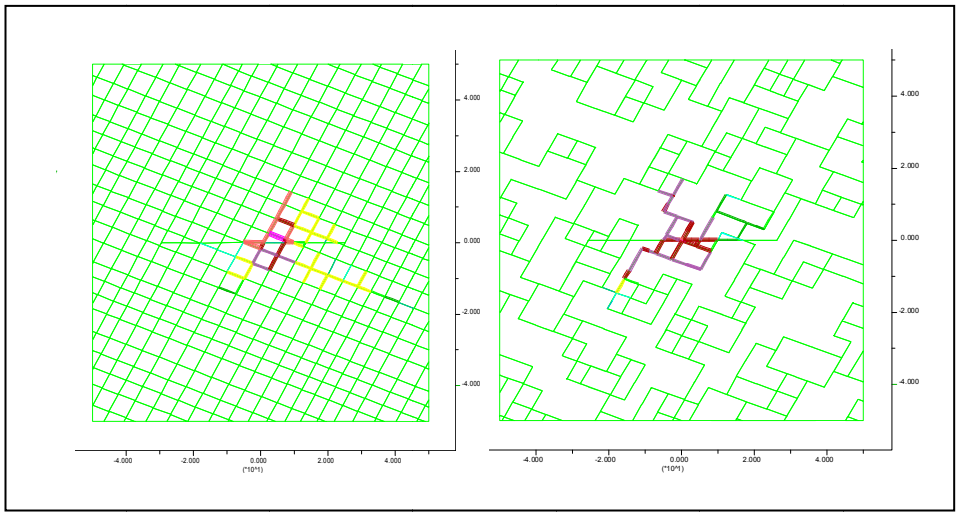
ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕ ΘΕΜΑ:

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗΣ ΘΡΑΥΣΗΣ ΣΕ ΦΥΣΙΚΑ ΡΩΓΜΑΤΩΜΕΝΟΥΣ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΕΣ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΔΙΑΚΡΙΤΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

ΙΑΚΩΒΑΤΟΣ ΔΙΟΝΥΣΙΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Π. ΝΟΜΙΚΟΣ



ΑΘΗΝΑ 2014

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕ ΘΕΜΑ:

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗΣ ΘΡΑΥΣΗΣ ΣΕ ΦΥΣΙΚΑ ΡΩΓΜΑΤΩΜΕΝΟΥΣ ΤΑΜΙΕΥΤΗΡΕΣ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΔΙΑΚΡΙΤΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

ΙΑΚΩΒΑΤΟΣ ΔΙΟΝΥΣΙΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Π. ΝΟΜΙΚΟΣ

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Π. ΝΟΜΙΚΟΣ

Α. ΣΟΦΙΑΝΟΣ

Σ. ΣΤΑΜΑΤΑΚΗ

Περίληψη

Η διπλωματική εργασία με τίτλο «Αριθμητική προσομοίωση υδραυλικής θραύσης σε φυσικά ρωγματωμένους ταμιευτηρες με τη μεθοδο διακριτων στοιχείων» εκπονήθηκε κατά τη διάρκεια του ακαδημαϊκού έτους 2013-2014 στο πλαίσιο του προπτυχιακού προγράμματος σπουδών στη σχολή Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η προσομοίωση της υδραυλικής θραύσης του πετρώματος και της αλληλεπίδρασης της με το δίκτυο ασυνεχειών, και η διερεύνηση της επίδρασης διαφόρων παραμέτρων γεωλογικών, λειτουργικών και προσομοίωσης στην διάδοση της υδραυλικής θραύσης όπως αυτή παρατηρείται στα αριθμητικά μοντέλα. Για τον σκοπό αυτό κατασκευάστηκαν αριθμητικά μοντέλα και πραγματοποιήθηκε προσομοίωση της υδραυλικής ρωγμάτωσης με την χρήση του προγράμματος UDEC της εταιρείας Itasca Inc., το οποίο λειτουργεί με βάση τη μέθοδο των διακριτών στοιχείων.

Στο θεωρητικό μέρος παρατίθενται στοιχεία που αφορούν τις βασικές αρχές της μηχανικής της υδραυλικής θραύσης καθώς και η περιγραφή της μεθόδου όταν εφαρμόζεται για την εξόρυξη σχιστολιθικού αερίου. Επιπλέον, γίνεται ανάλυση της μεθόδου των διακριτών στοιχείων και των διαφόρων αλγορίθμων που εφαρμόζονται στο UDEC για τον υπολογισμό των αριθμητικών μοντέλων.

Στο πειραματικό μέρος της εργασίας γίνεται η περιγραφή της κατασκευής των αριθμητικών μοντέλων και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τις παραμετρικές δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν.

Για τις προσομοιώσεις εφαρμόστηκαν δύο είδη αλγορίθμων: της συμπιεστής και της ασυμπίεστης ροής. Επίσης, εξετάστηκε η επίδραση διαφόρων παραμέτρων (όπως ο ρυθμός εισπίεσης και το αρχικό άνοιγμα ασυνεχειών), στην διακύμανση της πίεσης, στο υδραυλικό άνοιγμα των ασυνεχειών και στο μήκος διάδοσης της υδραυλικής θραύσης.

Abstract

The purpose of this thesis is the simulation of hydraulic fracturing of naturally fractured reservoirs using the Distinct element method. Hydraulic fracturing modeling is based on simplifying mathematical modeling valid only under certain and restrictive conditions. Discrete elements modeling of hydraulic fracturing has the ability to take explicitly into account the existence of the natural fractures of the rock mass and to investigate the effect of their condition (aperture for zero normal stress, geometry) and their interaction with the prevailing natural stress field.

For this reason, a series of numerical simulations were carried out, using two different types of flow algorithms (compressible and incompressible). During the simulations certain conditions are altered (e.g. injection rate, aperture for zero normal stress) in order to examine the effect on the fracture propagation.

During the thesis, there is description and analysis of the experiments that were conducted. Moreover, the results are presented along with some comments and in the end some of the conclusions are summarized

Περιεχόμενα

1 Εισαγωγή 7

2 Περί υδραυλικής θραύσης του πετρώματος 8

2.1 Γενικά 8

2.2 Μηχανική της υδραυλικής θραύσης 9

2.2.1 Συνθήκες εφελκυστικής αστοχίας 10

2.2.2 Έναρξη και διάδοση ρωγμάτωσης και θραύση του σχηματισμού (Fracture initiation and formation breakdown) 12

2.2.3 Προσανατολισμός και ανάπτυξη της ρωγμής (Fracture orientation, growth and confinement) 18

2.2.4 Μέγεθος και σχήμα ρωγμής 23

2.2.5 Φάση κλεισίματος της ρωγμής 25

2.2.5.1 Προσδιορισμός του σ3 από δοκιμές (shut-in/decline) 26

2.2.5.2 Προσδιορισμός του σ3 σε δοκιμές ροής προς τα έξω από την γεώτρηση (flowback) 29

2.3 Η επίδραση της προϋπάρχουσας ρωγμάτωσης 30

Φυσικές ρωγμές 30

2.4 Υδραυλική θραύση σε ταμιευτήρες σχιστολιθικού αερίου και πετρελαίου 33

2.4.1 Μέθοδος εξόρυξης 34

2.4.2 Εξοπλισμός 37

2.4.3 Σχιστολιθικό αέριο 38

2.4.4 Γεωλογικά χαρακτηριστικά ταμιευτήρων Σχιστολιθικού Αερίου 39

3 Η μέθοδος διακριτών στοιχείων και ο κώδικας UDEC 41

3.1 Το πρόγραμμα UDEC 41

3.2 Η μέθοδος διακριτών στοιχείων 42

3.2.1 Εξισώσεις κίνησης 44

3.2.2 Διατήρηση της ορμής και της ενέργειας στην μαθηματική διατύπωση της μεθόδου των διακριτών στοιχείων 47

3.2.3 Αναπαράσταση των ασυνεχειών στον κώδικα UDEC 49

3.2.3.1 Αναγνώριση και ταυτοποίηση επαφών 49

3.2.3.2 Μηχανική συμπεριφορά των ασυνεχειών 54

3.2.3.3 Παραμορφωσιμότητα των ογκοτεμαχίων 57

3.2.3.4 Δημιουργία δικτύου ασυνεχειών 60

3.2.4 Προσομοίωση της ροής μέσω ασυνεχειών στον κώδικα UDEC 63

3.2.4.1 Συμπιεστή ροή 64

3.2.4.2 Ασυμπίεστη ροή 71
4 Πρώτη σειρά αριθμητικών μοντέλων με συμπιεστή ροή 75
4.1 Προετοιμασία των αριθμητικών μοντέλων 76
4.2 Αριθμητικά αποτελέσματα 82
4.2.1 Πίεση και άνοιγμα ρωγμής για διάφορους ρυθμούς εισπίεσης 82
4.2.1.1 Ρυθμός εισπίεσης 0.0001 m^2/sec 82
4.2.1.2 Ρυθμός εισπίεσης 0.0002 m^2/sec 85
4.2.1.3 Ρυθμός εισπίεσης 0.0004 m^2/sec 88
4.2.1.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων 91
4.2.2 Πίεση και άνοιγμα ρωγμής με τη μεταβολή του αρχικού ανοίγματος 91
4.2.3 Αλγόριθμος συπιεστής ροής και απαιτούμενος χρόνος επίλυσης μοντέλων 92
5 Δεύτερη σειρά αριθμητικών μοντέλων με αλγόριθμο ασυμπίεστης ροής 93
5.1 Προετοιμασία των αριθμητικών μοντέλων 93
5.2 Αριθμητικά αποτελέσματα 98
5.2.1 Αποτελέσματα παραμετρικών δοκιμών με μεταβολή του ρυθμού εισπίεσης 99
5.2.1.1 Ρυθμός εισπίεσης $1*10^{-4}$ m^2/sec 100
5.2.1.2 Ρυθμός εισπίεσης $2*10^{-4}$ m^2/sec 102
5.2.1.3 Ρυθμός εισπίεσης $4*10^{-4}$ m^2/sec 105
5.2.1.4 Ρυθμός εισπίεσης $10*10^{-4}$ m^2/sec 107
5.2.1.5 Ρυθμός εισπίεσης $15*10^{-4}$ m^2/sec 110
5.2.1.6 Ρυθμός εισπίεσης $20*10^{-4}$ m^2/sec 113
5.2.1.7 Σύγκριση αποτελεσμάτων 116
5.2.2 Αποτελέσματα παραμετρικών δοκιμών με μεταβολή του αρχικού ανοίγματος ασυνεχειών 119
5.2.2.1 Αρχικό άνοιγμα ασυνεχειών 25μ 119
5.2.2.2 Αρχικό άνοιγμα ασυνεχειών 50μm 121
5.2.2.3 Αρχικό άνοιγμα ασυνεχειών 100μm 123
5.2.2.4 Αρχικό άνοιγμα ασυνεχειών 250μm 126
5.2.2.5 Αρχικό άνοιγμα ασυνεχειών 500μ 128
5.2.2.6 Σύγκριση αποτελεσμάτων 131
5.2.3 Αποτελέσματα παραμετρικών δοκιμών για διαφορετικά εντατικά πεδία... 134
5.2.3.1 Ανισότροπο εντατικό πεδίο (σxx 25 MPa σyy 20 MPa) 134
5.2.3.2 Ανισότροπο εντατικό πεδίο (σxx 30 MPa σyy 15 MPa) 137

5.2.3.3 Ισότροπο εντατικό πεδίο (σxx 25 MPa σyy 25 MPa) 139

5.2.3.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων 142

6 Τρίτη σειρά αριθμητικών μοντέλων με ψηδίδωση Voronoi 145

6.1 Προετοιμασία των αριθμητικών μοντέλων 146

6.2 Αποτελέσματα βασικού μοντέλου 151

6.3 Αποτελέσματα παραμετρικών δοκιμών με μεταβολη του μήκους στρογγυλοποίησης των ογκοτεμαχίων (round length) 158

6.4 Αποτελέσματα παραμετρικών δοκιμών με μεταβολή του αρχικού ανοίγματος των ασυνεχειών 179

6.5 Αποτελέσματα παραμετρικών δοκιμών με μεταβολή του ρυθμού εισπίεσης 186

7 Τέταρτη σειρά αριθμητικών μοντέλων με δίκτυο ασυνεχειών 194

7.1 Προετοιμασία των αριθμητικών μοντέλων 195

7.2 Μοντέλο με δίκτυο ασυνεχειών μεγάλης εμμονής 199

7.3 Μοντέλο με δίκτυο ασυνεχειών περιριορισμένης εμμονής 202

o Επίδραση εντατικού πεδίου 203

7.4 Συμπεράσματα 204

8 Συζήτηση-Συμπεράσματα 205

8.1 Προσομοίωση της διάδοσης της υδραυλικής θραύσης σε ένα προϋπάρχον επίπεδο ασυνέχειας 205

8.2 Προσομοίωση της ροής σε δίκτυο ασυνεχειών με αλγόριθμο ασυμπίεστης ροής 208

8.3 Προσομοίωση υδραυλικής θραύσης σε μοντέλο με ψηφίδωση Voronoi 212

8.4 Συμπεράσματα 214

9 Βιβλιογραφία 216

1 Εισαγωγή

Υδραυλική θραύση είναι η διαδικασία ρωγμάτωσης του πετρώματος λόγω της εισπίεσης ενός ρευστού μέσα σε μία γεώτρηση με ρυθμό έγχυσης που είναι πολύ υψηλός για το πέτρωμα, ή το γεωλογικό σχηματισμό γενικότερα, να τον δεχθεί χωρίς θραύση. Από την εισαγωγή της, η υδραυλική θραύση ήταν, και παραμένει. ένα από τα βασικά εργαλεία για τη βελτίωση της παραγωγικότητας σε εκμεταλλεύσεις ρευστών ορυκτών καυσίμων. Επιπλέον, αποτελεί μία από τις πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες μεθόδους για την εκτίμηση της εντατικής κατάστασης του πετρώματος σε βάθος.

Η υδραυλική θραύση έχει αρκετές εφαρμογές, όπως:

- Για την δημιουργία μικρών ρωγμών, μεγάλου πλάτους, πληρωμένες με άμμο (proppant), σχεδιασμένες να διεισδύουν σε ζώνες κοντά στην γεώτρηση, μειώνοντας την πτώση της πίεσης κοντά στην γεώτρηση
- Ρωγμές μπορούν να δημιουργηθούν κατά την διάρκεια εισπίεσης νερού σε ταμιευτήρες. Ο ρυθμός έγχυσης μπορεί να μειωθεί με την πάροδο του χρόνου, εξαιτίας του μερικού φραξίματος του σχηματισμού γύρω από την γεώτρηση, σε σημείο που ο ρυθμός έγχυσης να διατηρείται μόνο όταν η τιμή της πίεσης αυξάνεται πάνω από την τιμή της πίεσης των ρωγμών. Ρωγμάτωση μπορεί επίσης να προκληθεί σε σταθερή πίεση έγχυσης. Αυτό συμβαίνει όταν το νερό είναι πιο ψυχρό από τον σχηματισμό. Η ψύξη προκαλεί την συρρίκνωση του σχηματισμού, άρα οι τιμές των τάσεων ελαττώνονται κάτω από το επίπεδο της αρχικής πίεσης ρωγμάτωσης.
- Πριν την εφαρμογή της υδραυλικής θραύσης προηγείται μια δοκιμή ρωγμάτωσης, σε μικρότερη κλίμακα, προκειμένου να προσδιοριστεί η ελάχιστη τάση του σχηματισμού και κατ' επέκταση η απαιτούμενη πίεση που πρέπει να εφαρμοστεί, καθώς και άλλες παράμετροι της υδραυλικής θραύσης.
- Κατά την όρυξη της γεώτρησης, εκτελούνται δοκιμές διαρροής για να προσδιοριστεί η κλίση της ρωγμής στον σχηματισμό, κάτω από το περίβλημα της γεώτρησης, και ακολούθως η μέγιστη επιτρεπόμενη πίεση, για να αποτραπεί η απώλεια της κυκλοφορίας.
- Διενεργείται μια εκτεταμένη δοκιμή διαρροής, όπου η εισπίεση διαρκεί αρκετά για να διασφαλιστεί η δημιουργία μιας ρωγμής. Παρακολουθώντας

την φάση κλεισίματος (shut-in) και την φάση ροής του υγρού προς τα έξω, μπορεί να προσδιοριστεί η ελάχιστη κύρια τάση.

- Η υδραυλική θραύση χρησιμοποιείται για υπόγεια απόθεση αποβλήτων. Στην πετρελαϊκή βιομηχανία, ένα παράδειγμα είναι η επανέγχυση σε προϋπάρχοντα φρέατα γεωτρήσεων. Στην συγκεκριμένη περίπτωση, είναι σημαντικό να υπάρχει ένας περατός σχηματισμός, πάνω από το σημείο έγχυσης, που μπορεί να λειτουργήσει ως παραλήπτης, που θα συμβάλλει στην μείωση της πίεσης. Σε διαφορετική περίπτωση, η πίεση θα παραμείνει υψηλή, λόγω της πολύ μικρής διαρροής, και η ρωγμή που έχει δημιουργηθεί μπορεί να διαδοθεί μέχρι την επιφάνεια.

2 Περί υδραυλικής θραύσης του πετρώματος

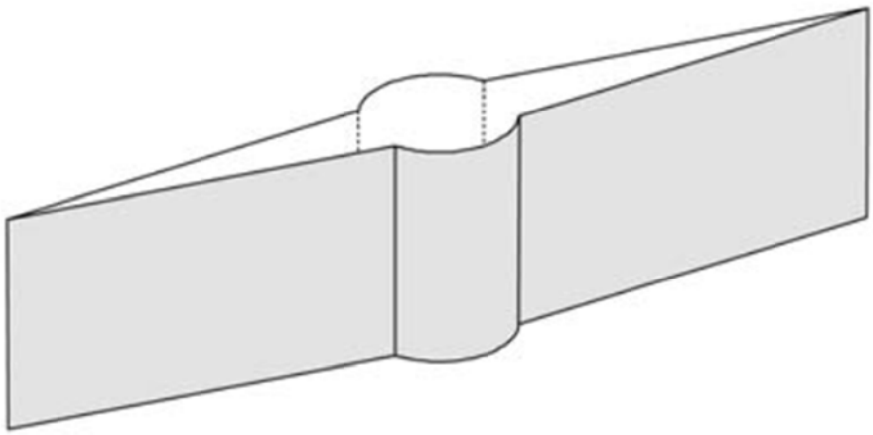
2.1 Γενικά

Κατά τη διαδικασία της υδραυλικής θραύσης, το νερό ή ο πολφός της γεώτρησης εισπιέζεται σε ένα υδραυλικά απομονωμένο τμήμα της γεώτρησης, έως ότου οι επαγόμενες τάσεις στο τοίχωμα της οπής της γεώτρησης είναι αρκετά μεγάλες ώστε να προκαλέσουν την έναρξη και τη διάδοση της θραύσης εντός του σχηματισμού. Στη βιομηχανία πετρελαίου, οι γεωτρήσεις συχνά τεχνηέντως ρωγματώνονται υδραυλικά ώστε να αυξηθεί η ικανότητα του ρευστού να ρέει από τον σχηματισμό μέσα στη γεώτρηση. Η βασική θεωρητική ανάλυση, από την πλευρά της μηχανικής των πετρωμάτων, σχετικά με τη διαδικασία της υδραυλικής θραύσης, για τον υπολογισμό της πίεσης του ρευστού που θα χρειαζόταν για να δημιουργήσει μία ρωγμή σε βραχομάζα υπό δεδομένη εντατική κατάσταση in situ, δόθηκε για πρώτη φορά από τους Hubbert και Willis (1957). Ο Scheidegger (1960) και ο Fairhurst (1964) παρατήρησαν ότι αυτές οι ίδιες εξισώσεις θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν με έναν αντίστροφο τρόπο ώστε να συναχθεί το in situ εντατικό πεδίο από τα δεδομένα για την πίεση του ρευστού που συλλέγονται κατά την διάρκεια της διαδικασία της υδραυλικής θραύσης.

2.2 Μηχανική της υδραυλικής θραύσης

Η υδραυλική θραύση λαμβάνει χώρα, όταν η πίεση του ρευστού μέσα στην γεώτρηση υπερβαίνει το άθροισμα της ελάχιστη κύριας τάσης και της εφελκυστικής αντοχής του πετρώματος. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την αστοχία και τη θραύση του πετρώματος. Η συνεχής εισπίεση ρευστού, υπό καθεστώς υψηλής πίεσης, προκαλεί τον διαχωρισμό του σχηματισμού της βραχομάζας και η ρωγμή θα διαδοθεί προς την κατεύθυνση που παρατηρείται η μικρότερη αντίσταση. Δηλαδή, σε ορισμένη απόσταση από την γεώτρηση, η ρωγμή θα διαδίδεται πάντα προς την κατεύθυνση της ελάχιστης κύριας τάσης.

Συνήθως, όταν η ελάχιστη κύρια τάση είναι σε οριζόντια διεύθυνση, οι ρωγμές που προκύπτουν είναι κατακόρυφες. Αν θεωρήσουμε μια κατακόρυφη γεώτρηση, δύο συμμετρικές ρωγμές αναπτύσσονται κάθετα στην ελάχιστη κύρια τάση, όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.1



Σχήμα 2.1. Υδραυλική θραύση γύρω από μια κατακόρυφη γεώτρηση

Η υδραυλική θραύση, χρησιμοποιήθηκε πρώτη φορά για εμπορικούς λόγους, στις αρχές της δεκαετίας του 1950, για την διέγερση των ταμιευτήρων πετρελαίου και φυσικού αερίου. Η συγκεκριμένη τεχνική εφαρμόζεται για την εξόρυξη υδρογονανθράκων από ταμιευτήρες χαμηλής περατότητας. Η εφαρμογή της υδραυλικής θραύσης περιλαμβάνει την εισπίεση μεγάλης ποσότητας υγρού και

άμμου, που προκαλεί την δημιουργία μεγάλων ρωγμών. Για την εφαρμογή της μεθόδου μπορεί να χρειαστούν πάνω από χίλια κυβικά μέτρα υγρού και ένα εκατομμύριο κιλά άμμου. Το υγρό προκαλεί την ρωγμάτωση, ενώ η άμμος γεμίζει τις ρωγμές και τις διατηρεί ανοιχτές. Αν η ρωγμή δεν πληρώνεται με άμμο, θα κλείσει όταν πέσει η τιμή της πίεσης του ρευστού.

2.2.1 Συνθήκες εφελκυστικής αστοχίας

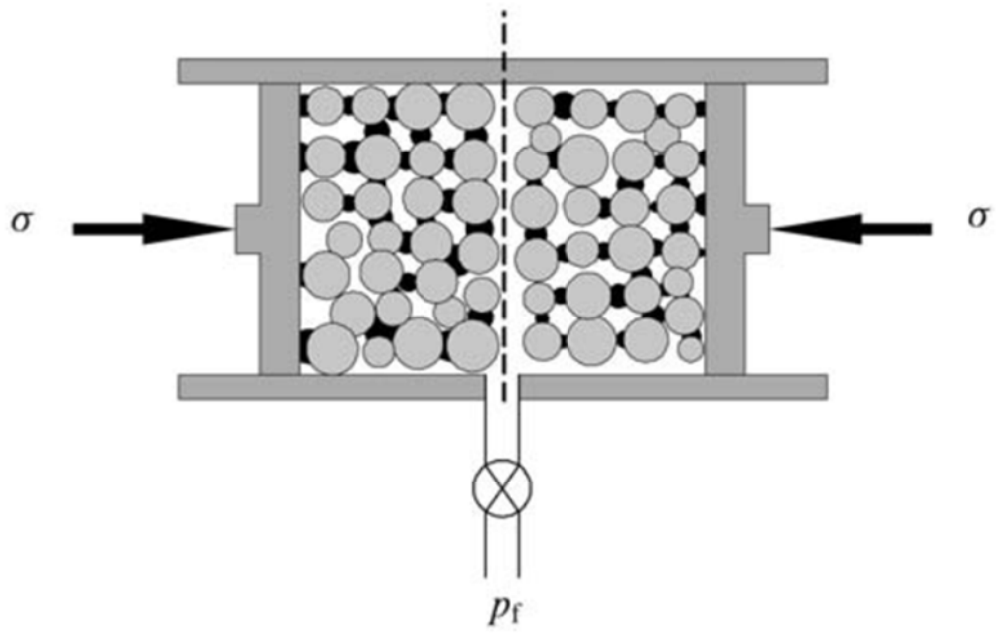
Από μακροσκοπικής πλευράς, η ρωγμάτωση έχει σχέση με την αστοχία σε εφελκυσμό. Γενικά, όταν έχουμε υπ'όψιν ένα δοκίμιο στερεού υλικού, η αστοχία σε εφελκυσμό θα συμβεί όταν η εφελκυστική τάση θα υπερβεί την εφελκυστική αντοχή. Ακολουθώντας την βασική συνθήκη ότι οι θλιπτικές τάσεις είναι θετικές ισχύει η συνθήκη:

$$\sigma < -T_0 \tag{2.1}$$

Για πορώδη υλικά η ολική τάση (total stress) αντικαθίσταται από την ενεργό τάση (effective stress) και ισχύει:

$$\sigma - p_f < -T_0 \tag{2.2}$$

όπου p_f είναι η πίεση πόρων Για πορώδη υλικά, θα πρέπει η παραπάνω συνθήκη να μελετηθεί λεπτομερώς. Έστω δοκίμιο πορώδους και περατού υλικό, σε ένα τριαξονικό κελί, όπως στο σχήμα 2.2, το οποίο υποβάλλεται σε μια εξωτερική τάση σ. Η πίεση πόρων p_f μπορεί να ποικίλει. Μια πλευρική πίεση μπορεί να εφαρμοστεί, αλλά δεν θα έχει σημαντική επιρροή.



Σχήμα 2.2. Υδραυλική ρωγμάτωση πορώδους και περατού δοκιμίου

Θεωρείται αρχικά ότι οι κόκκοι είναι συνδεδεμένοι μεταξύ τους και το δοκίμιο κολλημένο στα έμβολα φόρτισης. Κατά μήκος της διακεκομμένης γραμμής, οι δεσμοί έχουν σπάσει διαμορφώνοντας μια κλειστή ρωγμή. Η δύναμη που τείνει να κλείσει αυτήν την ρωγμή υπολογίζεται από την διαφορά της πίεσης που εφαρμόζεται (σ) και της πίεσης πόρων (p_f) στην ρωγμή. Η δε συνθήκη για το άνοιγμα της ρωγμής είναι:

$$\sigma - p_f < 0 \tag{2.3}$$

Η παραπάνω συνθήκη μπορεί να επιτευχθεί είτε αυξάνοντας την πίεση p_f ή μειώνοντας την εξωτερική τάση σ. Όταν το μήκος του δοκιμίου είναι μικρό, η πίεση p_f είναι σταθερή. Για δοκίμιο μεγαλύτερου μήκους, με πολύ μικρότερη περατότητα, είναι προφανές ότι η πίεση p_f είναι η πίεση στην ρωγμή και όχι η μέση πίεση στο plug.

Η δύναμη που απαιτείται για να διαχωρίσει το δοκίμιο στην μέση (όπως φαίνεται στο σχήμα 2.2) δίνεται από την σχέση

$$\sigma - p_f = -T_0 \tag{2.4}$$

όπου: T_0 είναι η εφελκυστική αντοχή και p_f η πίεση στους πόρους ή στην ρωγμή που διαμορφώνεται.

Συνοψίζοντας η εξίσωση 2.4 αποτελεί το γενικό κριτήριο για την έναρξη της θραύσης του υλικού, ενώ η εξίσωση 2.3 αντιπροσωπεύει το κριτήριο για το άνοιγμα των προϋπαρχόντων ρωγμών.

2.2.2 Έναρξη και διάδοση ρωγμάτωσης και θραύση του σχηματισμού (Fracture initiation and formation breakdown)

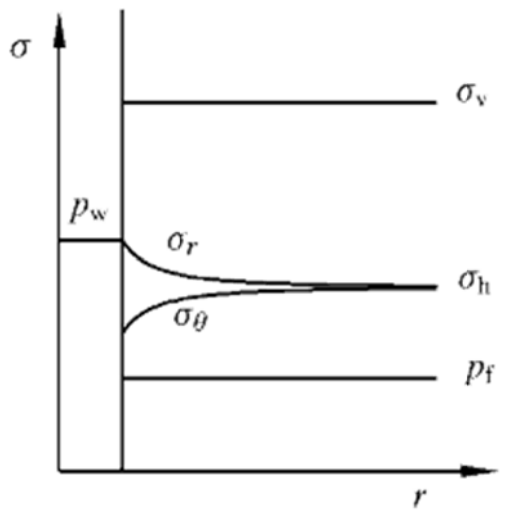
Για να απεικονιστεί η ιδέα της έναρξης της ρωγμάτωσης θα θεωρηθεί η παρακάτω ιδεατή κατάσταση. Μια κατακόρυφη γεώτρηση υπόκειται σε ένα εντατικό πεδίο ισότροπο στο οριζόντιο επίπεδο (δηλαδή, $\sigma_v>\sigma_H=\sigma_h$). Η βραχομάζα θεωρείται ισότροπη και ομοιογενής, που υπακούει στον νόμο του Hooke για γραμμική ελαστική συμπεριφορά. Η πίεση πόρων στον σχηματισμό παραμένει σταθερή και ανεπηρέαστη από την πίεση του ρευστού της γεώτρησης. Όσο αυξάνεται η πίεση στην γεώτρηση p_w, η εφαπτομενική τάση σ_θ θα μειώνεται αντίστοιχα.

Η συνθήκη για την έναρξη της υδραυλικής ρωγμάτωσης επιτυγχάνεται όταν:

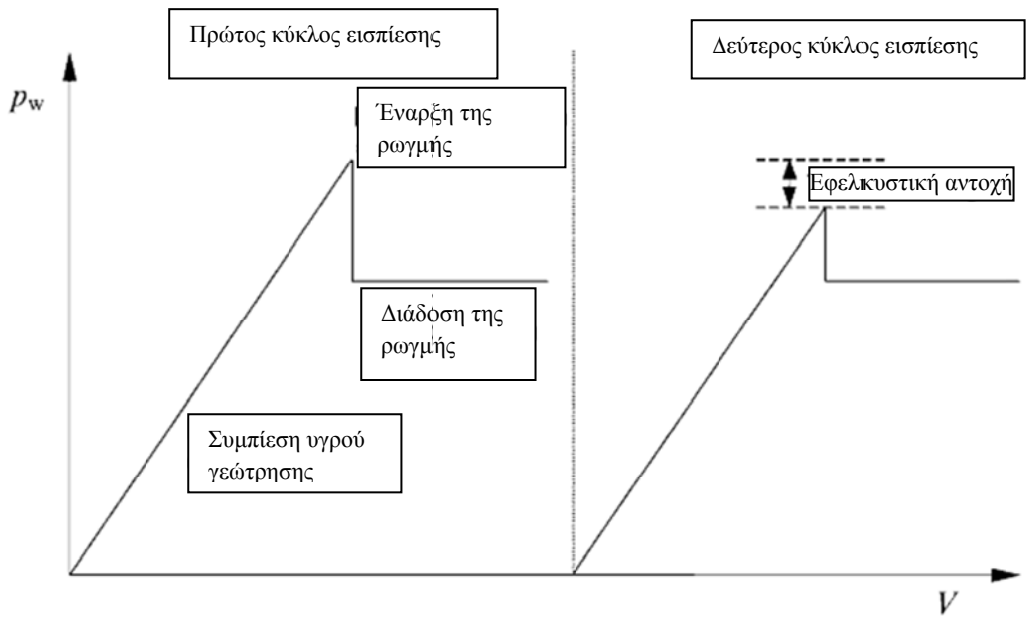
$$\sigma_\theta - p_f = -T_0 \tag{2.5}$$

ή

$$p_{w,max}^{frac} = 2\sigma_h - p_f + T_0 \tag{2.6}$$



Σχήμα 2.3. Κατανομή τάσεων γύρω από μια ανοιχτή κατακόρυφη γεώτρηση σε έναν αδιαπέρατο σχηματισμό, σε υψηλή πίεση



Σχήμα 2.4.Εικόνα Ιδεατή απόκριση της πίεσης της γεώτρησης κατά την διάρκεια της υδραυλικής θραύσης μιας κατακόρυφης γεώτρησης. περιλαμβάνονται Δύο κύκλοι πίεσης

Το πρώτο γραμμικό τμήμα αναπαριστά την ελαστική παραμόρφωση του συστήματος μέσα και γύρω από την γεώτρηση. Η κορυφή αναπαριστά την συνθήκη έναρξης της ρωγμάτωσης, δηλαδή την δημιουργία μιας κατακόρυφης ρωγμής στο τοίχωμα της γεώτρησης. Η πίεση της γεώτρησης πέφτει σχεδόν άμεσα σε αυτό το

σημείο. Αυτό υπονοεί μια κατάσταση ασταθούς ανάπτυξης της ρωγμής, σύμφωνα με την οποία ο όγκος της ρωγμής μεγαλώνει με έναν μεγαλύτερο ρυθμό από τον ρυθμό έγχυσης. Συνέχιση της εισπίεσης, θα οδηγήσει σε σταθερή ανάπτυξη της ρωγμής που αναπαρίσταται από το σταθερό επίπεδο πίεσης της γεώτρησης. Σε αυτήν την ιδεατή περίπτωση, το σημείο της έναρξης της ρωγμάτωσης και της θραύσης του σχηματισμού συμπίπτουν.

Η δεύτερη καμπύλη δείχνει την απόκριση που θα προέκυπτε αν πραγματοποιούνταν ένας δεύτερος κύκλος εισπίεσης. Τότε η μόνη αντίσταση στην έναρξη της ρωγμάτωσης και στην θραύση του σχηματισμού θα είναι η συγκέντρωση τάσης γύρω από την γεώτρηση. Η εφελκυστική αντοχή είναι μηδέν αφού η ρωγμή υπάρχει ήδη. Σε μια ιδεατή κατάσταση, η διαφορά ανάμεσα στην κορυφή του πρώτου και του δεύτερου διαγράμματος θα μπορούσε να θεωρηθεί μια έμμεση μέτρηση της εφελκυστικής αντοχής του πετρώματος του σχηματισμού.

Αν η γεώτρηση θεωρείται ότι είναι πλήρως περατή, και ο ρυθμός εισπίεσης ήταν αρκετά αργός ώστε να διασφαλίζεται μια συνθήκη σταθερής κατάστασης, η εφαπτομενική τάση στο τοίχωμα της γεώτρησης δίνεται από την εξίσωση:

$$\sigma_\theta = 2\sigma_h - p_w(p_{fo} - p_w)\frac{1-2\nu_{fr}}{1-\nu_{fr}}\alpha \tag{2.7}$$

Η πίεση έναρξης της ρωγμάτωσης γίνεται:

$$p_{w,max}^{frac} = \frac{2\sigma_h - \alpha\frac{1-2\nu_{fr}}{1-\nu_{fr}}p_{fo} + T_0}{2 - a\frac{1-2\nu_{fr}}{1-\nu_{fr}}} \tag{2.8}$$

και αν α=1

$$p_{w,max}^{frac} = 2(1-\nu_{fr})\sigma_h - (1-2\nu_{fr})p_{fo} + (1-\nu_{fr})T_0 \tag{2.9}$$

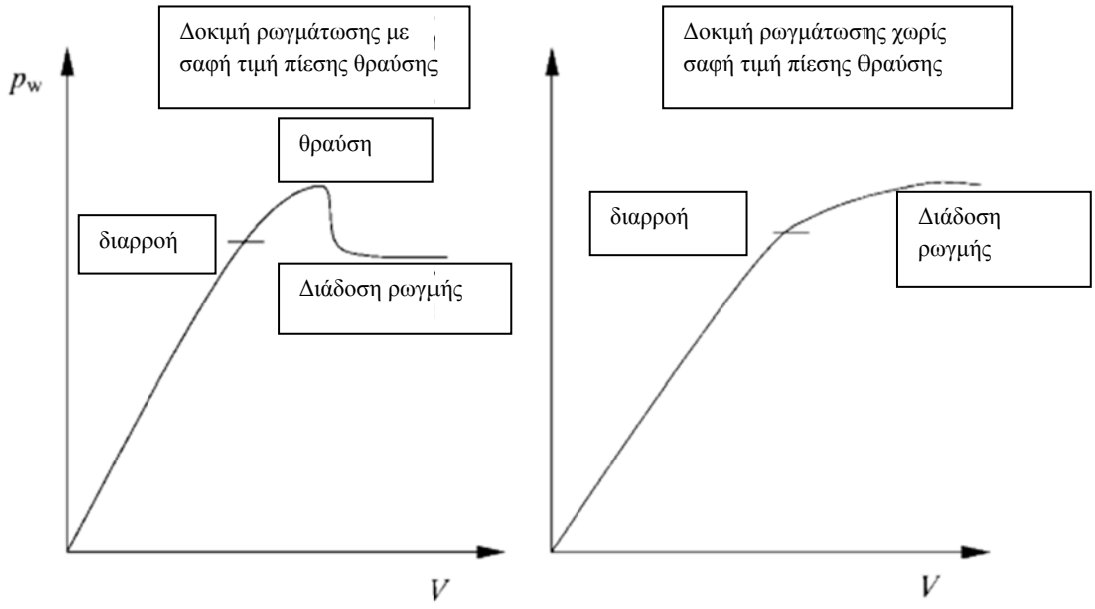
Η εξίσωση (2.6) αναπαριστά το ανώτερο όριο της πίεσης έναρξης της ρωγμάτωσης και η (2.8) το κατώτερο όριο. Το ανώτερο όριο αναφέρεται συνήθως ως ταχεία συμπίεση (fast pressurization) και το κατώτερο ως βραδεία συμπίεση (slow pressurization). Στην πραγματικότητα, η τιμή της πίεσης βρίσκεται ανάμεσα σε αυτά τα δύο όρια.

Για τη διερεύνηση της μηχανικής συμπεριφοράς όταν προϋπάρχουν ρωγμές στα τοιχώματα της γεώτρησης, θεωρείται ότι η εφαμπτομενική τάση μεταφέρεται κάθετα στη ρωγμή και η πίεση της γεώτρησης μπορεί να διεισδύσει στην ρωγμή χωρίς να προχωρά περαιτέρω μέσα στον σχηματισμό. Αυτή η υπόθεση είναι δυνατή όταν επανασυμπιέζεται π.χ. μια ρωγματωμένη γεώτρηση σε ψαμμίτη. Τότε:

$$p_w = \sigma_h \tag{2.10}$$

Αυτό υπονοεί ότι η πίεση έναρξης της ρωγμάτωσης είναι ίση με την ελάχιστη οριζόντια τάση. Ωστόσο, η συγκεκριμένη περίπτωση δεν ανιχνεύεται εύκολα όταν οι ρωγμές είναι πολύ μικρές. Όταν η ρωγμή αρχίζει να μεγαλώνει, εμφανίζεται μια απόκλιση από την γραμμική ανάπτυξη. Η απόκλιση εμφανίζεται σε χαμηλώτερη πίεση στον σχιστόλιθο από ότι στον ψαμμίτη. Ωστόσο, η απόκλιση ανάμεσα στον σχιστόλιθο και στον ψαμμίτη είναι ανεξάρτητη από το αν προϋπάρχουν ρωγμές ή όχι.

Σε ορισμένες περιπτώσεις, πριν την έναρξη της διάδοσης της ρωγμής, εμφανίζεται μια απότομη μείωση της πίεσης, ενώ σε άλλες όχι. Στην δεύτερη περίπτωση, η ρυθμός ανάπτυξης της ρωγμής είναι σταθερός, καθ’όλη την διάρκεια.



Σχήμα 2.5.Εικόνα ρεαλιστική απόκριση πίεσης γεώτρησης κατά την διάρκεια υδραυλικής θραύσης σε μια κάθετη γεώτρηση.

Αν οι οριζόντιες τάσεις είναι διαφορετικές, τότε η κατανομή των τάσεων τροποποιείται. Αν η σ_h είναι η ελάχιστη κύρια τάση και σ_H η ενδιάμεση κύρια τάση, τότε η έναρξη της ρωγμάτωσης για την περίπτωση του αδιαπέρατου σχηματισμού ή της «γρήγορης» συμπίεσης, σε μια κάθετη γεώτρηση δίνεται από την εξίσωση:

$$p_{w,max}^{frac} = 3\sigma_h - \sigma_H - p_f + T_0 \qquad (2.11)$$

Η εξίσωση 2.11 προκύπτει από την εξίσωση 2.6, αντικαθιστώντας το 2σh με ($3\sigma_h - \sigma_H$). Αντίστοιχη αντικατάσταση μπορεί να γίνει στην εξίσωση 2.8 για να ληφθεί η έκφραση του κατώτερου ορίου έναρξης της πίεσης ρωγμάτωσης. Αφού η σ_H εξ'ορισμού είναι μεγαλύτερη από την σ_h, αυτό υπονοεί ότι στην περίπτωση ανισότροπου εντατικού πεδίου, η πίεση έναρξης της ρωγμάτωσης είναι χαμηλώτερη από όταν το πεδίο είναι ισότροπο.

Αν στην εξίσωση 2.9 αντικαταστίσουμε όπου ν=0.5 και υποθέσουμε μια αμελητέα εφελκυστική αντοχή, τότε:

$$p_{w,max}^{frac} = \sigma_h \tag{2.12}$$

Η δημιουργία της ρωγμής, θα ξεκινήσει σε τιμή πίεσης ίση με την πίεση που χρειάζεται για να διαδοθεί η ρωγμή. Σε αυτήν την περίπτωση, δεν θα υπάρχει επίδραση από την συγκέντρωση των τάσεων γύρω από την γεώτρηση και στην διαδικασία έναρξης της ρωγμάτωσης.

Αν στην εξίσωση 2.9, γίνουν κατάλληλες αντικαταστάσεις ώστε να αντικατοπτρίζουν ένα ανισότροπο εντατικό πεδίο, τότε:

$$p_{w,max}^{fra} = \frac{3\sigma_h - \sigma_H}{2} \tag{2.13}$$

ή

$$p_{w,max}^{frac} = \sigma_h + \frac{\sigma_h - \sigma_H}{2} \tag{2.14}$$

Στην συγκεκριμένη ειδική περίπτωση, η δημιουργία της ρωγμής θα ξεκινήσει σε μια πίεση που είναι μικρότερη από την ελάχιστη κύρια τάση. Η πίεση έναρξης της ρωγμάτωσης είναι μικρότερη από την πίεση διάδοσης της ρωγμής και για τον λόγο αυτό χρειάζεται μια αύξηση στην πίεση της γεώτρησης για να διαδοθεί η ρωγμή.

Τέλος, θα πρέπει να επισημανθεί, ότι οι παραπάνω εκφράσεις βασίζονται σε μια ιδεατή κατάσταση. Η πραγματική τιμή της πίεσης έναρξης της ρωγμάτωσης, εξαρτάται από το εντατικό πεδίο, την διεύθυνση και κλίση της γεώτρησης, τα μηχανικά χαρακτηριστικά της βραχομάζας, τις ιδιότητες του ρευστού που εισπιέζεται και από τις διάφορες διαδικασίες κατά την εφαρμογή της μεθόδου.

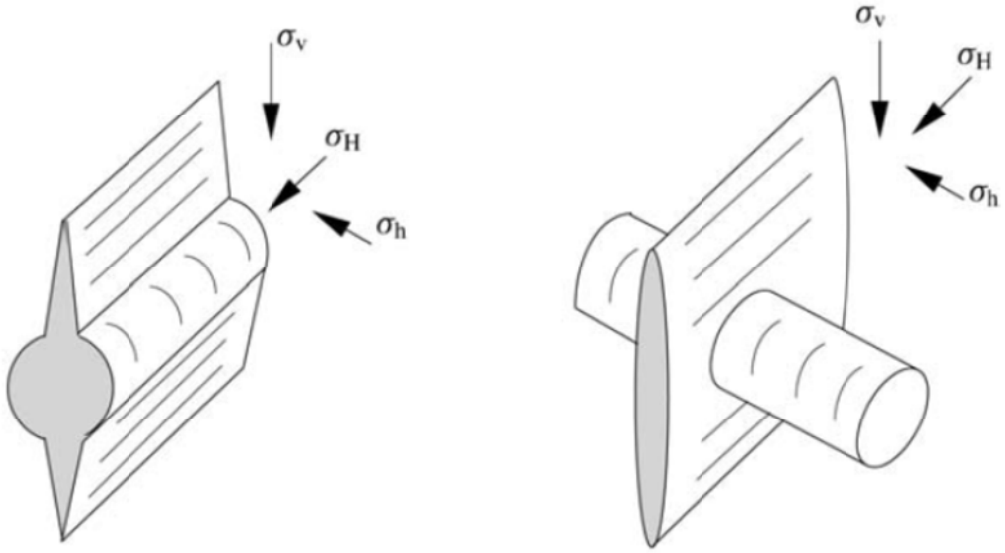
2.2.3 Προσανατολισμός και ανάπτυξη της ρωγμής (Fracture orientation, growth and confinement)

Μέχρι τώρα, έχει εξεταστεί η περίπτωση στην οποία σε μια κατακόρυφη γεώτρηση, μια ρωγμή, που είναι κάθετη στην διεύθυνση της ελάχιστης οριζόντιας τάσης, δημιουργείται όταν σH>σv>σh. Για παρεκκλίνοντα και οριζόντια ορύγματα, η κατάσταση είναι περισσότερο πολύπλοκη και είναι δύσκολο να γενικευθεί.

Προκειμένου να γίνει η απεικόνιση, θεωρείται μια οριζόντια γεώτρηση, σε ένα εντατικό πεδίο, όπου σv>σH>σh. Στην προκειμένη περίπτωση, είναι προφανές ότι η πίεση για την έναρξη της ρωγμάτωσης, εξαρτάται από την αζιμούθια διεύθυνση της γεώτρησης. Ας θεωρηθούν δύο περιπτώσεις:

1. Γεώτρηση παράλληλη με την σH: $p_{w,max}^{frac} = 3\sigma_h - \sigma_v - p_f + T_0$
2. Γεώτρηση παράλληλη με την σh: $p_{w,max}^{frac} = 3\sigma_H - \sigma_v - p_f + T_0$

Η πίεση που απαιτείται για την έναρξη της ρωγμάτωσης είναι υψηλότερη στην περίπτωση 2 από ότι στην περίπτωση 1. Οπότε, και η διεύθυνση της ρωγμής σε σχέση με την γεώτρηση θα είναι διαφορετική ανάμεσα στις δύο περιπτώσεις. Στην πρώτη περίπτωση, η ελάχιστη τάση του εντατικού πεδίου είναι κάθετη στην γεώτρηση και η ρωγμή θα είναι παράλληλη με την γεώτρηση (σχήμα αριστερά). Στην δεύτερη περίπτωση, η ρωγμή αντίστοιχα θα είναι κάθετη στην γεώτρηση (σχήμα δεξιά).

