγένεσης των πετρωμάτων με την παρουσία του φυσικού αερίου στο εσωτερικό τους, ενώ παρατίθενται και τα γνωρίσματα των ποιοτικότερων κοιτασμάτων, τα οποία ενδείκνυνται για εκμετάλλευση. Στην τελευταία ενότητα, διερευνάται η διαφοροποίηση των πετρωμάτων αυτών στην ευκολία ρωγμάτωσης, συγκρίνοντας ορισμένες χαρακτηριστικές ιδιότητες και τις τάσεις καταπόνησής τους.

Στο *Κεφάλαιο 4*, αρχικά, γίνεται μία παρουσίαση του μηχανικοϋδραυλικού φαινομένου της υδραυλικής διάρρηξης, στην οποία εστιάζουμε στους στόχους κάθε σταδίου της εφαρμογής και στους κυριότερους παράγοντες που επηρεάζουν το τελικό της αποτέλεσμα. Στο δεύτερο κομμάτι, παρατίθεται το απαραίτητο θεωρητικό υπόβαθρο της μεθόδου, στο οποίο θα στηριχθούν οι επιλογές των παραμέτρων για τη επικείμενη διερεύνηση του επόμενου κεφαλαίου.

Στο *Κεφάλαιο 5* λαμβάνει χώρα η παραμετροποίηση των εξισώσεων, βάσει της μελέτης του θεωρητικού υποβάθρου, των σχέσεων αλληλεπίδρασης των μεγεθών που υπεισέρχονται και το σενάριο εφαρμογής της υδραυλικής διάρρηξης που θεωρήθηκε για τη διερεύνησή της. Ακολούθως, παρατίθεται η παραμετρική ανάλυση της αύξησης της υδραυλικής αγωγιμότητας, συνοδευόμενη από τη συζήτηση των αποτελεσμάτων, τη σύγκριση με τιμές από την επιστημονική βιβλιογραφία και τα συμπερασματικά σχόλια επί αυτών.

Το *Κεφάλαιο 6* περιέχει τις επιπτώσεις της υδραυλικής διάρρηξης στο υπόγειο νερό, ανάλογα με τη διεργασία κατά την οποία εντοπίζεται. Στην συνέχεια, αναπτύσσονται οι κατηγορίες των χημικών προσθέτων ανάλογα με το σκοπό χρήσης τους, καθώς και η αξιολόγηση της επικινδυνότητας, ειδικότερα, των ιξωδοαυξητικών προσθέτων, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν και στη διερεύνηση της αύξησης της υδραυλικής αγωγιμότητας.

Το *Κεφάλαιο 7* αποτελεί μία σύνοψη των ζητημάτων που εξετάστηκαν και των συμπερασμάτων στα οποία καταλήξαμε.

Ακολουθούν η παράθεση της βιβλιογραφίας και το γλωσσάρι των τεχνικών όρων που χρησιμοποιήθηκαν τόσο από τα ελληνικά στο αγγλικά, όσο και το αντίστροφο.

Καταλήγοντας, στο *Παράρτημα Α* υφίσταται ο συγκεντρωτικός πίνακας με τις κατηγορίες των χημικών προσθέτων, ανάλογα με το σκοπό χρήσης του, μαζί με τις συχνότητες χημικές ουσίες που εντοπίζονται ανά κατηγορία.

Κεφάλαιο 2 Εξόρυξη αερίου με χρήση της υδραυλικής διάρρηξης

Η υδραυλική διάρρηξη αποτελεί μία τεχνική ενίσχυσης της παραγωγής φυσικού αερίου και πετρελαίου. Η συνεχής εξέλιξη και ο συνδυασμός της με τη σύγχρονη τεχνολογία των οριζόντιων γεωτρήσεων άνοιξε το δρόμο για την οικονομική εκμετάλλευση των μη συμβατικών κοιτασμάτων, στα οποία εντοπίζονται σημαντικά αποθέματα ορυκτών καυσίμων, παγκοσμίως. Τα κοιτάσματα αυτά, σε αντίθεση με τα συμβατικά, χαρακτηρίζονται από χαμηλές τιμές διαπερατότητας και διάφορες άλλες ιδιαιτερότητες (περισσότερα στο Κεφάλαιο 3), γεγονός που συντελεί στην αδυναμία εκμετάλλευσής τους με τα παραδοσιακά μέσα της βιομηχανίας εξόρυξης.

Στόχος της υδραυλικής διάρρηξης είναι η αύξηση της διαπερατότητας του πετρώματος, ρωγματώνοντάς το μέσω της εισπίεσης μεγάλων όγκων νερού, και τοποθετώντας, στη συνέχεια, κατάλληλο υλικό συγκράτησης των ρωγμών. Το μηχανικοϋδραυλικό αυτό κομμάτι της μεθόδου παρουσιάζεται, αναλυτικά, στην ενότητα 4.1. Στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιαστούν όλες οι δευτερεύουσες, πλην απαραίτητες, εργασίες που συνοδεύουν την εφαρμογή της μεθόδου, από την εξοικείωση με τη γεωλογία του κοιτάσματος έως την παραγωγή του φυσικού αερίου. Επίσης, στην τελευταία ενότητα του κεφαλαίου γίνεται μία αναφορά στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που σχετίζονται με τη μέθοδο της υδραυλικής διάρρηξης. Με το κεφάλαιο αυτό στοχεύουμε, πρώτον, στην εισαγωγή του ενδιαφερόμενου μηχανικού στη λογική της υδραυλικής διάρρηξης και, δεύτερον, στην ανάδειξη της αλληλοεξάρτησής της με τις διεργασίες, που τη συνοδεύουν. Στη συνέχεια, παρατίθεται ένας συγκεντρωτικός πίνακας (Πίνακας 2-1) των επιμέρους διεργασιών της εξόρυξης αερίου, με χρονολογική σειρά από αριστερά προς τα δεξιά.

Πίνακας 2-1: Διεργασίες που σχετίζονται με την υδραυλική διάρρηξη, με χρονολογική σειρά εφαρμογής από τα αριστερά προς τα δεξιά

Γεωλογική μελέτη και σχεδιασμός	Κατασκευή γεώτρησης	Υδραυλική διάρρηξη	Αναρροή υγρών	Παραγωγή αερίου
<ul style="list-style-type: none">• Δειγματοληψία• Επιτόπου δοκιμές• Καθορισμός παραμέτρων διάρρηξης• Προετοιμασία εργοταξίου	<ul style="list-style-type: none">• Διάνοιξη γεώτρησης• Σωλήνωση/Σκυροδέτηση	<ul style="list-style-type: none">• Εγκατάσταση εξοπλισμού διάρρηξης• Εφαρμογή υδραυλικής διάρρηξης (Ενότητα 4.2)	<ul style="list-style-type: none">• Αποθήκευση• Επεξεργασία• Ανακύκλωση• Διάθεση των λυμάτων	<ul style="list-style-type: none">• Ανάκτηση• Διαχωρισμός• Αποθήκευση

2.1 Γεωλογική μελέτη και σχεδιασμός

Η μελέτη ξεκινά από την εξοικείωση των μηχανικών με τη γεωλογία του κοιτάσματος. Οι επιτόπου δοκιμές και οι αναλύσεις δειγμάτων, από το βάθος εξόρυξης, επιτρέπουν την αξιολόγηση της διαθέσιμης ποσότητας αερίου, αλλά και τον προσδιορισμό του πορώδους, της διαπερατότητας και άλλων σημαντικών ιδιοτήτων του πετρώματος. Με αυτές τις μετρήσεις, μπορούν, ακόμα, να αποφευχθούν σημεία όπου απουσιάζει το φυσικό αέριο ή

παρατηρείται επαφή με υπάρχον ρήγμα. Επιπρόσθετα, σε μία αναφορά του US DoE (2009) επισημαίνεται η αυξανόμενη χαρτογράφηση της ετερογένειας των κοιτασμάτων, συνδυάζοντας τις μετρήσεις αυτές με επιφανειακές μεθόδους ανάλυσης των μικροσεισμικών δονήσεων, κατά τη διάρκεια της υδραυλικής διάρρηξης. Ειδικότερα, με βάση τις καταγραφές αυτές προσαρμόζονται διάφορες παράμετροι της υδραυλικής διάρρηξης στον εκάστοτε σχηματισμό, όπως το εύρος των πιέσεων του υγρού διάρρηξης, το βέλτιστο διάστημα του σχηματισμού προς ρωγμάτωση και η σύσταση των υλικών που θα χρησιμοποιηθούν (αναλυτικότερα επί των παραμέτρων στην ενότητα 4.1).

Ο σχεδιασμός μίας εφαρμογής της υδραυλικής διάρρηξης βασίζεται, σχεδόν αποκλειστικά, στη γεωλογική μελέτη του εκάστοτε κοιτάσματος, η οποία έχει προηγηθεί. Με βάση αυτή, όπως παρουσιάστηκε παραπάνω, προκύπτουν 1) η πίεση και το είδος του υγρού διάρρηξης, 2) η συχνότητα και η γεωμετρία των ρωγμών και 3) το είδος του υλικού συγκράτησης (ειδικότερα στην ενότητα 4.1). Πρόκειται για μία λεπτομερή διαδικασία, η οποία τροφοδοτείται, συνεχώς, με στοιχεία για την εξέλιξη της ρωγμάτωσης από επιφανειακούς και υπόγειους αισθητήρες. Το τελικό αποτέλεσμα της υδραυλικής διάρρηξης έχει διαφορετική μορφή ανάλογα με τα διαθέσιμα μέσα παραγωγής και το είδος του κοιτάσματος, δύο παράγοντες που αποτελούν πολύτιμα στοιχεία εισόδου στο σχεδιασμό της (US DoE, 2009). Επιπρόσθετα, σημαντικό στάδιο της εξόρυξης αερίου, με τη βοήθεια της υδραυλικής διάρρηξης, αποτελεί η τήρηση των κανόνων ασφαλείας καθ' όλη την περίοδο από την προετοιμασία του εργοταξίου έως και το τέλος της παραγωγής αερίου. Έτσι, παρά το γεγονός ότι η κατασκευή φρεατίων για τα υγρά λύματα ή η αποθήκευση των παραπροϊόντων της εξόρυξης δεν αποτελούν κομμάτια της διαδικασίας της υδραυλικής διάρρηξης, σχετίζονται έμμεσα με αυτήν και, συχνά μάλιστα, ενέχονται για μεγάλο μέρος των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της (ενότητα 2.6 και πιο αναλυτικά στο Κεφάλαιο 6).

2.2 Κατασκευή γεώτρησης

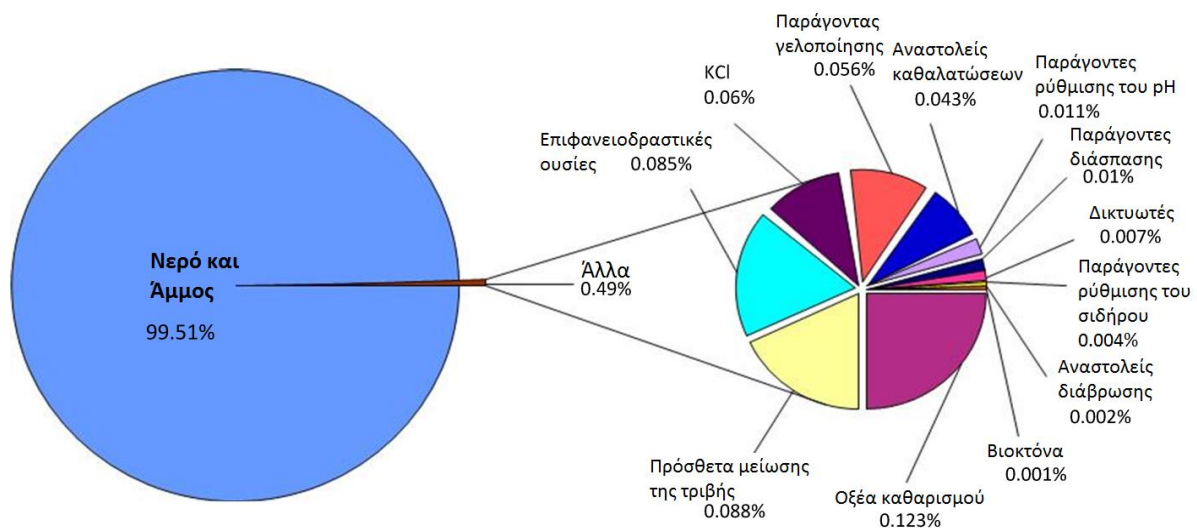
Η κατασκευή της γεώτρησης αποτελεί μία αρκετά αυτοματοποιημένη διαδικασία, η οποία περιέχει την τμηματική διάνοιξή της, με παρεμβολή των απαραίτητων σταδίων επένδυσης. Η διαδικασία ξεκινά από την εγκατάσταση της πλατφόρμας γεώτρησης, η οποία, σύμφωνα με τον Parshall (2008), υποστηρίζει πολλαπλές οριζόντιες γεωτρήσεις (6 έως 8) από μία μόνο κάθετη, ενώ συμβάλλει, ταυτόχρονα, στη συρρίκνωση της εργοταξιακής έκτασης και, άρα, των απαιτούμενων μέσων παραγωγής. Στη συνέχεια, διανοίγεται μια κάθετη γεώτρηση, έως ότου φτάσει στο κοίτασμα, με σταδιακή τοποθέτηση σωληνώσεως και ακόλουθη σκυροδέτηση. Συγκεκριμένα, η σωστή εφαρμογή της επένδυσης θεωρείται στάδιο ιδιαίτερης βαρύτητας για την απρόσκοπτη λειτουργία του έργου σε βάθος χρόνου. Κατά τον Hyne (2012), η σωλήνωση αποσκοπεί στον αποκλεισμό οποιασδήποτε ανεπιθύμητης αλληλεπίδρασης των επικείμενων διεργασιών της γεώτρησης με τους υπόγειους υδροφορείς, ενώ σύμφωνα με τον Renpu (2011), η σκυροδέτηση στοχεύει 1) στην προστασία του κελύφους από διάβρωση, 2) στη σταθεροποίηση της κατασκευής και 3) στην αποτροπή της διαφυγής υγρών κατά μήκος της γεώτρησης. Σε επόμενο στάδιο, ολοκληρώνεται και το οριζόντιο τμήμα, με τη βοήθεια μιας καθοδηγητικής κεφαλής, που στρίβει ελεγχόμενα το γεωτρήσιμο, το οποίο, τελικά, αντικαθίσταται από μια κεφαλή για τις ανάγκες της επικείμενης υδραυλικής διάρρηξης. Συμπληρωματικά, ο Hyne (2012) αναφέρει ότι δύναται να παραλειφθεί η επένδυση στο οριζόντιο τμήμα της γεώτρησης, μία τεχνική, όμως, που εγκαταλείπεται προς χάριν 1) της περιβαλλοντικής πρόνοιας (Κεφάλαιο 6), 2) της τμηματικής

εφαρμογής της διάρρηξης ανά διαστήματα (ενότητα 4.1) και 3) της ακριβέστερης ρωγμάτωσης με τη χρήση περιμετρικών διατρήσεων της επένδυσης (επίσης ενότητα 4.1).

2.3 Υδραυλική διάρρηξη

Πρόκειται για μια επαναληπτική διαδικασία ρωγμάτωσης των κοιτασμάτων, με στόχο την αύξηση της υδραυλικής αγωγιμότητάς τους (αντικείμενο της διερεύνησης στο 0) και την επακόλουθη διευκόλυνση της ροής φυσικού αερίου προς την επιφάνεια. Η αναλυτική περιγραφή του μηχανικού υδραυλικού φαινομένου της, καθώς και η μελέτη των μεγεθών που σχετίζονται με αυτήν δίνονται στις ενότητες 4.1 και 4.2, αντίστοιχα. Παρακάτω, παρατίθενται τα βασικά σημεία της εφαρμογής της μεθόδου.

Η υδραυλική διάρρηξη πραγματοποιείται, τμηματικά, σε μικρότερα κομμάτια της οριζόντιας γεώτρησης με μεγάλη εισπίεση (25 έως 80 Mpa) (Salehi and Ciezobka (2013); Abou-Sayed et al. (2011)) ανάλογα με το υφιστάμενο τασικό πεδίο, ενός μίγματος νερού, άμμου και κάποιων χημικών προσθέτων. Συγκεκριμένα, το υγρό λειτουργεί ως μέσο 1) ρωγμάτωσης του πετρώματος και 2) μεταφοράς της άμμου, η οποία χρησιμεύει στη διατήρηση των ανοιχτών ρωγμών μετά την αποτόνωση της πίεσης, για την επικείμενη ροή του αερίου προς τη γεώτρηση. Στα πρόσθετα εντοπίζονται, μεταξύ άλλων, υγρό μείωσης των τριβών, βιοκτόνα, αναστολείς διάβρωσης και ιξωδοαυξητικά, με συνολικό όγκο έως το 2% του υγρού εισπίεσης, τα οποία εμφανίζονται στο Σχήμα 2-1. Η εμβάθυνση στις λειτουργίες των χημικών προσθέτων για την διερεύνηση των επιπτώσεων ρύπανσης του υπογείου νερού από τη διαρροή τέτοιων υγρών αποτελεί αντικείμενο του Κεφαλαίου Κεφάλαιο 6, ενώ στο Παράρτημα Α παρατίθεται ένας συγκεντρωτικός πίνακας με τις κατηγορίες των χημικών προσθέτων ανάλογα με το σκοπό χρήσης τους.



Σχήμα 2-1: Παράδειγμα σύστασης ενός υγρού διάρρηξης με ποσόστωση, από δεδομένα εφαρμογών της υδραυλικής διάρρηξης στο σχιστολιθικό κοιτάσμα Fayetteville (US DoE, 2009)

2.4 Αναρροή υγρών

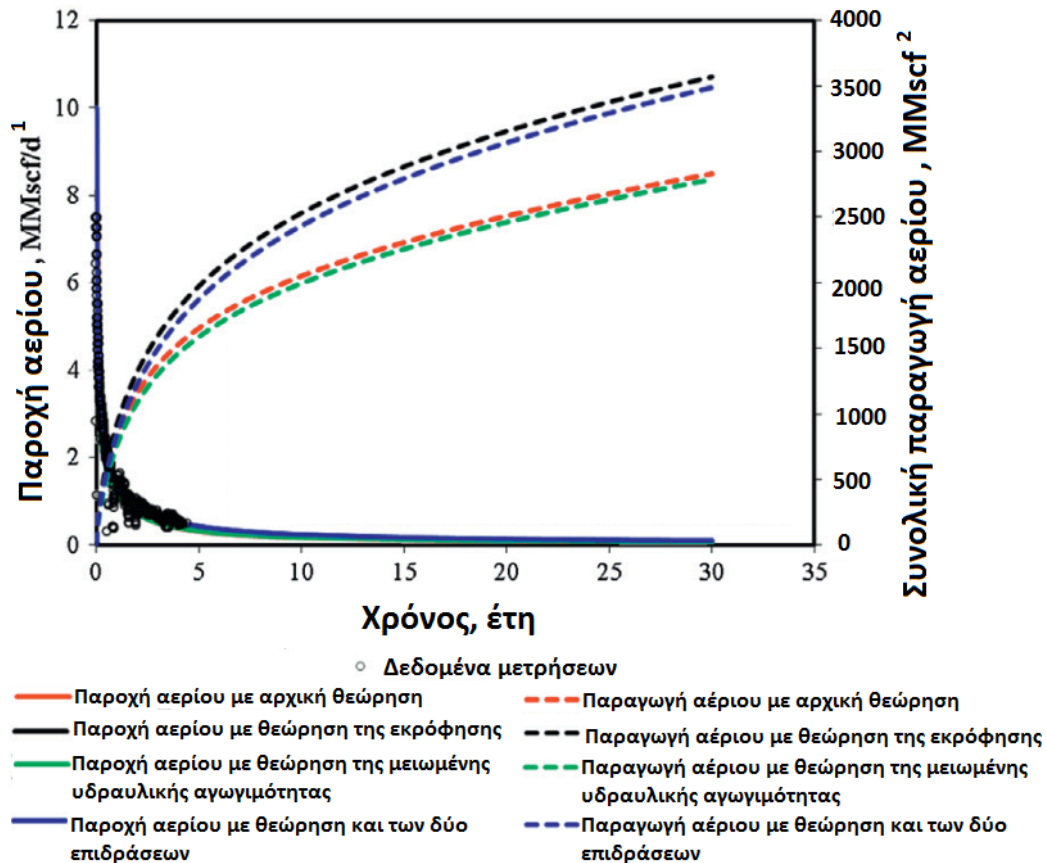
Μετά την ολοκλήρωση της υδραυλικής διάρρηξης και την ελάττωση της πίεσης στο εσωτερικό της γεώτρησης, παρατηρείται η αντιστροφή της ροής και η αναρροή υγρών από τη γεώτρηση προς την επιφάνεια. Ειδικότερα, τα υγρά αυτά αποτελούνται τόσο από μέρος των υγρών διάρρηξης, όσο και από υγρά του ίδιου του σχηματισμού. Ο όγκος του αναρρέοντος υγρού εξαρτάται από ποικίλους παράγοντες, όπως το εντατικό πεδίο, ο υδατικός κορεσμός και το αργιλικό ποσοστό του σχηματισμού, αλλά και τη διαρροή υγρών προς τα γειτονικά στρώματα. Σύμφωνα με έρευνα του NYS DEC (2015), συχνά, παρατηρείται όγκος υγρών αναρροής από 30% έως 70% του όγκου εισπίεσης, ενώ οι Nicot et al. (2014) υποστηρίζουν ότι δύναται να ξεπεράσει το 100% σε περίπτωση υδατικώς κορεσμένου σχηματισμού υπό μεγάλες εδαφικές πιέσεις, όπως στο σχιστολιθικό κοιτάσμα Barnett. Σημειωτέον ότι η ποσότητα του υγρού αναρροής μειώνεται με το πέρασμα του χρόνου, όμως συνεχίζεται καθ' όλη τη διάρκεια παραγωγής του φυσικού αερίου (Barbott et al., 2013). Οι διεργασίες που συνδέονται με αυτή τη φάση του έργου περιλαμβάνουν την αποθήκευση, την επεξεργασία και την ανακύκλωση των υγρών, όπως και την, τελική, διάθεση των λυμάτων. Σύμφωνα με την US EPA (2015b), ορισμένες από τις μεγαλύτερες αναφορές ρύπανσης προέρχονται από ατυχήματα κατά την τέλεση των διεργασιών αυτών σε έργα εξόρυξης αερίου με τη βοήθεια της υδραυλικής διάρρηξης (περισσότερα περί της ρύπανσης στην ενότητα 6.1).

2.5 Παραγωγή αερίου

Η παραγωγή φυσικού αερίου από τα μη συμβατικά κοιτάσματα καθίσταται δυνατή μέσω του πρόσφατα διαμορφωμένου δικτύου ρωγμών, που οφείλεται στην υδραυλική διάρρηξη. Το αέριο εντοπίζεται είτε ελεύθερο στους πόρους και τις ρωγμές του πετρώματος, είτε ροφημένο στην επιφάνεια των κόκκων του (περισσότερα για το αέριο στον αργιλικό σχιστόλιθο και τον ψαμμίτη στις ενότητες 3.1 και 3.2 αντίστοιχα). Ειδικότερα, η διπλή αυτή κατάσταση του αερίου ευθύνεται για την μη γραμμική εξέλιξη του παροχής του, η οποία αποτυπώνεται στο Σχήμα 2-2 και επεξηγείται στη συνέχεια. Αρχικά, και λόγω του ελεύθερου αερίου, παράγεται μία μεγάλη ποσότητα κατά τις πρώτες μέρες. Στη συνέχεια, όμως, σημειώνεται μία ραγδαία ύφεση του ρυθμού παραγωγής. Αυτή, οφείλεται στην εξάντληση του ελεύθερου κλάσματος και τη σταδιακή μετάβαση προς μία περίοδο βραδύτερης παραγωγής αερίου, τροφοδοτούμενη από την εκρόφηση του κλάσματος του ροφημένου αερίου.

Το κλειδί στην εκμετάλλευση αερίου από μη συμβατικά κοιτάσματα βρίσκεται στη ροφημένη, αυτή, ποσότητα. Ο συνυπολογισμός της ευθύνεται για την αύξηση του παραγόμενου αερίου από σχιστολιθικά κοιτάσματα, ενώ, παράλληλα, τροφοδοτεί την παραγωγή αερίου για το μεγαλύτερο μέρος της ζωής της γεώτρησης, η οποία, μάλιστα, δύναται να φτάσει έως και τα 30 χρόνια. Μαζί με την θετική επίδραση του μηχανισμού εκρόφησης, οι Yu and Sepehrnoori (2014) διερεύνησαν και την αρνητική επίδραση των γεωτεχνικών παραγόντων στην υδραυλική αγωγιμότητα, η οποία επηρεάζει σημαντικά την παραγωγή αερίου από μη συμβατικά κοιτάσματα. Ειδικότερα, από αναλύσεις τους σε δύο διαφορετικά σχιστολιθικά κοιτάσματα προκύπτει ότι τα αυξημένα εντατικά φορτία (αναλυτικά τα μεγέθη αυτά στις ενότητες 4.2.6 και 4.2.9) σε συνδυασμό με χαμηλότερο μέτρο ελαστικότητας του πετρώματος, οδηγούν σε αξιόλογη μείωση της υδραυλικής αγωγιμότητας

του σχηματισμού, μετά την εφαρμογή της υδραυλικής διάρρηξης. Η αρνητική επίδραση της μειωμένης υδραυλικής αγωγιμότητας αντισταθμίζεται από την θετική θεώρηση του μηχανισμού της εκρόφησης, όπως υποστηρίζεται στο εν λόγω άρθρο (Yu and Sepehrnoori, 2014), καταλήγοντας σε μία αύξηση 18.9% του συνολικού παραγόμενου αερίου σε σχέση με την αρχική θεώρηση. Η διαγραμματική απεικόνιση της επίδρασης των παραπάνω μηχανισμών (ξεχωριστά και συνολικά) τόσο στην παροχή (MMscf/d¹), όσο και τη συνολική παραγωγή αερίου (MMscf²) φαίνεται στο Σχήμα 2-2, το οποίο αντιστοιχεί στην ανάλυση μίας γεώτρησης εξόρυξης αερίου του κοιτάσματος Barnett.



Σχήμα 2-2: Καμπύλες παροχής (MMscf/d) και συνολικής παραγωγής αερίου (διακεκομμένες), για περίοδο παραγωγής 30 ετών, γεώτρησης εξόρυξης αερίου στο κοιτάσμα Barnett (Yu and Sepehrnoori, 2014)

¹ MMscf/d (Million Metric standard cubic feet per day) = (Εκατομμύρια κυβικά πόδια ανά ημέρα). 1 MMscf/d ισούται με 1177.17 m³/h ή 0.327 m³/s

² MMscf: 1 MMscf ισούται με 28316,85 m³

2.6 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις της υδραυλικής διάρρηξης

Η αναμφισβήτητη συμβολή της υδραυλικής διάρρηξης στην προσπάθεια εκμετάλλευσης αερίου από μη συμβατικά κοιτάσματα, αλλά και ο εντοπισμός τέτοιων κοιτασμάτων παγκοσμίως (US IEA, 2013), επιτάσσουν την, εις βάθος, διερεύνηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της εφαρμογής της. Οι επιπτώσεις αυτές, όπως εντοπίζουμε, συνδέονται κυρίως με την ατμοσφαιρική ρύπανση, τη ραδιενεργή ακτινοβολία και τη ρύπανση των υπόγειων υδροφορέων.

Εκπομπές αερίων, επιβλαβών στην ατμόσφαιρα και την ανθρώπινη υγεία, εκλύονται καθ' όλες τις φάσεις λειτουργίας μιας γεώτρησης εξόρυξης ορυκτών καυσίμων. Ταυτόχρονα, ανεξέλεγκτες εκπομπές φυσικού αερίου, το οποίο έχει περιεκτικότητα 90% σε μεθάνιο, σημειώνονται σε δύο φάσεις, σύμφωνα με έρευνα της NYSDEC, (2015). Αρχικά, όσο κατασκευάζεται το έργο, μέσω αντλιών, βαλβίδων, συμπιεστών, κ.α., και έπειτα, κατά την διάρκεια παραγωγής, μέσω της εξάτμισης του υγρού αναρροής από τα φρέατα συλλογής και της μεταφοράς του αερίου, με αγωγούς, σε μεγάλη απόσταση. Μάλιστα, σύμφωνα με τους Howarth et al. (2010), ο χαμένος όγκος μεθανίου, το οποίο θεωρείται αέριο του θερμοκηπίου, εκτιμάται σε 3.6 έως 7.9 % επί του συνολικώς παραγόμενου. Το γεγονός αυτό έχει σοβαρό αντίκτυπο στο ανθρακικό αποτύπωμα (Greenhouse-gas footprint) της εξόρυξης φυσικού αερίου με τη βοήθεια της υδραυλικής διάρρηξης. Πληροφοριακά, αναφέρεται ότι οι Howarth et al. (2010) υπολόγισαν το ανθρακικό αποτύπωμα της εκμετάλλευσης μη συμβατικών κοιτασμάτων έως και 49% μικρότερο εκείνης του γαιάνθρακα, αλλά τουλάχιστον 20% μεγαλύτερο από τη συμβατική εξόρυξη του φυσικού αερίου.

Η εκμετάλλευση αερίου με τη βοήθεια της υδραυλικής διάρρηξης μπορεί, επίσης, να συνδεθεί με τη ραδιενεργό ρύπανση του περιβάλλοντος. Ειδικότερα, στο περιβάλλον ιζηματογένεσης των ψαμμιτών και των αργιλικών σχιστόλιθων εντοπίζονται, σε μόνιμη βάση, φυσικά υπάρχουσες ραδιενεργές ουσίες (Naturally Occurring Radioactive Material), οι οποίες εγκλωβίζονται στο πέτρωμα κατά τη διαγένεσή του. Ουσίες, όπως το ουράνιο, το θόριο και το ράδιο παρασύρονται από το υγρό αναρροής μετά την υδραυλική διάρρηξη και οδηγούνται στην επιφάνεια. Έρευνα της US EPA (2015b) αναφέρει ότι οι αυξημένες συγκεντρώσεις ραδιενεργών ουσιών εντοπίζονται σε εγκαταστάσεις επεξεργασίας των υγρών αναρροής και σχετίζονται θετικά με τον αριθμό των Ολικά Διαλυμένων Στερεών (Total Dissolved Solids).

Τέλος, ιδιαίτερη βαρύτητα δίνεται στην περίπτωση της ρύπανσης των υπόγειων υδροφορέων, από διεργασίες που συνδέονται με την υδραυλική διάρρηξη. Όπως είπαμε και στην αρχή του κεφαλαίου, η μέθοδος αυτή δεν περιορίζεται μόνο στη ρωγμάτωση του πετρώματος στο βάθος εξόρυξης, αλλά περιλαμβάνει όλες τις απαραίτητες δραστηριότητες για την αποτελεσματική εφαρμογή της (Πίνακας 2-1). Μελετώντας την έρευνα της US EPA (2015b) για τις επιπτώσεις της εξόρυξης ορυκτών πόρων με τη βοήθεια της υδραυλικής διάρρηξης, γίνεται αντιληπτός ο πολύπλευρος χαρακτήρας της ρύπανσης αυτής. Ειδικότερα, εντοπίζονται ποικίλοι δίοδοι μεταφοράς των ρύπων προς το υπόγειο νερό, μέσω των δραστηριοτήτων που παρατέθηκαν νωρίτερα στο κεφάλαιο, όπως και ένας απροσδιόριστος αριθμός πιθανών ρύπων, προερχόμενων από τα υγρά της υδραυλικής διάρρηξης ή και τα προϊόντα της εξόρυξης. Η διερεύνηση των επιπτώσεων αυτών και η εμβάθυνση στα χημικά πρόσθετα, τα οποία ρυθμίζουν το ιξώδες του υγρού διάρρηξης και αποτελούν σημαντική παράμετρο της ανάλυσης της αύξησης της υδραυλικής αγωγιμότητας των σχηματισμών (ενότητα 4.2.4), θα συμπεριληφθούν σε ένα ξεχωριστό κεφάλαιο (Κεφάλαιο 6).

Κεφάλαιο 3 Κοιτάσματα μη συμβατικών ορυκτών καυσίμων

Η έννοια των μη συμβατικών κοιτασμάτων προέκυψε από την ανάγκη διαχωρισμού τους από τα, μέχρι πρότινος, συνηθισμένα κοιτάσματα που απασχολούσαν τη βιομηχανία εξόρυξης. Αντιθέτως, λοιπόν, από τα συμβατικά, τα οποία δεν απαιτούν καμία περαιτέρω ενέργεια πέραν της γεώτρησης για την παραγωγή ορυκτών πόρων, τα μη συμβατικά κοιτάσματα στηρίζονται στην εφαρμογή της υδραυλικής διάρρηξης. Τέτοια είναι και ο αργιλικός σχιστόλιθος και ορισμένα είδη ψαμμίτη, τα οποία θα διερευνηθούν στη συνέχεια του κεφαλαίου, όπως και κάποιοι ανθρακικοί σχηματισμοί. Τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τους, που διαχωρίζουν αυτή τη νέα κατηγορία σε σχέση πάντα με την υφιστάμενη, είναι οι χαμηλές τιμές διαπερατότητας, πορώδους και ρυθμού παραγωγής υδρογονανθράκων. Τα τεράστια αποθέματα ορυκτών πόρων που εντοπίζονται σε αυτά τα κοιτάσματα (US IEA, 2013), σε συνδυασμό με την εξέλιξη της υδραυλικής διάρρηξης που επιτρέπει την εκμετάλλευσή τους, έχουν ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη εκτενούς επιστημονικής βιβλιογραφίας, σχετικά με τη γεωλογία, την πετροφυσική, τη διαγένεση και την ωρίμανση των σχηματισμών αυτών. Στη συνέχεια, παρατίθεται μία σύνοψη από τη μελέτη της υπάρχουσας βιβλιογραφίας αναφορικά με τα κοιτάσματα, ιδιαίτερα του αργιλικού σχιστόλιθου και του ψαμμίτη. Επίσης, στο τέλος του κεφαλαίου γίνεται μία προσπάθεια αξιολόγησης-σύγκρισης των σχηματισμών αυτών, με βάση την ευκολία της ρωγμάτωσής τους, η οποία διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στις εφαρμογές της υδραυλικής διάρρηξης (Guo, 2015).

3.1 Αργιλικός σχιστόλιθος και φυσικό αέριο

Ο αργιλικός σχιστόλιθος είναι ένας ιζηματογενής σχηματισμός, ο οποίος δημιουργήθηκε από την απόθεση αργιλικών και άλλων υλικών και τη στερεοποίησή τους υπό το βάρος των υπερκείμενων στρωμάτων. Η κατακάθιση των αργιλικών πλακιδίων σχημάτισε λεπτές οριζόντιες στρωματώσεις, εγκλωβίζοντας, ταυτόχρονα, οργανικό υλικό. Η διαρκής συμπίεση σε μεγαλύτερα βάθη προκάλεσε την απομάκρυνση του νερού των πόρων και τη διαγένεση, από το λασπώδες υλικό, ενός μαλακού βράχου χαμηλής διαπερατότητας με πυκνές στρωματώσεις. Οριζόντιες και κατακόρυφες τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας, συνήθως μικρότερες από $1 \cdot 10^{-9}$ m/s (Freeze and Cherry, 1979), είναι χαρακτηριστικές του τυπικού αργιλικού σχιστόλιθου, με αποτέλεσμα οποιοσδήποτε υδρογονάνθρακας παράγεται στο σχηματισμό να αδυνατεί να διαφύγει υπό φυσιολογικές συνθήκες, παρά μόνο σε βάθος γεωλογικών χρόνων (εκατομμύρια χρόνια). Το γεγονός πως ο αργιλικός σχιστόλιθος αποτελεί, ταυτόχρονα, μητρικό και αποθήκευτρο πέτρωμα (υγρών και αερίων), είναι η κύρια διαφορά του με τα συμβατικά κοιτάσματα (π.χ. ψαμμιτικά, ασβεστολιθικά), σύμφωνα με τον Andrews (2013), αλλά δεν εξασφαλίζει τη συσσώρευση του φυσικού αερίου.

3.1.1 Διαγένεση πετρώματος και οργανικό υλικό

Η διαδικασία σχηματισμού του σχιστολιθικού αερίου συνοψίζεται σε 3 στάδια, στα οποία αντιστοιχούν ολοένα αυξανόμενα βάθη ενταφιασμού και μεγαλύτερες θερμοκρασίες. Απαραίτητη προϋπόθεση, πρώτα απ' όλα, θεωρείται η διατήρηση της οργανικής ύλης σε

περιβάλλοντα όπου δεν μπορεί να αποδομηθεί από μικροοργανισμούς. Το πρώτο στάδιο, της Διαγένεσης, εμφανίζεται στα πρώτα 1,000 μέτρα ενταφιασμού και χαρακτηρίζεται από την μεταμόρφωση της οργανικής ύλης, είτε σε βιογενές μεθάνιο υπό αναερόβιες συνθήκες, είτε σε, ώριμο για παραγωγή υδρογονανθράκων, κηρογενές³. Μάλιστα, σε αυτό το στάδιο οι Boyer et al. (2006) κάνουν λόγο για παραγωγή μικρών σχετικά ποσοτήτων βιτουμένιου⁴ από το κηρογενές. Ακολουθεί το δεύτερο στάδιο της Καταγένεσης, σε βάθη έως και 2,000 μέτρα, όπου το κηρογενές αυτό διασπάται και μετατρέπεται σε υδρογονάνθρακες με ολοένα μικρότερα μοριακά βάρη. Κατά κανόνα, το φυσικό αέριο προέρχεται από κηρογενές τύπου 3, καθώς και από πυρόλυση βαρύτερων υδρογονανθράκων, όπως το πετρέλαιο. Το τελευταίο στάδιο, της Μεταγένεσης, αντιστοιχεί σε ακόμη μεγαλύτερα βάθη και, άρα, μεγαλύτερες θερμοκρασίες και σηματοδοτεί την τελική μεταμόρφωση του κηρογενούς σε θερμογενές μεθάνιο, το οποίο αντιστοιχεί σε περίπου 90% του σχιστολιθικού αερίου (Vandenbroucke and Largeau, 2006). Οι Boyer et al. (2006), επίσης, παρατήρησαν ότι η πλούσια περιεκτικότητα του κηρογενούς σε υδρογόνο οδηγεί σε παραγωγή πετρελαίου και, αντίστοιχα η φτωχή οδηγεί σε παραγωγή σχιστολιθικού αερίου, ενώ η φυσική εξάλειψη του αποθέματος υδρογόνου προκαλεί παύση της παραγωγής καυσίμου, ανεξαρτήτως του διαθέσιμου άνθρακα, ο οποίος, τελικά, μεταμορφώνεται σε γραφίτη.

3.1.2 Παραγωγή φυσικού αερίου

Το παραγόμενο, βιογενές ή θερμογενές, αέριο αποθηκεύεται στο εσωτερικό του σχιστόλιθου, είτε ως ελεύθερο στις φυσικές ρωγμές και τους πόρους του, είτε ως προσροφημένο στην επιφάνεια του κηρογενούς και των αργιλικών πλακιδίων. Παρ' όλο που το ελεύθερο αέριο είναι αυτό που εξάγεται πρώτο από μία γεώτρηση, ένα σημαντικό ποσοστό αερίου προκύπτει από την εκρόφηση σε βάθος χρόνου, υποστηρίζουν οι Yu and Serehrnoori (2013). Διαφαίνεται, λοιπόν, η σημασία του μηχανισμού της προσρόφησης του αερίου στην ικανότητα αποθήκευσης του σχιστόλιθου. Με ειδικές αναλύσεις δειγμάτων εδαφικού υλικού, μπορούν να υπολογιστούν τόσο η ποσότητα του ελεύθερου και του συνολικού περιεχόμενου σχιστολιθικού αερίου, όσο και η ισόθερμη καμπύλη προσρόφησης Langmuir, η οποία περιγράφει την ισορροπία μεταξύ ελεύθερου και προσροφημένου μεθανίου σε σταθερή θερμοκρασία (Yu and Serehrnoori, 2013). Εμπειρικά, οι Boyer et al. (2006) προβαίνουν σε πλήθος αναλύσεων για διάφορους σχηματισμούς (

Πίνακας 3-1) καταλήγουν ότι, ώριμοι προς εξόρυξη σχηματισμοί περιέχουν περισσότερο ελεύθερο σχιστολιθικό αέριο, με το ποσοστό του προσροφημένου να κυμαίνεται σε 10% με 50% του συνολικού, ενώ στους ανώριμους παρατηρείται το αντίθετο φαινόμενο. Μάλιστα, τα φαινόμενα αυτά επαληθεύονται από την ίδια τη διαδικασία σχηματισμού του αερίου που

³Κηρογενές (Kerogen): Προκύπτει από το κερί + γένεση και χρησιμοποιήθηκε, αρχικά, για να περιγράψει την αδιάλυτη οργανική ουσία που εντοπίστηκε στους αργιλικούς σχιστόλιθους της Σκωτίας. Τελικά, κατέληξε να αντιπροσωπεύει όλες τις στερεές αδιάλυτες οργανικές ουσίες που βρίσκονται σε ιζηματογενή πετρώματα, τα οποία αποτελούν πηγές υδρογονανθράκων, και χωρίζεται σε 3 τύπους, ανάλογα με το κλάσμα H/C, το οποίο ανά τύπο μειώνεται. Τα κηρογενή τύπου I (H/C >1.5) και II (H/C περίπου 1.3) προέρχονται από λιμναία και θαλάσσια περιβάλλοντα, αντίστοιχα, και μετατρέπονται σε πετρέλαιο και πιθανότατα σε αέριο, αναλόγως της ωρίμανσής τους. Τύπου III (H/C περίπου 0.8) κηρογενές εντοπίζεται σε αποθέσεις, στο θαλάσσιο περιβάλλον, χερσαίων φυτών και αποδίδει αέριο πλούσιο σε μεθάνιο (Vandenbroucke and Largeau, 2006).

⁴ Το βιτουμένιο (bitumen) είναι το ποσοστό του εύφλεκτου οργανικού υλικού, το οποίο είναι διαλυτό από οργανικούς διαλύτες. Περιλαμβάνει υδρογονάνθρακες όπως το ορυκτό κερί και την άσφαλτο (Boyer, 2006).

αναλύθηκε νωρίτερα. Η μεγάλη, αρχικά, μάζα της οργανικής ύλης και, άρα, του κηρογενούς προσφέρεται για την προσρόφηση του παραγόμενου αερίου. Καθώς, όμως, αυτή η μάζα μειώνεται και οι επιφάνειες προσρόφησης έχουν κορεσθεί, αυξάνεται το ελεύθερο αέριο στους πόρους τού σχηματισμού. Παρά τη γραμμική συσχέτιση του συνολικού οργανικού κλάσματος και της ποσότητας του κηρογενούς, τα δύο αυτά μεγέθη δεν περιγράφουν την ίδια ουσία, καθώς το κηρογενές, εκτός από άνθρακα (περίπου 85% κατά βάρος), αποτελείται και από υδρογόνο, οξυγόνο, άζωτο και θείο. Από την άλλη, ο Jarvie (2012) κρίνει ότι το συνολικό οργανικό κλάσμα αποτελείται τόσο από τον άνθρακα του κηρογενούς, όσο και από εκείνο του υπάρχοντος πετρελαίου και βιτουμένιου, αλλά και εκείνο που αντιστοιχεί στην οργανική ύλη, αδύνατη να αποδώσει υδρογονάνθρακες. Τέλος, ο Jarvie (2012) υπογραμμίζει ότι το κλάσμα αυτό χρησιμοποιείται, εδώ, για να εκφράσει την δυναμικότητα ενός σχιστολιθικού σχηματισμού ως προς την παραγωγή αερίου, σε συνδυασμό με τις συνθήκες ωρίμανσης (θερμοκρασία, πίεση) και το περιεχόμενο υδρογόνο.