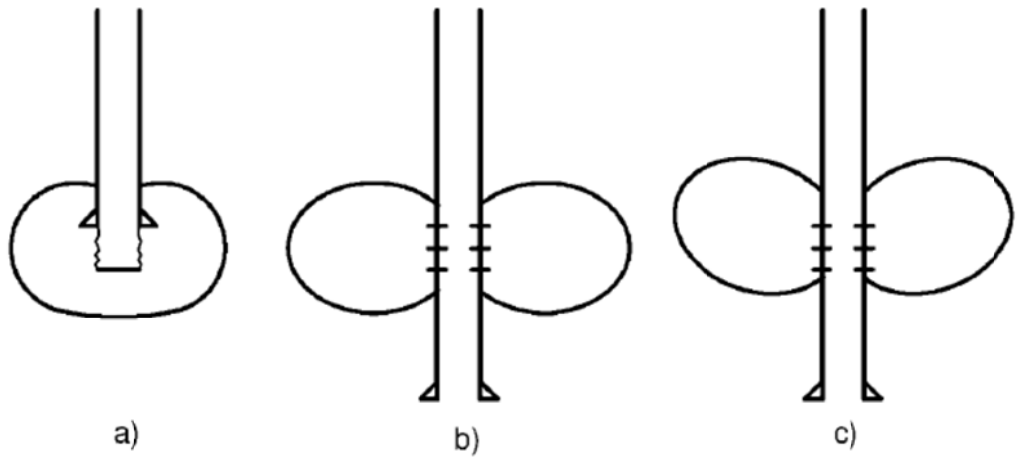


Σχήμα 2.6. Απεικόνιση ρωγμών διαφορετικών διευθύνσεων, παράλληλα με την γεώτρηση (αριστερά) και κάθετα στην γεώτρηση (δεξιά)

Σε περιπτώσεις όπου η γεώτρηση δεν είναι ευθυγραμμισμένη με την διεύθυνση κάποιας κύριας τάσης, η κατάσταση γίνεται ακόμα πιο περίπλοκη. Η ρωγμή θα διαδίδεται προς την κατεύθυνση που συναντά την λιγότερη αντίσταση. Η συγκεκριμένη όμως κατεύθυνση μπορεί να μην συμπίπτει με την διεύθυνση της ελάχιστης κύριας τάσης του εντατικού πεδίου. Στην συγκεκριμένη περίπτωση, η ρωγμή θα «στρίψει» προκειμένου να ευθυγραμμιστεί κάθετα με την ελάχιστη κύρια τάση του εντατικού πεδίου.

Σε γεωτρήσεις με διατρητό περίβλημα (perforated wells), ο προσανατολισμός και η πυκνότητα των οπών μπορούν να περιπλέξουν περαιτέρω την κατάσταση, οδηγώντας ταυτόχρονα σε πολλαπλές ρωγμές και μη επίπεδη γεωμετρία. Προτάσεις για τον σωστό σχεδιασμό της διάτρησης, έχουν διατυπωθεί από El Rabaa (1989) και Abass (1992).

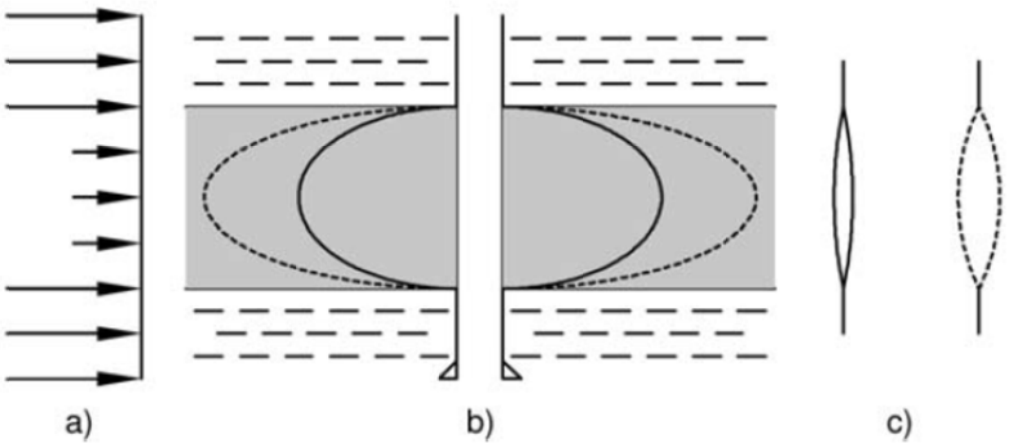
Σε μια ισότροπη βραχομάζα που βρίσκεται σε ένα ομοιογενές εντατικό πεδίο, η ρωγμή που ξεκινάει από μία σημειακή πηγή θα διαδοθεί συμμετρικά προς όλες τις κατευθύνσεις, σχηματίζοντας μια κυκλική ρωγμή circular or “penny-shaped” fracture. Η γεωμετρία επηρεάζεται από τη διαμόρφωση της γεώτρησης, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.7. Συνήθως, οι ρωγμές αναπτύσσονται ανοδικά, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.7c , αφού οι τάσεις λόγω της βαρύτητας μειώνονται σε αυτήν την διεύθυνση.



Σχήμα 2.7. Η διαφορετική διαμόρφωση της γεώτρησης, επηρεάζει την ανάπτυξη της ρωγμής. (a) ατσάλινο περίβλημα με τσιμέντο στο τέλος της γεώτρησης (casing shoe), (b) περίβλημα με διατρήματα, (c) επίδραση της βαρύτητας

Αν και οι κατακόρυφες τάσεις λόγω του βάρους των υπερκειμένων αυξάνονται συνήθως μονότονα με το βάθος, οι οριζόντιες τάσεις μπορεί να εξαρτώνται, επίσης, από τη λιθολογία ή τον τύπο του σχηματισμού. Σε στρώματα σχιστόλιθου οι τιμές των οριζόντιων τάσεων μπορεί να προσεγγίζουν τις λιθοστατικές εντατικές συνθήκες, ενώ σε ψαμμίτες οι τιμές της οριζόντιας τάσης μπορεί να είναι σημαντικά χαμηλότερες τιμές. Αυτές οι διαφορές ανάμεσα στις τιμές των οριζόντιων τάσεων, είναι σημαντικές όσο αφορά τον περιορισμό των ρωγμών σε στρωσιγενείς σχηματισμούς. Διαφορές επίσης στις ελαστικές ιδιότητες και στην αντοχή, μπορούν να επηρεάσουν τη διάδοση μιας ρωγμής μεταξύ των στρωμάτων. Σημαντικότερο όμως ρόλο παίζουν οι διαφορές στις τιμές των τάσεων του εντατικού πεδίου.

Η ρωγμάτωση σε ένα στρώμα ψαμμίτη, με υπερκείμενους και υποκείμενους σχηματισμούς σχιστόλιθου, απεικονίζεται στο σχήμα 2.7. Η διαφορά στην τιμή ανάμεσα στις ελάχιστες οριζόντιες κύριες τάσεις, σημειώνεται στο σχήμα 2.6 (a). Η διαφορά μπορεί να είναι αρκετή ώστε να αποτρέψει την διάδοση της ρωγμής στο στρώμα του σχιστολίθου. Το αποτέλεσμα θα είναι ο σχηματισμός μια ρωγμής με πλευρές σχήματος έλλειψης , όπως φαίνεται στο τμήμα (b). Για την επέκταση της ρωγμής, τα τοιχώματα θα πιεσθούν προς τα έξω, αυξάνοντας το πλάτος της ρωγμής (c).



Σχήμα 2.8. Περιορισμός μια ρωγμής, ανάμεσα σε στρώματα με υψηλότερη τάση

Ο περιορισμός της ρωγμής στο πάνω και στο κάτω μέρος, θα οδηγήσει στη δημιουργία ενός κυρτωμένου ρωγματωμένου τοιχώματος, που για να επιτευχθεί χρειάζεται μια υψηλότερη τιμή της πίεσης. Είναι χαρακτηριστικό για τον συγκεκριμένο τύπο ρωγμής, να αυξάνεται η πίεση που χρειάζεται για να διαδοθεί η ρωγμή, παράλληλα με την αύξηση του μήκους της. Η απαιτούμενη πίεση χωρίζεται σε τρία μέρη:

1. Η πίεση που απαιτείται για να διατηρήσει μια ρωγμή ανοιχτή
2. Η πίεση που χρειάζεται για την ροή του υγρού μέσα στην ρωγμή
3. Η πίεση που απαιτείται για να ξεπεραστεί η αντίσταση στο άκρο της ρωγμής, οδηγώντας στην δημιουργία νέου όγκου ρωγμής

ή

$$\boldsymbol{p_e = p(\sigma_{\square}) + p(flow) + p(tip)} \qquad (2.15)$$

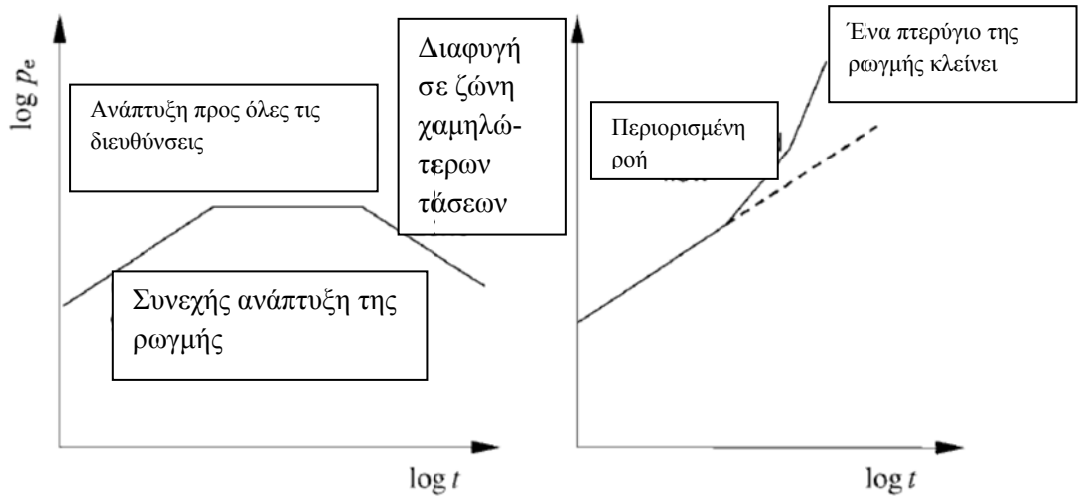
Ο πρώτος όρος, αναπαριστά το άθροισμα της ελάχιστης κύριας τάσης και της πίεσης που χρειάζεται για να διατηρηθεί ανοιχτή η ρωγμή. Για στενές ρωγμές, μικρού μεγέθους, με υγρό χαμηλού ιξώδους, η πίεση για την προέκταση της ρωγμής θα παραμείνει σταθερή. Για ρωγμές μεγαλύτερου μεγέθους, που χρησιμοποιείται παχύρευστο υγρό (ή υγρό με άμμο), η αντίσταση της πίεσης θα αυξηθεί και θα οδηγήσει στην αύξηση της πίεσης που απαιτείται για την διάδοση της ρωγμής.

Για την προέκταση ρωγμών κυκλικού σχήματος, η πίεση που απαιτείται για την διάδοση της ρωγμής θα παραμείνει σταθερή. Για περιπτώσεις όπου η ρωγμάτωση γίνεται σε μεγαλύτερη κλίμακα, η ρωγμή μπορεί να εγκλωβιστεί στην κάθετη διεύθυνση, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.8,και τότε, η πίεση διάδοσης αυξάνεται με την ανάπτυξη της ρωγμάτωσης. Ο πρώτος όρος της εξίσωσης 2.15 θα αρχίσει να αυξάνεται, αφού τα τοιχώματα της ρωγμής θα λυγίσουν προς τα έξω, αυξάνοντας το άνοιγμα της ρωγμής. Σε κάποια στιγμή, η τιμή της πίεσης προέκτασης θα γίνει μεγαλύτερη από την τιμή της οριζόντιας τάσης στα επάνω και κάτω στρώματα που προκαλούν τον περιορισμό. Τότε, η ρωγμή θα διεισδύσει στις περιοχές όπου υπάρχει υψηλή τάση.

Συμπερασματικά, οι διαφορετικές τιμές τάσεων που υπάρχουν στα διάφορα στρώματα, εμφανίζονται σαν εμπόδια στην διάδοση της ρωγμής, αλλά όχι σε όλες τις περιπτώσεις. Σε περίπτωση που υπάρχουν εναλλασσόμενα στρώματα σχιστολίθου και ψαμμίτη, η ρωγμή μπορεί να διαπεράσει ένα στρώμα και να διαδοθεί σε αυτό. Ωστόσο, κατά την διάδοση, παρουσιάζεται μια πολύπλοκη γεωμετρία.

Είναι προφανές, ότι η ελάχιστη τάση του εντατικού πεδίου, είναι ένας σημαντικός παράγοντας σχεδιασμού. Εξίσου σημαντική είναι η απόκριση της πίεσης κατά την διάρκεια της ρωγμάτωσης. Για ρωγμές που είναι περιορισμένες, διατυπώνεται ένας κανόνας, που συσχετίζει την πίεση ρωγμάτωσης (p_e) με τον χρόνο, όταν ο ρυθμός εισπίεσης είναι σταθερός. Σε ένα διάγραμμα όπου στους άξονες υπάρχουν οι τιμές του λογάριθμου της πίεσης και του λογάριθμου του χρόνου, η διάδοση της ρωγμής απεικονίζεται με μια ευθεία γραμμή (σχήμα 2.9 αριστερό τμήμα). Το επόμενο τμήμα της καμπύλης αναπαριστά την ανάπτυξη της ρωγμής προς όλες τις κατευθύνσεις, ενώ στο τρίτο τμήμα, αντιστοιχεί στην επέκταση της ρωγμής σε ζώνες χαμηλώτερης τάσης, οδηγώντας σε ένα είδος κατάστασης διαφυγής.

Στο δεξιό τμήμα του σχήματος, παρουσιάζεται η αύξηση της τιμής της πίεσης πάνω από το κανονικό επίπεδο. Αυτό παρατηρείται όταν εισπιέζεται μαζί με το υγρό και άμμος στην γεώτρηση. Αν ένα από τα πτερύγια της ρωγμής φράξει, παρουσιάζεται απότομη αύξηση της κλίσης της καμπύλης.

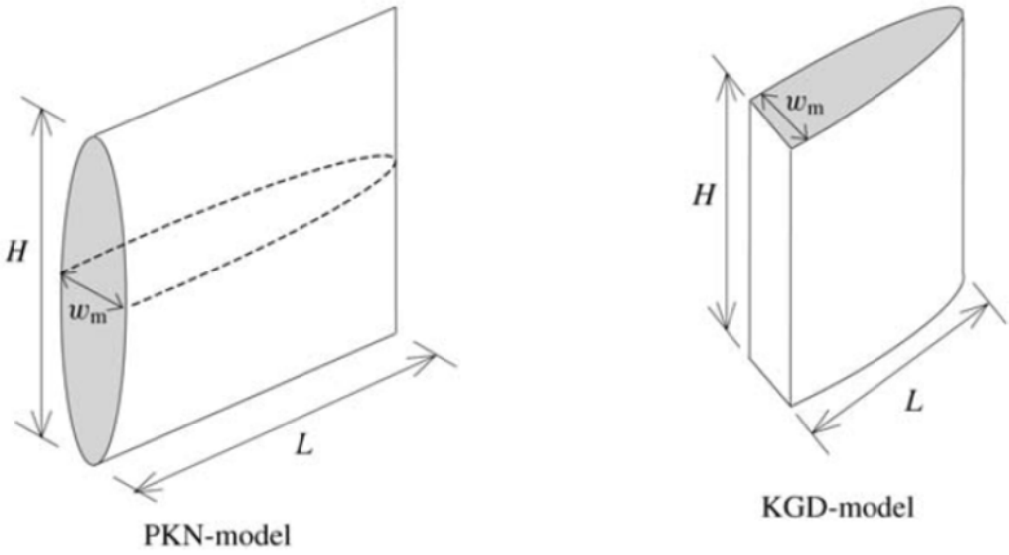


Σχήμα 2.9. Διάγραμμα της λογαριθμικής τιμής πίεσης σε σχέση με την λογαριθμική τιμή του χρόνου

2.2.4 Μέγεθος και σχήμα ρωγμής

Η απεικόνιση της γεωμετρίας της ρωγμής, είναι ένα ζήτημα που έχει αποτελέσει αντικείμενο έρευνας για αρκετές δεκαετίες. Παρακάτω, θα παρατεθούν ορισμένες αρχές της γεωμετρίας μιας ρωγμής και κάποιες αναλυτικές εκφράσεις που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την λήψη μιας εκτίμησης της γεωμετρίας της ρωγμής.

Τα κλασικά μοντέλα για τον υπολογισμό της γεωμετρίας μιας δισδιάστατης ρωγμής, είναι το PKN (Perkins–Kern–Nordgren) και το KGD (Kristianovitch–Geertsma–de Klerk). Και τα δύο μοντέλα θεωρούν συνθήκες επίπεδης παραμόρφωσης. Το μοντέλο KGD θεωρεί ότι η τροπή περιορίζεται στο οριζόντιο επίπεδο, ενώ στο μοντέλο PKN η τροπή είναι στο κάθετο επίπεδο.



Σχήμα 2.10 Αναπαράσταση του σχήματος την ρωγμής για τα δύο είδη μοντέλων

Και στα δύο μοντέλα, το ύψος της ρωγμής είναι σταθερό και ανεξάρτητο του μήκους της ρωγμής. Επίσης, η πίεση στην άκρη της ρωγμής θεωρείται μηδέν (η συγκεκριμένη υπόθεση είναι μια απλοποίηση, καθώς απαιτείται πίεση που θα υπερνικήσει την αντίσταση στην άκρη της ρωγμής και θα οδηγήσει στην διάδοσή της.

Το πεδίο εφαρμογής των δύο μοντέλων αποτελεί αντικείμενο εκτενούς συζήτησης. Γενικά, το μοντέλο PKN θεωρείται κατάλληλο για περιπτώσεις όπου το μήκος είναι πολύ μεγαλύτερο σε σχέση με το ύψος, ενώ το μοντέλο KGD για το αντίθετο. Το μέγιστο πλάτος της ρωγμής, σύμφωνα με το μοντέλο KGD, δίνεται από τον τύπο:

$$w_m = \frac{2(1-\nu)Lp_e}{G} = \frac{4(1-\nu^2)Lp_e}{E} = \frac{4Lp_e}{E'} \qquad (2.16)$$

όπου p_e είναι η καθαρή πίεση ρωγμάτωσης (πίεση στην ρωγμή μείον την ελάχιστη τάση), L είναι το μισό μήκος της ρωγμής, ν ο λόγος Poisson, G το μέτρο διάτμησης, E είναι το μέτρο ελαστικότητας και E' είναι το μέτρο ελαστικότητας για επίπεδη παραμόρφωση, το οποίο δίνεται από τη σχέση:

$$E' = \frac{E}{1-\nu^2} = \frac{2G}{1-\nu} \tag{2.17}$$

Καθώς η πίεση ρωγμάτωσης έχει μέγεθος της τάξης των MPa, ενώ το μέτρο της επίπεδης τροπής της τάξης των GPa, το πλάτος της ρωγμής είναι πολύ μικρότερο από το μήκος της. Η πίεση εξαρτάται από την αντίσταση της ροής μέσα στην ρωγμή, οπότε κατ' επέκταση από το ιξώδες και τον ρυθμό εισπίεσης.

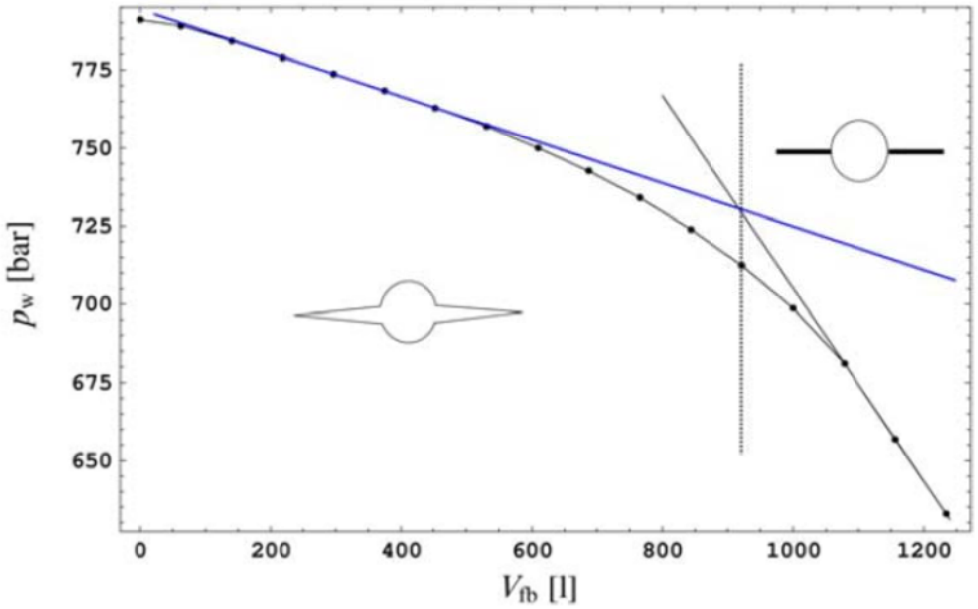
Το μέγιστο πλάτος της ρωγμής, σύμφωνα με το μοντέλο PKN υπολογίζεται, αντικαθιστώντας στην εξίσωση 2.16 το L με H/2.

Ένα μέσο πλάτος ρωγμής μπορεί να υπολογιστεί, αν θεωρηθεί ότι η ρωγμή είναι ελλειπτικού σχήματος.

$$\overline{w} = \frac{\pi(1-\nu)Lp_e}{2G} = \frac{\pi(1-\nu^2)Lp_e}{E} = \frac{\pi Lp_e}{E'} \tag{2.18}$$

2.2.5 Φάση κλεισίματος της ρωγμής

Η φάση όπου κλείνει η ρωγμή, είναι πολύ σημαντική, διότι παρέχει την δυνατότητα για τον υπολογισμό μιας προσεγγιστικής τιμής της ελάχιστης κύριας τάσης (σ_3). Η ρωγμή θα κλείσει, όταν η τιμή της πίεσης του ρευστού εξισορροπήσει την τάση που εφαρμόζεται κάθετα στην ρωγμή. Στις περισσότερες περιπτώσεις, θεωρείται ότι η τάση που κλείνει την ρωγμή είναι ίση με την ελάχιστη οριζόντια τάση (σ_h). Ωστόσο, σε κάποιες περιπτώσεις, δεν μπορεί να εξαχθεί η τιμή της ελάχιστης τάσης από το κλείσιμο των ρωγμών, διότι είναι μια διαδικασία που δεν είναι στιγμιαία. Κατά το κλείσιμο της ρωγμής, η πίεση μειώνεται σταδιακά και κάποια στιγμή θα ισούται με την ελάχιστη κύρια τάσης. Ωστόσο το σημείο αυτό δεν μπορεί να προσδιοριστεί με ακρίβεια, μετρώντας την πίεση μέσα στην γεώτρηση



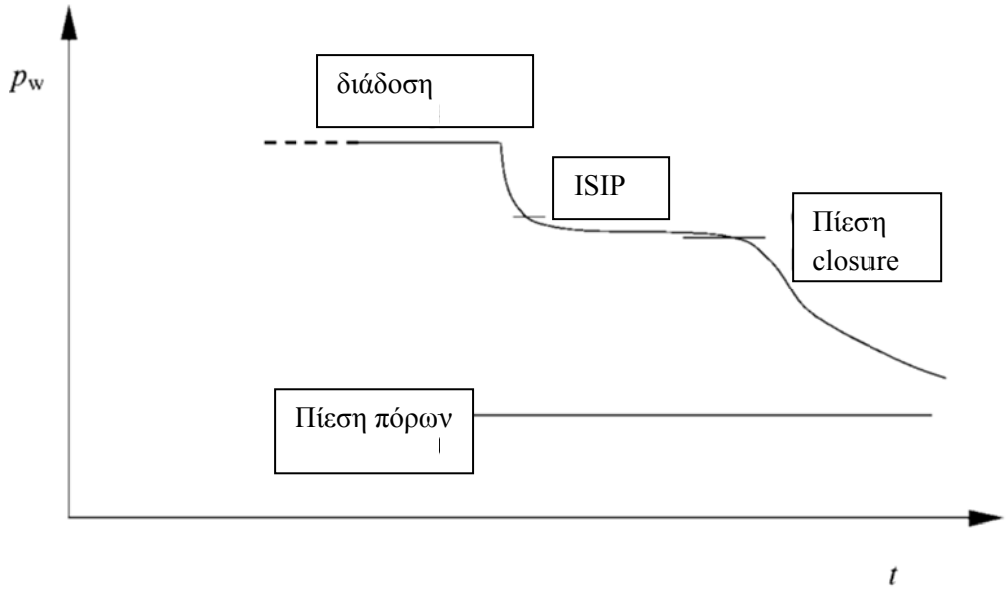
Σχήμα 2.11 Απεικόνιση της πίεσης της γεώτρησης σε σχέση με τον όγκο κατά την διάρκεια μιας δοκιμής ροής προς τα έξω (flowback test). Μια ανοιχτή ρωγμή απεικονίζεται στο πρώτο γραμμικό τμήμα και μια κλειστή ρωγμή, στο δεύτερο γραμμικό τμήμα

Αυτό μπορεί να εξεταστεί περαιτέρω, θεωρώντας ένα διάγραμμα της πίεσης σε σχέση με τον όγκο, κατά την δοκιμή της ροής προς τα έξω από την γεώτρηση. Το πρώτο γραμμικό τμήμα απεικονίζει την ακαμψία μιας ανοιχτής ρωγμής. Το δεύτερο γραμμικό τμήμα, απεικονίζει την ακαμψία του συστήματος της γεώτρησης, μετά το κλείσιμο των ρωγμών. Το κλείσιμο των ρωγμών σχετίζεται με την πίεση στο σημείο όπου παρουσιάζεται απόκλιση της ακαμψίας του συστήματος, από το γραμμικό τμήμα. Αυτή η απόκλιση είναι αποτέλεσμα της μείωσης του μεγέθους της ρωγμής, δηλαδή η πίεση είναι ίση ή μικρότερη από την ελάχιστη κύρια τάση, σε κάποιο σημείο της ρωγμής.

2.2.5.1 Προσδιορισμός του σ3 από δοκιμές (shut-in/decline)

Όταν η εισπίεση διακόπτεται και η ρωγμή κλείνει, η πίεση που απαιτείται για το άνοιγμα της ρωγμής και η πίεση που απαιτείται για την ροή του ρευστού, άμεσα πέφτουν στο μηδέν (εξίσωση 2.15). Αυτό σημαίνει ότι η πίεση στην ρωγμή είναι ίση με την ελάχιστη κύρια τάση και με την όποια υπόλοιπη πίεση περιέχεται στην ρωγμή.

Αν το ιξώδες του υγρού είναι χαμηλό και η ρωγμή είναι μικρή και δεν περιέχει κόκκους άμμου, η πίεση στην ρωγμή είναι χαμηλή. Αυτό σημαίνει ότι κάτω από αυτές τις συνθήκες η τιμή της πίεσης που μετριέται άμεσα μετά από το κλείσιμο της ρωγμής, είναι προσεγγιστικά ίση με την ελάχιστη κύρια τάση (σ_3). Το συγκεκριμένο γεγονός αναφέρεται ως στιγμιαία πίεση κλεισίματος (instantaneous shut-in pressure ISIP).



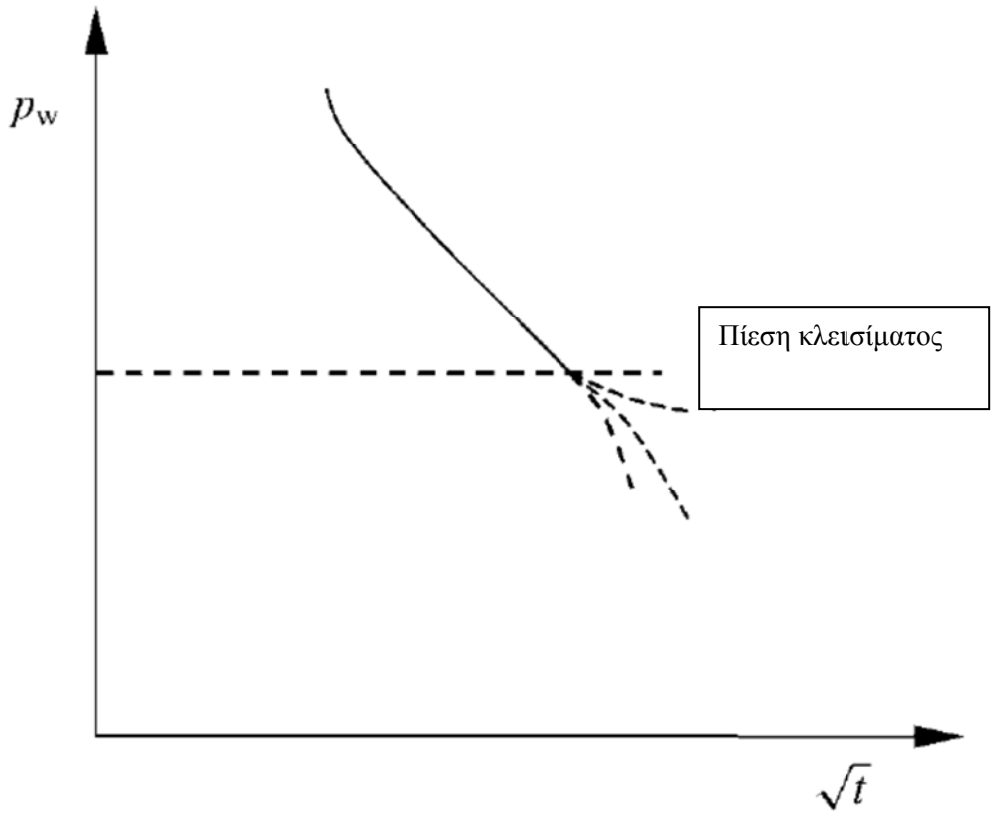
Σχήμα 2.12 Απεικόνιση της απόκρισης της πίεσης της γεώτρησης μετά το κλείσιμο των ρωγμών

Το προαναφερθέν γεγονός, απεικονίζεται στο σχήμα 2.12, όπου φαίνεται η τάση όπου το πλεόνασμα της πίεσης έχει διαφύγει και η ρωγμή κλείνει πραγματικά. Αυτή η πίεση αναφέρεται ως πίεση κλεισίματος (p_c) και θεωρείται ως η καλύτερη εκτίμηση της σ_3.

Ωστόσο, η τιμή της πίεσης κλεισίματος, εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως το ιξώδες του υγρού, τη διαρροή του υγρού μέσα στον σχηματισμό και τον ρυθμό εισπίεσης. Η καλύτερη προσεγγιστική τιμή για την σ_3, λαμβάνεται περιμένοντας να κλείσει η ρωγμή. Η τιμή της πίεσης κλεισίματος, αποτελεί το ανώτερο όριο της τιμής που μπορεί να λάβει η σ_3, ωστόσο η διαφορά μεταξύ πίεσης κλεισίματος και σ3 μπορεί να είναι σημαντική και η διαφορά θα διαφέρει από δοκιμή σε δοκιμή. Η στιγμιαία πίεση κλεισίματος, σε ορισμένες περιπτώσεις, είναι δύσκολο να προσδιοριστεί από την καμπύλη του σχήματος 2.12. Για παράδειγμα, αν η βραχομάζα έχει χαμηλή περατότητα, η αναμονή για να διαρρεύσει το υγρό από την

ρωγμή, προκειμένου να κλείσει, είναι πολύ μεγάλη. Στην προκειμένη περίπτωση, θεωρείται άσκοπο να περιμένει κανείς μέχρι να κλείσει η ρωγμή.

Η εύστοχη αναγνώριση της τιμής της πίεσης κλεισίματος δεν είναι εύκολη υπόθεση, αφού το κλείσιμο της ρωγμής πραγματοποιείται σταδιακά και όχι στιγμιαία. Όταν τα δύο εκατέρωθεν τοιχώματα της ρωγμής έρχονται σε φυσική επαφή, η ροή του υγρού εντός της ρωγμής μπορεί ακόμα να είναι ελεύθερη. Στην ιδανική περίπτωση όπου η ρωγμή κλείνει στιγμιαία, θα παρατηρηθεί μια απότομη πτώση της πίεσης. Αυτό οφείλεται στην δραστική αύξηση της ακαμψίας του συστήματος, λόγω του κλεισίματος της ρωγμής. Η πραγματική απόκριση της πίεσης στο κλείσιμο των ασυνεχειών, εξαρτάται από την φύση του υγρού που χρησιμοποιείται, την περατότητα της βραχομάζας και την ακαμψία του συστήματος. Για την ερμηνεία της απόκρισης της πίεσης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορα διαγράμματα. Ένα παράδειγμα δίνεται στο σχήμα 2.13:



Σχήμα 2.13 Διάγραμμα μείωσης της πίεσης σε σχέση με την τετραγωνική ρίζα του χρόνου

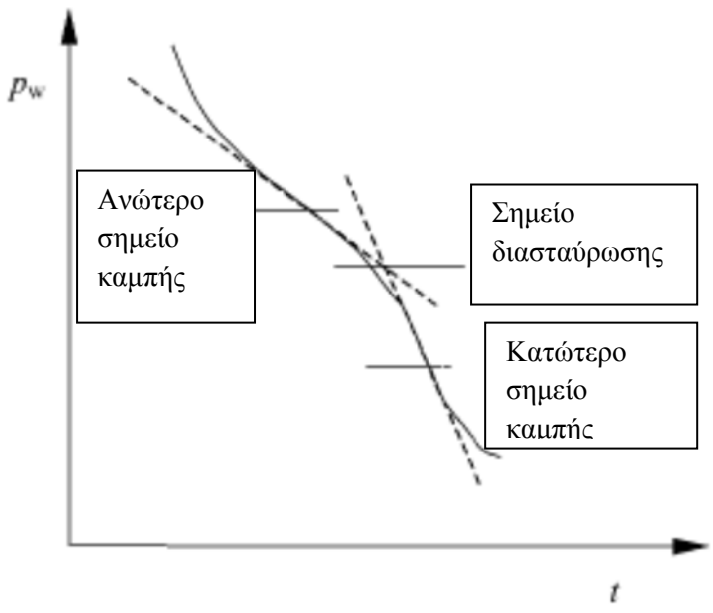
Η καμπύλη παρουσιάζει μια γραμμικότητα, όσο η ρωγμή παραμένει ανοιχτή. Όταν η ρωγμή κλείνει, η γραμμή αποκλίνει από την γραμμική συμπεριφορά. Η αλλαγή αυτή

μπορεί να συμβεί σε οποιαδήποτε από τις δύο διευθύνσεις και εξαρτάται από τις ιδιότητες της ρωγμής και του σχηματισμού.

Σε σχηματισμούς με χαμηλή περατότητα, οι κλασικές μέθοδοι ερμηνείας μπορεί να μην είναι εφαρμόσιμες. Η διαρροή του υγρού από την ρωγμή μπορεί να είναι πολύ μικρή, οπότε η ISIP είναι δύσκολο να προσδιοριστεί, αφού ο χρόνος για να κλείσει η ρωγμή είναι πολύ μεγάλος. Θα παρατηρηθεί μια πτώση της πίεσης, όταν η ρωγμή κλείνει, αλλά αυτό μπορεί να οφείλεται στην προέκταση της ρωγμής, εξαιτίας ενέργειας που έχει αποθηκευτεί στην ρωγμή. Για πιο ακριβείς τιμές της ελάχιστης κύριας τάσης, τόσο σε σχιστολιθικούς όσο και σε περισσότερο περατούς σχηματισμούς, προτείνεται η χρήση της δοκιμής ροής προς τα έξω, που περιγράφεται στην επόμενη ενότητα.

2.2.5.2 Προσδιορισμός του σ3 σε δοκιμές ροής προς τα έξω από την γεώτρηση (flowback)

Κατά την συγκεκριμένη δοκιμή, ένας όγκος υγρού εισπιέζεται στην γεώτρηση για να προκληθεί η ρωγμάτωση. Στην συνέχεια, επιτρέπεται η ροή του υγρού προς τα έξω, έως ότου έχει διαπιστωθεί κλείσιμο των ρωγμών.



Σχήμα 2.14 Συμπεριφορά της πίεσης κατά την ροή του ρευστού προς τα έξω

Στο διάγραμμα πίεσης-χρόνου, φαίνεται ένα σημείο καμπής στην πίεση κλεισίματος των ρωγμών. Αυτό είναι το ανώτερο σημείο καμπής, και οφείλεται στην αύξηση της ακαμψίας του συστήματος, καθώς κλείνει η ρωγμή. Άλλες εναλλακτικές προσεγγίσεις (π.χ. Shlyapobersky et al. 1988), θεωρούν την πίεση κλεισίματος στο κατώτερο σημείο καμπής. Εξάλλου, ο Plahn et al. (1997), πρότεινε σαν ερμηνεία, την χρήση του σημείου που προκύπτει από την διασταύρωση δύο ευθειών που σχεδιάζονται από το ανώτερο και το κατώτερο σημείο καμπής. Για να υποστηριχθεί η πρόταση, χρησιμοποιήθηκαν τα μοντέλα KGD και PKN.

Μια διαφορετική προσέγγιση παρουσιάστηκε από τον Raanen et al. (2001,2006), όπου ο όγκος του υγρού που ρέει προς τα έξω μετριέται και παρατηρείται η αλλαγή στην ακαμψία του συστήματος, όταν κλείνει η ρωγμή.

Είναι αποδεκτό ότι και οι δύο μέθοδοι προσφέρουν προσεγγιστικές τιμές της πίεσης, που είναι πιο κοντά στο ανώτερο σημείο καμπής. Ωστόσο, παραδοσιακά, θεωρείται ότι είναι απαραίτητο η ροή προς τα έξω του υγρού να είναι σταθερή, προκειμένου να είναι δυνατή μια διακριτή και ερμηνεύσιμη απόκριση της πίεσης.

2.3 Η επίδραση της προϋπάρχουσας ρωγμάτωσης

Φυσικές ρωγμές

Στην συγκεκριμένη παράγραφο, εξετάζεται η επίδραση της προϋπάρχουσας ρωγμάτωσης σε φυσικά ρωγματωμένους ταμιευτήρες σχιστολιθικού αερίου. Η εκτίμηση των γεωμηχανικών χαρακτηριστικών στην κλίμακα της βραχομάζας αποτελεί μια σημαντική πρόκληση, ιδιαίτερα στην περίπτωση των φυσικά ρωγματωμένων ταμιευτήρων. Το ερώτημα εάν οι φυσικές ρωγμές είναι ανοιχτές ή κλειστές σε βάθος δεν είναι εύκολο να απαντηθεί, καθώς η κατάσταση του μπορεί να αντιστοιχεί σε διάφορες ημιποσοτικές περιγραφές: ανοιχτή, κλειστή, συγκολλημένη (υπό την έννοια ότι μία προγενέστερα ανοιχτή ρωγμή έχει επουλωθεί από την παρουσία ενός ισχυρού συγκολλητικού υλικού πλήρωσης), επίμονη, προσανατολισμένη. Αν μια ρωγμή μπορεί να παρατηρηθεί εύκολα σε μια γεωφυσική

διασκόπηση δεν υπάρχει αμφιβολία για την ύπαρξή της. Πιθανόν οι ρωγμές αυτές, κατά την εξέταση ενός πυρήνα δειγματοληψίας από μία γεώτρησης, να εμφανίζουν επιφανειακές αλλοιώσεις και ορυκτές αποθέσεις, που πιστοποιούν ότι η ρωγμή ενήργησε ως διαδρομή ροής στο παρελθόν. Ωστόσο, η εξέταση του πυρήνα συχνά δείχνει και ρωγμές που ανοίγουν λόγω απρόσεκτου χειρισμού του πυρήνα και παρόλο που η ρωγμή μπορεί να είναι σαφώς γεωλογικής προέλευσης, που διασχίζει π.χ. τη στρώση, δεν είναι εμφανείς αλλοιώσεις στην επιφάνειά της. Αυτή η ρωγμή, που ονομάζεται από τους Dusseault et al. (2011) ως "incipient fracture", και όπου στην επιφάνεια είναι ανοιχτή από τις διαδικασίες αποσάθρωσης, αλλά σε βάθος είναι κλειστή ή μερικώς αποκολλημένη σε όλη την επιφάνειά της, θα καλείται στην παρούσα παράγραφο ως «δυνητικά ανοιχτή» ρωγμή. Μια τέτοια ρωγμή δεν μπορεί να ανιχνευθεί σε βάθος, διότι η τέλεια επαφή των τοιχωμάτων της και η υψηλή πίεση δεν επιτρέπουν ούτε το παραμικρό άνοιγμα, το οποίο θα οδηγούσε σε αντανάκλαση της σεισμικής ενέργειας ή θα ήταν με άλλο τρόπο ανιχνεύσιμο. Καθώς φαίνεται, δεν υπάρχει μέθοδος για να προσδιοριστεί ποσοτικά η σχετική σημασία των ρωγμών αυτών στην περίπτωση των φυσικά ρωγματωμένων ταμιευτήρων, ωστόσο, η σπουδαιότητά τους φαίνεται να είναι ιδιαίτερα σημαντική.

Κατά τους Dusseault et al. (2011), η προέλευση των φυσικών ρωγμών που είναι ανοιχτές ή δυνητικά ανοιχτές εικάζεται ότι προκύπτει από μια τάση για πλευρική συρρίκνωση του πετρώματος, κάποια στιγμή κατά τη διάρκεια της γεωλογικής του ιστορίας, ή εξαιτίας της δημιουργίας μεγάλων εσωτερικών πιέσεων που οδήγησαν σε φυσική υδραυλική ρωγμάτωση.

Όταν οι οργανικοί σχιστόλιθοι απλώνονται ως βιολογική λάσπη, σημειώνεται ενταφιασμός και μεγάλη ποσότητα νερού αποβάλλεται από τους σχιστόλιθους. Καθώς ο ενταφιασμός πυκνών ακολουθιών σχιστόλιθου συνεχίζεται, αναπτύσσονται πιέσεις στους πόρους από την κατακόρυφη φόρτιση, και αν po> σhmin, θα σημειωθεί κατακόρυφη υδραυλική ρωγμάτωση, ως μοναδικός τρόπος για να εκτονωθούν οι υπερβολικά υψηλές πιέσεις. Στην πραγματικότητα, η ροή αυτού του νερού που αποβάλλεται σε υψηλές πιέσεις οδηγεί σε συμπίεση των φορέων άμμου που απομονώνονται από τοπικές περιοχές ροής, οδηγώντας σε συνθήκες υψηλής πίεσης (περιστασιακά po> 0.95 • σν). Η κατακόρυφη παραμόρφωση σε ένα μη τεκτονικό περιβάλλον συμπίεσης οδηγεί άμεσα σε κατακόρυφη καθίζηση, αλλά η κατάσταση μη πλευρικής παραμόρφωσης που σχετίζεται με τα επίπεδα στρώματα, οδηγεί σε μείωση του σhmin, που οδηγεί σε εσωτερική υδραυλική ρωγμάτωση, το οποίο με τη

σειρά ου οδηγεί σε μεγάλο βαθμό στη δομή των φυσικά ρωγματωμένων ταμιευτήρων, την οποία συναντάμε σε πολλές τοποθεσίες.

Όταν πραγματοποιείται ενταφιασμός υδατανθράκων (φυτικής ύλης) ή λιπιδίων (φυκών), η βακτηριακή δράση διασπά τους υδατάνθρακες σε CH4, CO2 και H2O, αφήνοντας πίσω τον άνθρακα, ενώ η θερμογένεση διασπά τα λιπίδια (που ονομάζονται Type II κηροζίνη) σε υδρογονάνθρακες και άνθρακα (εξού και οι μαύροι σχιστόλιθοι). Η μετατροπή μιας ημιστερεάς ουσίας, όπως η κηροζίνη, σε ρευστό (υγρό και ίσως αέριο υδρογονάνθρακα) περιλαμβάνει συμπίεση του υγρού, καθώς η πίεση του εδαφικού σκελετού μεταφέρεται ως πίεση στα υγρά. Όπως παραπάνω, στην περίπτωση του po> σhmin, θα σημειωθεί κάθετη υδραυλική ρωγμάτωση και μέρος του πετρελαίου και του αερίου μπορεί να διαφύγει για να "μεταναστεύσει" σε πορώδεις, διαπερατούς ταμιευτήρες. Όταν η πίεση εκτονωθεί σε μεγάλο βαθμό, το υπόλοιπο πετρέλαιο και το αέριο μπορούν να παραμείνουν στην αρχική βραχομάζα και να σχηματίσουν, εφόσον το οργανικό περιεχόμενο είναι επαρκές, ταμιευτήρες σχιστολιθικού αερίου και σχιστολιθικού πετρελαίου, μέσα σε βράχους που είναι πλέον φυσικά διαρρηγμένοι.

Ένας τρίτος σημαντικός μηχανισμός είναι η μετατροπή του σμεκτίτη σε πυρίτιο, ιλλίτη και νερό, σε βάθος γεωλογικού χρόνου. Όχι μόνο παράγεται νερό, γεγονός που μπορεί να αυξήσει την πίεση στους πόρους, νωρίς σε αυτή τη διαδικασία μετάβασης, αλλά η ορυκτολογική αλλαγή περιλαμβάνει μια ογκομετρική συρρίκνωση που μπορεί να είναι αρκετά υψηλή σε ποσοστά επί τοις εκατό (> 10% εάν ο σχιστόλιθος ήταν αρχικά καθαρός σμεκτίτης). Η πλευρική συρρίκνωση, ακόμα και σε πολύ μικρό ποσοστό, έχει σημαντικές συνέπειες στην οριζόντια τάση λόγω της κατάστασης μη πλευρικής παραμόρφωσης σε επίπεδα στρώματα, τα οποία υποβάλλονται σε ομοιόμορφες αλλαγές. Αναλογικά με τη θερμοελαστική συρρίκνωση, εάν μια ομοιόμορφη πλευρική παραμόρφωση λαμβάνει χώρα σε ένα πλευρικά εκτεταμένο στρώμα, τότε $\Delta\sigma'h \approx \varepsilon h \bullet E / (1 - \nu)$.

Εδώ, η αλλαγή στην πλευρική ενεργό τάση είναι ανάλογη με το γινόμενο της γραμμικής παραμόρφωσης $- \varepsilon h = \Delta L / L$ και του μέτρου του Young, διαιρούμενο με (1-ν), όπου ν είναι ο λόγος Poisson. Ακόμη και για σχετικά μαλακά πετρώματα πριν από την πλήρη σκλήρυνση, με μια τιμή του E = 5 GPa, συρρίκνωση 1% (ε = 0.01) οδηγεί σε απώλεια ενεργούς πλευρικής τάσης ίσης με $\Delta\sigma'h \approx \varepsilon h \bullet E / (1\ \nu) \approx 0{,}01 \bullet 5{,}000$ MPa / (1 - 0,33) ≈ 70 MPa. Η βραχομάζα δεν έχει άλλη επιλογή από το να αναπτύξει κάθετες ρωγμές, όταν η οριζόντια ενεργός τάση γίνεται εφελκυστική και

αυτό συμβαίνει συχνά στη φύση σε ένα επαναλαμβανόμενο μοτίβο, και εμφανίζεται ως ένα σύνολο ασυνεχειών.