3.1.3 Χαρακτηριστικά ενός ποιοτικού σχιστολιθικού κοιτάσματος

Ο

Πίνακας 3-1 συνοψίζει τα χαρακτηριστικά ενός ποιοτικού σχηματισμού προς εκμετάλλευση, μαζί με στοιχεία που συγκέντρωσε ο Jarvie (2012) από γνωστούς σχιστολιθικούς σχηματισμούς της Αμερικής. Η επιτυχία των σχιστολιθικών πηγών αποδίδεται, σε πρώτη φάση, στην περιορισμένη διαπερατότητά τους και στη μικρή τιμή του πορώδους (<15 (Jarvie, 2012)), που αποτρέπουν την ολική διαφυγή των υδρογονανθράκων από το σχηματισμό. Στο πορώδες περιλαμβάνεται τόσο το φυσικό πορώδες, όσο και το οργανικό πορώδες που δημιουργείται από την αποδόμηση του κηρογενούς. Επίσης, τιμές μεγαλύτερες της μονάδας για το συνολικό οργανικό κλάσμα δείχνουν ικανή παραγωγή αερίου. Προφανώς, όσο αυξάνεται το ποσοστό, αυξάνει και η ικανότητα αυτή, μαζί με την δυνατότητα αποθήκευσης του αερίου στο κηρογενές και το οργανικό πορώδες. Από την άλλη πλευρά, υπερβολικά μεγάλο συνολικό οργανικό κλάσμα (>15%), οι Boyer et al. (2006) θεωρούν ότι μπορεί να καταλαμβάνει πόρους απαραίτητους για την αποθήκευση του παραγόμενου αερίου. Η ανόργανη σύσταση του πετρώματος καθορίζει, σε μεγάλο βαθμό, την απόκριση του συστήματος στις διαδικασίες ρωγμάτωσης για την παραγωγή των υδρογονανθράκων. Μεγάλο πυριτικό κλάσμα αυξάνει την ψαθυρότητα και συντελεί στην διάδοση των ρωγμών στο σχηματισμό, ενώ αυξημένο αργιλικό κλάσμα τού προσδίδει πλαστιμότητα και δυσχεραίνει τη σωστή ρωγμάτωση. Το ζητούμενο μικρό κλάσμα πετρελαίου προκύπτει από την ευεργετική πυρόλυση του σε αέριο κατά την διαδικασία ωρίμανσης του κοιτάσματος. Τέλος, έχει αποδειχθεί ότι το μεγάλο ποσοστό υγρασίας επιδρά στην αποθήκευση και τη μεταφορά του αερίου στο σχηματισμό. Ειδικότερα, μέσω πειραμάτων οι Yuan et al. (2014) παρατήρησαν μείωση του προσροφημένου αερίου έως και

50%, λόγω της προσρόφησης νερού, ενώ, υπογράμμισαν, επίσης, ότι η πλήρωση των πόρων με νερό δυσκολεύει την μεταφορά του αερίου μέσα σε αυτούς.

Πίνακας 3-1: Βέλτιστο εύρος των χαρακτηριστικών ενός σχιστολιθικού σχηματισμού προς εκμετάλλευση και στοιχεία σχηματισμών των Η.Π.Α. (Jarvie, 2012)

Σχηματισμός	Πορώδες	Συνολικό οργανικό κλάσμα (% μάζας των στερεών)	Αργιλικό κλάσμα (% όγκου των στερεών κόκκων)	Πυριτικό κλάσμα (% όγκου των στερεών κόκκων)	Υγρασία (% όγκου των πόρων)	Πετρέλαιο (% όγκου των πόρων)	Ελεύθερο αέριο (%)	Προσοφημένο αέριο (%)
Βέλτιστο εύρος	4-7 [3] <15 [3] ⁵	1 [3] – 15 [2]	<35 [1]	>30 [3]	<45 [2]	<5 [3]	>50 [2]	10-50 [2]
Marcellus	6.2 (4.0–12.0)	4.01 (2.0–13.0)	35	37	43	1	55	45
Haynesville	8.3 (4.0-14.0)	3.01 (0.5– 4.0)	30	30	30	<1	75	25
Barnett	5.0 (4.0-6.0)	3.74 (3.0–12.0)	25	45	1.9	10	45	55
Eagle Ford	6.0-14.0	2.76 (2.0–8.5)	15	15	35	15	75	25
Montney	4.0-6.0	1.95 (0.2–11.0)	15	40	25	1	90	10

Πηγές: [1] (Andrews, 2013), [2] (Boyer et al., 2006), [3] (Jarvie, 2012)

3.2 Ψαμμίτης και φυσικό αέριο

Ο ψαμμίτης αποτελεί έναν από τους συνηθέστερους σχηματισμούς παραγωγής ορυκτών καυσίμων, παγκοσμίως. Πρόκειται για ιζηματογενές πέτρωμα, το οποίο ως συμβατικό κοιτάσμα αποτελεί μέσο αποθήκευσης των κινούμενων υδρογονανθράκων. Τις τελευταίες δεκαετίες, ολοένα και περισσότερο αέριο εντοπίζεται παγιδευμένο στο εσωτερικό ψαμμιτών χαμηλής υδραυλικής αγωγιμότητας, συνήθως μικρότερης από $1 \cdot 10^{-6}$ m/s (Freeze and Cherry, 1979). Η ειδοποιός διαφορά τους από τους συμβατικούς ψαμμίτες βρίσκεται στην εκτεταμένη συμπίεση του πετρώματος, λόγω ενταφιασμού. Οι σχηματισμοί αυτοί κατατάσσονται, μαζί με τον αργιλικό σχιστόλιθο και άλλους, στα μη συμβατικά κοιτάσματα που διαχωρίζονται λόγω των χαμηλών τιμών του πορώδους, της διαπερατότητας και του ρυθμού παραγωγής υδρογονανθράκων. Τα χαρακτηριστικά αυτά, καθιστούν αδύνατη την εξόρυξη των ορυκτών καυσίμων με τα παραδοσιακά μέσα της πετρελαιοβιομηχανίας και απαιτούν την εφαρμογή νέων μεθόδων, όπως η οριζόντια γεώτρηση και η υδραυλική διάρρηξη, για την ενίσχυση της παραγωγής. Μία επιπρόσθετη διαφοροποίηση τους από τα συμβατικά κοιτάσματα έγκειται στο γεγονός ότι βρίσκονται σε πολύ μικρή απόσταση ή εμπεριέχουν τα μητρικά πετρώματα των υδρογονανθράκων (συνήθως γαιάνθρακες) που τους διοχετεύουν συνεχώς φυσικό αέριο.

⁵ Τυπικά 4-7, αλλά όχι περισσότερο από 15 (Jarvie, 2012).

3.2.1 Διαγένεση πετρώματος

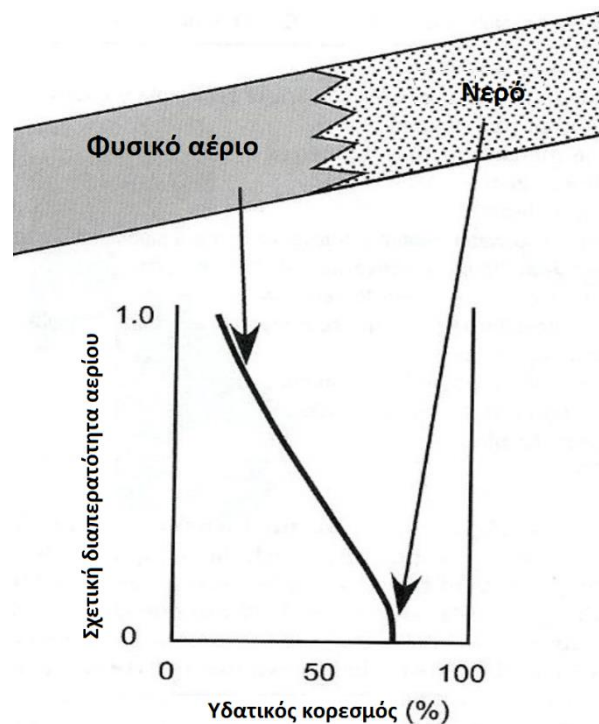
Η μόρφωση των ψαμμιτικών πετρωμάτων βασίζεται σε διάφορους μηχανισμούς διαγένεσης. Μεγάλο ρόλο στους ιζηματογενείς σχηματισμούς διαδραματίζει, φυσικά, το περιβάλλον ιζηματογένεσής τους. Οι τελικές ιδιότητές τους, συμπεριλαμβανομένης της διαπερατότητας και του πορώδους, αποτελούν ένα συνδυασμό των ιδιοτήτων κάθε επιμέρους ανόργανου κλάσματός τους. Η μόρφωση των ψαμμιτών ξεκινά, συνήθως, από αλλουβιακές αποθέσεις λεκανών και εκβολών ή από θαλάσσιες καθιζήσεις, όπου παρατηρείται λεπτόκοκκη άμμος, η οποία καθιζάνει διατηρώντας καλά δικτυωμένους πόρους και, άρα, υψηλή διαπερατότητα, σύμφωνα με τον Naik (2003). Το ίζημα αυτό, εκτός από άμμο, περιέχει και διάφορα άλλα ανόργανα συστατικά, όπως quartz, άστριους, άργιλο και θραύσματα βράχων. Ο ακόλουθος ενταφιασμός του αποτελεί, όπως είπαμε, το σημαντικότερο μηχανισμό διαγένεσης του πετρώματος. Αυτός προκαλεί, αρχικά, τη συμπίεση των ιζημάτων και τη μηχανική αναδιάταξη των κόκκων τους, με αποτέλεσμα την αξιόλογη μείωση του πορώδους κατά 30% έως 40%, σύμφωνα με τον Berg (1986). Στη συνέχεια, λαμβάνει χώρα η τιμνέντωση των κλασμάτων quartz και ασβεσίτη, η οποία μειώνει περαιτέρω το πορώδες. Σημειωτέον, ότι παρατηρούνται και φαινόμενα διαγένεσης, τα οποία οδηγούν σε μικρή αύξηση της τιμής του πορώδους, όπως η αποβολή του νερού από το διπλό στρώμα των αργιλικών πλακιδίων και η υδατική έκπλυση των τιμνεντώσεων και των αστρίων (Berg, 1986).

3.2.2 Είδη ψαμμιτικών κοιτασμάτων

Ανάλογα με το περιβάλλον ιζηματογένεσης, το βάθος ενταφιασμού και την υφιστάμενη διαγένεση παρατηρούνται διαφορετικά είδη ψαμμιτικών κοιτασμάτων. Ο Naik (2003) διαχωρίζει τα ρηχά ψαμμιτικά κοιτάσματα, που χωρίζονται σε 3 είδη και εντοπίζονται στα όρια των εδαφικών λεκανών, από τα βαθύτερα κοιτάσματα, τα οποία βρίσκονται, συνήθως, στο κεντρικό τμήμα τους. Πιο συγκεκριμένα, στην κατηγορία των ρηχών κατατάσσονται το είδος του ψαμμίτη βραχυχρόνιου βιογενούς αερίου που εμφανίζεται σε διαδοχικές στρωματώσεις με μητρικά πετρώματα και αποτελείται από αέριο πλούσιο σε μεθάνιο, όπως και το αντίστοιχο μακροχρόνιο. Ως τρίτο είδος θεωρείται το ψαμμιτικό πέτρωμα που περιέχει θερμογενές αέριο, το οποίο, παρ' όλ' αυτά, δεν βρίσκεται σε επαφή με κάποιο μητρικό πέτρωμα και το περιεχόμενο αέριο έχει ταξιδέψει από βαθύτερα στρώματα.

Το πιο διαδεδομένο είδος στην εκμετάλλευση των ορυκτών πόρων είναι ο ψαμμίτης βαθιάς εδαφικής λεκάνης, που αποτελεί υποσύνολο των κοιτασμάτων των εδαφικών λεκανών (Basin-centered gas systems). Τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του περιλαμβάνουν 1) τις μη φυσιολογικές πιέσεις, 2) τον κορεσμό σε φυσικό αέριο, 3) τη χαμηλή διαπερατότητα και 4) την απουσία υποκείμενου υδατικού στρώματος. Η πρώτη, ιστορικά, αναφορά του έγινε από τον Masters (1979), όταν εντοπίστηκαν ψαμμιτικοί σχηματισμοί, χαμηλών τιμών πορώδους και διαπερατότητας, σε βαθιά τμήματα εδαφικών λεκανών, με τα παραπάνω χαρακτηριστικά. Σε αντίθεση με τη συνηθισμένη στρωμάτωση των συμβατικών κοιτασμάτων, όπου παρατηρείται συγκέντρωση αέριων και υγρών ορυκτών καυσίμων πάνω από ένα στρώμα-φράγμα νερού, εδώ το υδροφόρο στρώμα βρίσκεται από πάνω (Σχήμα 3-1). Η μετάβαση από τη μία φάση στην άλλη, μάλιστα, υφίσταται σε μία μεταβατική ζώνη 8 km έως 16 km, η οποία από υδατικά κορεσμένη μετατρέπεται σε κορεσμένη από φυσικό αέριο, χωρίς κάποιο ευδιάκριτο σύνορο μεταξύ τους. Οι Jiang et al. (2015) θεωρούν ότι η πολύπλοκη αυτή σχέση μεταξύ των υγρών και των αερίων αποδίδεται στη μεγάλη ανομοιογένεια που

παρουσιάζει η κατανομή των πόρων τους. Συγκεκριμένα, αυτή ευνοεί την πλήρωση των μικροπόρων του ψαμμίτη με αέριο και την μετακίνησή του μέσα σε αυτούς. Το παρατηρούμενο φαινόμενο επαληθεύει τη διαπίστωση ότι η άνωση δεν αποτελεί την κινητήρια δύναμη των ρευστών στα ψαμμιτικά κοιτάσματα χαμηλής διαπερατότητας. Παρακάτω αποδίδεται και σχηματικά, στο Σχήμα 3-1, η θεώρηση του άνω υδροφόρου ορίου των μη συμβατικών ψαμμιτικών κοιτασμάτων, όπως διατυπώθηκε από τον Masters (1979), μαζί με μία διαγραμματική απεικόνιση της σχετικής διαπερατότητας του αερίου ως προς τον υδατικό κορεσμό.



Σχήμα 3-1: Μεταβατική ζώνη του ψαμμιτικού στρώματος, από κορεσμένο με αέριο σε κορεσμένο με νερό. Το νερό αποτελεί το άνω σύνορο στο κοιτάσμα για το φυσικό αέριο λόγω της πολύ μικρής διαπερατότητας του πετρώματος (Masters, 1979)

Ορισμένα πρόσθετα χαρακτηριστικά των ψαμμιτών βαθιάς λεκάνης είναι, ότι

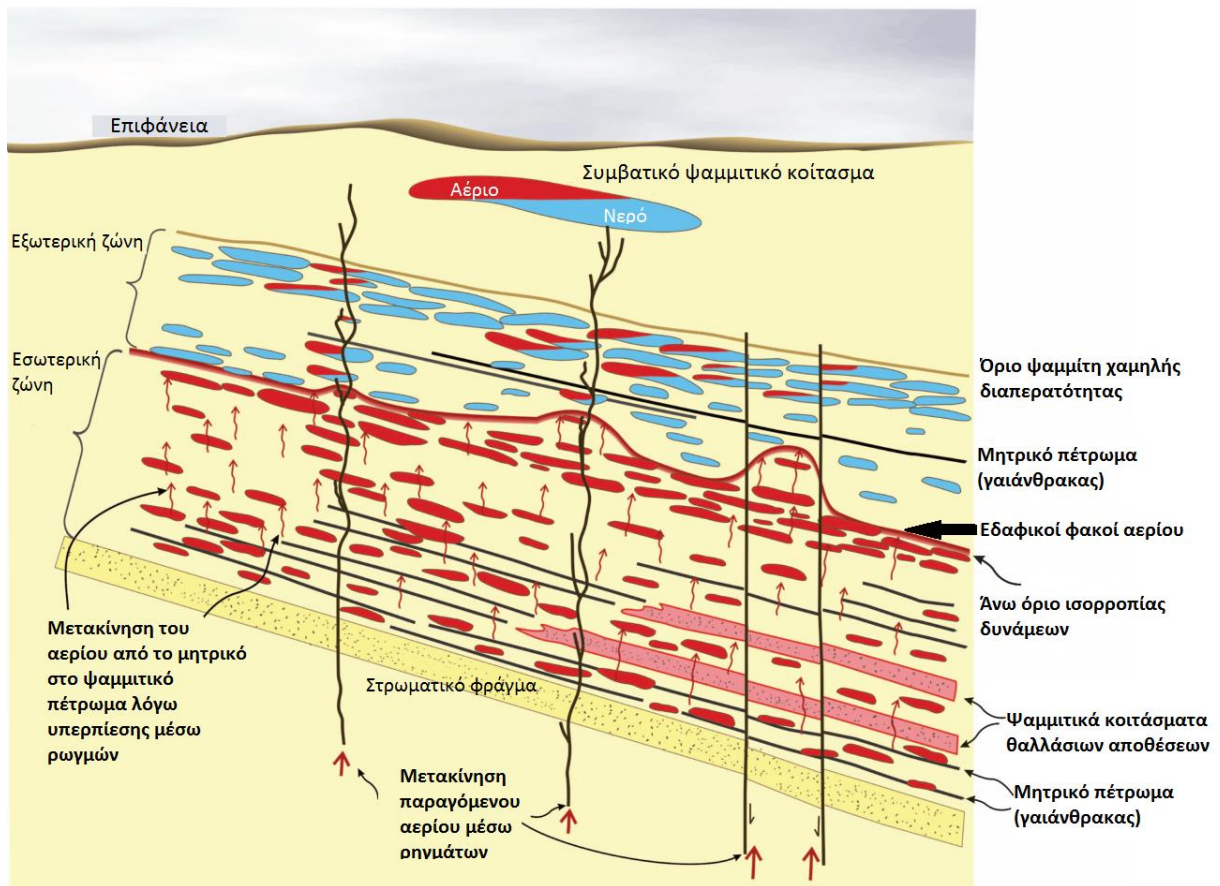
- Εκτείνονται σε ολόκληρη την περιοχή της λεκάνης, και κυριότερα στο κεντρικό βαθύτερο τμήμα της
- Δεν έχουν προφανές στρωματικό άνω φράγμα
- Διακρίνονται από γεωλογικούς φακούς («sweet spots»), οι οποίοι εντοπίζονται σε συγκεκριμένα βάθη και ενδείκνυνται για εκμετάλλευση, καθώς διαθέτουν μεγαλύτερες τιμές πορώδους και συγκέντρωσης αερίου από τον υπόλοιπο σχηματισμό
- Η βαθμός εξόρυξης είναι πολύ μικρός σε σχέση με το υφιστάμενο αέριο, λόγω περιορισμένης διαπερατότητας και της μεγάλης έκτασης του κοιτάσματος
- Παρουσιάζουν φυσική ρωγμάτωση

- Περιέχουν τόσο μητρικά (συνήθως γαιάνθρακας) όσο και αποθήκευτρα πετρώματα σε μικρή απόσταση μεταξύ τους, συγκριτικά με τα συμβατικά κοιτάσματα
- Το νερό εντοπίζεται πάνω από τους σχηματισμούς και δεν εμφανίζεται σε μεγάλο βαθμό κατά την εξόρυξη του φυσικού αερίου

3.2.3 Μηχανισμός παγίδευσης του αερίου

Ποιος είναι, όμως, ο μηχανισμός που παγιδεύει το κινούμενο αέριο στο εσωτερικό των ψαμμιτικών σχηματισμών; Οι συνθήκες που προϋποθέτουν τη συσσώρευση αερίου σε ψαμμίτες βαθιάς λεκάνης συμπεριλαμβάνουν 1) ένα πλούσιο σε αέριο μητρικό πέτρωμα (συνήθως γαιάνθρακα), 2) ένα αποθήκευτρο πέτρωμα χαμηλής διαπερατότητας και 3) ένα υποκείμενο στρωματικό φράγμα κάτω από το σχηματισμό. Οι προϋποθέσεις αυτές αποτυπώνονται και στην απεικόνιση της εδαφικής τομής μίας λεκάνης στις Η.Π.Α. (Σχήμα 3-2), στην οποία έχουν βρεθεί ψαμμιτικά κοιτάσματα.

Ο μηχανισμός παγίδευσης και μεταφοράς του φυσικού αερίου σε ένα ψαμμιτικό κοιτάσμα περιγράφεται από δύο διαφορετικές ισορροπίες, δυνάμεων και υλικών, οι οποίες αλληλεπιδρούν μεταξύ τους. Αναλυτικότερα, η ισορροπία δυνάμεων αποτελείται από τις ανοδικές δυνάμεις της άνωσης και της πίεσης του παραγόμενου αερίου και τις καθοδικές δυνάμεις της υδροστατικής και της τριχοειδούς πίεσης (Naik, 2003). Έτσι, προκύπτει ένα άνω όριο μέσα στο σχηματισμό για την μετακίνηση του περιεχόμενου αερίου. Λογικό συμπέρασμα θεωρείται επίσης, πως ο όγκος του αερίου που παράγεται στο τμήμα του ψαμμίτη, το οποίο βρίσκεται έξω από το ανώτατο όριο της ισορροπίας δυνάμεων (Εξωτερική ζώνη στο Σχήμα 3-2), μεταναστεύει πέρα από αυτόν και συγκεντρώνεται σε συμβατικά κοιτάσματα. Η δε ισορροπία αναφέρεται στις ποσότητες παραγόμενου και μεταφερόμενου αερίου από το μητρικό πέτρωμα. Η αποκατάσταση της ισορροπίας αυτής επιτυγχάνεται με την μετακίνηση του παραγόμενου αερίου προς τα αποθήκευτρα ψαμμιτικά πετρώματα, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3-2. Γι' αυτό και η πλήρωση με φυσικό αέριο των ψαμμιτικών κοιτασμάτων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ποιότητα του μητρικού πετρώματος. Καταλήγουμε, λοιπόν, στο γεγονός ότι υπάρχει μία περίπλοκη σχέση μεταξύ των υφιστάμενων δυνάμεων και πιέσεων στους ψαμμίτες, η οποία ορίζει και το μηχανισμό παγίδευσης του αερίου στο εσωτερικό τους.



Σχήμα 3-2: Απεικόνιση μιας εδαφικής τομής της λεκάνης Piceance στο Colorado των Η.Π.Α.. Τα κόκκινα βέλη αντιστοιχούν στην μετακίνηση του αερίου από τα μητρικά προς τα ψαμμιτικά πετρώματα είτε μέσω ρωγμών, είτε ρηγματών. Η κόκκινη γραμμή σηματοδοτεί το άνω όριο της μετακίνησης αυτής. Πέρα από αυτήν υφίσταται η εξωτερική ζώνη όπου παρατηρούνται συμβατικά κοιτάσματα (Fall et al., 2012)

3.2.4 Χαρακτηριστικά ενός ποιοτικού ψαμμιτικού κοιτάσματος

Το κλειδί για το σχηματισμό ενός τέτοιου κοιτάσματος είναι η εγγύτητα σε κάποιο μητρικό πέτρωμα. Το γνώρισμα αυτό μαζί με τα υπόλοιπα, τα οποία περιγράφονται παρακάτω, μπορούν να εντοπιστούν και στην παραπάνω εδαφική τομή (Σχήμα 3-2), η οποία μας δίνει μια συνολική άποψη της φύσης των ψαμμιτικών κοιτασμάτων. Οι ευρέως εντοπιζόμενοι γαιάνθρακες αποτελούν ατέρμονες πηγές αερίου, το οποίο μεταναστεύει και αποθηκεύεται στους ψαμμίτες (Jiang et al., 2015). Ωστόσο, παρά την μεγάλη επιφανειακή κάλυψη των ψαμμιτικών κοιτασμάτων, παρατηρούνται γεωλογικοί φακοί αυξημένης συγκέντρωσης αερίου. Οι περιοχές αυτές διακρίνονται από αυξημένες τιμές διαπερατότητας και πορώδους, γι' αυτό και αποτελούν συχνότερα το αντικείμενο της εκμετάλλευσης των κοιτασμάτων αυτών. Ο σχηματισμός των γεωλογικών φακών αποδίδεται είτε στους μηχανισμούς της διαγένεσης, είτε στη φυσική ρωγμάτωση, ενώ η πλήρωσή τους με φυσικό αέριο οφείλεται στις υφιστάμενες υψηλές πιέσεις που προκύπτουν από τη συνεχή παραγωγή αερίου των μητρικών πετρωμάτων. Σημαντική, λοιπόν, θεωρείται και η φυσική ρωγμάτωση των ψαμμιτικών κοιτασμάτων, η οποία προκαλείται από τις κινούμενες μάζες του φυσικού

αερίου. Ειδικότερα, λόγω της συσσώρευσης του αερίου αυτού στο εσωτερικό των κοιτασμάτων, παρατηρείται η αύξηση της πίεσής τους σε σημείο που, ουσιαστικά, ρωγματώνει το πέτρωμα. Ο μηχανισμός αυτός αυξάνει αισθητά τη διαπερατότητα των ψαμμιτικών πετρωμάτων και, παράλληλα, δημιουργεί γεωλογικούς φακούς, οι οποίοι συγκεντρώνουν μεγάλες ποσότητες αερίου. Επίσης, η ποιότητα ενός ψαμμιτικού κοιτάσματος μπορεί να συνδεθεί, όπως και στον αργιλικό σχιστόλιθο, με τις χαμηλές τιμές διαπερατότητας και πορώδους, οι οποίες δεν επιτρέπουν στο περιεχόμενο αέριο να μεταναστεύσει και να διαφύγει από το σχηματισμό. Παρ' ότι δεν έχει καθιερωθεί, ακόμη, ένας ορισμός για τους ψαμμίτες χαμηλής διαπερατότητας, λόγω των διαφόρων ειδών και της ανομοιογένειας που παρουσιάζουν ανάλογα με την περιοχή, απαραίτητα γνωρίσματά τους θεωρούνται το πορώδες μικρότερο από 10% και η διαπερατότητα μικρότερη από $0,1 \cdot 10^{-3} \mu\text{m}^2$.

Ο Πίνακας 3-2 συνοψίζει τα χαρακτηριστικά των πιο γνωστών ψαμμιτικών κοιτασμάτων σε λεκάνες της Κίνας και της Αμερικής. Από τη σύγκριση των στοιχείων αυτών παρατηρούμε ότι τα ποιοτικότερα κοιτάσματα παρουσιάζουν μεγαλύτερες τιμές διαπερατότητας από το σύνηθες εύρος. Σε αυτά τα χαρακτηριστικά βασίζεται και η αποτελεσματικότερη εκμετάλλευση των ψαμμιτικών κοιτασμάτων με την εφαρμογή μεθόδων όπως η οριζόντια γεώτρηση και η υδραυλική διάρρηξη.

Πίνακας 3-2: Χαρακτηριστικά των πιο γνωστών ψαμμιτικών κοιτασμάτων σε λεκάνες της Κίνας και της Αμερικής

Λεκάνη	Πορώδες (%)	Διαπερατότητα (μm^2)
Σύνηθες εύρος	3-12 [1]	$<0,1 \cdot 10^{-3}$ [1]
Ordos (Κίνα)	6.9 [2]	$0,2 \cdot 10^{-3}$ [2]
Sichuan (Κίνα)	5.6 [2]	$0,03 \cdot 10^{-3}$ [2]
Iles (Η.Π.Α.)	7-7.5 [3]	$(0,2-0,4) \cdot 10^{-3}$ [3]

Πηγές: [1] (Zou et al., 2012), [2] (Ying et al., 2004), [3] (Nelson, 2003)

3.3 Αξιολόγηση ψαμμιτικών και σχιστολιθικών κοιτασμάτων με βάση την ευκολία ρωγμάτωσης

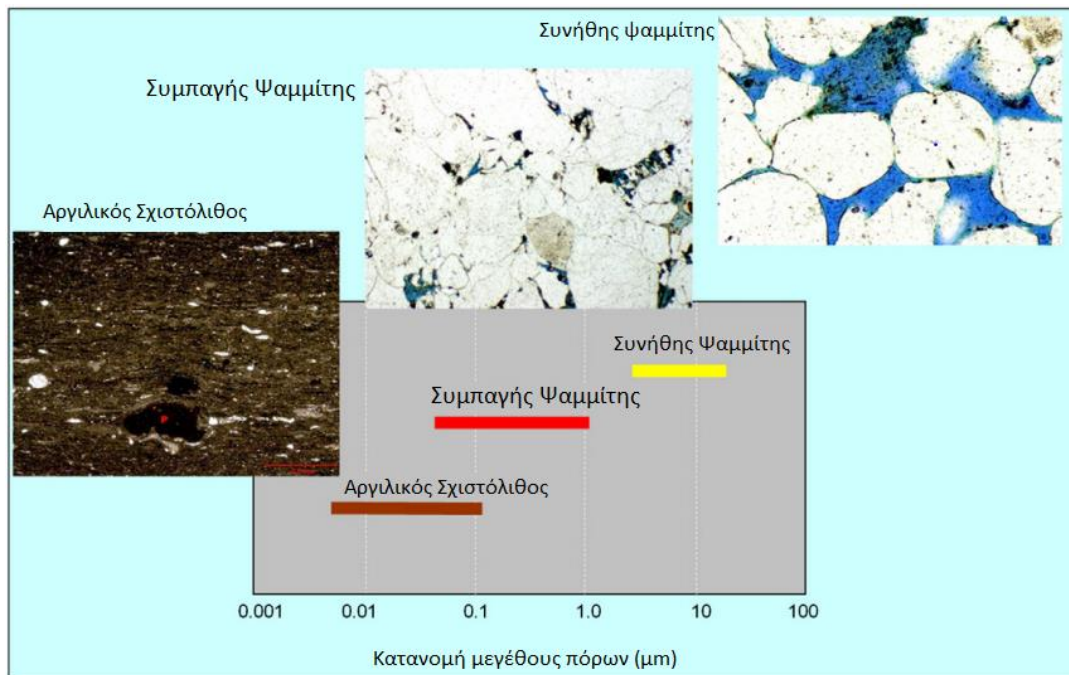
3.3.1 Διαφορές και ομοιότητες σχηματισμών

Ο αργιλικός σχιστόλιθος και ο ψαμμίτης είναι δύο πετρώματα στα οποία εντοπίζονται μεγάλες ποσότητες ορυκτών καυσίμων. Οι διαφορά τους από τα συμβατικά κοιτάσματα (όπως τα ψαμμιτικά και τα ανθρακικά) έγκειται στις ιδιαίτερα χαμηλές τιμές διαπερατότητας, πορώδους και ρυθμού παραγωγής αερίου και πετρελαίου που τα χαρακτηρίζουν. Και μεταξύ τους, όμως, τα πετρώματα που εξετάζονται παρουσιάζουν σημαντικές διαφοροποιήσεις. Ο σχιστόλιθος αποτελεί ταυτόχρονα μητρικό και αποθήκευτρο πέτρωμα υδρογονανθράκων με μεγάλο ποσοστό οργανικού κλάσματος, ενώ στον ψαμμίτη, απουσία του οργανικού υλικού,

εντοπίζεται αέριο και πετρέλαιο που έχει εγκλωβιστεί σε αυτόν, κάτω από ένα υπερκείμενο υδροφόρο εδαφικό στρώμα. Η αποτελεσματική εκμετάλλευση των πηγών αυτών επιβάλλει τη χρήση νέων μεθόδων εξερεύνησης και εξόρυξης, όπως η οριζόντια γεώτρηση και η υδραυλική διάρρηξη. Καίρια θεωρείται, λοιπόν, η καταγραφή των διαφορών ανάμεσα στους δύο σχηματισμούς, για να γίνει κατανοητή η φύση τους και να αξιολογηθεί η εφαρμογή των παραπάνω τεχνολογιών σε αυτούς. Οι διαφορές αυτές αποτυπώνονται στις ιδιότητες των δύο σχηματισμών, όπως το πορώδες, η διαπερατότητα, η ψαθυρότητα και η αντοχή, οι οποίες με τη σειρά τους εξαρτώνται από διάφορους παράγοντες και παρουσιάζουν σημαντικό εύρος. Ο βαθμός ευκολίας για τη δημιουργία δικτύου ρωγμών στους εξεταζόμενους σχηματισμούς επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από την ψαθυρότητά τους και συνδέεται, ταυτόχρονα, με την αντοχή τους.

3.3.2 Διαπερατότητα

Η διαπερατότητα ορίζει, σε μεγάλο βαθμό, τη δυνατότητα αποδέσμευσης των υδρογονανθράκων από τους σχηματισμούς που μελετούμε. Η τιμή της δεν είναι σταθερή από την αρχή, καθώς επηρεάζεται από την αλληλεπίδραση άλλων ιδιοτήτων, όπως το ολικό και το ενεργό πορώδες, το μέγεθος των κόκκων και η υφιστάμενη διαγένεση του πετρώματος. Αυτός είναι και ο λόγος που συναντάται μεγάλη ανομοιογένεια στη διαπερατότητα, ακόμη και στον ίδιο σχηματισμό. Στην περίπτωση του συμπαγούς ψαμμίτη, οι Rezaee et al. (2012) εκτιμούν ότι οι χαμηλές τιμές διαπερατότητας, εύρους $(0.001 \text{ έως } 1) \cdot 10^{-3} \mu\text{m}^2$, δεν εξαρτώνται αποκλειστικά από τη διαδικασία της ιζηματογένεσης, όπως στους συνήθεις ψαμμιτικούς σχηματισμούς, αλλά και από την εκτεταμένη συμπίεση και την τσιμέντωση που λαμβάνει χώρα σε βάθος χρόνου (ενότητα 3.2.1). Αντίστοιχα, στην περίπτωση του αργλικού σχιστόλιθου (ενότητα 3.1.1) υπενθυμίζεται ότι η διαγένεσή του περιλαμβάνει τη στερεοποίηση των, οριζόντια προσανατολισμένων, αργλικών πλακιδίων του σε πυκνές στρωματώσεις, οι οποίες ευθύνονται για την χαμηλή διαπερατότητά του, με τιμές μικρότερες από $0.0001 \cdot 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (Rezaee et al., 2012). Ένας σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει τη διαπερατότητα των ψαμμιτικών και των σχιστολιθικών σχηματισμών είναι η κατανομή του μεγέθους των πόρων, η οποία φαίνεται στο Σχήμα 3-3. Σε αυτό παρατηρούμε, ότι υπάρχει διαφορά μίας τάξης μεγέθους ανάμεσα στο εύρος των εξεταζόμενων πετρωμάτων, οπότε, συνήθως, αντιστοιχούν μεγαλύτερες τιμές αρχικής διαπερατότητας στους ψαμμίτες από ότι στους αργλικούς σχιστόλιθους. Ένας άλλος παράγοντας, ο οποίος επιδρά στην τελική τιμή της διαπερατότητας, είναι η πλευρική καταπόνηση των πετρωμάτων. Σύμφωνα με μετρήσεις των Rezaee et al. (2012), διαπιστώθηκε ότι η τελική διαπερατότητα ενός σχηματισμού μειώνεται σημαντικά με την αύξηση των πλευρικών τάσεων. Δεδομένης, λοιπόν, της μεγαλύτερης πλευρικής τάσης στον αργλικό σχιστόλιθο, στην περίπτωση γειτονικών στρωματώσεων (δηλαδή για παρόμοιες επί τόπου τάσεις στα 2 πετρώματα) περιμένουμε μικρότερη διαπερατότητα στο σχιστόλιθο από ότι στον ψαμμίτη.



Σχήμα 3-3: Απεικόνιση και κατανομή μεγέθους των πόρων των σχηματισμών (Rezaee et al., 2012)

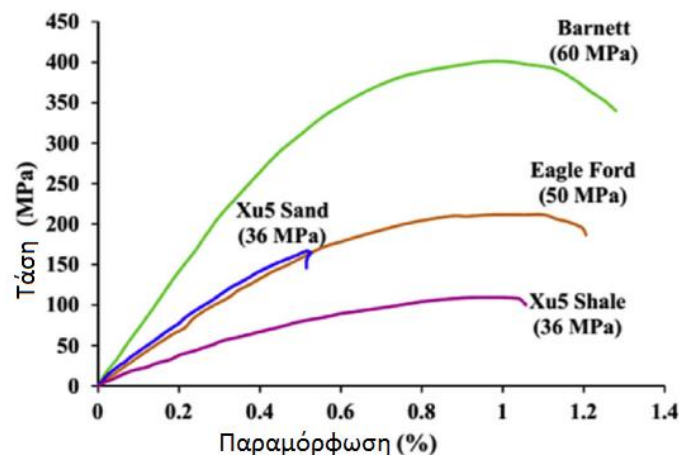
3.3.3 Πορώδες

Το πορώδες, στην περίπτωση που εξετάζουμε, αποδίδεται από την ενεργή του τιμή, δηλαδή από τα κενά εκείνα τα οποία είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους και μετέχουν στην ροή των ρευστών. Από μετρήσεις σε σχηματισμούς των Η.Π.Α., ο Sun (2014) υπολόγισε ότι σε αργιλικό σχιστόλιθο και ψαμμίτη αντιστοιχούν, κατά μέσο όρο, οι τιμές 1-9% και 5-12%. Το αποτέλεσμα αυτό επαληθεύεται από 2 γεγονότα. Πρώτον, από το γεγονός πως ο σχιστολιθικός σχηματισμός περιέχει μεγαλύτερο ποσοστό αργίλου από τον ψαμμίτη. Ειδικότερα, στην άργιλο αντιστοιχίζεται μειωμένη αντοχή σε συμπίεση, με αποτέλεσμα η δομή της να τείνει προς κατάρρευση υπό το βάρος των υπερκείμενων στρωμάτων. Και, δεύτερον, από το περιεχόμενο οργανικό υλικό του αργιλικού σχιστόλιθου, το οποίο καταλαμβάνει μεγάλο ποσοστό των πόρων και δυσχεραίνει τη ροή στο εσωτερικό του.

3.3.4 Ψαθυρότητα

Μία ακόμη ιδιότητα που διαφοροποιείται ανάμεσα στον αργιλικό σχιστόλιθο και τον ψαμμίτη είναι η ψαθυρότητα. Η ψαθυρότητα περιγράφει τη συμπεριφορά του υλικού κατά την αστοχία. Ειδικότερα, ο Bai (2016) διατυπώνει ότι πρόκειται για την ικανότητα ενός υλικού να αντιστέκεται σε οποιαδήποτε ανελαστική (μόνιμη) παραμόρφωση. Σημειωτέον ότι η μεγαλύτερη αντοχή αλλάζει ανάλογα με το υλικό και, ότι θα μπορούσε κάλλιστα να αντιστοιχεί η μεγαλύτερη τάση αστοχίας στο όλκιμο υλικό, γεγονός που επαληθεύεται στο Σχήμα 3-4. Σε αυτό το σχήμα δίνονται τα αποτελέσματα τριαξονικών δοκιμών του Bai (2016) για διάφορους σχιστολιθικούς σχηματισμούς και έναν ψαμμιτικό, όπου εμφανείς είναι η όλκιμη και η ψαθυρή μορφή αστοχίας τους, αντίστοιχα. Παρατηρούμε, επίσης, τη θετική συσχέτιση της αντοχής σε τριαξονική θλίψη των σχιστολιθικών σχηματισμών με την αύξηση των πλευρικών τάσεων, οι οποίες δίνονται σε παρενθέσεις επί του σχήματος. Συμπεραίνεται, λοιπόν, ότι ο βαθμός ψαθυρότητας ενός πετρώματος είναι μεγαλύτερος στο διάστημα με την

μικρότερη αντοχή και τις χαμηλότερες πλευρικές τάσεις. Σύμφωνα με το Σχήμα 3-4 για την λεκάνη Xu5 στην Κίνα, διαφαίνεται ότι, για παρόμοιες επί τόπου τάσεις, το ψαμμιτικό πέτρωμα παρουσιάζει μεγαλύτερη αντοχή από το σχιστολιθικό, συνεπώς περιμένουμε ευκολότερη ρωγμάτωση του αργιλικού σχιστολιθικού στην παρούσα κατάσταση. Από τη σκοπιά της οριζόντιας γεώτρησης και της υδραυλικής διάρρηξης, η αυξημένη ψαθυρότητα ενός σχηματισμού μπορεί να οδηγήσει σε ανεπιθύμητη παραγωγή υλικού κατά τη διάνοιξη και την ρωγμάτωση, οπότε και να προκληθούν προβλήματα απόφραξης.



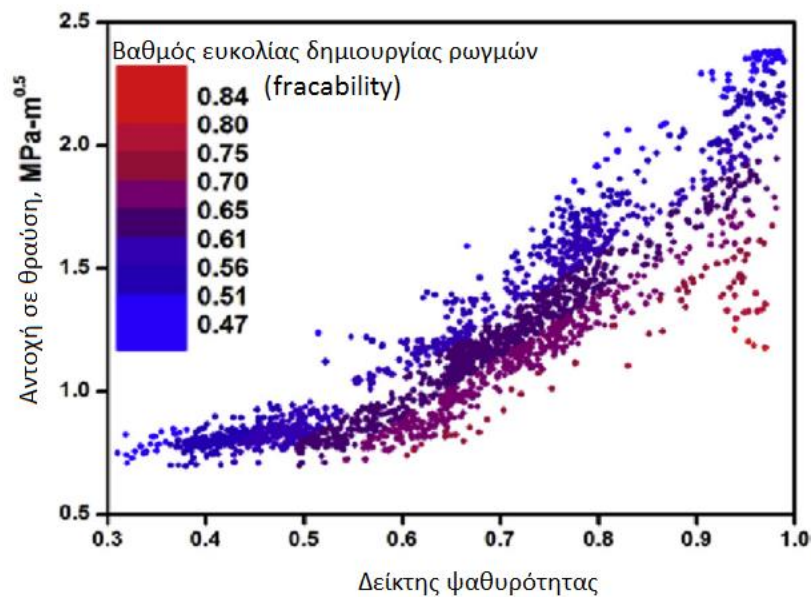
Σχήμα 3-4: Τριαξονικές δοκιμές για γνωστούς σχιστολιθικούς και ψαμμιτικούς σχηματισμούς (σε παρένθεση βρίσκονται οι πλευρικές τάσεις) (Bai, 2016)

3.3.5 Βαθμός ευκολίας δημιουργίας δικτύου ρωγμών (fracability)

Σύμφωνα με την πιο πρόσφατη μέθοδο αξιολόγησης της υδραυλικής διάρρηξης, όπου υπολογίζεται με τριδιάστατες μετρήσεις ο όγκος του ρωγματομένου κοιτάσματος, μονάδα μέτρησης της αποτελεσματικότητας της διάρρηξης θεωρείται ο βαθμός ευκολίας για τη δημιουργία δικτύου ρωγμών (fracability) (Guo, 2015). Υψηλός βαθμός ευκολίας συνεπάγεται ένα πολύπλοκο δίκτυο ρωγμών πολλαπλής γεωμετρίας. Μέσω βασικών πειραμάτων βραχομηχανικής επιβεβαιώθηκε το γεγονός πως, συνολικά, ο βαθμός αυτός αυξάνεται με την αύξηση του δείκτη ψαθυρότητας, αλλά, ταυτόχρονα, μειώνεται με την αύξηση της αντοχής σε θραύση, σε εφελκυσμό ή σε διάτμηση.

Η αξιολόγηση των σχηματισμών μέσω της σύνδεσης του βαθμού ευκολίας για τη δημιουργία ενός σύνθετου δικτύου ρωγμών με τις ιδιότητες τους είναι μία πολύπλοκη διαδικασία. Σύμφωνα με πρόσφατο άρθρο του Bai (2016), ο βαθμός αυτός αντιστοιχείται, με ακρίβεια, μόνο με την αντοχή του ίδιου του πετρώματος (για παράδειγμα την αντοχή σε ανεμπόδιστη θλίψη) επηρεάζεται, όμως, και από την ορυκτολογία του. Επιπρόσθετα, οφείλουν να ληφθούν υπόψη και οι πλευρικές τάσεις, οι οποίες αυξάνουν με τη σειρά τους την αντοχή του πετρώματος σε τριαξονικές φορτίσεις. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων του Bai (2016) συγκεντρώνονται στο Σχήμα 3-5, με βάση το οποίο επαληθεύεται ότι μεγαλύτερος βαθμός ευκολίας για τη δημιουργία δικτύου ρωγμών προκύπτει για μικρότερες τιμές της αντοχής σε θραύση. Πιο συγκεκριμένα, διαφαίνεται, επίσης, και η μη γραμμική σχέση της

αντοχής αυτής με την ψαθυρότητα, λόγω της πρόσθετης θετικής επίδρασης της ορυκτολογίας στον βαθμό ευκολίας (Bai, 2016). Στην περίπτωση διαδοχικών στρωμάτων ψαμμίτη με αργιλικό σχιστόλιθο (παρόμοιο υπερκείμενο βάρος), γνωρίζοντας πως οι σχιστολιθικοί σχηματισμοί υπόκεινται σε μεγαλύτερες πλευρικές τάσεις, προκύπτει ότι το ψαμμιτικό πέτρωμα θα ρωγματωθεί ευκολότερα. Το συμπέρασμα αυτό θα φανεί ιδιαίτερο χρήσιμο, κατά τη διερεύνηση της αύξησης της υδραυλικής αγωγιμότητας των σχηματισμών αυτών με τη βοήθεια της υδραυλικής διάρρηξης, που βρίσκεται στο 0. Παρόμοια επίδραση παρατηρείται και στην, κατά μήκος, έκταση των ρωγμών, η οποία αποδίδεται στην, συναφή, αντοχή σε θραύση.