Εικόνα 2.1 Σύνολα ασυνεχειών σε επιφανειακές εμφανίσεις βραχομάζας του πετρελαϊκού κοιτάσματος στην λεκάνη της κεντρικής Σουμάτρας (φωτογραφία των Dusseault et al., 2011)

Η παραπάνω εικόνα δείχνει την επιφανειακή εμφάνιση βραχομάζας πετρελαϊκού κοιτάσματος σε κάποια απόσταση (2.5-3.0 km) από την λεκάνη της κεντρικής Σουμάτρας. Εκεί, δημιουργήθηκε φυσικό αέριο και πετρέλαιο που μετανάστευσε σε κοιτάσματα βορειοανατολικά της λεκάνης. Διακρίνεται έντονα ένα σύνολο ασυνεχειών με ομοιόμορφες αποστάσεις, που «δείχνει» προς το γειτονικό βουνό και είναι πιθανόν ότι η διεύθυνση 90° ως προς το κύριο σετ ασυνεχειών, να είναι η διεύθυνση της σ_{hmin} την στιγμή που διαμορφώθηκαν οι ασυνέχειες, παράλληλα στο βουνό. Βαθύτερα στην λεκάνη, η βραχομάζα ρωγματώνεται και θεωρείται ως προσδοκόμενη για σχιστολιθικό αέριο και πετρέλαιο (ανάλογα με το βάθος).

2.4 Υδραυλική θραύση σε ταμιευτήρες σχιστολιθικού αερίου και πετρελαίου

Υδραυλική θραύση, ονομάζεται η μέθοδος εξόρυξης ορυκτών καυσίμων, κατά την οποία η βραχομάζα ρωγματώνεται λόγω της εισπίεσης ενός ρευστού υπό πίεση. Ρευστό υψηλής πίεσης εισπιέζεται, μέσω μιας γεώτρησης στο έδαφος, προκαλώντας ρωγμές σε ιζηματογενής σχηματισμούς που εντοπίζονται σε μεγάλα βάθη. Δια μέσου των συγκεκριμένων ρωγμών, ρέει φυσικό αέριο ή πετρέλαιο το οποίο βρίσκονταν εγκλωβισμένο μέσα στον σχηματισμό.

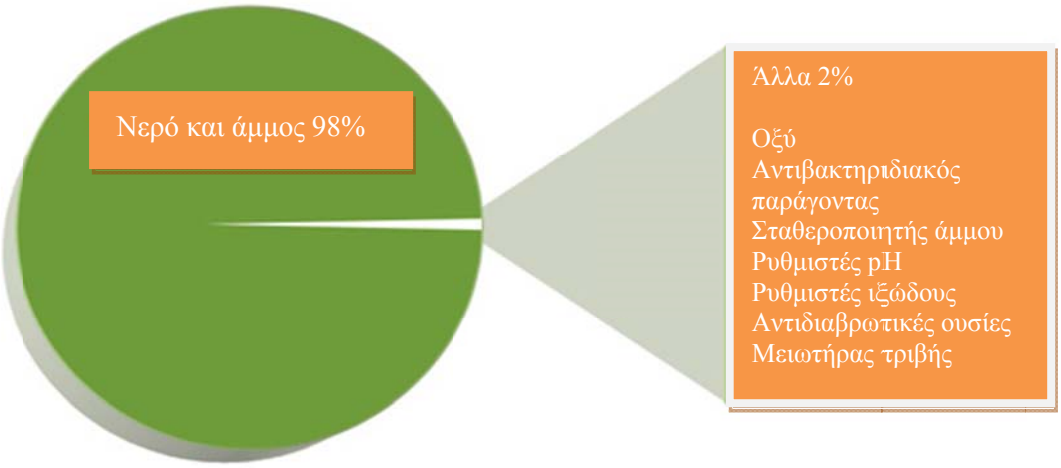
Ήδη από τις αρχές του 19 αιώνα, είχε εντοπιστεί εγκλωβισμένο μέσα σε ιζηματογενή πετρώματα (σχιστόλιθους), ένα είδος φυσικού αερίου, που ονομάστηκε σχιστολιθικό αέριο (shale gas) και το οποίο μπορούσε να αποτελέσει μια εναλλακτική πηγή ενέργειας , σε σχέση με τις ήδη υπάρχουσες. Ωστόσο η εκμετάλλευση του ήταν αδύνατη λόγω της έλλειψης της απαιτούμενης τεχνολογίας και τεχνογνωσίας. Έπειτα από έρευνες, η μέθοδος που αναπτύχθηκε για την εκμετάλλευση των κοιτασμάτων σχιστολιθικού αερίου ονομάστηκε υδραυλική θραύση και ξεκίνησε ως πείραμα το 1947. Ωστόσο, την δεκαετία του 1970, άρχισε η επισταμένη έρευνα της συγκεκριμένης μεθόδου, όταν ο φόβος της μείωσης της παραγωγής του συμβατικού πετρελαίου και αερίου οδήγησε την Αμερικανική Κυβέρνηση να επενδύσει στην έρευνα.

Δύο τεχνικές εξόρυξης υδρογονανθράκων εφαρμόζονταν για την εκμετάλλευση κοιτασμάτων φυσικού αερίου και πετρελαίου: η οριζόντια και η κάθετη. Η μέθοδος της οριζόντιας εξόρυξης, παρότι ήταν πιο ακριβή από τη συμβατική κάθετη εξόρυξη, ενεργοποίησε την εξόρυξη υδρογονανθράκων από πηγές οι οποίες ως εκείνη τη στιγμή ήταν μη προσβάσιμες. Ο συνδυασμός των δυο τεχνολογιών έγινε γνωστός ως «υδραυλική ρωγμάτωση» (hydraulic fracturing/ fracking). Οι πρώτοι που ανέπτυξαν τη συγκεκριμένη τεχνική ήταν δυο μηχανικοί του Αμερικανικού Τμήματος Ενέργειας στα μέσα της δεκαετίας του 1970, αλλά η εμπορική της επιτυχία δε χρονολογείται παρά μέχρι το 1986 και μόλις πριν μια δεκαετία έγινε πρότυπο εξόρυξης ενέργειας από σχιστολιθικούς σχηματισμούς στη χώρα.

2.4.1 Μέθοδος εξόρυξης

Κατά την μέθοδο υδραυλικής θραύσης, ορύσσεται κατακόρυφη γεώτρηση η οποία όταν πλησιάζει στον σχιστολιθικό σχηματισμό αλλάζει σταδιακά κλίση (kickoff point) έως ότου γίνει οριζόντια και συνεχίζει κατά μήκος του σχηματισμού. Στην συνέχεια, εισέρχεται ο σωλήνας παραγωγής και γίνεται η τσιμέντωση των τοιχωμάτων της γεώτρησης. Έπειτα εισέρχεται το όπλο διάτρησης το οποίο με έκρηξη δημιουργεί μικρές ρωγμές στον σχηματισμό και εισπιέζεται ένα μείγμα νερού, άμμου και διάφορων χημικών, τα οποία χρησιμεύουν για την προστασία του εξοπλισμού και την ρύθμιση της ροής του μείγματος μέσα στον σωλήνα

(αντιβακτηριδιακά, οξύ διάλυσης υπολειμμάτων γεώτρησης, ρυθμιστές pH, ρυθμιστές ιξώδους, αντιδιαβρωτικά, αντιοξειδωτικά).

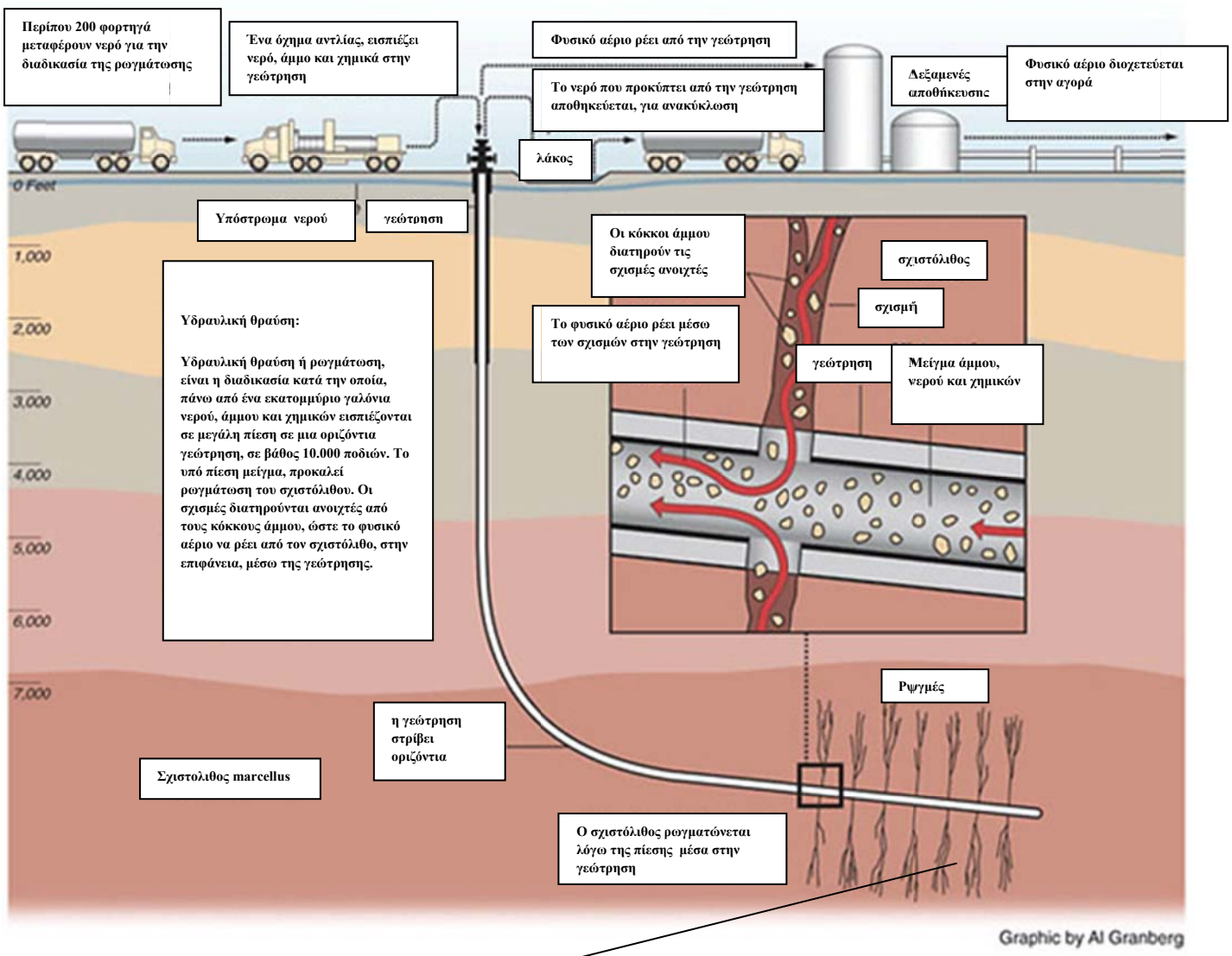


Σχήμα 2.15 Συστατικά μείγματος υδραυλικής θραύσης

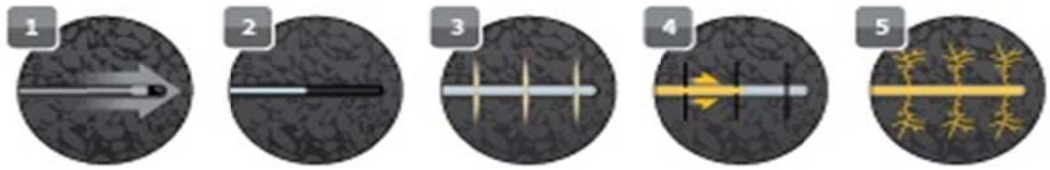
Η διαδικασία αποτελείται από τα εξής στάδια:

I. Στην αρχή εισπιέζεται μείγμα υδροχλωρικού οξέως και νερού το οποίο καθαρίζει την γεώτρηση από τα υπολείμματα διάτρησης (spearhead stage)
II. Έπειτα, εισέρχεται ρευστό το οποίο προκαλεί την έναρξη ρωγμάτωσης των σχηματισμών (pad stage)
III. Διοχετεύεται πολφός που αποτελείται από νερό και άμμο κυρίως, μέσω του οποίου η άμμος διεισδύει εντός των ρωγματώσεων αναλαμβάνοντας την πίεση του σχηματισμού (proppant stage)
IV. Στην συνέχεια, εισπιέζεται νερό στην γεώτρηση, για να καθαριστεί από υπολείμματα του πολφού (Flush stage)

Έπειτα από το πέρας των παραπάνω διαδικασιών, τοποθετείται έμβολο απομόνωσης ώστε να αποτραπεί η διαφυγή του αερίου και η διαδικασία επαναλαμβάνεται αρκετές φορές κατά μήκος του σχηματισμού. Τέλος, ανοίγουν τα έμβολα επιτρέποντας την ροή του υπολειπόμενου νερού και στην συνέχεια του αερίου. Το φυσικό αέριο αποθηκεύεται σε ειδικές δεξαμενές, ενώ το νερό (15-50%) ανακυκλώνεται έπειτα από ειδική επεξεργασία.



Οριζόντια διάτρηση



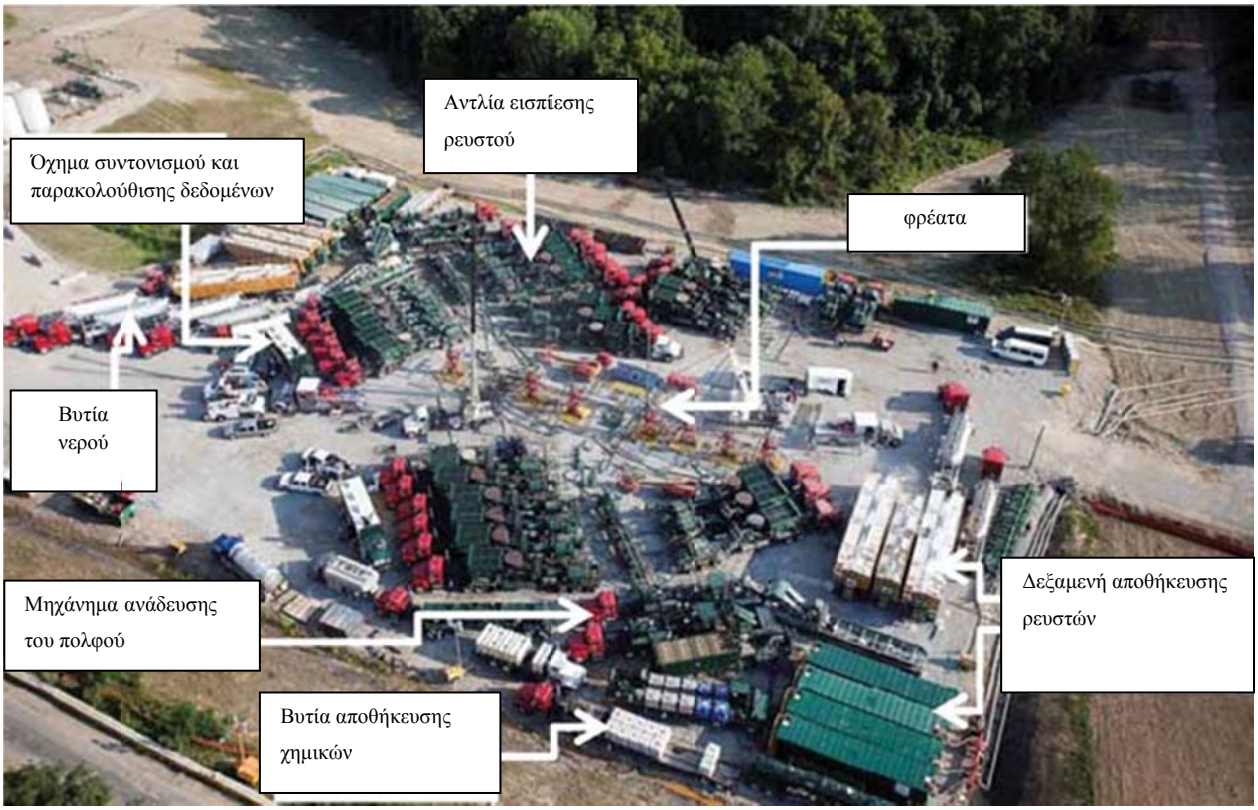
Γεώτρηση οριζόντια στα 914-1.524m	Περίβλημα παραγωγής εισέρχεται στην γεώτρηση και τσιμεντώνεται	Εκρηκτικά πυροδοτούνται μέσα στο όπλο διάτρησης, δημιουργώντας μικρές τρύπες μέσα στον σχιστόλιθο	Μείγμα από νερό, άμμο και χημικά, εισπιέζεται στην γεώτρηση	Το ρευστό δημιουργεί σχισμές μέσα από τις οποίες ρέει το φυσικό αέριο

Σχήμα 2.16 Σχηματική απεικόνιση της εξόρυξης σχιστολιθικού αερίου με την μέθοδο της υδραυλικής θραύσης

2.4.2 Εξοπλισμός

Αξίζει να γίνει μια απλή αναφορά στον εξοπλισμό που απαιτείται για την προετοιμασία (ανάμειξη και εισπίεση) του μείγματος που χρησιμοποιείται για την ρωγμάτωση των σχιστολιθικών σχηματισμών:

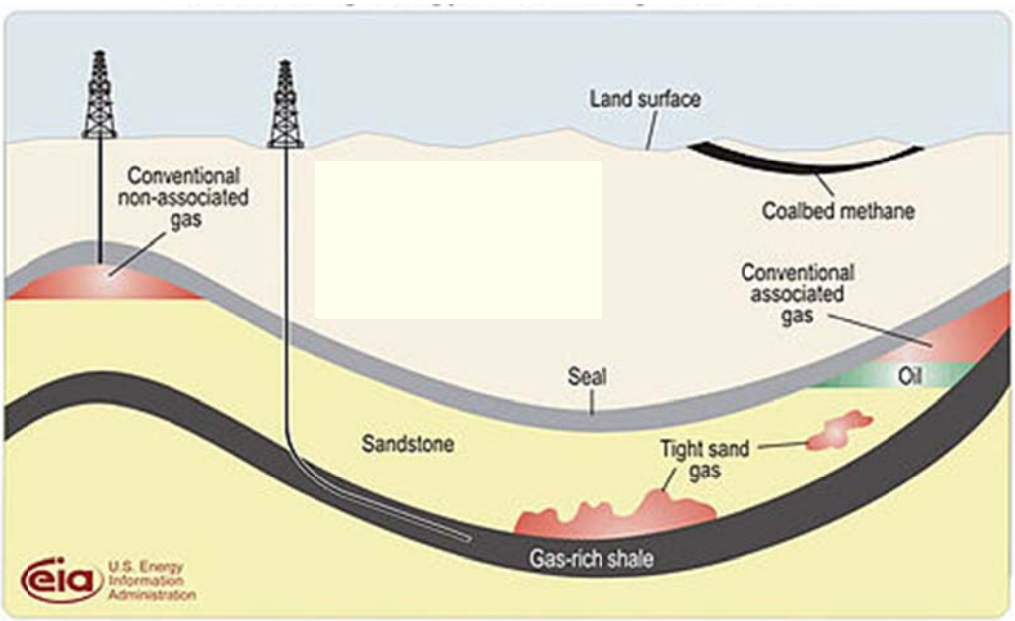
1) Βυτία νερού
2) Δεξαμενές αποθήκευσης άμμου
3) Βυτία αποθήκευσης χημικών
4) Μηχάνημα ανάδευσης του πολφού
5) Δεξαμενή αποθήκευσης ρευστών
6) Αντλία εισπίεσης του ρευστού
7) Όχημα συντονισμού και παρακολούθησης δεδομένων. Παρακολουθεί τον ρυθμό και την πίεση με την οποία το ρευστό ρωγμάτωσης εισπιέζεται στην γεώτρηση.



Εικόνα 2.2 Πανοραμική εικόνα του εργοταξίου κατά την εξόρυξη με την μέθοδο της υδραυλικής θραύσης

2.4.3 Σχιστολιθικό αέριο

Το σχιστολιθικό αέριο είναι φυσικό αέριο που δημιουργείται και παγιδεύεται μέσα σε σχηματισμούς σχιστόλιθου. Ο σχιστόλιθος είναι λεπτόκοκκο ιζηματογενές πέτρωμα, το οποίο περιέχει και μεγάλο ποσοστό οργανικών ουσιών (φυτικής και ζωικής προέλευσης). Σύμφωνα με την επικρατέστερη θεωρία, οι οργανικές ουσίες, κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας, είναι η αιτία για την δημιουργία του φυσικού αερίου. Στα συμβατικά κοιτάσματα, το φυσικό αέριο μεταναστεύει από το «μητρικό» πέτρωμα σε γειτονικούς σχηματισμούς με ενεργό πορώδες, μέχρι να συναντήσει αδιαπέρατο σχηματισμό, όπου και παγιδεύεται. Αντίθετα, ο σχιστόλιθος δεν έχει ενεργό πορώδες και το φυσικό αέριο παγιδεύεται στους πόρους του «μητρικού» πετρώματος.



Σχήμα 2.17 Σχηματική απεικόνιση κοιτασμάτων σχιστολιθικού αερίου και πετρελαίου

2.4.4 Γεωλογικά χαρακτηριστικά ταμιευτήρων Σχιστολιθικού Αερίου

Κάθε ταμιευτήρας είναι διαφορετικός, όμως όλοι οι ταμιευτήρες έχουν ομοιότητες. Αυτό σημαίνει ότι περιληπτικά, τα χαρακτηριστικά των θερμογόνων δεξαμενών σχιστολιθικού αερίου, είναι χρήσιμα για τη γενική εκτίμηση των γεωμηχανικών ιδιοτήτων και για την εμπειρική ανάπτυξη βέλτιστων πρακτικών υδραυλικής θραύσης, σε φυσικά ρωγματωμένους ταμιευτήρες, μέσω σχετικών μεθόδων. Οι ταμιευτήρες σχιστολιθικού αερίου, που είναι θερμογόνες στη φύση, είναι κατά κανόνα μαύροι σχιστόλιθοι, το χρώμα των οποίων προκύπτει από την υψηλή περιεκτικότητα σε υπολειπόμενο άνθρακα, εξαιτίας της αρχικής υψηλής περιεκτικότητας σε οργανική ύλη (Tourtelot 1979). Είναι θαλάσσιοι σχιστόλιθοι (πολύ πιο σπάνια λιμναίοι), πάχους 200 έως 500 μ. (μέγιστο βάθος πάνω από 150 m για τον ταμιευτήρα σχιστολιθικού αερίου στον ποταμό Horn, πάνω από 400μ για πιο πυκνά τμήματα στην περιοχή της δυτικής Alberta), αν και οι περισσότεροι εκμεταλλεύσιμοι ταμιευτήρες σχιστολιθικού αερίου στις ΗΠΑ είναι πάχους 20 έως 60μ. Το πάχος είναι μια σημαντική πτυχή της ανάπτυξης, καθώς η εκτέλεση διεργασιών με τη μέθοδο της υδραυλικής θραύσης, ώστε να καλύψουν έναν ταμιευτήρα σχιστολιθικού αερίου ύψους άνω των 200μ., είναι δύσκολη.

Οι δεξαμενές σχιστολιθικού αερίου είναι συνήθως σχιστόλιθοι χαλαζία-ιλλίτη που περιέχουν λίγη έως καθόλου διογκωμένη άργιλο και χαμηλό πορώδες (<10%) με μικρό Darcy διαπερατότητα κύριας μάζας. Ο βαθύς ενταφιασμός και η μεγάλη γεωλογική ηλικία σημαίνουν ότι τα αργιλικά ορυκτά σμεκτίτη που πιθανόν βρίσκονται με τα αρχικά ιζήματα, έχουν μεταβληθεί διαγενετικά σε ιλλίτη και καταβυθισμένο χαλαζία. Αυτό σημαίνει ότι η περιεκτικότητα σε πυρίτιο των στρωμάτων σχιστολιθικού αερίου είναι υψηλή (άνω του 40%) και η περιεκτικότητα σε αργιλικά ορυκτά, με κυρίαρχο τον ιλλίτη, είναι χαμηλή (10-40%). Αυτή η μετάβαση θεωρείται ο βασικότερος λόγος που τα στρώματα σχιστολιθικού αερίου μπορούν να διαρρηχθούν φυσικά, διότι η μετάβαση από σμεκτίτη σε ιλλίτη σχετίζεται, όπως προαναφέρθηκε, με μια σημαντική μείωση του όγκου. Να σημειωθεί ότι αν ο σμεκτίτης είναι παρών, ακόμα και σε μικρές ποσότητες, η διόγκωση μπορεί να έχει σημαντικές αρνητικές επιπτώσεις στα αποτελέσματα της υδραυλικής θραύσης, με τη χρήση υδατικών υγρών.

Τα αποθέματα σχιστολιθικού αερίου που είναι εκμεταλλεύσιμα την παρούσα στιγμή, θα μπορούσαν να θεωρηθούν μη τεκτονικά από δομικής πλευράς. Αν και

υπάρχουν τοπικά ρήγματα, σε γενικές γραμμές τα στρώματα είναι σχετικά επίπεδα και όχι πτυχωμένα. Για παράδειγμα, ο σχιστόλιθος Marcellus βρίσκεται κάτω από το μεγαλύτερο μέρος της Απαλάχιας λεκάνης (Roen and Kepferle 1993) στα βορειοδυτικά των Απαλάχιων όρεων και η περιοχή που ενδέχεται να υπάρχουν κοιτάσματα σχιστολιθικού αερίου, εκτείνεται από το μέσον της πολιτείας της Νέας Υόρκης έως το νοτιότερο τμήμα της Δυτικής Βιρτζίνια και από τη διαταραγμένη ζώνη (βορειοδυτική Απαλάχια ζώνη) έως το δυτικό Οχάιο και Μίσιγκαν σε απόσταση 250.000 τετ.χιλ. Είναι παχύτερος στο νοτιοανατολικά ως προς τη ζώνη θραύσης, αλλά καθώς ο σχηματισμός παραμορφώνεται όλο και περισσότερο και τέμνεται από ρήγματα, η περιεκτικότητα σε αέριο είναι μικρότερη. Στα βορειοδυτικά, ο σχιστόλιθος Marcellus τείνει να έχει περισσότερα υγρά και μόρια C_2, με αποτέλεσμα να είναι ένας περισσότερο επιθυμητός στόχος. Πιθανόν τα ¾ του σχιστόλιθου Marcellus να είναι απαραμόρφωτα ή μη ρηγματωμένα, αλλά φυσικά ρωγματωμένα. Παρόμοια συμπεράσματα μπορούν να εξαχθούν και για τον σχιστόλιθο Utica, που βρίσκεται κάτω από τον Marcellus και εκτείνεται μέχρι και τις πεδινές περιοχές του ποταμού St. Lawrence στο Κεμπέκ (Dykstra και Longman 1995). Κατ' επέκταση, παρόμοια θέματα, όπως η παραμόρφωση, η ρηγμάτωση, η αφθονία υγρών και ούτω καθεξής μπορούν να επεκταθούν και σε άλλους ταμιευτήρες σχιστολιθικού αερίου.

3 Η μέθοδος διακριτών στοιχείων και ο κώδικας UDEC

3.1 Το πρόγραμμα UDEC

Για την ανάπτυξη των αριθμητικών πειραμάτων προσομοίωσης της υδραυλικής θραύσης σε μια ρωγματωμένη βραχομάζα, επιλέχθηκε το πρόγραμμα UDEC (Universal Distinct Element Code) της εταιρείας Itasca. Το UDEC αποτελεί ένα αριθμητικό πρόγραμμα, το οποίο αναπτύσσεται σε δύο διαστάσεις, και βασίζεται στην μέθοδο των διακριτών στοιχείων για μοντελοποίηση ασυνεχών μέσων. Η μέθοδος διακριτών στοιχείων που είναι ενσωματωμένη στο UDEC έχει εξελιχθεί για χρονικό διάστημα μεγαλύτερο από 40 χρόνια, ξεκινώντας με την αρχική παρουσίαση από τον Cundall (1971) για την επίλυση προβλημάτων βραχομηχανικής.

Το συγκεκριμένο πρόγραμμα προσομοιώνει την απόκριση ενός ασυνεχούς μέσου (όπως μία ρωγματωμένη βραχομάζα), που υποβάλλεται είτε σε δυναμική είτε σε στατική φόρτιση. Το ασυνεχές μέσο προσομοιώνεται ως ένα σύνολο διακριτών τεμαχίων (blocks). Οι ασυνέχειες αντιμετωπίζονται ως διακριτά όρια αλληλεπίδρασης μεταξύ αυτών των τμημάτων και ταυτόχρονα επιτρέπονται μετατοπίσεις κατά μήκος των ασυνεχειών και κατά την περιστροφή των τεμαχίων. Κάθε τέμαχος δύναται να συμπεριφέρεται ως άκαμπτο υλικό ή ως παραμορφώσιμο υλικό. Για την προσομοίωση της συμπεριφοράς παραμορφώσιμων τεμαχών, αυτά υποδιαιρούνται σε δίκτυο στοιχείων πεπερασμένων διαφορών και το κάθε στοιχείο αποκρίνεται σύμφωνα με την προκαθορισμένη τροπή, η οποία μπορεί να είναι γραμμική ή μη γραμμική. Ακόμη, η σχετική κίνηση των εκατέρωθεν επιφανειών των ασυνεχειών περιγράφεται με γραμμικές ή και μη-γραμμικές σχέσεις δύναμης-μετατόπισης τόσο στην ορθή όσο και στη διατμητική διεύθυνση. Το UDEC διαθέτει εντολή για την αυτόματη δημιουργία ζωνών (στοιχείων πεπερασμένων διαφορών) για τη διακριτοποίηση των παραμορφώσιμων τεμαχών.

Η γλώσσα προγραμματισμού που περιέχεται στο UDEC, ονομάζεται FISH (συντομογραφία του FlakISH, διότι η γλώσσα αρχικά είχε σχεδιαστεί για το πρόγραμμα FLAC). Η συγκεκριμένη γλώσσα δημιουργήθηκε για να εξυπηρετήσει τις απαιτήσεις των χρηστών του UDEC, προκειμένου να εισάγουν μεταβλητές και συναρτήσεις στο πρόγραμμα.

Στην παρούσα εργασία η προσομοίωση της γεωμηχανικής συμπεριφοράς του ρωγματωμένου πετρώματος έγινε στα πλαίσια στατικής ανάλυσης. Η στατική επίλυση στο UDEC επιτυγχάνεται με την εισαγωγή συντελεστών απόσβεσης στις εξισώσεις της κίνησης, έτσι ώστε ο ρυθμός μεταβολής της κινητικής ενέργειας του μοντέλου να τείνει σε μία αμελητέα τιμή. Έτσι, στο στάδιο της στατικής επίλυσης, το μοντέλο θα βρίσκεται είτε σε κατάσταση ισορροπίας δυνάμεων είτε σε κατάσταση σταθερής κίνησης.

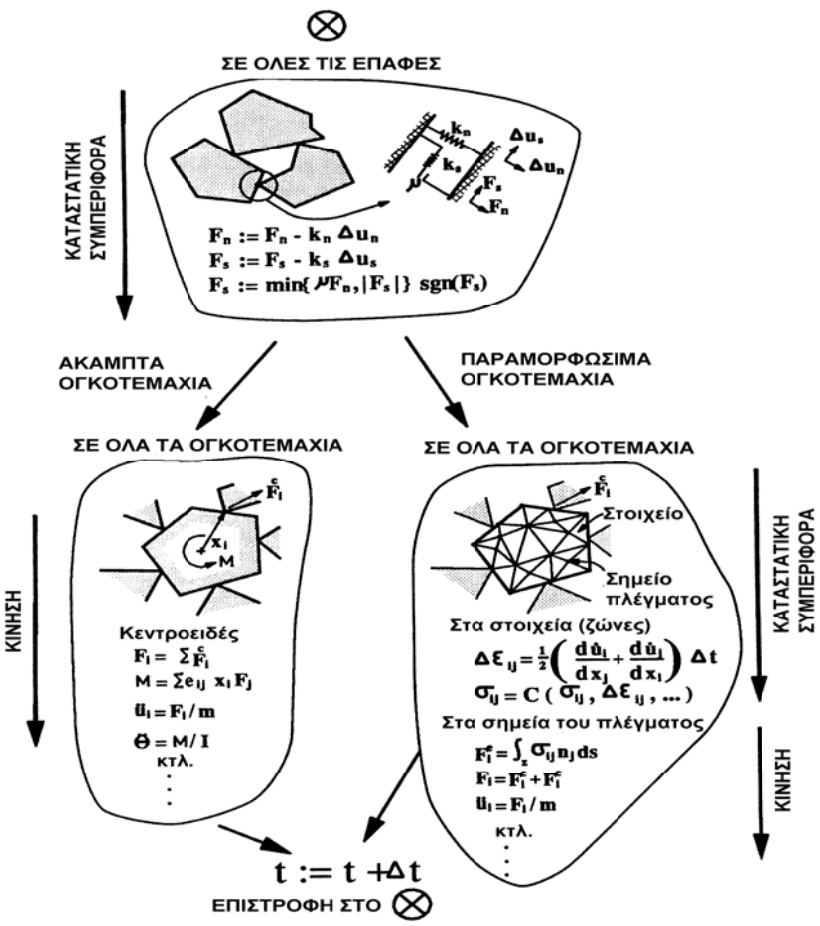
3.2 Η μέθοδος διακριτών στοιχείων

Στη μέθοδο διακριτών στοιχείων, η μάζα του πετρώματος αναπαρίσταται από ένα σύστημα διακριτών ογκοτεμαχίων που χωρίζονται μεταξύ τους από ασυνέχειες. Οι ασυνέχειες θεωρούνται ως διεπιφάνειες μεταξύ των ογκοτεμαχίων, δηλ. η ασυνέχεια θεωρείται ως σύνορο του ογκοτεμαχίου, στο οποίο αντιστοιχεί μία συνοριακή εντατική συνθήκη. Οι δυνάμεις και οι μετατοπίσεις στις διεπιφάνειες αυτές βρίσκονται μέσω μίας σειράς υπολογισμών, που αποτυπώνουν τις διαδοχικές κινήσεις των ογκοτεμαχίων. Οι μετακινήσεις είναι αποτέλεσμα της διάδοσης δια μέσου του συστήματος διαταραχών εξαιτίας των εφαρμοζόμενων συνοριακών φορτίων ή των μαζικών δυνάμεων (π.χ. η δύναμη της βαρύτητας). Με τον τρόπο αυτό συντελείται μία δυναμική διαδικασία στην οποία η ταχύτητα διαδόσεως της διαταραχής εξαρτάται από τις φυσικές ιδιότητες του διακριτού συστήματος.

Η δυναμική αυτή συμπεριφορά αναπαρίσταται αριθμητικά από ένα χρονοβηματικό αλγόριθμο (οι υπολογισμοί εξελίσσονται συναρτήσει του χρόνου), στον οποίο το μέγεθος του χρονικού βήματος περιορίζεται από την παραδοχή ότι οι ταχύτητες και οι επιταχύνσεις παραμένουν σταθερές κατά τη διάρκεια του κάθε χρονικού βήματος. Η μέθοδος διακριτών στοιχείων βασίζεται στην θεώρηση ότι το χρονικό βήμα είναι αρκετά μικρό, έτσι ώστε κατά τη διάρκεια ενός βήματος, οι διαταραχές να μην μπορούν να διαδοθούν μεταξύ ενός διακριτού στοιχείου και των γειτονικών του. Το σχήμα επίλυσης είναι παρόμοιο με αυτό που χρησιμοποιείται από την μέθοδο πεπερασμένων διαφορών για ανάλυση συνεχών μέσων. Ο περιορισμός του χρονικού βήματος ισχύει τόσο για τα ογκοτεμάχια όσο και για τις διεπιφάνειες μεταξύ αυτών.

Το μέγεθος του χρονικού βήματος καθορίζεται είτε από τη μάζα των ογκοτεμαχίων και την ακαμψία των διεπιφανειών, όταν πρόκειται για άκαμπτα ογκοτεμάχια, είτε από το μέγεθος και τις ελαστικές σταθερές των τριγωνικών ζωνών σταθερής παραμόρφωσης και την ακαμψία των διεπιφανειών, προκειμένου για παραμορφώσιμα ογκοτεμάχια.

Οι υπολογισμοί που πραγματοποιούνται στη μέθοδο διακριτών στοιχείων εναλλάσσονται μεταξύ της εφαρμογής ενός νόμου δύναμης-παραμόρφωσης σε όλες τις επαφές μεταξύ των ογκοτεμαχίων και του δεύτερου νόμου του Νεύτωνα σε όλα τα ογκοτεμάχια. Ο νόμος δύναμης-παραμόρφωσης χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των δυνάμεων στις επαφές έχοντας σαν γνωστές (και σταθερές) τις μετακινήσεις. Ο δεύτερος νόμος του Νεύτωνα δίνει την κίνηση των ογκοτεμαχίων που προκύπτει από τη δράση των δυνάμεων που επιδρούν σε αυτά. Εάν τα ογκοτεμάχια είναι παραμορφώσιμα η κίνηση υπολογίζεται στα σημεία των τριγωνικών ζωνών σταθερής παραμόρφωσης του εσωτερικού πλέγματος των ογκοτεμαχίων. Η εφαρμογή του καταστατικού νόμου του υλικού των ογκοτεμαχίων δίνει τις τάσεις που ασκούνται στα σημεία του εσωτερικού του ογκοτεμαχίου. Στο σχήμα 3.1 δείχνεται σχηματικά ο κύκλος υπολογισμού της μεθόδου διακριτών στοιχείων.



Σχήμα 3.1 Σειρά υπολογισμών στη μέθοδο των διακριτών στοιχείων.

3.2.1 Εξισώσεις κίνησης

Η κίνηση ενός μεμονωμένου ογκοτεμαχίου καθορίζεται από το μέγεθος και τη διεύθυνση της συνισταμένης δύναμης και ροπής που ασκούνται σ' αυτό. Οι εξισώσεις που περιγράφουν την μεταφορική και περιστροφική κίνηση ενός ογκοτεμαχίου δίνονται παρακάτω.

Ας θεωρήσουμε τη μονοδιάστατη κίνηση σώματος μάζας *m* υπό την επίδραση μίας χρονικά μεταβαλλόμενης δύναμης *F=F(t)*. Σύμφωνα με το 2° νόμο του Νεύτωνα έχουμε:

$$\frac{d\dot{u}}{dt} = \frac{F}{m} \tag{3.1}$$

όπου $\dot{u}$ = η ταχύτητα του σώματος,

t = ο χρόνος, και

m = η μάζα του σώματος.

Το κεντρικό διαφορικό σχήμα για το αριστερό μέλος της εξ. (3.1) σε χρόνο t γράφεται ως εξής:

$$\frac{d\dot{u}}{dt} = \frac{\dot{u}(t + \Delta t/2) - \dot{u}(t - \Delta t/2)}{\Delta t} \tag{3.2}$$

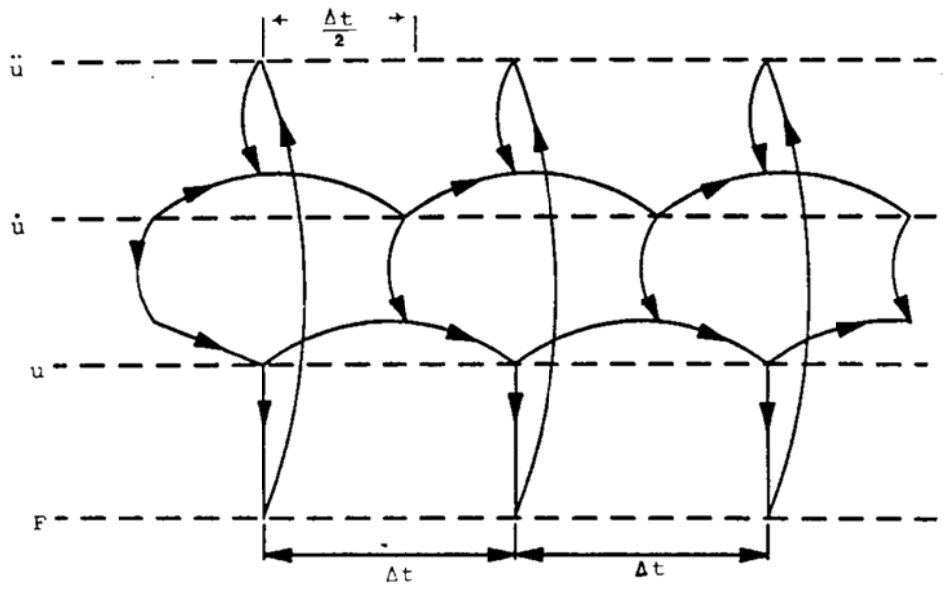
Αντικαθιστώντας την εξ. (3.2) στην (3.1) προκύπτει ύστερα από πράξεις:

$$\dot{u}(t + \Delta t/2) = \dot{u}(t - \Delta t/2) + \frac{F(t)}{m}\Delta t \tag{3.3}$$

Εφόσον οι ταχύτητες αποθηκεύονται κάθε μισό χρονικό βήμα, είναι δυνατόν να εκφράσουμε τις μετακινήσεις ως εξής:

$$u(t + \Delta t) = u(t) + \dot{u}(t + \Delta t/2)\Delta t \tag{3.4}$$

Επειδή οι δυνάμεις εξαρτώνται από τις μετατοπίσεις, οι υπολογισμοί δυνάμεων/μετατοπίσεων πραγματοποιούνται στιγμιαία σε κάποιο χρόνο. Το Σχήμα 3.2 δείχνει το χρησιμοποιούμενο από τη μέθοδο κεντρικό διαφορικό σχήμα, στο οποίο η σειρά των υπολογισμών δείχνεται με τα βέλη. Το σχήμα αυτό είναι ακρίβειας δευτέρας τάξεως (σφάλματα πρώτης τάξεως δεν υφίστανται).



Σχήμα 3.2 Κεντρικό διαφορικό σχήμα που χρησιμοποιείται στη μέθοδο των διακριτών στοιχείων.

Για ογκοτεμάχια δύο διαστάσεων, στα οποία δρουν αρκετές δυνάμεις καθώς επίσης και η δύναμη της βαρύτητας, οι εξισώσεις της κίνησης γράφονται:

$$\dot{u}_i(t+\Delta t/2) = \dot{u}_i(t-\Delta t/2) + \left(\frac{\sum F_i(t)}{m} + g_i\right)\Delta t\,, \qquad \text{i =1, 2}$$

(3.5)

$$\dot{\theta}(t+\Delta t/2) = \dot{\theta}(t-\Delta t/2) + \left(\frac{\sum M(t)}{I}\right)\Delta t\,, \qquad \text{i =1, 2}$$

όπου $\dot{\theta}$ = γωνιακή ταχύτητα του ογκοτεμαχίου περί το κεντροειδές

I = ροπή αδρανείας του ογκοτεμαχίου,

$\sum M$ = συνολική ροπή που ασκείται στο ογκοτεμάχιο

$\dot{u}_i$ = συνιστώσες της ταχύτητας του ογκοτεμαχίου

g_i = συνιστώσες της επιτάχυνσης της βαρύτητας

Στην εξ. (Α-5) και σε αυτές που ακολουθούν, ο δείκτης *i* σημαίνει συνιστώσες ενός Καρτεσιανού συστήματος συντεταγμένων, και επαναλαμβανόμενοι δείκτες σε μία έκφραση δηλώνουν την πράξη της πρόσθεσης.

Οι ταχύτητες που προκύπτουν από την εξ. (Α-5) χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της νέας θέσης του ογκοτεμαχίου με βάση τις σχέσεις:

$$x_i(t+\Delta t) = x_i(t) + \dot{u}_i(t+\Delta t/2)\cdot\Delta t$$

$$\theta(t+\Delta t) = \theta(t) + \dot{\theta}(t+\Delta t/2)\cdot\Delta t \tag{3.6}$$

όπου θ = στροφή του ογκοτεμαχίου περί το κεντροειδές

x_i = συντεταγμένες του κεντροειδούς του ογκοτεμαχίου.

Σημειώνεται ότι οι περιστροφές των ογκοτεμαχίων δεν αποθηκεύονται από τον αλγόριθμο. Οι απειροστά αυξανόμενες περιστροφές χρησιμοποιούνται για την ανανέωση της θέσεως των κορυφών του ογκοτεμαχίου.

Συμπερασματικά, κάθε χρονικό βήμα παράγει νέες θέσεις των ογκοτεμαχίων, οι οποίες δημιουργούν νέες δυνάμεις στις επαφές. Οι συνισταμένες ροπές και δυνάμεις χρησιμοποιούνται για των υπολογισμό των γραμμικών και γωνιακών επιταχύνσεων κάθε ογκοτεμαχίου. Οι ταχύτητες και οι μετακινήσεις του ογκοτεμαχίου υπολογίζονται με ολοκλήρωση για απειροστά αυξανόμενο χρόνο. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρις ότου μία ικανοποιητική κατάσταση ισορροπίας ή συνεχούς αστοχίας προσεγγιστεί.

3.2.2 Διατήρηση της ορμής και της ενέργειας στην μαθηματική διατύπωση της μεθόδου των διακριτών στοιχείων

Πολλοί κώδικες ηλεκτρονικού υπολογιστή για την ανάλυση συνεχών μέσων, ξεκινάνε από τη διατύπωση των νόμων διατήρησης της ορμής και της ενέργειας και καταλήγουν στις απαιτούμενες εξισώσεις για τη διαμόρφωση των αριθμητικών αλγορίθμων. Με τον τρόπο αυτό παρουσιάζεται η ιδιότητα τους να ικανοποιούν τις εξισώσεις διατήρησης της ορμής και της ενέργειας στην δυναμική τους προσομοίωση.

Η μέθοδος διακριτών στοιχείων επίσης ικανοποιεί τις εξισώσεις διατήρησης της ορμής και της ενέργειας. Για την απόδειξη του παραπάνω χρησιμοποιείται ως αφετηρία η διατύπωση των νόμων του Νεύτωνα.

Αρχή διατήρησης ορμής: Ας θεωρήσουμε δύο σώματα (a και b) που βρίσκονται σε επαφή για κάποιο χρονικό διάστημα T. Σύμφωνα με τον 3° νόμο του Νεύτωνα, στα σώματα ασκείται δύναμη F, ίσου μέτρου και αντίθετης φοράς, υπό την επίδραση της οποίας τα δύο σώματα επιταχύνονται με σταθερή επιτάχυνση σύμφωνα με τις σχέσεις:

$$m_a \cdot \dot{u}_a = F \tag{3.7}$$

$$m_b \cdot \dot{u}_b = -F \tag{3.8}$$

Συνδυάζοντας τις παραπάνω και ολοκληρώνοντας προκύπτει:

$$\int_0^T m_a \cdot \ddot{u}_a \, dt = -\int_0^T m_b \cdot \ddot{u}_b \, dt \tag{3.9}$$

$$m_a \cdot \left[\dot{u}_a(T) - \dot{u}_a(0)\right] = -m_b \cdot \left[\dot{u}_b(T) - \dot{u}_b(0)\right] \tag{3.10}$$

$$m_a \cdot \dot{u}_a(T) + m_b \cdot \dot{u}_b(T) = m_a \cdot \dot{u}_a(0) + m_b \cdot \dot{u}_b(0) \tag{3.11}$$

,

Η εξ. (3.11) δείχνει ότι η συνολική ορμή στο τέλος μίας τυχαίας χρονικής περιόδου είναι η ίδια με αυτή στην αρχή της περιόδου.

Αρχή διατήρησης ενέργειας: Έστω ένα σώμα μάζας m με αρχική ταχύτητα u_o και τελική ταχύτητα u που διανύει απόσταση S υπό την επίδραση της δύναμης F. Έχουμε:

$$m \cdot \dot{u} = F \tag{3.12}$$

Χρησιμοποιώντας τη σχέση $\dot{u} = u \cdot du / ds$,

$$m\int_{u_o}^{u} u du = \int_0^S F ds, \tag{3.13}$$

όπου η μάζα θεωρείται σταθερή. Προκύπτει έτσι:

$$\frac{1}{2} m(u^2 - u_o^2) = FS, \tag{3.14}$$

Από την εξ. (3.14) συμπεραίνεται ότι το έργο που παράγεται από τη δύναμη F ισούται με τη μεταβολή της κινητικής ενέργειας του σώματος.

Εάν η δύναμη που αντιτίθεται στην κίνηση σχετίζεται με τη μετακίνηση σύμφωνα με τη σχέση $F=-k.s$, όπου το k εκφράζει τη ελαστική σταθερά του συστήματος, τότε η εξ. (A-13) γίνεται

$$m\int_{u_o}^{u} u du = -\int_0^S ks ds, \tag{3.15}$$

Επομένως,

$$\frac{1}{2} m(u^2 - u_o^2) = \frac{1}{2} ks^2, \tag{3.16}$$

Στην περίπτωση αυτή, η μείωση της κινητικής ενέργειας ισούται με την ενέργεια που αποθηκεύεται στο σύστημα . Το ίδιο επιχείρημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί αντίστροφα για να δείξει ότι η κινητική ενέργεια που απορροφάται από ένα σώμα ισούται με τη μείωση της ενέργειας που βρίσκεται αποθηκευμένη στο σύστημα. Έτσι η κινητική ενέργεια ενός σώματος ύστερα από μία ελαστική κρούση ισούται με την κινητική ενέργεια μετά την κρούση.

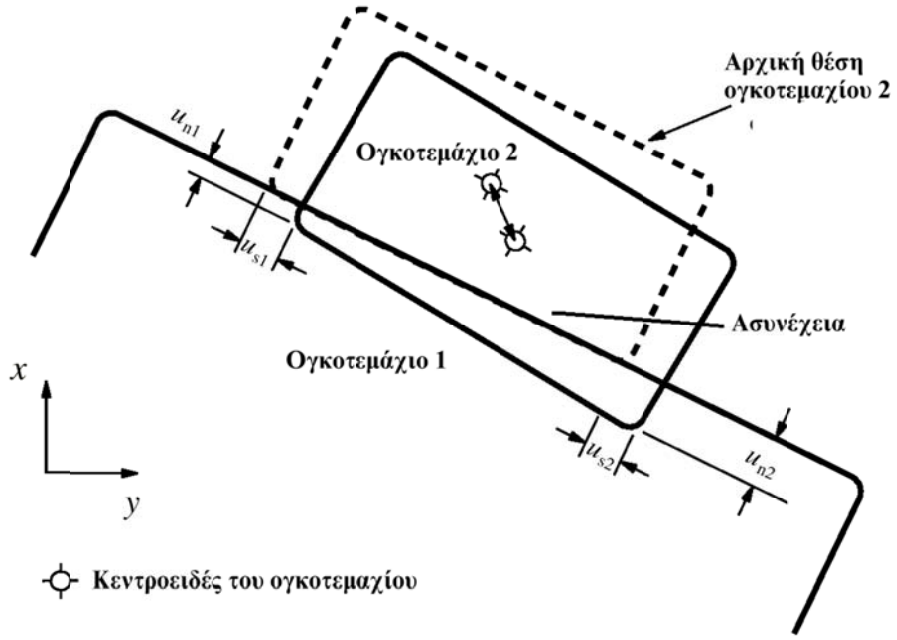
3.2.3 Αναπαράσταση των ασυνεχειών στον κώδικα UDEC

3.2.3.1 Αναγνώριση και ταυτοποίηση επαφών

Μία ασυνέχεια πετρώματος αναπαρίσταται αριθμητικά σαν μία επιφάνεια επαφής, που σχηματίζεται μεταξύ των πλευρών δύο ογκοτεμαχίων και που

αποτελείται από μεμονωμένα σημεία επαφής. Έτσι για κάθε ζεύγος ογκοτεμαχίων που βρίσκονται σε επαφή (ή διαχωρίζονται από ένα μικρό κενό στην περίπτωση ανοικτών ασυνεχειών), δημιουργούνται στοιχεία δεδομένων για την αναπαράσταση των σημείων επαφής.

Στο UDEC τα γειτονικά ογκοτεμάχια μπορούν να εφάπτονται είτε κατά το τμήμα μίας κοινής πλευράς τους είτε σε μεμονωμένα σημεία εκεί όπου μία γωνία συναντάει μία πλευρά ή μία άλλη γωνία. Όταν τα ογκοτεμάχια είναι άκαμπτα οι αριθμητικές επαφές δημιουργούνται στα σημεία που μία γωνία αλληλεπιδρά με μία άλλη γωνία ή με μία πλευρά ενός γειτονικού ογκοτεμαχίου, όπως δείχνει το Σχ. 3.3. Εάν τα ογκοτεμάχια είναι παραμορφώσιμα, οι σημειακές επαφές δημιουργούνται σε όλα τα σημεία του πλέγματος που βρίσκονται στις πλευρές του ογκοτεμαχίου σε επαφή. Έτσι ο αριθμός των σημείων επαφής αυξάνεται συναρτήσει της διαμέρισης του εσωτερικού του ογκοτεμαχίου σε τριγωνικές ζώνες.



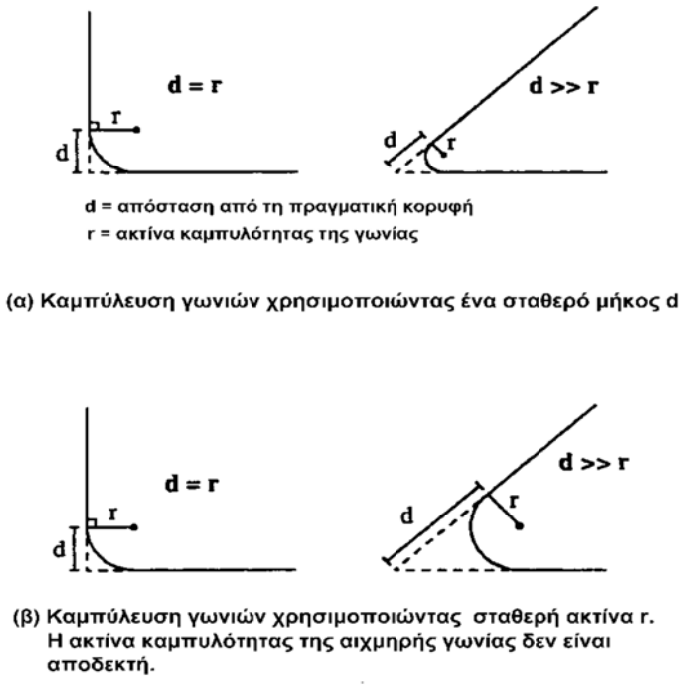
Σχήμα 3.3 Αναπαράσταση επαφών μεταξύ δύο άκαμπτων ογκοτεμαχίων.

Ένα πρόβλημα που προκύπτει με τον παραπάνω τρόπο αναπαράστασης των επαφών σχετίζεται με την περίπτωση που δύο ογκοτεμάχια βρίσκονται σε επαφή δια μέσω δύο γωνιών τους. Εάν οι γωνίες θεωρηθούν απολύτως αιχμηρές ή με άπειρη αντοχή (όπως στην περίπτωση άκαμπτων ογκοτεμαχίων) τότε κατά την αριθμητική προσομοίωση είναι δυνατόν τα ογκοτεμάχια να μπλοκαριστούν ή να χάσουν την ελευθερία κινήσεως τους. Στην πραγματικότητα όμως, όταν η παραπάνω περίπτωση

εμφανίζεται σε ένα σύστημα ογκοτεμαχίων στη φύση, θα συμβεί θραύση των γωνιών λόγω της συγκέντρωσης υψηλών τάσεως στα σημεία αιχμής.

Η ακριβής προσομοίωση αυτού του φαινομένου είναι πρακτικά αδύνατη. Αντιμετωπίζεται όμως, όσο το δυνατόν πιο ρεαλιστικά, εάν οι γωνίες των ογκοτεμαχίων στρογγυλευθούν κατάλληλα έτσι ώστε τα ογκοτεμάχια να μπορούν να κινηθούν ομαλά όταν δύο απέναντι γωνίες έλθουν σε επαφή.

Η στρογγύλευση των γωνιών των ογκοτεμαχίων πραγματοποιείται με ένα κυκλικό τόξο που ορίζεται με την απόσταση *d* της αρχής του κυκλικού τόξου από την πραγματική κορυφή, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.4. Καθορίζοντας μία σταθερή απόσταση *d* για όλα τα ογκοτεμάχια (η οποία ονομάζεται "μήκος στρογγύλευσης") αποφεύγεται η περίπτωση της υπερβολικής στρογγύλλευσης πολύ οξείων γωνιών (Σχ. Α.4α), όπως θα συνέβαινε εάν αντί για την απόσταση d καθοριζόταν μία κοινή κυκλική ακτίνα για όλα τα ογκοτεμάχια (Σχήμα 3.4 β).

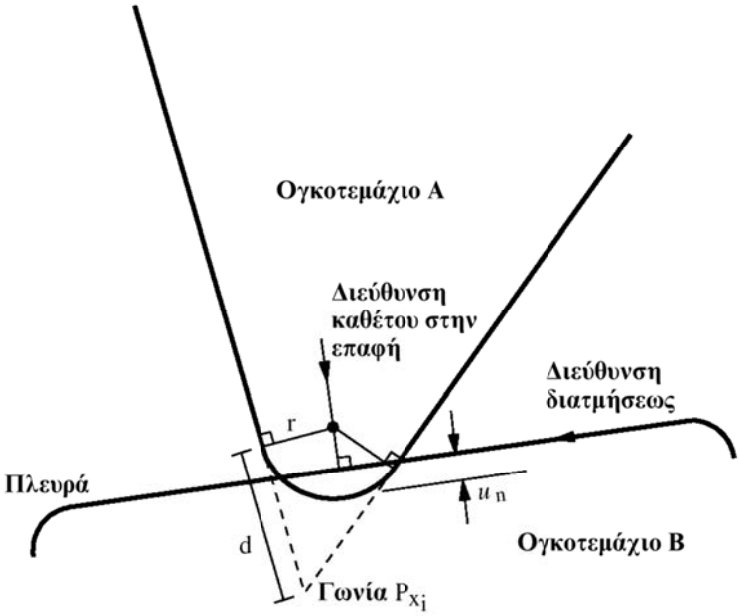


Σχήμα 3.4 Στρογγύλευση γωνιών στον κώδικα UDEC.

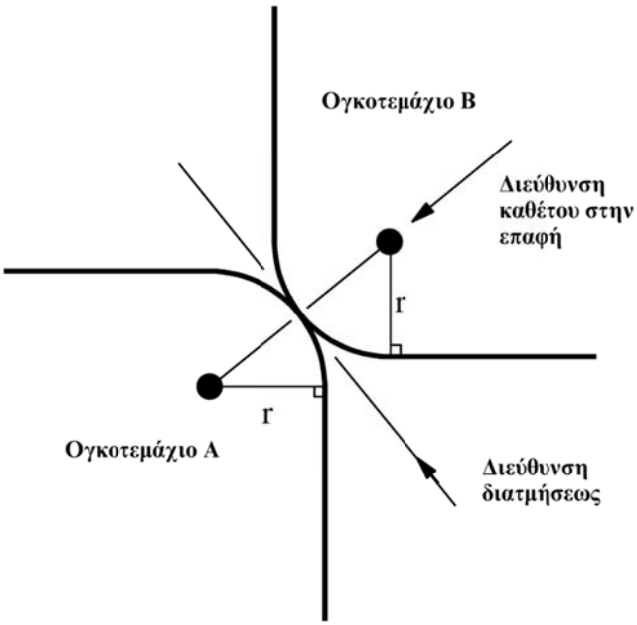
Στην περίπτωση επαφής τύπου γωνίας με πλευρά, το σημείο επαφής τοποθετείται στην τομή της πλευράς με την κάθετη από το κέντρο καμπυλότητας της γωνίας προς την πλευρά (Σχήμα 3.5α). Αντίστοιχα για επαφή τύπου γωνίας με γωνία, το σημείο επαφής τοποθετείται στην τομή της ευθείας που ενώνει τα δύο απέναντι κέντρα καμπυλότητας των κυκλικών τόξων με τα κυκλικά τόξα (Σχ. 3.5β). Όπως

φαίνεται από το Σχ. 3.5, οι διευθύνσεις της κάθετης και διατμητικής δύναμης που δρουν σε μία επαφή καθορίζονται σε σχέση με τη διεύθυνση της καθέτου στην επαφή.

Σε παραμορφώσιμα ογκοτεμάχια που εφάπτονται κατά μήκος μίας πλευράς τους τα σημεία επαφής τοποθετούνται στην τομή της καθέτου από κάθε πλεγματικό σημείο προς την πλευρά του γειτονικού ογκοτεμαχίου. Εάν τα πλεγματικά σημεία των γειτονικών ογκοτεμαχίων ταυτίζονται (από άποψη συντεταγμένων) δημιουργούνται ξεχωριστές επαφές για κάθε πλεγματικό σημείο. Η αντιμετώπιση αυτή είναι χρήσιμη γιατί παρέχει τη δυνατότητα καλύτερης αναπαράστασης μίας πιθανής ολίσθησης μεταξύ των δύο ογκοτεμαχίων.



(α). Λεπτομέρεια στρογγύλευσης επαφής τύπου γωνίας με πλευρά.

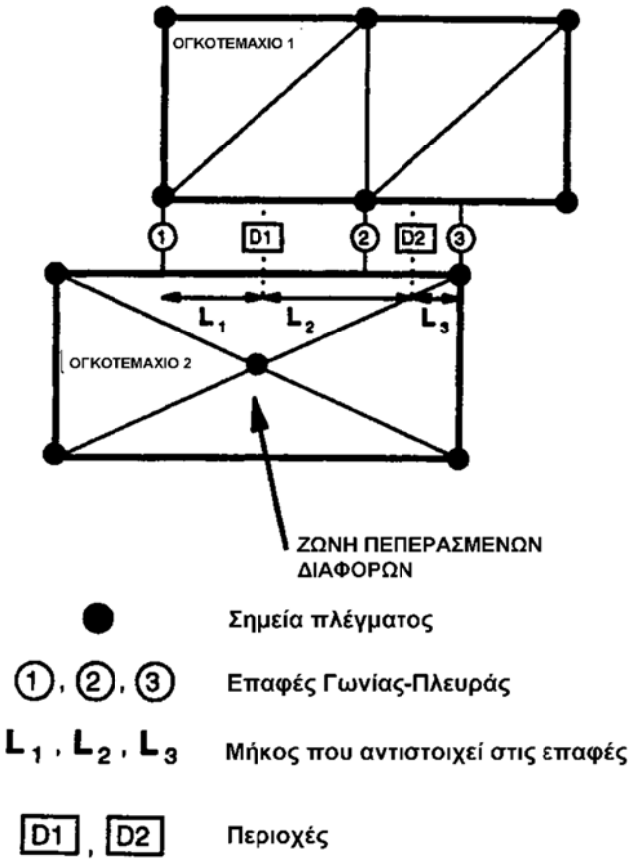


(β). Λεπτομέρεια στρογγύλευσης επαφής τύπου πλευράς με πλευρά.

Σχήμα 3.5 Τοποθέτηση σημείων επαφής για επαφή τύπου γωνίας με πλευρά (α) και γωνίας με γωνία (β) και ορισμός των διευθύνσεων στις επαφές των ογκοτεμαχίων.

Η στρογγύλευση των γωνιών επηρεάζει μόνο την θέση των σημείου επαφής, όπως περιγράφηκε παραπάνω. Όλοι οι υπόλοιποι υπολογισμοί που σχετίζονται με τις συντεταγμένες των κορυφών των ογκοτεμαχίων πραγματοποιούνται με τις πραγματικές τους συντεταγμένες. Το μέγεθος του μήκους στρογγύλευσης επηρεάζει τα αποτελέσματα της προσομοίωσης και συνεπώς για την αποφυγή σφαλμάτων κατά την επίλυση, πρέπει να διατηρείται στο 1% περίπου του μήκους πλευράς ενός τυπικού ογκοτεμαχίου στο μοντέλο.

Οι συντεταγμένες των σημείων επαφής ανανεώνονται αυτόματα από τον αλγόριθμο καθώς πραγματοποιείται η κίνηση των ογκοτεμαχίων. Έτσι στην περίπτωση δυναμικών αναλύσεων, όπου οι πραγματοποιούμενες μετακινήσεις είναι μεγάλες, μπορεί να απαιτείται η διαγραφή και η προσθήκη εκατοντάδων επαφών κατά τη διάρκεια της δυναμικής προσομοίωσης. Το UDEC δημιουργεί αυτόματα ένα δίκτυο περιοχών (domains) που αντιπροσωπεύουν μία γειτονιά ογκοτεμαχίων. Σαν περιοχές λαμβάνονται οι χώροι μεταξύ των ογκοτεμαχίων που ορίζονται από τα σημεία επαφής όπως τα σημεία D1 και D2 του Σχ. 3.6.



Σχήμα 3.6 Σημεία επαφής και περιοχές μεταξύ παραμορφώσιμων ογκοτεμαχίων.

Κατά τη διάρκεια ενός χρονικού βήματος νέα σημεία επαφής μπορεί να δημιουργηθούν μόνο σε πλευρές και γωνίες που ανήκουν στην ίδια περιοχή. Με τον τρόπο αυτό η ανανέωση των επαφών συντελείται τοπικά σε κάθε περιοχή του δικτύου. Το μειονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι η δυσκολία που αντιμετωπίζει στην ανανέωση σημείων επαφής χαλαρών συμπλεγμάτων ογκοτεμαχίων, επειδή στην περίπτωση αυτή οι περιοχές δεν είναι δυνατόν να ορισθούν σωστά.

3.2.3.2 Μηχανική συμπεριφορά των ασυνεχειών

Η αριθμητική αναπαράσταση του συστήματος των ογκοτεμαχίων και των ασυνεχειών πραγματοποιείται, όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, θεωρώντας δύο τύπους επαφών: επαφή γωνίας με γωνία και επαφή γωνίας με πλευρά, οι οποίες καλούνται "αριθμητικές επαφές".

Στην πραγματικότητα, δύο ογκοτεμάχια μπορεί να εφάπτονται σε όλο το μήκος μίας πλευράς τους. Για την αναπαράσταση αυτής της Μία τέτοια επαφή πλευράς με πλευρά αντιστοιχεί σε μία περιοχή με δύο "αριθμητικές επαφές" (σημεία επαφής). Η ασυνέχεια θεωρείται ότι εκτείνεται μεταξύ των δύο σημείων επαφής. Το μήκος του τμήματος μεταξύ αυτών των σημείων χωρίζεται στη μέση και σε κάθε σημείο επαφής αντιστοιχίζεται το μισό αυτού. Οι κάθετες και διατμητικές τάσεις στις επαφές υπολογίζονται χρησιμοποιώντας τα εκατέρωθεν μήκη που αντιστοιχίζονται στα σημεία επαφής. Οι απειροστά αυξανόμενες κάθετες και διατμητικές μετακινήσεις υπολογίζονται για κάθε σημείο επαφής και το αντίστοιχο μήκος του (L_1, L_2 και L_3 του Σχ. 3.6).

Για την προσομοίωση της μηχανικής συμπεριφοράς των ασυνεχειών χρησιμοποιείται το ακόλουθο καταστατικό μοντέλο:

Η μετακίνηση σε διεύθυνση κάθετη προς το επίπεδο της ασυνέχεια συσχετίζεται με την εφαρμοζόμενη τάση με μία γραμμική σχέση της μορφής:

$$\Delta\sigma_n = -k_n \Delta u_n \,, \tag{3.17}$$

Όπου $\Delta\sigma_n$ = η απειροστή αύξηση της τάσεως κατά την κάθετη διεύθυνση

Δu_n = η αντίστοιχη αύξηση της κάθετης μετατοπίσεως

k_n = η κάθετη ακαμψία του επιπέδου της ασυνέχειας

Εάν η κάθετη τάση που ασκείται στο επίπεδο της ασυνέχειας υπερβεί την αντοχή της σε εφελκυσμό (T), δηλ. εάν $\sigma_n < -T$, τότε η κάθετη τάση τίθεται ίση με μηδέν ($\sigma_n = 0$).

Ομοίως η απειροστή αύξηση της τάσεως κατά την παράλληλη προς την ασυνέχεια διεύθυνση είναι ανάλογη της ελαστικής συνιστώσας της διατμητικής μετατόπισης, σύμφωνα με τη σχέση:

$$\Delta\tau_s = k_s \Delta u_s^e \,, \tag{3.18}$$

Όπου $\Delta\tau_s$ = η απειροστή αύξηση της τάσεως κατά την παράλληλη διεύθυνση

Δu_s^e = η ελαστική συνιστώσα της απειροστής αύξησης της διατμητικής μετατόπισης

k_s = η διατμητική ακαμψία του επιπέδου της ασυνέχειας

Η διατμητική αντοχή του επιπέδου της ασυνέχειας καθορίζεται σύμφωνα με τον νόμο του Coulomb από τη σχέση:

$$\tau_{\max} = C + \sigma_n \tan\phi \tag{3.19}$$

όπου $\tau_{\max}$ η διατμητική αντοχή, C η συνοχή του επιπέδου της ασυνέχειας και ϕ η γωνία τριβής. Εάν η διατμητική δύναμη που ασκείται στο επίπεδο της ασυνέχειας είναι μικρότερη της διατμητικής της αντοχής, δηλ. $|\tau_s| \le \tau_{\max}$, τότε η απειροστή αύξηση της δύναμης διατμήσεως δίνεται από την εξίσωση (18). Διαφορετικά, εάν $|\tau_s| \ge \tau_{\max}$ τότε αυτή παραμένει σταθερή και ίση με τη διατμητική αντοχή, ενώ το πρόσημό της καθορίζεται από τη σχέση:

$$\tau_s = sign(\Delta u_s)\tau_{\max}\,, \tag{3.20}$$

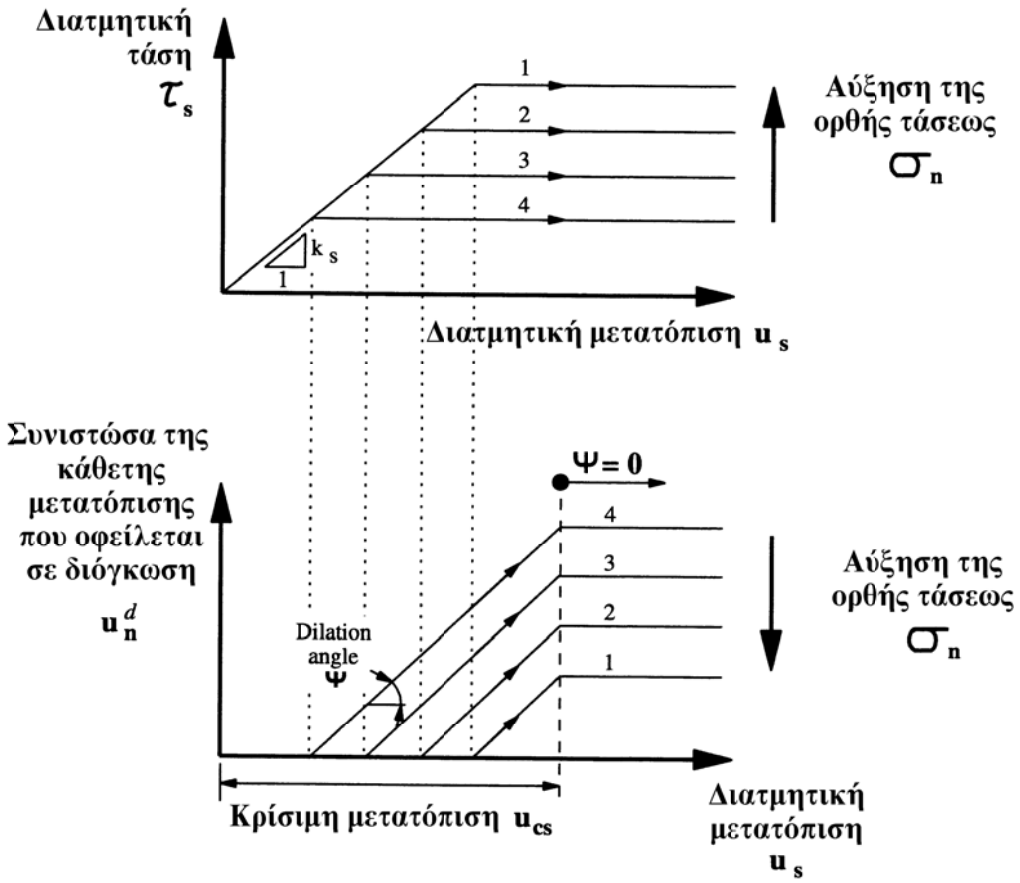
Το παραπάνω μοντέλο μηχανικής συμπεριφοράς των ασυνεχειών είναι γνωστό το μοντέλο ολίσθησης του Coulomb, και δίνεται σχηματικά στο σχήμα 3.7.

Προκειμένου για ασυνέχειες με τραχεία επιφάνεια, η οποία θα περιέχει μικρές ή μεγάλες οδοντώσεις, σε χαμηλές τιμές της ορθής τάσεως παρατηρείται διόγκωση της ασυνέχειας, καθώς τα ογκοτεμάχια του πετρώματος εκατέρωθεν της ασυνέχειας τείνουν να ολισθήσουν και η ολίσθηση τους εμποδίζεται από τις οδοντώσεις. Η διόγκωση καθορίζεται στο κριτήριο του Coulomb από τη γωνία ψ (γωνία διόγκωσης ή γωνία διαστολή ή γωνία τραχύτητας). Όσο αυξάνεται η κάθετη τάση που ασκείται στην ασυνέχεια η διόγκωση περιορίζεται λόγω της θραύσης των οδοντώσεων. Το ίδιο συμβαίνει και με την αύξηση της διατμητικής μετατόπισης, η οποία όταν υπερβεί μία κρίσιμη τιμή u_{cs} θεωρείται ότι οι οδοντώσεις δεν παίζουν πλέον κανένα ρόλο.

Η παραπάνω συμπεριφορά περιγράφεται στο UDEC, από τις σχέσεις:

α) εάν $|\tau_s| \le \tau_{\max}$, τότε $\psi = 0$

β) εάν $|\tau_s| = \tau_{\max}$ και $|u_s| \ge u_{\max}$, τότε επίσης $\psi = 0$



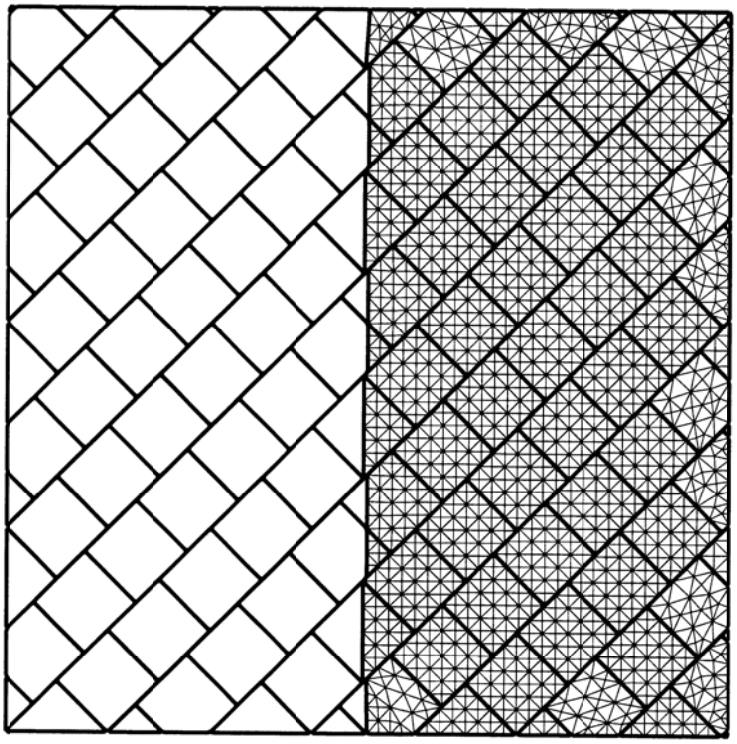
Σχήμα 3.7 Μοντέλο διατμητικής ολίσθησης των ασυνεχειών στο UDEC.

3.2.3.3 Παραμορφωσιμότητα των ογκοτεμαχίων

Στη μέθοδο διακριτών στοιχείων τα ογκοτεμάχια του πετρώματος μπορεί να είναι άκαμπτα ή παραμορφώσιμα. Στην πρώτη περίπτωση η βραχόμαζα περιγράφεται σαν ένα σύστημα άρρηκτων ογκοτεμαχίων το γεωμετρικό σχήμα των οποίων παραμένει αμετάβλητο. Άκαμπτα ογκοτεμάχια μπορούν να χρησιμοποιηθούν όταν η μηχανική συμπεριφορά της βραχόμαζας καθορίζεται κυρίως από τη μηχανική συμπεριφορά των ασυνεχειών της, όπως στην περίπτωση ογκοτεμαχισμένης

βραχόμαζας σε χαμηλό εντατικό πεδίο ή όταν τα άρρηκτα ογκοτεμάχια του πετρώματος έχουν μεγάλη αντοχή και μικρή παραμορφωσιμότητα.

Όταν η παραμορφωσιμότητα των ογκοτεμαχίων του πετρώματος δεν μπορεί να αγνοηθεί τότε πρέπει αυτά να θεωρηθούν ως παραμορφώσιμα. Στην περίπτωση αυτή το εσωτερικό των ογκοτεμαχίων διαιρείται (διακριτοποιείται) σε τριγωνικές ζώνες πεπερασμένων διαφορών. Στο Σχ. 3.8 δίνεται για σύγκριση η εικόνα μίας βραχόμαζας με άκαμπτα ογκοτεμάχια (αριστερά) και μίας με παραμορφώσιμα (δεξιά).



(a) Ακαμπτα ογκοτεμάχια (b) Παραμορφώσιμα ογκοτεμάχια

Σχήμα 3.8 Εικόνα Βραχόμαζας με άκαμπτα ογκοτεμάχια (α) και με παραμορφώσιμα (β).

Οι κορυφές των τριγωνικών στοιχείων αποτελούν τα σημεία του πλέγματος (ή καννάβου) του εσωτερικού των ογκοτεμαχίων, τα οποία ονομάζονται πλεγματικά σημεία ή κομβικά σημεία ή κόμβοι. Σε κάθε κόμβο αντιστοιχίζεται μία ποσότητα μάζας, που εξαρτάται από τον αριθμό και το μέγεθος των τριγωνικών στοιχείων που

έχουν ως κορυφή το συγκεκριμένο κόμβο. Η κίνηση κάθε κόμβου περιγράφεται από τις εξισώσεις:

$$\ddot{u}_i = \frac{\int_s \sigma_{ij} n_j ds + F_i}{m} + g_i \tag{3.21}$$

όπου:

s η επιφάνεια που περικλείει τον κόμβο μάζας m,

n_j το κάθετο μοναδιαίο διάνυσμα προς την παραπάνω επιφάνεια,

F_i η συνισταμένη των εξωτερικών δυνάμεων που ασκούνται στον κόμβο,

g_i η επιτάχυνση της βαρύτητας.

Η συνισταμένη δύναμη στους κόμβους υπολογίζεται από το άθροισμα τριών όρων:

$$F_i = F_i^z + F_i^c + F_i^l \tag{3.22}$$

όπου F_i^l οι εξωτερικές δυνάμεις που ασκούνται στον κόμβο, F_i^c οι δυνάμεις στα σημεία επαφής των ογκοτεμαχίων και F_i^z οι δυνάμεις λόγω της εσωτερικής έντασης των τριγωνικών ζωνών με κορυφή τον κάθε συγκεκριμένο κόμβο. Δυνάμεις επαφής ασκούνται μόνο στους κόμβους που βρίσκονται στις πλευρές των ογκοτεμαχίων.

Οι δυνάμεις λόγω εσωτερικής έντασης των ζωνών υπολογίζονται από τη σχέση:

$$F_i^z = \int_c \sigma_{ij} n_j ds \tag{3.23}$$

όπου σ_{ij} ο τανυστής των τάσεων της κάθε ζώνης και n_j το μοναδιαίο διάνυσμα κάθετα στο σύνορο C, το οποίο σχηματίζεται από την κλειστή πολυγωνική γραμμή που ενώνει τα μέσα των πλευρών των τριγωνικών ζωνών που συγκλίνουν στον κόμβο.

Για τον υπολογισμό του διανύσματος της δύναμης $\sum F_i$, που ασκείται σε κάθε κόμβο, λαμβάνονται υπόψη τα φορτία που περιγράφηκαν παραπάνω καθώς και η δύναμη λόγω βαρύτητας που ασκείται στον κόμβο και που υπολογίζεται από τη σχέση:

$$F_i^g = m_g g_i \tag{3.24}$$

όπου g_i η επιτάχυνση της βαρύτητας και m_g η συγκεντρωμένη μάζα που αντιστοιχεί σε κάθε κόμβο.

Όταν το σύστημα βρίσκεται σε ισορροπία η δύναμη $\sum F_i$ θα είναι ίση με μηδέν. Διαφορετικά ο κάθε κόμβος θα κινείται και η κίνηση του θα περιγράφεται από τη σχέση:

$$\dot{u}_i^{(t+\Delta t/2)} = \dot{u}_i^{(t-\Delta t/2)} + \sum F_i^{(t)} \frac{\Delta t}{m} \tag{3.25}$$

Σε κάθε χρονικό βήμα οι παραμορφώσεις και στροφές υπολογίζονται από τις σχέσεις:

$$\dot{e}_{ij} = \frac{1}{2}(\dot{u}_{i,j} + \dot{u}_{j,i}) \tag{3.26}$$

$$\dot{\theta}_{ij} = \frac{1}{2}(\dot{u}_{i,j} - \dot{u}_{j,i}) \tag{3.27}$$

3.2.3.4 Δημιουργία δικτύου ασυνεχειών

Στο *UDEC* είναι διαθέσιμοι δύο τύποι απεικόνισης ασυνεχειών. Σύμφωνα με τον πρώτο τύπο, δημιουργούνται ασυνέχειες καθορισμένες από συμβατικές γεωμετρικές παραμέτρους ρωγματωμένης βραχομάζας, που βασίζονται σε στατιστικά στοιχεία. Στον δεύτερο τύπο απεικόνισης ασυνεχειών, χρησιμοποιείται η ψηφίδωση Voronoi, με τη δημιουργία τεμαχίων πολυγώνων τυχαίου μεγέθους και σχήματος. Μέσω της εντολής **JSET** εκτελείται η απεικόνιση των ασυνεχειών, βασιζόμενη σε στατιστικά στοιχεία, ενώ μέσω της εντολής **VORONOI** εκτελείται η ψηφίδωση Voronoi.

Ο πρώτος τύπος απεικόνισης ασυνεχειών στο UDEC, δημιουργεί ένα μοτίβο ασυνεχειών, το οποίο βασίζεται σε παραμέτρους καθορισμένους από τον χρήστη. Μέσω αυτής της περιγραφής του μοτίβου ασυνεχειών, είναι δυνατόν να γίνουν ποσοτικές δηλώσεις που αφορούν την επίδραση συγκεκριμένων γεωμετρικών παραμέτρων στην μηχανική συμπεριφορά. Επίσης, στην περίπτωση ενός μοτίβου ασυνεχειών που παρατηρείται στο πεδίο, οι συγκεκριμένες παράμετροι μπορούν να προσδιοριστούν με την αντιστοίχιση του τεχνητού μοτίβου, με το παρατηρούμενο

Ένα σύστημα ασυνεχειών καθορίζεται από 8 παραμέτρους (4 από τις οποίες ελέγχουν τις μέσες γεωμετρικές ιδιότητες και οι υπόλοιπες 4 ελέγχουν την τυπική απόκλιση της τυχαίας διακύμανσης των γεωμετρικών ιδιοτήτων. Οι παράμετροι που δίνονται μέσω τις εντολής **JSET** είναι:

JSET angle α_m <α_d> gap g_m <g_d> spac s_m <s_d> trace t_m <t_d> origin x_o y_o adev ad_o

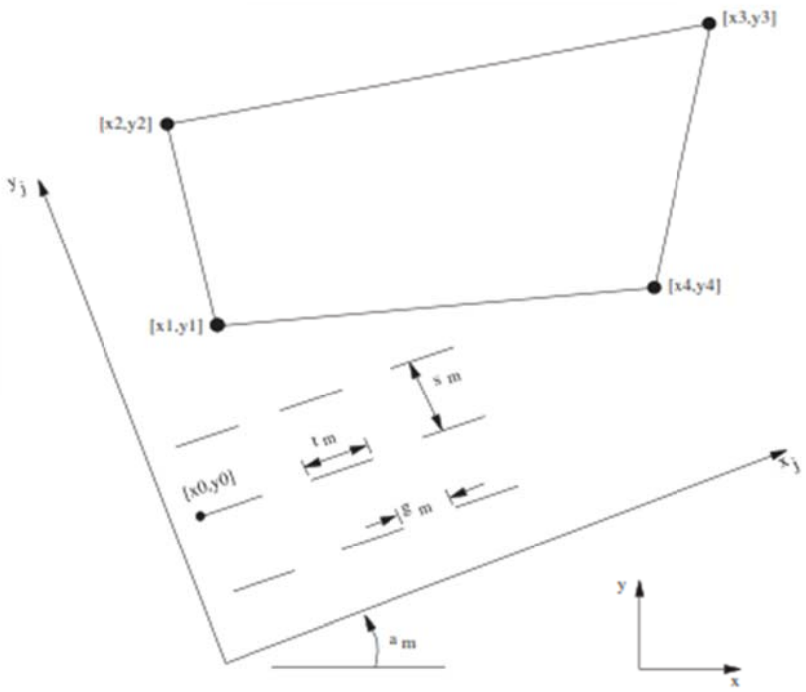
όπου: α=η γωνία του ίχνους της ασυνέχειας με τον άξονα x

g=το μήκος του κενού ανάμεσα στις εκατέρωθεν επιφάνειες των τοιχωμάτων των ασυνεχειών

s=απόσταση ανάμεσα στα ίχνη των

t=το μήκος του ίχνους στα τμήματα ασυνεχειών

Για κάθε ζεύγος τιμών, η πρώτη καταχώρηση (με δείκτη m) είναι η μέση τιμή και η δεύτερη καταχώρηση (με δείκτη d) είναι η μέγιστη τυπική απόκλιση από την μέση τιμή. Οι παράμετροι απεικονίζονται στο σχήμα 3.9



Σχήμα 3.9 Βασικές παράμετροι για την απεικόνιση των ασυνεχειών στο UDEC

Οι εντολές **origin** και **adev** χρησιμεύουν στον προσανατολισμό του ίχνους της ασυνέχειας, στην περιοχή του μοντέλου. Οι παράμετροι των εντολών είναι:

- x_o,y_o: οι συντεταγμένες όπου θα είναι η αφετηρία της ασυνέχειας
- ad_0: η απόκλιση της γωνίας όλων των ασυνεχειών, από την κατεύθυνση που δόθηκε για το ίχνος της ρωγμής

Η δημιουργία των ασυνεχειών μπορεί να περιοριστεί σε ένα συγκεκριμένο μέρος του μοντέλου μέσω της εντολής **RANGE** και **JREGION**. Η εντολή **JREGION** ορίζει μια περιοχή που περικλείεται από ένα κυρτό τετράπλευρο, μέσα στην οποία θα δημιουργηθούν οι ασυνέχειες

JREGION id n x1 y1 x2 y2 x3 y3 x4 y4

Στα αριθμητικά μοντέλα, χρησιμοποιήθηκε κυρίως, η μέθοδος της ψηφιδωσης Voronoi, διότι η συγκεκριμένη μέθοδος είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για την προσομοίωση της διάδοσης της ρωγμάτωσης. Η ρωγμάτωση επιτυγχάνεται όταν υπερβαίνεται η αντοχή των ασυνεχειών μεταξύ των τεμαχίων Voronoi.

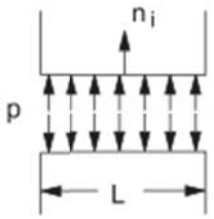
Κατά την ψηφιδωση Voronoi, ένα ή περισσότερα ογκοτεμάχια (blocks) του μοντέλου, υποδιαιρείται σε υποτεμάχια Voronoi, αυθαίρετου μεγέθους. Πρώτα, καθορίζεται ένα μέσο μήκος ακμής *l*. Στην συνέχεια καθορίζεται ο αριθμός επανάληψης (iteration number), ο οποίος μπορεί να αυξηθεί για να γίνει πιο ομοιόμορφη η κατανομή του μεγέθους των τεμαχίων Voronoi. Τέλος, μπορεί να καθοριστεί το μήκος στρογγυλοποίησης ν, το οποίο πρέπει να είναι τουλάχιστον 20 φορές μικρότερο από το μήκος ακμής των ογκοτεμαχίων.

Η ψηφιδωση Voronoi εκτελείται μέσω της εντολης **VORONOI**. Ο αλγόριθμος Voronoi, στην αρχή διανέμει τυχαία σημεία μέσα στην περιοχή ψηφιδωσης και έπειτα τα εσωτερικά σημεία επιτρέπεται να κινηθούν μέσω μιας επαναληπτικής διαδικασίας. Όσο πιο μεγάλος είναι ο αριθμός επανάληψης, τόσο πιο ομοιόμορφη θα είναι η απόσταση μεταξύ των σημείων. Ανάμεσα σε όλα τα σημεία δημιουργούνται τρίγωνα, τα οποία προκύπτουν από την κατασκευή μεσοκαθέτων στα τρίγωνα που μοιράζονται μια κοινή πλευρά. Τα πολύγωνα περικόπτονται στο όρια της περιοχής ψηφιδωσης.

3.2.4 Προσομοίωση της ροής μέσω ασυνεχειών στον κώδικα UDEC

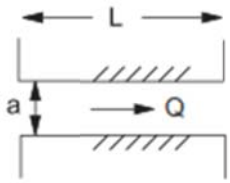
Το *UDEC* έχει τη δυνατότητα να πραγματοποιήσει την ανάλυση της ροής ενός ρευστού μέσα από τις ασυνέχειες ενός συστήματος αδιαπέρατων ογκοτεμαχίων (blocks). Κατά την αριθμητική προσομοίωση διενεργείται μια πλήρως συζευγμένη υδραυλική και μηχανική ανάλυση, στην οποία η υδραυλική αγωγιμότητα των ασυνεχειών εξαρτάται από την μηχανική παραμόρφωση και αντιστρόφως, η πίεση του ρευστού στις ασυνέχειες επηρεάζει τους μηχανικούς υπολογισμούς. Τα φαινόμενα που μπορούν να προσομοιωθούν με το *UDEC* συνοψίζονται παρακάτω:

1. Επίδραση πίεσης



$$F_i = p\, n_i\, L$$

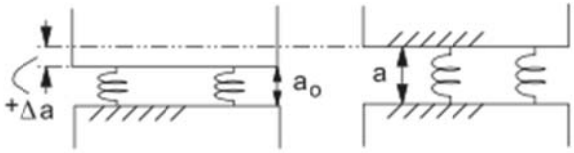
2. Ροή



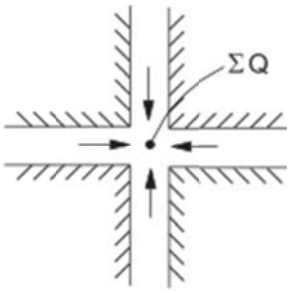
$$Q = -k_j a^3 \frac{\Delta p}{L}$$

3. Μηχανική επίδραση στο άνοιγμα

$$a = a_o + \Delta a$$



4. Δημιουργία πίεσης



$$\Delta p = \frac{K_w}{V}(\Sigma Q \Delta t - \Delta V)$$

Όπου: ΣQ= ροή μέσα στον κόμβο

ΔV= μεταβολή μηχανικού όγκου

V= μέσος όγκος

Σχήμα 3.10 Διάδραση ρευστού-στερεού στις ασυνέχεια

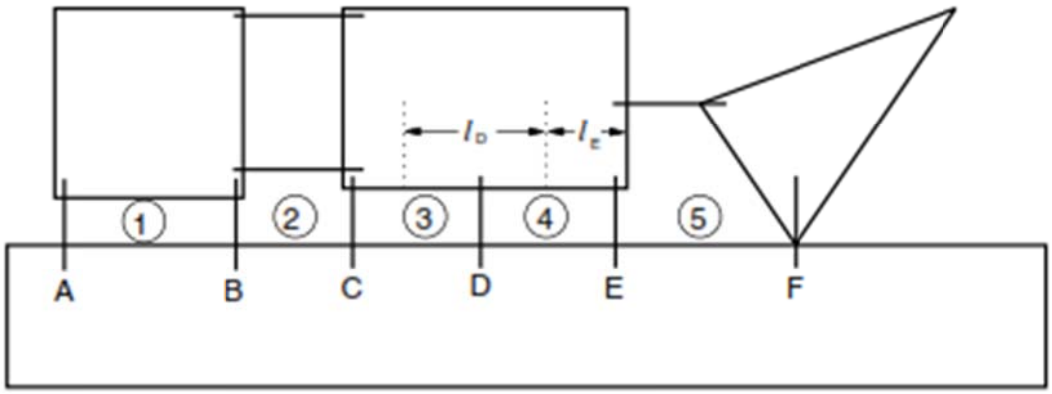
Στο *UDEC*, περιέχονται τέσσερις βασικοί αλγόριθμοι για **τ**ην αριθμητική προσομοίωση της ροής ενός ρευστού:

- Ο αλγόριθμος για συμπιεστή ροή (compressible fluid flow), παροδική (transient) ή σταθερή (steady state)
- Ο αλγόριθμος για ασυμπίεστη ροή (incompressible fluid flow)
- Ο αλγόριθμος για ροή αερίου (gas flow)
- Ο αλγόριθμος για την διφασική ροή ρευστού-αερίου (liquid/gas flow)

3.2.4.1 Συμπιεστή ροή

Η αριθμητική εφαρμογή της ροής του ρευστού βασίζεται στην κατασκευή αρχικά ενός δικτύου από τομείς (domains), κάθε ένας εκ των οποίων θεωρείται ότι είναι γεμάτος με ρευστό σε ομοιόμορφη πίεση, και που επικοινωνεί με τους γειτονικούς τομείς μέσω επαφών. Σύμφωνα με το σχήμα 3.10 οι τομείς είναι αριθμημένοι από το 1 μέχρι το 5. Οι τομείς 1,3 και 4 αντιπροσωπεύουν ασυνέχειες,

ενώ ο τομέας 2 βρίσκεται στην διασταύρωση δύο ασυνεχειών και ο τομέας 5 αποτελεί ένα κενό. Οι τομείς διαχωρίζονται από τα σημεία επαφής, στα οποία ασκούνται οι δυνάμεις μηχανικής αλληλεπίδρασης ανάμεσα στα ογκοτεμάχια. Επειδή τα παραμορφώσιμα ογκοτεμάχια διακριτοποιούνται σε ένα πλέγμα τριγωνικών στοιχείων, κόμβοι (gridpoints) υπάρχουν όχι μόνο στις κορυφές των ογκοτεμαχίων αλλά και κατά μήκος των πλευρών τους. Ένα σημείο επαφής θα τοποθετηθεί εκεί όπου ο κόμβος θα συναντήσει την πλευρά ή τον κόμβο ενός άλλου ογκοτεμαχίου. Για παράδειγμα, στο παρακάτω σχήμα, η επαφή D υπονοεί την ύπαρξη ενός κόμβου κατά μήκος μιας από τις πλευρές που βρίσκονται σε επαφή. Σαν αποτέλεσμα, η ασυνέχεια ανάμεσα στα δύο ογκοτεμάχια αναπαρίσταται από δύο τομείς (3 και 4). Αν επιλέγονταν ένα πιο λεπτομερές πλέγμα πεπερασμένων διαφορών, η ασυνέχεια θα αναπαριστανόταν από έναν μεγαλύτερο αριθμό συνεχόμενων τομέων. Συμπερασματικά, το πόσο λεπτομερής είναι η αριθμητική αναπαράσταση του δικτύου ροής, συνδέεται με την μηχανική διακριτοποίηση που εφαρμόζεται και η οποία μπορεί να οριστεί από τον χρήστη. Σημειώνεται όμως ότι, αυξημένη λεπτομέρεια διακριτοποίησης οδηγεί σε υψηλούς υπολογιστικούς χρόνους.