Σχήμα 3-5: Βαθμός ευκολίας δημιουργίας δικτύου ρωγμών σε ένα σχηματισμό (fracability) και συσχέτιση αντοχής σε θραύση με το δείκτη ψαθυρότητας (Bai, 2016)

3.3.6 Συμπερασματικά σχόλια

Συνοψίζοντας, η παραπάνω αξιολόγηση βασικών ιδιοτήτων (διαπερατότητα, πορώδες και ψαθυρότητα) των σχηματισμών οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η ρωγμάτωση συμβαίνει ευκολότερα στον ψαμμίτη απ' ότι στον αργιλικό σχιστόλιθο. Σύμφωνα με την επιστημονική βιβλιογραφία που μελετήθηκε, η ευκολία αυτή βασίζεται, κυρίως, στην αντοχή σε θλίψη του πετρώματος, η οποία οφείλουμε να τονίσουμε ότι διαφοροποιείται τόσο ανά λεκάνη, όσο και τοπικά αναλόγως των υφιστάμενων τάσεων. Η σύγκριση, λοιπόν, των 2 σχηματισμών οφείλει να περιορισθεί σε διαδοχικά στρώματα, όπου μπορούν να εξαχθούν ασφαλέστερα συμπεράσματα. Για παρόμοιο τασικό πεδίο, οι τριαξονικές δοκιμές, που δίνονται στο Σχήμα 3-4, υποδεικνύουν πως ο ψαμμίτης παρουσιάζει μεγαλύτερη αντοχή από τον αργιλικό σχιστόλιθο, γεγονός που δεν επαληθεύει το παραπάνω συμπέρασμα. Αυτό που συμβαίνει στο πεδίο, θεωρώντας διαδοχική στρωμάτωση των σχηματισμών, είναι ότι οι πλευρικές τάσεις καταπονούν πολύ περισσότερο τον σχιστόλιθο απ' ότι τον ψαμμίτη. Ως αποτέλεσμα, τα ενδιάμεσα ψαμμιτικά στρώματα είναι αυτά που ρωγματώνονται με μεγαλύτερη ευκολία από τα γειτονικά σχιστολιθικά, ενώ χαρακτηρίζονται, ταυτόχρονα, και από καταλληλότερες ιδιότητες για την παραγωγή αερίου, όπως είδαμε στις ενότητες που προηγήθηκαν.

Κεφάλαιο 4 Αύξηση της υδραυλικής αγωγιμότητας σε αργιλικό σχιστόλιθο και ψαμμίτη

Η λογική της υδραυλικής ρωγμάτωσης είναι γνωστή από τις αρχές του 20^{ου} αιώνα, όμως η σημερινή ευρεία χρήση της βασίζεται σε σχετικά σύγχρονες θεωρίες, οι οποίες συνεχώς εξελίσσονται. Το θεωρητικό υπόβαθρο της υδραυλικής ρωγμάτωσης ξεκίνησε να αναπτύσσεται από τη δεκαετία του 1970 και έπειτα. Η αποτελεσματικότητα της υδραυλικής διάρρηξης εξαρτάται από πολυδιάστατους παράγοντες, όπως τη μηχανική συμπεριφορά των σχηματισμών, τη μηχανική των ρευστών, τη χημεία, την ακολουθούμενη διαδικασία και άλλους. Γι' αυτό, πριν από τη διερεύνηση της αύξησης της υδραυλικής αγωγιμότητας μη συμβατικών κοιτασμάτων μετά την εφαρμογή της μεθόδου, οφείλουμε να παραθέσουμε το θεωρητικό υπόβαθρο και να μελετήσουμε όλους τους μηχανισμούς που υπεισέρχονται σε αυτή. Το κεφάλαιο αυτό θα βοηθήσει, επίσης, και στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων της ανάλυσης.

4.1 Η διαδικασία εφαρμογής της υδραυλικής διάρρηξης

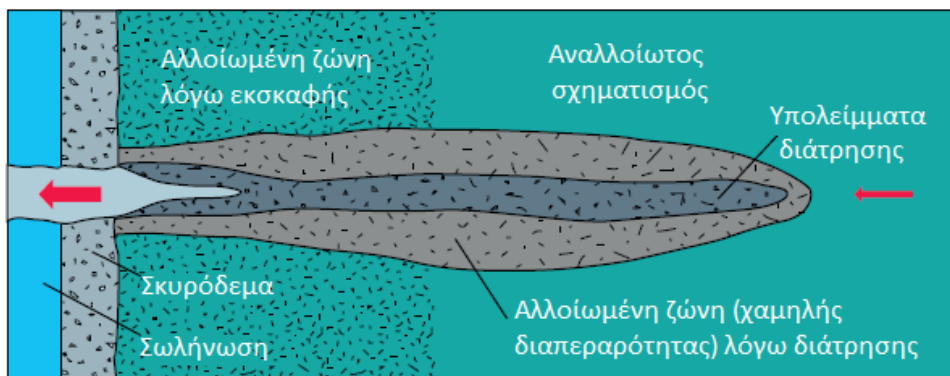
Η υδραυλική διάρρηξη, όπως παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 2, αποτελεί μια μέθοδο ρωγμάτωσης κοιτασμάτων και περιλαμβάνει την εισπίεση ενός διαλύματος, το οποίο υπό μεγάλη πίεση προκαλεί ρωγμές στο πέτρωμα τους. Η εφαρμογή της, για την αύξηση της παραγωγικότητας πετρελαίου και φυσικού αερίου των συμβατικών κοιτασμάτων, δεν αποτελεί νέα τεχνολογία, σύμφωνα με την έρευνα της US EPA (2015b). Άλλες εφαρμογές περιλαμβάνουν τη διάθεση μεταλλευτικών αποβλήτων υπογείως, την εκμετάλλευση της γηγενούς θερμότητας των γεωθερμικών κοιτασμάτων και τον προσδιορισμό του επιτόπου τασικού πεδίου ενός σχηματισμού, σε οποιοδήποτε βάθος. Η εξέλιξη και ο συνδυασμός της μεθόδου με τις οριζόντιες γεωτρήσεις εξόρυξης κατέστησαν δυνατή την εκμετάλλευση μη συμβατικών πηγών ορυκτών καυσίμων, όπως είναι ο αργιλικός σχιστόλιθος και ο ψαμμίτης, γεγονός που θεωρείται μία από τις μεγαλύτερες καινοτομίες της εξόρυξης ορυκτών πόρων του 21^{ου} αιώνα. Διαφορετικά, η φυσική αποδέσμευση των υδρογονανθράκων από τα πετρώματα, αυτά, θα συνέβαινε σε βάθος γεωλογικών χρόνων. Το εισπιεζόμενο υγρό της υδραυλικής διάρρηξης έχει, συνήθως, ως βάση το νερό και περιέχει απαραίτητα χημικά πρόσθετα, για τη σωστή λειτουργία της μεθόδου, και κοκκώδες υλικό, για την διατήρηση των ρωγμών στο χρόνο. Αξίζει να σημειωθεί πως αναλόγως των εγγενών χαρακτηριστικών κάθε κοιτάσματος (π.χ. έκταση, τασικό πεδίο, ψαθυρότητα, φυσικές ρωγμές) και της διαθέσιμης τεχνολογίας, η οποία συνεχώς εξελίσσεται, διαμορφώνονται τόσο η σύσταση του παραπάνω μείγματος, όσο και οι υπόλοιπες παράμετροι (π.χ. πίεση, παροχή, προσανατολισμός) της ρωγμάτωσης (US DoE, 2009). Στην παρούσα ενότητα συνοψίζονται οι μηχανικοϋδραυλικοί μηχανισμοί που απαρτίζουν την υδραυλική διάρρηξη μαζί με τα επιμέρους στάδιά της (εμβάθυνση στα στοιχεία της ενότητας 2.3), ενώ, καταλήγοντας γίνεται μία προσπάθεια εντοπισμού των παραγόντων που επηρεάζουν σε μεγαλύτερο βαθμό την εφαρμογή της.

4.1.1 Προγραμματισμός και περιμετρική διάτρηση

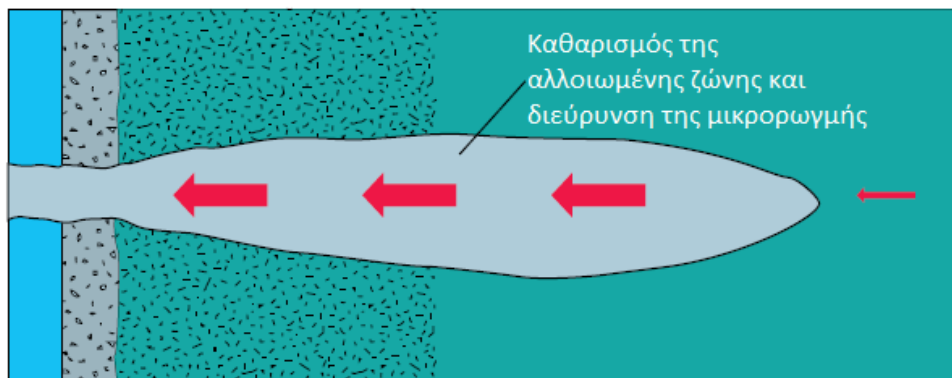
Η υδραυλική διάρρηξη επαναλαμβάνεται κατά τμήματα μιας οριζόντιας γεώτρησης, ξεκινώντας από το τέλος και προχωρώντας προς την αρχή. Ο τμηματικός αυτός διαχωρισμός βοηθάει, σύμφωνα με την έρευνα του US DoE (2009), πρώτον, στην επίτευξη της απαραίτητης πίεσης ρωγμάτωσης ανεξαρτήτως του μήκους της οριζόντιας γεώτρησης, δεύτερον, στη βελτιστοποίηση της θέσης των ρωγμών και, τρίτον, στην προσαρμογή των παραμέτρων, όπως είναι οι ποσότητες των υλικών και οι πιέσεις, ανάλογα με τις κατά μήκος γεωλογικές ανομοιογένειες. Σε κάθε τμήμα, η διαδικασία χωρίζεται στα παρακάτω 4 στάδια, τα οποία αναλύονται στη συνέχεια:

1. Κατεργασία της γεώτρησης με οξύ και άλλα χημικά πρόσθετα
2. Εισπίεση υγρού διάρρηξης για τη ρωγμάτωση του πετρώματος
3. Τοποθέτηση του υλικού συγκράτησης των ανοιχτών ρωγμών
4. Έκπλυση της γεώτρησης με νερό

Ιδιαίτερη βαρύτητα, πριν την έναρξη της υδραυλικής διάρρηξης, δίνεται στην περιμετρική διάτρηση της γεώτρησης, με τη βοήθεια ειδικά σχεδιασμένων εκρήξεων. Στόχος της είναι, τόσο η διάνοιξη οπών στην επένδυση της γεώτρησης και στην αλλοιωμένη ζώνη του σχηματισμού, λόγω της γεώτρησης, όσο και η δημιουργία εναρκτήριων μικρορωγμών προς μία επιθυμητή διεύθυνση μέσα στο πέτρωμα (Σχήμα 4-1). Παρ' όλ' αυτά, η ίδια η έκρηξη προκαλεί και την αλλοίωση του σχηματισμού γύρω από τις μικρορωγμές, με συνέπεια την περαιτέρω μείωση της διαπερατότητάς του. Λύση στο πρόβλημα αυτό δίνει η επιβολή μικρότερης πίεσης στο εσωτερικό της γεώτρησης από εκείνη του σχηματισμού στο σημείο της διάτρησης. Έτσι, ο Cosad (1992) υποστηρίζει ότι αποτρέπεται η απευθείας εισροή νερού από τη γεώτρηση στη μικρορωγμή και, ταυτόχρονα, απομακρύνεται το αλλοιωμένο υλικό, που θα επιβράδυνε, διαφορετικά, τη ροή των ζητούμενων υδρογονανθράκων προς αυτήν (Σχήμα 4-2).



Σχήμα 4-1: Σχηματική απεικόνιση της μικρορωγμής κατά τη διάτρηση, όπου φαίνονται οι αλλοιωμένες ζώνες του σχηματισμού, λόγω της γεώτρησης και της ίδιας της διάτρησης (με κόκκινο συμβολίζεται η ροή των υπολειμμάτων διάτρησης) (Cosad, 1992)



Σχήμα 4-2: Σχηματική απεικόνιση της μικρορωγμής μετά την απομάκρυνση των υπολειμμάτων διάτρηση (με κόκκινο συμβολίζεται η ροή του αερίου) (Cosad, 1992)

4.1.2 Στάδια της διαδικασίας

Η διαδικασία της υδραυλικής διάρρηξης ξεκινάει με το 1^ο στάδιο, της κατεργασίας της γεώτρησης με ένα υδατικό διάλυμα οξέος (συνήθως υδροχλωρικού) και άλλων χημικών προσθέτων, όπως αναστολέων διάβρωσης, αναστολέων καθαλατώσεων και βιοκτόνων (αναλυτικότερα επί των χημικών προσθέτων στην ενότητα 6.2). Η κατεργασία αυτή στοχεύει στην βελτιστοποίηση των συνθηκών που επικρατούν στο βάθος του σχηματισμού για την αποτελεσματικότερη διάρρηξή του. Ειδικότερα, σύμφωνα με την US EPA (2015b), το οξύ καθαρίζει τη γεώτρηση και τις μικρορωγμές από τα υπολείμματα των διεργασιών της εκσκαφής και της περιμετρικής διάτρησης που προηγήθηκαν, ενώ ο αναστολέας διάβρωσης αποτρέπει την απόφραξη του εξοπλισμού και των ρωγμών λόγω σκουριάς.

Το 2^ο στάδιο περιλαμβάνει την εισπίεση μεγάλων ποσοτήτων νερού μαζί με ένα χημικό πρόσθετο υγρό μείωσης της τριβής, το οποίο μειώνει τη ζώνη της τυρβώδους ροής, κοντά στα τοιχώματα των σωληνώσεων και της γεώτρησης, και βοηθάει στη γρηγορότερη αύξηση της παροχής εισπίεσης. Στόχος του σταδίου αυτού είναι το φορτίο εισπίεσης να ξεπεράσει την πίεση ρωγμάτωσης (ενότητα 4.2.9), ώστε να ρωγματωθεί ο σχηματισμός και να δημιουργηθεί σε αυτόν ένα δίκτυο ρωγμών. Στην έρευνα του US DoE (2009) υπογραμμίζεται ότι η έκταση της ζώνης ρωγμάτωσης εξαρτάται κυρίως από το τασικό πεδίο στο βάθος εξόρυξης, την παρουσία ή όχι φυσικών ρωγμών στην περιοχή και την τυχούσα διαρροή εισπιεζόμενου υγρού στα εσωτερικά του σχηματισμού και σε γειτονικά, πιο περατά, στρώματα, φαινόμενα τα οποία επηρεάζουν τις εφαρμογές της υδραυλικής διάρρηξης όπως καταδεικνύεται στην ενότητα 4.2.

Στη συνέχεια, εφαρμόζεται το 3^ο στάδιο, της τοποθέτησης του κοκκώδους υλικού συγκράτησης των ρωγμών, το οποίο πρόκειται συνήθως για άμμο, με τη βοήθεια του ίδιου του υγρού διάρρηξης. Η ικανότητα μεταφοράς του, βαθιά στις ρωγμές του σχηματισμού καθορίζεται από το ιξώδες του υγρού. Πιο συγκεκριμένα, η αύξηση του ιξώδους αυτού, η οποία επιτυγχάνεται με την χρήση των ιξωδοαυξητικών χημικών προσθέτων, ενισχύει την μεταφορά του υλικού συγκράτησης στις ρωγμές, με απώτερο σκοπό την αύξηση της υδραυλικής αγωγιμότητάς τους (αντικείμενο της διερεύνησης στο 0). Το υλικό που χρησιμοποιείται είναι αρχικά μικρής και έπειτα μεγαλύτερης διαμέτρου, καθώς έτσι μεταφέρεται βαθύτερα στις ρωγμές. Για την ευκολότερη απομάκρυνση του υγρού εισπίεσης, μετά το τέλος της τοποθέτησης αυτής, εφαρμόζονται και κάποιοι παράγοντες διάσπασης, οι οποίοι μειώνουν το ιξώδες του υγρού κοντά σε εκείνο του νερού.

Το 4^ο και τελευταίο στάδιο περιλαμβάνει την έκπλυση της γεώτρησης με καθαρό νερό, ώστε να αφαιρεθεί το υγρό εισπίεσης και το περισσευούμενο υλικό συγκράτησης, τα οποία δύναται να προκαλέσουν προβλήματα απόφραξης των ρωγμών κατά την παραγωγή, σύμφωνα με τους Gidley et al. (1989).

Μετά την ολοκλήρωση της υδραυλικής διάρρηξης ολόκληρης της γεώτρησης, απομειώνεται η πίεση μέσα σε αυτήν και ακολουθεί η αναρροή των υδάτων, όπως περιγράφεται και στην ενότητα 2.4. Αυτά αποτελούνται από ποσότητες υγρών, που σχετίζονται με την υδραυλική διάρρηξη, νερό των πόρων του σχηματισμού (σε ορισμένες περιπτώσεις σημαντικό ποσοστό της αναρροής) και κοκκώδες υλικό που δεν συγκρατήθηκε στις ρωγμές. Ταυτόχρονα, ξεκινάει και η ζητούμενη παραγωγή φυσικού αερίου, καθώς είναι δυνατή, πλέον, η ροή του ανάμεσα στο υλικό συγκράτησης και προς την επιφάνεια, μέσω της γεώτρησης.

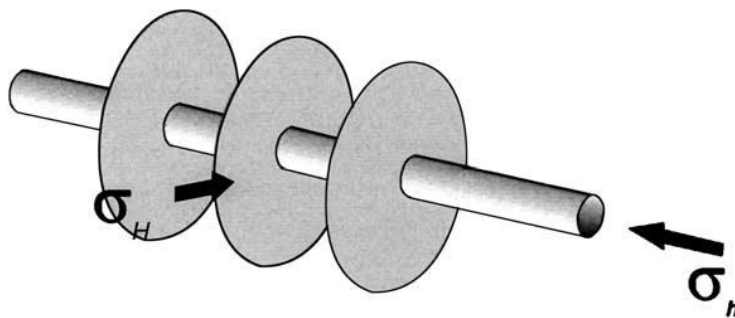
4.1.3 Παράγοντες που επηρεάζουν την υδραυλική διάρρηξη

Όπως προαναφέρθηκε, η υδραυλική διάρρηξη είναι μία μέθοδος ρωγμάτωσης, το αποτέλεσμα της οποίας εξαρτάται, σε μεγάλο βαθμό, τόσο από τη διαθέσιμη τεχνολογία, όσο και από τις ιδιότητες του εκάστοτε σχηματισμού. Παράλληλα, οι Adachi et al. (2006) τονίζουν ότι η ορθή εφαρμογή της μεθόδου προϋποθέτει και την κατανόηση των μηχανισμών που εμπλέκονται, όπως η μηχανική συμπεριφορά του ρωγματωμένου πετρώματος, η ροή του υγρού εισπίεσης μέσα σε αυτό και ο μηχανισμός διάδοσης των ρωγμών.

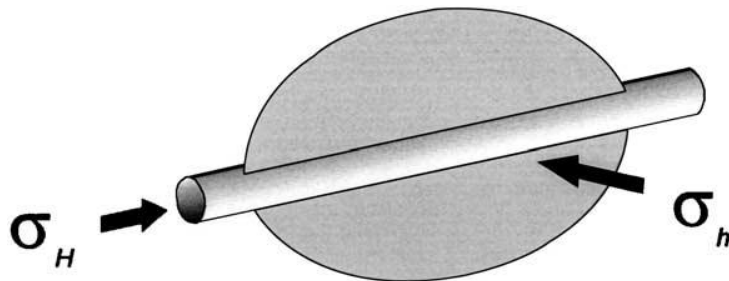
Με τη βοήθεια αριθμητικών αναλύσεων, οι Kim and Moridis (2015) εντόπισαν την επίδραση διαφόρων ιδιοτήτων των σχιστολιθικών κοιτασμάτων επί της υδραυλικής διάρρηξης. Παραδείγματος χάριν, ο μεγάλος βαθμός κορεσμού ενός σχηματισμού φάνηκε να επισπεύδει την αύξηση της πίεσης των πόρων και τη διάδοση των ρωγμών. Αυτό αποδίδεται στην συνδρομή των υγρών και των αερίων του σχηματισμού στον όγκο του εισπιεζόμενου υγρού, με αποτέλεσμα σχετικά μικρός όγκος αυτού να οδηγεί σε εκτενή διάδοση των ρωγμών. Επίσης, κρίθηκε πως μεγάλες τιμές του μέτρου ελαστικότητας και του λόγου του Poisson, δυσχεραίνουν τη διάδοση των ρωγμών και πως η κατακόρυφη εξάπλωσή τους εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ετερογένεια, που διακρίνει την ιζηματογενή στρωμάτωση των μη συμβατικών κοιτασμάτων.

Ιδιαίτερη σημασία δίνεται και στην πετροφυσική διάσταση της εισπίεσης υγρού, στο φάσμα της διάδοσης των ρωγμών. Είναι γνωστό ότι, λόγω σεισμών, πλευρικών τάσεων, θερμοκρασιακών μεταβολών και εσωτερικών διεργασιών, στο αποθήκευτρο πέτρωμα δημιουργούνται ρήγματα και φυσικές ρωγμές. Μέσω πειραμάτων, οι Guo et al. (2014) υπολόγισαν πως για διαφορετικές παροχές εισπίεσης προκύπτουν διαφορετικά αποτελέσματα στην πολυπλοκότητα των ρωγμών, άρα και στον όγκο του ρωγματωμένου πετρώματος. Πιο συγκεκριμένα, ενώ για χαμηλή παροχή το υγρό κινείται ανάμεσα στη στρωμάτωση και τις φυσικές ρωγμές, η αύξησή της οδηγεί στην απόκλιση από τον άξονα τής μέγιστης οριζόντιας τάσης προς άλλες διευθύνσεις και, επομένως, στην αύξηση του ρωγματωμένου όγκου. Περαιτέρω αύξηση, όμως, της παροχής από μία κρίσιμη τιμή και μετά έχει τα αντίθετα αποτελέσματα, καθώς η ρωγμή επεκτείνεται προς μία κύρια κατεύθυνση, αγνοώντας τις φυσικές ρωγμές, γεγονός που μειώνει την παράπλευρη εξάπλωσή της και, άρα, τον όγκο του ρωγματωμένου πετρώματος. Οι Gidley et al. (1989) σημειώνουν πως η αρχική απόκλιση των ρωγμών είναι συνάρτηση και της διαφοράς των οριζόντιων τάσεων.

Τέλος, αποτελεσματικό δίκτυο ρωγμών οι Crosby et al. (2001) θεωρούν μόνο εκείνο το οποίο εκτείνεται εγκάρσια στην ελάχιστη οριζόντια τάση και παράλληλα στη μέγιστη (Σχήμα 4-3), και όχι εκείνο με τη διαμήκη ανάπτυξη (Σχήμα 4-4). Σύμφωνα με τις αναλύσεις τους όμως, δεν αρκεί ο σωστός προσανατολισμός της γεώτρησης (ενότητα 4.2.8). Προϋπόθεση για την ανάπτυξη των εγκάρσιων ρωγμών αποτελεί η περιμετρική διάτρηση κατά τον άξονα της μέγιστης οριζόντιας τάσης, που παρουσιάστηκε παραπάνω. Η διαδικασία αυτή, ενώ βοηθά στην εκκίνηση της ρωγμής, ταυτόχρονα μειώνει την απαιτούμενη πίεση ρωγμάτωσης κατά τη διαμήκη διεύθυνση. Για την αποτροπή της διαμήκου ρωγμάτωσης, οι Hossain et al. (2000) εφιστούν μεγάλη προσοχή στη διατήρηση της πίεσης εισπίεσης έως μία τιμή, η οποία, μάλιστα, επηρεάζεται από την ανακατανομή των επιτόπου τάσεων μετά την αρχική ρωγμάτωση (ενότητα 4.2.6).



Σχήμα 4-3: Επιτυχής ρωγμάτωση με εγκάρσια ανάπτυξη (Crosby et al., 2001)



Σχήμα 4-4: Ανεπιτυχής ρωγμάτωση με διαμήκης ανάπτυξη (Crosby et al., 2001)

4.2 Διερεύνηση παραμέτρων που συνδέονται με την υδραυλική διάρρηξη

4.2.1 Υδραυλική αγωγιμότητα

Η υδραυλική αγωγιμότητα αποτελεί ιδιότητα του σχηματισμού, συμβολίζεται με K (L/T) και περιγράφει την ευκολία με την οποία ένα υγρό κινείται μέσα στους πόρους ή τις ρωγμές του σχηματισμού. Επίσης, εξαρτάται από την διαπερατότητά του, το βαθμό κορεσμού του, όπως και την πυκνότητα και το ιξώδες του αντίστοιχου υγρού. Ο προσδιορισμός της τιμής της υδραυλικής αγωγιμότητας μπορεί να γίνει μέσω της εξίσωσης του Darcy, εάν γνωρίζουμε την

παροχή του ρευστού Q (L^3/T), την επιφάνεια A (L^2) κάθετα στη ροή και την υδραυλική κλίση i , η οποία δίνεται παρακάτω:

$$\text{Νόμος Darcy:} \quad Q = K A i \quad (4-1)$$

Για ροή μέσα σε ρωγμή, οι Hoek και Bray (1977) παρουσίασαν ένα προσομοίωμα ροής ρευστού ανάμεσα σε δύο παράλληλες πλάκες. Με βάση αυτή τη θεωρία, ο νόμος του Darcy μετασχηματίζεται σε

$$Q = c H_L \quad (4-2)$$

όπου H_L : Διαφορά υδραυλικού φορτίου στο δοκίμιο (L)

$$c: \text{Αγωγιμότητα και ισχύει} \quad c = \frac{g e^3}{12 \nu L} \quad (4-3)$$

όπου g : Επιτάχυνση της βαρύτητας (L/T^2)

e : Άνοιγμα ανάμεσα στις παράλληλες πλάκες (L)

ν : Κινηματικό ιξώδες του ρευστού (L^2/T)

L : Μήκος των πλακών στη διεύθυνση της ροής (L)

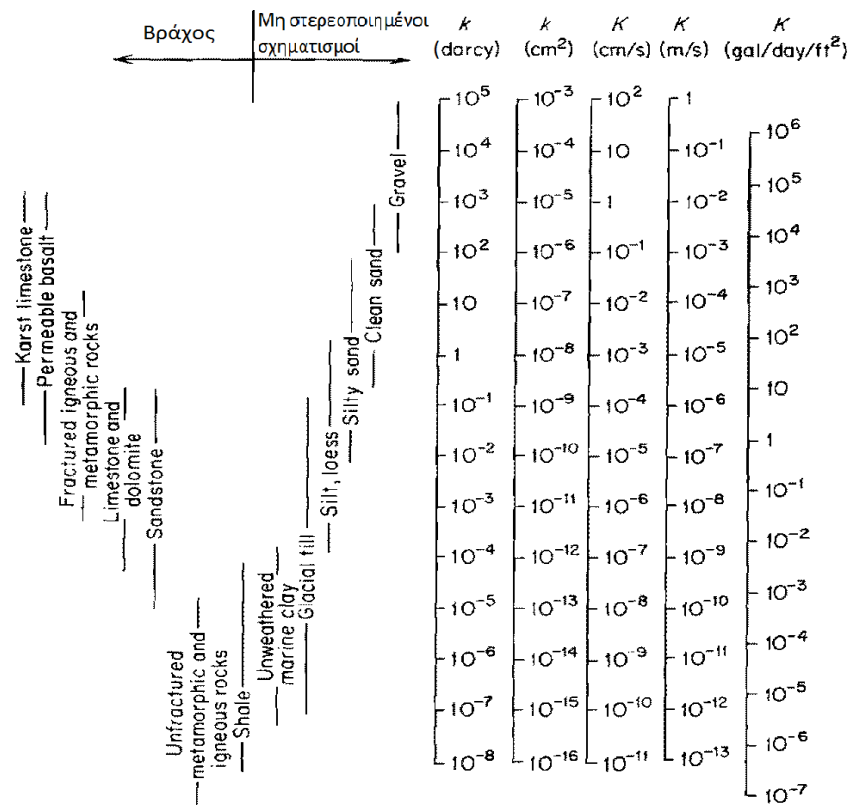
Στην περίπτωση των πολλαπλών ρωγμών, με κατάλληλο μετασχηματισμό της παραπάνω εξίσωσης (4-2) για μοναδική ρωγμή, προκύπτει η παρακάτω εξίσωση για τη υδραυλική αγωγιμότητα K , παράλληλα στην διεύθυνση των ρωγμών:

$$K = \frac{\lambda g e^3}{12 \nu} \quad (4-4)$$

όπου λ : Συχνότητα των ρωγμών ανά μονάδα μήκους (L^{-1})

Από την εξίσωση (4-4) διαφαίνονται και οι παράμετροι που επηρεάζουν την τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας, από την εφαρμογή της υδραυλικής διάρρηξης. Ειδικότερα, η τιμή του ανοίγματος της ρωγμής e παρουσιάζει μεγάλη βαρύτητα, εφόσον είναι υψωμένη στην τρίτη δύναμη, γι' αυτό και θα υπολογιστεί με τη χρήση διδιάστατου προσομοιώματος εξέλιξης του ανοίγματός τους. Επίσης, η συχνότητα των ρωγμών λ θα προκύψει από την συσχέτισή της με το ύψος των ρωγμών, ώστε να επιτρέψει την απρόσκοπτη διάδοση των ρωγμών. Τέλος, το κινηματικό ιξώδες ν αντιστοιχεί στο ρευστό που ρέει στο εσωτερικό των ρωγμών, το οποίο στην περίπτωση μας αναφέρεται στην περίοδο μετά την υδραυλική διάρρηξη. Ο Πίνακας 4-1 παρουσιάζει τα τυπικά εύρη των υδραυλικών αγωγιμοτήτων άρρηκτου πετρώματος K_0 , στην περίπτωση του ψαμμίτη και του αργιλικού σχιστόλιθου, σύμφωνα με τους Freeze and Cherry (1979).

Πίνακας 4-1: Εύρος τιμών της υδραυλικής αγωγιμότητας K για διάφορους σχηματισμούς (Freeze and Cherry, 1979)

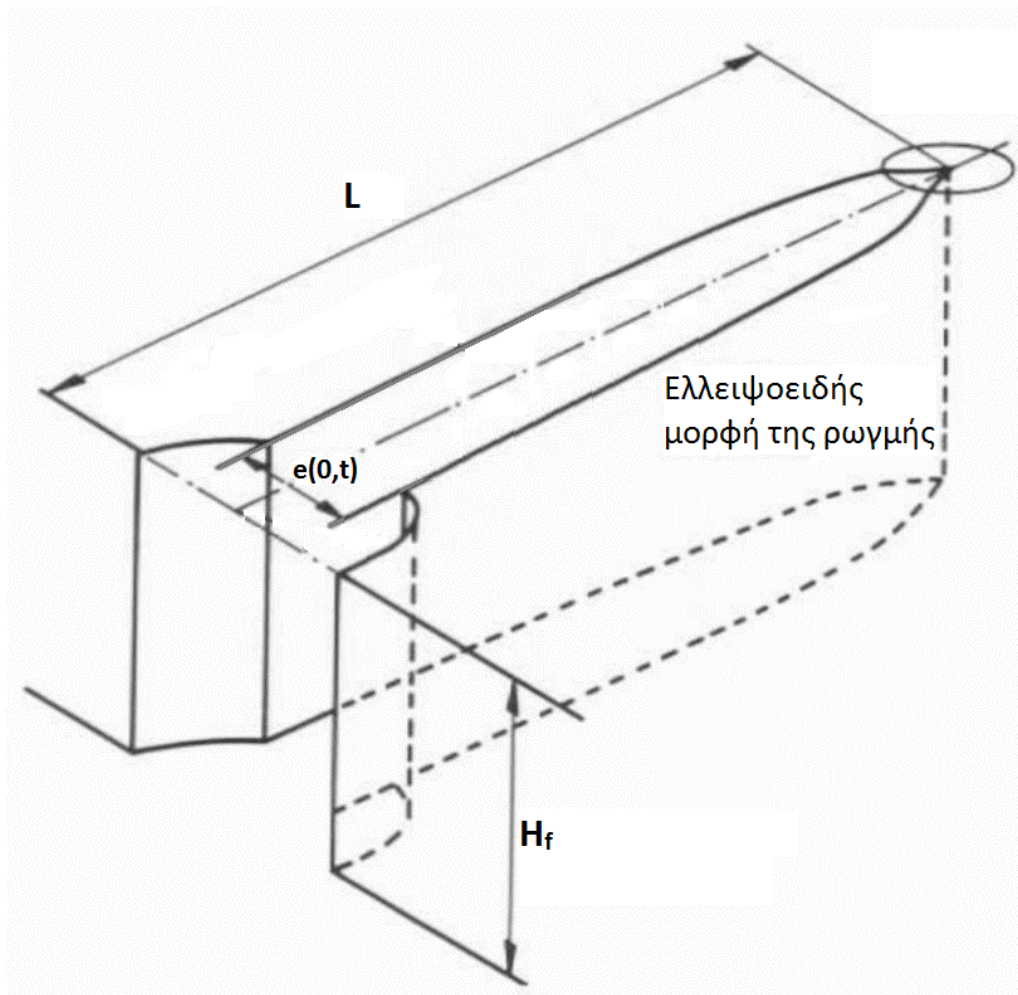


Η τιμή που υπολογίζεται με τη βοήθεια της εξίσωσης (4-4) αντιστοιχεί στην υδραυλική αγωγιμότητα, παράλληλα στις ρωγμές, αμέσως μετά την υδραυλική διάρρηξη. Τι συμβαίνει όμως, μετά την αποτόνωση της πίεσης του υγρού διάρρηξης, με την τιμή αυτή; Εδώ, εισέρχεται ο ρόλος των υλικών συγκράτησης της ρωγμής, τα οποία αναλαμβάνουν τις πιέσεις από το υφιστάμενο τασικό πεδίο και παρέχουν, ταυτόχρονα, αρκετή παραμένουσα αγωγιμότητα, ώστε να επιτρέπεται η ροή των υγρών και των αερίων στη ρωγμή. Ουσιαστικά, όπως εκτιμούν οι Gidley et al. (1989), αυτή είναι η τελική τιμή με την οποία θα παραχθεί το αέριο από το κοίτασμα. Η ονομαστική υδραυλική αγωγιμότητα των υλικών συγκράτησης εξαρτάται από 1) το είδος (συνήθως άμμος, κεραμικά ή βωξίτης) και 2) τη συγκέντρωση του υλικού, 3) την πίεση κλεισίματος της ρωγμής (αναλύεται παρακάτω στην ενότητα 4.1.9) και 4) τη θερμοκρασία του σχηματισμού. Ειδικότερα, η καταγραφή αυξημένων συνθηκών πίεσης και θερμοκρασίας μειώνουν την παραμένουσα αγωγιμότητα των ρωγμών. Συνεπώς, απαιτείται η επιλογή κατάλληλου είδους και συγκέντρωσης του υλικού αυτού, με σκοπό την επίτευξη της επιθυμητής υδραυλικής αγωγιμότητας, για την εκμετάλλευση των κοιτασμάτων. Για την περίπτωση των μη συμβατικών κοιτασμάτων, ο Britt (2012) συμπεραίνει πως οι απαιτήσεις για το μέγεθος της ρωγμής είναι μικρότερες από εκείνες του μήκους της, με συνέπεια την ευρεία χρήση της άμμου, ως υλικού συγκράτησης των ρωγμών.

4.2.2 Προσομοίωμα εξέλιξης του ανοίγματος των ρωγμών

Τα διδιάστατα προσομοιώματα μορφώθηκαν για τον προσδιορισμό των διαστάσεων μιας ρωγμής στο εσωτερικό άρρηκτου πετρώματος, με δεδομένα τις ιδιότητές του και τα μεγέθη

της υδραυλικής διάρρηξης. Η ανάλυση θα γίνει με τη χρήση του προσομοίωμα Geertsma-de Klerk, των Geertsma and de Klerk (1969), το οποίο αναπτύχθηκε για εφαρμογή σε κατακόρυφες γεωτρήσεις ψαμμιτικών σχηματισμών. Το γεγονός αυτό, δεν περιμένουμε να οδηγήσει σε σφάλματα την εφαρμογή στις οριζόντιες γεωτρήσεις, εφόσον πρόκειται για προσομοίωμα υπολογισμού της διάδοσης των ρωγμών σε οριζόντιο επίπεδο. Η μορφή των συνόρων της ρωγμής είναι προδιαγεγραμμένη (ελλειψοειδής), ενώ οι Geertsma and de Klerk (1969) έχουν θεωρήσει, επίσης, ορθογωνική πορεία διάδοσης και γραμμικώς ελαστική παραμόρφωση των τοιχίων της, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4-5. Οι παραδοχές που λαμβάνονται από το προσομοίωμα, είναι, πρώτον, αυτή του σταθερού ύψους ρωγμής και, δεύτερον, εκείνη της στιβαρότητας του εδάφους μόνο κατά το οριζόντιο επίπεδο. Έτσι προκύπτει, ότι το υπολογισθέν άνοιγμα της ρωγμής είναι ανεξάρτητο του ύψους της, αν εξαιρέσει κανείς τη συντοριακή συνθήκη στη γεώτρηση που ορίζει τη σταθερή τιμή της πίεσης εισπίεσης και συνδέεται με το ύψος αυτό. Επίσης, το άνοιγμα επηρεάζεται και από την παροχή ανά μονάδα ύψους, αλλά παραμένει σταθερό καθ' ύψος, καθώς θεωρούνται συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης (plane-strain condition), όπως παρουσιάζεται και στο Σχήμα 4-5. Η εφαρμογή του προσομοιώματος για πραγματικές συνθήκες αποδίδει μεγαλύτερες τιμές ανοίγματος από τα υπόλοιπα προσομοιώματα, οι οποίες, όμως, βρίσκονται πιο κοντά στην πραγματικότητα. Ο τύπος υπολογισμού του ανοίγματος στην αρχή της ρωγμής σε συνάρτηση με το χρόνο $e(0, t)$ δίνεται στην εξίσωση (4-5). Στη συνέχεια, δίνονται και οι συντελεστές C_5 , που αφορούν την εφαρμογή του προσομοιώματος είτε για το ένα, είτε και για τα δύο σκέλη της ρωγμής εκατέρωθεν της γεώτρησης. Σημειωτέον ότι ανάλογα με την επιλογή του συντελεστή οφείλει να προσαρμοστεί και η παροχή εισπίεσης, η οποία αναφέρεται στη γεώτρηση. Οι παράμετροι του προσομοιώματος μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες. Πρώτον, στις ιδιότητες του σχηματισμού ρωγμάτωσης, που περιλαμβάνουν το μέτρο διατμήσεως G , το λόγο του Poisson ν και το ύψος του κοιτάσματος H_f και, δεύτερον, στα δεδομένα για την εφαρμογή της υδραυλικής διάρρηξης, όπως είναι η παροχή εισπίεσης του υγρού q_0 , το δυναμικό ιξώδες του υγρού διάρρηξης μ και το χρόνο από την έναρξη της ρωγμάτωσης t .



Σχήμα 4-5: Απεικόνιση της διάδοσης της ρωγμής από κατακόρυφη γεώτρηση κατά το προσομοίωμα GdK (Geertsma and de Klerk, 1969)

$$e(0, t) = C_5 \left[\frac{(1-\nu)q_0^3 \mu}{GH_f^3} \right]^{\frac{1}{6}} t^{\frac{1}{3}} \quad (4-5)$$

όπου ν : Λόγος του Poisson

q_0 : Παροχή εισπίεσης του υγρού (L^3/T)

μ : Δυναμικό ιξώδες του υγρού διάρρηξης $\{M/(L \cdot T)\}$

G : Μέτρο διάτμησης του σχηματισμού $\{M/(L \cdot T^2)\}$

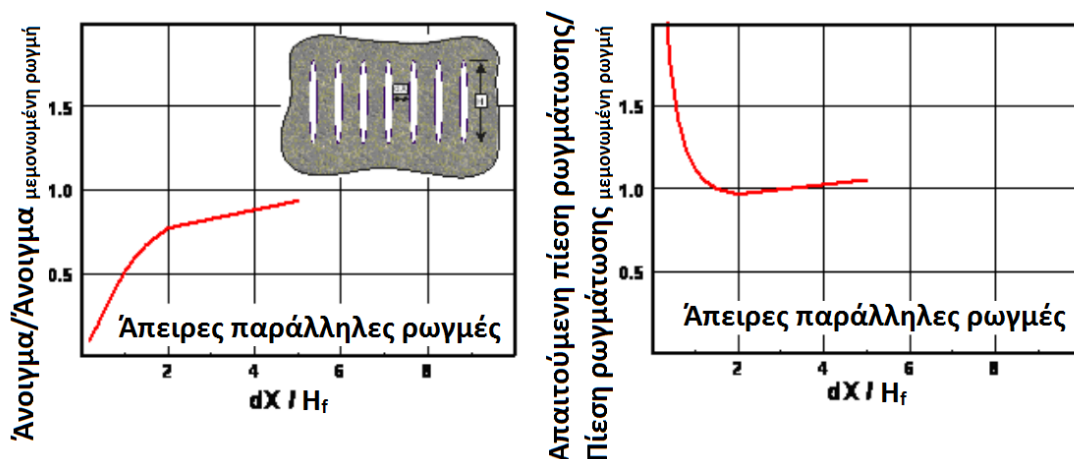
H_f : Ύψος της ρωγμής (L)

t : Χρόνος από την έναρξη της ρωγμάτωσης (T)

C_5 : Συντελεστής της εξίσωσης ανάλογα με τα θεωρούμενα σκέλη της ρωγμής, ο οποίος ισούται με 1.87 για μονό σκέλος και με 1.32 για δύο σκέλη

4.2.3 Συχνότητα ρωγμών

Η συχνότητα των ρωγμών, εκτός από την θετική επιρροή που εμφανίζει στο παραγωγικό στάδιο της γεώτρησης, όπως αποτυπώνεται στο άρθρο των Ostojic et al. (2011), διαδραματίζει σημαντικό ρόλο και στη διαδικασία της υδραυλικής διάρρηξης του σχηματισμού, σύμφωνα με τους Britt and Smith (2009). Αναφορικά με τη φυσική ρωγμάτωση του πετρώματος, καταλαβαίνουμε ότι η παρουσία της ευνοεί περισσότερο την αρχική πλήρωση των σχηματισμών (βλέπε ενότητα 3.2.3) και την πολυπλοκότητα του δικτύου των ρωγμών, παρά την τελική υδραυλική αγωγιμότητα των ίδιων των ρωγμών της υδραυλικής διάρρηξης. Επομένως, βάσει της θεώρησης άρρηκτου πετρώματος, η λογική για την απόλυτη εκμετάλλευση των κοιτασμάτων οδηγεί στην πύκνωση των ρωγμών ανά μονάδα μήκους της γεώτρησης. Παρ' όλ' αυτά, είναι δυνατόν η μείωση της απόστασης ανάμεσα στις ρωγμές να επηρεάσει αρνητικά τόσο το τελικό άνοιγμα μεταξύ τους, όσο και τις απαιτούμενες πιέσεις για τη ρωγμάτωση και, άρα, την αποτελεσματικότητά τους. Αυτό επαληθεύεται, από αναλύσεις με πεπερασμένα στοιχεία των Britt and Smith (2009), σε μεμονωμένη, σε δύο και σε άπειρες διαδοχικές ρωγμές. Πιο συγκεκριμένα, στην έρευνα αυτή, της οποίας τα αποτελέσματα δίνονται στο Σχήμα 4-6, βρέθηκε η σχέση ανάμεσα στο λόγο της απόστασης προς το ύψος των ρωγμών dX/H_f με τους λόγους τόσο του ανοίγματος, όσο και της απαιτούμενης πίεσης για τις άπειρες ρωγμές προς τη μεμονωμένη θεώρηση. Από το Σχήμα 4-6, προκύπτουν ορισμένα χρήσιμα συμπεράσματα για την επίδραση της απόστασης στις άλλες δύο μεταβλητές. Αρχικά, από το αριστερό σκέλος του σχήματος, παρατηρούμε ότι, για απόσταση μεγαλύτερη από 2 φορές το ύψος των ρωγμών, το επιμέρους άνοιγμά τους ξεπερνάει το 75% της μεμονωμένης ρωγμής, ενώ για τιμές του ίδιου λόγου μικρότερες της μονάδας, το άνοιγμα αυτό μειώνεται δραστικά. Παράλληλα, αναφορικά με την απαιτούμενη πίεση ρωγμάτωσης, ένας μικρός λόγος απόστασης των ρωγμών προς το ύψος τους οδηγεί σε κατακόρυφη αύξηση της πίεσης αυτής, όμως για λόγους μεγαλύτερους του 2, η απαιτούμενη πίεση ρωγμάτωσης του συνόλου των ρωγμών ταυτίζεται με εκείνη της μεμονωμένης. Το, αναμενόμενο, συμπέρασμα, δηλαδή η βελτίωση των παραμέτρων διάρρηξης με την αύξηση των αποστάσεων των ρωγμών, επαληθεύεται από τη συνθήκη $dX/H_f \geq 2$.

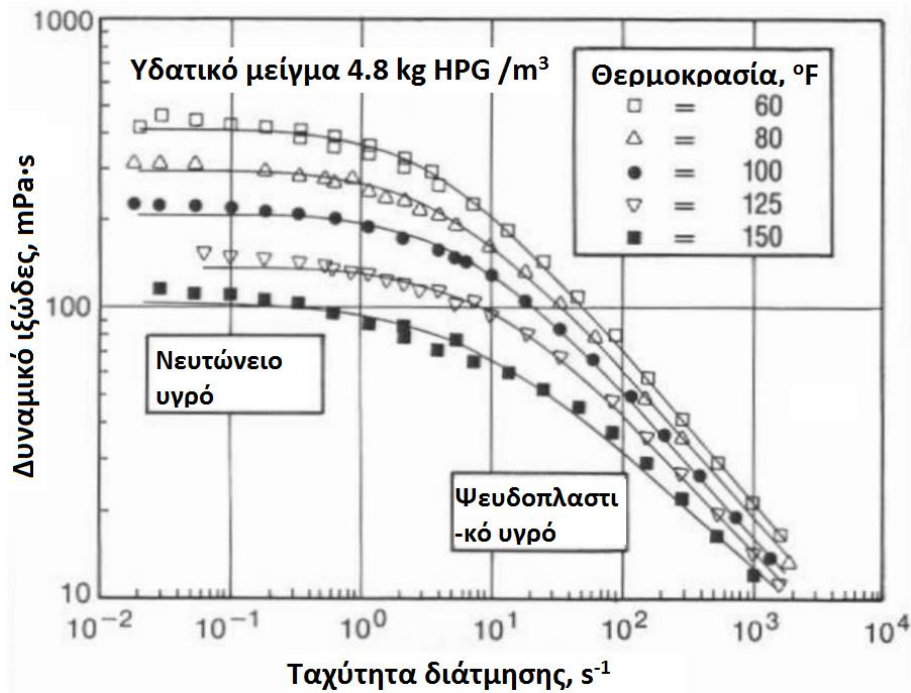


Σχήμα 4-6: Η επίδραση της συχνότητας των ρωγμών στο άνοιγμά τους και την απαιτούμενη πίεση ρωγμάτωσης (Britt and Smith, 2009)

4.2.4 Ιξώδες υγρών διάρρηξης

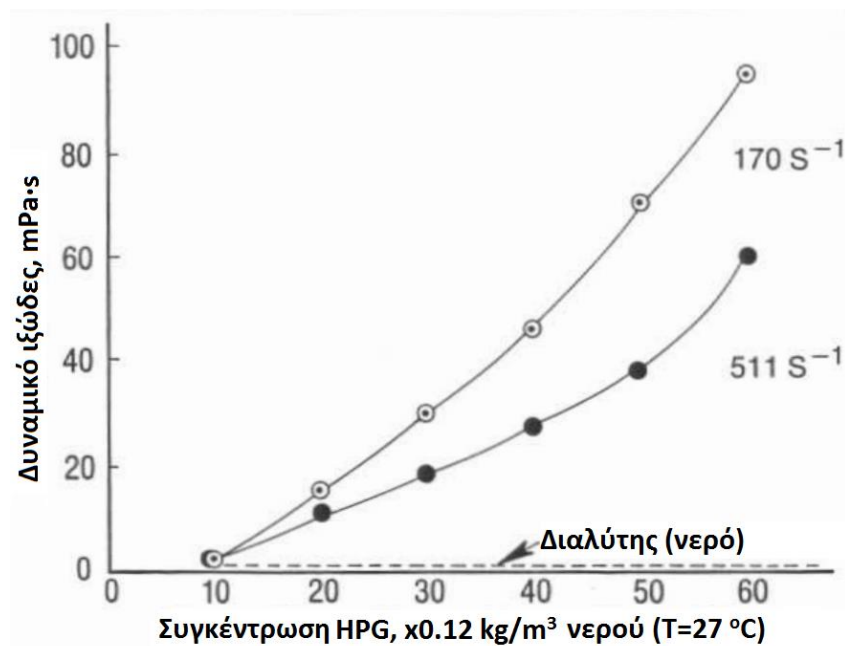
Στην περίπτωση της εκμετάλλευσης κοιτασμάτων σε ασυνήθιστα μεγάλα βάθη, όπου εφαρμόζεται και κατά κόρον η υδραυλική διάρρηξη, υπάρχει η ανάγκη χρήσης υγρών αυξημένου ιξώδους. Αυτά στοχεύουν στην αποτελεσματική διαπλάτυνση των ρωγμών και την επακόλουθη μεταφορά του υλικού συγκράτησης σε όλες τις ρωγμές, αλλά και σε μεγάλο μήκος μέσα στο σχηματισμό. Παράλληλα, η αύξηση του ιξώδους σημαίνει την μείωση των απωλειών του υγρού στο εσωτερικό του σχηματισμού και, έμμεσα, την γρηγορότερη αύξηση της πίεσης στη γεώτρηση. Από την άλλη πλευρά, μεγάλη σημασία δίνεται στη μείωση του ιξώδους του υγρού, μετά το πέρας της υδραυλικής διάρρηξης, ώστε να αποφευχθεί η αλλοίωση του σχηματισμού και να αφαιρεθεί ευκολότερα το υγρό από τις ρωγμές. Η απλούστερη και συνηθέστερη μορφή των υγρών διάρρηξης είναι εκείνα με υδατική βάση και περιεχόμενα πολυμερή, που διακρίνονται από μεσαίες τιμές ιξώδους (100 έως 10 mPa·s) (Gidley et al., 1989). Εκτός αυτού όμως, όλο και περισσότερο στη σύγχρονη υδραυλική διάρρηξη, χρησιμοποιείται επεξεργασμένο νερό, ίσου ιξώδους με του νερού (γύρω στο 1 mPa·s ανάλογα με τη θερμοκρασία), χωρίς ιξωδορυθμιστικά πρόσθετα, το οποίο παρουσιάζει ικανοποιητική αποτελεσματικότητα, σύμφωνα με τους *Gidley et al.* (1989). Η επιλογή των συστατικών του μείγματος εξαρτάται, εξίσου, από τις υφιστάμενες και τις επιθυμητές συνθήκες για την αποτελεσματικότητα της υδραυλικής διάρρηξης, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του σχηματισμού. Η τιμή του ιξώδους ενός υγρού αποτελεί συνάρτηση της ταχύτητας διάτμησης, της θερμοκρασίας περιβάλλοντος, της συγκέντρωσης των πολυμερών και του μοριακού τους βάρους, των χημικών αντιδράσεων στο εσωτερικό της γεώτρησης και του χρόνου παραμονής στο σχηματισμό.

Ανάλογα με τη είδος και τη σύσταση τους, τα υγρά διάρρηξης επηρεάζονται με διαφορετικό τρόπο από τους ποικίλους παράγοντες. Οι *Guillot and Dunand* (1985) συμπέραναν ότι τα μείγματα εισπίεσης παρουσιάζουν ψευδοπλαστική (shear thinning) ροή, λόγω των πολυμερών, στις συνθήκες εφαρμογής της υδραυλικής διάρρηξης. Αυτό σημαίνει ότι το ιξώδες τους μειώνεται καθώς αυξάνεται η ταχύτητα διάτμησης. Παρ' όλ' αυτά, εάν μειωθεί αρκετά η ταχύτητα διάτμησης, από πειράματα των *Guillot and Dunand* (1985), προκύπτει ότι τα υγρά συμπεριφέρονται ως Νευτώνεια, δηλαδή το ιξώδες τους είναι ανεξάρτητο από την ταχύτητα αυτή, φαινόμενο που αποτυπώνεται και στο Σχήμα 4-7. Ταυτόχρονα, και η αύξηση της θερμοκρασίας έχει παρόμοια αποτελέσματα στο ιξώδες των υγρών διάρρηξης. Πιο συγκεκριμένα, από το Σχήμα 4-7 παρατηρούμε ότι για μικρές τιμές της ταχύτητας διάτμησης, η αύξηση της θερμοκρασίας έχει μεγαλύτερο αντίκτυπο στο ιξώδες. Από την άλλη πλευρά, στην περίπτωση του υγρού εισπίεσης από επεξεργασμένο νερό χωρίς ιξωδορυθμιστικά πρόσθετα το ιξώδες του επηρεάζεται από διαφορετικούς παράγοντες. Όντας Νευτώνειο υγρό, το ιξώδες του νερού δεν είναι ευαίσθητο στη μεταβολή της ταχύτητας διάτμησης. Πάραυτα μεταβάλλεται με την αυξομείωση της θερμοκρασίας του, ενώ μικρότερες μεταβολές επιφέρουν οι αλλαγές στο pH και η επιβαλλόμενη πίεση, σύμφωνα με τους *Matthews and Russell* (1967). Η αποτίμηση της επιρροής αυτών των παραγόντων στην τελική τιμή του ιξώδους του νερού είναι δυνατή μέσω μιας σειράς εξισώσεων του *IAPWS* (2008). Επιπρόσθετα, οι *Geertsma and de Klerk* (1969) εντόπισαν ότι είναι δυνατόν ορισμένα υγρά εισπίεσης, με προσθήκη ειδικών ιξωδοαυξητικών, να παρουσιάζουν το μέγιστο ιξώδες σε συγκεκριμένη θερμοκρασία. Αυτό επιτρέπει, ουσιαστικά, τον έλεγχο της χρονικής στιγμής που θα «ενεργοποιηθεί» το υγρό διάρρηξης και αποτελεί σπουδαίο εργαλείο για τον προγραμματισμό και την αποτελεσματικότητα της εφαρμογής.



Σχήμα 4-7: Η επίδραση της ταχύτητας διάτμησης και της θερμοκρασίας στο δυναμικό ιξώδες υδατικού μείγματος 4.8 kg/m³ HPG (Guillot and Dunand, 1985)

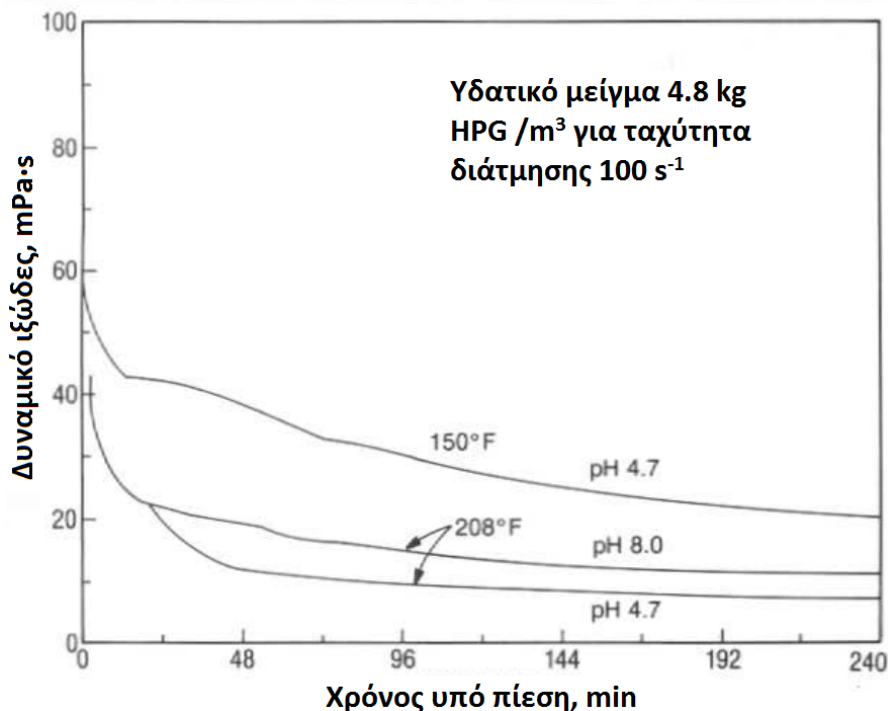
Αύξηση του ιξώδους στα υγρά εισπίεσης επιτυγχάνεται με την αύξηση της συγκέντρωσης των πρόσθετων πολυμερών. Σύμφωνα με μετρήσεις του Schlumberger (1984) με ιξωδόμετρο Couette στους 27 °C, οι οποίες παρατίθενται στο Σχήμα 4-8, το ιξώδες αυξάνεται ανάλογα με τη συγκέντρωση των πολυμερών. Επίσης, με το Σχήμα 4-8 επαληθεύεται και η επίδραση της ταχύτητας διάτμησης στην τιμή του ιξώδους.



Σχήμα 4-8: Η επίδραση της συγκέντρωσης των πολυμερών για δύο διαφορετικές ταχύτητες διάτμησης στο δυναμικό ιξώδες υδατικού μείγματος HPG, στους 27 °C (τα δεδομένα προέκυψαν

από μετρήσεις της Dowell Schlumberger με ιξωδόμετρο Couette στο Houston, το 1984)
(Schlumberger, 1984)

Τέλος, αντίκτυπο στο ιξώδες των υγρών διάρρηξης έχει και ο χρόνος που βρίσκονται υπό πίεση στις σωληνώσεις, στη γεώτρηση και στο σχηματισμό, όπως αποτυπώνεται και στο Σχήμα 4-9. Ειδικότερα, με αυτόν τον τρόπο λαμβάνεται υπόψη η επίδραση, πρώτον, των φαινομένων της διάτμησης, σε όρους ταχύτητας διάτμησης που συζητήθηκε νωρίτερα, και, δεύτερον, των χημικών αντιδράσεων, τα οποία, σύμφωνα με τους Gidley et al. (1989) οδηγούν στην υποβάθμιση των πολυμερών του υγρού. Οι χημικές αυτές αντιδράσεις περιλαμβάνουν την οξείδωση, την υδρόλυση, τη θερμική διάσπαση και τις αντιδράσεις λόγω ενζύμων. Οι παραπάνω μηχανισμοί επιταχύνονται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Επίσης, στο Σχήμα 4-9 φαίνεται και η αρνητική επίδραση της μείωσης του pH στο ιξώδες του υγρού.



Σχήμα 4-9: Επίδραση του χρόνου υπό πίεση, της θερμοκρασίας και του pH στο δυναμικό ιξώδες υδατικού μείγματος HPG (τα δεδομένα δόθηκαν από τον S.K. Knoll, με άδεια της Aqualon Co., Houston, (1984)) (Gidley et al., 1989)

Συνεπώς, τίθεται ως πρωταρχικός στόχος ο καθορισμός των μεταβλητών για τον προσδιορισμό της τελικής τιμής του ιξώδους κάθε υγρού. Ο προσδιορισμός των τιμών αυτών είναι απαραίτητος για την επικείμενη διερεύνηση της αύξησης της υδραυλικής αγωγιμότητας (Κεφάλαιο 5), ώστε να αποτιμηθεί η επίδραση του ιξώδους των υγρών διάρρηξης. Για το υγρό υδατικής βάσης με πρόσθετα πολυμερή η τιμή του ιξώδους θα προκύψει από κατάλληλο συνδυασμό των παραπάνω διαγραμμάτων, ενώ για το υγρό χαμηλού ιξώδους θα υπολογιστεί, μέσω μιας σειράς εξισώσεων, σε σχέση με την θερμοκρασία στο σχηματισμό και την πυκνότητα του υγρού.

4.2.5 Χρόνος από την έναρξη της ρωγμάτωσης

Η διάρκεια της υδραυλικής διάρρηξης υπεισέρχεται στον υπολογισμό τόσο του ανοίγματος των ρωγμών, όσο και της τελικής διαπερατότητας των σχηματισμών. Ταυτόχρονα, από το παραπάνω Σχήμα 4-9 συμπεραίνεται ότι υπάρχει χρονική εξάρτηση και του ιξώδους του υγρού διάρρηξης. Συνεπώς, η συνολική διάρκεια της υδραυλικής διάρρηξης οφείλει να είναι, από τη μία πλευρά, αρκετά μεγάλη, ώστε να επιτευχθεί η ρωγμάτωση με τη μικρότερη παροχή υγρού διάρρηξης, με σκοπό την αποφυγή της αλλοίωσης του πετρώματος (ειδικότερα στην ενότητα 4.1.1). Από την άλλη πλευρά, η διάρκεια αυτή πρέπει να είναι και αρκετά σύντομη, ώστε να ελαχιστοποιηθούν οι διαρροές στο εσωτερικό του σχηματισμού και να αποφευχθεί η μείωση του ιξώδους του υγρού διάρρηξης, λόγω υποβάθμισης των πολυμερών. Ουσιαστικά, η διάρκεια της ρωγμάτωσης εξαρτάται από την επαρκή διάδοση στο εσωτερικό του κοιτάσματος, αρχικά, των ρωγμών και, έπειτα, του υλικού συγκράτησής τους. Σύμφωνα με τους Gidley et al. (1989), για την αποφυγή των δυσμενών φαινομένων που αναφέρθηκαν παραπάνω, η ρωγμάτωση και η ακόλουθη τοποθέτηση του κοκκώδους υλικού διαρκούν, η κάθε μία, 60 λεπτά.

4.2.6 Τασικό πεδίο των σχηματισμών

Η κατανομή των επιτόπου τάσεων και η μεταβολή τους κατά τη διάρκεια της υδραυλικής διάρρηξης αποτελούν δύο από τους σημαντικότερους παράγοντες για την αποτελεσματικότητα της μεθόδου. Οι επιτόπου τάσεις ορίζουν τον προσανατολισμό διάδοσης και τη γεωμετρία των ρωγμών, τις απαιτούμενες πιέσεις εισπίεσης για την επίτευξη της ρωγμάτωσης, τις προδιαγραφές του υλικού διατήρησης των ρωγμών και, συνολικά, τη συμπεριφορά του πετρώματος κατά τη διαδικασία. Το υφιστάμενο τασικό πεδίο, σε ορισμένο βάθος, αποτελεί μια σύνθετη συνάρτηση των ιδιοτήτων κάθε σχηματισμού, της διαγένεσής του και της τεκτονικής δράσης στην περιοχή. Ειδικότερα, τα ώριμα κοιτάσματα, που ενδείκνυνται προς εκμετάλλευση (εκτενέστερα για τα κοιτάσματα στο Κεφάλαιο 3), εντοπίζονται, στην πλειοψηφία τους, σε βάθη που ξεπερνούν τα 2 χιλιόμετρα και έχουν μακρόχρονη ιστορία αλληπάλληλων καθιζήσεων και ανυψώσεων. Έτσι, ενώ οι οριζόντιες τάσεις αποτελούν ποσοστό της κατακόρυφης κατά τον αρχικό ενταφιασμό, μία, πιθανή, ανύψωση περιπλέκει τις σχέσεις μεταξύ των τάσεων. Ειδικότερα, η κλασική θεωρία της εδαφομηχανικής εξηγεί ότι η κατακόρυφη τάση τείνει να μειωθεί, καθώς εξαρτάται από το βάρος των υπερκείμενων σχηματισμών, ωστόσο οι πλευρικές τάσεις μειώνονται πολύ λιγότερο, λόγω του υφιστάμενου εγκιβωτισμού από τα γειτονικά πετρώματα. Έτσι, καταλήγουμε σε ένα καθεστώς μεγαλύτερων πλευρικών τάσεων από τις κατακόρυφες.

Εξαιτίας των πολλών παραγόντων που επηρεάζουν το επιτόπου τασικό πεδίο ενός σχηματισμού, ο Haimson (1978) θεωρεί ότι οι ακριβέστερες μέθοδοι εκτίμησής του είναι οι επιτόπου δοκιμές, όπως η δοκιμή της υδραυλικής ρωγμάτωσης. Ο Haimson (1978) αριθμεί, επίσης, τα πλεονεκτήματα της δοκιμής αυτής επί των υπολοίπων σε 1) τη δυνατότητα εφαρμογής σε πολύ μεγάλο βάθος (>5 km), 2) την ανεξαρτησία της από τις ελαστικές ιδιότητες του σχηματισμού στο πλαίσιο του υπολογισμού, 3) τον ακριβέστερο υπολογισμό των τάσεων σε μεγάλες επιφάνειες και όχι σημειακά και 4) τη δυνατότητα καταγραφής μεγάλων διαφορών ανάμεσα στις υφιστάμενες τάσεις. Όπως προκύπτει και από επιτόπου μετρήσεις του ίδιου στις Η.Π.Α. (Haimson, 1978), συνήθως η μέγιστη οριζόντια τάση είναι μεγαλύτερη από την κατακόρυφη, αν και μπορεί να συμβεί και το αντίθετο, η οποία συμπληρωματικά είναι μεγαλύτερη από την ελάχιστη οριζόντια τάση ($\sigma_H > \sigma_v > \sigma_h$ ή $\sigma_v > \sigma_H$)

> σ_h). Τα κριτήρια αυτά ορίζουν το είδος του επιπέδου αστοχίας, ενώ από αναλύσεις των Britt and Smith (2009) διαφαίνεται η επίδραση των διαφορετικών αυτών τασικών πεδίων στις πιέσεις που σχετίζονται με την υδραυλική διάρρηξη (ενότητα 4.2.9). Οι μετρήσεις (Σχήμα 4-10) και οι προκύπτουσες εξισώσεις συσχέτισης των τάσεων με το βάθος, εξισώσεις 4-6, 4-7 και 4-8, παρουσιάζονται στη συνέχεια. Η πλειονότητα των μετρήσεων αυτών, σε διαδοχικούς σχηματισμούς αργλικού σχιστόλιθου και ψαμμίτη, αποδίδει μεγαλύτερες δρώσες τάσεις στους πρώτους από ότι στους δεύτερους, φαινόμενο που εξηγείται στην ενότητα 3.3, και μάλιστα ο Warpinski (1989) εντόπισε διαφορές από 6.9 MPa έως 13.8 MPa. Παρ' ολ' αυτά, οι Kry and Gronseth (1983) παρατήρησαν και περιπτώσεις παρόμοιων επιτόπου τάσεων για διαδοχικούς σχηματισμούς, εξαιτίας της διαγένεσης και της μετακίνησης των σχηματισμών, φαινόμενα που εξηγήθηκαν παραπάνω.

$$\sigma_h = 20 \pm 0.16z \quad (4-6)$$

$$\sigma_H = 75 \pm 0.24z \quad (4-7)$$

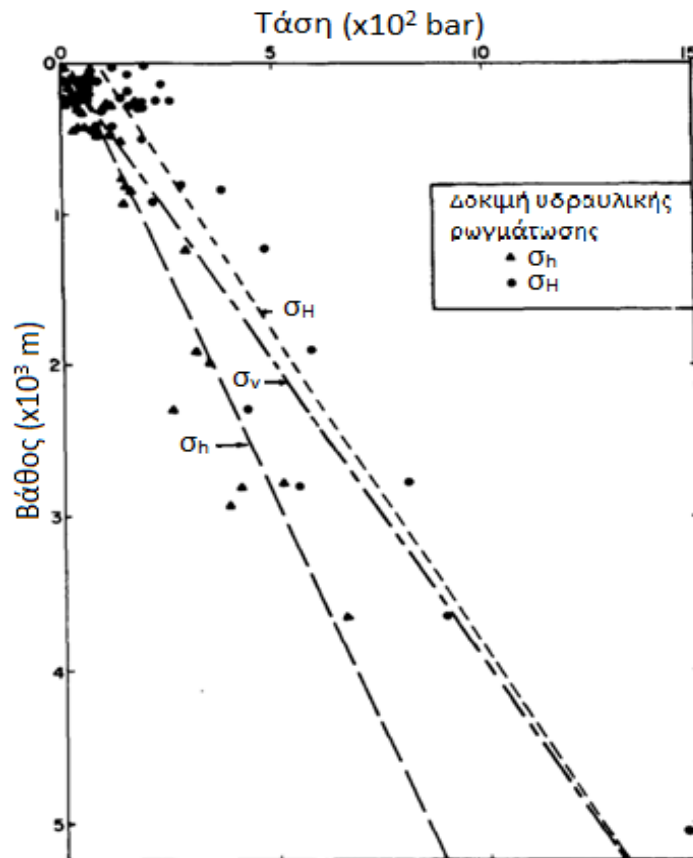
$$\sigma_v = 0.25z \quad (4-8)$$

όπου σ_h : η ελάχιστη κύρια οριζόντια τάση $\{M/(L \cdot T^2)\}$

σ_H : η μέγιστη κύρια οριζόντια τάση $\{M/(L \cdot T^2)\}$

σ_v : η κύρια κατακόρυφη τάση $\{M/(L \cdot T^2)\}$

z : το βάθος μέτρησης των τάσεων (L)



Σχήμα 4-10: Κατανομές των κύριων τάσεων (σε bar⁶) με το βάθος στις Η.Π.Α., με βάση μετρήσεις υδραυλικής διάρρηξης (Haimson, 1978)

Η εφαρμογή της υδραυλικής διάρρηξης επιφέρει αλλαγές στις πιέσεις του κοιτάσματος και, έμμεσα, στο τασικό πεδίο. Οι μεταβολές αυτές επικεντρώνονται στα φαινόμενα, πρώτον, της διαρροής του υγρού διάρρηξης στο εσωτερικό του σχηματισμού και, δεύτερον, της πτώσης της στάθμης του υγρού των πόρων. Πιο αναλυτικά, η διαρροή αυτή έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της πίεσης των πόρων, κατά τη διάρκεια της υδραυλικής διάρρηξης. Η μικρή διαπερατότητα των μη συμβατικών κοιτασμάτων αμβλύνει το φαινόμενο, καθώς το υγρό που εισέρχεται στο σχηματισμό αδυνατεί να διαφύγει γρήγορα και η πίεση των πόρων του αυξάνεται, δυσχεραίνοντας την εφαρμογή της μεθόδου. Ειδικότερα, η πίεση των πόρων επηρεάζει την πίεση του κλεισίματος της ρωγμής (ενότητα 4.2.9), γι' αυτό, και ο Cleary (1980) πρότεινε τη χρήση κατάλληλων χημικών προσθέτων ελέγχου της διαρροής του υγρού διάρρηξης (ενότητα 6.2.9). Από την άλλη, η πτώση της στάθμης του υγρού των πόρων, η οποία προέρχεται από την αναρροή των υγρών στην επιφάνεια που συζητήθηκε στην ενότητα 2.4, οδηγεί στην μείωση της πίεσης των πόρων. Φυσικό επακόλουθο αποτελεί η τάση για ογκομετρική μείωση του σχηματισμού, που έχει αποστραγγισθεί. Πάραυτα, λόγω της αλληλεπίδρασης του πετρώματος με τους άρρηκτους γειτονικούς σχηματισμούς του, αποτρέπεται η μείωση του όγκου του, η οποία μετατρέπεται, αντίθετα, σε μείωση των επιτόπου τάσεων του σχηματισμού, όπως περιγράφει ο Geertsma (1985).

⁶ 1 bar = 0.1 MPa

4.2.7 Αντοχή ψαμμίτη και αργιλικού σχιστόλιθου

Στη διαμόρφωση των αντοχών των μη συμβατικών κοιτασμάτων σημαίνοντα ρόλο διαδραματίζουν παράγοντες, όπως η διαγένεση μέσα στο χρόνο και η ορυκτολογία τους. Η διαφοροποίηση των αντοχών του σχιστόλιθου και του ψαμμίτη αιτιολογείται στην ενότητα 3.3 του προηγούμενου κεφαλαίου. Οι επιμέρους αντοχές, που μπορούν να μας δώσουν μία εικόνα για τα πετρώματα, είναι η εφελκυστική αντοχή σ_t και η αντοχή στη θραύση K_{Ic} .

Η εφελκυστική αντοχή σ_t είναι η αντοχή που οφείλει να υπερβεί η πίεση εισπίεσης για να ρωγματωθεί ένα άρρηκτο πέτρωμα κατά τη διαδικασία της υδραυλικής ρωγμάτωσης. Συνεπώς, εμπλέκεται στον υπολογισμό των πιέσεων ρωγμάτωσης και επαναρωγμάτωσης των πετρωμάτων, που θα αναπτυχθούν στη συνέχεια, και, ειδικότερα, ισούται με τη διαφορά ανάμεσα στις δύο. Οι τιμές της εφελκυστικής αντοχής μετρώνται με δοκιμές τύπου Brazilian Test. Ωστόσο, οι Guo et al. (1993) υπογραμμίζουν ότι το αποτέλεσμα των δοκιμών αυτών δε συμπίπτει, πάντα, με τη διαφορά των παραπάνω πιέσεων από τις πραγματικές δοκιμές υδραυλικής διάρρηξης, καθώς οι τιμές τους υπολογίζονται συναρτήσεως πολλών παραγόντων.

Η αντοχή στη θραύση K_{Ic} ενός σχηματισμού, σύμφωνα με International Society for Rock Mechanics Commission On Testing Methods (1988), εκφράζει την αντίστασή του στη διάδοση μιας ρωγμής ή την καταναλισκόμενη ενέργεια κατά τη δημιουργία νέων ρωγμών. Το μέγεθος αυτό συνδέει την αντοχή με το άνοιγμα της ρωγμής στα ψαθυρά υλικά. Η κύρια παράμετρος της αντοχής στη θραύση είναι ο συντελεστής τάσεων καταπόνησης K (Stress intensity factor), ο οποίος αντιπροσωπεύει, από τη μία πλευρά, τις τάσεις στη «μύτη» της ρωγμής υπό φορτίο και, από την άλλη, το ρυθμό απελευθέρωσης της διαθέσιμης ενέργειας στη διάδοση της ρωγμής. Οι μονάδες της δίνονται σε πίεση επί την τετραγωνική ρίζα της απόστασης, και πιο συγκεκριμένα, σε $\text{Pa}\sqrt{\text{m}}$. Όταν η τιμή του συντελεστή αυτού φτάνει την οριακή $K = K_{Ic}$, συμπίπτει με την αντοχή στη θραύση και σηματοδοτεί την εκκίνηση της ρωγμάτωσης.

4.2.8 Προσανατολισμός των ρωγμών

Η μηχανική πίσω από τον προσανατολισμό των ρωγμών έχει διερευνηθεί εκτενώς στη βιβλιογραφία, καθώς αποτελεί βασικό στοιχείο της αποτελεσματικότητας της υδραυλικής διάρρηξης. Η γενικότερη άποψη, όπως περιγράφουν οι Gidley et al. (1989) θεωρεί πως η διεύθυνση διάδοσης της ρωγμής είναι κάθετη στην ελάχιστη κύρια τάση, στην περίπτωση του ανισότροπου τασικού πεδίου, ενώ στην περίπτωση ισότροπης φόρτισης εισέρχεται και η παράμετρος των φυσικών ρωγματώσεων του σχηματισμού. Γίνεται, λοιπόν, κατανοητό πως υπάρχει μία άμεση σχέση του επιτόπου τασικού πεδίου (ενότητα 4.2.6), όπως προκύπτει και από αναλύσεις των Britt and Smith (2009), με τον εκάστοτε προσανατολισμό τους, η οποία καθορίζει τη βέλτιστη διεύθυνση διάδοσης της ρωγμής για την αποτελεσματικότερη υδραυλική διάρρηξη του κοιτάσματος.

4.2.9 Εξέλιξη των πιέσεων

Μετά το επιτόπου τασικό πεδίο, ιδιαίτερη σημασία έχει και ο προσδιορισμός των πιέσεων που αναπτύσσονται κατά την εφαρμογή της υδραυλικής διάρρηξης. Οι πιέσεις αποτελούν αντικείμενο τόσο του προγραμματιστικού, όσο και του εκτελεστικού τμήματος

του έργου. Αυτό προκύπτει από το γεγονός ότι, αποτελούν, ταυτόχρονα, ένδειξη της αποτελεσματικής ρωγμάτωσης του σχηματισμού, αλλά και της ενισχυμένης υδραυλικής αγωγιμότητας μετά την ολοκλήρωση της ρωγμάτωσης. Ένα παράδειγμα «ιδανικής» δοκιμής υδραυλικής ρωγμάτωσης παρατίθεται στο Σχήμα 4-11 και περιέχει όλα τα εμπλεκόμενα μεγέθη, τα οποία επεξηγούνται στη συνέχεια.

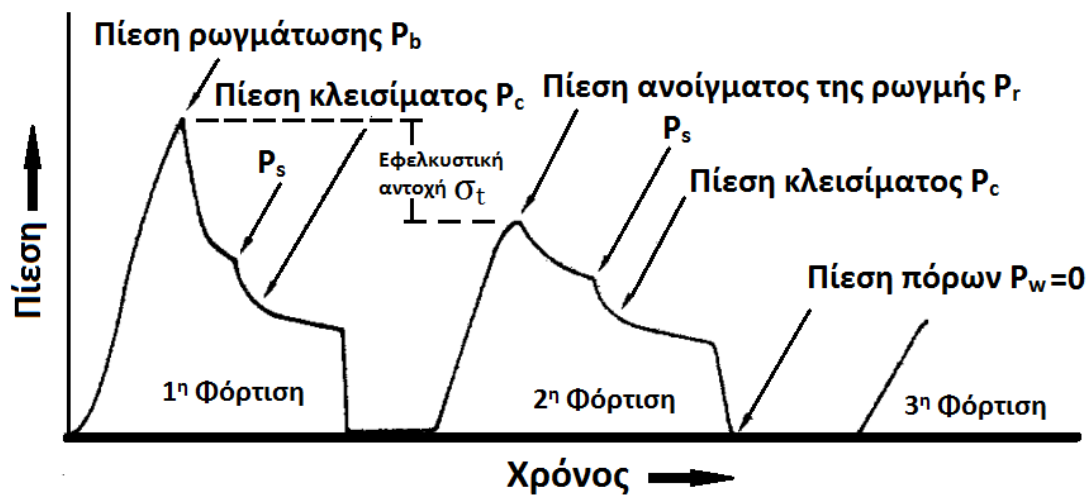
Η πίεση ρωγμάτωσης P_b (Breakdown pressure) αντιστοιχεί στην μέγιστη πίεση που παρατηρείται στη εφαρμογή της μεθόδου, τη στιγμή που το πέτρωμα ρωγματώνεται για πρώτη φορά. Στην τιμή της εμπεριέχεται και η εφελκυστική αντοχή του άρρηκτου πετρώματος σ_t , ενώ για μηδενική πίεση πόρων $P_w=0$ δίνεται από την εξίσωση (4-9). Η πίεση των πόρων και η επίδραση των αυξομειώσεων της (αναλυτικότερα στην ενότητα 4.2.6) παραλείπονται, συνήθως, από τους υπολογισμούς (Σχήμα 4-11), κάνοντας χρήση του νόμου των ενεργών τάσεων, σύμφωνα με τον Haimson (1978). Μία πρόσθετη απαίτηση για την απαλοιφή των δυναμικών φαινομένων της πίεσης των πόρων, όπως προσθέτει στο άρθρο του ο Haimson (1978), αποτελεί η εφαρμογή μικρής παροχής υγρού (της τάξης των λίγων L/min) στη δοκιμή, η οποία επηρεάζει και τη συνολική διάρκεια της υδραυλικής διάρρηξης (ενότητα 4.2.5). Σύμφωνα με την μηχανική της ρωγμάτωσης, η πίεση που απαιτείται για την εκκίνηση της ρωγμάτωσης μιας υπάρχουσας ρωγμής, πριν την επέκταση της ρωγμής, ονομάζεται πίεση κλεισίματος P_c (closure pressure) και ισούται με την τάση του σχηματισμού κάθετα στο επίπεδο ρωγμάτωσης. Αυτή αντιστοιχεί στην ελάχιστη οριζόντια κύρια τάση σ_h , όπως φαίνεται στην εξίσωση (4-10). Επίσης, η τάση αυτή έχει βρεθεί ότι ισούται και με την πίεση απευθείας μετά το κλείσιμο των ρωγμών P_s (Instantaneous Shut-In Pressure), ειδικότερα στις περιπτώσεις σχηματισμών χαμηλής διαπερατότητας για μικρές σχετικά εφαρμογές, όπως αυτοί που θα διερευνηθούν στο 0. Ο Geertsma (1985) σημειώνει, ότι, εξαιτίας της μεταβολής του τασικού πεδίου που παρουσιάζεται παραπάνω (ενότητα 4.2.6), η πίεση κλεισίματος τείνει να μειωθεί μετά την μείωση της πίεσης των πόρων.

Στην πραγματικότητα, πρώτα, λαμβάνονται οι μετρήσεις των πιέσεων από τη δοκιμή της υδραυλικής ρωγμάτωσης και, έπειτα, υπολογίζεται το τασικό πεδίο στο συγκεκριμένο βάθος του σχηματισμού, μέσω των ακόλουθων εξισώσεων. Ιδανικά, από την ανακυκλική φόρτιση του πετρώματος είναι δυνατόν να υπολογισθεί και η εφελκυστική αντοχή του. Πιο συγκεκριμένα, από την δεύτερη ή την τρίτη φόρτιση λαμβάνουμε, τώρα, ως μέγιστη την πίεση ανοίγματος της ρωγμής P_r (Fracture re-open pressure), αντί για την αρχική πίεση ρωγμάτωσης P_b . Η διαφορά ανάμεσα σε αυτές τις δύο είναι ίση με την εφελκυστική αντοχή του πετρώματος σ_t .

$$P_b = 3\sigma'_h - \sigma'_H + \sigma_t \quad (4-9)$$

$$P_c = \sigma'_h = P_s \quad (4-10)$$

όπου έχουμε θεωρήσει πίεση πόρων $P_w=0$ και όλα τα μεγέθη πίεσης και τάση έχουν μονάδες $\{M/(L \cdot T^2)\}$



Σχήμα 4-11: Παράδειγμα καμπύλης πίεσης – χρόνου (International Society for Rock Mechanics Commission On Testing Methods, 1987)

Κεφάλαιο 5 Παραμετρική διερεύνηση της αύξησης της υδραυλικής αγωγιμότητας

Σχηματισμοί, όπως ο ψαμμίτης και ο αργιλικός σχιστόλιθος, δύναται να περιέχουν μεγάλες ποσότητες υδρογονανθράκων, διακρίνονται, όμως, και από πολύ χαμηλές τιμές διαπερατότητας, που καθιστούν αδύνατη την εκμετάλλευσή τους με συμβατικά μέσα. Η χρήση της υδραυλικής διάρρηξης, όπως εξηγήσαμε στην ενότητα 4.1 επιτυγχάνει την αύξηση της υδραυλικής αγωγιμότητας του κοιτάσματος, μέσω της ρωγμάτωσης και της διευκόλυνσης της ροής του αερίου προς τη γεώτρηση. Με βάση τη μελέτη της επιστημονικής βιβλιογραφίας που έγινε στην ενότητα 4.2, θα ληφθούν αντιπροσωπευτικές τιμές για τις παραμέτρους που θα χρησιμοποιηθούν στην επικείμενη διερεύνηση. Οι τιμές αυτές θα συγκεντρωθούν σε ένα πίνακα στο τέλος της ενότητας 5.1. Ταυτόχρονα, στην ίδια ενότητα γίνεται μία προσπάθεια να προσδιοριστούν και οι σχέσεις αλληλεπίδρασης μεταξύ των παραμέτρων αυτών. Με αυτόν το τρόπο, θα προκύψουν χρήσιμα συμπεράσματα τόσο για την επίδραση των μεταβλητών, όσο και για την κατάλληλη παραμετροποίηση με στόχο τη βέλτιστη σχεδίαση ενός έργου υδραυλικής διάρρηξης. Στη δεύτερη ενότητα 5.2 παρουσιάζεται η παραμετρική ανάλυση της αύξησης, πρώτον, του ανοίγματος και, δεύτερον, της υδραυλικής αγωγιμότητας των ρωγμών, λόγω την υδραυλική διάρρηξης. Οι απαραίτητοι υπολογισμοί θα γίνουν με τη χρήση εξισώσεων, οι οποίες έχουν ήδη σχολιασθεί στην ενότητα 4.2. Στο τέλος του παρόντος κεφαλαίου παρατίθενται και τα συμπερασματικά σχόλια των αποτελεσμάτων της διερεύνησης της υδραυλικής αγωγιμότητας.

5.1 Παράμετροι διερεύνησης της υδραυλικής αγωγιμότητας

5.1.1 Στάδια ανάλυσης και παράμετροι

Το εύρος της υδραυλικής αγωγιμότητας θα διερευνηθεί μέσω μίας παραμετρικής ανάλυσης. Από την ανάλυση αυτή, θα προκύψουν οι διαφορές που εντοπίζονται στην εφαρμογή της υδραυλικής διάρρηξης ανάλογα με το σχηματισμό ρωγμάτωσης. Συγκεκριμένα, επιλέγονται δύο κοιτάσματα, ψαμμίτη και αργιλικού σχιστόλιθου, θεωρώντας παρόμοιο επιτόπου τασικό πεδίο και τις αντίστοιχες αντοχές τους. Ακολούθως, θα υπολογιστούν οι πιέσεις ρωγμάτωσης και κλεισίματος των ρωγμών, που αποτελούν σημαντικά μεγέθη για τη σχεδίαση ενός έργου υδραυλικής διάρρηξης. Από τη διερεύνηση αυτή θα αποτυπωθεί, επίσης, η επίδραση του είδους των υγρών εισπίεσης, με τη μορφή του διαφορετικού ιξώδους, στην τελική τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας. Στο τέλος της ενότητας παρατίθενται και οι απλουστευτικές παραδοχές που ελήφθησαν στην ανάλυση, μαζί με τις αβεβαιότητες που προέκυψαν κατά την παραμετροποίηση της.

Στο σενάριο εφαρμογής, οι ρωγμές θα εκκινούν από μία οριζόντια γεώτρηση και θα διαδίδονται οριζόντια σε σταθερά διαστήματα μεταξύ τους. Ειδικότερα, το άνοιγμα των ρωγμών, που θα προκύψει από κατάλληλο προσομοίωμα, και η συχνότητά τους είναι απαραίτητα μεγέθη για τον υπολογισμό και τη βελτιστοποίηση της υδραυλικής αγωγιμότητας. Η επιλογή των τιμών για τις παραμέτρους και τις παραδοχές του σεναρίου οφείλει να είναι λογική και να ακολουθείται από επαρκή αιτιολόγηση. Ειδικότερα, οι παραδοχές ορίζουν σε μεγάλο βαθμό την αληθοφάνεια της ανάλυσης και περιλαμβάνουν,

μεταξύ άλλων, το τασικό πεδίο, το βάθος ρωγμάτωσης, τη θερμοκρασία του κοιτάσματος, μαζί με τις αντοχές και το ύψος του σχηματισμού διάρρηξης και των γειτονικών στρωμάτων του.

5.1.2 Τασικό πεδίο ψαμμίτη και αργιλικού σχιστόλιθου

Στην ανάλυση θεωρούνται παρόμοιες τιμές τάσεων για τον ψαμμίτη και τον αργιλικό σχιστόλιθο (Πίνακας 5-1). Ειδικότερα, η περίπτωση αυτή, αν και δεν αντιπροσωπεύει το τασικό πεδίο διαδοχικών σχηματισμών ψαμμίτη και αργιλικού, δύναται να αντιστοιχεί σε σχηματισμούς από διαφορετικές λεκάνες. Οι τιμές ελήφθησαν από επιτόπου μετρήσεις με τη βοήθεια της δοκιμής της υδραυλικής διάρρηξης, οι οποίες παρατίθενται στο Σχήμα 4-10. Οι τάσεις στο θεωρούμενο βάθος των 2 χιλιομέτρων διακρίνονται από τη σχέση $\sigma_H > \sigma_V > \sigma_h$ (Πίνακας 5-1).