Σχήμα 3.11 Η ροή στις ασυνέχειες προσομοιώνεται ως ροή σε τομείς όπου A-F τα σημεία επαφής και1-5 οι τομείς

Σε περίπτωση που θεωρείται απουσία της βαρύτητας, σε κάθε τομέα υπάρχει μια ομοιόμορφη πίεση ρευστού. Σε προβλήματα όπου θεωρείται ότι υπάρχει βαρύτητα, η πίεση ποικίλει γραμμικά, σύμφωνα με την υδροστατική κλίση και η πίεση του τομέα ορίζεται ως η τιμή της πίεσης, στο κέντρο κάθε τομέα.

Η ροή διέπεται από το διαφορικό της πίεσης ανάμεσα σε γειτονικούς τομείς. Ο ρυθμός της ροής υπολογίζεται με δύο διαφορετικές μεθόδους:

Για σημειακή επαφή (δηλαδή γωνίας-πλευράς, όπως η επαφή F στο σχήμα……ή γωνίας-γωνίας) ο ρυθμός της ροής από έναν τομέα με πίεση p1 σε έναν τομέα με πίεση p2 δίνεται από τον τύπο:

$$q = -k_c \Delta p \tag{3.28}$$

όπου:

Kc είναι ένας συντελεστής περατότητας και

$$\Delta p = p2 - p1 + \rho_w g(y2 - y1) \tag{3.29}$$

όπου:

ρw είναι η πυκνότητα του ρευστού

g είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας

y1,y2 είναι οι συντεταγμένες y των κέντρων των τομέων

Στην περίπτωση που δύο άκρα βρίσκονται σε επαφή, μπορεί να οριστεί ένα μήκος επαφής (στο σχήμα 3.11 το l_D και το l_E αποτελούν τα μήκη των επαφών D και E αντίστοιχα). Το μήκος ορίζεται ως το άθροισμα της μισής απόστασης από την κοντινότερη επαφή προς τα δεξιά και προς τα αριστερά. Σε αυτήν την περίπτωση ισχύει ο κυβικός νόμος για ροή σε μια επίπεδη ρωγμή (κατά Whitherspoon, 1980). Ο ρυθμός της ροής υπολογίζεται από τον τύπο :

$$q = -k_j a^3 \frac{\Delta p}{l} \tag{3.30}$$

όπου:

k_j είναι ο συντελεστής περατότητας των ασυνεχειών (η θεωρητική του τιμή είναι 1/12μ, όπου μ το δυναμικό ιξώδες του ρευστού.

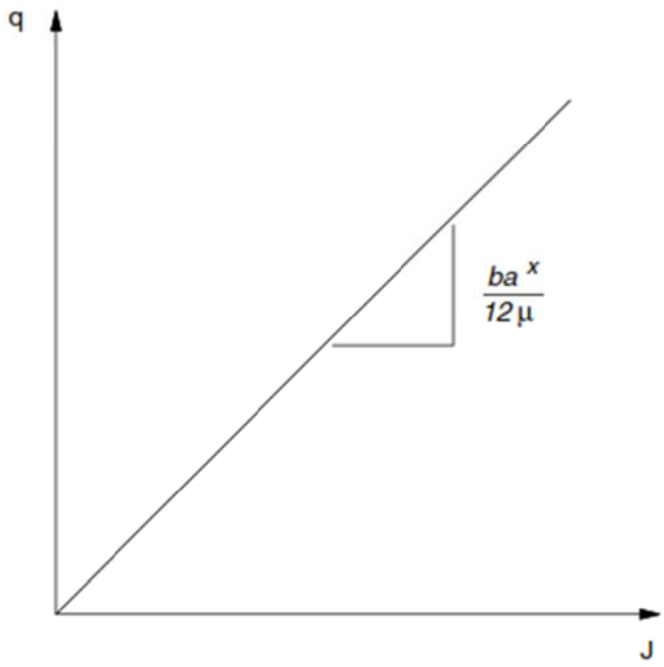
α είναι το υδραυλικό άνοιγμα της επαφής

l είναι το μήκος που έχει οριστεί στην επαφή ανάμεσα στους τομείς

Η παραπάνω εξίσωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για επαφή σημείων, δεδομένου ότι έχει οριστεί ένα ελάχιστο μήκος σε αυτές τις επαφές

Στο *UDEC*, ο χρήστης μπορεί να αλλάξει τον συντελεστή περατότητας και εκθέτη στην εξίσωση…..

Για νευτώνεια ροή, ο ρυθμός ροής ανά μονάδα πλάτους, q, σχετίζεται γραμμικά με την κλίση πίεσης, J, όπως φαίνεται στο σχήμα…..



Σχήμα 3.12 Σχέση ροής-κλίσης για νευτώνειο υγρό στο *UDEC*

Η γενική εξίσωση για ροή ρευστού ανάμεσα σε επίπεδες επιφάνειες είναι:

$$q = \frac{b\alpha^x J}{12\mu} \tag{3.31}$$

όπου:

α είναι το πλάτος της ρωγμής (άνοιγμα)

b είναι εμπειρικός συντελεστής

μ είναι το δυναμικό ιξώδες του ρευστού

x είναι ο εκθέτης του ανοίγματος

Στην πιο συνήθη μορφή αυτής της εξίσωσης (κυβικός νόμος), x=3 και b=1. Οι τιμές μπορούν να αλλάξουν με την χρήση των εντολών **expa** και **emb** αντίστοιχα

Η εξίσωση **Δp** υποδηλώνει ότι η ροή μπορεί να λάβει μέρος σε μια επαφή, ακόμα όταν και οι δύο πιέσεις που υπάρχουν στους τομείς είναι μηδέν. Σε αυτήν την περίπτωση, η δύναμη της βαρύτητας μπορεί να προκαλέσει το ρευστό να μεταναστεύσει από έναν τομέα που δεν είναι πλήρως κορεσμένος. Ωστόσο θα πρέπει να ληφθούν υπ'όψιν δύο παράγοντες:

1. Η φαινόμενη περατότητα πρέπει να μειωθεί όσο μειώνεται και ο βαθμός κορεσμού (η περατότητα πρέπει να είναι μηδέν για μηδενικό κορεσμό)
2. Ρευστό δεν μπορεί να εξαχθεί από έναν τομέα με μηδενικό κορεσμό

Για να αντιμετωπιστεί ο πρώτος παράγοντας, ο ρυθμός της ροής που υπολογίζεται από τις εξισώσεις Q και Q , πολλαπλασιάζονται με έναν συντελεστή, fs , συνάρτηση του βαθμού κορεσμού, s ,

$$f_s = s^2(3 - 2s) \tag{3.32}$$

Η εξίσωση είναι εμπειρική και fs=0 αν s=0 και fs=1 αν s=1 (δηλαδή η περατότητα είναι αμετάβλητη για πλήρη κορεσμό και μηδέν για μηδενικό κορεσμό). Η παράγωγος της εξίσωσης είναι μηδέν και ένα για s=0 και s=1 αντίστοιχα (εισροή δεν μπορεί να συμβεί από έναν τελείως ακόρεστο τομέα.

Το υδραυλικό άνοιγμα γενικά δίνεται από τον τύπο:

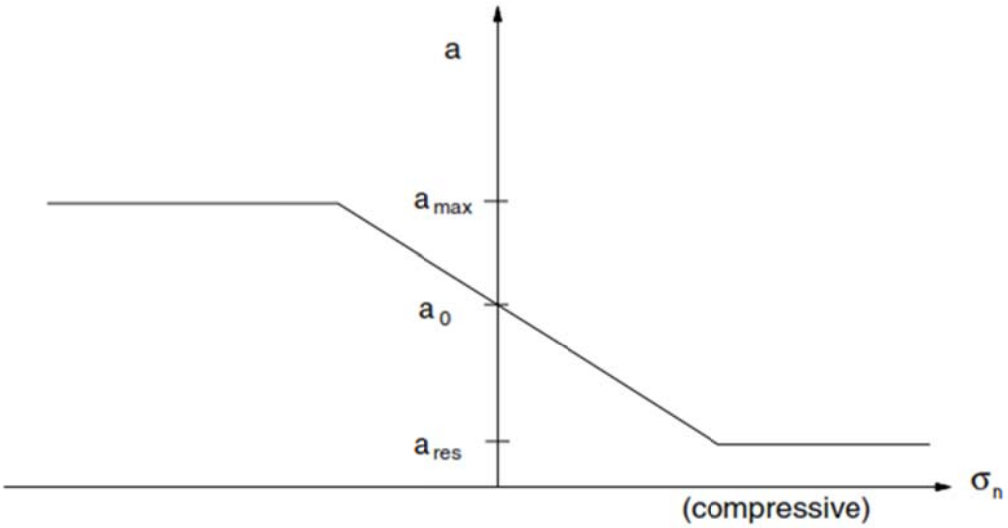
$$\alpha = \alpha_0 + u_n \tag{3.33}$$

όπου:

α_0 είναι το άνοιγμα της ρωγμής όταν η ορθή τάση στην ασυνέχεια είναι μηδέν

u_n είναι η ορθή μετατόπιση των εκατέρωθεν τοιχωμάτων της ασυνέχειας

Μια ελάχιστη τιμή ,a_{res} , θεωρείται για το παραμένον άνοιγμα των ρωγμών και μια μέγιστη τιμή ανοίγματος των ρωγμών, a_{max} (εξορισμού είναι 5 φορές μεγαλύτερη από την a_{res}, αλλά μπορεί να οριστεί και από τον χρήστη). Η παραπάνω έκφραση είναι μια πολύ απλή συσχέτιση ανάμεσα στο μηχανικό και υδραυλικό άνοιγμα των ασυνεχειών. Εντούτοις, μπορούν να χρησιμοποιηθούν περισσότερο λεπτομερείς συσχετίσεις, όπως π.χ. ο εμπειρικός νόμος του Barton (1985).



Σχήμα 3.13 Συσχέτιση μεταξύ υδραυλικού ανοίγματος, α, και joint normal stress, σ_n, στο *UDEC*

Σε κάθε χρονικό βήμα του μηχανικού υπολογισμού στο *UDEC*, οι υπολογισμοί καθορίζουν την επικαιροποιημένη γεωμετρία του συστήματος, αποδίδοντας έτσι τις νέες τιμές των ανοιγμάτων για όλες τις επαφές και τον όγκο όλων των τομέων. Η ροή του ρευστού διαμέσου των επαφών μπορεί να υπολογιστεί από τις προηγούμενες εξισώσεις. Έπειτα, οι πιέσεις των τομέων ενημερώνονται, λαμβάνοντας υπ'όψιν τον καθαρό όγκο της ροής μέσα στον τομέα και πιθανές

αλλαγές στον όγκο του τομέα λόγω της οριακής κίνησης των γειτονικών ογκοτεμαχίων. Η νέα πίεση του τομέα γίνεται:

$$p = p_0 + K_w Q \frac{\Delta t}{V} - K_w \frac{\Delta V}{V_m} \tag{3.34}$$

όπου:

p_0 είναι η πίεση του τομέα στο προηγούμενο χρονικό βήμα

Q είναι το άθροισμα ρυθμού ροής στον τομέα από τις γειτονικές επαφές

K_w είναι το μέτρο συμπίεσης του ρευστού

ΔV είναι $V-V_0$

V_m είναι $(V+V_0)/2$

Αν η πίεση του τομέα που υπολογίζεται είναι αρνητική, τότε η πίεση ορίζεται μηδέν και η ροή από τον τομέα χρησιμοποιείται για να μειώσει τον κορεσμό, s,

$$s = s_0 + Q \frac{\Delta t}{V} - \frac{\Delta V}{V_m} \tag{3.35}$$

Όπου s_0 είναι ο βαθμός κορεσμού του τομέα στο προηγούμενο χρονικό βήμα. Όσο $s<1$, η πίεση παραμένει μηδέν και εφαρμόζεται η εξίσωση 2.7 αντί της 2.6. Αν το υπολογισμένο $s>1$, τότε το s γίνεται 1 και εφαρμόζεται η εξίσωση 2.6.

Για να υπάρχει αριθμητική σταθερότητα του συγκεκριμένου αλγόριθμου ροής ρευστού, το χρονικό βήμα ροής πρέπει να περιοριστεί σε:

$$\Delta t_f = \min[\frac{V}{K_w \Sigma_i k_i}] \tag{3.36}$$

όπου:

V είναι ο όγκος του τομέα

Ki είναι το άθροισμα των συντελεστών περατότητας όλων των επαφών

Η χρήση του συγκεκριμένου αλγορίθμου μπορεί να οδηγήσει σε χρονοβόρες αναλύσεις, ιδιαίτερα αν το άνοιγμα των επαφών είναι μεγάλο και υπάρχουν πολύ μικροί τομείς. Επίσης, το ρευστό που γεμίζει μια ασυνέχεια, αυξάνει την ακαμψία των ασυνεχειών (K_w/α), γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε μείωση του χρονικού βήματος σε έναν μηχανικό υπολογισμό.

3.2.4.2 Ασυμπίεστη ροή

Σύμφωνα με τον αλγόριθμο για συμπιεστή ροή, οι αυξήσεις της πίεσης ρευστού υπολογίζονται από την μεταβολή του όγκου των ασυνεχειών και τον καθαρό όγκος εισροής μέσα στον τομέα (εξίσωση 3.34). Για μικρά ανοίγματα ασυνεχειών, το ρευστό παρουσιάζεται ως δύσκαμπτο ελατήριο, με τιμή ακαμψίας μεγαλύτερη από την τυπική ακαμψία ασυνεχειών. Στον αλγόριθμο, αυτό σημαίνει ότι το μηχανικό βήμα πρέπει να μειωθεί. Το χρονικό βήμα της ροής (εξίσωση 3.36) είναι αντιστρόφως ανάλογο με το μέτρο συμπίεσης και την υδραυλική αγωγιμότητα των ασυνεχειών. Για τυπικά ανοίγματα ασυνεχειών, προκύπτουν χρονικά βήματα της τάξης μεγέθους των millisecond. Άρα, ο αλγόριθμος μπορεί να εφαρμοστεί σε πρακτικά προβλήματα, για προσομοιώσεις πολύ μικρής διάρκειας.

Ένας διαφορετικός τύπος αλγόριθμου προτείνεται από τον κώδικα UDEC για να ξεπεραστούν τα προαναφερθέντα προβλήματα. Ωστόσο, προτού περιγραφεί, είναι αξιοσημείωτο να παρουσιαστούν τα χαρακτηριστικά ενός συστήματος βραχομάζας-ρευστού:

1) Υπάρχουν δύο διαφορετικές δυσκολίες που αντιμετωπίζουν οι χρήστες:
   a) Το ρευστό μέσα στην ασυνέχεια έχει μεγάλη ακαμψία, λόγω του μικρού ανοίγματος
   b) Η περατότητα ποικίλει με την αλλαγή του ανοίγματος, λόγω του κυβικού όρου στην εξίσωση ροής

2) Η βραχομάζα είναι εκείνη που καθορίζει την πίεση, σε σχέση με το ρευστό. Για παράδειγμα, σε ένα συμβατικό σύστημα σωληνώσεων, το ρευστό καθορίζει την πίεσή του, μέσω των εξισώσεων ροής και συνέχειας. Ωστόσο, ένα συνηθισμένο τεμάχιο βραχομάζας, είναι τόσο μαλακό σε σχέση με το ρευστό που έχει παγιδευτεί σε μια ρωγμή, ώστε σημαντικές αλλαγές στον όγκο του ρευστού επηρεάζουν ελάχιστα τις τάσεις στη βραχομάζα . Αφού οι τάσεις της βραχομάζας πρέπει να ισορροπήσουν με την πίεση του ρευστού στις γειτονικές ρωγμές, η πίεση του ρευστού καθορίζεται από τις τάσεις της βραχομάζας.
3) Αν το ενδιαφέρον βρίσκεται σε μια μη σταθερή και μη δυναμική ροή (δηλαδή, το μοντέλο πρέπει να συλλάβει με ακρίβεια την καθυστέρηση της μετάδοσης, όταν οι διακυμάνσεις της πίεσης, μεταναστεύουν από το ένα μέρος του συστήματος στο άλλο), τότε οι επιδράσεις της αδράνειας ή της διάδοσης, μπορούν να αγνοηθούν. Επικεντρώνουμε την προσοχή μας σε ένα υγρό (όπως το νερό), που περιέχεται σε ρωγμές μικρού ανοίγματος (10 με 100 μικρόμετρα) και μήκους 1 με 10 m.
4) Σταθερές χρόνου (δηλαδή, χρόνος που απαιτείται για να επιτευχθεί ένα ποσοστό της τελικής πίεσης, ή χρόνος που χρειάζεται η αλλαγή της πίεσης για να διαδοθεί σε μια ορισμένη απόσταση) εξαρτώνται περισσότερο από την συμπιεστότητα όλου του συστήματος και στον τρόπο της παραμόρφωσης, παρά στην τοπική συμπιεστότητα. Το μέτρο συμπίεσης του ρευστού είναι σχεδόν ασήμαντο.

Λαμβάνοντας τα παραπάνω υπ’όψιν, προτείνεται από το UDEC ο παρακάτω αλγόριθμος:

Ο ρυθμός της ροής υπολογίζεται από την διαφορά των πιέσεων, σύμφωνα με την εξίσωση 3.30. Σε κάθε τομέα (διασταύρωση ασυνεχειών ή το μεσαίο τμήμα μιας ασυνέχειας), η ροή που προκύπτει από κάθε ασυνέχεια, προστίθεται αλγεβρικά και πολλαπλασιάζεται από το χρονικό βήμα της ροής για να υπολογιστεί ο καθαρός όγκος υγρού που εισέρχεται στον τομέα.

$$\Delta V_f = \Sigma q \Delta t_f \qquad (3.37)$$

Ο όγκος που υπολογίζεται δεν μεταφράζεται αμέσως σε μετατοπίσεις ογκοτεμαχίων βραχομάζας, αλλά αποθηκεύεται σε ένα «μπαλόνι» συνδεδεμένο με

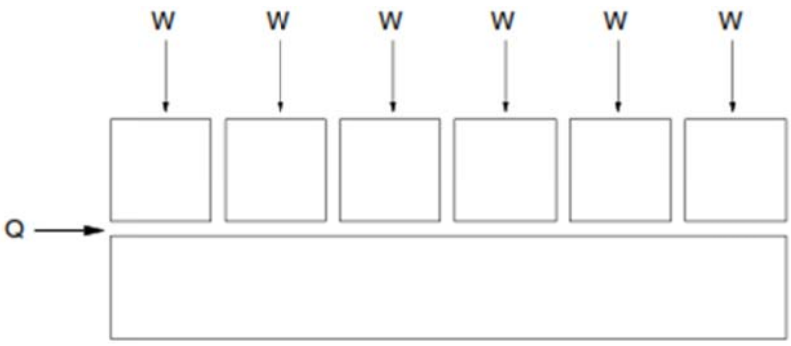
τον τομέα. Στην συνέχεια, ο χρόνος ροής διατηρείται σταθερός και επιτρέπεται στο περιεχόμενο του κάθε μπαλονιού να διαρρεύσει στον αντίστοιχο τομέα. Η διαρροή σταματάει, όταν η τιμή του όγκου του τομέα γίνεται ίση με τον όγκο που έχει αποθηκευτεί στο μπαλόνι. Η διεργασία περιλαμβάνει την συνήθη δυναμική χαλάρωση των εξισώσεων κίνησης των κόμβων, αλλά με μια επιπρόσθετη οριακή συνθήκη πίεσης, που προέρχεται από την διαρροή του ρευστού μέσα στον τομέα. Το σύστημα διαρροής περιγράφεται στην παρακάτω εξίσωση:

$$p^{'} = p^{0} + F_p(\Delta V_{stored} - \Delta V_{domain}) \tag{3.38}$$

όπου:

$p^{'}$	είναι η πίεση του τομέα στο προηγούμενο χρονικό βήμα
p^{0}	είναι η πίεση του τομέα στο νέο χρονικό βήμα
ΔV_{stored}	είναι ο όγκος που είναι αποθηκευμένος στο «μπαλόνι»
ΔV_{domain}	είναι η αύξηση του όγκου στον τομέα
F_p	είναι σταθερός παράγοντας

Η παραπάνω εξίσωση ρυθμίζει την πίεση μέχρι ο όγκος του τομέα να γίνει ίδιος με τον αποθηκευμένο όγκο στο «μπαλόνι».



Σχήμα 3.14 Παράδειγμα ακραίας περίπτωσης, όπου η ταχύτητα της διάδοσης εξαρτάται από την ακαμψία του συστήματος

Στην συνέχεια, ο αλγόριθμος εκτελεί μια ακολουθία από χρονικά βήματα, τα οποία ορίζονται από τον χρήστη. Για κάθε βήμα, προκειμένου να επιτευχθεί η συνοχή του ρευστού σε κάθε τομέα, πραγματοποιείται μια σειρά βημάτων σύμφωνα με την μέθοδο της μηχανικής χαλάρωσης. Δεδομένης της υπόθεσης ότι το ρευστό είναι ασυμπίεστο, ο καθαρός όγκος ροής σε έναν τομέα, κατά ένα χρονικό βήμα, πρέπει να ισοδυναμεί με την αύξηση του όγκου μέσα στον τομέα. Ο όγκος του ρευστού, που ισοδυναμεί με την διαφορά των δύο όγκων που προαναφέρθηκαν, υφίστανται σταδιακή μείωση, λόγω της εφαρμογής της μεθόδου της μηχανικής χαλάρωσης. Για τον συγκεκριμένο σκοπό, η πίεση του τομέα αυξομειώνεται αναλογικά με τον μη εξισορροπημένο όγκο κάθε τομέα. Ο συντελεστής αναλογίας ελέγχεται από ένα προσαρμοστικό σύστημα και για το λόγο αυτό ποικίλει ανάμεσα στις επαναλήψεις, για να προσφέρει καλύτερη σύγκλιση.

Η ροή σε μια επίπεδη ρωγματωμένη βραχομάζα μπορεί να εξιδανικευτεί μέσω του μοντέλου παράλληλων πλακών. Η αναλυτική λύση για μια στρωτή ροή παχύρευστου υγρού, ανάμεσα σε παράλληλες πλάκες δίνεται από τον μαθηματικό τύπο:

$$u = k_f\, J \tag{3.39}$$

όπου J είναι η υδραυλική κλίση, και η υδραυλική αγωγιμότητα της ρωγμής δίνεται από την εξίσωση:

$$k_f = \frac{a^2 g}{12v} \tag{3.40}$$

όπου: α είναι το πλάτος της ρωγμής

ν είναι το κινηματικό ιξώδες του υγρού

g είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας

Ο ρυθμός ροής ανά μονάδα πλάτους εκφράζεται ως:

$$q = \upsilon\, \alpha = \frac{\alpha^3 g}{12v}\, J \tag{3.41}$$

που συνήθως αναφέρεται ως κυβικός νόμος για την ροή

4 Πρώτη σειρά αριθμητικών μοντέλων με συμπιεστή ροή

Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο Κεφάλαιο, στην πρώτη σειρά των αριθμητικών μοντέλων, θα εξεταστεί η εξιδανικευμένη περίπτωση εισπίεσης ενός ιξώδους ρευστού σε μια επίπεδη ρωγμή, η οποία προσομοιώνει την υδραυλική θραύση σε ένα ταμιευτήρα. Η απόκριση του μοντέλου μελετάται μέσω της πίεσης και του πλάτους του ανοίγματος της επίπεδης ρωγμής.

Σκοπός της προσομοίωσης είναι η διερεύνηση της δυνατότητας του προγράμματος να προσομοιώσει τη μεταβατική συμπεριφορά κατά την υδραυλική θραύση με τον αλγόριθμο συμπιεστής ροής, καθώς και η εξέταση της συμπεριφοράς του μοντέλου για μεταβολή παραμέτρων λειτουργίας της υδραυλικής θραύσης, όπως είναι ο ρυθμός εισπίεσης.

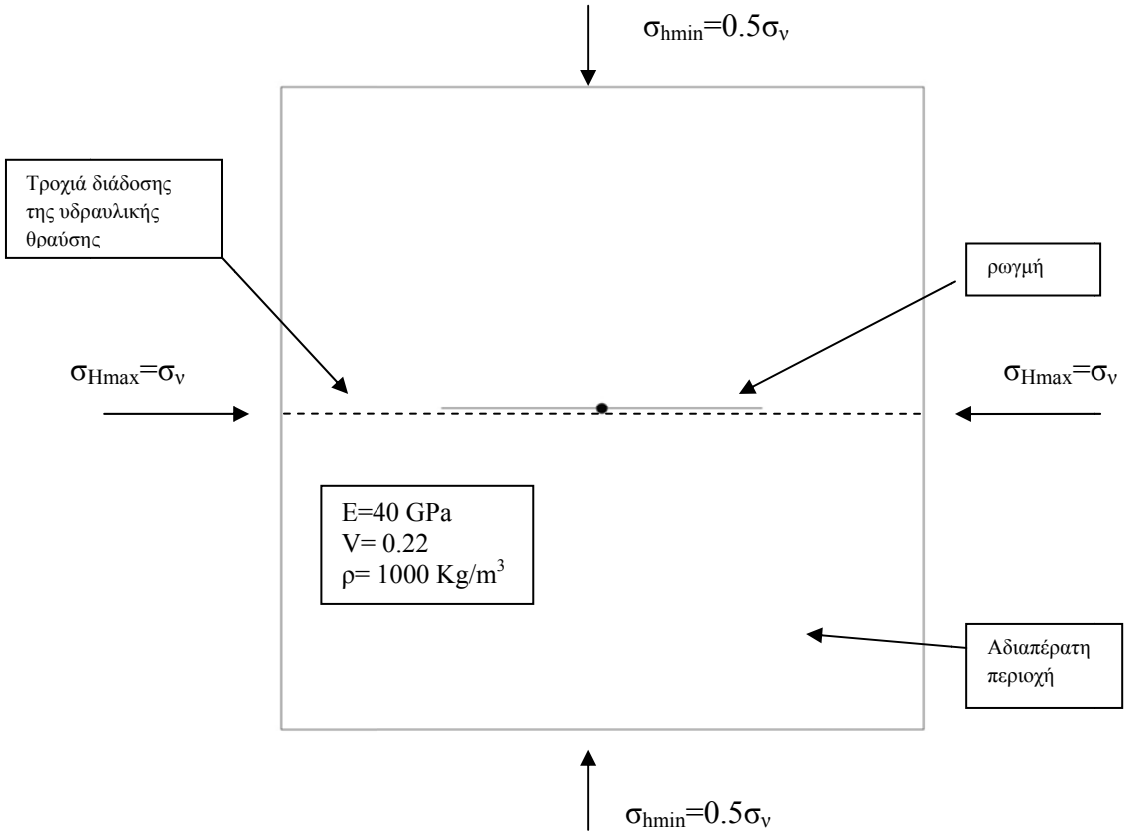
Για την προσέγγιση του θέματος, θα πραγματοποιηθεί η προσομοίωση ενός αριθμητικού μοντέλου, που θα περιλαμβάνει την απεικόνιση μιας δισδιάστατης τομής ενός ταμιευτήρα. Ο σχηματισμός αναπαρίσταται ως ένα ισοδύναμο συνεχές μέσο, που αποτελεί την βραχομάζα, ενώ μια επίπεδη ρωγμή, διασχίζει το μοντέλο ακριβώς στην μέση. Η βραχομάζα είναι ελαστική και αδιαπέρατη. Στο κέντρο του μοντέλου, έχει ορυχθεί γεώτρηση, μέσω της οποίας εισπιέζεται ρευστό με σταθερό ρυθμό. Η ρωγμή είναι αρχικά στεγνή (βαθμός κορεσμού μηδεν), έχει μηδενική συνοχή, ενώ δεν επιτρέπεται η ροή πέραν του άκρου της ρωγμής.

Προκειμένου το UDEC να προσομοιώσει την διάδοση της ρωγμάτωσης, θα πρέπει πρώτα να οριστούν τα επίπεδα τα οποία θα διασχίσει η ρωγμή. Η τροχιά της ρωγμής θα πρέπει να οριστεί ρητά στο μοντέλο, πριν την αριθμητική προσομοίωση. Στο συγκεκριμένο μοντέλο, η υδραυλική θραύση θεωρείται επίπεδη και προσανατολισμένη κατά την διεύθυνση της μέγιστης κύριας τάσης. Οι εκατέρωθεν επιφάνειες του επιπέδου της υδραυλικής θραύσης είναι αρχικά συνδεμένες και η αντοχή των δεσμών αντιπροσωπεύει την εφελκυστική αντοχή του πετρώματος. Η διάδοση της υδραυλικής θραύσης αντιστοιχεί στο «σπάσιμο» αυτών των δεσμών. Βέβαια, η θεώρηση της διάδοσης της υδραυλικής θραύσης σε μια επίπεδη ρωγμή, είναι μια απλοποίηση. Στην πράξη, η υδραυλική θραύση, που χρησιμοποιείται για παράδειγμα για την διέγερση του σχιστόλιθου, οδηγεί στην δημιουργία ενός μεγάλου

αριθμού ρωγμών που διαδίδονταται ταυτόχρονα ή διαδοχικά. Κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες, η μηχανική αλληλεπίδραση ανάμεσα σε αυτές τις ρωγμές, μπορεί να οδηγήσει σε μη επίπεδες και πολύπλοκες τροχιές, όπως έχει παρατηρηθεί από πειραματικές παρατηρήσεις.

4.1 Προετοιμασία των αριθμητικών μοντέλων

Στο παρακάτω σχήμα, απεικονίζεται το μοντέλο του UDEC, το οποίο αναπαριστά ένα δισδιάστατο οριζόντιο τμήμα ενός ταμιευτήρα,έστω πάχους 350 m. Οι διαστάσεις του μοντέλου είναι 23.04x23.04 m. Η εισπίεση, πραγματοποιείται μέσω μιας κατακόρυφης γεώτρησης που βρίσκεται στο κέντρο του μοντέλου. Το εντατικό πεδίο θεωρείται ανισότροπο, με την μέγιστη οριζόντια κύρια τάση ίση με την κατακόρυφη τάση και την ελάχιστη οριζόντια κύρια τάση ίση με την μισή τιμή της κατακόρυφης τάσης.



Σχήμα 4.1:Σχηματική απεικόνιση του ταμιευτήρα

Για να αποφασιστεί ο όγκος του ρευστού που θα χρησιμοποιηθεί, λήφθηκαν υπ'όψιν οι διαστάσεις του ταμιευτήρα, καθώς και σχετικές τιμές από τη διεθνή βιβλιογραφία. Ο ρυθμός εισπίεσης που θα χρησιμοποιηθεί είναι 0.14 m^3/s ή αλλιώς 140 kg ρευστού ανά δευτερόλεπτο. Η συγκεκριμένη τιμή μπορεί να μεταφραστεί σε 52.8 βαρέλια το λεπτό.

Για την κατασκευή του μοντέλου, πρέπει πρώτα να προσδιοριστεί η γωνία στρογγυλοποίησης του κάθε ογκοτεμαχίου. Με την χρήση της εντολής **ROUND** ορίζεται το μήκος στο οποίο θα πραγματοποιηθεί στρογγύλευσης των γωνιών των ογκοτεμαχίων στο UDEC σε 0.01 m και μέσω της εντολής **EDGE** ορίζεται η ελάχιστη τιμή του μήκους της πλευράς του κάθε ογκοτεμαχίου (0.02 m). Στην συνέχεια, με την εντολή **BLOCK**, κατασκευάζεται το δισδιάστατο τμήμα του ταμιευτήρα, διαστάσεων 23.04x23.04 m. Τέλος, μέσω της εντολής **GENERATE EDGE,** πραγματοποιείται η διακριτοποίηση του μοντέλου σε ζώνες πεπερασμένων διαφορών, ορίζοντας ως μέγιστο μήκος πλευράς μίας ζώνης πεπερασμένων διαφορών ίση με 0.2

Αφού ολοκληρώθηκε η γεωμετρία του μοντέλου, στην συνέχεια θα πρέπει να καθορισθούν οι μηχανικές ιδιότητες της βραχομάζας και των ασυνεχειών. Με την εντολή **prop mat 1** δίνονται τα βασικά μηχανικά χαρακτηριστικά στην βραχομάζα. Η πυκνότητα του πετρώματος είναι 2700 Kg/m^3, το μέτρο ελαστικότητας 40 GPa και ο λόγος Poisson 0.22. Στον κώδικα όμως, πρέπει να εισαχθεί το μέτρο συμπίεσης K (bulk modulus) και το μέτρο διάτμησης G (shear modulus). Όλα τα αριθμητικά μοντέλα, για παραμορφώσιμα ογκοτεμάχια στο *UDEC*, διέπονται από μια ισότροπη συμπεριφορά υλικού, σε ελαστικό εύρος. Αυτή περιγράφεται από τις ελαστικές σταθερές K και G, που χρησιμοποιούνται στα αριθμητικά μοντέλα του *UDEC*, αντί για το μέτρο ελαστικότητας και τον λόγο Poisson. Σύμφωνα με το εγχειρίδιο χρήσης του κώδικα UDEC το bulk και το shear modulus αντιστοιχούν σε πιο θεμελιώδεις πτυχές της συμπεριφοράς του υλικού, σε σχέση με το μέτρο ελαστικότητας και τον λόγο Poisson. Ο υπολογισμός των δύο μεγεθών, γίνεται με την χρήση των παρακάτω εξισώσεων:

$$\boldsymbol{K = \frac{E}{3(1-2\nu)}} \qquad 4.1$$

όπου:

K είναι το μέτρο συμπίεσης

E είναι το μέτρο ελαστικότητας

ν είναι ο λόγος Poisson

$$\boldsymbol{G = \frac{E}{2(1+\nu)}} \qquad 4.2$$

όπου:

G είναι το μέτρο διάτμησης

E είναι το μέτρο ελαστικότητας

ν είναι ο λόγος Poisson

Από τις εξισώσεις 4.1 και 4.2 υπολογίζονται οι τιμές των K και G και μέσω των εντολών **dens bulk** και **shear**, εισάγονται οι τιμές 2700 kg/m^3, 2.3381x10^{10} Pa και 1.639*10^{10} Pa αντίστοιχα.

Στην συνέχεια, ορίζονται οι μηχανικές ιδιότητες της ρωγμής. Με την εντολή **joint** ορίζονται οι παρακάτω παράμετροι:

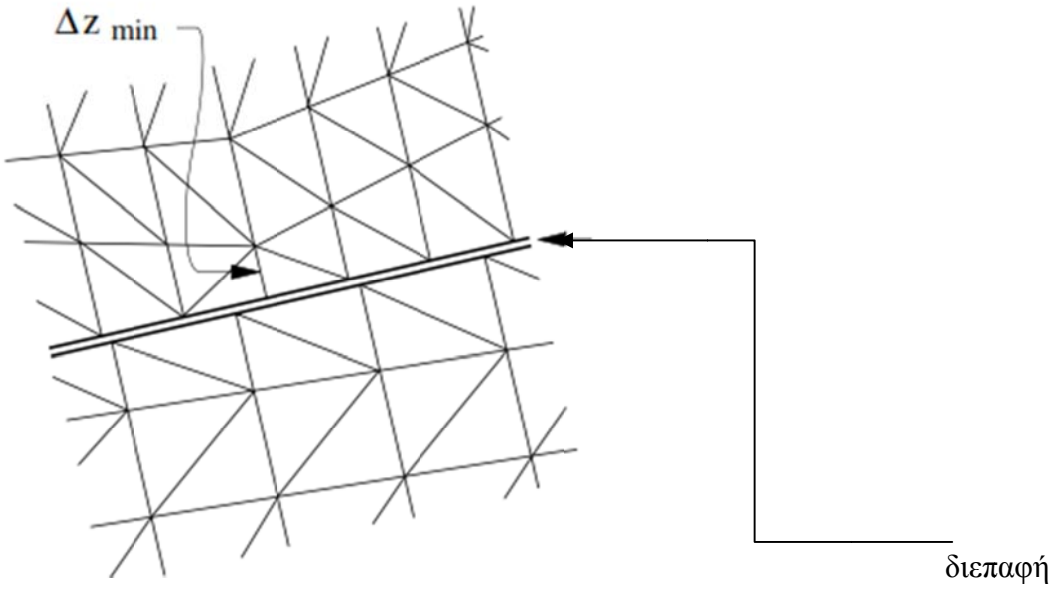
- jkn: είναι η τιμή της ορθής δυστροπίας (joint normal stiffness)
- jks: είναι η τιμή της διατμητικής δυστροπίας (joint shear stiffness)
- jcoh: είναι η τιμή της συνοχής
- jfric: είναι η γωνία τριβής των ασυνεχειών
- jten: είναι η αντοχή σε εφελκυσμό
- jperm: είναι σταθερά περατότητας των ασυνεχειών που χρησιμοποιείται στο UDEC για αριθμητικές προσομοιώσεις ροής
- azero: είναι το αρχικό άνοιγμα των ασυνεχειών υπό μηδενική ορθή τάση
- ares: είναι το παραμένον άνοιγμα των ασυνεχειών. Το άνοιγμα των ασυνεχειών δεν μπορεί να μειωθεί κάτω του ares ανεξαρτήτως του φυσικού εντατικού πεδίου.

Στο δίκτυο ασυνεχειών, θα μπρούσαν να δοθούν υψηλές τιμές ορθής **κ**αι διατμητικής δυστροπίας, για να αποφευχθούν οι μετακινήσεις κατά μήκος μιας νοητής ρωγμής. Ωστόσο, το χρονικό βήμα υπολογισμού της αριθμητικής προσομοίωσης, βασίζεται στην τιμή της δυστροπίας. Αν οι τιμές της δυστροπίας είναι πολύ υψηλές, η υπολογιστική διαδικασία θα είναι πολύ αργή. Για μηχανικούς υπολογισμούς, η βέλτιστη τιμή που μπορούν να λάβουν οι τιμές **jkn** και **jks** θα πρέπει να είναι δέκα φορές μικρότερη από την αντίστοιχη ακαμψία των γειτονικών ζωνών. Οι τιμές υπολογίζονται από την εξίσωση:

$$\boldsymbol{k_n \; \kappa\alpha\iota \; k_s \leq 10 \left[\max \left[\frac{K + \frac{4}{3} G}{\Delta z_{min}} \right] \right]} \qquad 4.3$$

όπου:

kn και ks	είναι οι τιμές της ορθής και διατμητικής δυστροπίας
K	είναι το μέτρο συμπίεσης
G	είναι το μέτρο διάτμησης
Δz_{min}	είναι το ελάχιστο πλάτος της παρακείμενης ζώνης



Σχήμα 4.2:Διαστάσεις ζωνών που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της δυστροπίας

Η τιμή που προκύπτει από τη χρήση της σχέσης 4.3 είναι kn=2.3*10^{12} Pa. Ωστόσο, λόγω της μικρής περατότητας των ασυνεχειών, εμποδίζεται η διάδοση του ρευστού που εισρέει, με αποτέλεσμα να πιέζονται τα block του πετρώματος και να οδηγούνται σε γεωμετρικές αλληλοεπικαλύψεις. Η γεωμετρική επικάλυψη μεταξύ των τεμαχών στο UDEC δεν μπορεί να υπερβαίνει μία προκαθορισμένη από το χρήση τιμή. Όταν η αλληλοεπικάλυψη ξεπεράσει την επιτρεπόμενη τότε εμφανίζεται κατά την επίλυση σφάλμα, το οποίο αναφέρεται ως «contact overlap». Για να αποφύγουμε το overlap, θα δώσουμε μεγαλύτερη τιμή ακαμψίας, δηλαδή 3*10^{12} Pa.

Σχετικά με τις παραμέτρους jcoh και jfri στη ρωγμή αποδίδονται μηδενική συνοχή και γωνία τριβής 45°.

Ο υπολογισμός της σταθεράς περατότητας των ασυνεχειών έγινε με χρήση της εξίσωσης

$$\boldsymbol{k_j = \frac{1}{12\mu}} \qquad 4.4$$

όπου:

k_j είναι η σταθερά περατότητας των ασυνεχειών

μ είναι η τιμή του δυναμικού ιξώδους του ρευστού

Στην συγκεκριμένη αριθμητική προσμομοίωση, θεωρείται πως το ρευστό είναι νερό με κινηματικό ιξώδες (ν) 10^{-6} m^2/s και πυκνότητα (ρ) 1000Kg/m^3. Το δυναμικό ιξώδες υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\boldsymbol{\nu = \frac{\mu}{\rho}} \qquad 4.5$$

μ= 10^{-3} Pa*s και αντικαθιστώντας στην εξίσωση 4.5 ο συντελεστής περατότητας ισούται με kj =83.33 $pa^{-1}*s^{-1}$.

Το αρχικό άνοιγμα των ασυνεχειών τίθεται ως azero=2.5*10^{-5}m και το παραμένον άνοιγμα ως ares=2*10^{-5}m.

Τέλος, με την εντολή **set jcondf** , δίνονται οι ίδιες τιμές παραμέτρων και στις νέες επαφές που θα προκύψουν.

Το επόμενο βήμα είναι να καθορισθεί το εντατικό πεδίο με την εντολή **insitu stress**. Το πεδίο είναι ανισότροπο με τιμές των τάσεων σxx= -30*10^6 Pa, σyy=-15*10^6 Pa και σzz= 0 Pa. Η βραχομάζα είναι εξ' ορισμού αδιαπέρατη στο UDEC ενώ και το εξωτερικό όριο του μοντέλου ορίζεται ως αδιαπέρατο μέσω της εντολής **bound imperm**.

Έπειτα πρέπει να οριστεί το είδος του αλγορίθμου ροής που θα χρησιμοποιηθεί μέσω της εντολής **set flow**. Επιλέγεται ο αλγόριθμος συμπιεστής ροής (**crompressible**). Η πυκνότητα του υγρού είναι 1000 Kg/m^3. Με την εντολή **well flow atdomain**, δίνονται ο ρυθμός εισπίεσης (0.0004 m^2/sec) οι συντεταγμένες πάνω στις οποίες θα τοποθετηθεί η γεώτρηση (τοποθετείται στο κέντρο του μοντέλου). Είναι σημαντικό να επισημανθεί ότι το αριθμητικό μοντέλο διαθέτει μια ειδική εντολή, **j5flow**, η οποία για την συγκεκριμένη ανάλυση τίθεται **off**. Αυτό σημαίνει ότι η ροή επιτρέπεται μόνο μέσα από ασυνέχειες ρωγμές που έχουν αστοχήσει είτε σε εφελκυσμό είτε σε διάτμηση. Η εισπίεση του ρευστού θα διαρκέσει 10 sec.

4.2 Αριθμητικά αποτελέσματα

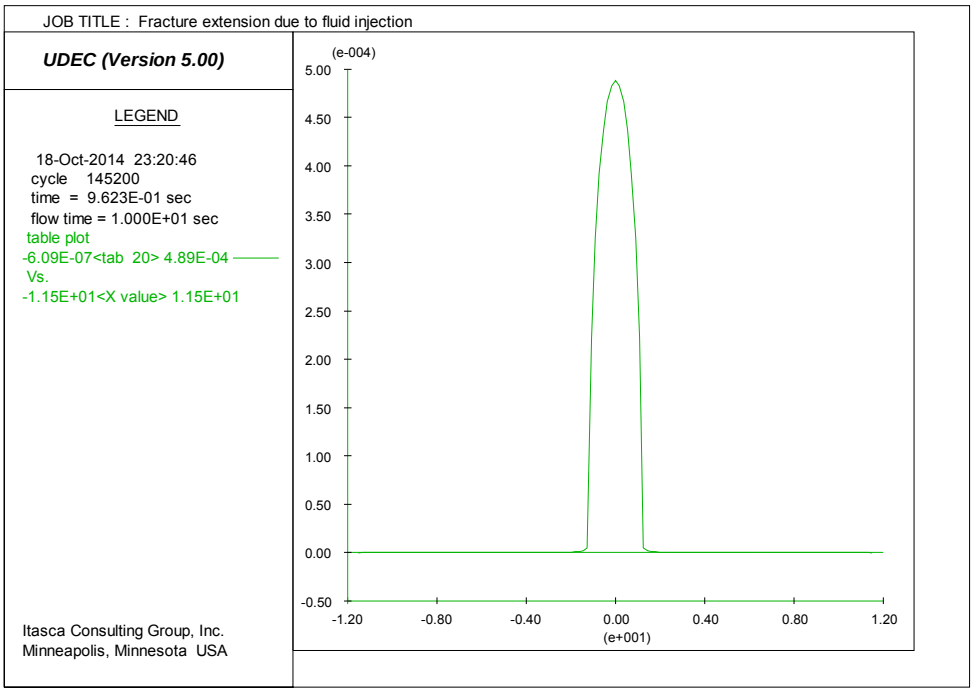
Στην πρώτη σειρά των αριθμητικών μοντέλων, θα παρατηρηθούν οι τιμές που λαμβάνει η πίεση και το πλάτος του ανοίγματος των ασυνεχειών, σε συνάρτηση με τις τιμές του ρυθμού εισπίεσης και του αρχικού ανοίγματος της ρωγμής. Στο βασικό μοντέλο έχει οριστεί η τιμή του ρυθμού εισπίεσης σε 0.0004 m^2/sec και το αρχικό άνοιγμα ίσο με 25 μm. Οι παραμετρικές αναλύσεις που εκτελέσθηκαν περιλαμβάνουν αρχικά τη μείωση του ρυθμού εισπίεσης σε 0.0002 και 0.0001 m^2/sec, διατηρώντας το αρχικό άνοιγμα σε 25μm. Στην συνέχεια, ο ρυθμός εισπίεσης θα διατηρηθεί σε 0.0004 m^2/sec και το αρχικό άνοιγμα θα αυξηθεί σε 50 και 100μm.

4.2.1 Πίεση και άνοιγμα ρωγμής για διάφορους ρυθμούς εισπίεσης

Παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα της πίεσης και του ανοίγματος της ρωγμής για τιμές ρυθμούς εισπίεσης 0.0001, 0.0002, 0.0004 m^2/sec αντίστοιχα.