Πίνακας 5-1: Επιτόπου τασικό πεδίο σχηματισμών ψαμμίτη και αργιλικού σχιστόλιθου στο βάθος των δύο χιλιομέτρων (Haimson, 1978)

Σχηματισμός	Μέγιστη οριζόντια τάση σ_H (MPa)	Κατακόρυφη τάση σ_V (MPa)	Ελάχιστη οριζόντια τάση σ_h (MPa)
Ψαμμίτης	55.5	50.0	34.0
Αργιλικός Σχιστόλιθος	55.5	46.0	34.0

5.1.3 Αντοχή του ψαμμίτη και του αργιλικού σχιστόλιθου

Η διαφοροποίηση των αντοχών των δύο σχηματισμών μας απασχόλησε στην ενότητα 3.3. Εκεί, επίσης, εντοπίστηκαν και τα γενεσιουργά αίτια των διαφορετικών πλευρικών τάσεων που υφίστανται, ειδικότερα στην περίπτωση που εντοπίζονται ως διαδοχικοί εδαφικοί σχηματισμοί (ίδιο βάθος). Η επίδραση των τάσεων αυτών στις αναπτυσσόμενες πιέσεις, οι οποίες ευθύνονται για τη δημιουργία και τη διατήρηση των ρωγμών, διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην ακριβή προσομοίωση της διαδικασίας ρωγμάτωσης. Στην αριθμητική λύση θα θεωρήσουμε ορισμένες αντιπροσωπευτικές τιμές για την αντοχή του ψαμμίτη και του αργιλικού σχιστόλιθου, αντίστοιχα (Πίνακας 5-2).

Πίνακας 5-2: Εφελκυστική αντοχή και αντοχή σε θραύση των σχηματισμών

Σχηματισμός	Εφελκυστική αντοχή σ_t (MPa)	Αντοχή σε θραύση K_{Ic} (MPa \sqrt{m})
Ψαμμίτης	8 [1]	1.6 [2]
Αργιλικός Σχιστόλιθος	3 [1]	0.6 [2]

Πηγές: [1] (Perras and Diederichs, 2014), [2] (Brechtel et al., 1978)

5.1.4 Πιέσεις κατά την υδραυλική διάρρηξη

Η υφιστάμενη πίεση στο εσωτερικό της ρωγμής, μετά την υδραυλική ρωγμάτωση, ονομάζεται πίεση κλεισίματος της ρωγμής και ισούται με την επιτόπου ελάχιστη οριζόντια κύρια τάση. Επιπρόσθετα, η διαφορά της πίεσης αυτής με τις αντίστοιχες πιέσεις των γειτονικών σχηματισμών της έχει αποδειχθεί πως επηρεάζει σημαντικά την κατακόρυφη διάδοση των ρωγμών. Αυτό, σύμφωνα με τους Gidley et al. (1989) αποτελεί ένα εργαλείο για τον υπολογισμό, έστω και προσεγγιστικά, της επέκτασης του ύψους των ρωγμών έξω από τα άνω και κάτω όρια του σχηματισμού. Στο συγκεκριμένο σενάριο υδραυλικής διάρρηξης, θα θεωρήσουμε γειτονικούς σχηματισμούς με πολύ μεγαλύτερες οριζόντιες τάσεις, γεγονός που αποτελεί συχνά την πραγματικότητα για τα κοιτάσματα που μελετούμε. Έτσι, μπορούμε με ασφάλεια να θεωρήσουμε, ότι η διάδοση της ρωγμής περιορίζεται στο εσωτερικό του κοιτάσματος και να αντιστοιχίσουμε το ύψος, της από τα δημοσιευμένα στοιχεία σχηματισμών του Jarvie (2012). Οι πιέσεις προκύπτουν από αντικατάσταση των επιτόπου τάσεων και των αντοχών που επιλέχθηκαν νωρίτερα, στις εξισώσεις (4-9) και (4-10) της ενότητας 4.2.9. Οι τελικές τιμές τους, για κάθε σχηματισμό, παρουσιάζονται παρακάτω (Πίνακας 5-3).

Πίνακας 5-3: Οι πιέσεις ρωγμάτωσης και κλεισίματος των ρωγμών των σχηματισμών

Σχηματισμός	Πίεση ρωγμάτωσης P_b (MPa)	Πίεση κλεισίματος της ρωγμής P_c (MPa)
Ψαμμίτης	54.5	34.0
Αργιλικός Σχιστόλιθος	49.5	34.0

5.1.5 Χρόνος από την έναρξη της ρωγμάτωσης

Η διάρκεια της υδραυλικής διάρρηξης εξαρτάται από διάφορους παράγοντες (περισσότερα στην ενότητα 4.2.5), όπως το απαιτούμενο μήκος διάδοσης των ρωγμών και η επαρκής τοποθέτηση του υλικού συγκράτησής της σε όλο αυτό το μήκος. Προκύπτει, λοιπόν, ότι η επίδραση των περιοριστικών παραγόντων είναι αυτή ορίζει τη μέγιστη διάρκεια του σταδίου της ρωγμάτωσης. Από διάφορα προσομοιώματα της διαδικασίας της υδραυλικής διάρρηξης στη βιβλιογραφία (Gidley et al. (1989) και Adachi et al. (2006), παρατηρείται ότι η διάρκεια αυτή ισούται, συνήθως, με 60 λεπτά. Με βάση αυτή την τιμή, λαμβάνουμε και για την ακόλουθη ανάλυση ως μέγιστη τιμή για το χρόνο από την έναρξη της ρωγμάτωσης $t = 3600 \text{ s}$.

5.1.6 Ιξώδες των υγρών διάρρηξης

Από την μελέτη της μηχανικής, που διέπει την υδραυλική διάρρηξη, και την εμπειρική εκτίμηση των ειδικών, οι Gidley et al. (1989) υποστηρίζουν ότι η αποτελεσματικότερη εφαρμογή της απαιτεί τη χρήση υγρών με μεγάλο ιξώδες. Μεγάλες και μικρές τιμές ιξώδους επιτυγχάνονται στα υγρά με χρήση πολυμερών και αποκλειστικά επεξεργασμένου νερού, αντίστοιχα. Στην παρούσα διερεύνηση, θα θεωρήσουμε τόσο ένα υγρό, μεσαίου ιξώδους, με υδατική βάση και πρόσθετα πολυμερή υδροξυ-προπυλικής κυάμοψης (Hydroxypropyl guar ή HPG), όσο και ένα υγρό, χαμηλού ιξώδους, με βάση το νερό και καθόλου ιξωδορυθμιστικά πρόσθετα.

Ειδικότερα στην περίπτωση ενός υγρού με πρόσθετα πολυμερή, είδαμε και στην ενότητα 4.2.4 ότι η τιμή του ιξώδους του εξαρτάται από 1) την ταχύτητα διάτμησης, 2) τη θερμοκρασία περιβάλλοντος, 3) τη συγκέντρωση των πολυμερών, 4) τις χημικές αντιδράσεις στο εσωτερικό της γεώτρησης και 5) το χρόνο παραμονής στο σχηματισμό. Όπως γίνεται κατανοητό από τη μελέτη της επίδρασης των μεταβλητών αυτών στην ίδια ενότητα, το ιξώδες μειώνεται καθώς αυξάνονται η ταχύτητα διάτμησης, η θερμοκρασία περιβάλλοντος και ο χρόνος στο σχηματισμό, και αυξάνεται όσο αυξάνεται η συγκέντρωση των πολυμερών. Οπότε οφείλουμε, πρώτα, να καθορίσουμε τις παραμέτρους αυτές και, έπειτα, να προσδιορίσουμε την τελική τιμή του ιξώδους. Από την άλλη πλευρά, όπως υπογραμμίστηκε στην ενότητα 4.2.4, το ιξώδες του υγρού διάρρηξης από επεξεργασμένο νερό μεταβάλλεται ανάλογα με τις υφιστάμενες συνθήκες pH, πίεσης και θερμοκρασίας. Ο IAPWS (2008) έχει προβεί στη σύνθεση μία εξίσωσης υπολογισμού του ιξώδους του νερού, με παραμέτρους τη θερμοκρασία και την πυκνότητά του. Η θερμοκρασία λαμβάνεται ίδια με τη θεώρηση για το έτερο υγρό ($T=38 \text{ }^\circ\text{C}$), ενώ η πυκνότητα του νερού σε αυτή τη θερμοκρασία ισούται με 993 kg/m^3 . Ο Πίνακας 5-4 περιέχει τις τυπικές τιμές των μεγεθών που θεωρήσαμε με σκοπό την εκτίμηση του ιξώδους των υγρών διάρρηξης.

Εντέλει, οι τιμές για τα ιξώδη των υγρών εισπίεσης (Πίνακας 5-5), που θα εισαχθούν στην ανάλυση, προκύπτουν από το συνδυασμό των παραπάνω παραμέτρων με τη βοήθεια των σχημάτων της ενότητας 4.2.4. Οφείλει να σημειωθεί, επίσης, ότι λόγω της φθίνουσας καμπύλης ιξώδους-χρόνου, η τιμή στην περίπτωση του υγρού με προσθήκη πολυμερών, αποτελεί μία μέση τιμή του εύρους του.

Πίνακας 5-4: Τυπικές τιμές μεγεθών για την εκτίμηση του ιξώδους των υγρών ρωγμάτωσης

Ταχύτητα διάτμησης (s^{-1})	100
Θερμοκρασία περιβάλλοντος ($^{\circ}C$)	38
Συγκέντρωση πολυμερών (kg/m^3)	4.8
Χρόνος στο σχηματισμό (s)	3600
Πυκνότητα νερού (kg/m^3)	993

Πίνακας 5-5: Οι τιμές του ιξώδους των υγρών που θα χρησιμοποιηθούν στη διερεύνηση

Υγρό	Τιμή δυναμικού ιξώδους μ (MPa·s)
Με υδατική βάση και πολυμερή HPG	$5 \cdot 10^{-8}$ [1]
Με υδατική βάση	$6.8 \cdot 10^{-10}$ [2]

Πηγές: [1] (Gidley et al., 1989), [2] (IAPWS, 2008)

5.1.7 Ιδιότητες των σχηματισμών και παράμετροι του προσομοιώματος του ανοίγματος των ρωγμών

Η εφαρμογή ενός προσομοιώματος για τον υπολογισμό της γεωμετρίας των ρωγμών, που προκαλούνται από την υδραυλική διάρρηξη, απαιτεί τον προσδιορισμό ορισμένων παραμέτρων. Στην ανάλυση μας, χρησιμοποιήθηκε το διδιάστατο προσομοίωμα GdK των Geertsma and de Klerk (1969). Όλες οι παραδοχές και οι παράμετροι που υπεισέρχονται σε αυτό, αναλύονται στην ενότητα 4.2.2, ενώ δίνεται ξανά, ο τύπος υπολογισμού του ανοίγματος (εξίσωση 4-5). Σημειωτέον, ότι υπολογίζουμε την τιμή του ανοίγματος στην αρχή της ρωγμής, ενώ, όσο προχωράμε κατά μήκος αυτής στο προσομοίωμα, τα τοιχώματα της εμφανίζουν ελλειψοειδή μορφή. Οι παράμετροι της προσομοίωσης χωρίζονται, πρώτον, στις βασικές ιδιότητες ανά σχηματισμό και, δεύτερον, στα δεδομένα για την εφαρμογή της υδραυλικής διάρρηξης, ενώ η επιλογή τους έγινε μετά τη μελέτη της αντίστοιχης βιβλιογραφίας (Πίνακας 5-6).

$$e(0, t) = C_5 \left[\frac{(1-\nu)q_0^3 \mu}{GH_f^3} \right]^{\frac{1}{6}} t^{\frac{1}{3}} \quad (4-5)$$

όπου ν : Λόγος του Poisson

q_0 : Παροχή εισπίεσης του υγρού (m^3/s)

μ : Δυναμικό ιξώδες του υγρού (MPa·s)
 G : Μέτρο διάτμησης του σχηματισμού (MPa)
 H_f : Ύψος της ρωγμής (m) $\equiv H_R$: Ύψος του κοιτάσματος (m)
 t : Χρόνος από την έναρξη της ρωγμάτωσης (s)
 C_5 : Συντελεστής της εξίσωσης ανάλογα με τα θεωρούμενα σκέλη της ρωγμής, ο οποίος ισούται με 1.87 για μονό σκέλος και με 1.32 για δύο σκέλη

Πίνακας 5-6: Τιμές μεγεθών για τον υπολογισμό του ανοίγματος των ρωγμών

Παράμετροι	Ψαμμίτης	Αργιλικός σχιστόλιθος
Γεωλογικά χαρακτηριστικά		
Μέτρο διάτμησης G (MPa)	8000 [1]	4000 [1]
Λόγος Poisson ν	0.25	
Ύψος κοιτάσματος H_R (m)	30 [2]	
Δεδομένα υδραυλικής διάρρηξης		
Παροχή στο στόμιο της ρωγμής q_0 (m ³ /s)	0.066 [3]	
Χρόνος από την έναρξη t (s)	0 – 3600 [3,4]	
Ιξώδες υγρού εισπίεσης μ (MPa·s)	6.8·10 ⁻¹⁰ [5] έως 5·10 ⁻⁸ [3]	

Πηγές: [1] (Hoek and Diederichs, 2006), [2] (Jarvie, 2012), [3] (Gidley et al., 1989), [4] (Adachi et al., 2006), [5] (IAPWS, 2008)

5.1.8 Συχνότητα των ρωγμών κατά μήκος της γεώτρησης

Σύμφωνα με τη μελέτη των ρωγμών στην ενότητα 4.2.3, η απόσταση ανάμεσα στις ρωγμές διαδραματίζει μεγάλο ρόλο στη διαδικασία της υδραυλικής διάρρηξης και, σε επόμενο βήμα, στην παραγωγή του φυσικού αερίου. Συγκεκριμένα, από αναλύσεις με πεπερασμένα στοιχεία οι Britt and Smith (2009) διαπίστωσαν ότι, η απόσταση αυτή προς το ύψος των ρωγμών dX/H_f επηρεάζει το άνοιγμα των ρωγμών και την απαιτούμενη πίεση ρωγμάτωσης. Η σχέση αυτή αποτυπώνεται και στο Σχήμα 4-6.

Θεωρώντας το σενάριο των άπειρων ρωγμών, προκύπτει μία διαφοροποίηση του τελικού ανοίγματος και της απαιτούμενης πίεσης σε σχέση με τη μεμονωμένη ρωγμή. Πιο

συγκεκριμένα, παρατηρείται ότι για απόσταση μεγαλύτερη από 2 φορές το ύψος των ρωγμών, πρώτον, η αρνητική επιρροή στο άνοιγμα τους μειώνεται κάτω από 25% και, δεύτερον, η επιρροή στην πίεση ρωγμάτωσης γίνεται αμελητέα. Συνεπώς, από το θεωρούμενο ύψος των ρωγμών, το οποίο θα ληφθεί ίσο με εκείνο του κοιτάσματος, μπορούμε να λάβουμε μια τιμή για την αποδεκτή απόσταση ανάμεσα στις ρωγμές της γεώτρησης. Παράλληλα, υπενθυμίζεται ότι η συχνότητα διαδραματίζει και θετικό ρόλο στον υπολογισμό της υδραυλικής αγωγιμότητας, καθώς αυξάνει τον αριθμό των ρωγμών ανά μέτρο (ενότητα 4.2.3). Στην επικείμενη διερεύνηση, για ύψος ρωγμών $H_f = 30$ m και θεωρούμενο λόγο $dX/H_f = 2$, η ζητούμενη συχνότητα των ρωγμών ανά μέτρο μήκος λ ισούται με $2/60 = 0,033$. Η τιμή αυτή είναι η βέλτιστη, σύμφωνα με αναλύσεις που διερευνήθηκαν στην ενότητα 4.2.3. Επίσης, στην ανάλυση θα διερευνηθεί και η επίδραση αυτού του παράγοντα στην υδραυλική αγωγιμότητα των σχηματισμών, λαμβάνοντας διάφορες τιμές για τον λόγο dX/H_f από το Σχήμα 4-6. Οι τιμές του λόγου αυτού που θα διερευνηθούν στην ανάλυση δίνονται, για ευκολία, παρακάτω μαζί με την ποσοστιαία επίδρασή του στο άνοιγμα των ρωγμών (Πίνακας 5-7).

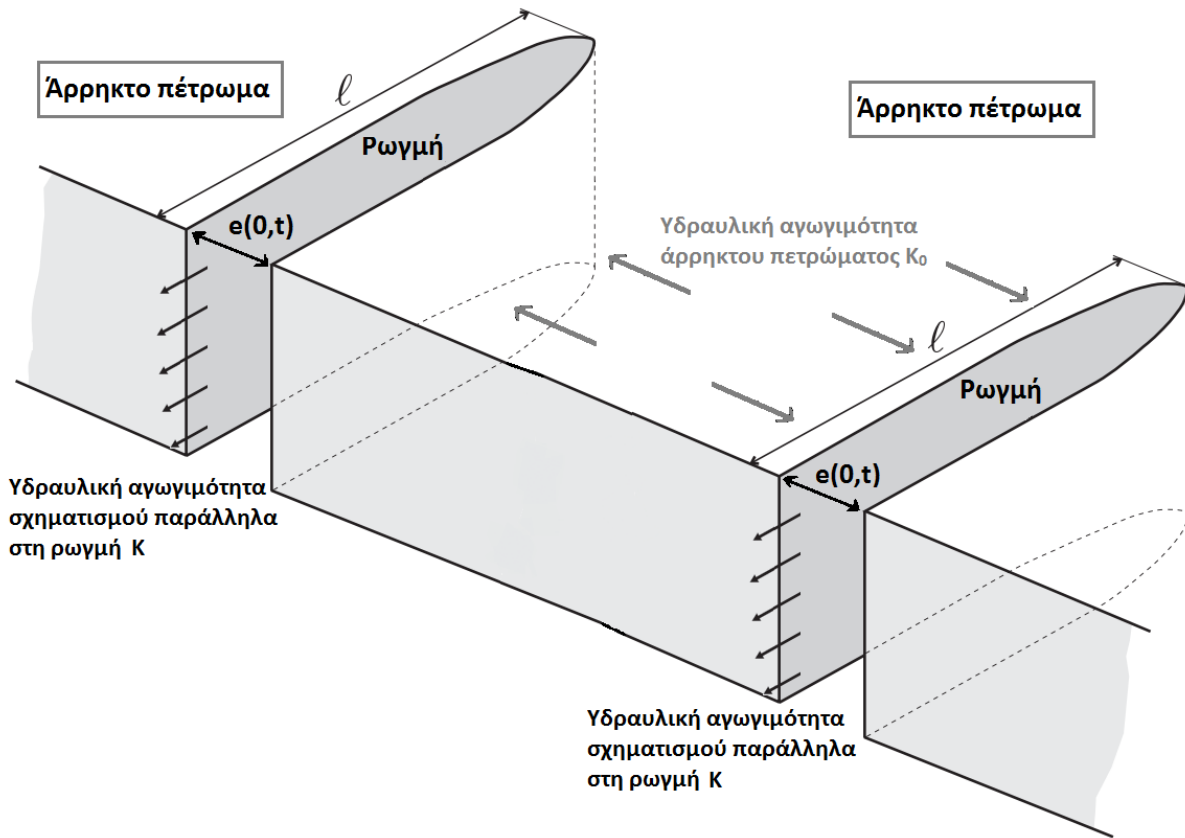
Πίνακας 5-7: Ποσοστό του ανοίγματος μεμονωμένης ρωγμής, το οποίο αντιστοιχεί σε σειρά άπειρων ρωγμών, με βάση το λόγο της απόστασης των ρωγμών προς το ύψος τους (Britt and Smith, 2009)

dX/H_f	Απόσταση ρωγμών dX (m) για $H_f = 30$ m	Ποσοστό ανοίγματος της μεμονωμένης ρωγμής (%)
5	150	95
4	120	87,5
2	60	75
1,5	45	60
1	30	50

5.1.9 Υδραυλική αγωγιμότητα των σχηματισμών

Η υδραυλική αγωγιμότητα του άρρηκτου πετρώματος K_0 δίνεται στην ενότητα 4.2.1 (Πίνακας 4-1). Το εύρος της, στον ψαμμίτη και τον αργιλικό σχιστόλιθο, προκύπτει 10^{-10} έως 10^{-6} και 10^{-13} έως 10^{-9} , αντίστοιχα. Έστω οι μέσες τιμές $K_0 = 10^{-8}$ m/s και $K_0 = 10^{-11}$ m/s, ως τιμές αναφοράς για τους υπολογισμούς της ανάλυσης. Συνεπώς, τα τελικά αποτελέσματα οφείλουν να προστεθούν στις τιμές αναφοράς, ώστε να προκύψει η τελική τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας, παράλληλα στις ρωγμές, αμέσως μετά την υδραυλική διάρρηξη.

Η απεικόνιση των διαφορετικών μορφών της υδραυλικής αγωγιμότητας, επάνω στο προσομοίωμα των ρωγμών που χρησιμοποιείται στη διερεύνηση φαίνεται στο Σχήμα 5-1.



Σχήμα 5-1: Απεικόνιση της υδραυλικής αγωγιμότητας του άρρηκτου πετρώματος K_0 και της υδραυλικής αγωγιμότητας του σχηματισμού παράλληλα στις ρωγμές K στο προσομοίωμα που θα χρησιμοποιηθεί στη διερεύνηση

Ο τύπος της υδραυλικής αγωγιμότητας K , συναρτήσει του ανοίγματος της ρωγμής e έχει την μορφή της εξίσωσης (4-4), η οποία δίνεται και στην ενότητα 4.2.1:

$$K = \frac{\lambda g e^3}{12\nu} \quad (4-4)$$

Αν αντικαταστήσουμε το άνοιγμα της ρωγμής, από την εξίσωση (4-5) στην (4-4), θα προκύψει η εξίσωση (5-1) για την υδραυλική αγωγιμότητα συναρτήσει του χρόνου, όπως φαίνεται παρακάτω. Επίσης, μπορούμε να μετατρέψουμε το κινηματικό ιξώδες, που υπεισέρχεται στην εξίσωση, σε δυναμικό, πολλαπλασιάζοντας με την πυκνότητα του υγρού. Οφείλουμε, όμως, να τονίσουμε, ότι το ιξώδες αυτό δεν αντιστοιχεί στο υγρό διάρρηξης, αλλά στο υγρό παραγωγής της γεώτρησης. Η θεώρηση του νερού, ως το υγρό αυτό, δεν είναι λανθασμένη, γιατί, πρώτον, η γεώτρηση είναι στην πραγματικότητα γεμάτη με νερό για αρκετό καιρό μετά την ολοκλήρωση της διάρρηξης και, δεύτερον, διευκολύνει τη σύγκριση των υδραυλικών αγωγιμοτήτων με τα δεδομένα της βιβλιογραφίας.

$$K = \frac{\lambda g e(0,t)^3}{12\nu_w} = \frac{\lambda g}{12\nu_w} \left\{ C_5 \left[\frac{(1-\nu)q_0^3 \mu}{Gh_f^3} \right]^{\frac{1}{6}} t^{\frac{1}{3}} \right\}^3 = \frac{\lambda g}{12\nu_w} C_5^3 \left[\frac{(1-\nu)q_0^3 \mu}{Gh_f^3} \right]^{\frac{1}{2}} t =$$

$$\frac{\lambda g \rho_w}{12\mu_w} C_5^3 \left[\frac{(1-\nu)q_0^3 \mu}{Gh_f^3} \right]^{\frac{1}{2}} t \quad (5-1)$$

όπου ρ_w : η πυκνότητα του νερού. Αυτή, ισούται με 993 kg/m^3 , στους $38 \text{ }^\circ\text{C}$.

μ_w : το ιξώδες του νερού. Αυτό ισούται με $6.8 \cdot 10^{-10} \text{ MPa}\cdot\text{s}$, στους $38 \text{ }^\circ\text{C}$.

Η προκύπτουσες τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας, παράλληλα στις ρωγμές και αμέσως μετά τη διάρρηξη, από την επικείμενη διερεύνηση οφείλουν να συγκριθούν με τιμές από την επιστημονική βιβλιογραφία. Με τον τρόπο αυτόν, θα γίνει μία εκτίμηση για την ορθότητα των επιλεγμένων παραμέτρων και των αποτελεσμάτων της διερεύνησης. Οι συνηθέστερες τιμές, που εντοπίζονται στις αναφορές, αφορούν την υδραυλική αγωγιμότητα των ρωγμών μετά την αποτόνωση των τάσεων και την τοποθέτηση του υλικού συγκράτησής τους.

Σύμφωνα με τη διαδικασία σχεδιασμού ενός τέτοιου έργου που προτείνεται από τους Gidley et al. (1989), η τιμή αυτή συνδέεται άρρηκτα με το είδος του υλικού, την αντοχή του, την κοκκομετρική του διαβάθμιση και τις συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας του σχηματισμού. Για τη σύγκριση, επιλέχθηκε άμμος τύπου Ottawa, με πίεση κλεισίματος ίση με την θεωρούμενη για τους 2 σχηματισμούς $P_c=34 \text{ MPa}$, η οποία, σύμφωνα με την έρευνα της Penny (1987) για διάφορες κοκκομετρικές διαβαθμίσεις, αντιστοιχεί σε ένα εύρος υδραυλικής αγωγιμότητας K , $1 \cdot 10^{-3}$ έως $2,1 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$. Στο εύρος αυτό έχει συνυπολογιστεί και η μείωση της ονομαστικής αγωγιμότητας των υλικών λόγω της επίδρασης της πίεσης και της θερμοκρασίας, η οποία βάση της παραπάνω έρευνας ισούται περίπου με 40%. Σημειωτέον ότι η διαδικασία υπολογισμού του εύρους αναφέρεται σε εφαρμογές ψαμμιτικής εκμετάλλευσης από κατακόρυφες γεωτρήσεις, η οποία προηγήθηκε των σχιστολιθικών. Η χρήση της άμμου αποτελεί τη συνηθέστερη επιλογή για την υδραυλική διάρρηξη σχηματισμών ιδιαίτερα χαμηλής διαπερατότητας, δηλαδή μικρότερης από $0,1 \cdot 10^{-3} \text{ } \mu\text{m}^2$, όπως έχει σχολιασθεί και στην ενότητα 4.2.1, ενώ για διαφορετικά υλικά συγκράτησης και συνδυασμούς πιέσεων και θερμοκρασιών προκύπτουν μεγαλύτερες ή μικρότερες τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας.

Αναφορικά με τον αργιλικό σχιστόλιθο, τα αποτελέσματα μίας ανάλυσης των Wu et al. (2016) για το κοίτασμα του Barnett στις Η.Π.Α. παρουσιάζουν μία πρωτογενή αγωγιμότητα ρωγμών ίση με $K= 0,7 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$. Οφείλει να σημειωθεί, ότι η μηχανική πίσω από τις ρωγμές στον αργιλικό σχιστόλιθο είναι πιο σύνθετη από την περίπτωση του ψαμμίτη, εξαιτίας των εξαιρετικά χαμηλών τιμών της διαπερατότητας του πετρώματός του. Όπως γίνεται κατανοητό από τη βιβλιογραφία, η απαιτήσις αγωγιμότητας των ρωγμών μειώνονται με την μείωση της εγγενούς διαπερατότητας του πετρώματος και αυξάνονται, αντ' αυτού, οι απαιτήσεις για μεγάλο μήκος των ρωγμών, σύμφωνα με τον Britt (2012).

5.1.10 Συγκεντρωτικός πίνακας παραμέτρων

Πίνακας 5-8: Συγκεντρωτικός πίνακας τιμών για την παραμετρική ανάλυση της αύξησης της υδραυλικής αγωγιμότητας με τη βοήθεια της υδραυλικής διάρρηξης

Παράμετροι	Ψαμμίτης	Αργιλικός σχιστόλιθος
Σταθερές		
Μέτρο διάτμησης G (MPa)	8000 [1]	4000 [1]
Λόγος Poisson v	0.25	
Ύψος κοιτάσματος H_R (m)	30[2]	
Παροχή στο στόμιο της ρωγμής q₀ (m ³ /s)	0.066[3]	
Χρόνος από την έναρξη t (s)	0 – 3600 [3, 5]	
Ιξώδες υγρού εισπίεσης μ (MPa·s)	6.8·10 ⁻¹⁰ [5] έως 5·10 ⁻⁸ [3]	

Πηγές: [1] (Hoek and Diederichs, 2006), [2] (Jarvie, 2012), [3] (Gidley et al., 1989), [4] (Adachi et al., 2006), [5] (IAPWS, 2008)

5.1.11 Παραδοχές και αβεβαιότητες

Η παρακάτω ανάλυση αποτελεί, περισσότερο, ένα εργαλείο κατανόησης της συσχέτισης των παραμέτρων που εμπλέκονται στην υδραυλική διάρρηξη και, λιγότερο, ένα ολοκληρωμένο μέσο προσομοίωσης του συνόλου των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα. Αυτό συμβαίνει, διότι δεν λαμβάνονται υπόψη αρκετές μεταβλητές που επηρεάζουν το τελικό αποτέλεσμα στο πεδίο.

Μία τέτοια είναι η διαρροή του υγρού διάρρηξης στο εσωτερικό του σχηματισμού. Το φαινόμενο αυτό θέτει συνθήκες για τη διάρκεια της ρωγμάτωσης (ενότητα 4.2.5), τη γεωμετρία της ρωγμής και τα συστατικά του υγρού (ενότητα 4.2.6). Επομένως, και ο χρόνος της ρωγμάτωσης, ο οποίος ελήφθη από ακριβείς αναφορές προσομοιώσεων με υπολογιστή, ενδέχεται να αποδώσει αυξημένα αποτελέσματα τόσο για το άνοιγμα, όσο και για την υδραυλική αγωγιμότητα των ρωγμών.

Στον υπολογισμό των πιέσεων που συναντώνται κατά την εφαρμογή της υδραυλικής διάρρηξης (ενότητα 4.2.9), θεωρείται η παραδοχή της μηδενικής πίεσης πόρων. Αυτό αποτελεί συνήθη τακτική στις επιτόπου δοκιμές, με την οποία υπολογίζονται οι ενεργές τάσεις των σχηματισμών. Στην παρούσα διερεύνηση, παρότι χρησιμοποιήσαμε ολικές τάσεις από μετρήσεις, δεν συνυπολογίσαμε την πίεση πόρων στους υπολογισμούς. Ωστόσο, για την

περίπτωση της άμεσης σύγκρισης δύο πετρωμάτων, η διαφορά ανάμεσα στις πιέσεις που συναντώνται παραμένει ίδια είτε με τη συμμετοχή, είτε όχι της πίεσης πόρων.

Παράλληλα, η τελική τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας, για την περίοδο παραγωγής του κοιτάσματος εξαρτάται, σε μεγάλο βαθμό, από το υλικό συγκράτησης των ρωγμών. Μία σύντομη αναφορά στην επίδρασή της γίνεται στην προηγούμενη ενότητα 5.1.9. Ειδικότερα, η τοποθέτησή του αποτελεί ξεχωριστό κομμάτι της μηχανικής της υδραυλικής διάρρηξης και επηρεάζεται από μεταβλητές όπως οι πιέσεις εισπίεσης, η γεωμετρία των ρωγμών και το ιξώδες του υγρού διάρρηξης.

Ακόμη μία μεταβλητή, που δε συνυπολογίστηκε στην ανάλυση, είναι η ετερογένεια των σχηματισμών, σε όρους φυσικής ρωγμάτωσης, αρχικής υδραυλικής αγωγιμότητας, συστατικών και επιτόπου τάσεων. Η ετερογένεια αυτή, η οποία χαρτογραφείται με τη βοήθεια τριδιάστατων απεικονίσεων των κοιτασμάτων (ενότητα 2.1), καθορίζει πολλές μεταβλητές της υδραυλικής διάρρηξης, όπως την κατεύθυνση και τη συχνότητα των ρωγμών, το υφιστάμενο τασικό πεδίο, την οрукτολογία των σχηματισμών, τα περιεχόμενα οрукτά καύσιμα, άρα, και την αποτελεσματικότητά της.

Επίσης, η λήψη ενός κοινού πεδίου τάσεων για τα πετρώματα, γνωρίζουμε από τη βραχομηχανική, ότι δεν αντιστοιχεί στην πραγματικότητα (ενότητα 3.3.5). Πιο συγκεκριμένα, παρά την ταύτιση των κατακόρυφων τάσεων στην περίπτωση των διαδοχικών στρωμάτων ψαμμίτη και αργιλικού σχιστόλιθου, τα πλευρικά φορτία των σχηματισμών διαφοροποιούνται. Ο σχιστόλιθος υφίσταται μεγαλύτερη πλευρική πίεση από τον ψαμμίτη, γεγονός που καθορίζει και την αντίστροφη σχέση του ανοίγματος των ρωγμών, που παρουσιάζει η υδραυλική διάρρηξη διαδοχικών στρωμάτων. Στο παρόν προσομοίωμα διάδοσης των ρωγμών, το οποίο σχολιάζεται στην συνέχεια, λαμβάνει υπόψη ως μοναδική γεωλογική παράμετρο το μέτρο διατμήσεως των πετρωμάτων. Επομένως, προκύπτει αδύνατο να προσομοιωθεί η διαφορά των πλευρικών φορτίσεων, η οποία θεωρείται η κύρια διαφοροποίηση ανάμεσα στον ψαμμίτη και τον αργιλικό σχιστόλιθο. Παρ' όλ' αυτά, γίνεται μία προσπάθεια αξιολόγησης της ευκολίας ρωγμάτωσης των σχηματισμών αυτών με βάση την αντοχή τους στην ενότητα 3.3.

Τέλος, οφείλει να υπογραμμιστεί, ότι το εφαρμοζόμενο προσομοίωμα για τον υπολογισμό του ανοίγματος των ρωγμών έχει αναπτυχθεί για την εφαρμογή σε ψαμμιτικές εκμεταλλεύσεις από κατακόρυφες γεωτρήσεις (ενότητα 4.2.2). Επομένως, η εφαρμογή του για οριζόντιες γεωτρήσεις σε ψαμμίτη και αργιλικό σχιστόλιθο, ίσως, κριθεί ανακριβής ή ακατάλληλη. Ειδικότερα, παρ' ότι το τασικό πεδίο που επηρεάζει τη ρωγμή παραμένει ίδιο λόγω κατάλληλου προσανατολισμού της γεώτρησης, μεγέθη όπως η γεωμετρία της ρωγμάτωσης (δηλαδή το διανοιγόμενο μήκος και ύψος της ρωγμής) και η απαιτούμενη παροχή για μεγάλο αριθμό παράλληλων ρωγμών, πιθανότατα, διαφοροποιούνται, επηρεάζοντας τη ρεαλιστικότητα των αποτελεσμάτων. Επίσης, η φύση του αργιλικού σχιστόλιθου, που διερευνήθηκε στην ενότητα 3.1, διαφέρει σημαντικά από εκείνη του ψαμμίτη. Οι διαφορές, που παρουσιάζονται στην αξιολόγηση των δύο πετρωμάτων (ενότητα 3.3), εκτείνονται τόσο σε θέματα αντοχής και ευκολίας για τη δημιουργία δικτύου ρωγμών, όσο και σε τιμές διαπερατότητας. Επομένως, η ανάλυσή του με ένα προσομοίωμα εξέλιξης του ανοίγματος των ρωγμών, το οποίο έχει αναπτυχθεί για ψαμμιτικά πετρώματα, πιθανόν, εμπεριέχει διαφορετικούς μηχανισμούς από αυτούς που πραγματικά παρατηρούνται κατά την υδραυλική διάρρηξη ενός αργιλικού σχιστόλιθου.

5.2 Παραμετρική ανάλυση της υδραυλικής αγωγιμότητας μη συμβατικών κοιτασμάτων

Μέσα από τη μελέτη της επιστημονικής βιβλιογραφίας για την υδραυλική διάρρηξη, εντοπίστηκαν οι παράγοντες που επηρεάζουν την αποτελεσματικότητά της (ενότητα 4.1.3). Για τη συγκεκριμένη διερεύνηση, η έννοια της αποτελεσματικότητας αυτής θα συνδεθεί με την αύξηση της υδραυλικής αγωγιμότητας των κοιτασμάτων μετά τη ρωγμάτωση. Στην εξίσωση υπολογισμού της υδραυλικής αγωγιμότητας υπεισέρχεται το άνοιγμα των ρωγμών, ως καθοριστικός παράγοντας, το οποίο υπολογίζεται μέσω ενός προσομοιώματος, που περιέχει τόσο τις ιδιότητες του σχηματισμού, όσο και ορισμένα βασικά μεγέθη της υδραυλικής διάρρηξης. Η διερεύνηση θα εφαρμοστεί για δύο διαφορετικούς σχηματισμούς μη συμβατικών κοιτασμάτων, έναν ψαμμίτη και έναν αργιλικό σχιστόλιθο (ενότητα 3.3), από όπου θα προκύψουν συμπεράσματα για την επιρροή του είδους τους στην ευκολία αύξησης της υδραυλικής αγωγιμότητας. Επίσης, θα διερευνηθεί και η επίδραση του ιξώδους του υγρού διάρρηξης (αναλυτικότερα στις ενότητες 4.2.4 και 5.1.6), το οποίο υπεισέρχεται στον υπολογισμό της τιμής του ανοίγματος των ρωγμών, άρα, και στην υδραυλική αγωγιμότητά τους. Παράλληλα, θα γίνει μία προσπάθεια εντοπισμού της επίδρασης της απόστασης μεταξύ των ρωγμών, η οποία, όπως προκύπτει από τη μελέτη του θεωρητικού υποβάθρου (ενότητα 4.2.3), επηρεάζει άμεσα και έμμεσα την τελική υδραυλική αγωγιμότητα των σχηματισμών.

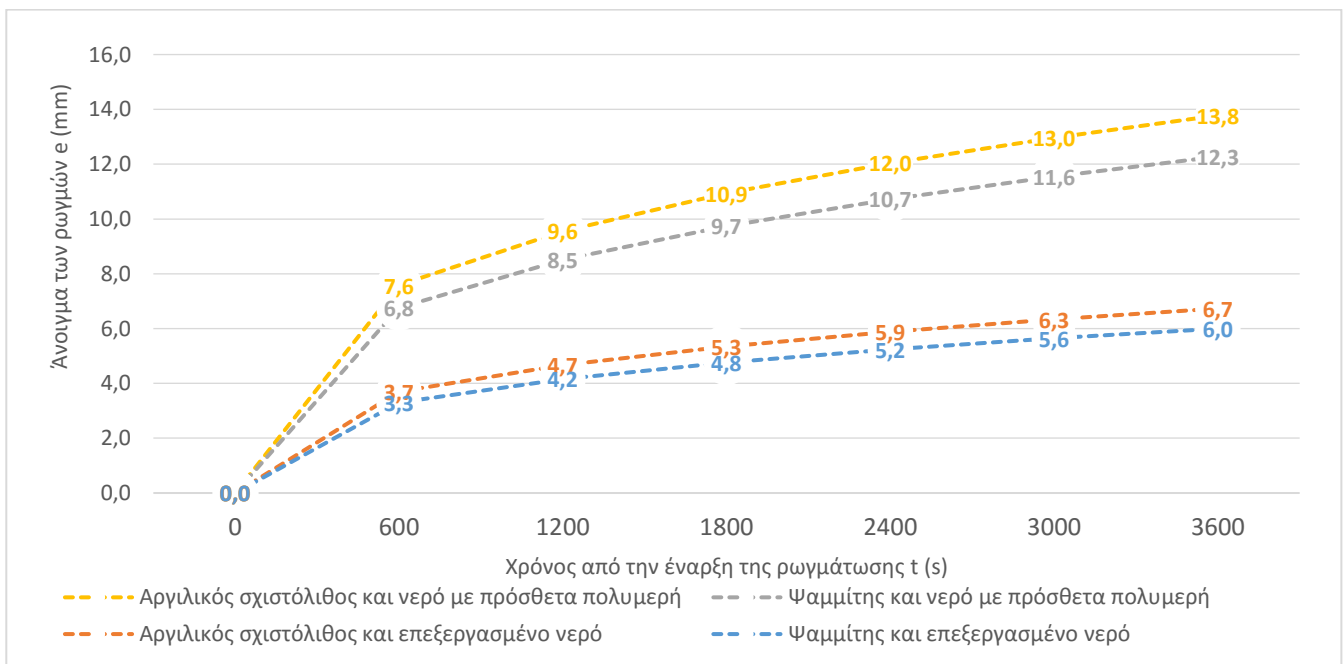
5.2.1 Χρονική εξέλιξη του ανοίγματος των ρωγμών

Αρχικά, οφείλουμε να εξετάσουμε την παράμετρο του ανοίγματος των ρωγμών e . Η εξίσωση υπολογισμού της είναι συνάρτηση του χρόνου. Οι παράγοντες, που εμπλέκονται σε αυτήν, είναι τα είδη των σχηματισμών και των υγρών διάρρηξης. Για την ανάλυση, έχουμε θεωρήσει δύο διαφορετικούς σχηματισμούς και δύο υγρά διάρρηξης (4 συνδυασμοί). Επιπρόσθετα, σύμφωνα με τη θεωρία, η τιμή του τελικού ανοίγματος μπορεί να επηρεαστεί και από την απόσταση μεταξύ των ρωγμών, οπότε οφείλει να ληφθεί υπόψη και αυτή η παράμετρος.

Ο Πίνακας 5-9 περιέχει τα αποτελέσματα της χρονικής εξέλιξης του ανοίγματος, ανά διαστήματα των 10 λεπτών από την έναρξη της ρωγμάτωσης, σε σχέση με το είδος του σχηματισμού και του υγρού διάρρηξης, ενώ παρουσιάζονται και, γραφικά, στο Σχήμα 5-2.

Πίνακας 5-9: Χρονική εξέλιξη του ανοίγματος των ρωγμών για 4 συνδυασμούς διαφορετικών σχηματισμών και υγρών διάρρηξης

Χρόνος από την έναρξη της ρωγμάτωσης t (s)	Ψαμμίτης	Αργιλικός Σχιστόλιθος	Ψαμμίτης	Αργιλικός Σχιστόλιθος
	Επεξεργασμένο νερό		Νερό με πρόσθετα πολυμερή	
	Άνοιγμα ρωγμών e (mm)			
0	0	0	0	0
600	3,3	3,7	6,8	7,6
1200	4,2	4,7	8,5	9,6
1800	4,8	5,3	9,7	10,9
2400	5,2	5,9	10,7	12,0
3000	5,6	6,3	11,6	13,0
3600	6,0	6,7	12,3	13,8

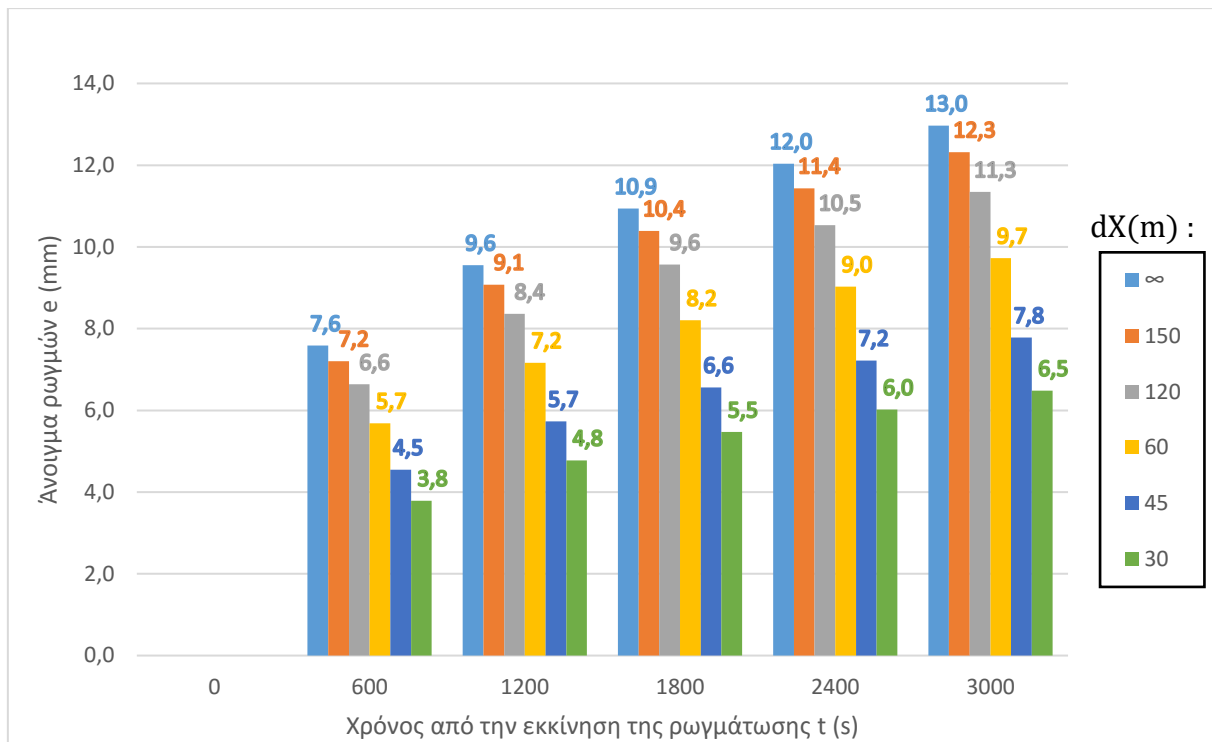


Σχήμα 5-2: Χρονική εξέλιξη του ανοίγματος των ρωγμών για 4 συνδυασμούς διαφορετικών σχηματισμών και υγρών διάρρηξης

Επιπλέον, εάν συνυπολογίσουμε την επίδραση της απόστασης μεταξύ των ρωγμών, το τελικό άνοιγμα τους ε' μειώνεται, ανάλογα με το λόγο της απόστασης προς το ύψος των ρωγμών. Επειδή η επίδραση δεν εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του σχηματισμού, ή το υγρό διάρρηξης, θα εφαρμοστεί σε ένα μόνο συνδυασμό από τους παραπάνω και για δεδομένο ύψος ρωγμών $H_f = 30$ m. Έστω ο συνδυασμός «Αργιλικός σχιστόλιθος και νερό με πρόσθετα πολυμερή», στον οποίο παρατηρούνται τα υψηλότερα αποτελέσματα ανοίγματος των ρωγμών. Ο Πίνακας 5-10 περιέχει τα αποτελέσματα του συνυπολογισμού της απόστασης των ρωγμών στο τελικό άνοιγμά τους. Η πρώτη στήλη περιέχει τα στοιχεία από τη θεώρηση της μεμονωμένης ρωγμής (άπειρη απόσταση ανάμεσα στις ρωγμές), η οποία παρουσιάστηκε παραπάνω. Στη συνέχεια, παραθέτουμε και το Σχήμα 5-3, στο οποίο είναι φανερή η αυξανόμενη μείωση του τελικού ανοίγματος, εξαιτίας της μείωσης στην απόσταση των ρωγμών.

Πίνακας 5-10: Άνοιγμα των ρωγμών ανάλογα με την απόσταση μεταξύ τους, για δεδομένο ύψος ρωγμών, που αντιστοιχεί στο συνδυασμό «Αργιλικός σχιστόλιθος και νερό με πρόσθετα πολυμερή»

Χρόνος από την έναρξη της ρωγμάτωσης t (s)	Απόσταση ρωγμών για $H_f = 30$ m					
	∞	150	120	60	45	30
	Άνοιγμα ρωγμών e (mm)					
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
600	7,6	7,2	6,6	5,7	4,5	3,8
1200	9,6	9,1	8,4	7,2	5,7	4,8
1800	10,9	10,4	9,6	8,2	6,6	5,5
2400	12,0	11,4	10,5	9,0	7,2	6,0
3000	13,0	12,3	11,3	9,7	7,8	6,5
3600	13,8	13,1	12,1	10,3	8,3	6,9

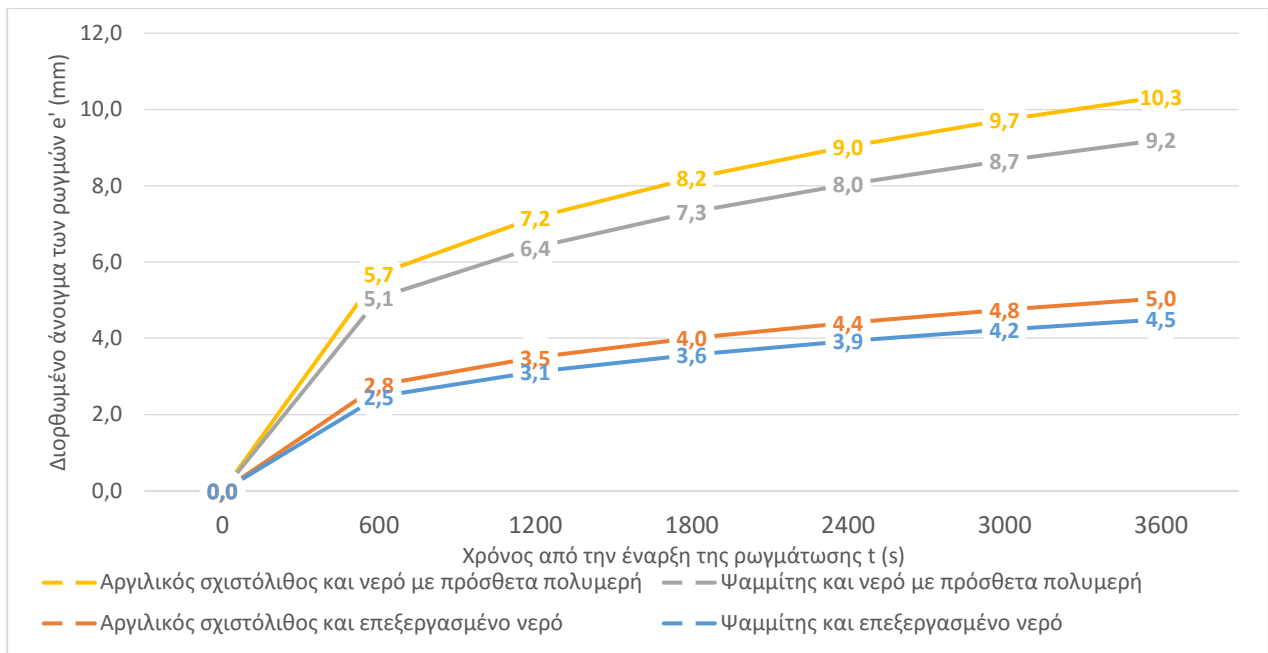


Σχήμα 5-3: Άνοιγμα των ρωγμών ανάλογα με την απόσταση μεταξύ τους (dX), για δεδομένο ύψος ρωγμών, που αντιστοιχεί στο συνδυασμό «Αργιλικός σχιστόλιθος και νερό με πρόσθετα πολυμερή»

Θεωρώντας ως βέλτιστο, παραγωγικά και οικονομικά, το λόγο της απόστασης προς το ύψος των ρωγμών ίσο με 2, προκύπτουν τα παρακάτω τελικά αποτελέσματα του ανοίγματος των ρωγμών για τους 4 αρχικούς συνδυασμούς (Πίνακας 5-11, Σχήμα 5-4). Οι τιμές αυτές θα χρησιμοποιηθούν, σε επόμενο στάδιο, στον υπολογισμό της υδραυλικής αγωγιμότητας λόγω υδραυλικής διάρρηξης των σχηματισμών, καθώς δεν έχει νόημα να αναφερόμαστε στο σύνολο της γεώτρησης για μεμονωμένη ρωγμή και, άρα, η αρχική θεώρηση είναι ανεπαρκής. Ταυτόχρονα, οι υπόλοιποι συνδυασμοί διακρίνονται είτε από πολύ αραιές, είτε από πολύ πυκνές ρωγμές, οι οποίες παρουσιάζουν σημαντική ποσοστιαία μείωση του τελικού ανοίγματος των ρωγμών.

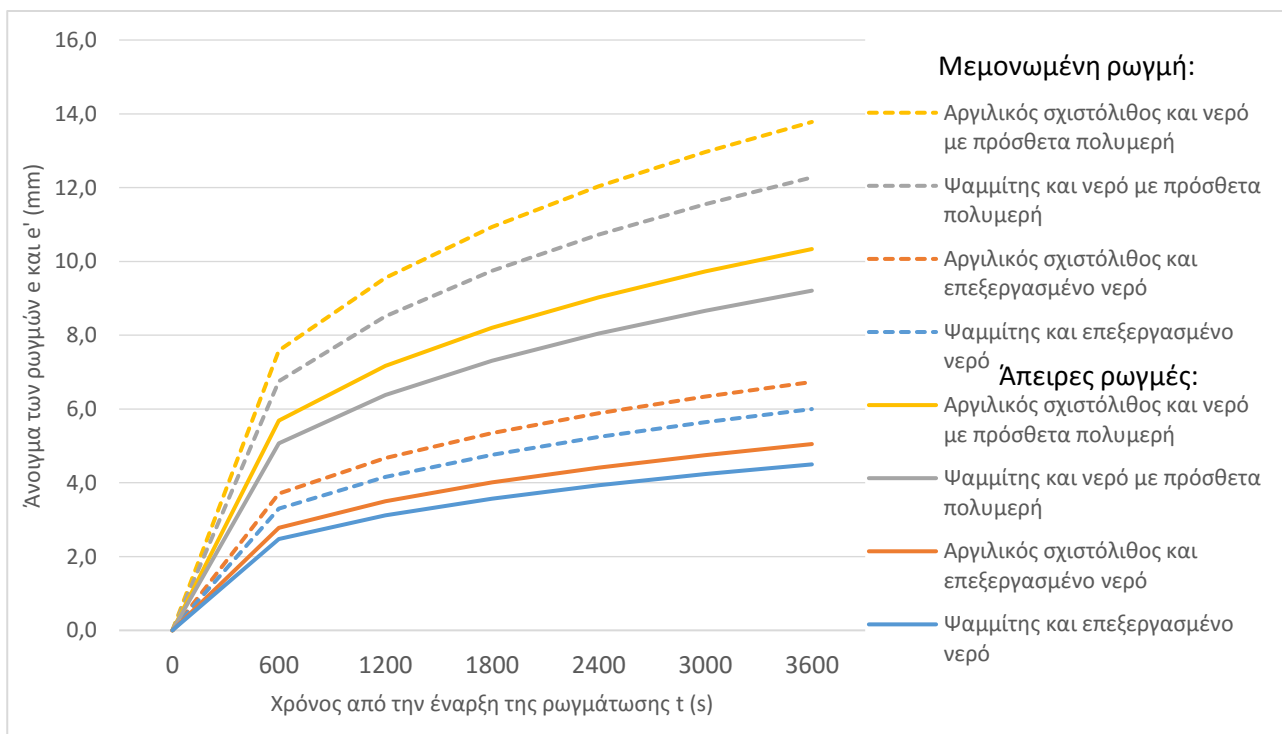
Πίνακας 5-11: Χρονική εξέλιξη του διορθωμένου ανοίγματος των ρωγμών e' για 4 συνδυασμούς διαφορετικών σχηματισμών και υγρών διάρρηξης, με συνυπολογισμό της επίδρασης της απόστασης ανάμεσα στις ρωγμές

Χρόνος από την έναρξη της ρωγμάτωσης t (s)	Ψαμμίτης	Αργιλικός Σχιστόλιθος	Ψαμμίτης	Αργιλικός Σχιστόλιθος
	Επεξεργασμένο νερό		Νερό με πρόσθετα πολυμερή	
	Διορθωμένο άνοιγμα ρωγμών e' (mm)			
0	0,0	0,0	0,0	0,0
600	2,5	2,8	5,1	5,7
1200	3,1	3,5	6,4	7,2
1800	3,6	4,0	7,3	8,2
2400	3,9	4,4	8,0	9,0
3000	4,2	4,8	8,7	9,7
3600	4,5	5,0	9,2	10,3



Σχήμα 5-4: Χρονική εξέλιξη του ανοίγματος των ρωγμών για 4 συνδυασμούς διαφορετικών σχηματισμών και υγρών διάρρηξης, με συνυπολογισμό της επίδρασης της απόστασης ανάμεσα στις ρωγμές

Συνοψίζοντας, στο Σχήμα 5-5 παρουσιάζεται η αρχική θεώρηση της μεμονωμένης ρωγμής, συγκρινόμενη με τη ρεαλιστικότερη θεώρηση των άπειρων ρωγμών σε απόσταση διπλάσια του ύψους τους, για όλους τους συνδυασμούς.



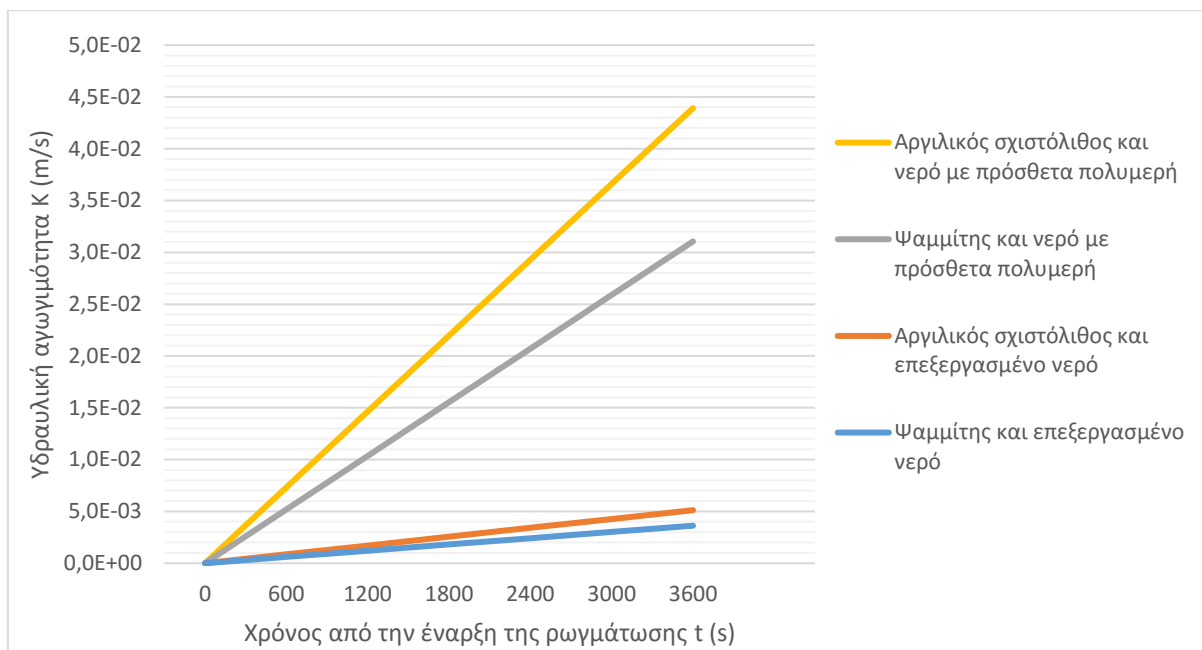
Σχήμα 5-5: Χρονική εξέλιξη του ανοίγματος των ρωγμών για 4 συνδυασμούς διαφορετικών σχηματισμών και υγρών διάρρηξης, με θεώρηση μεμονωμένης και άπειρων ρωγμών

5.2.2 Υδραυλική αγωγιμότητα

Η τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας, παράλληλα στις ρωγμές, δίνεται από την εξίσωση (4-4), η οποία αναπτύσσεται στην ενότητα 4.2.1 και εξαρτάται από τη συχνότητα των ρωγμών, το άνοιγμα των ρωγμών και το κινηματικό ιξώδες του υγρού παραγωγής. Από την αντικατάσταση της εξίσωσης του ανοίγματος αυτού στην εξίσωση της υδραυλικής αγωγιμότητας προκύπτει μία τρίτη εξίσωση (5-1), όπως φαίνεται και στην ενότητα 5.1.9, η οποία αποδίδει την εξέλιξη της υδραυλικής αγωγιμότητας γραμμικώς ανάλογα του χρόνου. Προφανώς, στους υπολογισμούς της εξίσωσης αυτής, εμπεριέχονται και οι υπολογισμοί του ανοίγματος των ρωγμών. Στην ανάλυση έχουμε θεωρήσει άρρηκτο πέτρωμα και οι τιμές αναφοράς ανήκουν σε αντίστοιχα εύρη για τους δύο σχηματισμούς. Ο Πίνακας 5-12 περιέχει τα αποτελέσματα της χρονικής εξέλιξης της υδραυλικής αγωγιμότητας, τα οποία παρουσιάζονται και γραφικά στο Σχήμα 5-6 και το λεπτομερές Σχήμα 5-7.

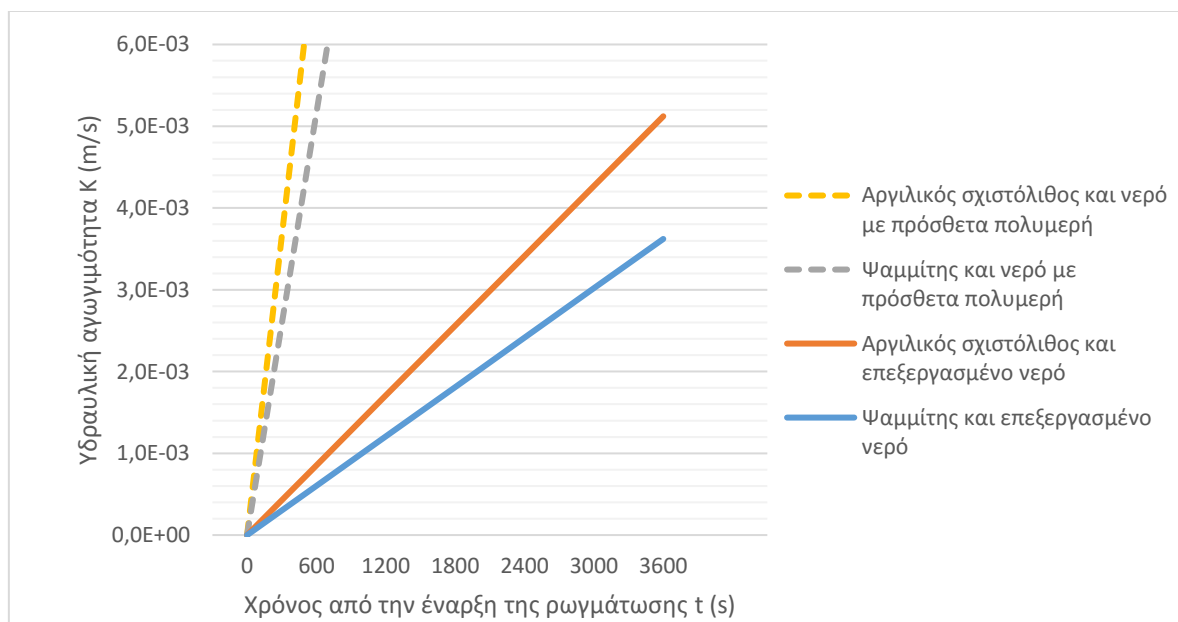
Πίνακας 5-12: Χρονική εξέλιξη της υδραυλικής αγωγιμότητας για 4 συνδυασμούς διαφορετικών σχηματισμών και υγρών διάρρηξης, με συνυπολογισμό της επίδρασης της απόστασης ανάμεσα στις ρωγμές

Χρόνος από την έναρξη της ρωγμάτωσης t (s)	Ψαμμίτης	Αργιλικός Σχιστόλιθος	Ψαμμίτης	Αργιλικός Σχιστόλιθος
	Επεξεργασμένο νερό		Νερό με πρόσθετα πολυμερή	
	Υδραυλική αγωγιμότητα K (m/s)			
0	1,0E-08	1,0E-11	1,0E-08	1,0E-11
600	6,0E-04	8,5E-04	5,2E-03	7,3E-03
1200	1,2E-03	1,7E-03	1,0E-02	1,5E-02
1800	1,8E-03	2,6E-03	1,6E-02	2,2E-02
2400	2,4E-03	3,4E-03	2,1E-02	2,9E-02
3000	3,0E-03	4,3E-03	2,6E-02	3,7E-02
3600	3,6E-03	5,1E-03	3,1E-02	4,4E-02



Σχήμα 5-6: Χρονική εξέλιξη της υδραυλικής αγωγιμότητας για 4 συνδυασμούς διαφορετικών σχηματισμών και υγρών διάρρηξης, με συνυπολογισμό της επίδρασης της απόστασης ανάμεσα στις ρωγμές

Λόγω των διαφορών σε τάξεις μεγέθους ανάμεσα στα αποτελέσματα της ανάλυσης, ακολουθεί το Σχήμα 5-7, στο οποίο φαίνονται με λεπτομέρεια οι δύο συνδυασμοί με τις χαμηλότερες τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας.

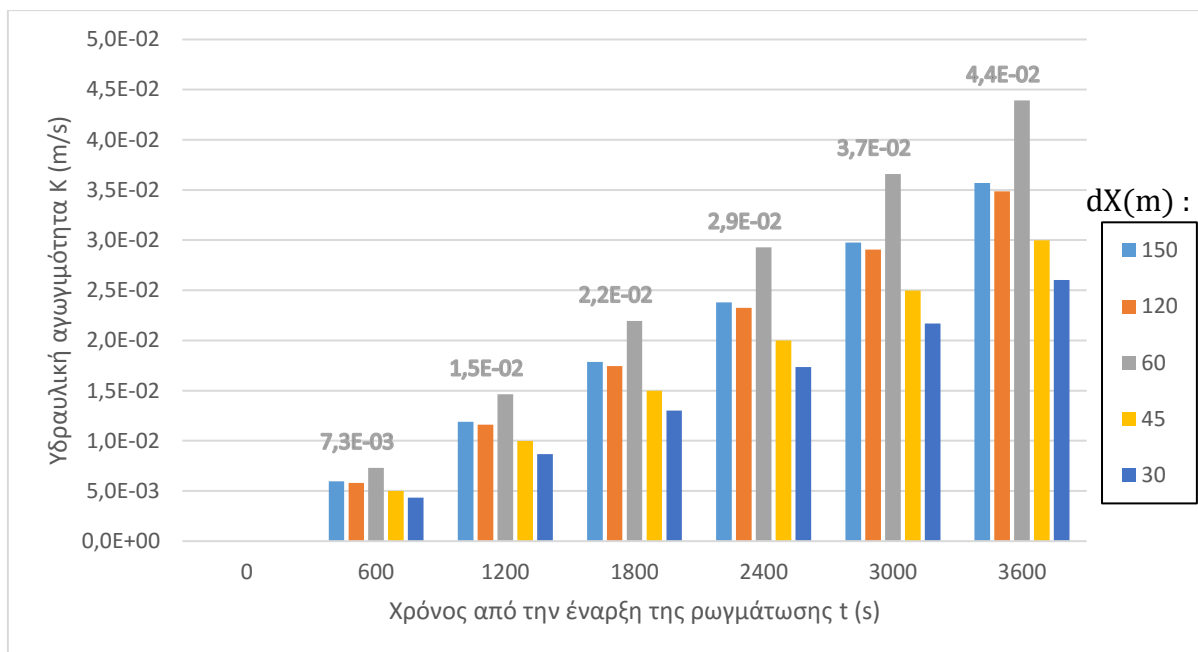


Σχήμα 5-7: Λεπτομέρεια των δύο συνδυασμών του Διαγράμματος 5 με την χαμηλότερη υδραυλική αγωγιμότητα

Εντέλει, θα διερευνήσουμε την επίπτωση που επιφέρει η μεταβολή της απόστασης των ρωγμών στην τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας των σχηματισμών, όπως έγινε και στην περίπτωση του ανοίγματος τους, για ένα συνδυασμό. Η μεταβλητή αυτή εμφανίζεται στην εξίσωση, πρώτον, μέσω της ποσοστιαίας μείωσης του ανοίγματος των ρωγμών ανάλογα με το λόγο, της μεταξύ τους απόστασης προς το ύψος τους, και, δεύτερον, μέσω της συχνότητας των ρωγμών στη γεώτρηση. Έστω ο συνδυασμός «Αργιλικός σχιστόλιθος και νερό με πρόσθετα πολυμερή», όπου υπολογίζεται η υδραυλική αγωγιμότητα, για τις διάφορες αποστάσεις και για δεδομένο ύψος ρωγμών $H_f = 30$ m. Στη συνέχεια, παραθέτονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης (Πίνακας 5-13, Σχήμα 5-8). Σημειωτέον, ότι τα αποτελέσματα για $\frac{dX}{H_f} = 2$, δηλαδή για $dX = 60$ m, πρέπει να συμπίπτουν με τα αποτελέσματα του Πίνακας 5-12 για τον εν λόγω συνδυασμό.

Πίνακας 5-13: Χρονική εξέλιξη της υδραυλικής αγωγιμότητας ανάλογα με την απόσταση των ρωγμών, για δεδομένο ύψος, που αντιστοιχεί στο συνδυασμό «Αργιλικός σχιστόλιθος και νερό με πρόσθετα πολυμερή»

Χρόνος από την έναρξη της ρωγμάτωσης t (s)	Απόσταση ρωγμών για $H_f = 30$ m				
	150	120	60	45	30
	Υδραυλική αγωγιμότητα K (m/s)				
	1,0E-11	1,0E-11	1,0E-11	1,0E-11	1,0E-11
600	6,0E-03	5,8E-03	7,3E-03	5,0E-03	4,3E-03
1200	1,2E-02	1,2E-02	1,5E-02	1,0E-02	8,7E-03
1800	1,8E-02	1,7E-02	2,2E-02	1,5E-02	1,3E-02
2400	2,4E-02	2,3E-02	2,9E-02	2,0E-02	1,7E-02
3000	3,0E-02	2,9E-02	3,7E-02	2,5E-02	2,2E-02
3600	3,6E-02	3,5E-02	4,4E-02	3,0E-02	2,6E-02



Σχήμα 5-8: Χρονική εξέλιξη της υδραυλικής αγωγιμότητας ανάλογα με την απόσταση των ρωγμών (dX), για δεδομένο ύψος, που αντιστοιχεί στο συνδυασμό «Αργιλικός σχιστόλιθος και νερό με πρόσθετα πολυμερή»

5.2.3 Συζήτηση των αποτελεσμάτων

Τα αποτελέσματα των αναλύσεων βοηθούν στην κατανόηση των φαινομένων που ευθύνονται για την αποτελεσματικότητα της υδραυλικής διάρρηξης. Η γραφική τους απεικόνιση, επίσης, είναι πολύ χρήσιμη στην εξαγωγή των συμπερασμάτων της παρούσας διερεύνησης.

5.2.3.1 Άνοιγμα των ρωγμών

Στην ενότητα 5.2.1 παρουσιάζεται η χρονική εξέλιξη του ανοίγματος των ρωγμών. Αυτή φαίνεται να επηρεάζεται σημαντικά από το ιξώδες των υγρών διάρρηξης και λιγότερο από το είδος του σχηματισμού, γεγονός αναμενόμενο από τη μελέτη της εξίσωσης υπολογισμού της, καθώς οι τιμές του ιξώδους έχουν διαφορά δύο, σχεδόν, τάξεων μεγέθους, ενώ τα μέτρα διατμήσεως των σχηματισμών καμία. Επομένως, το εύρος του ανοίγματος των ρωγμών προκύπτει μικρό για τη θεώρηση ίδιας τιμής ιξώδους και διαφορετικό σχηματισμό, ενώ εμφανίζεται αυξημένο στην περίπτωση του ίδιου σχηματισμού με διαφορετικές τιμές του ιξώδους. Έτσι, από την αποτύπωση στο Σχήμα 5-2 των αποτελεσμάτων της διερεύνησης, από τους 4 συνδυασμούς προέκυψε ότι μεγαλύτερο άνοιγμα, με τιμή $e = 13,8 \text{ mm}$ τη χρονική στιγμή $t = 3600 \text{ s}$, αντιστοιχεί στον μαλακότερο σχηματισμό με το υγρό μεσαίου ιξώδους «Αργιλικός σχιστόλιθος και νερό με πρόσθετα πολυμερή». Παράλληλα, την ίδια χρονική στιγμή το μέγιστο άνοιγμα στον ψαμμίτη για το ίδιο υγρό ανέρχεται σε $e = 12,3 \text{ mm}$. Η χρήση επεξεργασμένου νερού ως υγρού διάρρηξης μειώνει τις μέγιστες τιμές σε $e = 6,7 \text{ mm}$ και $e = 6,0 \text{ mm}$, για τον σχιστόλιθο και τον ψαμμίτη, αντίστοιχα. Πρέπει να σημειωθεί ότι

για τιμές του χρόνου μικρότερες από 600 s το προσομοίωμα δίνει αποτελέσματα με διαφορετική κλίση, τα οποία ενδεχομένως να μην είναι αξιόπιστα. Παρατηρούμε, ότι η ανάλυση αυτή δεν λαμβάνει υπόψη την απόσταση μεταξύ των ρωγμών, η οποία, με βάση τη μελέτη της επιστημονικής βιβλιογραφίας (Ενότητα 4.2.3), μπορεί να οδηγήσει σε υπερεκτιμημένα αποτελέσματα.

Για το λόγο αυτό, προχωρήσαμε σε μία δεύτερη ανάλυση του ανοίγματος των ρωγμών, με το συνυπολογισμό της επίδρασης της απόστασης ανάμεσα στις ρωγμές. Η επίδραση αυτή, μεταφράζεται σε μείωση του ανοίγματος, όσο μικραίνει η, εν λόγω, απόσταση. Για το συνδυασμό «Αργιλικός σχιστόλιθος και νερό με πρόσθετα πολυμερή», στον οποίο αντιστοιχεί το μεγαλύτερο άνοιγμα ρωγμών, υπολογίστηκαν οι νέες τιμές για όλες τις θεωρούμενες αποστάσεις. Φανερό είναι η μείωση του ανοίγματος, στο Σχήμα 5-3, όσο μειώνεται η απόσταση. Ειδικότερα, για λόγο απόστασης προς ύψος των ρωγμών ίσο με 2, εντοπίζεται ένα σημείο καμπής από τη μελέτη της βιβλιογραφίας στην ενότητα 4.2.3, το οποίο θεωρείται πολύ σημαντικό στη βελτιστοποίηση της εφαρμογής. Με τη θεώρηση του λόγου αυτού, σε όλους τους συνδυασμούς, παίρνουμε νέες τιμές ανοίγματος (Σχήμα 5-4), οι οποίες είναι πιο κοντά στην πραγματικότητα. Μάλιστα, από το συγκεντρωτικό Σχήμα 5-5 για τη διερεύνηση του ανοίγματος των ρωγμών, φαίνεται ότι η τελική τιμή του μεγαλύτερου ανοίγματος μειώθηκε από $e' = 13,8 \text{ mm}$ σε $e' = 10,3 \text{ mm}$, δηλαδή παρατηρείται μείωση 3,5 mm, η οποία αντιστοιχεί στο 25% του αρχικού ανοίγματος. Επιπλέον, η μείωση αυτή προσαυξάνεται στον υπολογισμό της υδραυλικής αγωγιμότητας, όπως διαφαίνεται παρακάτω, διότι το άνοιγμα των ρωγμών εμπεριέχεται σε αυτόν υψωμένο στην τρίτη δύναμη.

5.2.3.2 Υδραυλική αγωγιμότητα

Οι υπολογισμοί της υδραυλικής αγωγιμότητας πραγματοποιήθηκαν, για όλους τους συνδυασμούς, με τα διορθωμένα στοιχεία για το άνοιγμα των ρωγμών. Η γραμμική απεικόνιση που χαρακτηρίζει τη χρονική εξέλιξη της (Σχήμα 5-6 και λεπτομέρεια στο Σχήμα 5-7) είναι αναμενόμενη, με δεδομένη την τελική μορφή της εξίσωσής της, η οποία παρουσιάζεται στην ενότητα 5.1.9. Μεγάλο ενδιαφέρον συγκεντρώνεται στις προκύπτουσες τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας τόσο για τα διαφορετικά υγρά διάρρηξης, όσο και για τις διάφορες τιμές της απόστασης ανάμεσα στις ρωγμές. Όπως και στην διερεύνηση του ανοίγματος, η υδραυλική αγωγιμότητα παρουσιάζει μεγαλύτερο εύρος τιμών για δεδομένο σχηματισμό και χρήση υγρών διαφορετικού ιξώδους, από το εύρος που παρατηρείται για δεδομένο ιξώδες υγρού και διαφορετικό είδος σχηματισμού. Επίσης, παρατηρείται ότι τα αποτελέσματα της υδραυλικής αγωγιμότητας δεν επηρεάζονται από τη διαφορετική κλίση των καμπυλών του ανοίγματος των ρωγμών, για χρονικές τιμές μικρότερες από 600 s, καθώς πρόκειται για εύρη λίγων χιλιοστών.

Η χρονική εξέλιξη της υδραυλικής αγωγιμότητας, παράλληλα στις ρωγμές των σχηματισμών, για τους 4 συνδυασμούς υγρού διάρρηξης και πετρώματος αποτυπώνεται στο Σχήμα 5-6. Οφείλει να σημειωθεί, ότι οι τιμές αναφοράς $K_0 = 10^{-8} \text{ m/s}$ και $K_0 = 10^{-11} \text{ m/s}$ για τον ψαμμίτη και τον σχιστόλιθο, αντίστοιχα, είναι αμελητέες σε σχέση με τις τελικές τιμές της αγωγιμότητας. Ειδικότερα, στην περίπτωση του ψαμμίτη, παρατηρούμε σημαντική αύξηση, από $K_0 = 10^{-8} \text{ m/s}$ έως $K_{\tau\epsilon\lambda} = 6 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$ με χρήση επεξεργασμένου νερού, και $K_{\tau\epsilon\lambda} = 5,1 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ για χρήση νερού με πρόσθετα πολυμερή. Αντιστοίχως, για το σχιστολιθικό πέτρωμα, παρατηρήθηκε ακόμη μεγαλύτερη αύξηση με εύρος από $K_0 =$

10^{-11} m/s έως $K_{\tau\epsilon\lambda} = 5,2 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ με τη θεώρηση επεξεργασμένου νερού, και $K_{\tau\epsilon\lambda} = 4,4 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$ με τη θεώρηση νερού με πρόσθετα πολυμερή. Επίσης, η τελική τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας, παράλληλα στις ρωγμές, μεταβάλλεται ανάλογα με τη συχνότητά τους, η οποία υπεισέρχεται τόσο στην εξίσωση υπολογισμού της ίδιας, όσο και σε εκείνη του ανοίγματος των ρωγμών. Όπως διαφαίνεται στο Σχήμα 5-8, υπάρχει μία βέλτιστη τιμή για το μέγεθος αυτό, η οποία μεταφράζεται σε μία μέγιστη αγωγιμότητα. Στην ανάλυσή μας, η βέλτιστη τιμή της συχνότητας των ρωγμών προκύπτει για απόσταση διπλάσια του ύψους τους και ισούται με $\lambda = 0,0333 \text{ m}^{-1}$. Αναφορικά με τις υπόλοιπες συχνότητες, παρατηρείται η απότομη μείωση της αγωγιμότητας για φθίνουσες τιμές της απόστασης, μικρότερες από 60 m., όπως και μία πολύ ήπια αύξησή της για αύξουσες τιμές, μεγαλύτερες από 60 m.

5.2.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων με δεδομένα από τη βιβλιογραφία

Η σύγκριση αυτή στοχεύει στον εντοπισμό και την αιτιολόγηση των ομοιοτήτων και των διαφορών ανάμεσα στις τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας που υπολογίστηκαν στην παραπάνω διερεύνηση και σε πραγματικές μετρήσεις δοκιμών ή αναλύσεις της βιβλιογραφίας. Τα φαινόμενα και οι μηχανισμοί της υδραυλικής διάρρηξης που ήταν αδύνατο να ληφθούν υπόψη στους υπολογισμούς (περισσότερα στην ενότητα 5.1.11) αυξάνουν την πιθανότητα απόκλισης των αποτελεσμάτων από την πραγματικότητα. Συνεπώς, ναι μεν περιμένουμε μία σχετική προσέγγιση των τιμών της βιβλιογραφίας από τα αποτελέσματα, αλλά και μία αξιόλογη απόκλιση. Επιπρόσθετα, η απόκλιση αυτή αναμένεται μεγαλύτερη στον αργιλικό σχιστόλιθο από τον ψαμμίτη, λόγω της διαφορετικής φύσης του πετρώματός του και των πρόσθετων αβεβαιοτήτων που υπεισέρχονται στους μηχανισμούς διάδοσης των ρωγμών που τον συνοδεύουν. Περισσότερα για τους σχηματισμούς και τη σύγκριση μεταξύ τους βρίσκονται στο Κεφάλαιο 3.

Οι τιμές από τη βιβλιογραφία για τη διαπερατότητα των ρωγμών σε ψαμμίτη και αργιλικό σχιστόλιθο, μετά την υδραυλική διάρρηξη, προέκυψαν $K_{\psi,\beta\iota\beta\lambda.}=(1,0 \text{ έως } 2,1)\cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ (Penn, 1987) και $K_{\sigma\chi,\beta\iota\beta\lambda.}=0,7\cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ (Wu et al., 2016), αντίστοιχα. Το εύρος των υπολογισμένων τιμών από την παρούσα διερεύνηση, με χρήση επεξεργασμένου νερού ως υγρό διάρρηξης, παρουσιάζεται ως $K_{\psi,\text{ανάλυση,νερό}}=(0,6 \text{ έως } 3,6)\cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ και $K_{\sigma\chi.,\text{ανάλυση,νερό}}=(0,85 \text{ έως } 5,1)\cdot 10^{-3} \text{ m/s}$, ενώ για τη χρήση νερού με πρόσθετα πολυμερή, το εύρος αυτό προκύπτει ως $K_{\psi,\text{ανάλυση,πρόσθετα}}=(0,5 \text{ έως } 3,1) \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$ και $K_{\sigma\chi.,\text{ανάλυση,πρόσθετα}}=(0,7 \text{ έως } 4,4)\cdot 10^{-2} \text{ m/s}$, αντίστοιχα. Ο Πίνακας 5-14 περιέχει συγκεντρωμένα τα δεδομένα από τη βιβλιογραφία και τα εύρη των τιμών που υπολογίστηκαν στην παρούσα διερεύνηση.

Πίνακας 5-14: Δεδομένα τελικής υδραυλικής αγωγιμότητας των ρωγμών μετά την υδραυλική διάρρηξη σε ψαμμίτη και αργιλικό σχιστόλιθο, βάσει της βιβλιογραφίας και της παρούσας διερεύνησης

Πηγή	Υδραυλική αγωγιμότητα K (m/s)	
	Ψαμμίτης	Αργιλικός σχιστόλιθος
Βιβλιογραφία	$(1,0 \text{ έως } 2,1) \cdot 10^{-3}$ [1]	$0,7 \cdot 10^{-3}$ [2]
Ανάλυση με επεξεργασμένο νερό	$(0,6 \text{ έως } 3,6) \cdot 10^{-3}$	$(0,8 \text{ έως } 5,1) \cdot 10^{-3}$
Ανάλυση με νερό και πρόσθετα πολυμερή	$(0,5 \text{ έως } 3,1) \cdot 10^{-2}$	$(0,7 \text{ έως } 4,4) \cdot 10^{-2}$

Πηγές: [1] (Penny, 1987), [2] (Wu et al., 2016)

Συγκρίνοντας τα δύο ζεύγη σχηματισμού και υγρού διάρρηξης, παρατηρούμε, ότι οι τιμές της διερεύνησης βρίσκονται πολύ κοντά σε εκείνες της βιβλιογραφίας. Πιο συγκεκριμένα, για το ψαμμιτικό πέτρωμα παρατηρούμε, ουσιαστικά, ταύτιση των αποτελεσμάτων. Το γεγονός αυτό ήταν αρκετά αναμενόμενο, καθώς, πρώτον, χρησιμοποιήθηκε πραγματικό προσομοίωμα της εξέλιξης του ανοίγματος των ρωγμών για ψαμμιτικό σχηματισμό και, δεύτερον, οι τιμές των μεγεθών που εισήχθησαν σε αυτό προέκυψαν από εις βάθος μελέτη της βιβλιογραφίας. Από την άλλη, η εγγύτητα των αποτελεσμάτων για τον αργιλικό σχιστόλιθο στις τιμές της βιβλιογραφίας δεν ήταν αναμενόμενη. Αυτό βασίζεται στην χαλαρότερη απαίτηση αγωγιμότητας στους σχηματισμούς ιδιαίτερα χαμηλής διαπερατότητας, όπως ο σχιστόλιθος, όπου το ζητούμενο, αντιθέτως, είναι ένα αυξημένο μήκος ρωγμής.

Επίσης, αναφορικά με τη συχνότητα, παρατηρείται η επαλήθευση του συμπεράσματος της επιστημονικής βιβλιογραφίας, που αποτυπώνεται στο Σχήμα 5-8, δηλαδή το γεγονός πως η βέλτιστη τιμή της προκύπτει από το λόγο απόστασης προς ύψος των ρωγμών ίσο με 2.

5.2.5 Συμπερασματικά σχόλια

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την παραμετρική αυτή ανάλυση αφορούν όλους τους τομείς της υδραυλικής διάρρηξης και της υδραυλικής αγωγιμότητας των σχηματισμών, που διερευνήσαμε:

1. Το είδος του υγρού διάρρηξης, μέσω του ιξώδους του, επηρεάζει το άνοιγμα και την υδραυλική αγωγιμότητα των ρωγμών, οδηγώντας σε μεγαλύτερα αποτελέσματα με τη χρήση του νερού αυξημένου ιξώδους σε σχέση με το νερό συνηθισμένου ιξώδους.
2. Το είδος του πετρώματος, μέσω του μέτρου διατμήσεώς του, επηρεάζει το άνοιγμα και την υδραυλική αγωγιμότητα των ρωγμών, οδηγώντας σε μεγαλύτερα αποτελέσματα για

το μαλακότερο πέτρωμα του αργιλικού σχιστόλιθου σε σχέση με το σκληρότερο πέτρωμα του ψαμμίτη.

3. Συνολικά, η ρύθμιση και ο έλεγχος του ιξώδους του υγρού εισπίεσης κατά τη διάρκεια της υδραυλικής διάρρηξης ορίζει, σε μεγαλύτερο βαθμό από το μέτρο διατμήσεως του πετρώματος, το εύρος του ανοίγματος και της υδραυλικής αγωγιμότητας των ρωγμών.
4. Με το μέτρο διατμήσεως αποδίδεται η ευκολότερη διάδοση των ρωγμών στο πέτρωμα του αργιλικού σχιστόλιθου, αντί του ψαμμίτη, γεγονός που θεωρείται ρεαλιστικό στην περίπτωση των παρόμοιων πιέσεων κλεισίματος της ρωγμής, η οποία ελήφθη ως παραδοχή για την ανάλυση.
5. Η απόκλιση των αποτελεσμάτων του ανοίγματος για μικρές χρονικές τιμές αποδίδεται στην αδυναμία του προσομοιώματος να αποδώσει την πραγματικότητα στην περιοχή αυτή, όμως δεν μειώνει την αξιοπιστία του για μεγαλύτερες τιμές του χρόνου. Επίσης, η απόκλιση αυτή δεν εμφανίζεται στην καμπύλη της υδραυλικής αγωγιμότητας, καθώς η εξέλιξη του ανοίγματος είναι της τάξης των λίγων χιλιοστών.
6. Δεν είναι δυνατή η ρεαλιστική σύγκριση, με τη χρήση του επιλεγθέντος προσομοιώματος, της υδραυλικής αγωγιμότητας στην περίπτωση των διαδοχικών στρωμάτων διαφορετικών πλευρικών τάσεων και ψαθυροτήτων, όπως είναι στην πραγματικότητα ο ψαμμίτης και ο αργιλικός σχιστόλιθος στο πεδίο.
7. Η αύξηση της συχνότητας των ρωγμών αυξάνει την τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας, καθώς περισσότερες ρωγμές σηματοδοτούν μεγαλύτερο όγκο ρωγματωμένου πετρώματος. Ταυτόχρονα, η αύξηση αυτή, προκαλεί αύξηση των απαιτούμενων τάσεων ρωγμάτωσης, με αποτέλεσμα τη μείωση του τελικού ανοίγματος των ρωγμών σε σχέση με το άνοιγμα μιας μεμονωμένης ρωγμής. Αρχικά, η αρνητική επιρροή της πύκνωσης των ρωγμών είναι αμελητέα, όμως, μετά το σημείο καμπής, της απόστασης ίσης με δύο φορές το ύψος των ρωγμών, παρατηρήθηκε ταχύτερη μείωση του ανοίγματος, για περαιτέρω αύξηση της συχνότητάς τους.
8. Υφίσταται μία βέλτιστη τιμή της συχνότητας, η οποία, όπως επαληθεύεται από την επιστημονική βιβλιογραφία, προκύπτει από το λόγο απόστασης προς ύψος των ρωγμών ίσο με δύο, η αρνητική επιρροή της οποίας στο άνοιγμα των ρωγμών είναι η μικρότερη δυνατή σε σχέση με τη θετική επιρροή της πύκνωσης των ρωγμών.
9. Η τιμή αναφοράς της υδραυλικής αγωγιμότητας K_0 του άρρηκτου πετρώματος θεωρείται αμελητέα απέναντι στην τελική τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας του σχηματισμού, παράλληλα στις ρωγμές, και, άρα η διαφοροποίηση ανάμεσα στα δύο πετρώματα εμφανίζεται μόνο στην τιμή του μέτρου διατμήσεως.
10. Η υδραυλική αγωγιμότητα K , παράλληλα στις ρωγμές των σχηματισμών, εμφανίζεται σημαντικά αυξημένη μετά την υδραυλική διάρρηξη, με τις διαφορές να φτάνουν τις 6 τάξεις μεγέθους για τον ψαμμίτη και τις 9 για τον αργιλικό σχιστόλιθο.
11. Το αποτέλεσμα της παρούσας διερεύνησης για την υδραυλική αγωγιμότητα του ψαμμίτη, ήταν αναμενόμενο και επαληθεύτηκε από τα στοιχεία της βιβλιογραφίας.
12. Το αποτέλεσμα της παρούσας διερεύνησης για την υδραυλική αγωγιμότητα του αργιλικού σχιστόλιθου, ήταν αναμενόμενο δεδομένου του μικρότερου μέτρου διατμήσεώς του από τον ψαμμίτη. Μη αναμενόμενο, από τη μελέτη του θεωρητικού υποβάθρου της υδραυλικής διάρρηξης, ήταν το μεγαλύτερο άνοιγμα ρωγμών και, άρα, η

αυξημένη διαπερατότητα του σχιστόλιθου. Σε μία πραγματική εφαρμογή στο πεδίο, η πλεονάζουσα πλευρική τάση και η ολκιμότητα του αργιλικού σχιστόλιθου, στην περίπτωση διαδοχικών σχηματισμών, συνεπάγεται μικρότερες τιμές ανοίγματος και υδραυλικής αγωγιμότητας από τον ψαμμίτη, ο οποίος καταπονείται από μικρότερες πλευρικές τάσεις και είναι πιο ψαθυρός. Επίσης, μη αναμενόμενη ήταν η ταύτιση των αποτελεσμάτων για τον αργιλικό σχιστόλιθο με τα στοιχεία της βιβλιογραφίας, γεγονός που, ίσως, οφείλεται στη θεώρηση της υδραυλικής αγωγιμότητας, συγκεκριμένα, παράλληλα στις ρωγμές, η οποία δεν επηρεάζεται από το τασικό πεδίο του εκάστοτε σχηματισμού.