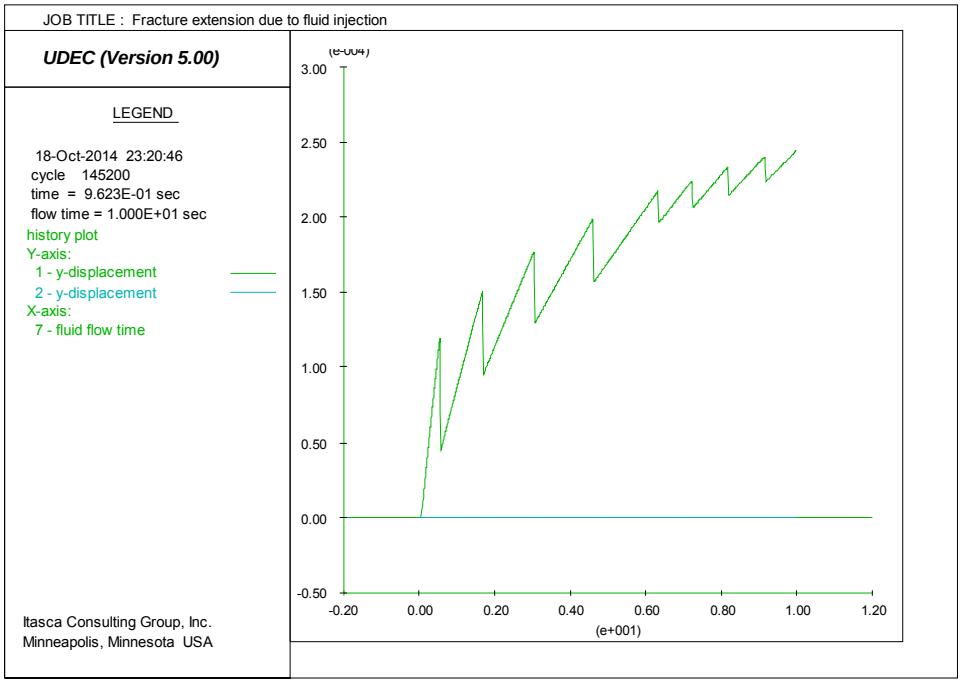
4.2.1.1 Ρυθμός εισπίεσης 0.0001 m^2/sec

Στο Σχήμα 4.3 δίνεται το διάγραμμα κατανομής του εύρους της ρωγμής της υδραυλικής θραύσης. Σύμφωνα με το αυτό, το πλάτος του ανοίγματος της ρωγμής λαμβάνει την μέγιστη τιμή, περίπου 490 μm στη θέση της εισπίεσης. Η υδραυλική θραύση έχει διαδοθεί περίπου 1.2m σε 10 sec. Η ταχύτητα διάδοσης υπολογίζεται σε 0.12m/sec.



Σχήμα 4.3:Άνοιγμα ρωγμής σε συνάρτηση με την απόσταση από τη θέση εισπίεσης

Στο Σχήμα 4.4. δίνεται το διάγραμμα της μεταβολής της ορθής μετατόπισης του τοιχώματος της ρωγμής της υδραυλικής θραύσης σε απόσταση 0.005 m (καμπύλη 1) και 2 m (καμπύλη 2) από τη γεώτρηση. Σύμφωνα με το διάγραμμα, μετά από 10sec η υδραυλική θραύση έχει διαδοθεί σε απόσταση λιγότερη από 2m, με την μέγιστη τιμή της μετατόπισης να είναι 245μm, ίση με το μισό του υδραυλικού ανοίγματος.

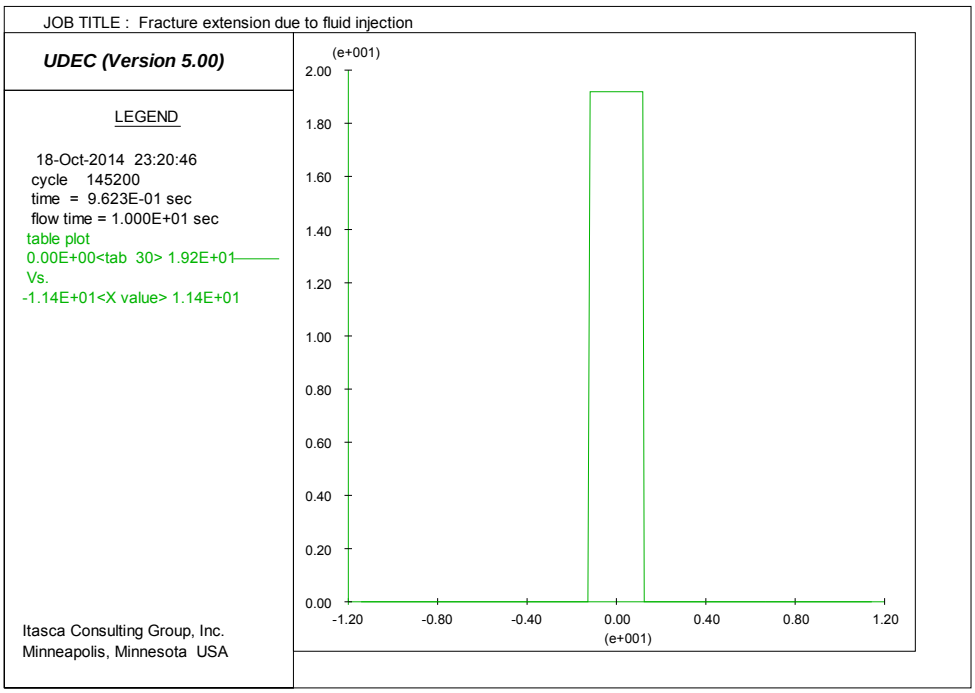


Σχήμα 4.4:Υδραυλικό άνοιγμα της ρωγμής στο αριστερό τμήμα της ρωγμής

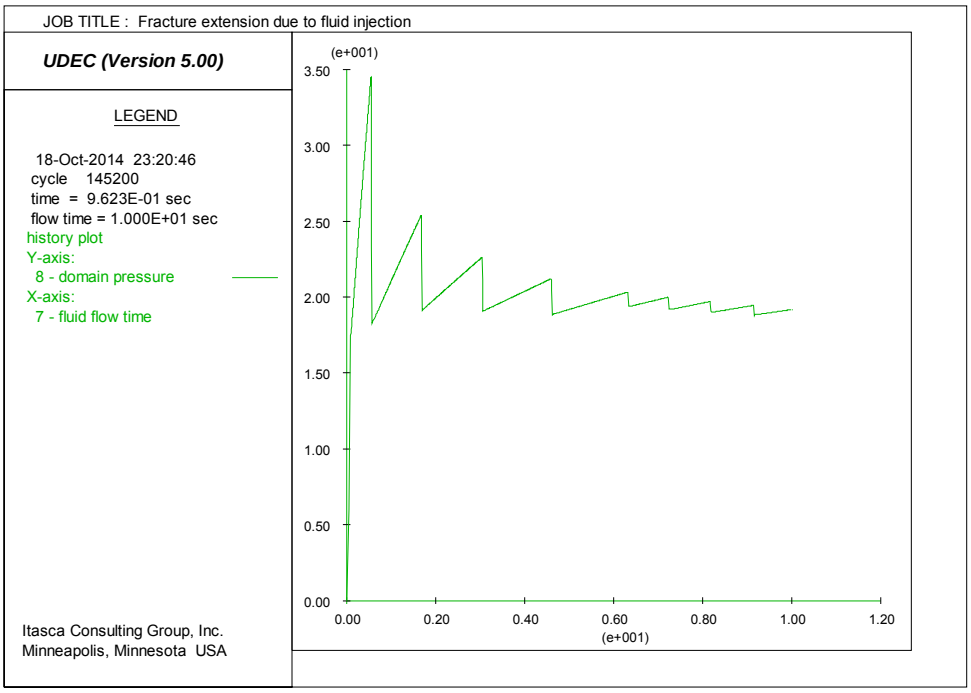
Στο Σχήμα 4.5 δίνεται το διάγραμμα της κατανομής της πίεσης κατά μήκος της ρωγμής της υδραυλικής θραύσης, σε χρόνο εισπίεσης 10 sec. Σύμφωνα με αυτό, η κατανομή της πίεσης είναι ομοιόμορφη στο εύρος της υδραυλικής θραύσης, ενώ η μέγιστη τιμή που λαμβάνει η πίεση (στη θέση εισπίεσης) είναι 19.2 MPa.

Η μεταβολή της πίεσης στη θέση της γεώτρησης δίνεται στο Σχήμα 4.6. Από αυτό, παρατηρείται πολύ υψηλή τιμή της πίεσης στην αρχή της εισπίεσης και σταδιακή μείωση, καθώς η υδραυλική θραύση διαδίδεται και το άνοιγμα της ρωγμής της υδραυλικής θραύσης αυξάνεται.

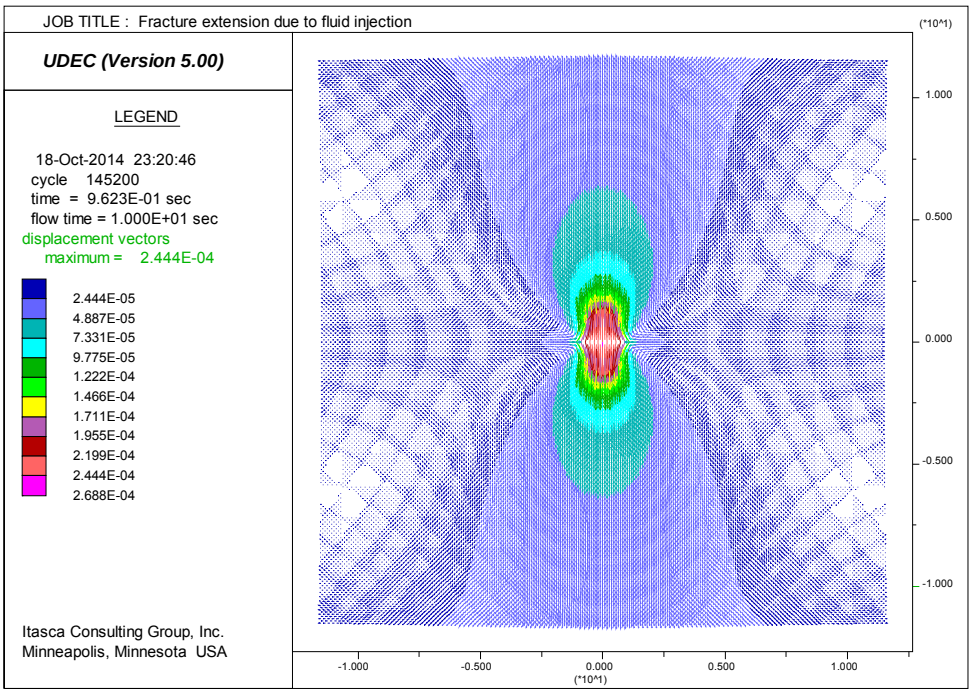
Σχετικά με την διάδοση των διαταραχών στο μοντέλο, από τις τιμές των μετατοπίσεων που δίνονται στο Σχήμα 4.7, παρατηρούνται μικρές μετατοπίσεις πέριξ της περιοχής διάδοσης της υδραυλικής θραύσης.



Σχήμα 4.5:Πίεση σε συνάρτηση με την απόσταση από τη θέση εισπίεσης



Σχήμα 4.6:Η τιμή της πίεσης στο αριστερό τμήμα της ρωγμής για εισπίεση διάρκειας 10sec



Σχήμα 4.7:Απεικόνιση των μετακινήσεων γύρω από τη γεώτρηση

4.2.1.2 Ρυθμός εισπίεσης 0.0002 m²/sec

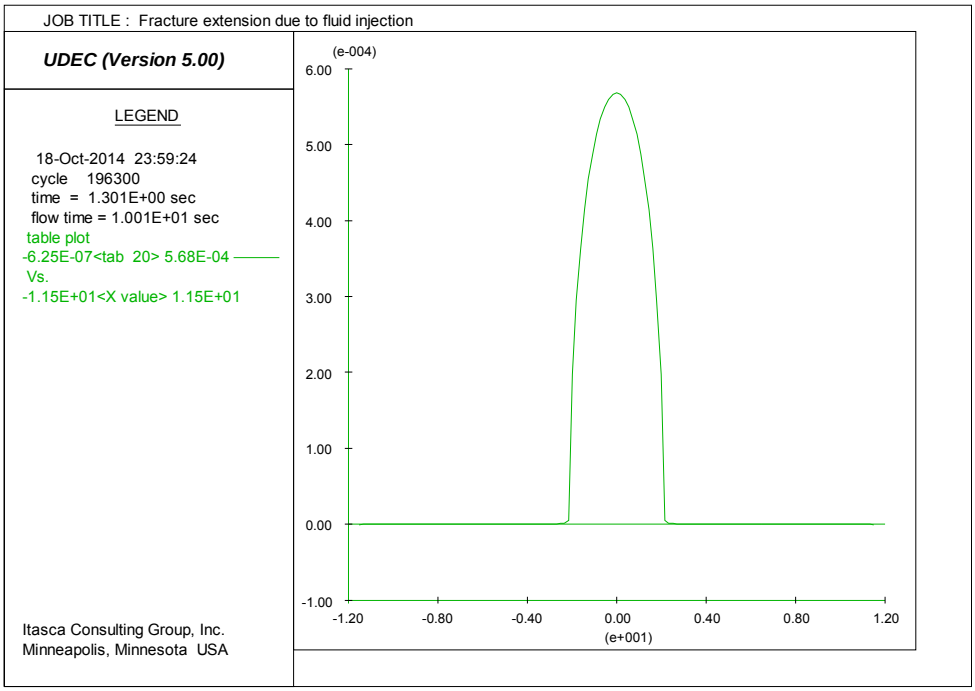
Στο Σχήμα 4.8 δίνεται το διάγραμμα κατανομής του εύρους της ρωγμής της υδραυλικής θραύσης. Σύμφωνα με το αυτό, το πλάτος του ανοίγματος της ρωγμής λαμβάνει την μέγιστη τιμή, περίπου 570 μm στη θέση της εισπίεσης. Η υδραυλική θραύση έχει διαδοθεί περίπου 2,15m σε 10 sec. Η ταχύτητα διάδοσης υπολογίζεται σε 0.215m/sec.

Στο Σχήμα 4.9 δίνεται το διάγραμμα της μεταβολής της ορθής μετατόπισης του τοιχώματος της ρωγμής της υδραυλικής θραύσης σε απόσταση 0.005 m (καμπύλη 1) και 2 m (καμπύλη 2) από τη γεώτρηση. Σύμφωνα με το διάγραμμα, λίγο πριν τα 10sec η υδραυλική θραύση έχει διαδοθεί σε απόσταση 2m, με την μέγιστη τιμή της μετατόπισης να είναι 285μm, ίση με το μισό του υδραυλικού ανοίγματος.

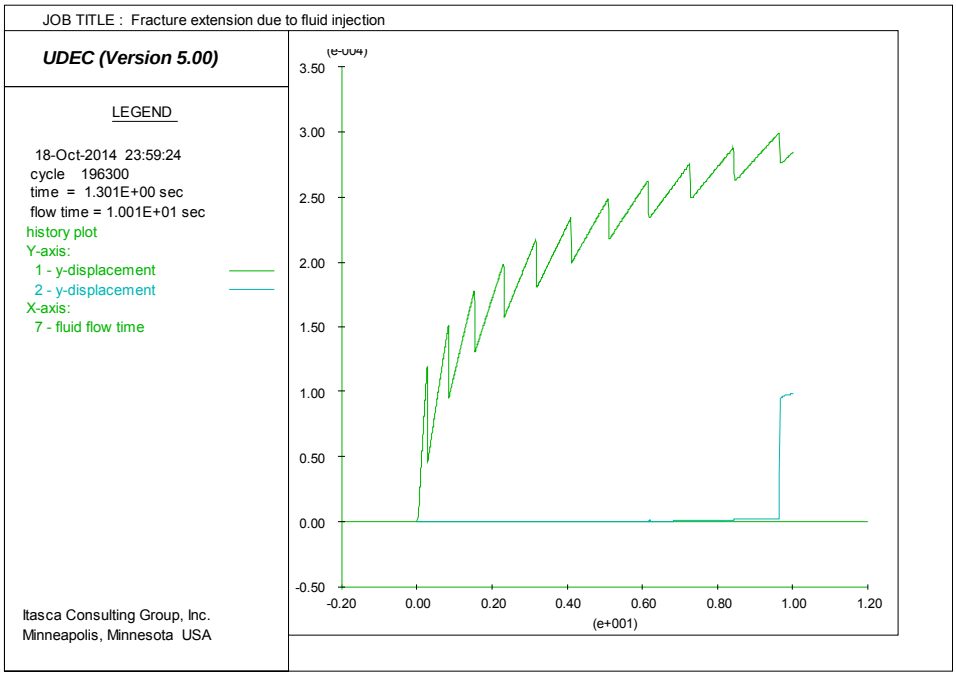
Στο Σχήμα 4.10 δίνεται το διάγραμμα της κατανομής της πίεσης κατά μήκος της ρωγμής της υδραυλικής θραύσης, σε χρόνο εισπίεσης 10 sec. Σύμφωνα με αυτό, η κατανομή της πίεσης είναι ομοιόμορφη στο εύρος της υδραυλικής θαύσης, ενώ η μέγιστη τιμή που λαμβάνει η πίεση (στη θέση εισπίεσης) είναι 17.8 MPa.

Η μεταβολή της πίεσης στη θέση της γεώτρησης δίνεται στο Σχήμα 4.11. Από αυτό, παρατηρείται πολύ υψηλή τιμή της πίεσης στην αρχή της εισπίεσης και σταδιακή μείωση, καθώς η υδραυλική θραύση διαδίδεται και το άνοιγμα της ρωγμής της υδραυλικής θραύσης αυξάνεται.

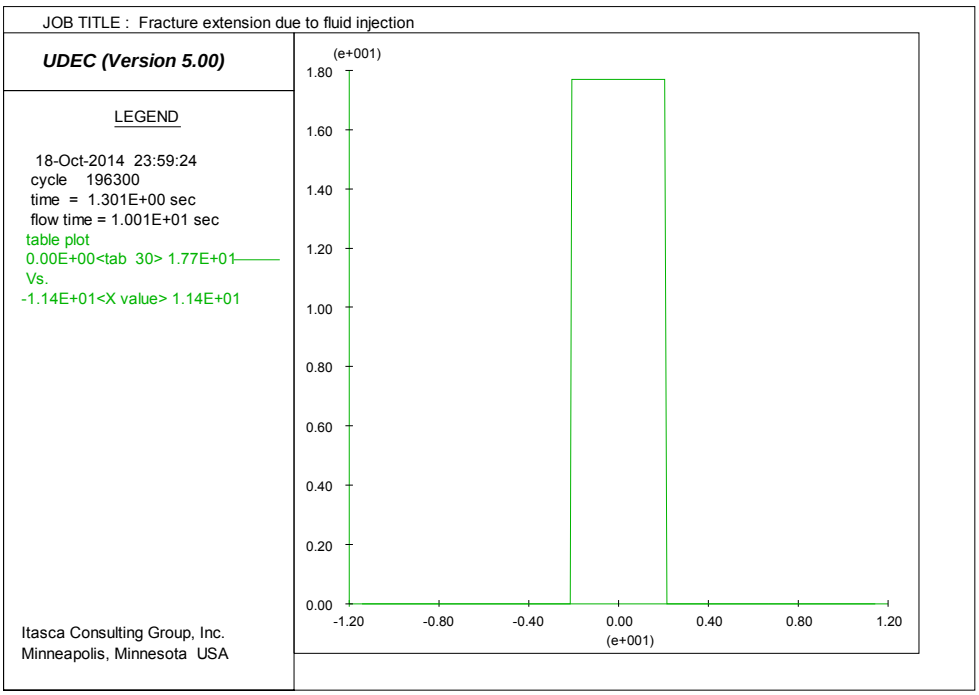
Σχετικά με τη διάδοση των διαταραχών στο μοντέλο, από τις τιμές των μετατοπίσεων που δίνονται στο Σχήμα 4.12, παρατηρούνται μικρές μετατοπίσεις πέριξ της περιοχής διάδοσης της υδραυλικής θραύσης.



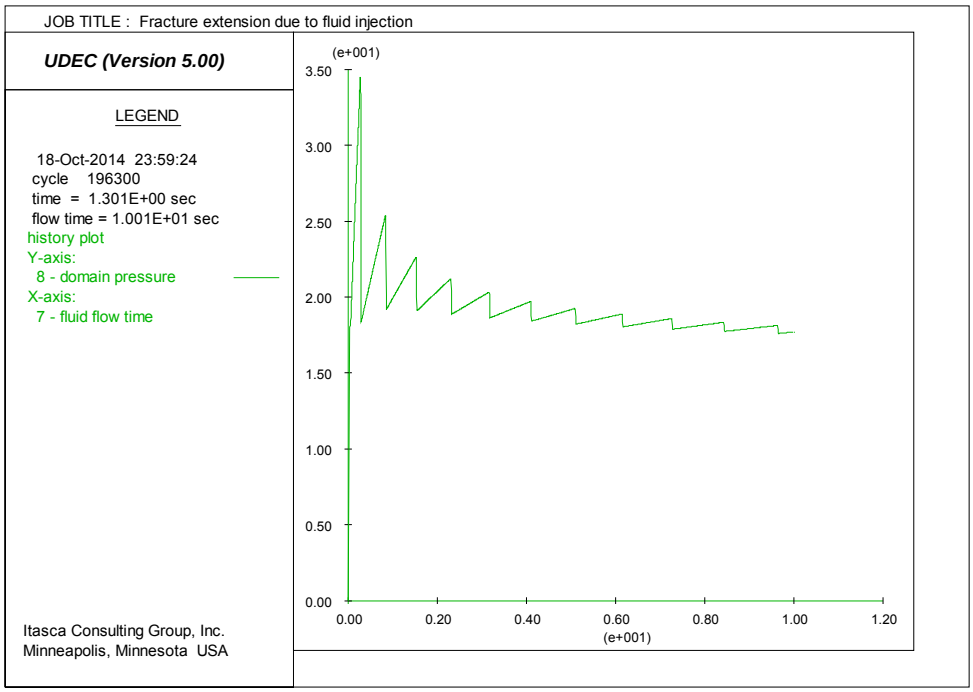
Σχήμα 4.8:Άνοιγμα των ασυνεχειών σε συνάρτηση με την απόσταση από τη γεώτρηση



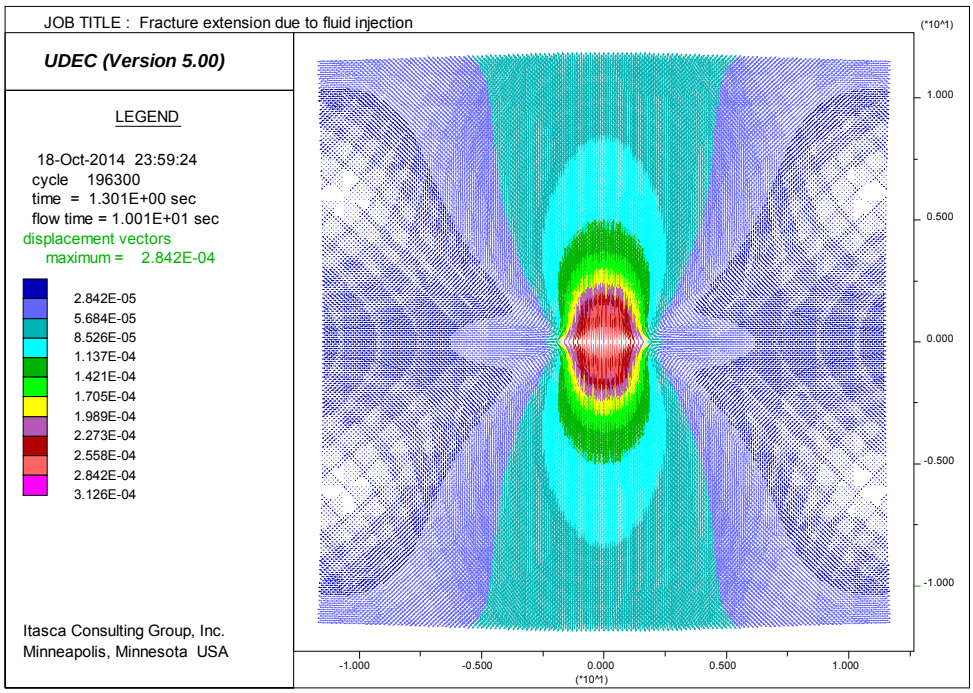
Σχήμα 4.9:Υδραυλικό άνοιγμα της ρωγμής στο αριστερό τμήμα της ρωγμής



Σχήμα 4.10:Πίεση σε συνάρτηση με την απόσταση από τη γεώτρηση



Σχήμα 4.11:Η τιμή της πίεσης στο αριστερό τμήμα της ρωγμής για εισπίεση διάρκειας 10sec



Σχήμα 4.12:Απεικόνιση των μετακινήσεων γύρω από τη γεώτρηση

4.2.1.3 Ρυθμός εισπίεσης 0.0004 m^2/sec

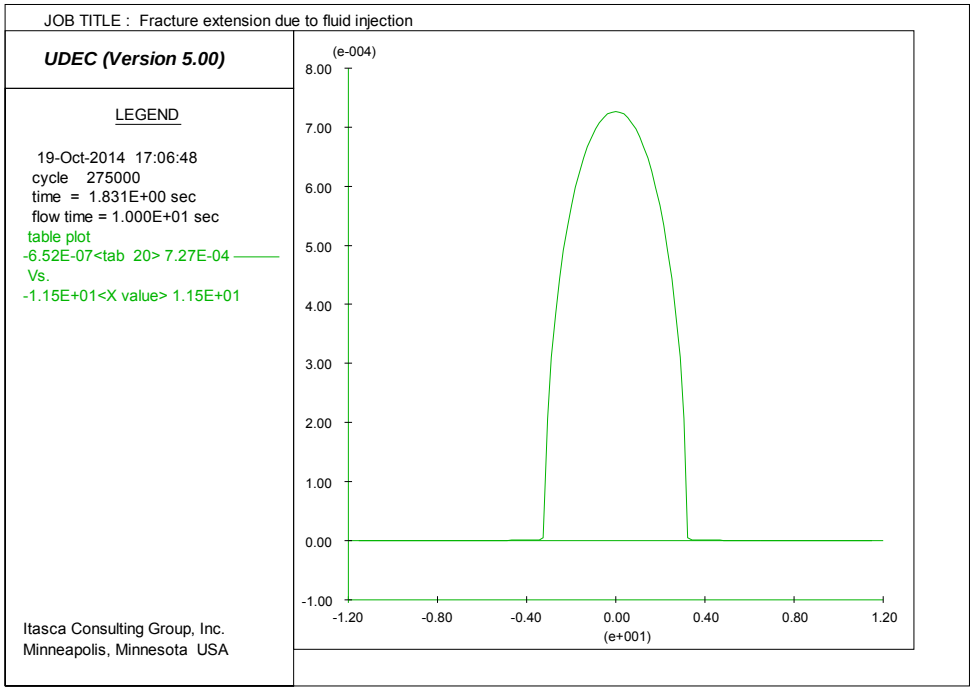
Στο Σχήμα 4.13 δίνεται το διάγραμμα κατανομής του εύρους της ρωγμής της υδραυλικής θραύσης. Σύμφωνα με το αυτό, το πλάτος του ανοίγματος της ρωγμής λαμβάνει την μέγιστη τιμή, περίπου 720 μm στη θέση της εισπίεσης. Η υδραυλική θραύση έχει διαδοθεί περίπου 3,3m σε 10 sec. Η ταχύτητα διάδοσης υπολογίζεται σε 0.33m/sec.

Στο Σχήμα 4.14 δίνεται το διάγραμμα της μεταβολής της ορθής μετατόπισης του τοιχώματος της ρωγμής της υδραυλικής θραύσης σε απόσταση 0.005 m (καμπύλη 1) και 2 m (καμπύλη 2) από τη γεώτρηση. Σύμφωνα με το διάγραμμα, στα 5.5 sec η υδραυλική θραύση έχει διαδοθεί σε απόσταση 2m και παρατηρείται ορθή μετατόπιση 95 μm. Η μέγιστη τιμή της ορθής μετατόπισης είναι 360 μm, ίση με το μισό του υδραυλικού ανοίγματος.

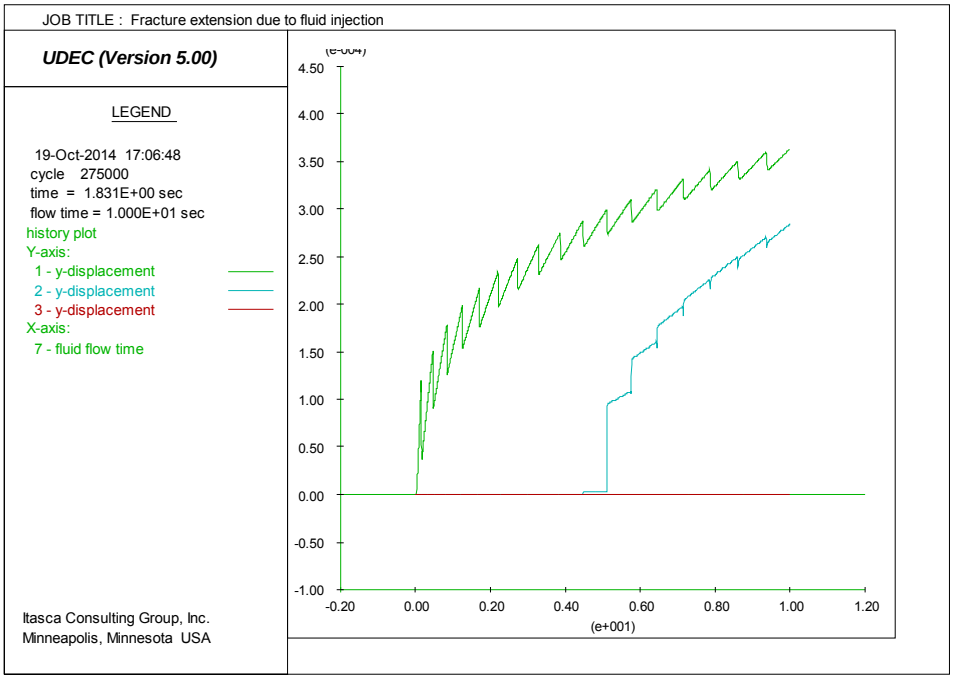
Στο Σχήμα 4.15 δίνεται το διάγραμμα της κατανομής της πίεσης κατά μήκος της ρωγμής της υδραυλικής θραύσης, σε χρόνο εισπίεσης 10 sec. Σύμφωνα με αυτό, η κατανομή της πίεσης είναι ομοιόμορφη στο εύρος της υδραυλικής θαύσης, ενώ η μέγιστη τιμή που λαμβάνει η πίεση (στη θέση εισπίεσης) είναι 17.1 MPa.

Η μεταβολή της πίεσης στη θέση της γεώτρησης δίνεται στο Σχήμα 4.16. Από αυτό, παρατηρείται πολύ υψηλή τιμή της πίεσης στην αρχή της εισπίεσης και σταδιακή μείωση, καθώς η υδραυλική θραύση διαδίδεται και το άνοιγμα της ρωγμής της υδραυλικής θραύσης αυξάνεται.

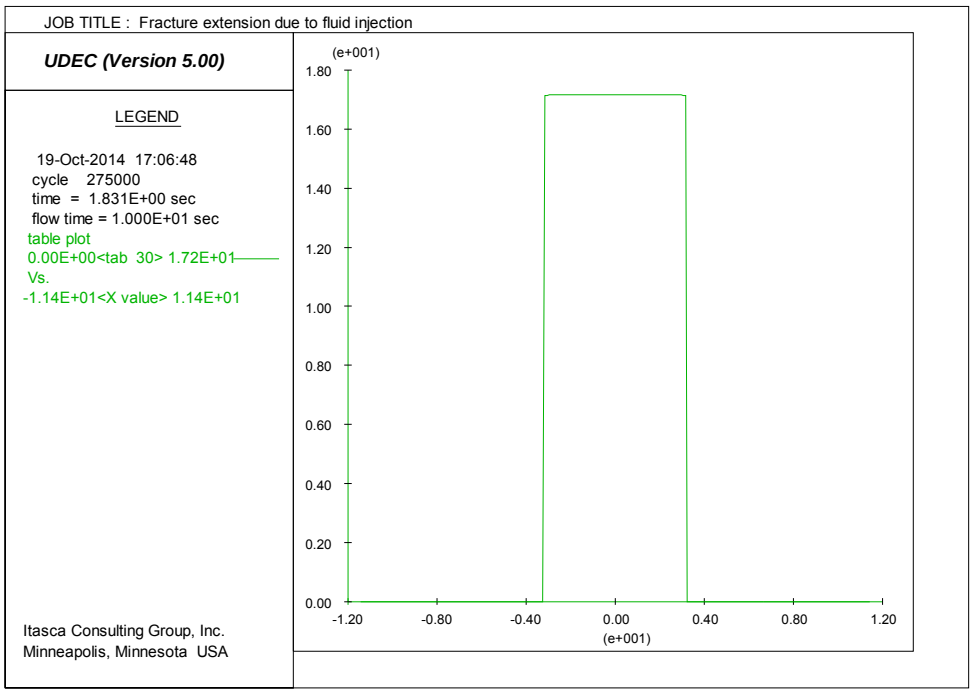
Σχετικά με την διάδοση των διαταραχών στο μοντέλο, από τις τιμές των μετατοπίσεων που δίνονται στο Σχήμα 4.17, παρατηρούνται μετατοπίσεις πέριξ της περιοχής διάδοσης της υδραυλικής θραύσης. Στην περίπτωση αυτή, οι μετατοπίσεις είναι μεγαλύτερες σε σχέση με τους προηγούμενους ρυθμούς εισπίεσης.



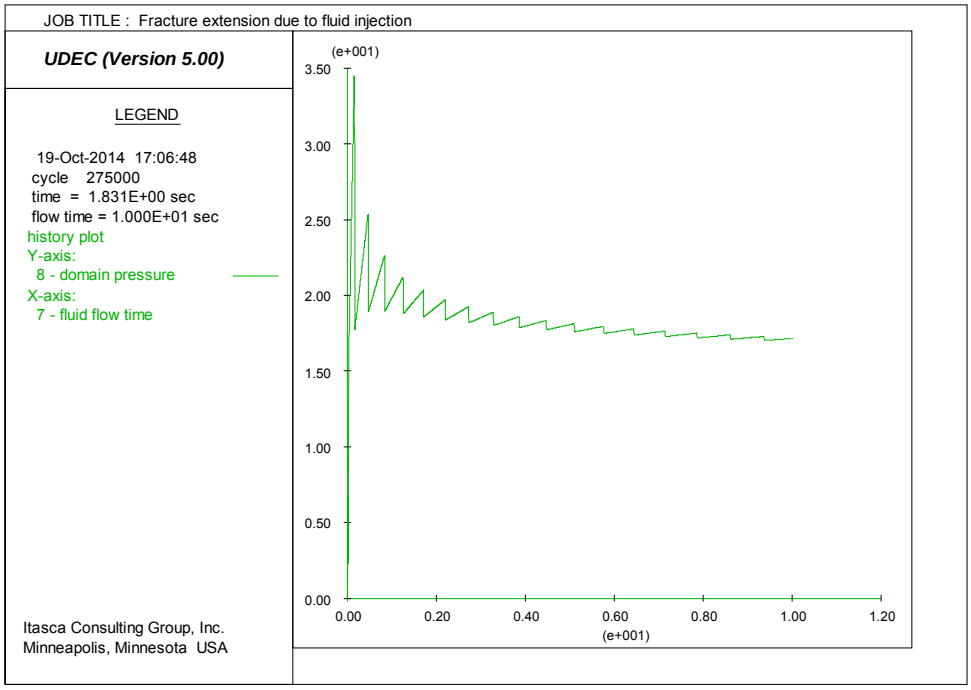
Σχήμα 4.13:Άνοιγμα των ασυνεχειών σε συνάρτηση με την απόσταση από τη γεώτρηση



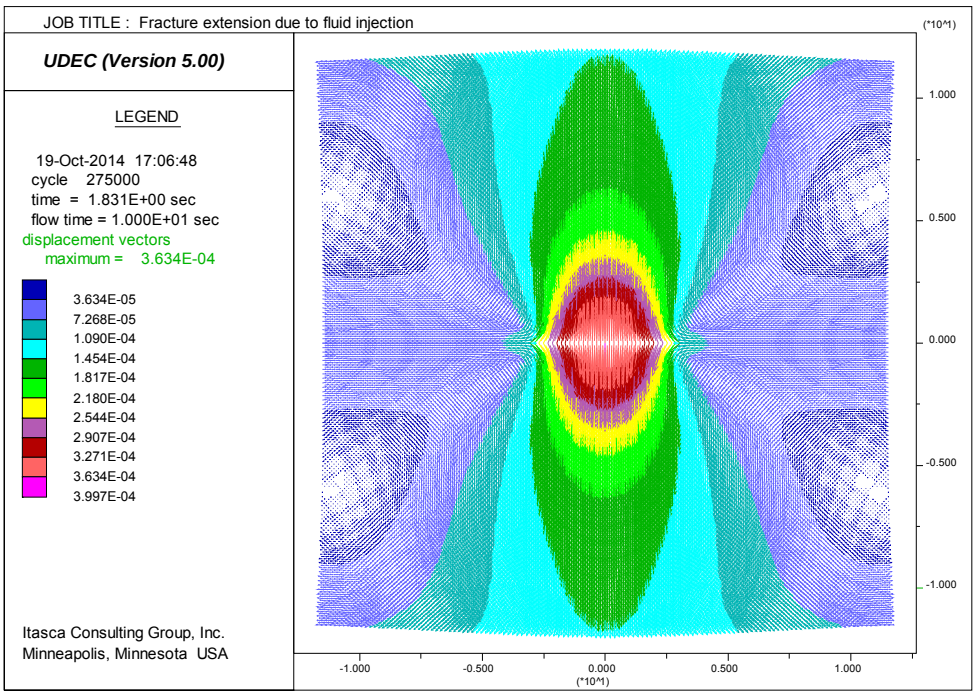
Σχήμα 4.14:Υδραυλικό άνοιγμα της ρωγμής στο αριστερό τμήμα της ρωγμής



Σχήμα 4.15:Πίεση σε συνάρτηση με την απόσταση από τη θέση εισπίεσης



Σχήμα 4.16:Η τιμή της πίεσης στο αριστερό τμήμα της ρωγμής για εισπίεση διάρκειας 10sec



Σχήμα 4.17:Απεικόνιση των μετακινήσεων γύρω από τη γεώτρηση

4.2.1.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων

Με την αύξηση του ρυθμού εισπίεσης $1x10^{-4}$ m^2/sec σε $4x10^{-4}$ m^2/sec παρατηρείται αύξηση της ταχύτητας διάδοσης της υδραυλικής θραύσης από 0.12m/s σε 0.33 m/sec. Αντίστοιχα, η μέγιστη τιμή του πλάτους του ανοίγματος της ρωγμής της υδραυλικής θραύσης αυξάνεται από 490μm σε 720μm, ενώ η τιμή που λαμβάνει η πίεση στη θέση της γεώτρησης σε χρόνο 10 sec μειώνεται από 19.2 σε 17.1 MPa. Επιπλέον, όσο αυξάνεται ο ρυθμός εισπίεσης, παρατηρούνται πιο έντονες μετατοπίσεις γύρω από τη γεώτρηση.

4.2.2 Πίεση και άνοιγμα ρωγμής με τη μεταβολή του αρχικού ανοίγματος

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκαν παραμετρικές δοκιμές με μεταβολή του αρχικού ανοίγματος της ρωγμής. Το βασικό μοντέλο έχει αρχική τιμή ανοίγματος azero=25μm. Η συγκεκριμένη τιμή αυξήθηκε στα 50 και 100μm. Με την πραγματοποίηση των πειραματικών δοκιμών, παρατηρήθηκε ότι τα αποτελέσματα ήταν πανομοιότυπα και δεν υπήρχε κάποια μεταβολή. Το συγκεκριμένο γεγονός οφείλεται στον τρόπο υπολογισμού της πίεσης και του ανοίγματος των ασυνεχειών. Ο αλγόριθμος δεν χρησιμοποιεί στην επίλυση του την μεταβλητή του αρχικού ανοίγματος ασυνεχειών, με συνέπεια να μην παρατηρείται μεταβολή στις τιμές.

Αντίθετα επηρεάζεται από την αλλαγή του ρυθμού εισπίεσης, άρα είναι λογικό να μην υπάρχει κάποια αλλαγή στις τιμές, διατηρώντας σταθερό τον ρυθμό εισπίεσης.

4.2.3 Αλγόριθμος συπιεστής ροής και απαιτούμενος χρόνος επίλυσης μοντέλων

Ο αλγόριθμος συμπιεστής ροής χρησιμοποιείται εξ' ορισμού στο UDEC για την προσομοίωση προβλημάτων μεταβατικής ροής (transient flow analysis). Εντούτοις, οι απαιτήσεις αριθμητικής ευστάθειας του αλγορίθμου, δηλαδή οι απαιτήσεις ώστε ο αλγόριθμος να συγκλίνει σε μία λύση και να μην οδηγείται σε αποτυχία επίλυσης, απαιτούν πολύ μικρά χρονικά βήματα υπολογισμού (της τάξης των ορισμένων (μsec). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μεγάλους απαιτούμενους χρόνους επίλυσης ακόμη και για μικρού μεγέθους προβλήματα. Ο απαιτούμενος χρόνος υπολογισμού για τα μοντέλα της πρώτης σειράς ήταν περίπου 12 ώρες για την προσομοίωση 10 sec ροής. Συνεπώς, η χρήση του αλγορίθμου σε πρακτικά προβλήματα, όπου μπορεί να απαιτούνται μοντέλα μεγάλων διαστάσεων ή προσομοίωση αρκετών ωρών ροής, απαιτεί τεράστιους υπολογιστικούς χρόνους. Για το λόγο αυτό, στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε ένας εναλλακτικός αλγόριθμος που προτείνεται από το UDEC, και καλείται αλγόριθμος ασυμπίεστης ροής. Ο αλγόριθμος αυτός διερευνάται στο επόμενο κεφάλαιο.

5 Δεύτερη σειρά αριθμητικών μοντέλων με αλγόριθμο ασυμπίεστης ροής

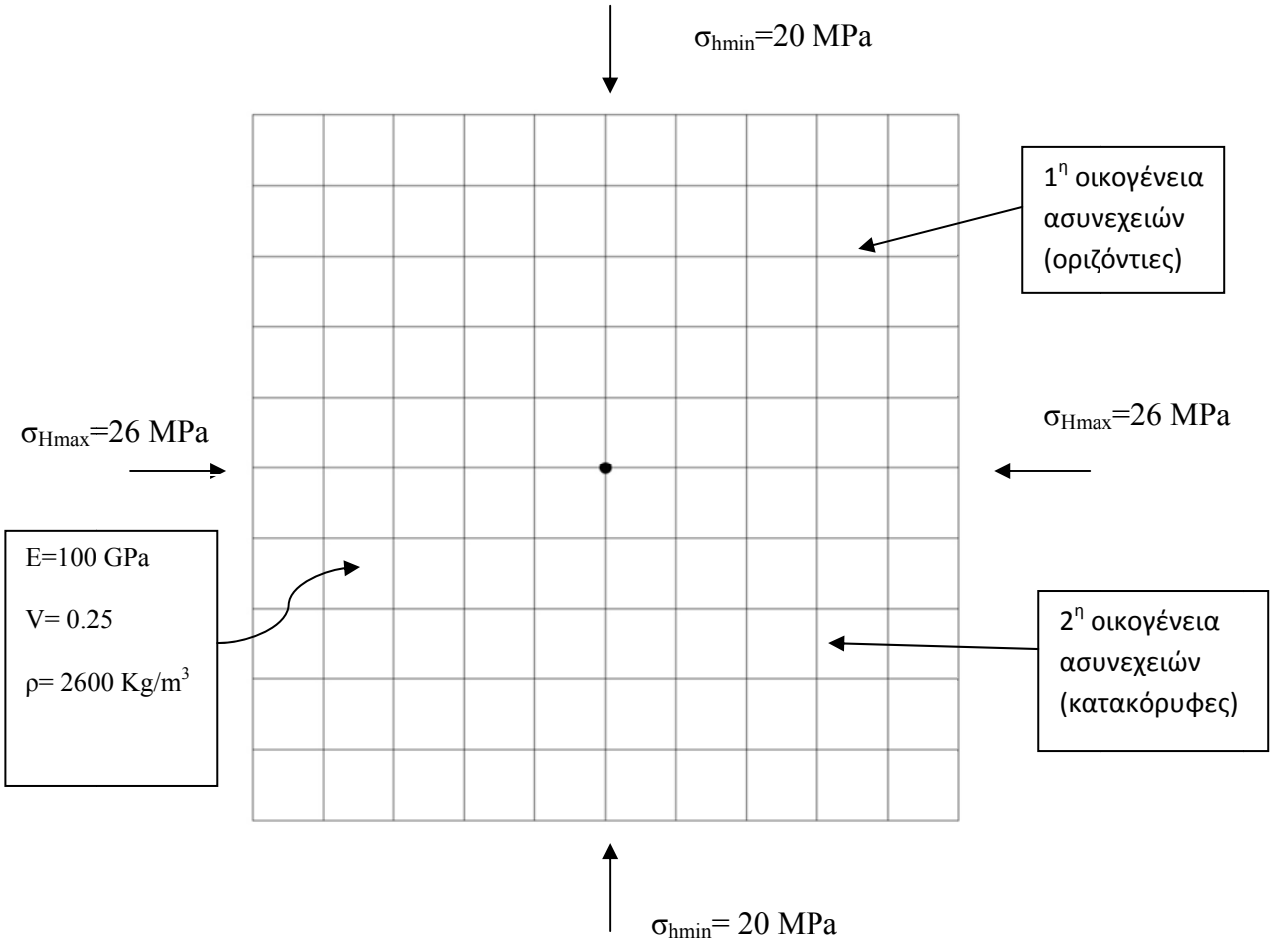
Για τον σχεδιασμό της επόμενης σειράς αριθμητικών μοντέλων, ελήφθηκαν υπ'όψιν τα προβλήματα που προέκυψαν στην προηγούμενη σειρά αριθμητικών μοντέλων. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, με την εφαρμογή του αλγόριθμου συμπιεστής ροής, χρειάστηκαν περίπου 10 ώρες για να προσομοιωθεί το χρονικό διάστημα ενός δευτερολέπτου εισπίεσης του ρευστού. Για την προσομοίωση ενός ικανοποιητικού χρονικού διαστήματος (π.χ. 1 ώρα εισπίεση ρευστού), απαιτείται πολύ μεγάλος υπολογιστικός χρόνος. Επιπλέον, όταν στα προηγούμενα μοντέλα εφαρμόστηκε ένα δίκτυο ασυνεχειών, οι αριθμητικές προσομοιώσεις δεν ήταν δυνατό να ολοκληρωθούν.

Προκειμένου να αντιμετωπιστούν τα προβλήματα που προέκυψαν, αποφασίστηκε να εφαρμοστεί ένας διαφορετικός αλγόριθμος από εκείνο της συμπιεστής ροής που χρησιμοποιήθηκε καθώς οδηγούσε σε δυσανάλογα χρονοβόρες αναλύσεις. Επιλέχθηκε λοιπόν ο αλγόριθμος ασυμπίεστης ροής, ο οποίος μπορεί να επιταχύνει σημαντικά τον υπολογιστικό χρόνο της αριθμητικής ανάλυσης.

Στη δεύτερη σειρά αριθμητικών μοντέλων, εξετάζεται ο αλγόριθμος ασυμπίεσης μεταβατικής ροής στο UDEC με την προσομοίωση της ροής ρευστού σε ένα αραιό δίκτυο ασυνεχειών.