Κεφάλαιο 6 Επιπτώσεις της υδραυλικής διάρρηξης στους υπόγειους υδροφορείς

Το κεφάλαιο αυτό αποτελεί επέκταση της ενότητας 2.6, όπου παρατίθενται οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που σχετίζονται με την υδραυλική διάρρηξη. Οι επιπτώσεις της στους υπόγειους υδροφορείς θεωρούνται επίμαχα ζητήματα για την εφαρμογή της παγκοσμίως, λόγω, πρώτον, του πλήθους των καταγεγραμμένων περιστατικών ρύπανσης και, δεύτερον, της δυσκολίας εντοπισμού και απομάκρυνσης των ρύπων που έχουν διαφύγει. Η ορθή αντιμετώπιση μιας πιθανής ρύπανσης ξεκινάει από την διερεύνηση των μηχανισμών που την προκάλεσαν. Στην περίπτωση της υδραυλικής διάρρηξης, όπως θα δούμε και παρακάτω (ενότητα 6.1), εντοπίζονται πολλές πιθανές δίοδοι για τη μεταφορά των ρύπων στο υπόγειο νερό. Απαραίτητη, λοιπόν, κρίνεται η αξιολόγησή τους ανάλογα με την πιθανότητα της κάθε μίας να οδηγήσει στη ρύπανση του υπόγειου νερού. Στη συνέχεια του κεφαλαίου (ενότητα 6.2), γίνεται μια προσπάθεια κατηγοριοποίησης των χημικών προσθέτων που χρησιμοποιούνται στην υδραυλική διάρρηξη, με κριτήριο το σκοπό χρήσης τους. Το έργο αυτό θεωρείται ιδιαίτερα σημαντικό για τον εντοπισμό των επιπτώσεων της υδραυλικής διάρρηξης, καθώς παρέχει απαραίτητες πληροφορίες, όχι μόνο για το ποιες χημικές ουσίες χρησιμοποιούνται και γιατί, αλλά και για την αποτίμηση της διακινδύνευσής τους στην ανθρώπινη υγεία ως πιθανών ρύπων. Στη συγκεκριμένη εργασία, εξαιτίας της σημαντικής συμβολής τους στη διερεύνηση της αύξησης της υδραυλικής αγωγιμότητας η οποία παρατίθεται στο Κεφάλαιο 5, θα εξετάσουμε ως πιθανούς ρύπους τα χημικά πρόσθετα, τα οποία αυξάνουν το ιξώδες του υγρού διάρρηξης.

6.1 Μηχανισμοί ρύπανσης του υπόγειου νερού λόγω της υδραυλικής διάρρηξης

Η ραγδαία εξέλιξη της εκμετάλλευσης των μη συμβατικών κοιτασμάτων, ανά τον κόσμο, θεωρείται γενεσιουργός αιτία νέων βραχυχρόνιων και μακροχρόνιων περιβαλλοντικών επιπτώσεων, οι οποίες δεν είχαν, μέχρι πρότινος, απασχολήσει την βιομηχανία εξόρυξης ορυκτών πόρων. Η επίδραση της εξόρυξης του μη συμβατικού αερίου στους υπόγειους υδροφορείς εντοπίζεται στην πιθανότητα ρύπανσής τους κατά τη διάρκεια κατασκευής και λειτουργίας ενός τέτοιου έργου. Η άποψη, σύμφωνα με την κοινή γνώμη, πως η ρύπανση λαμβάνει χώρα κατά τη διάρκεια της υδραυλικής διάρρηξης έχει αποδειχθεί ότι είναι λανθασμένη (King, 2012).

Οι μηχανισμοί της ρύπανσης, σύμφωνα με την έρευνα της US EPA (2015b) μπορούν να διαχωριστούν, ανάλογα με τη φάση του έργου στην οποία προκαλείται η κάθε μία. Αναλυτικά, οι φάσεις αυτές, αν συνδεθούν με τον «κύκλο του νερού» στην υδραυλική διάρρηξη, διακρίνονται, πρώτον, στην άντληση του απαραίτητου όγκου νερού, δεύτερον, την ανάμιξή του με χημικά πρόσθετα, τρίτον, την εισπίεση του υγρού διάρρηξης και, τέταρτον, την διαχείριση του υγρού αναρροής. Η US EPA (2015b), επίσης αναφέρει ότι οι υπόγειοι υδροφορείς είναι δυνατόν να προσβληθούν, τόσο από επιφανειακές, όσο και από υπόγειες διαρροές και μετακινήσεις ρύπων, υπό ορισμένες συνθήκες. Οι συνθήκες αυτές διερευνήθηκαν και, σε συνδυασμό με την συχνότητα και το πλήθος των διαπιστωμένων διαρροών σε πραγματικά περιστατικά, προέκυψαν συμπεράσματα για τη σοβαρότητα των επιπτώσεων.

6.1.1 Άντληση υδάτων

Η λήψη νερού από υπόγειους υδροφορείς για τις δραστηριότητες της υδραυλικής διάρρηξης φαίνεται να μην επηρεάζει, άμεσα, την ποιότητα του πόσιμου νερού. Ο συνδυασμός της, όμως, με την περιορισμένη διαθεσιμότητα υδάτινων πόρων, που παρατηρείται σε ορισμένες περιοχές, δύναται να έχει αρνητικά αποτελέσματα. Ειδικότερα, η ταπεινώση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα λόγω εκτεταμένης άντλησης, μπορεί να προκαλέσει τόσο την κινητοποίηση βαθύτερα εγκλωβισμένων ρύπων όσο και την ανάμιξη «υγιών» υδροφορέων με χαμηλότερης ποιότητας νερό από παρακείμενα στρώματα. Συνεπώς, για την αντιμετώπιση των φαινομένων αυτών, επιτακτική θεωρείται η διερεύνηση των επιπτώσεων της άντλησης ανάλογα με τα δυναμικά χαρακτηριστικά της εκάστοτε περιοχής και, με βάση αυτά, την προσαρμογή των υδατικών προσλήψεων του αντίστοιχου έργου.

6.1.2 Ανάμιξη υγρού διάρρηξης

Η αποτελεσματικότητα της υδραυλικής διάρρηξης βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στις ξεχωριστές λειτουργίες που επιτελούν τα χημικά πρόσθετα που χρησιμοποιούνται. Ανάμεσα σε αυτά βρίσκονται οξέα (π.χ. υδροχλωρικό οξύ), αλκοόλες (π.χ. μεθανόλη), αρωματικοί υδρογονάνθρακες, βάσεις, πολυσακχαρίτες και οργανικές ενώσεις. Παρά το γεγονός, ότι το συνολικό ποσοστό τους δεν ξεπερνά το 2% του υγρού διάρρηξης, οι μεγάλοι όγκοι που απαιτούνται για τη διαδικασία της υδραυλικής διάρρηξης επιτάσσουν την ανάγκη αποθήκευσης και χρήσης, επί τόπου, πολλών κυβικών μέτρων χημικών ουσιών. Κατά τη περίοδο αποθήκευσης, ανάμιξης και άντλησης των χημικών, παρατηρούνται διαρροές, λόγω ατυχημάτων και κατασκευαστικών αστοχιών. Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με την έρευνα της US EPA (2015b), συνηθέστερη αιτία επιφανειακής διαρροής αποδείχθηκε η αστοχία του εξοπλισμού, και ειδικότερα, εκείνη στα αποθηκευτικά μέσα που χρησιμοποιούνται, όπως δεξαμενές και βυτιοφόρα. Από τις χημικές ουσίες που εντοπίστηκαν, οι δύο συχνότερες είναι η χλωριούχος χωλίνη και το τετράκις (υδροξυμέθυλο) φωσφόριο. Παρά την, έως τώρα, απουσία διαπιστευμένων περιστατικών ρύπανσης υπόγειων υδροφορέων με αυτό τον τρόπο, καταγράφονται περισσότερες διαρροές χημικών ουσιών ετησίως, καθώς αυξάνεται η εφαρμογή της υδραυλικής διάρρηξης σε παγκόσμια κλίμακα. Σημειωτέον ότι η αδυναμία εντοπισμού πιθανής ρύπανσης μπορεί να οφείλεται στα χαρακτηριστικά μεταφοράς των ρύπων στο έδαφος, οι οποίοι, ωστόσο, είναι δυνατόν να εμφανιστούν στο πόσιμο νερό σε βάθος χρόνου.

6.1.3 Εισπίεση υγρού διάρρηξης

Η ρύπανση ενός υπόγειου υδροφορέα, εξαιτίας της εισπίεσης του υγρού διάρρηξης, πραγματοποιείται με δύο πιθανούς μηχανισμούς. Ο πρώτος είναι εκείνος της διαρροής υγρών και αερίων διαμέσου ή κατά μήκος της επένδυσης της γεώτρησης. Μάλιστα, η σημερινή, επιτακτική, εφαρμογή μιας πολυεπίπεδης επένδυσης (διαδοχικά στρώματα από χάλυβα και σκυρόδεμα) στοχεύει, ακριβώς, στην απομόνωση του εσωτερικού της γεώτρησης από τους περιβάλλοντες σχηματισμούς (ενότητα 2.2). Παρ' όλ' αυτά, υφίσταται πλήθος περιστατικών, όπου υπήρξε ή υπάρχει μεγάλη πιθανότητα ρύπανσης. Οι αιτίες, που οδηγούν στην αστοχία μιας γεώτρησης, είναι κυρίως τα κατασκευαστικά ελαττώματα και οι μεγάλες επιβαλλόμενες πιέσεις. Ταυτόχρονα, το μεγάλο ποσοστό των παλαιότερων γεωτρήσεων δεν

πληρεί τα σύγχρονα κριτήρια ασφαλείας. Η υποβάθμιση της επένδυσης τους λόγω παλαιότητας, τις καθιστά πιθανές πηγές ρύπανσης, εφόσον, συχνά, είτε επαναδιαρρηγνύονται για σκοπούς παραγωγής, είτε προσβάλλονται από τις υψηλές πιέσεις της διάρρηξης μιας γειτονικής γεώτρησης και αστοχούν. Παρόμοια δυσμενή επίδραση μπορεί να εμφανιστεί και σε νεότερες, αλλά ανεπαρκώς σφραγισμένες, ανενεργές γεωτρήσεις. Σε διαπιστωμένα περιστατικά στην Αμερική, η US EPA (2015b) αναφέρει ότι εντοπίστηκαν συγκεντρώσεις μεθανίου και βενζολίου σε παρακείμενους υδροφορείς, λόγω της ελλιπούς σκυροδέτησης των γεωτρήσεων.

Ο δεύτερος μηχανισμός ρύπανσης αντιστοιχεί στην μετακίνηση των ρύπων, καθ' ύψος των ενδιάμεσων σχηματισμών, προς τους υδροφορείς. Η ρύπανση, για συνήθη βάθη κοιτασμάτων περί τα 2 km, θεωρείται απίθανη να συμβεί. Όμως, μη συμβατικά κοιτάσματα εντοπίζονται και σε πολύ μικρότερα βάθη. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση των ρηχών σχηματισμών σε ορισμένες λεκάνες της Αμερικής, η απόσταση του επιπέδου εφαρμογής της υδραυλικής διάρρηξης από τη βάση του υδροφορέα αγγίζει τα 600 m. Επίσης, υπάρχει αναφορά σχηματισμών στους οποίους συνυπάρχουν ορυκτά καύσιμα και, εν δυνάμει, πόσιμο νερό. Η πιθανότητα ρύπανσης, σε αυτά τα παραδείγματα, είναι ιδιαίτερα αυξημένη και, μάλιστα, εκτός από τη μακροχρόνια επίδραση, μπορεί να εκδηλωθούν και άμεσες επιπτώσεις στην ποιότητα του νερού, λόγω της συνύπαρξης των χημικών της υδραυλικής διάρρηξης.

6.1.4 Διαχείριση του υγρού αναρροής

Μετά την ολοκλήρωση της υδραυλικής διάρρηξης και την απομείωση της πίεσης στη γεώτρηση, υφίσταται αναρροή των υγρών διάρρηξης, μαζί με οποιοδήποτε υγρό ή στερεό παρασύρθηκε από τη ρωγμάτωση του σχηματισμού (ενότητα 2.4). Η ποσότητα του υγρού αναρροής κυμαίνεται, συνήθως, από 10% έως 25% του όγκου του υγρού διάρρηξης, αλλά φτάνει έως και περισσότερο από 100% αυτού, ανάλογα με το σχηματισμό. Το υγρό αυτό χρήζει ασφαλούς αποθήκευσης και διαχείρισης. Όπως και στην διαδικασία της ανάμιξης των χημικών, οι ενέργειες αυτές εγκυμονούν τον κίνδυνο ρύπανσης, ενώ, σύμφωνα με την US EPA (2015b), υπάρχουν διαπιστωμένα περιστατικά διαρροής υγρών αναρροής και, μάλιστα, ο όγκος τους υπολογίζεται διπλάσιος από ότι εκείνου στη διαδικασία ανάμιξης. Ειδικότερα, ως αίτια αναφέρονται, και πάλι, οι αστοχίες στον εξοπλισμό (όπως βαλβίδες, αγωγοί), με συχνότερη τη διαρροή από τα αποθηκευτικά μέσα (όπως βυτία και δεξαμενές). Οι επιπτώσεις, που αναμένονται σε περίπτωση ρύπανσης ενός υπόγειου υδροφορέα, είναι ιδιαίτερα δυσμενείς, καθώς στο υγρό περιέχονται, τόσο χημικά πρόσθετα, όσο και επιβλαβείς ουσίες και σωματίδια, τα οποία ήταν εγκλωβισμένα στο σχηματισμό. Πιο συγκεκριμένα, εντοπίζονται μεγάλες συγκεντρώσεις ιόντων (όπως βρωμίδια, χλωρίδια, ασβέστιο, σίδηρος, κάλιο, μαγγάνιο, μαγνήσιο, νάτριο), μετάλλων (όπως βάριο, κάδμιο, χρώμιο, μόλυβδος, και υδράργυρος), οργανικών ενώσεων (π.χ. βενζόλιο) και ραδιενεργών στοιχείων (π.χ. ράδιο). Ανάμεσα σε αυτά, βρίσκονται συστατικά με μεγάλη κινητικότητα στους υπόγειους υδροφορείς και πολλά με γνωστές επιπτώσεις στην ανθρώπινη υγεία.

6.1.5 Συμπερασματικά σχόλια

Συνοψίζοντας, από δημοσιευμένες αναφορές χρήσης και διαρροής των χημικών που απαντώνται στις διαδικασίες της υδραυλικής διάρρηξης, όπως αυτές στη διαδικτυακή βάση

FracFocus, έγινε μία προσπάθεια αναγνώρισης του κινδύνου ρύπανσης των υπόγειων υδροφορέων στην ανθρώπινη υγεία (King, 2012). Το πλήθος και η συχνότητα των περιστατικών, όπως και η μελέτη της βιβλιογραφίας, υποδεικνύουν ότι οι πιθανότεροι μηχανισμοί ρύπανσης είναι είτε η μετακίνηση των παραγόμενων υγρών και αερίων, λόγω αστοχιών στην επένδυση της γεώτρησης, είτε η διαρροή των υγρών διάρρηξης και αναρροής στην επιφάνεια.

Τα υγρά διάρρηξης περιείχαν, συνολικά, 1,076 χημικές ουσίες, οι 453 από τις οποίες έχουν γνωστές φυσικοχημικές ιδιότητες και αποτελούν, ως επί το πλείστον, πιθανούς ρύπους. Στα υγρά αναρροής εντοπίστηκαν 134 χημικές ουσίες, ενώ μετρήθηκαν συγκεντρώσεις για 75 από αυτές. Οι 86 από τις 134 έχουν γνωστές φυσικοχημικές ιδιότητες. Επίσης, διαπιστώθηκαν δείκτες αναφοράς (για χρόνια έκθεση) και συντελεστές κλίσης για κατάποση, σε 90 από τις 1,076 και σε 83 από τις 134, αντίστοιχα. Το επόμενο βήμα, της αποτίμησης διακινδύνευσης της ανθρώπινης υγείας, απαιτεί την εξακρίβωση των συγκεκριμένων χημικών ουσιών και των συγκεντρώσεών τους, μεγέθη τα οποία μεταβάλλονται κατά τόπους, σε συνδυασμό με τα αντίστοιχα δεδομένα χρόνου και τρόπου έκθεσης.

6.2 Κατηγορίες χημικών προσθέτων

Όπως γίνεται κατανοητό από την έρευνα για τη μέθοδο της υδραυλικής διάρρηξης, η αποτελεσματική εφαρμογή της απαιτεί, εκτός από τις μεγάλες ποσότητες νερού και άμμου, τη χρήση διαφόρων χημικών προσθέτων. Αυτά καθιστούν ικανό τον έλεγχο τόσο των ιδιοτήτων του υγρού διάρρηξης (π.χ. ιξώδες, pH), όσο και της αλληλεπίδρασής του με το σχηματισμό προς ρωγμάτωση. Μέσω της προσθήκης των χημικών προσθέτων, πρώτον, διευκολύνεται η διάδοση των ρωγμών και η μεταφορά του υλικού συγκράτησής τους, και δεύτερον, ελαχιστοποιείται η αλλοίωση του πετρώματος λόγω της υδραυλικής διάρρηξης, η οποία ευθύνεται για την παρεμπόδιση της ροής του περιεχόμενου φυσικού αερίου προς τη γεώτρηση. Τα είδη και ο αριθμός των προσθέτων, που χρησιμοποιούνται, εξαρτώνται από ποικίλους παράγοντες, όπως τη γεωλογία του σχηματισμού, τις συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας που επικρατούν στο βάθος γεώτρησης, αλλά και τη διαθεσιμότητα των χημικών ουσιών ανά περιοχή. Έτσι, γίνεται αντιληπτό ότι δεν απαιτούνται όλα τα είδη προσθέτων στο σύνολο των υδραυλικών διαρρήξεων. Από στατιστική έρευνα σε 20 πολιτείες της Αμερικής για την περίοδο από τον Ιανουάριο του 2011 έως το Φεβρουάριο του 2013, η US EPA (2015b) υπολογίζει ότι, ανά έργο, χρησιμοποιήθηκαν από 4 έως 28 χημικά πρόσθετα, με μέση τιμή τα 14. Σημειωτέον, ότι αυτά αποτελούνται είτε εξ ολοκλήρου από μία χημική ουσία, είτε από μείγμα διαφόρων ουσιών, ανάλογα με το είδος, τον κατασκευαστή τους και το σχηματισμό. Αναφορικά με τους κατασκευαστές, πολύ συχνά εντοπίζονται πρόσθετα διαφορετικών κατασκευαστών, τα οποία εξυπηρετούν τον ίδιο σκοπό, και διαθέτουν παραπλήσια χημική σύσταση και ονομασία. Ειδικότερα, ο σκοπός χρήσης ενός προσθέτου ορίζει και το είδος στο οποίο αυτό αντιστοιχεί παρατίθενται στο Παράρτημα. Επισημαίνεται, επίσης, ότι υπάρχουν πολλές ουσίες, οι οποίες εμφανίζονται ως συστατικά σε περισσότερα από ένα είδη προσθέτου, οι οποίες εξυπηρετούν, δηλαδή, πολλαπλούς σκοπούς. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται όλες οι κατηγορίες, μαζί με τις λειτουργίες που επιτελούν και με παραδείγματα χημικών ενώσεων ανά κατηγορία.

6.2.1 Οξέα καθαρισμού (Acids)

Πρόκειται για τα πρώτα χημικά πρόσθετα που χρησιμοποιούνται μετά την ολοκλήρωση της γεώτρησης και των εναρκτήριων ρωγμών, αλλά πριν από τη ρωγμάτωση του σχηματισμού. Σκοπός τους είναι ο καθαρισμός της γεώτρησης και των μικρορωγμών από τα κατάλοιπα της σκυροδέτησης και της διάτρησης, όπως είναι τα υλικά της αλλοιωμένης ζώνης, τα οποία μπορεί να μειώσουν την αποτελεσματικότητα της υδραυλικής διάρρηξης. Ως οξύ καθαρισμού, χρησιμοποιείται συνήθως διάλυμα υδροχλωρικού οξέος.

6.2.2 Γαλακτωματοποιητές (Emulsifiers)

Όπως γίνεται κατανοητό, τα υγρά που σχετίζονται με την υδραυλική διάρρηξη αποτελούνται από πλήθος διαφορετικών ουσιών, οι οποίες διακρίνονται από διαφορετικές ιδιότητες και λειτουργίες. Η ομογενοποίηση των μειγμάτων (γαλακτώματα) αυτών είναι απαραίτητη για την διαχείριση και τη χρήση τους και επιτυγχάνεται μέσω της μείωσης των διεπιφανειακών τάσεων ανάμεσα στα διαφορετικά υγρά, με την εφαρμογή των γαλακτωματοποιητών. Για παράδειγμα ο Fink (2013) αναφέρει ότι εφαρμόζονται μείγματα ελαίου σε νερό, τα οποία διαθέτουν αυξημένο ιξώδες και σταθεροποιούνται με τη χρήση πολύ(βινυλοκαρβοξυλικού οξέος), μείγματα υδατικών διαλυμάτων με πολυμερή, τα οποία είναι θερμοδυναμικά ασυμβίβαστα μεταξύ τους και χρήζουν ειδικής επεξεργασίας για την ομογενοποίηση, όπως και άλλες περιπτώσεις.

6.2.3 Παράγοντες σταθεροποίησης της αργίλου (Clay controlling agents)

Η γνωστή ιδιότητα της αργίλου, λόγω της οποίας προσλαμβάνει νερό και να αυξάνει το διπλό στρώμα των πλακιδίων της, δύναται να προκαλέσει προβλήματα και αστοχίες κατά τη διαδικασία της υδραυλικής διάρρηξης. Τα προβλήματα αυτά διακρίνονται, πρώτον, στην παρεμπόδιση της ροής του ζητούμενου αερίου μέσω των πόρων προς τη γεώτρηση, δεύτερον, στις άγνωστες μεταβολές των τάσεων και των παραμορφώσεων του σχηματισμού, λόγω της αλληλεπίδρασής του με το νερό που εισπιέζεται και, τρίτον, στα διαβρωτικά φαινόμενα εξαιτίας της υδατικής πλήρωσης του σχηματισμού. Ο κύριος μηχανισμός σταθεροποίησης της αργίλου περιλαμβάνει τη μείωση του νερού που εισέρχεται στο εσωτερικό του σχηματισμού, φράσσοντας τους πόρους με τη βοήθεια πολυμερών. Ταυτόχρονα, με την προσθήκη υδρόφιλων και υδρόφοβων δεσμών στα πολυμερή, μπορεί να επιτευχθεί και η χημική σταθεροποίηση των αργιλικών πλακιδίων. Το υδρόφιλο μέρος, συνήθως, αποτελείται από πόλυ(οξυεθυλένιο) και το υδρόφοβο από ισοκυανικές ενώσεις, μέρη τα οποία προσκολλούν στα αργιλικά πλακίδια και αποτρέπουν την πρόσληψη νερού, σύμφωνα με τον Fink (2013).

6.2.4 Αναστολείς διάβρωσης (Corrosion inhibitors)

Η χρήση οξέων, όπως περιγράφηκε και παραπάνω, για τον καθαρισμό της γεώτρησης και των μικρορωγμών μπορεί να προκαλέσει τον σχηματισμό σκουριάς στα μεταλλικά μέρη του εξοπλισμού (όπως σωληνώσεις, εξαρτήματα, επένδυση και δεξαμενές). Αυτό, θα έχει ως συνέπεια τη μείωση της ροής των υγρών στο εσωτερικό της γεώτρησης και την αύξηση της πιθανότητας αστοχίας ενός εξ αυτών, εξαιτίας των μεγάλων επιβαλλόμενων τάσεων. Η έρευνα του US DoE (2015) τονίζει ότι αναστολείς διάβρωσης, όπως η μεθανόλη και η

ισοπροπανόλη χρησιμοποιούνται, συνήθως, σε συνδυασμό με δεσμευτές οξυγόνου, όπως το θειικό αμμώνιο, για τον περιορισμό των φαινομένων οξείδωσης, τα οποία δυσχεραίνουν την αντιδιαβρωτική δράση.

6.2.5 Αναστολείς καθαλατώσεων (Scale inhibitors)

Η καθαλάτωση λαμβάνει χώρα όταν ένα διάλυμα τυγχάνει υπερκορεσμού, όπως συμβαίνει κατά τη διαδικασία της υδραυλικής διάρρηξης στο εσωτερικό της γεώτρησης, συνήθως λόγω των αλλαγών στη θερμοκρασία. Η λειτουργία των αναστολέων βασίζεται είτε στην αντίδραση αυτών με τις ουσίες που αποτελούν τα πιθανά άλατα (όπως το ανθρακικό ασβέστιο, το θειικό ασβέστιο και το θειικό βάριο (US DoE, 2015)), είτε εμποδίζοντας την κρυσταλλοποίηση των αλάτων αυτών. Οι αναστολείς χωρίζονται σε οργανικούς και ανόργανους. Πιο συγκεκριμένα, συνήθεις ανόργανοι θεωρούνται τα πολυ(μεταφωσφορικά) και τα φωσφορικά άλατα, ενώ οργανικοί τα πολυ(ακρυλικά οξέα) (PAA), τα σουλφονικά πολυμερή και τα φωσφονικά άλατα.

6.2.6 Παράγοντες ρύθμισης του pH (pH controlling agents)

Η ρύθμιση του pH στο εσωτερικό της γεώτρησης και του σχηματισμού είναι ένας σημαντικός παράγοντας για τη σωστή λειτουργία των υπόλοιπων προσθέτων του υγρού εισπίεσης (όπως οι δικτυωτές που αναφέρονται παρακάτω). Συχνότερα χρησιμοποιούνται, ως ρυθμιστές (buffers), άλατα ασθενών οξέων και βάσεων. Τέτοια είναι τα ανθρακικά, τα διττανθρακικά, τα όξινα φωσφορικά, με παραδείγματα όπως το μυρμηκικό οξύ, το φουμαρικό οξύ και το σουλφαμικό οξύ.

6.2.7 Βιοκτόνα (Biocides)

Η ανάπτυξη μικροοργανισμών που επηρεάζουν την αποτελεσματικότητα της υδραυλικής διάρρηξης και της παραγωγής φυσικού αερίου επιτάσσει τη χρήση βιοκτόνων. Ειδικά στην περίπτωση της υδραυλικής διάρρηξης, όπου γίνεται χρήση μεγάλων ποσοτήτων νερού από λίμνες και ποτάμια, η μεγάλη περιεκτικότητά του σε οξυγόνου διευκολύνει την ανάπτυξη αυτή. Η βιογενής παραγωγή υδρόθειου στο εσωτερικό μιας γεώτρησης συνδέεται με αυξημένα φαινόμενα διάβρωσης, κόστη παραγωγής και μειωμένη ποσότητα παραγόμενου αερίου. Παράλληλα, ορισμένα θειικο-μειωτικά βακτηρίδια αποδίδουν οξέα με αποτέλεσμα την διάβρωση, ακόμη και, των ανοξειδωτών μεταλλικών επιφανειών. Συνήθη εφαρμοζόμενα βιοκτόνα είναι η γλουταραλδεϋδη, το 2,2-διβρωμο-3-νιτριλοπροπιοναμίδιο και το τετράκις υδρομέθυλο θειικό φωσφόνιο.

6.2.8 Επιφανειοδραστικές ουσίες (Surfactants)

Οι χημικές αυτές ενώσεις επιφέρουν τη μείωση των διεπιφανειακών τάσεων για την επίτευξη δύο στόχων. Πρώτον, η προσρόφηση των μορίων αυτών στις επιφάνειες του σχηματισμού αποτρέπει την απώλεια υγρού προς το εσωτερικό του σχηματισμού και, άρα, διευκολύνει την ταχύτερη αναρροή του υγρού εισπίεσης μετά την ολοκλήρωση της υδραυλικής διάρρηξης προς τη γεώτρηση. Ταυτόχρονα, η μη πλήρωση των πόρων του σχηματισμού με το εισπιεζόμενο υγρό βοηθάει, αρχικά, την εκρόφηση και, έπειτα, τη ροή

του περιεχόμενου φυσικού αερίου, επίσης, προς τη γεώτρηση. Ο δεύτερος στόχος των επιφανειοδραστικών ενώσεων είναι η διάσπαση των γαλακτωμάτων για τον ευκολότερο διαχωρισμό των υδρογονανθράκων από το νερό και τα έλαια, που συνυπάρχουν. Παράδειγμα τέτοιων ενώσεων είναι τα αλκαλαμινο φωσφονικά οξέα.

6.2.9 Πρόσθετα ελέγχου διαρροής στο σχηματισμό (Fluid loss additives)

Το φαινόμενο της διαρροής υγρού εισπίεσης, κατά την υδραυλική διάρρηξη, προς το εσωτερικό του σχηματισμού μπορεί να προκαλέσει προβλήματα στην αποτελεσματικότητα της μεθόδου. Η χρήση των προσθέτων αυτών στοχεύει, πρώτον, στη μετρίαση των διαρροών, οι οποίες ευθύνονται για τις μεγαλύτερες δυσκολίες στις διαδικασίες διάρρηξης και παραγωγής (π.χ. κορεσμός των πόρων με υγρό, χαμηλή διαπερατότητα λόγω αλλοιωμένης ζώνης). Δεύτερον, επιτρέπει τη γρηγορότερη ανάπτυξη της απαιτούμενης πίεσης ρωγμάτωσης, η οποία συνδέεται με τη μείωση της διάρκειας της υδραυλικής διάρρηξης και, τρίτον, προσφέρει περιβαλλοντική προστασία, με την έννοια της ελαχιστοποίησης της αλληλεπίδρασης των υγρών διάρρηξης με το εσωτερικό του σχηματισμού. Τα πρόσθετα περιέχουν αιωρούμενα μακρομόρια, τα οποία πληρώνουν τα κενά των πόρων και δημιουργούν ένα «φίλτρο». Ειδικότερα, οι υδροδυναμικές δυνάμεις που επιβάλλονται ορίζουν τόσο το πάχος του φίλτρου, όσο και το ρυθμό διαρροής του υγρού, μέσα από αυτό. Τέτοιες ουσίες είναι το κοκκώδες άμυλο και ο μαρμαρυγίας (πυριτικό αργιλικό κάλιο).

6.2.10 Πρόσθετα μείωσης της τριβής (Friction reducers)

Η διαδικασία της υδραυλικής διάρρηξης συμπεριλαμβάνει την εισπίεση μεγάλων ποσοτήτων υγρών, σε πολλά στάδια κατά τη διάρκεια ενός έργου, μέσω ενός δικτύου σωλήνων και της γεώτρησης. Η ελαχιστοποίηση της τυρβώδους ροής των υγρών, λόγω των προσθέτων αυτών, οδηγεί τόσο σε εξοικονόμηση ενέργειας, όσο και σε περιορισμό των φαινομένων διάβρωσης και αλλοίωσης του σχηματισμού προς εκμετάλλευση. Η μείωση της τριβής ανάμεσα στο υγρό και τα τοιχώματα της γεώτρησης συνεπάγεται, επίσης, τη γρηγορότερη επίτευξη της επιθυμητής πίεσης για τη ρωγμάτωση του πετρώματος. Πολλές φορές τα πρόσθετα αυτά, επιλέγονται αντί των ιξωδοαυξητικών, τα οποία παρουσιάζονται στη συνέχεια, λόγω της μικρότερης αλλοίωσης και απόφραξης των πόρων του σχηματισμού που προκαλούν. Ως προσθετικά μείωσης της τριβής εντοπίζονται τα πολυμερή και συμπολυμερή, με μεγάλο μοριακό βάρος, όπως τα πολυακρυλαμιδικά και τα πολυακρυλικά.

6.2.11 Πηκτωματογόνα ή Ιξωδοαυξητικά (Gelling agents ή Viscosifiers)

Τα πρόσθετα αυτά αυξάνουν το ιξώδες του υγρού εισπίεσης, που έχει ως βάση το νερό, μετατρέποντάς το σε ζελατίνη. Η κατάσταση αυτή του υγρού επιτρέπει την καλύτερη μεταφορά του υλικού συγκράτησης των ρωγμών στις ρωγμές μεγάλου μήκους, όπως και την βελτιστοποίηση της διαδικασίας ρωγμάτωσης του πετρώματος (ενότητα 4.2.4). Η επιλογή τους βασίζεται, αποκλειστικά, στη συμβατότητα με τις ιδιότητες του σχηματισμού ρωγμάτωσης, όπως οι συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας, η αλατότητα και άλλες. Ταυτόχρονα, η συμβατότητα και η συμπεριφορά των ζελατινοποιημένων υγρών προσαρμόζεται σε πιθανές ακραίες συνθήκες θερμοκρασίας και αλατότητας με την προσθήκη σταθεροποιητών, οι οποίοι παρουσιάζονται παρακάτω. Οι συνηθέστερες ουσίες

που χρησιμοποιούνται είναι πολυμερή, όπως το κόμμι κυάμοψης (guar gum), η υδροξοπροπυλική κυάμοψη (hydroxypropyl guar), το κόμμι ξανθάνης (xanthan gum) και διάφοροι αιθέρες κυτταρίνης, όπως η μεθυλοκυτταρίνη, η καρβοξυμεθυλοκυτταρίνη (CMC) και η υδροξυαιθυλοκυτταρίνη (HEC) (Fink, 2013).

6.2.12 Δικτυωτές (Crosslinkers)

Οι δικτυωτές επιτρέπουν την αύξηση του ιξώδους ενός υγρού, χωρίς την επιπλέον προσθήκη ιξωδοαυξητικών προσθέτων (πολυμερών). Ειδικότερα, η αύξηση αυτή επιτυγχάνεται μέσω της σύνδεσης των μορίων των πολυμερών, που ήδη περιέχονται, και τη δημιουργία σταυροπολυμερών (US EPA, 2015b). Το βορικό οξύ, ως δικτυωτής, δημιουργεί συμπλέγματα με υδροξύλια και προσδίδει τις επιθυμητές ιδιότητες (π.χ. μεγάλο ιξώδες, μετρίαση διαρροών) στο υγρό για θερμοκρασίες έως και 105 °C. Επίσης, δικτυωτές θεωρούνται και οι οργανικές ενώσεις τιτανίου και ζirkονίου. Τα πλεονεκτήματα που επιφέρει η χρήση δικτυωτών και, άρα, η μείωση των απαιτούμενων πολυμερών συμπεριλαμβάνουν το χαμηλότερο κόστος της υδραυλικής διάρρηξης, την αυξημένη παραγωγή φυσικού αερίου, παράλληλα με τη δυνατότητα εφαρμογής σε κοιτάσματα μεγάλου βάθους και υψηλών θερμοκρασιών, όπου δε συνιστώνται οι μεγάλες ποσότητες πολυμερών (Fink, 2013).

6.2.13 Σταθεροποιητές ζελατίνης (Gel stabilizers)

Η λειτουργία των σταθεροποιητών ζελατίνης κρίνεται απαραίτητη για τη διατήρηση των ιδιοτήτων του δικτυωμένου υγρού εισπίεσης που παρουσιάστηκε παραπάνω, ιδιαίτερα σε εφαρμογές υψηλής θερμοκρασίας περιβάλλοντος. Ουσίες όπως η διαιθανολαμίνη, η τριαιθανολαμίνη, η μεθανόλη, η αιθυλενοδιαμίνη και τα μείγματά τους αποτρέπουν τη διάσπαση των συμπλεγμάτων στο υγρό και, επομένως, τη μείωση του ιξώδους του (Fink, 2013).

6.2.14 Απογαλακτωματοποιητές (Non-emulsifiers)

Η ομάδα των προσθέτων αυτών βοηθάει στην απογαλακτωματοποίηση (αποομογενοποίηση) ορισμένων μειγμάτων, ώστε να γίνει ευκολότερη η αφαίρεση τους από τη γεώτρηση, μετά τη χρήση τους. Σε ορισμένες περιπτώσεις, προκαλούν τη διάσπαση των πολυμερών, γεγονός που προσδίδει κινητικότητα στο μείγμα και διευκολύνει τον καθαρισμό. Η αποτελεσματικότητα των απογαλακτωματοποιητών βασίζεται, πρώτον, στο σωστό συνδυασμό με τα είδη των εκάστοτε μειγμάτων-στόχων, δεύτερον, στην χρονική στιγμή έναρξης της δράσης τους (το θετικότερο είναι αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία) και, τρίτον, στην ταχύτητα διάσπασής τους στα επιμέρους συστατικά, διευκολύνοντας την αφαίρεσή τους. Παράλληλα, χρησιμοποιούνται και ορισμένες καταλυτικές ουσίες για την αντίδραση, όπως αλκοόλες, αρωματικές ενώσεις, καρβοξυλικά οξέα, υδροξείδια, θειικά, θειώδη, φωσφορικά άλατα και άλλα.

6.2.15 Παράγοντες διάσπασης (Breakers)

Οι παράγοντες διάσπασης στοχεύουν στη μείωση του ιξώδους του υγρού εισπίεσης, μετά την ολοκλήρωση της ρωγμάτωσης του σχηματισμού. Οι χημικές αυτές ενώσεις προκαλούν

την αποσύνθεση των πολυμερών και, έτσι, διευκολύνουν τόσο την παραμονή του υλικού συγκράτησης στις ρωγμές, όσο και τη γρηγορότερη ροή υγρών και αερίων προς τη γεώτρηση. Σημαντική επιρροή στην αποτελεσματικότητα όλου του έργου διαδραματίζει η χρονική στιγμή της ενεργοποίησης των παραγόντων διάσπασης. Εσπευσμένη μείωση του ιξώδους μπορεί να σημαίνει ημιτελή διάδοση των ρωγμών στο σχηματισμό ή ανεπαρκή τοποθέτηση του υλικού συγκράτησης. Από την άλλη, η εκπρόθεσμη διάσπαση της ζελατινής μπορεί να καθυστερήσει την αναρροή των υγρών και, άρα, την παραγωγή του ζητούμενου φυσικού αερίου. Βέλτιστη περίοδος λειτουργίας θεωρούνται οι 24 ώρες μετά την ολοκλήρωση του σταδίου της ρωγμάτωσης. Οι συνηθέστεροι παράγοντες διάσπασης είναι οξέα, οξειδωτικά και ένζυμα, με ή χωρίς τη χρήση καταλυτών, αναλόγως τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος.

6.2.16 Καταγραφή των χημικών προσθέτων

Για τον εντοπισμό και την καταγραφή του συνόλου των χημικών ενώσεων που έχουν χρησιμοποιηθεί μέχρι σήμερα στις εφαρμογές της υδραυλικής διάρρηξης στις Η.Π.Α., κρίθηκε απαραίτητη η δημιουργία βάσεων δεδομένων. Η διαδικτυακή βάση των Η.Π.Α. ονομάζεται FracFocus Chemical Disclosure Registry. Σε αυτήν, είναι υποχρεωμένες όλες οι εργολαβικές εταιρείες να δημοσιεύουν τα χημικά πρόσθετα, που χρησιμοποιούν σε κάθε γεώτρηση, μαζί με τις απαραίτητες συμπληρωματικές πληροφορίες, όπως το όνομα της γεώτρησης, το σκοπό χρήσης, τη χημική ονομασία, τον σειριακό αριθμό Chemical Abstract Service Registry Number και τις συγκεντρώσεις). Περισσότερες από 39.000 δημοσιεύσεις χημικών προσθέτων, έως το Μάρτιο του 2013, συμπεριλήφθηκαν στην ανάλυση της Υπηρεσίας Προστασίας του Περιβάλλοντος (US EPA, 2015a), για την ακόλουθη αξιολόγηση των πιθανών επιπτώσεων της υδραυλικής διάρρηξης στους υδροφορείς πόσιμου νερού (US EPA, 2015b). Από την επεξεργασία των δημοσιευμένων στοιχείων, τα οποία περιλαμβάνουν περισσότερες από ένα εκατομμύριο χημικές ουσίες (όπως δηλώθηκαν από τις εργολαβικές εταιρείες), προκύπτουν 1.378 χημικές ενώσεις με διαπιστευμένο από την EPA χημικό τύπο και CASRN. Τελικά, η αφαίρεση και των διπλότυπων έχει ως αποτέλεσμα την αποτίμηση 693 ξεχωριστών χημικών ενώσεων, οι οποίες έχουν χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές υδραυλικής διάρρηξης. Σημειωτέον, ότι στο σύνολο αυτό δεν περιέχονται χημικά συστατικά, τα οποία αποτελούν μέρος των εμπιστευτικών προσθέτων των εταιρειών και δεν διαθέτουν δημοσιευμένο CASRN.

6.3 Διερεύνηση επικινδυνότητας των ιξωδοαυξητικών προσθέτων

Η χρήση των ιξωδοαυξητικών χημικών προσθέτων αποτέλεσε μεγάλη καινοτομία στην εξέλιξη της υδραυλικής διάρρηξης. Η ζελατινοποίηση του υγρού διάρρηξης επιτρέπει την αποτελεσματικότερη ρωγμάτωση του πετρώματος, ενώ, ταυτόχρονα, μεταφέρει καλύτερα μεγαλύτερη ποσότητα υλικού συγκράτησης σε όλο το μήκος των ρωγμών, με απόρροια τη βελτίωση της αποτελεσματικότητας του έργου σε σχέση με τη χρήση καθαρού νερού.

6.3.1 Τα είδη των ιξωδοαυξητικών προσθέτων

Όπως αναφέρεται και στην ενότητα 6.2.11, τα συχνότερα ιξωδοαυξητικά είναι η κυάμοψη (guar) και τα παράγωγα της (καρβοξυ-μεθυλική (CMG), υδροξυ-προπυλική (HPG) και η καρβοξυ-μεθυλο-υδροξυ-προπυλική (CMHPG) κυάμοψη) και οι ενώσεις κυτταρίνης (υδροξυ-

αιθυλική (HEC), υδροξυ-προπυλική (HPC), καρβοξυ-μεθυλο-υδροξυ-αιθυλική (CMHEC) κυτταρίνη). Οι Stringfellow et al. (2014) υπογραμμίζουν ότι η κυάμοψη και τα παράγωγα της εντοπίζονται και ως πρόσθετα σε πολλά τρόφιμα (π.χ. παγωτά) και προϊόντα υγιεινής. Οι ενώσεις αυτές παράγονται από φυσικά υλικά και δεν είναι τοξικές.