5.1 Προετοιμασία των αριθμητικών μοντέλων

Το μοντέλο του *UDEC*, θα αναπαριστά ένα δισδιάστατο οριζόντιο τμήμα ενός ταμιευτήρα, πάχους 350 m. Οι διαστάσεις του μοντέλου είναι 20x20 m. Η εισπίεση, πραγματοποιείται μέσω μιας κατακόρυφης γεώτρησης που βρίσκεται στο κέντρο του μοντέλου. Το εντατικό πεδίο θεωρείται ανισότροπο. Ο ρυθμός έγχυσης που θα χρησιμοποιηθεί είναι 0.35 m^3/s ή αλλιώς 350 kg ρευστού ανά δευτερόλεπτο. Η συγκεκριμένη τιμή μπορεί να μεταφραστεί σε 132 βαρέλια το λεπτό (bpm).



Σχήμα 5.1 Σχηματική απεικόνιση του αριθμητικού μοντέλου

Για την κατασκευή του μοντέλου, καθορίζεται πρώτα το μήκος στο οποίο θα γίνει η στρογγύλευση των γωνιών των ογκοτεμαχίων. Με την χρήση της εντολής **ROUND**, ορίζεται το μήκος αυτό σε 0.001m. Μέσω της εντολής **EDGE** ορίζεται η ελάχιστη τιμή του μήκους της πλευράς κάθε ογκοτεμαχίου σε 0.002 m. Στην συνέχεια, με την εντολή **BLOCK**, κατασκευάζεται το δισδιάστατο τμήμα του ταμιευτήρα, διαστάσεων 20x20 m. Στην συνέχεια, για την απεικόνιση του δικτύου ασυνεχειών, χρησιμοποιείται η εντολή **JSET**. Θα κατασκευαστούν δύο οικογένειες ασυνεχειών, κάθετες μεταξύ τους, σε μορφή πλέγματος. Η πρώτη οικογένεια ασυνεχειών κατασκευάζεται οριζόντια (**ANGLE** 0°) , ενώ η δεύτερη, με γωνία 90° (**ANGLE** 90°). Οι ασυνέχειες έχουν απόσταση μεταξύ τους 2.5m (**SPACING** 2.5) και έχουν αφετηρία το κέντρο του ταμιευτήρα (**ORIGIN** 0.0). Τέλος, μέσω της εντολής **GENERATE EDGE,** πραγματοποιείται η διακριτοποίηση του μοντέλου σε ζώνες πεπερασμένων διαφορών.

Το επόμενο βήμα είναι η εισαγωγή της πυκνότητας, και των ελαστικών σταθερών του άρρηκτου πετρώματος. Η πυκνότητα είναι 2600 kg/m^3, το μέτρο ελαστικότητας 100 GPa και ο λόγος poisson 0.25. Το μέτρο συμπίεσης K (bulk modulus) και το μέτρο διάτμησης G (shear modulus), υπολογίζονται από τους τύπους:.

$$\boldsymbol{K = \frac{E}{3(1-2\nu)}} \qquad 5.1$$

όπου:

K είναι το bulk modulus

E είναι το μέτρο ελαστικότητας

ν είναι ο λόγος poisson

$$\boldsymbol{G = \frac{E}{2(1+\nu)}} \qquad 5.2$$

όπου:

G είναι το shear modulus

E είναι το μέτρο ελαστικότητας

ν είναι ο λόγος poisson

Εισάγονται λοιπόν στο πρόγραμμα οι τιμές **dens** 2600 Kg/m^3, **bulk** 66.67*10^9 Pa και **shear** 40*10^9 Pa.

Στην συνέχεια, ορίζονται οι μηχανικές ιδιότητες των ασυνεχειών. Με την εντολή **joint** ορίζονται οι παρακάτω παράμετροι:

- jkn: η τιμή της ορθής δυστροπίας (joint normal stiffness)
- jks: η τιμή της διατμητικής δυστροπίας (joint shear stiffness)
- jcoh: η τιμή της συνοχής
- jfric: η γωνία τριβής των ασυνεχειών
- jten: η αντοχή σε εφελκυσμό
- jperm: η σταθερά περατότητας των ασυνεχειών που χρησιμοποιείται στο UDEC για αριθμητικές προσομοιώσεις ροής
- azero: το αρχικό άνοιγμα των ασυνεχειών υπό μηδενική ορθή τάση

- ares: το παραμένον άνοιγμα των ασυνεχειών. Το άνοιγμα των ασυνεχειών δεν μπορεί να μειωθεί κάτω του ares ανεξαρτήτως του φυσικού εντατικού πεδίου.

Στο δίκτυο ασυνεχειών, θα μπορούσαν να δοθούν υψηλές τιμές ορθής και διατμητικής δυστροπίας (normal και shear stiffness), για να αποφευχθούν οι ορθές και διατμητικές μετατοπίσεις στα επίπεδα των ασυνεχειών. Ωστόσο, το χρονικό βήμα υπολογισμού της αριθμητικής προσομοίωσης, βασίζεται στην τιμή της δυστροπίας. Αν οι τιμές της δυστροπίας είναι πολύ υψηλές, η υπολογιστική διαδικασία θα είναι πολύ αργή. Για μηχανικούς υπολογισμούς, η βέλτιστη τιμή που μπορούν να λάβουν οι τιμές **jkn** και **jks** θα πρέπει να είναι δέκα φορές μικρότερη από την αντίστοιχη ακαμψία των γειτονικών ζωνών. Οι τιμές υπολογίζονται από την εξίσωση 5.3:

$$\boldsymbol{k_n \; \kappa\alpha\iota \; k_s \leq 10 \left[\max \left[\frac{K + \frac{4}{3} G}{\Delta z_{min}} \right] \right]} \qquad 5.3$$

όπου:

kn και ks	είναι οι τιμές της joint και shear stiffness
K	είναι το bulk modulus
G	είναι το shear modulus
Δzmin	είναι το ελάχιστο πλάτος της παρακείμενης ζώνης

Η τιμή που προκύπτει από τη χρήση της παραπάνω σχέσης είναι kn=1.2*10^{11} Pa. Ωστόσο, λόγω της μικρής περατότητας των ασυνεχειών, εμποδίζεται η διάδοση του ρευστού που εισρέει, με αποτέλεσμα να πιέζονται τα block του πετρώματος και να οδηγούνται σε γεωμετρικές αλληλοεπικαλύψεις. Η γεωμετρική επικάλυψη μεταξύ των τεμαχών στο UDEC δεν μπορεί να υπερβαίνει μία προκαθορισμένη από το χρήση τιμή. Όταν η αλληλοεπικάλυψη ξεπεράσει την επιτρεπόμενη τότε εμφανίζεται σφάλμα contact overlap.Για να αποφύγουμε το overlap, θα δώσουμε μεγαλύτερη τιμή δυστροπίας, δηλαδή 2*10^{11} Pa. Για τον ίδιο λόγο, η ρωγμή, έχει μηδενική συνοχή και αντοχή σε εφελκυσμό και γωνία τριβής 30°. Ο υπολογισμός της σταθεράς περατότητας των ασυνεχειών έγινε με χρήση της εξίσωσης

$$\boldsymbol{k_j = \frac{1}{12\mu}} \qquad 5.4$$

όπου:

kj είναι η σταθερά περατότητας των ασυνεχειών

μ είναι η τιμή του δυναμικού ιξώδους του ρευστού

Στην συγκεκριμένη αριθμητική προσμομοίωση, θεωρείται πως το ρευστό είναι νερό με κινηματικό ιξώδες (ν) 10^{-6} m^2/s και πυκνότητας (ρ) 1000 kg/m^3. Το δυναμικό ιξώδες υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\boldsymbol{\nu = \frac{\mu}{\rho}} \qquad 5.5$$

μ= 10^{-3} Pa*s και αντικαθιστώντας στην εξίσωση 5.4 ο συντελεστής περατότητας ισούται με 83.33 $pa^{-1}.s^{-1}$.

Το αρχικό άνοιγμα των ασυνεχειών τίθεται ως azero=1*10^{-4}m και το παραμένον άνοιγμα ως ares=2*10^{-5}m.

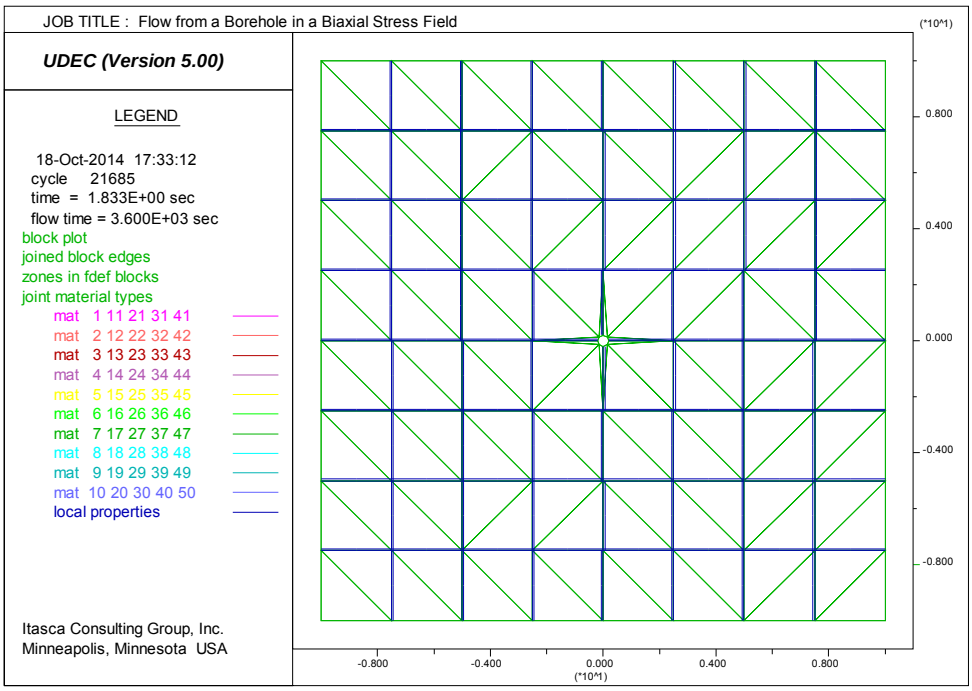
Τέλος, με την εντολή **set jcondf** , δίνονται οι ίδιες τιμές παραμέτρων και στις νέες επαφές που θα προκύψουν.

Το επόμενο βήμα είναι να καθοριστεί το εντατικό πεδίο με την εντολή **insitu stress**. Το πεδίο είναι ανισότροπο με τιμές των τάσεων σxx=-25*10^6 Pa, σyy=-20*10^6 Pa και σzz=0 Pa. Το εξωτερικό όριο του μοντέλου ορίζεται ως αδιαπέρατο μέσω της εντολής **bound imperm**. Έπειτα πρέπει να οριστεί το είδος του αλγορίθμου ροής που θα χρησιμοποιηθεί μέσω της εντολής **set flow**. Επιλέγεται ο αλγόριθμος ασυμπιεστής ροής (**incrompressible**). Η πυκνότητα του υγρού είναι 1000 kg/m^3. Με την εντολή **well flow atdomain**, δίνονται ο ρυθμός εισπίεσης (0.001 m^2/sec/m) και οι συντεταγμένες πάνω στις οποίες θα τοποθετηθεί η γεώτρηση (τοποθετείται στο κέντρο του μοντέλου). Είναι σημαντικό να επισημανθεί ότι το αριθμητικό μοντέλο διαθέτει μια ειδική εντολή, **j5flow**, η οποία για την συγκεκριμένη ανάλυση τίθεται

off. Αυτό σημαίνει ότι η ροή επιτρέπεται να ρέει μόνο μέσα από ασυνέχειες που έχουν αστοχήσει είτε σε διάτμηση είτε σε εφελκυσμό. Η εισπίεση του ρευστού θα διαρκέσει 30 sec.

5.2 Αριθμητικά αποτελέσματα

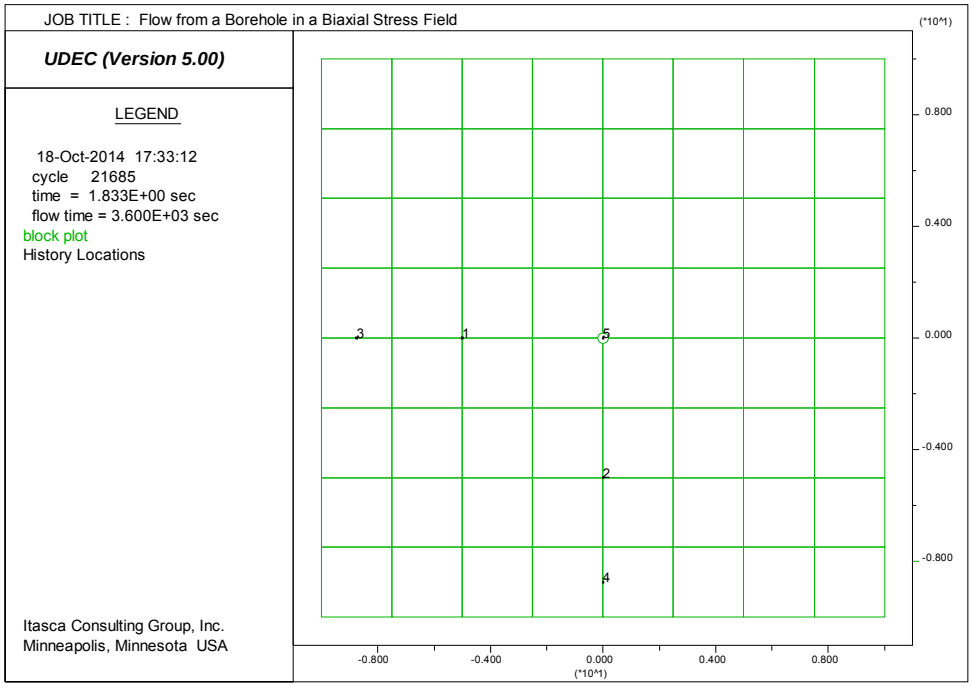
Στο Σχήμα 5.2 παρουσιάζεται το μοντέλο του UDEC, μιας δισδιάστατης τομής ενός ταμιευτήρα, διαστάσεων 20x20 m, με δύο οικογένειες ασυνεχειών, οριζόντιες και κατακόρυφες (μπλε χρώμα). Στο κέντρο του μοντέλου έχει ορυχθεί γεώτρηση, μέσω της οποίας εισπιέζεται ρευστό με σταθερό ρυθμό.



Σχήμα 5.2:Μοντέλο τομής δισδιάστατου ταμιευτήρα 20x20 m

Για διάρκεια εισπίεσης ρευστού 30 sec, θα παρατηρηθεί η πορεία της ροής, το άνοιγμα των ασυνεχειών και θα ληφθούν οι τιμές της πίεσης, σε διάφορα σημεία του ταμιευτήρα, σε συνάρτηση με τον χρόνο. Στο σχήμα 5.3 φαίνονται τα σημεία στα οποία λαμβάνονται τιμές για την πίεση. Τα σημεία 1 και 3 βρίσκονται πάνω στην οριζόντια ρωγμή, τα σημεία 2 και 4 βρίσκονται πάνω στην κάθετη ρωγμή και το σημείο 5 έχει τοποθετηθεί στο κέντρο του μοντέλου (στην γεώτρηση). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η πίεση, έπειτα από κάποιο χρονικό διάστημα, σταθεροποιείται.Ο υπολογισμός των αριθμητικών μοντέλων έγινε για χρονικό διάστημα εισπίεσης διάρκειας 30 sec. Η συμπεριφορά της πίεσης παρατηρήθηκε και για ένα μεγαλύτερο

χρονικό διάστημα, διάρκειας 1 ώρας, όμως τα αποτελέσματα δεν διαφέρουν από εκείνα των 30 sec καθώς το μοντέλο φθάνει σε μία σταθερή κατάσταση.



Σχήμα 5. 3:Τα σημεία από τα οποία λαμβάνεται η τιμή της πίεσης σε συνάρτηση με τον χρόνο

Το βασικό αριθμητικό μοντέλο επιλύθηκε για τιμή του ρυθμού εισπίεσης $1*10^{-3}$ m^2/sec.

5.2.1 Αποτελέσματα παραμετρικών δοκιμών με μεταβολή του ρυθμού εισπίεσης

Σε πρώτη φάση, θα εξεταστεί η επιρροή του ρυθμού εισπίεσης (injection rate), στην πορεία της ροής, στο άνοιγμα των ασυνεχειών και στην διακύμανση της πίεσης. Οι τιμές που θα δοθούν στον ρυθμό εισπίεσης είναι:

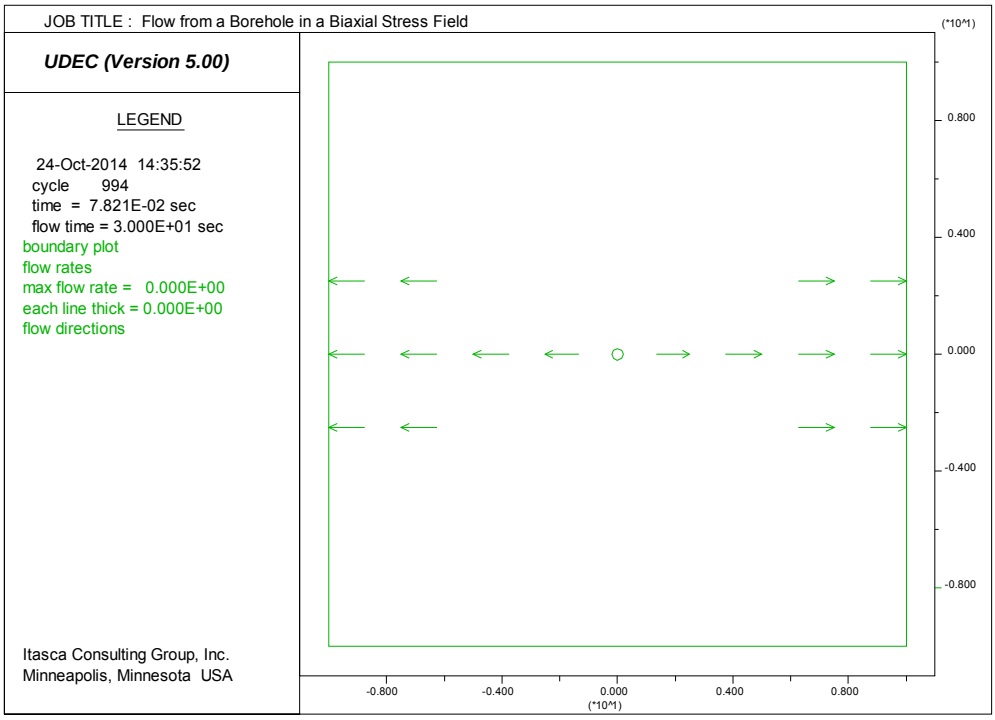
1. $1*10^{-4}$ m^2/sec [(0.035 m^3/sec) / (350m)]
2. $2*10^{-4}$ m^2/sec [(0.07 m^3/sec) /(350m)]
3. $4*10^{-4}$ m^2/sec [(0.07 m^3/sec) /(350m)]
4. $1*10^{-3}$ m^2/sec [(0.35 m^3/sec) /(350m)]
5. $1.5*10^{-3}$ m^2/sec [(0.525 m^3/sec) /(350m)]
6. $2*10^{-3}$ m^2/sec [(0.7 m^3/sec) /(350m)]

Παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα των πειραματικών δοκιμών. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η λήψη των τιμών έγινε σε δύο διαφορετικά χρονικά διαστηματα και συγκεκριμένα για εισπίεση διάρκειας 30sec (μέχρι να σταθεροποιηθεί η πίεση) και 3600sec.

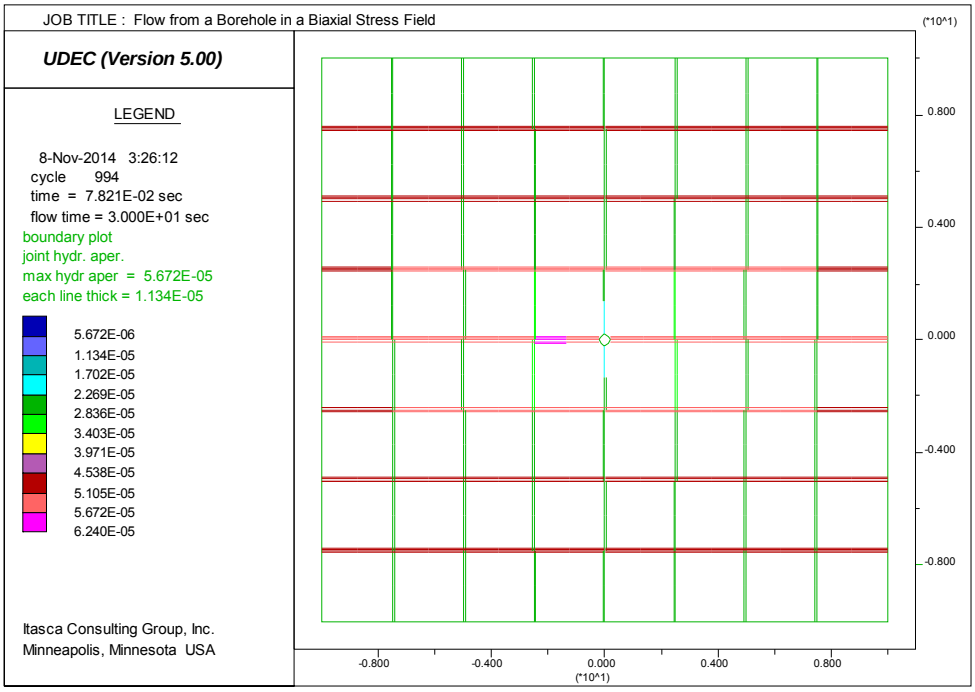
5.2.1.1 Ρυθμός εισπίεσης $1*10^{-4}$ m^2/sec

Στο Σχήμα 5.4 δίνονται τα διανύσματα της ροής στις ασυνέχειες του μοντέλου για διάρκεια εισπίεσης 30 sec. Όπως παρατηρείται, κοντά στη γεώτρηση η ροή εμφανίζεται στη κεντρική οριζόντια ασυνέχεια. Σε απόσταση 6 m από τη γεώτρηση εμφανίζεται ροή και στις δύο εκατέρωθεν οριζόντιες ασυνέχειες. Επιπλέον από την επισκόπηση του μοντέλου προέκυψε ότι κατά μήκος της οριζόντιας ασυνέχειας η ροή μειώνεται με την αύξηση της απόστασης από τη γεώτρηση σταδιακά προς τα όρια του μοντέλου.

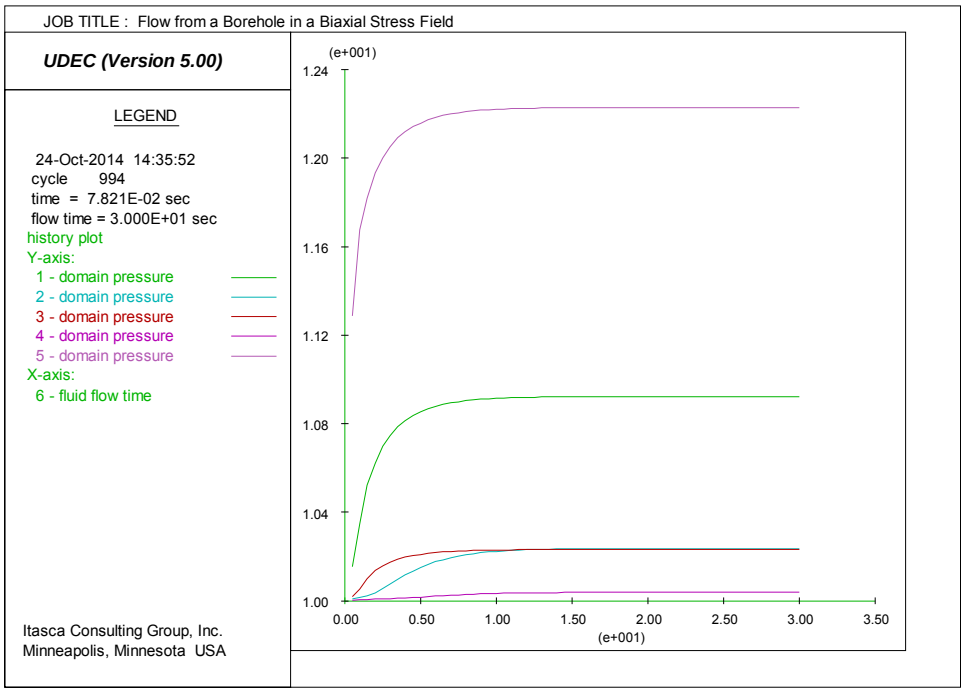
Στο Σχήμα 5.5 δίνεται η εικόνα του υδραυλικού ανοίγματος των ασυνεχειών του μοντέλου. Παρατηρείται ότι, οι ασυνέχειες στις οποίες εμφανίζεται ροή, παρουσιάζουν το μεγαλύτερο υδραυλικό άνοιγμα.Η μέγιστη τιμή του υδραυλικού ανοίγματος είναι 56.7μm στη κεντρική οριζόντια ασυνέχεια πλησίον της γεώτρησης. Στο κάθετο σύστημα ασυνεχειών, στο οποίο δεν εμφανίζεται ροή, το υδραυλικό άνοιγμα είναι κοντά στην τιμή ares (παραμένον υδραυλικό άνοιγμα).



Σχήμα 5.4:Διεύθυνση της ροής για εισπίεση διάρκειας 30 sec



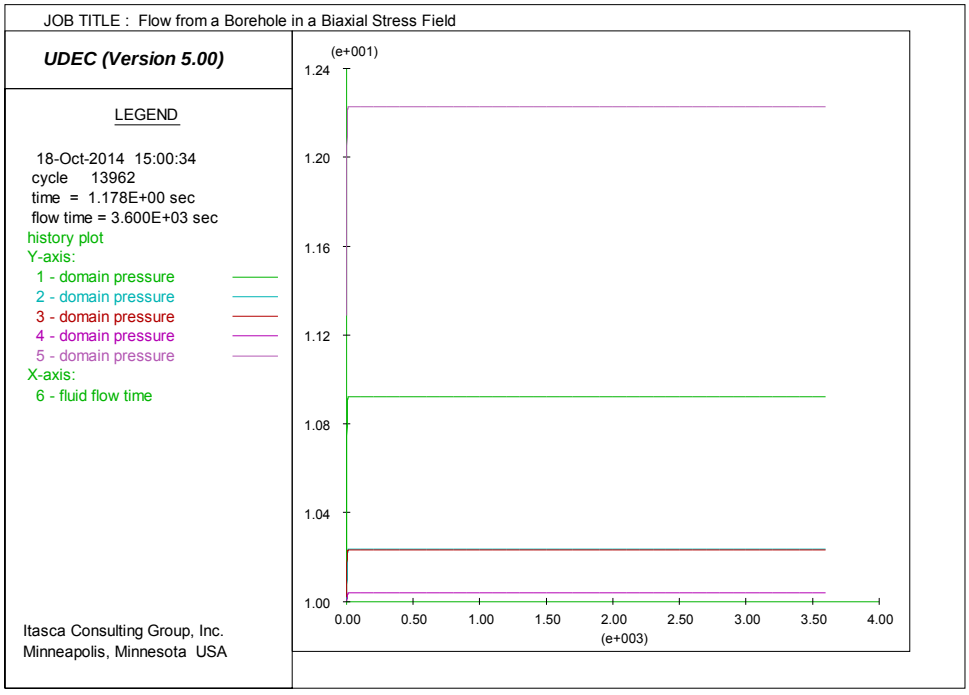
Σχήμα 5.5:Υδραυλικό άνοιγμα των ασυνεχειών για εισπίεση διάρκειας 30 sec



Σχήμα 5.6:Διακύμανση της πίεσης στα διάφορα σημεία του ταμιευτήρα για εισπίεση διάρκειας 30 sec

Στο Σχήμα 5.6 δίνεται το διάγραμμα μεταβολής της πίεσης στα 5 σημεία καταγραφής συναρτήσει του χρόνου εισπίεσης. Σύμφωνα με το διάγραμμα, στη κεντρική οριζόντια ασυνέχεια η μέγιστη τιμή της πίεσης κυμαίνεται ανάμεσα στα 10.2 MPa (σημείο 3) και 10.9 MPa (σημείο 1), ενώ στη κάθετη ρωγμή η μέγιστη τιμή κυμαίνεται ανάμεσα στα 10 MPa περίπου (σημείο 4) και στα 10.22 MPa (σημείο 2). Στη γεώτρηση η μέγιστη τιμή της πίεσης είναι 12.2 MPa. Παρατηρείται μια μείωση

της πίεσης, όσο απομακρυνόμαστε από τη γεώτρηση και στην οριζόντια και στην κατακόρυφη ρωγμή. Από το Σχήμα 5.7, στο οποίο δίνεται η τιμή της πίεσης στα πέντε σημεία καταγραφής σε χρόνο 1 ώρας, παρατηρείται ότι η πίεση αφού λάβει τη μέγιστη τιμή της σε κάθε σημείο, σταθεροποιείται.

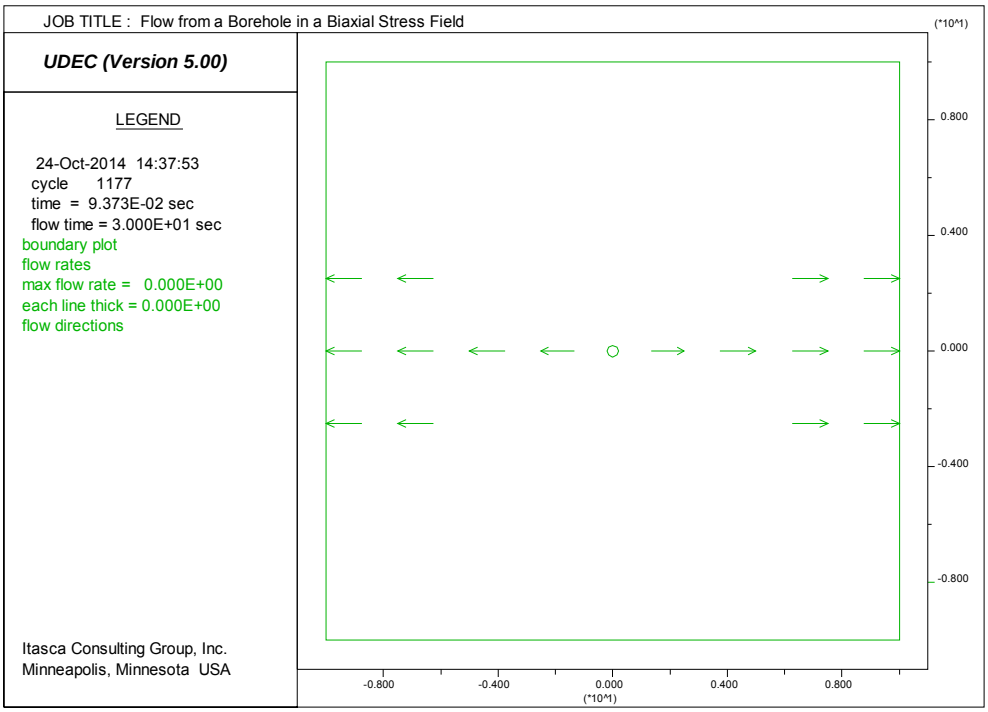


Σχήμα 5.7:Διακύμανση της πίεσης στα διάφορα σημεία του ταμιευτήρα για εισπίεση διάρκειας 3600 sec

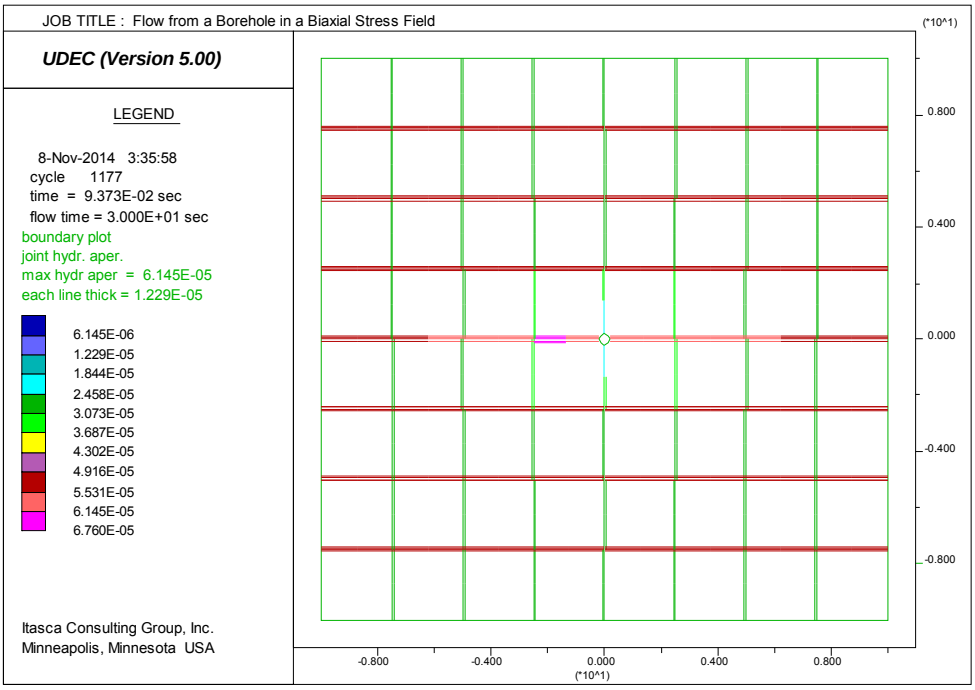
5.2.1.2 Ρυθμός εισπίεσης $2*10^{-4}$ m^2/sec

Στο Σχήμα 5.8 δίνονται τα διανύσματα της ροής στις ασυνέχειες του μοντέλου για διάρκεια εισπίεσης 30 sec. Όπως παρατηρείται, κοντά στη γεώτρηση η ροή εμφανίζεται στη κεντρική οριζόντια ασυνέχεια. Σε απόσταση 6 m από τη γεώτρηση εμφανίζεται ροή και στις δύο εκατέρωθεν οριζόντιες ασυνέχειες. Επιπλέον από την επισκόπηση του μοντέλου προέκυψε ότι κατά μήκος της οριζόντιας ασυνέχειας η ροή μειώνεται με την αύξηση της απόστασης από τη γεώτρηση σταδιακά προς τα όρια του μοντέλου.

Στο Σχήμα 5.9 δίνεται η εικόνα του υδραυλικού ανοίγματος των ασυνεχειών του μοντέλου. Παρατηρείται ότι, οι ασυνέχειες στις οποίες εμφανίζεται ροή, παρουσιάζουν το μεγαλύτερο υδραυλικό άνοιγμα. Η μέγιστη τιμή του υδραυλικού ανοίγματος είναι 61.5μm στη κεντρική οριζόντια ασυνέχεια πλησίον της γεώτρησης. Στο κάθετο σύστημα ασυνεχειών, στο οποίο δεν εμφανίζεται ροή, το υδραυλικό άνοιγμα είναι κοντά στη τιμή ares (παραμένον υδραυλικό άνοιγμα) πλησίον της γεώτρησης. Σε απόσταση 4 m από τη γεώτρηση το υδραυλικό άνοιγμα αυξάνεται μέχρι 30 μm.



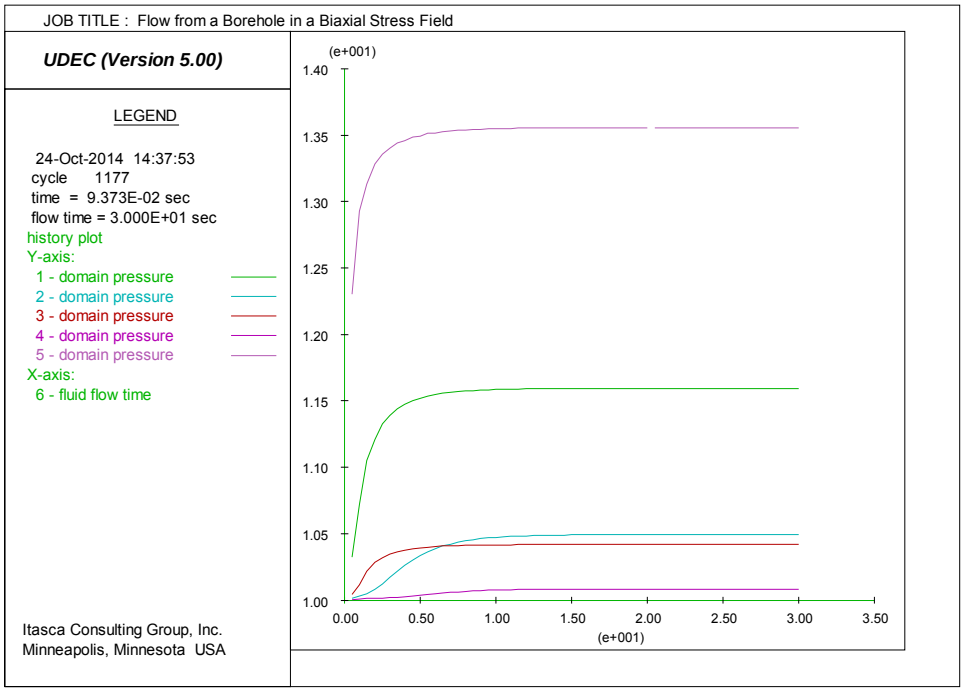
Σχήμα 5.8:Διεύθυνση της ροής για εισπίεση διάρκειας 30 sec



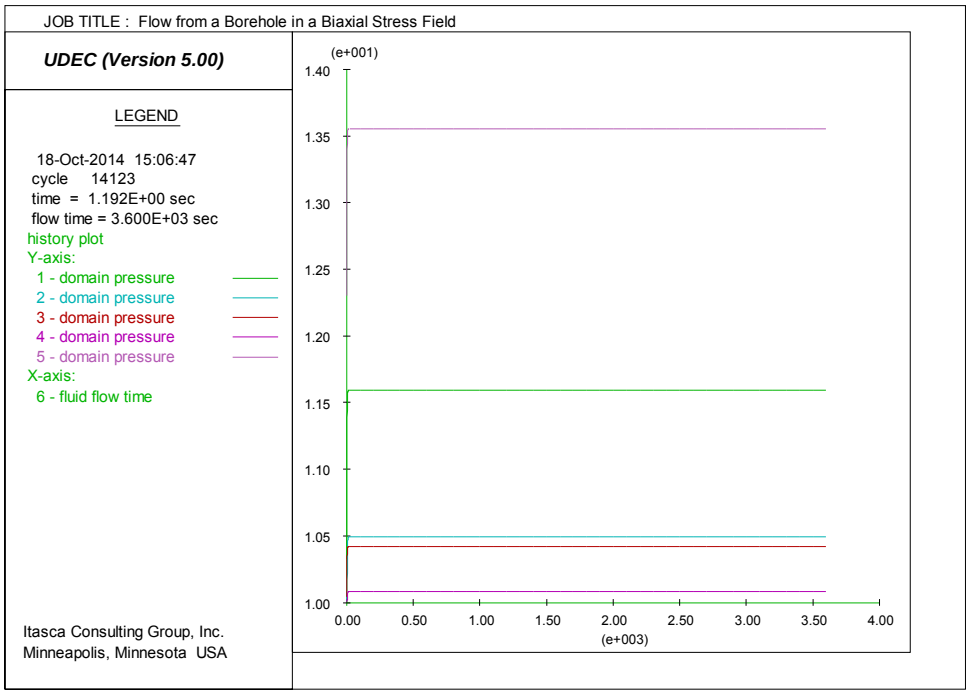
Σχήμα 5.9:Υδραυλικό άνοιγμα των ασυνεχειών για εισπίεση διάρκειας 30 sec

Στο Σχήμα 5.10 δίνεται το διάγραμμα μεταβολής της πίεσης στα 5 σημεία καταγραφής συναρτήσει του χρόνου εισπίεσης. Σύμφωνα με το διάγραμμα, στην οριζόντια ρωγμή η μέγιστη τιμή της πίεσης κυμαίνεται ανάμεσα στα 10.4 MPa (σημείο 3) και 11.55 MPa (σημείο 1). ενώ στη κάθετη ρωγμή η μέγιστη τιμή

κυμαίνεται ανάμεσα στα 10.1 MPa περίπου (σημείο 4) και στα 10.5 MPa (σημείο 2). Στη γεώτρηση η μέγιστη τιμή της πίεσης είναι 13.55 MPa (σημείο 5). Παρατηρείται μια μείωση της πίεσης, όσο απομακρυνόμαστε από τη γεώτρηση και στην οριζόντια και στη κατακόρυφη ρωγμή. Από το Σχήμα 5.11, παρατηρείται ότι η πίεση σε σύντομο χρονικό διάστημα σταθεροποιείται και η τιμή της παραμένει σταθερή μέχρι την 1 ώρα.



Σχήμα 5.10:Διακύμανση της πίεσης στα διάφορα σημεία του ταμιευτήρα για εισπίεση διάρκειας 30 sec



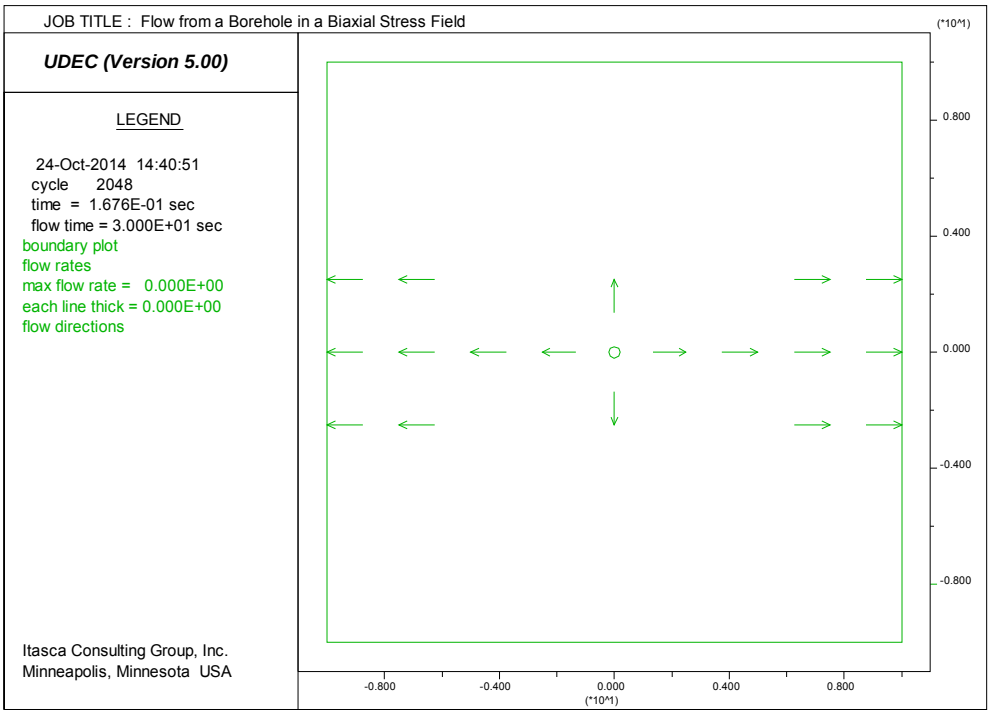
Σχήμα 5.11:Διακύμανση της πίεσης στα διάφορα σημεία του ταμιευτήρα για εισπίεση διάρκειας 3600 sec

5.2.1.3 Ρυθμός εισπίεσης $4*10^{-4}$ m^2/sec

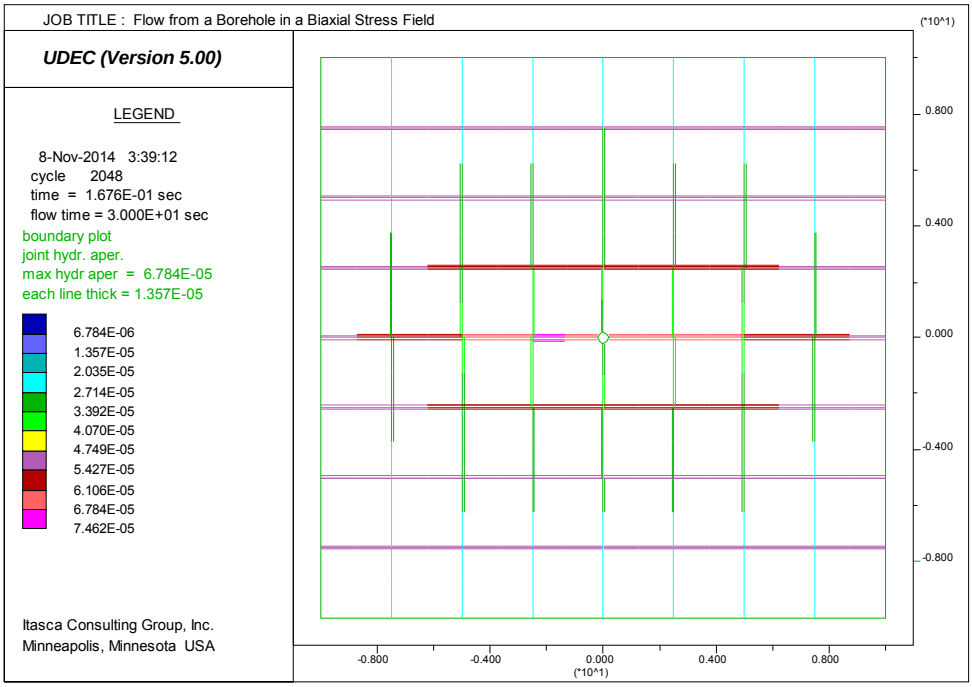
Στο Σχήμα 5.12 δίνονται τα διανύσματα της ροής στις ασυνέχειες του μοντέλου για διάρκεια εισπίεσης 30 sec. Όπως παρατηρείται, το ρευστό ρέει κυρίως στη κεντρική οριζόντια ασυνέχεια και στις δύο ασυνέχειες εκατέρωθεν της κεντρικής, ωστόσο εμφανίζεται μια περιορισμένη ροή στη κεντρική κατακόρυφη ρωγμή.

Στο Σχήμα 5.13 δίνεται η εικόνα του υδραυλικού ανοίγματος των ασυνεχειών του μοντέλου. Παρατηρείται ότι, οι ασυνέχειες που παρουσιάζουν υδραυλικό άνοιγμα λόγω της εισπίεσης του ρευστού, είναι εκείνες που σύμφωνα με το σχήμα υπάρχει ροή του ρευστού. Το μέγιστο υδραυλικό άνοιγμα που παρατηρείται είναι 67.84μm.