Παρ' όλ' αυτά, όλο και περισσότερο εφαρμόζεται η εναλλακτική των ζελατινοποιημένων υγρών διάρρηξης, που αποτελείται από υγρό με χημικά πρόσθετα μείωσης της τριβής. Ειδικότερα, η επιλογή αυτή δίνει λύση στο πρόβλημα της αλλοίωσης του σχηματισμού και της απόφραξης των πόρων του, το οποίο εμφανίζεται από τη χρήση ζελατίνης σύμφωνα με τους Wang et al. (2012). Εδώ, πρέπει να αποσαφηνιστεί πως τα πρόσθετα αυτά δεν επιφέρουν την ίδια μεταβολή του ιξώδους με τα ιξωδοαυξητικά, όμως η χρήση πολυμερών και σε αυτή την περίπτωση έχει κάποια, μικρότερη, επίδραση στο ιξώδες, σύμφωνα με τους Wang et al. (2012). Όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα 6.2.10, ως πρόσθετα μείωσης της τριβής χρησιμοποιούνται πολυμερή και συμπολυμερή, με μεγάλο μοριακό βάρος, όπως τα πολυακρυλαμιδικά και τα πολυακρυλικά. Παρά το γεγονός ότι τα πολυακρυλαμιδικά θεωρούνται τοξικά (Wang et al., 2012), γίνεται λόγος υποβάθμισης των ενώσεων αυτών σε ακρυλαμίδα με την επίδραση της θερμότητας ή της υπερϊώδους ακτινοβολίας. Η ακρυλαμίδα με χημικό τύπο (C_3H_5NO) αποτελεί γνωστή νευροτοξίνη.

6.3.2 Πλαίσιο διερεύνησης της πιθανότητας ανθρώπινης έκθεσης

Με βάση την έρευνα της US EPA (2015b), αλλά και το άρθρο των Rogers et al. (2015), γίνεται κατανοητό ότι πρωταρχικό ρόλο στην υπόγεια μεταφορά του ρύπου παίζουν η κινητικότητα και η επιμονή. Η σύγκριση των δύο αυτών τιμών για κάθε ρύπο και για ένα δεδομένο σενάριο μεταφοράς, επιτρέπει την αποτίμηση της διακινδύνευσης στην ανθρώπινη υγεία, σύμφωνα με το παραπάνω άρθρο. Πιο συγκεκριμένα, έγινε η αντιδιαστολή 1) του χρόνου που απαιτείται ώστε να μειωθεί η συγκέντρωση του ρύπου στο ένα δέκατο με 2) τον απαιτούμενο χρόνο μεταφοράς του ρύπου σε μία ορισμένη απόσταση ($d=94$ m), ίση με τη μέση τιμή των ελάχιστων επιτρεπόμενων αποστάσεων γεώτρησης εξόρυξης από οικιακό πηγάδι στις Η.Π.Α.. Ταυτόχρονα, συμπεριλήφθηκε και η παράμετρος της συχνότητας εμφάνισης των ρύπων, προχωρώντας στην αξιολόγηση μόνο εκείνων με περισσότερες από 50 αναφορές στις βάσεις δεδομένων (0,1 % όλων των αναφορών). Η εφαρμογή του πλαισίου αυτού στο άρθρο των Rogers et al. (2015) έγινε στο σύνολο των ρύπων που εντοπίστηκαν από την US EPA (2015b) και τη βάση δεδομένων FracFocus⁷, βάσει της προεργασίας που αναπτύχθηκε στην ενότητα 6.1.

Μεταξύ των αποτελεσμάτων της, είναι το ιξωδοαυξητικό πρόσθετο FD&C blue no. 1 και το πρόσθετο μείωσης της τριβής ακρυλαμίδα. Το FD&C blue no. 1, ή αλλιώς Erioglaucine Disodium Salt, πρόκειται για μία, μη τοξική, χρωστική ουσία, που εντοπίστηκε σε 195 από τις 50,000 αναφορές που εξετάστηκαν (0.39%) και η οποία βοηθά στον εντοπισμό πιθανών διαρροών στο έδαφος, των υγρών που χρησιμοποιούνται. Στην ακρυλαμίδα που παρουσιάστηκε νωρίτερα, αποδόθηκε η μεγαλύτερη πιθανότητα έκθεσης του ανθρώπου, καθώς εντοπίστηκε σε περισσότερες από 1,600 αναφορές εκ των 50,000 (3,2%) στις βάσεις δεδομένων. Επίσης, η ακρυλαμίδα παρουσίασε αξιόλογη επιμονή και κινητικότητα, αφού ο χρόνος που απαιτήθηκε για να μειωθεί η συγκέντρωση της στο 10% της αρχικής βρέθηκε ίσος με 0.37 χρόνια και εκείνος για τη μεταφορά της σε απόσταση 94 μέτρων ίσος με 0.26 χρόνια.

⁷ <https://fracfocus.org/>

Από τα στοιχεία τοξικότητας για την ακρυλαμίδα (US EPA IRIS, 2007), η χρόνια δόση αναφοράς προκύπτει $RfD = 0.002 \text{ mg/kg-day}$, ενώ ο συντελεστής κλίσης για κατάποση είναι $OSF = 0.5 \text{ (mg/kg-day)}^{-1}$. Η διαλυτότητά της στο νερό είναι $C = 2.155 \text{ g/mL}$ στους $30 \text{ }^\circ\text{C}$ και η βιοσυσώρευση της δίνεται από τον συντελεστή κατανομής σε μείγμα οκτανόλης-νερού $\log K_{ow} = -0.67$ (US EPA IRIS, 2007). Σύμφωνα με την ίδια πηγή, η ακρυλαμίδα εμφανίζει ιδιαίτερη κινητικότητα στο έδαφος, λόγω συντελεστή κατανομής σε μείγμα οργανικού άνθρακα-νερού $\log K_{oc} = 1$, όμως παρατηρείται η γρήγορη υποβάθμιση της με χρόνο ημιζωής στο έδαφος $t_{1/2, \text{εδαφος}} = 18\text{-}45$ ώρες. Από την άλλη εάν η ακρυλαμίδα εντοπιστεί στο νερό, βάσει του ίδιου συντελεστή κατανομής $\log K_{oc} = 1$, δεν προβλέπεται η προσρόφηση της στα διαλυμένα στερεά του. Ο χρόνος ημιζωής της στο νερό λόγω υδρόλυσης θεωρείται $t_{1/2, \text{νερό}} > 38$ χρόνια (US National Library of Medicine, 2005).

6.3.3 Συμπερασματικά σχόλια

Με βάση αυτά τα στοιχεία, συμπεραίνεται η σοβαρότητα μίας πιθανής διαρροής υγρού διάρρηξης, το οποίο περιέχει ακρυλαμίδα. Παρά τα οφέλη που προσφέρει αυτή στην αποτελεσματικότητα της μεθόδου, η τοξικότητα, η κινητικότητα και η επιμονή της καταδεικνύουν ότι η πιθανότητα έκθεσης του ανθρώπου, στην περίπτωση διαρροής της από μία εφαρμογή υδραυλικής διάρρηξης είναι ιδιαίτερα αυξημένη και δύναται να προκαλέσει δυσμενείς επιπτώσεις στην υγεία, όπως νευροπάθεια. Η US EPA (2015b), τέλος, παρέχει και περαιτέρω στοιχεία για τα συχνότερα χημικά πρόσθετα, όπως οι τιμές των όγκων που χρησιμοποιούνται ανά έργο. Στην περίπτωση της ακρυλαμίδης αναφέρεται η χρήση 361 λίτρων (L) χημικής ουσίας, κατά μέσο όρο, που, δεδομένης της πυκνότητας 1.13 g/mL , μεταφράζεται σε 408 kg.

Κεφάλαιο 7 Σύνοψη και συμπεράσματα

Η παρούσα διπλωματική εργασία έθεσε στόχο να απαντήσει το ερώτημα σε ποιο βαθμό δύναται να αυξηθεί η υδραυλική αγωγιμότητα ενός σχηματισμού με τη βοήθεια της υδραυλικής διάρρηξης. Γι' αυτό το λόγο, προτάθηκε ένας απλός τρόπος εκτίμησης της υδραυλικής αγωγιμότητας, ο οποίος λαμβάνει υπόψη βασικές παραμέτρους της μεθόδου και ορισμένες ιδιότητες του πετρώματος. Η απαίτηση για παραμετροποίηση της ανάλυσης οδήγησε στην εξοικείωση με τις εφαρμογές της υδραυλικής διάρρηξης και την εμβάθυνση στις ιδιαιτερότητες που παρουσιάζουν τα μη συμβατικά κοιτάσματα ορυκτών πόρων. Παράλληλα, δεδομένης της χρήσης πλήθους διαφορετικών χημικών προσθέτων για την επίτευξη του βέλτιστου αποτελέσματος, αναζητήθηκαν τα πιθανά σενάρια ρύπανσης των υπόγειων υδροφορέων.

Το κύριο συμπέρασμα που εξάγεται από την παραμετρική διερεύνηση είναι ότι η ρύθμιση του ιξώδους του υγρού διάρρηξης καθορίζει, σε μεγάλο βαθμό, την υδραυλική αγωγιμότητα του σχηματισμού, όταν η κατεύθυνση της ροής είναι παράλληλη στις ρωγμές του σχηματισμού. Η αύξηση της υδραυλικής αγωγιμότητας και η διατήρησή της σε υψηλά επίπεδα, κατά τη διάρκεια της ρωγμάτωσης, αποτελεί μία συσχέτιση μεταξύ των υφιστάμενων συνθηκών του σχηματισμού, του είδους του ιξωδορυθμιστικού πρόσθετου, των παραμέτρων της εφαρμογής και της συμβολής των υπολοίπων χημικών προσθέτων. Επίσης, καταλήγουμε στο συμπέρασμα πως οι ελαστικές ιδιότητες του σχηματισμού διάρρηξης επηρεάζουν, αλλά σε μικρότερο βαθμό, το εύρος της υδραυλικής αγωγιμότητας. Η αύξηση, επί της τιμής του άρρηκτου πετρώματος, ανέρχεται σε 6 και 9 τάξεις μεγέθους στον ψαμμίτη και τον αργιλικό σχιστόλιθο, αντίστοιχα. Επιπρόσθετα, το γεγονός ότι, πρώτον, το εύρος των αποτελεσμάτων και των δύο σχηματισμών κυμαίνεται περί την ίδια τιμή και, δεύτερον, επαληθεύεται από τα δεδομένα της βιβλιογραφίας, οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η υδραυλική διάρρηξη συνιστά μία σταθερή μέθοδο αύξησης της υδραυλικής αγωγιμότητας, η οποία εμφανίζεται να μην εξαρτάται από την αρχική τιμή αυτής στο άρρηκτο πέτρωμα. Αναφορικά με την παράμετρο της συχνότητας των ρωγμών, προσδιορίστηκε μέσω της διερεύνησης ότι παίζει καθοριστικό ρόλο στη βελτιστοποίηση της υδραυλικής διάρρηξης. Η επίδρασή της εντοπίζεται όχι μόνο ως θετική, όπως αναμενόταν, κατά την πύκνωση των ρωγμών για την ρωγμάτωση μεγαλύτερου ποσοστού του διαθέσιμου κοιτάσματος, αλλά και ως αρνητική, λόγω των φαινομένων δυσμενούς αλληλεπίδρασης των διαδοχικών ρωγμών σε όρους ανοιγμάτων και απαιτούμενων πιέσεων. Το βασικό συμπέρασμα είναι ότι υφίσταται ένα σημείο καμψής στη συχνότητα όπου επιτυγχάνεται η μέγιστη θετική επιρροή της πύκνωσης των ρωγμών χωρίς η δυσμενής επιρροή της να αυξάνεται κατακόρυφα.

Αξιολογώντας το προσομοίωμα εξέλιξης του ανοίγματος των ρωγμών και τις σχέσεις υπολογισμού της υδραυλικής αγωγιμότητας συμπεραίνουμε ότι η χρήση τους είναι ορθή, αλλά ανεπαρκής για να προσομοιώσει την πλήρη πραγματικότητα. Ειδικότερα, εντοπίζεται ότι το προσομοίωμα έχει αναπτυχθεί για την ανάλυση ψαμμιτικών σχηματισμών και δεν είναι σε θέση να συνυπολογίσει τη διαφοροποίηση της πλευρικής τάσης των πετρωμάτων που χρησιμοποιήθηκαν.

Ένας πρόσθετος όρος που συνδέεται με την αποτελεσματικότητα της υδραυλικής διάρρηξης είναι η ευκολία δημιουργίας δικτύου ρωγμών (fracability). Συγκρίνοντας τα πετρώματα δύο μη συμβατικών κοιτασμάτων, προέκυψε ότι μεγαλύτερη ευκολία αντιστοιχεί στον ψαμμίτη σε σύγκριση με τον αργιλικό σχιστόλιθο. Συγκεκριμένα, αυτό οφείλεται στην

μικρότερη πλευρική πίεση και το μεγαλύτερο βαθμό ψαθυρότητας που διακρίνει τον ψαμμίτη, σε συνθήκες παρόμοιου τασικού πεδίου.

Τέλος, η διερεύνηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από την χρήση των χημικών προσθέτων στις εφαρμογές της υδραυλικής διάρρηξης είχε ως αποτέλεσμα τον εντοπισμό διαφόρων χημικών ουσιών με μεγάλη πιθανότητα ανθρώπινης έκθεσης. Για την κατηγορία των ρυθμιστών του ιξώδους, καταλήγουμε στη χημική ένωση της ακρυλαμίδης ως ρύπο προτεραιότητας λόγω της τοξικότητάς της, της κινητικότητάς της και της συχνότητας εμφάνισής της σε εφαρμογές υδραυλικής διάρρηξης.

Βιβλιογραφία

Abou-Sayed I. S., Sorrell M. A., Foster R. A., Atwood E. L., Youngblood, D. R., (2011). Haynesville shale development program: From vertical to horizontal. Society of Petroleum Engineers North American Unconventional Gas Conference and Exhibition, Texas, USA. <http://dx.doi.org/10.2118/144425-MS>

Adachi J., Siebrits E., Peirce A., Desroches J., (2006). Computer simulation of hydraulic fractures. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 44, p. 739–757, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrmms.2006.11.006>

Andrews I.J., (2013). The Carboniferous Bowland Shale gas study: geology and resource estimation. British Geological Survey for Department of Energy and Climate Change, London, UK. http://nora.nerc.ac.uk/503839/1/BGS_DECC_BowlandShaleGasReport_MAIN_REPORT.pdf

Bai M., (2016). Why are brittleness and fracability not equivalent in designing hydraulic fracturing in tight shale gas reservoirs. Petroleum 2 (2016), p. 1-19, <http://dx.doi.org/10.1016/j.petlm.2016.01.001>

Barbot E., Vidic N.S., Gregory K.B., Vidic R.D., (2013). Spatial and temporal correlation of water quality parameters of produced waters from Devonian-age shale following hydraulic fracturing. Environmental Science and Technology 47 (6), pp. 2562-2569. <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es304638h>

Berg R. R., (1986). Reservoir Sandstones. Prentice-Hall, Inc., New Jersey, USA

Boyer C., Suarez-Rivera, J.K.R., Lewis, R.E., Waters, G., (2006). Producing Gas from Its Source. Schlumberger Oilfield Review 18 (3), p. 36-49, http://www.slb.com/~media/Files/resources/oilfield_review/ors06/aut06/producing_gas.pdf, ημερομηνία πρόσβασης 26/03/2016

Brechtel C.E., Abou-Sayed A.S., Jones A.H., (1978). Fracture Containment Analysis Conducted on the Benson Pay Zone in Columbia Well 20538-T. Proc. U. S. DOE Morgantown Energy Technology Center Second Eastern Gas Shales Symposium, Morgantown, WV., pp. 264.

Britt L. K., Smith M. B., (2009). Horizontal Well Completion, Stimulation Optimization, And Risk Mitigation -SPE 125526. SPE Eastern Regional Meeting, Charleston, West Virginia, USA. <http://www.nsfacturing.com/Files/SPE-125526-Final.pdf>

Britt L., (2012). Fracture stimulation fundamentals. Journal of Natural Gas Science and Engineering 8, pp. 34-51. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jngse.2012.06.006>

Cleary M.P., (1980). Analysis of Mechanisms and Procedures for Producing Favorable Shapes of Hydraulic Fractures - SPE-9260-MS. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Dallas, Texas, USA. <http://dx.doi.org/10.2118/9260-MS>

Cosad C., (1992). Choosing a Perforation Strategy. Oilfield Review 4 (4), p. 54-69, https://www.slb.com/~media/Files/resources/oilfield_review/ors92/1092/p54_69.pdf

Crosby D., Rahman M.M, Rahman M.K., Rahman S., (2001). Single and multiple transverse fracture initiation from horizontal wells. Journal of Petroleum Science and Engineering 35, p.191– 204, [10.1016/S0920-4105\(02\)00243-7](https://doi.org/10.1016/S0920-4105(02)00243-7)

Fall A., et al., (2012). Testing the basin-centered gas accumulation model using fluid inclusion observations: Southern Piceance Basin, Colorado. American Association of Petroleum Geologists Bulletin 96 (12), pp.2297-2318. <http://dx.doi.org/10.1306/05171211149>

Fink J.K., (2013). Hydraulic Fracturing Chemicals and Fluids Technology. Gulf Professional Publishing. Waltham, MA 02451, USA.

Freeze R.A., Cherry J.A., (1979). Groundwater. Prentice-Hall, Inc.

Geertsma J., (1985). Some Rock-Mechanical Aspects of Oil and Gas Well Completions - SPE-8073-PA. Society of Petroleum Engineers Journal 25 (6), pp. 848-856. <http://dx.doi.org/10.2118/8073-PA>

Geertsma J., de Klerk, F., (1969). Rapid Method of Predicting Width and Extent of Hydraulically Induced Fractures. Journal of Petroleum Technology 21 (12). <http://dx.doi.org/10.2118/2458-PA>

Gidley J. L., Holditch S. A., Nierode D. E., Veatch Jr. R. W., (1989). Recent Advances in Hydraulic Fracturing. Society of Petroleum Engineers, Richardson, Texas, USA.

Guillot D., Dunand A., (1985). Rheological characterization of fracturing fluids by using laser anemometry. Society of Petroleum Engineers Journal 25 (1). <http://dx.doi.org/10.2118/12030-PA>

Guo F., Morgenstern N. R., Scott J. D., (1993). Interpretation of Hydraulic Fracturing Breakdown Pressure. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 30 (6), pp. 617-626. [http://dx.doi.org/10.1016/0148-9062\(93\)91221-4](http://dx.doi.org/10.1016/0148-9062(93)91221-4)

Guo J.-C., Luo B., Zhu H.-Y., Wang Y.-H., Lu Q.-L., Zhao X., (2015). Evaluation of fracability and screening of perforation interval for tight sandstone gas reservoir in western Sichuan Basin. Journal of Natural Gas Science and Engineering 25, p. 77-87, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jngse.2015.04.026>

Guo T., Zhang S., Qu Z., Zhou T., Xiao Y., Gao J., (2014). Experimental study of hydraulic fracturing for shale by stimulated reservoir volume, *Fuel* 128, p.373–380, <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2014.03.029>

Haimson B.C., (1978). The hydrofracturing stress measuring method and recent field results. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* 15 (4), pp. 167-178. [http://dx.doi.org/10.1016/0148-9062\(78\)91223-8](http://dx.doi.org/10.1016/0148-9062(78)91223-8)

Hoek E., Bray J., (1977). *Rock Slope Engineering*, 2nd edition. Institute of Mining and Metallurgy, London, UK

Hoek E., Diederichs M. S., (2006). Empirical estimation of rock mass modulus. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 43, pp. 203–215. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrmms.2005.06.005>

Hossain M.M., Rahman M.K., Rahman S.S., (2000). Hydraulic fracture initiation and propagation: roles of wellbore trajectory, perforation and stress regimes, *Journal of Petroleum Science and Engineering* 27, p.129–149, [http://dx.doi.org/10.1016/S0920-4105\(00\)00056-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0920-4105(00)00056-5)

Howarth R. W., Santoro R., Ingraffea A., (2010). Methane and the greenhouse-gas footprint of natural gas from shale formations. *Climatic Change* 106 (4), pp. 679–690. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0061-5>

Hyne N. J., (2012) *Nontechnical guide to petroleum geology, exploration, drilling and production*. PennWell, Oklahoma, USA.

International Association for the Properties of Water and Steam, (2008). Release on the IAPWS Formulation 2008 for the Viscosity of Ordinary Water Substance - IAPWS R12-08. <http://iapws.org/relguide/visc.pdf>

International Society for Rock Mechanics Commission On Testing Methods, (1988). Suggested methods for determining the fracture toughness of rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. 25 (2), pp. 71-96. [http://dx.doi.org/10.1016/0148-9062\(88\)91871-2](http://dx.doi.org/10.1016/0148-9062(88)91871-2)

International Society for Rock Mechanics Commission On Testing Methods, (1987). Suggested methods for rock stress determination. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* 24 (1), pp. 53-73. [http://dx.doi.org/10.1016/0148-9062\(87\)91232-0](http://dx.doi.org/10.1016/0148-9062(87)91232-0)

Jarvie D.M., (2012). Shale resource systems for oil and gas: Part 1—Shale-gas resource systems. *AAPG Memoir* 97, p. 69–87. https://www.researchgate.net/publication/266413593_Shale_Resource_Systems_for_Oil_and_Gas_Part_1-Shale-gas_Resource_Systems

Jessica D. Rogers, Troy L. Burke, Stephen G. Osborn, and Joseph N. Ryan., (2015). A Framework for Identifying Organic Compounds of Concern in Hydraulic Fracturing Fluids Based on Their

Mobility and Persistence in Groundwater. Environ. Sci. Technol. Lett. 2 (6), p. 158–164. <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acs.estlett.5b00090>

Jiang, Z., Li, Z., Li, F. et al., (2015). Tight sandstone gas accumulation mechanism and development models. Petroleum Science 12 (4), pp. 587-605. <http://link.springer.com/article/10.1007/s12182-015-0061-6>

Johannes Karl Fink, (2013). Hydraulic Fracturing Chemicals and Fluids Technology. Gulf Professional Publishing. Waltham, MA 02451, USA.

Kim J., Moridis G.J., (2015). Numerical analysis of fracture propagation during hydraulic fracturing operations in shale gas systems. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 76, p.127–137, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrmms.2015.02.013>

King E. George, (2012). Hydraulic Fracturing 101: What Every Representative, Environmentalist, Regulator, Reporter, Investor, University Researcher, Neighbor and Engineer Should Know About Estimating Frac Risk and Improving Frac Performance in Unconventional Gas and Oil Wells - SPE 152596. SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference, Texas, USA. https://fracfocus.org/sites/default/files/publications/hydraulic_fracturing_101.pdf

Kry P.R., Gronseth J.M., (1983). In-situ Stresses and Hydraulic Fracturing in the Deep Basin. Journal of Canadian Petroleum Technology 22 (6). <http://dx.doi.org/10.2118/83-06-02>

Masters J.A., (1979). Deep Basin gas trap, western Canada. American Association of Petroleum Geologists Bulletin 63 (2), p.152-181. <http://archives.datapages.com/data/bulletns/1977-79/data/pg/0063/0002/0150/0152.htm?doi=10.1306%2FC1EA55CB-16C9-11D7-8645000102C1865D>

Matthews, C.S. and Russell, D.G., (1967). Pressure Buildup and Flow Tests in Wells. Society of Petroleum Engineers of AIME, New York, USA.

Naik G. C., (2003). Tight Gas Reservoirs- An unconventional natural energy source for future. Society of Petroleum Engineers. http://www.pinedaleonline.com/socioeconomic/pdfs/tight_gas.pdf, ημερομηνία πρόσβασης 09/10/2016

Nelson P.H., (2003). Petroleum Systems and Geologic Assessment of Oil and Gas in the Uinta-Piceance Province, Utah and Colorado. U.S. Geological Survey Digital Data Series DDS–69–B. http://pubs.usgs.gov/dds/dds-069/dds-069-b/REPORTS/Chapter_15.pdf

Nicot, J.P., Scanlon B.R., Reedy R.C., Costley R.A., (2014). Source and fate of hydraulic fracturing water in the Barnett Shale: a historical perspective. Environmental Science and Technology 48 (4), pp. 2464-2471. <http://dx.doi.org/10.1021/es404050r>

NYSDEC, (2015). Regulatory Program for Horizontal Drilling and High-Volume Hydraulic Fracturing to Develop the Marcellus Shale and Other Low-Permeability Gas Reservoirs. http://www.dec.ny.gov/docs/materials_minerals_pdf/fsgeis2015.pdf, ημερομηνία πρόσβασης 17/10/2016

Ostojic J., Rezaee R., Bahrami H., (2011). Production performance of hydraulic fractures in tight gas sands, a numerical simulation approach. *Journal of Petroleum Science and Engineering* 88-99, pp. 75-81. <http://dx.doi.org/10.1016/j.petrol.2011.11.002>

Parshall J., (2008). Barnett Shale Showcases Tight-gas Development. *Journal of Petroleum Technology* 60 (9). <http://dx.doi.org/10.2118/0908-0048-JPT>

Penny G.S., (1987). An Evaluation of the Effects of Environmental Conditions and Fracturing Fluids Upon the Long-Term Conductivity of Proppants - SPE-16900-MS. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Dallas, Texas. <http://dx.doi.org/10.2118/16900-MS>

Perras M. A., Diederichs M. S, (2014). A Review of the Tensile Strength of Rock: Concepts and Testing. *Geotechnical and Geological Engineering* 32 (2), pp. 525-546. <http://link.springer.com/article/10.1007/s10706-014-9732-0>

Renpu W., (2011), *Advanced well completion engineering*. Gulf Professional Publishing, Amsterdam, The Netherlands.

Rezaee R., Saeedi A., Clennell B., (2012). Tight gas sands permeability estimation from mercury injection capillary pressure and nuclear magnetic resonance data. *Journal of Petroleum Science and Engineering* 88–89, p. 92–99. <http://dx.doi.org/10.1016/j.petrol.2011.12.014>

Rogers J. D., Burke T. L., Osborn S. G., Ryan J. N., (2015). A Framework for Identifying Organic Compounds of Concern in Hydraulic Fracturing Fluids Based on Their Mobility and Persistence in Groundwater. *Environ. Sci. Technol. Lett.*, 2015, 2 (6), p. 158–164. <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acs.estlett.5b00090>

Salehi I., Ciezobka J., (2013). Controlled hydraulic fracturing of naturally fractured shales: A case study in the Marcellus Shale examining how to identify and exploit natural fractures - (SPE-164524-MS). Society of Petroleum Engineers Unconventional Resources Conference-USA, Texas, USA. <http://dx.doi.org/10.2118/164524-MS>

Schlumberger, (1984). *Fracturing Fluids: Engineering Data*, Dowell Schlumberger, Houston, USA.

Stringfellow W. T., Domen J. K., Camarillo M. K., Sandelin W. L., Borglin S., (2014). Physical, chemical, and biological characteristics of compounds used in hydraulic fracturing. *Journal of Hazardous Materials* 275, pp. 37–54. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.04.040>

Sun Y., (2014). Impact of slickwater fracturing fluid compositions on the petrophysical properties of shale and tight sand. *Doctoral Dissertations*. Paper 2359. http://scholarsmine.mst.edu/doctoral_dissertations/2359

US DoE, (2009). Modern Shale Gas Development in the United States: A Primer. [http://energy.gov/sites/prod/files/2013/03/f0/ShaleGasPrimer Online 4-2009.pdf](http://energy.gov/sites/prod/files/2013/03/f0/ShaleGasPrimer%20Online%204-2009.pdf), ημερομηνία πρόσβασης Σάββατο, 26 Μαρτίου 2016

U.S. DoE, (2011). Shale gas – Applying technology to solve America’s energy challenges. U.S. Department of Energy. [http://www.netl.doe.gov/file%20library/research/oil-gas/Shale Gas March 2011.pdf](http://www.netl.doe.gov/file%20library/research/oil-gas/Shale%20Gas%20March%202011.pdf)

US EIA, (2013). Technically Recoverable Shale Oil and Shale Gas Resources: An Assessment of 137 Shale Formations in 41 Countries Outside the United States. http://www.eia.gov/analysis/studies/worldshalegas/archive/2013/pdf/fullreport_2013.pdf?zscb=33537304

US EPA, (2015a). Analysis of Hydraulic Fracturing Fluid Data from the FracFocus Chemical Disclosure Registry 1.0 - EPA/601/R-14/003. <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-03/documents/fracfocustanalysisreportandappendicesfinal0320155080.pdf>, ημερομηνία πρόσβασης 17/10/2016

US EPA, (2015b). Assessment of the Potential Impacts of Hydraulic Fracturing for Oil and Gas on Drinking Water Resources (External Review Draft) - EPA/600/R-15/047, http://ofmpub.epa.gov/eims/eimscomm.getfile?p_download_id=523539, ημερομηνία πρόσβασης 17/10/2016

US EPA, IRIS, (2007). Toxicological Review of Acrylamide (External Review Draft). U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, EPA/635/R-07/009A. https://cfpub.epa.gov/si/si_public_file_download.cfm?p_download_id=495149, ημερομηνία πρόσβασης 21/10/2016

US National Library of Medicine, Hazardous Substances Data Bank, (2005). ACRYLAMIDE CASRN:79-06-1. <http://toxnet.nlm.nih.gov/cgi-bin/sis/search2/r?dbs+hsdb:@term+@DOCNO+191>, ημερομηνία πρόσβασης 21/10/2016

Vandenbroucke M., Largeau C., (2006). Kerogen origin, evolution and structure. *Organic Geochemistry* 38 (5), p. 719–833. <http://dx.doi.org/10.1016/j.orggeochem.2007.01.001>

Wang J. Y., Holditch S. A., McVay D. A., (2012). Effect of gel damage on fracture fluid cleanup and long-term recovery in tight gas reservoirs. *Journal of Natural Gas Science and Engineering* 9, pp. 108-118. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1875510012000601?np=y>

Warpinski N.R., (1989). Determining the Minimum in situ Stress from Hydraulic Fracturing through Perforations. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* 26 (6), p. 523-31. [http://dx.doi.org/10.1016/0148-9062\(89\)91430-7](http://dx.doi.org/10.1016/0148-9062(89)91430-7)

Wu Y., Cheng L., Huang S., Jia P., Zhang J., Lan X., Huang H., (2016). A practical method for production data analysis from multistage fractured horizontal wells in shale gas reservoirs. *Fuel* 186, pp. 821–829. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2016.09.029>

Ying F.X., Luo P., He D.B., (2004). *Clastic Reservoir Diagenesis and Numerical Simulation of the Petroliferous Basins of China*. Petroleum Industry Press, Beijing, China

Yu W., Sepehrnoori K., (2014). Simulation of gas desorption and geomechanics effects for unconventional gas reservoirs. *Fuel* 116, p. 455–464. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2013.08.032>

Yuan W., Pan Z., Li X., Yang Y., Zhao C., Connell L. D., Li S., He J., (2014). Experimental study and modelling of methane adsorption and diffusion in shale. *Fuel* 117, p. 509–519. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2013.09.046>

Zou C., et al., (2012). Tight gas sandstone reservoirs in China: characteristics and recognition criteria. *Journal of Petroleum Science and Engineering* 88–89, pp. 82–91. <http://dx.doi.org/10.1016/j.petrol.2012.02.001>

Κατάλογος συμβόλων

Ελληνικά σύμβολα

λ – Συχνότητα των ρωγμών ανά μονάδα μήκους (L^{-1})

μ – Δυναμικό ιξώδες υγρού διάρρηξης $\{M/(L \cdot T)\}$

μ_w – Δυναμικό ιξώδες του νερού $\{M/(L \cdot T)\}$

ν – Κινηματικό ιξώδες του υγρού (L^2/T)

ν – Λόγος του Poisson

ρ_w – Πυκνότητα του νερού (M/L^3)

σ_h – Ελάχιστη κύρια οριζόντια τάση $\{M/(L \cdot T^2)\}$

σ_H – Μέγιστη κύρια οριζόντια τάση $\{M/(L \cdot T^2)\}$

σ_t – Εφελκυστική τάση $\{M/(L \cdot T^2)\}$

σ_v – Κύρια κατακόρυφη τάση $\{M/(L \cdot T^2)\}$

Λατινικά σύμβολα

A – Επιφάνεια κάθετα στη ροή (L^2)

c – Αγωγιμότητα (L^2/T)

C – Διαλυτότητα στο νερό (M/L^3)

dX – Απόσταση μεταξύ των ρωγμών (L)

e – Άνοιγμα ανάμεσα στις παράλληλες πλάκες (ρωγμής) (L)

e' – Άνοιγμα των ρωγμών με συνυπολογισμό της συχνότητας (L)

g – Επιτάχυνση της βαρύτητας (L/T^2)

G – Μέτρο διατμήσεως του πετρώματος $\{M/(L \cdot T^2)\}$

H_f – Ύψος της ρωγμής (L)

H_L – Διαφορά υδραυλικού φορτίου (L)

i – Υδραυλική κλίση

K – Υδραυλική αγωγιμότητα (L/T)

K_0 – Υδραυλική αγωγιμότητα άρρηκτου πετρώματος (L/T)

K_{Ic} – Αντοχή στη θραύση ($\{M/(L^{1/2} \cdot T^2)\}$)

L – Μήκος των πλακών (ρωγμών) στη διεύθυνση της ροής (L)

$\log K_{oc}$ – Συντελεστής κατανομής σε μείγμα οργανικού άνθρακα-νερού

$\log K_{ow}$ – Συντελεστής κατανομής σε μείγμα οκτανόλης-νερού

OSF – Συντελεστής κλίσης για κατάποση $\{M/(M \cdot T)\}^{-1}$

P_b – Πίεση ρωγμάτωσης $\{M/(L \cdot T^2)\}$

P_c – Πίεση κλεισίματος $\{M/(L \cdot T^2)\}$

P_r – Πίεση ανοίγματος της ρωγμής $\{M/(L \cdot T^2)\}$

P_s – Πίεση απευθείας μετά το κλείσιμο των ρωγμών $\{M/(L \cdot T^2)\}$

P_w – Πίεση πόρων $\{M/(L \cdot T^2)\}$

Q – Παροχή ρευστού (L^3/T)

q_0 – Παροχή εισπίεσης του υγρού διάρρηξης (L^3/T)

RfD – Χρόνια δόση αναφοράς $\{M/(M \cdot T)\}$

t – Χρόνος από την έναρξη της ρωγμάτωσης (T)

$t_{1/2}$ – Χρόνος ημιζωής (T)

z – Βάθος μέτρησης των τάσεων από την επιφάνεια (L)

Γλωσσάρι τεχνικών όρων

Αλατότητα = Salinity

Αναρροή (υγρού) = Flowback (fluid)

Ανθρακικό αποτύπωμα = Greenhouse-gas footprint

Αποθήκευτρο πέτρωμα = reservoir rock

Βιτουμένιο = Bitumen

Γαλάκτωμα (χημεία) = Emulsion (chemistry)

Διαγένεση = Diagenesis

Διάστημα = Interval

Δικτύωση (πολυμερών) = Crosslinking (polymers)

Δόση αναφοράς = RfD (Reference dose)

Επιφανειοδραστική ουσία = Surfactant

Ζελατίνη (χημεία) = Gel (chemistry)

Καθαλάτωση (χημεία) = Scale (chemistry)

Καταγένεση = Katagenesis

Κατεργασία με οξύ = Acid treatment

Κηρογενές = Kerogen

Μεταγένεση = Metagenesis

Μη συμβατικό (κοίτασμα) = Unconventional (reservoir)

Ολικά Διαλυμένα Στερεά = Total Dissolved Solids

Περιμετρική διάτρηση (γεώτρησης) = Perforation (wellbore)

Πίεση ανοίγματος των ρωγμών = Fracture re-open pressure

Πίεση απευθείας μετά το κλείσιμο των ρωγμών = Instantaneous shut-in pressure

Πίεση κλεισίματος της ρωγμής = Fracture closure pressure

Πίεση ρωγμάτωσης = Breakdown pressure

Πλατφόρμα γεώτρησης = Well pad

Σκέλος (ρωγμής) = Wing (fracture)

Σταυροπολυμερές = Crosslinked polymer

Στρωματικό φράγμα = Barrier layer

Συνθήκη επίπεδης παραμόρφωσης = plain-strain condition

Συντελεστής κατανομής = Partition coefficient

Συντελεστής κλίσης για κατάποση = OSF (Oral Slope Factor)

Συντελεστής τάσεων καταπόνησης = Stress intensity factor

Τσιμέντωση = Cementation

Υλικό συγκράτησης των ρωγμών = Proppant material

Υποβάθμιση (πολυμερών) = Degradation (polymer)

Φακός (γεωλογία) = Sweet spot (geology)

Φυσικά υπάρχουσες ραδιενεργές ουσίες = Naturally Occurring Radioactive Material

Ψαθυρότητα = Brittleness

Ψευδοπλαστική ροή = Shear thinning flow

Glossary of technical terms

- Acid treatment** = Κατεργασία με οξύ
- Barrier layer** = Στρωματικό φράγμα
- Bitumen** = Βιτουμένιο
- Breakdown pressure** = Πίεση ρωγμάτωσης
- Brittleness** = Ψαθυρότητα
- Capillary pressure** = Τριχοειδής πίεση
- Cementation** = Τσιμέντωση
- Crosslinked polymer** = Σταυροπολυμερές
- Crosslinking (polymers)** = Δικτύωση (πολυμερών)
- Degradation (polymer)** = Υποβάθμιση (πολυμερών)
- Diagenesis** = Διαγένεση
- Emulsion (chemistry)** = Γαλάκτωμα (χημεία)
- Flowback (fluid)** = Αναρροή (υγρού)
- Fracture closure pressure** = Πίεση κλεισίματος της ρωγμής
- Fracture re-open pressure** = Πίεση ανοίγματος της ρωγμής
- Gel (chemistry)** = Ζελατίνη (χημεία)
- Greenhouse-gas footprint** = Ανθρακικό αποτύπωμα
- Instantaneous shut-in pressure** = Πίεση απευθείας μετά το κλείσιμο των ρωγμών
- Interval** = Διάστημα
- Katagenesis** = Καταγένεση
- Kerogen** = Κηρογενές
- Metagenesis** = Μεταγένεση
- Naturally Occurring Radioactive Material** = Φυσικά υπάρχουσες ραδιενεργές ουσίες
- OSF (Oral Slope Factor)** = Συντελεστής κλίσης για κατάποση
- Partition coefficient** = Συντελεστής κατανομής
- Perforation (wellbore)** = Περιμετρική διάτρηση (γεώτρησης)
- Plain-strain condition** = Συνθήκη επίπεδης παραμόρφωσης
- Proppant material** = Υλικό συγκράτησης των ρωγμών
- Reservoir rock** = Αποθήκευτρο πέτρωμα

RfD (Reference dose) = Δόση αναφοράς

Salinity = Αλατότητα

Scale (chemistry) = Καθαλάτωση (χημεία)

Shear thinning flow = Ψευδοπλαστική ροή

Stress intensity factor = Συντελεστής τάσεων καταπόνησης

Surfactant = Επιφανειοδραστική ουσία

Sweet spot (geology) = Φακός (γεωλογία)

Total Dissolved Solids = Ολικά Διαλυμένα Στερεά

Unconventional (reservoir) = Μη συμβατικό (κοίτασμα)

Well pad = Πλατφόρμα γεώτρησης

Wing (fracture) = Σκέλος ρωγμής

Παράρτημα. Συγκεντρωτικός πίνακας με τα χημικά πρόσθετα της υδραυλικής διάρρηξης ανάλογα με το σκοπό χρήσης τους

Πίνακας 7-1: Οι κατηγορίες των χημικών προσθέτων που χρησιμοποιούνται σε κάθε στάδιο της υδραυλικής διάρρηξης, ο σκοπός που επιτελούν και οι συχνότερες χημικές ουσίες ανά κατηγορία

Κατηγορίες χημικών προσθέτων	Σκοπός	Χημικές ουσίες που εμφανίζονται σε $\geq 20\%$ των αναφορών στη βάση FracFocus (US EPA, 2015b)
1ο στάδιο: Κατεργασία της γεώτρησης με οξύ και άλλα χημικά πρόσθετα		
Οξέα καθαρισμού (Acids)	Διαλύουν τα κατάλοιπα της σκυροδέτησης και της αλλοιωμένης ζώνης του σχηματισμού για την απόφραξη των μικρορωγμών	Hydrochloric acid
Γαλακτωματοποιητές (Emulsifiers)	Βοηθούν στην ανάμιξη υγρών μειώνοντας τις διεπιφανειακές τάσεις μεταξύ τους για την ομογενοποίηση του μείγματος	2-Butoxyethanol; polyoxyethylene(10) nonylphenyl ether; methanol; nonyl phenol ethoxylate
Παράγοντες σταθεροποίησης της αργίλου (Clay controlling agents)	Αποτρέπουν τη διόγκωση και τη μετακίνηση των αργιλικών πλακιδίων λόγω του νερού	Choline chloride
Αναστολείς διάβρωσης (Corrosion inhibitors)	Προστατεύουν τα σιδερένια και χαλύβδινα τμήματα του εξοπλισμού από τις διαβρωτικές ουσίες	Methanol; propargyl alcohol; isopropanol
Παράγοντες ρύθμισης του σιδήρου (Iron controlling agents)	Αποτρέπουν την απόφραξη των πόρων από την κατακρήμνιση των οξειδίων των μετάλλων	Citric acid

Αναστολείς καθαλατώσεων (Scale inhibitors)	Εμποδίζουν την κατακρήμνιση των ανθρακικών και θειικών αλάτων στην περίμετρο της σωλήνωσης ή σε ευαίσθητα σημεία της γεώτρησης	Ethylene glycol; methanol
Παράγοντες ρύθμισης του pH (pH controlling agents)	Επηρεάζουν το pH ενός διαλύματος είτε επιβάλλοντας, είτε αποτρέποντας την αλλαγή του, για την επίτευξη των επιθυμητών συνθηκών για τη λειτουργία των υπολοίπων προσθέτων	Carbonic acid, dipotassium salt; potassium hydroxide; sodium hydroxide; acetic acid
Βιοκτόνα (Biocides)	Αποτρέπουν την ανάπτυξη βακτηρίων, τα οποία μπορεί να παράγουν αέριους ρύπους και, παράλληλα, να μειώσουν την μεταφορική ικανότητα του υγρού διάρρηξης	Glutaraldehyde; 2,2-dibromo-3-nitrilopropionamide
2ο στάδιο: Εισπίεση υδατικού διαλύματος για τη ρωγμάτωση του πετρώματος		
Πρόσθετα μείωσης της τριβής (Friction reducers)	Μειώνουν την τριβή του υγρού διάρρηξης με τις επιφάνειες της γεώτρησης για την ευκολότερη αύξηση της παροχής εισπίεσης	Hydrotreated light petroleum distillates
3ο στάδιο: Τοποθέτηση του υλικού συγκράτησης των ανοιχτών ρωγμών		
Πηκτωματογόνα ή ιξωδοαυξητικά (Gelling agents or Viscosifiers)	Αυξάνουν το ιξώδες του υγρού εισπίεσης με στόχο τη μεταφορά μεγαλύτερων ποσοτήτων υλικού συγκράτησης των ρωγμών και τη μετρίαση των φαινομένων διαφυγής του υγρού μέσα στο σχηματισμό	Guar gum; hydrotreated light petroleum distillates
Δικτυωτές (Crosslinkers)	Αυξάνουν το ιξώδες ενώνοντας τα μόρια των πολυμερών ενός ρευστού	Ethylene glycol; potassium hydroxide; sodium hydroxide
Απογαλακτωματοποιητές (Non-emulsifiers)	Διαχωρίζουν μείγματα που δημιουργήθηκαν κατά την υδραυλική διάρρηξη και την αλληλεπίδραση με το σχηματισμό	Methanol; isopropanol; nonyl phenol ethoxylate

Παράγοντες διάσπασης (Breakers)	Μειώνουν το ιξώδες υγρών ειδικής κατεργασίας όπως η ζελατίνη, μετά τη χρήση τους	Peroxydisulfuric acid diammonium salt
4ο στάδιο: Έκπλυση της γεώτρησης με νερό		