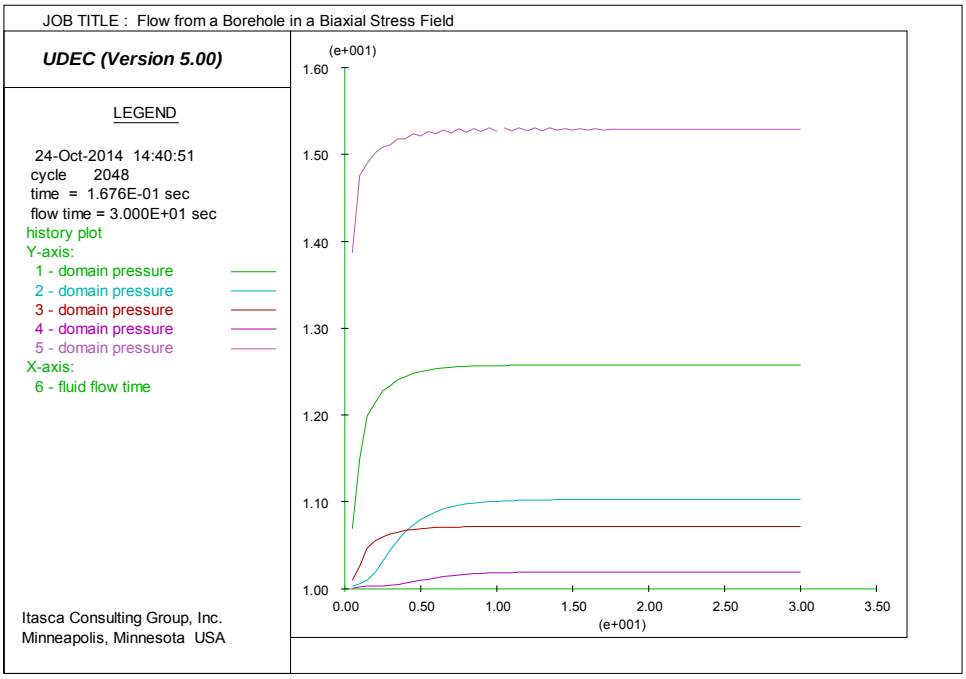
Σύμφωνα με το διάγραμμα του Σχήματος 5.14, στην οριζόντια ρωγμή η μέγιστη τιμή της πίεσης κυμαίνεται ανάμεσα στα 10.7 MPa (σημείο 3) και 12.6 MPa (σημείο 1). ενώ στη κάθετη ρωγμή η μέγιστη τιμή κυμαίνεται ανάμεσα στα 10.2 MPa περίπου (σημείο 4) και στα 11.02 MPa (σημείο 2). Στη γεώτρηση η μέγιστη τιμή της πίεσης είναι 15.3 MPa (σημείο 5). Παρατηρείται μια μείωση της πίεσης, όσο απομακρυνόμαστε από τη γεώτρηση και στην οριζόντια και στη κατακόρυφη ρωγμή. Επιπλέον, από το διάγραμμα του Σχήματος 5.15 παρατηρείται ότι η πίεση σταθεροποιείται σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα και διατηρείται σταθερή σε όλη τη διάρκεια της εισπίεσης (1 ώρα).



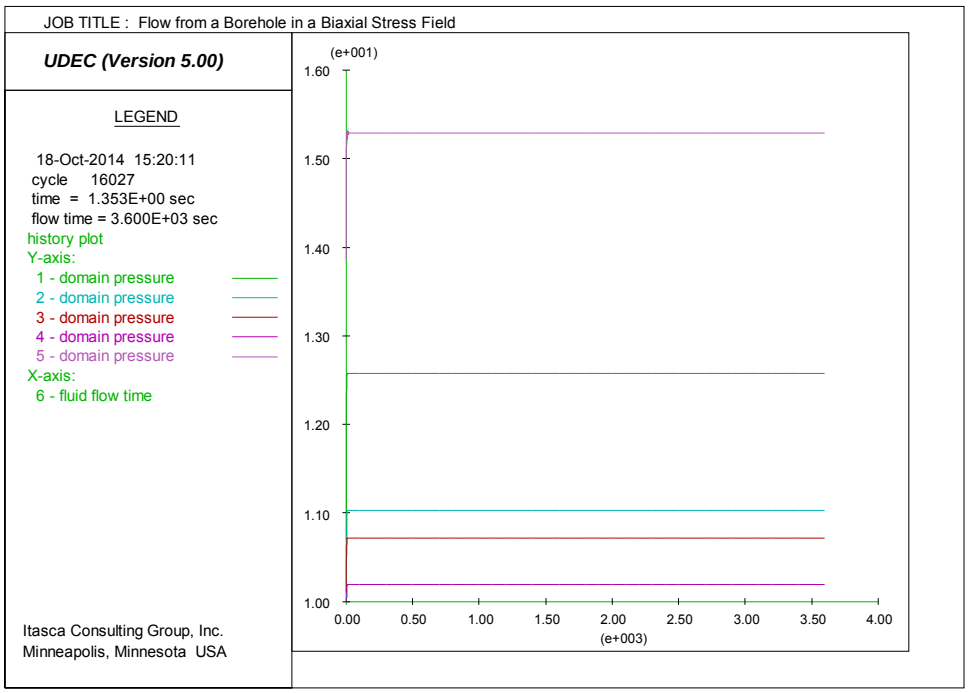
Σχήμα 5.12:Διεύθυνση της ροής για εισπίεση διάρκειας 30 sec



Σχήμα 5.13:Υδραυλικό άνοιγμα των ασυνεχειών για εισπίεση διάρκειας 30 sec



Σχήμα 5.14:Διακύμανση της πίεσης στα διάφορα σημεία του ταμιευτήρα για εισπίεση διάρκειας 30 sec



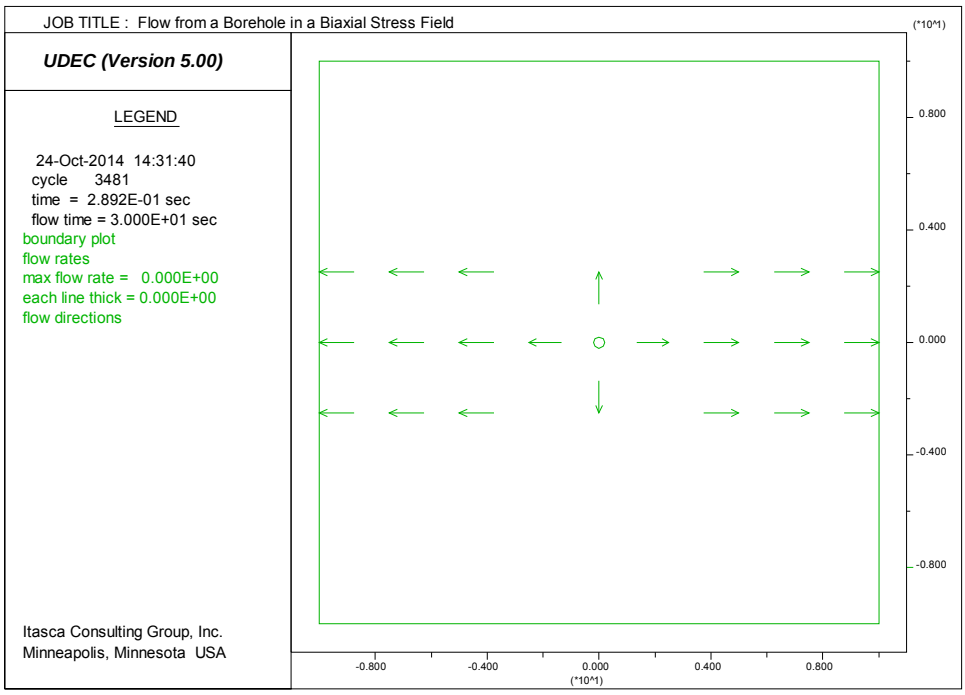
Σχήμα 5.15:Διακύμανση της πίεσης στα διάφορα σημεία του ταμιευτήρα για εισπίεση διάρκειας 3600 sec

5.2.1.4 Ρυθμός εισπίεσης $10*10^{-4}$ m^2/sec

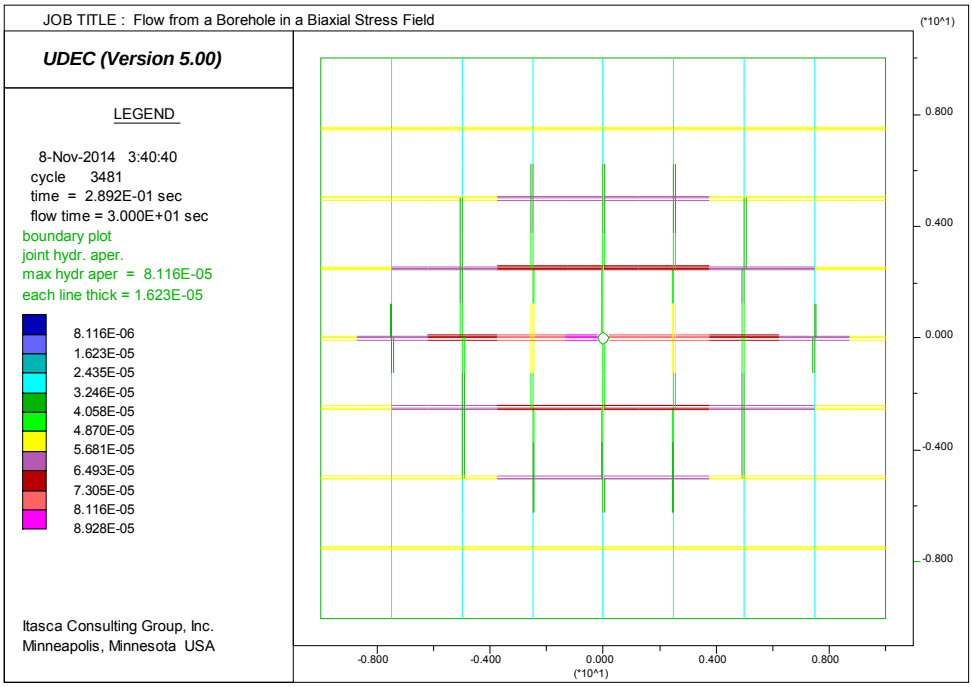
Από το Σχήμα 5.16 παρατηρείται ότι το ρευστό ρέει κατά μήκος κυρίως της οριζόντιας κεντρικής ασυνέχειας και των δύο γειτονικών της οριζόντιων ασυνεχειών και λιγότερο κατά μήκος της κατακόρυφης κεντρικής ρωγμής.

Από την εικόνα του υδραυλικού ανοίγματος (Σχήμα 5.17) παρατηρείται ότι το υδραυλικό άνοιγμα των ασυνεχειών παρουσιάζεται μεγαλύτερο στις ασυνέχειες από όπου διέρχεται το ρευστό. Η μέγιστη τιμή παρατηρείται στην κεντρική οριζόντια ασυνέχεια πλησίον στη γεώρηση και είναι περίπου ίση με 81μm.

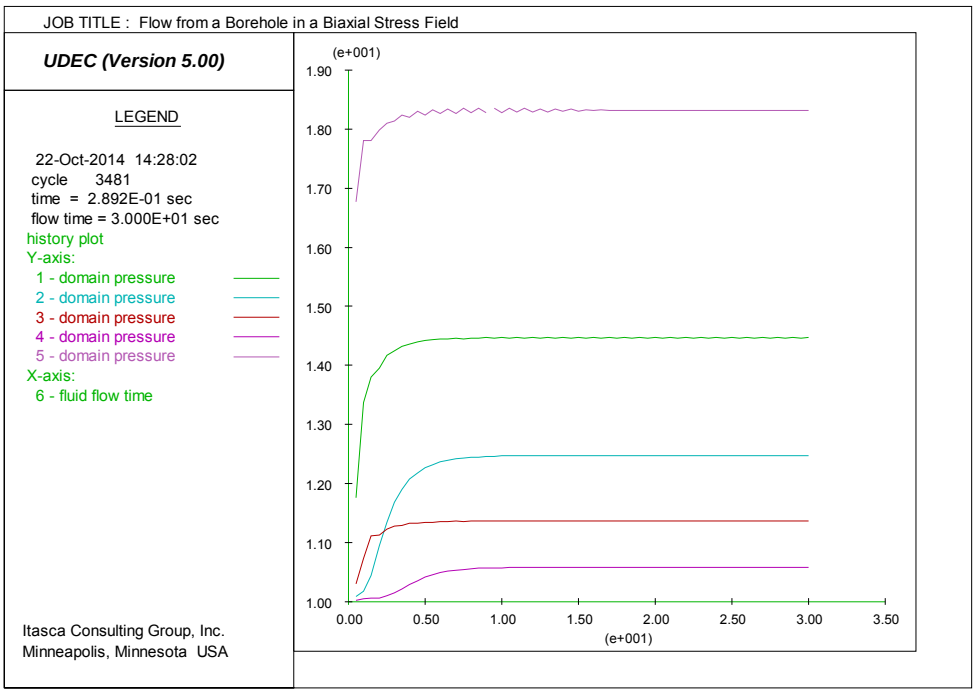
Σύμφωνα με το διάγραμμα του Σχήματος 5.16, στην οριζόντια ρωγμή η μέγιστη τιμή της πίεσης κυμαίνεται ανάμεσα στα 11.3 Pa (σημείο 3) και 14.5 MPa (σημείο 1). ενώ στη κάθετη ρωγμή η μέγιστη τιμή κυμαίνεται ανάμεσα στα 10.5 MPa (σημείο 4) και στα 12.4 MPa (σημείο 2). Στη γεώτρηση η μέγιστη τιμή της πίεσης είναι 18.3 MPa (σημείο 5). Παρατηρείται μια μείωση της πίεσης, όσο απομακρυνόμαστε από τη γεώτρηση και στην οριζόντια και στη κατακόρυφη ρωγμή. Τέλος, η πίεση παραμένει σταθερή σε όλη τη διάρκεια της εισπίεσης.



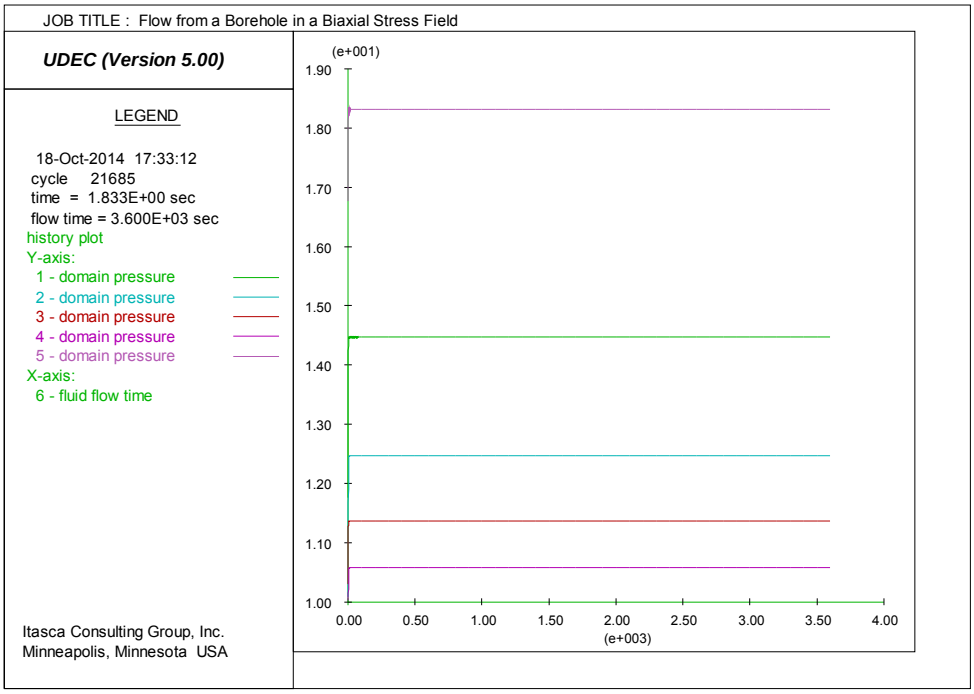
Σχήμα 5.16:Διεύθυνση της ροής για εισπίεση διάρκειας 30 sec



Σχήμα 5. 17:Υδραυλικό άνοιγμα των ασυνεχειών για εισπίεση διάρκειας 30 sec



Σχήμα 5.18:Διακύμανση της πίεσης στα διάφορα σημεία του ταμιευτήρα για εισπίεση διάρκειας 30 sec



Σχήμα 5.19:Διακύμανση της πίεσης στα διάφορα σημεία του ταμιευτήρα για εισπίεση διάρκειας 3600 sec

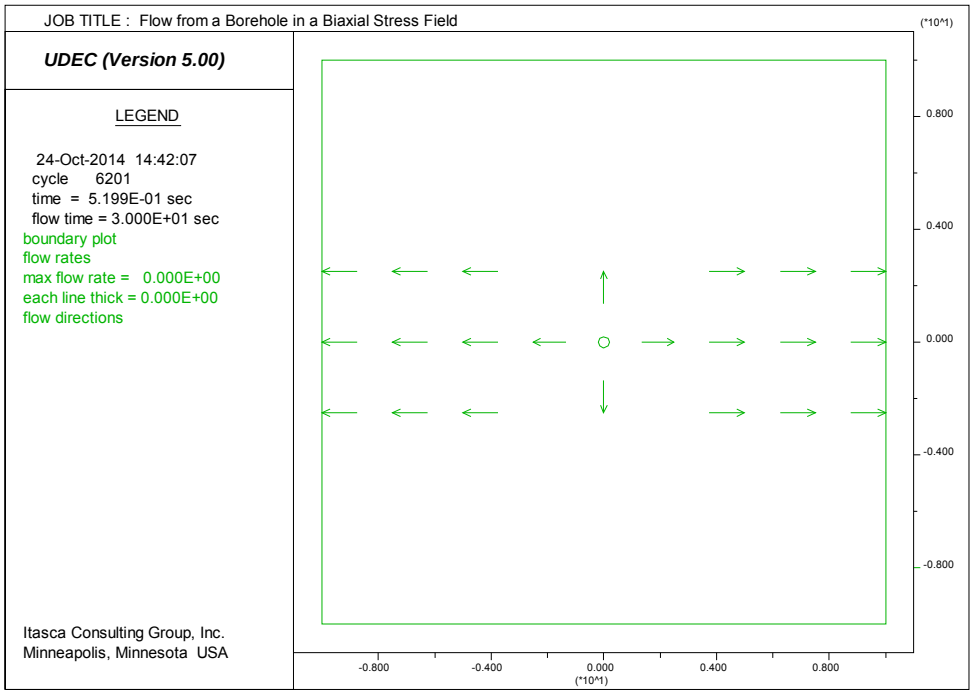
*5.2.1.5 Ρυθμός εισπίεσης 15*10^{-4} m^2/sec*

Από το Σχήμα 5.20, παρατηρείται ότι το ρευστό ρέει κατά μήκος κυρίως της οριζόντιας κεντρικής ασυνέχειας και των δύο γειτονικών της και λιγότερο κατά μήκος της κατακόρυφης κεντρικής ασυνέχειας.

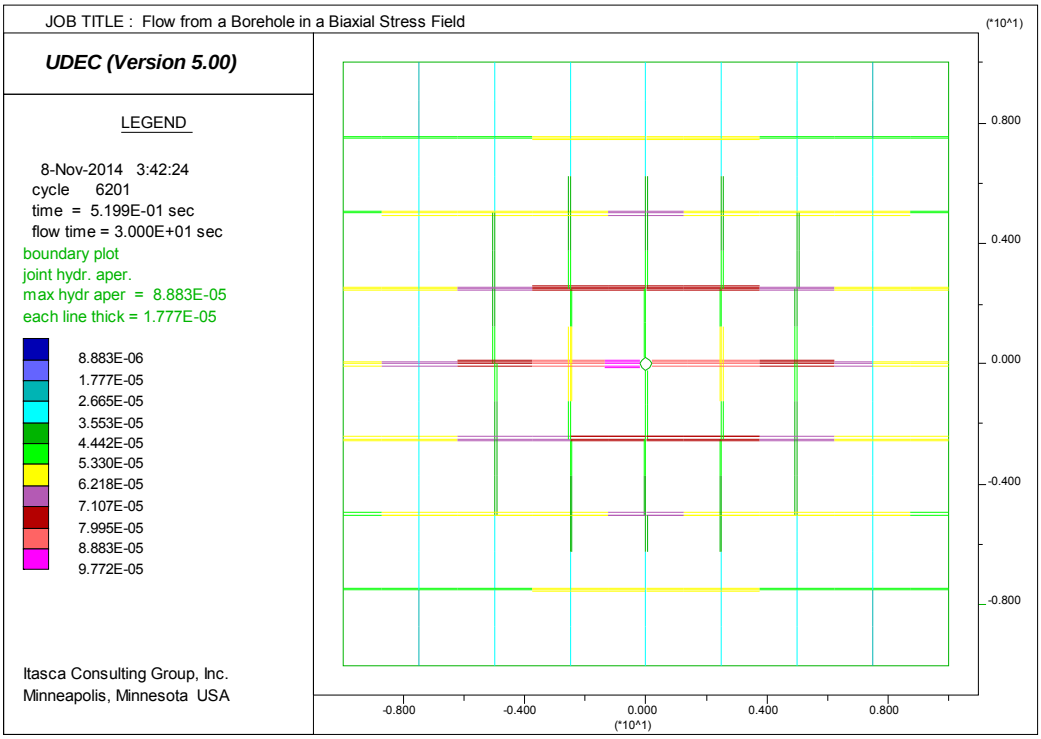
Οι ασυνέχειες στις οποίες υπάρχει ροή, παρουσιάζουν υδραυλικό άνοιγμα, με την μέγιστη τιμή να υπολογίζεται περίπου στα 88.8μm (Σχήμα 5.21).

Σύμφωνα με το διάγραμμα του Σχήματος 5.22, στην οριζόντια ασυνέχεια η μέγιστη τιμή της πίεσης κυμαίνεται ανάμεσα στα 11.8 Pa (σημείο 3) και 15.7 MPa (σημείο 1). ενώ στη κάθετη ασυνέχεια η μέγιστη τιμή κυμαίνεται ανάμεσα στα 11 MPa (σημείο 4) και στα 13.4 MPa (σημείο 2). Στη γεώτρηση η μέγιστη τιμή της πίεσης είναι 20 MPa (σημείο 5). Παρατηρείται μια μείωση της πίεσης, όσο απομακρυνόμαστε από τη γεώτρηση και στην οριζόντια και στη κατακόρυφη ασυνέχεια.

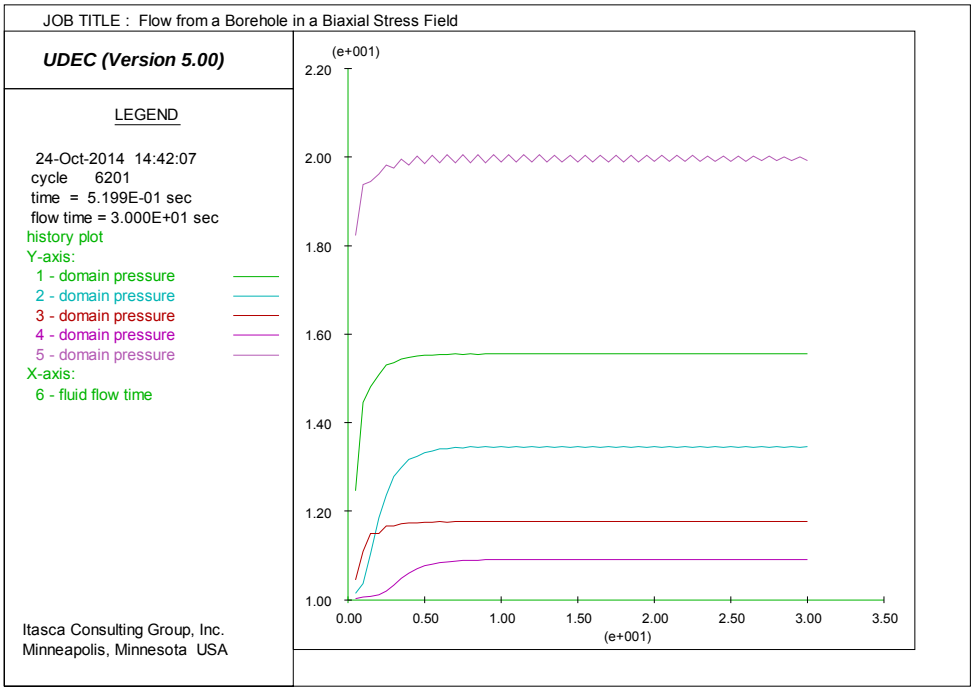
Επειδή η τιμή της πίεσης για χρονικό διάστημα 30 sec δεν έχει στεθεροποιηθεί, έγινε λήψη των τιμών της πίεσης για εισπίεση ρευστού διάρκειας 40 sec, προκειμένου να διαπιστωθεί ο χρόνος που χρειάστηκε για να σταθεροποιηθεί η πίεση (Σχήμα 5.23). Πέραν των 40 sec, η πίεση παραμένει σταθερή σε όλη τη διάρκεια της εισπίεσης (Σχήμα 5.24)



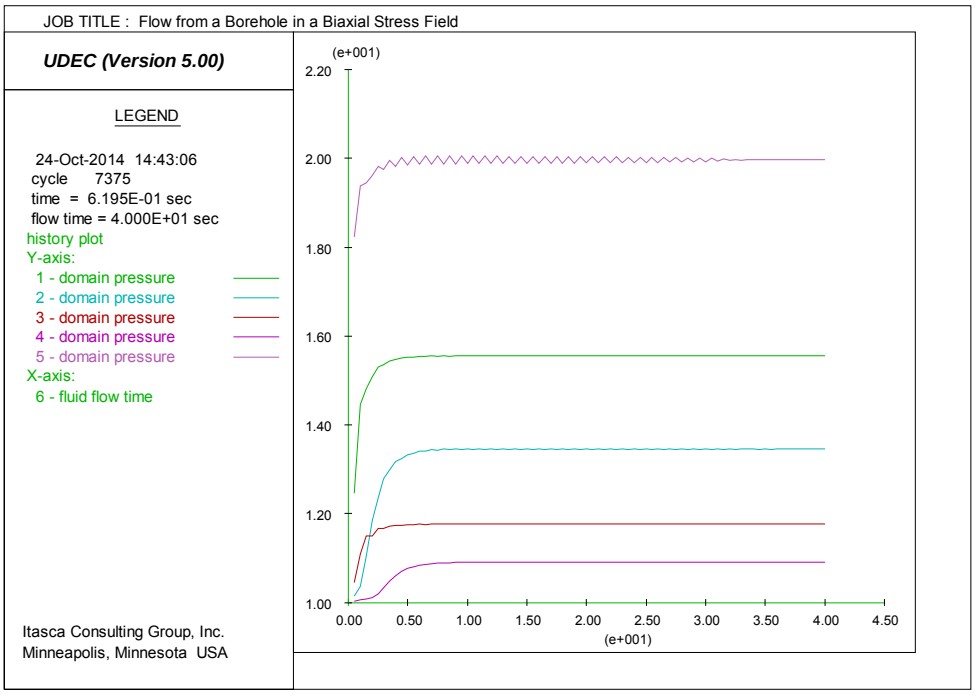
Σχήμα 5.20:Διεύθυνση της ροής για εισπίεση διάρκειας 30 sec



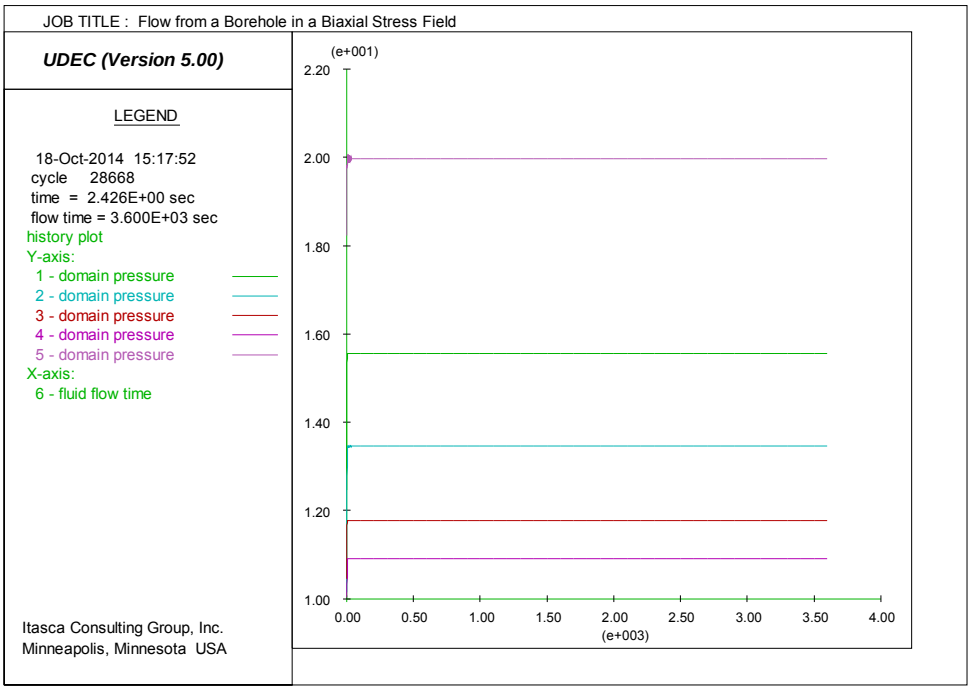
Σχήμα 5.21:Υδραυλικό άνοιγμα των ασυνεχειών για εισπίεση διάρκειας 30 sec



Σχήμα 5.22:Διακύμανση της πίεσης στα διάφορα σημεία του ταμιευτήρα για εισπίεση διάρκειας 30 sec



Σχήμα 5.23:Διακύμανση της πίεσης στα διάφορα σημεία του ταμιευτήρα για εισπίεση διάρκειας 40 sec

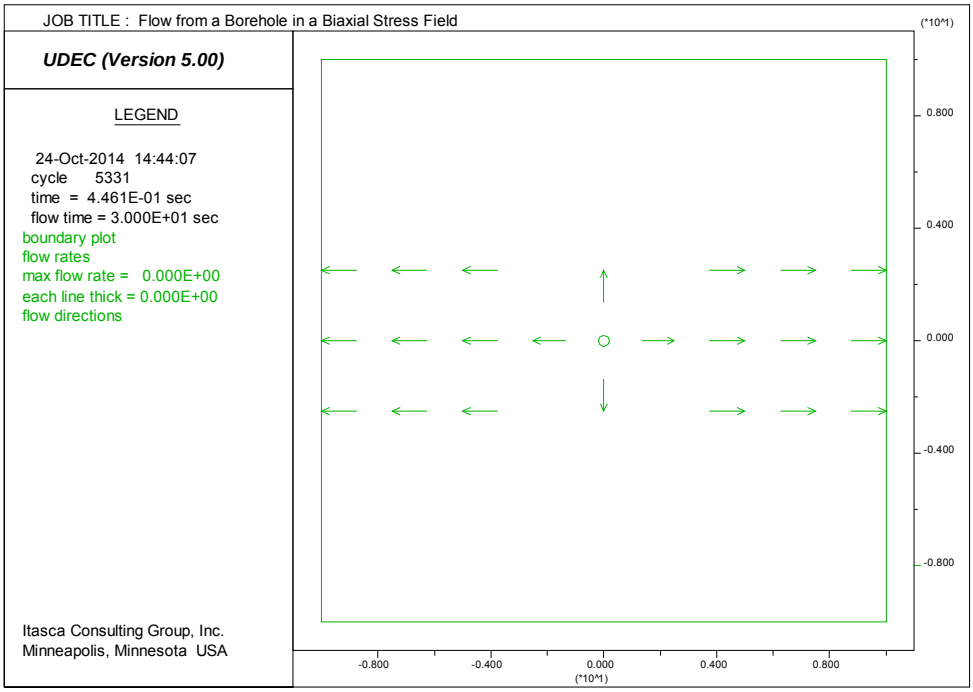


Σχήμα 5.24:Διακύμανση της πίεσης στα διάφορα σημεία του ταμιευτήρα για εισπίεση διάρκειας 3600 sec

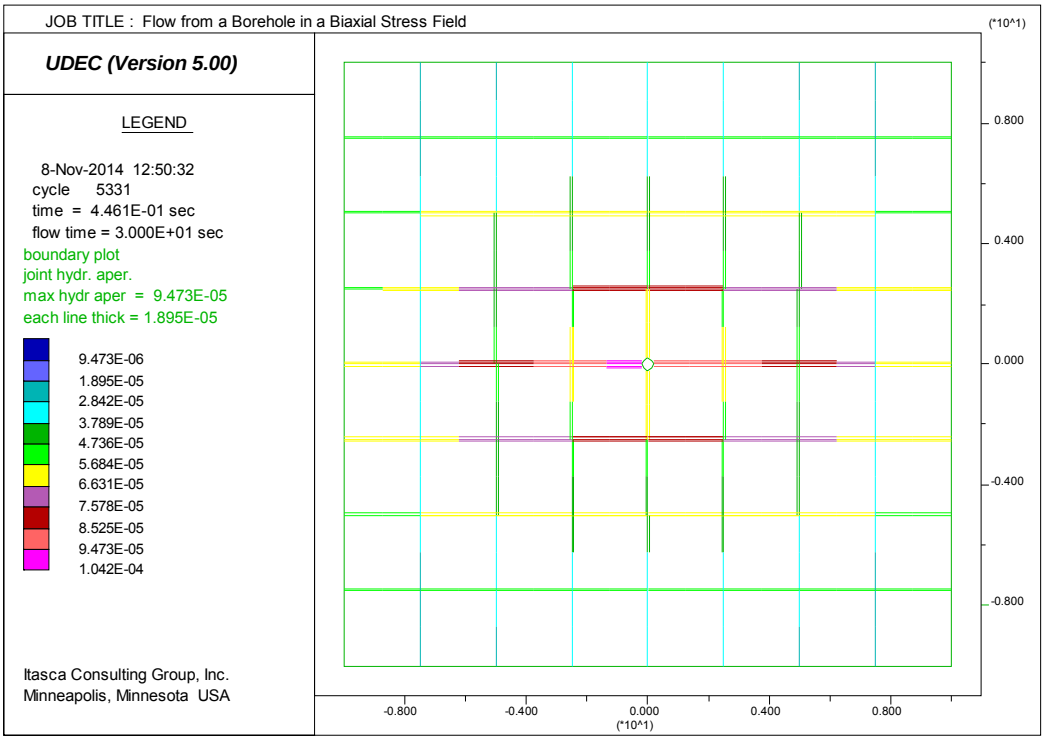
*5.2.1.6 Ρυθμός εισπίεσης 20*10^{-4} m^2/sec*

Από το Σχήμα 5.26 παρατηρείται ότι το ρευστό ρέει κατά μήκος κυρίως της οριζόντιας κεντρικής ρωγμής και των δύο ρωγμών εκατέρωθεν της κεντρικής και λιγότερο κατά μήκος της κατακόρυφης κεντρικής ρωγμής. Οι ασυνέχειες στις οποίες υπάρχει ροή, παρουσιάζουν το μεγαλύτερο υδραυλικό άνοιγμα, με την μέγιστη τιμή να υπολογίζεται περίπου στα 94.7μm (Σχήμα 5.27).

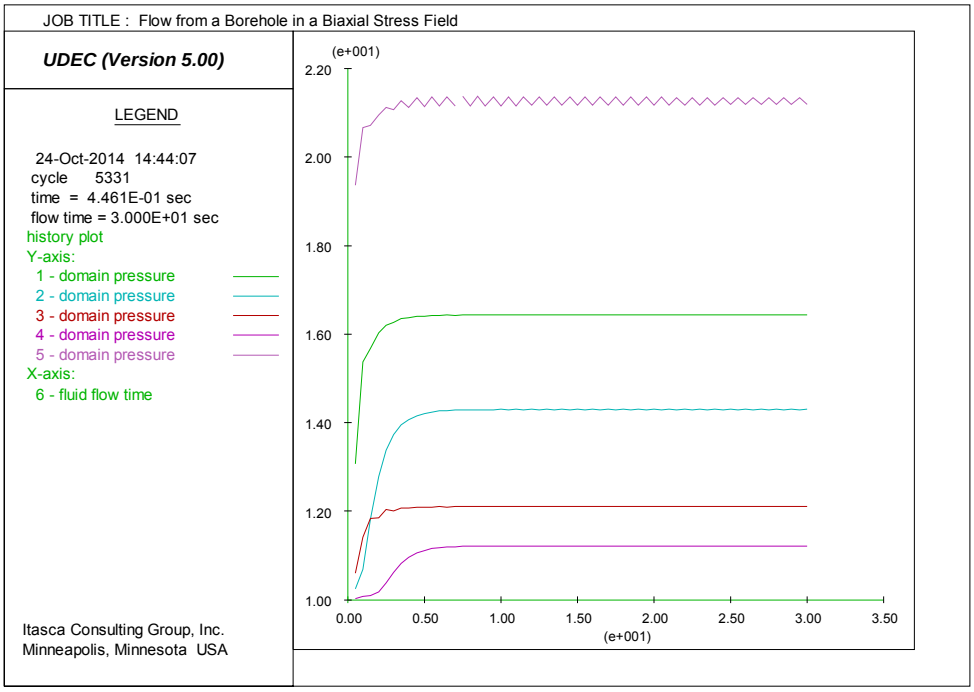
Σύμφωνα με το διάγραμμα μεταβολής της πίεσης συναρτήσει του χρόνου (Σχήμα 5.28), στην οριζόντια ασυνέχεια η μέγιστη τιμή της πίεσης κυμαίνεται ανάμεσα στα 12.1 Pa (σημείο 3) και 16.4 MPa (σημείο 1). ενώ στη κάθετη ασυνέχεια η μέγιστη τιμή κυμαίνεται ανάμεσα στα 11.3 MPa (σημείο 4) και στα 14.2 MPa (σημείο 2). Στη γεώτρηση η μέγιστη τιμή της πίεσης είναι 21.2 MPa (σημείο 5). Παρατηρείται μια μείωση της πίεσης, όσο απομακρυνόμαστε από τη γεώτρηση και στην οριζόντια και στη κατακόρυφη ρωγμή. Επιπλέον, παρατηρείται ότι η πίεση στο σημείο 5 χρειάζεται ένα μεγαλύτερο διάστημα για να σταθεροποιηθεί και συγκεκριμένα 65 sec (Σχήμα 5.29). Πέραν τούτου, η πίεση παραμένει σταθερή σε όλη τη διάρκεια της εισπίεσης.



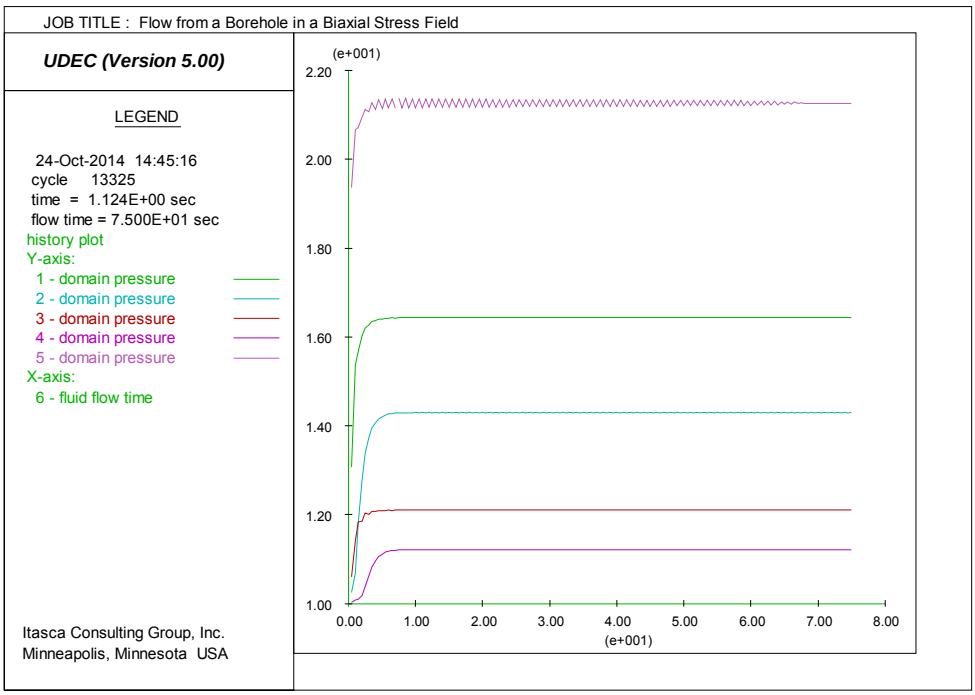
Σχήμα 5.25:Διεύθυνση της ροής για εισπίεση διάρκειας 30 sec



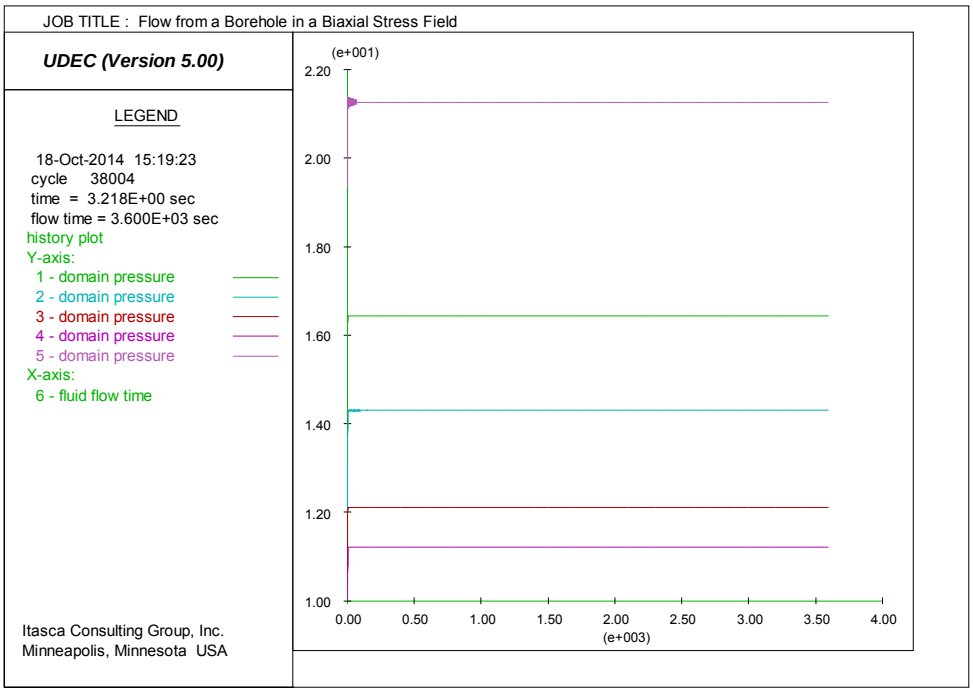
Σχήμα 5.26:Υδραυλικό άνοιγμα των ασυνεχειών για εισπίεση διάρκειας 30 sec



Σχήμα 5.27:Διακύμανση της πίεσης στα διάφορα σημεία του ταμιευτήρα για εισπίεση διάρκειας 30 sec

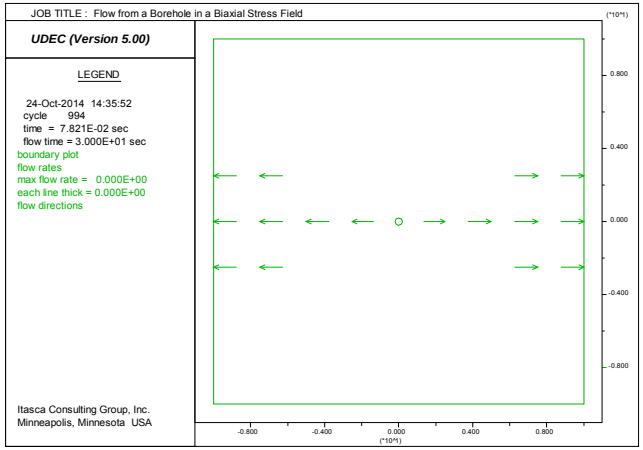


Σχήμα 5.28:Διακύμανση της πίεσης στα διάφορα σημεία του ταμιευτήρα για εισπίεση διάρκειας 75 sec

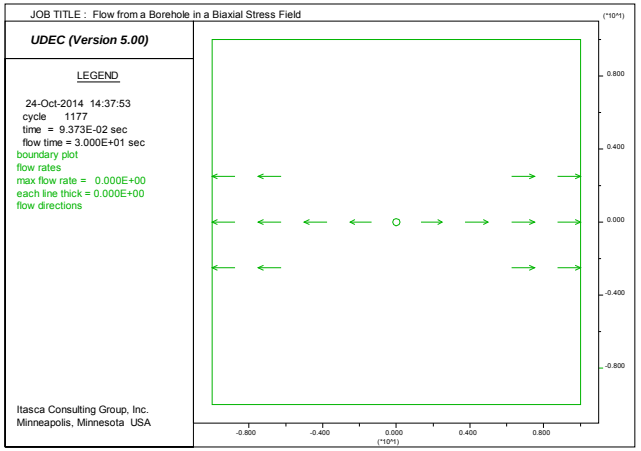


Σχήμα 5.29:Διακύμανση της πίεσης στα διάφορα σημεία του ταμιευτήρα για εισπίεση διάρκειας 3600 se

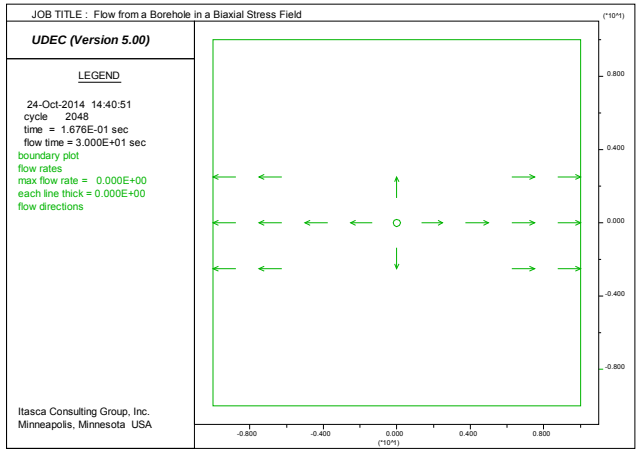
5.2.1.7 Σύγκριση αποτελεσμάτων



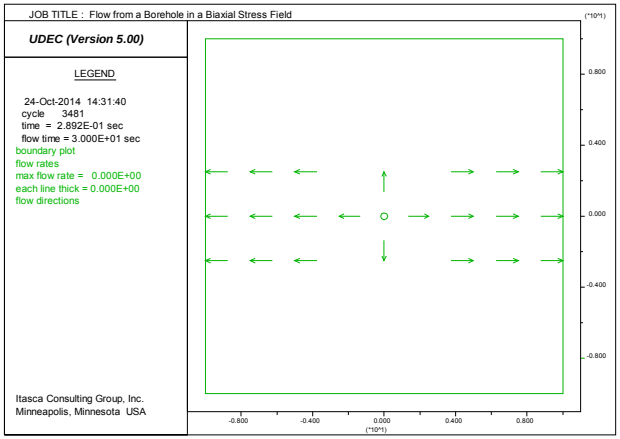
$1*10^{-4}$ m^2/sec



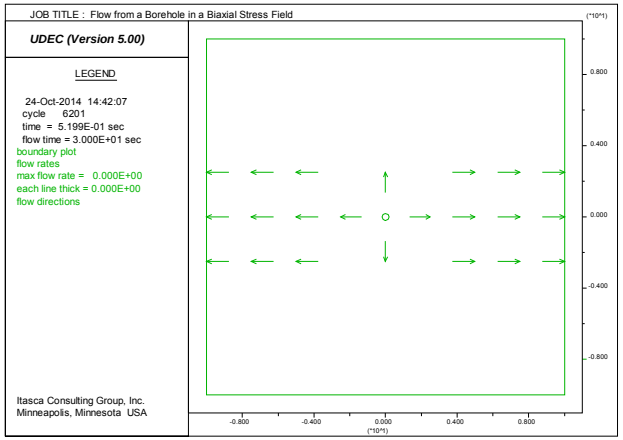
$2*10^{-4}$ m^2/sec



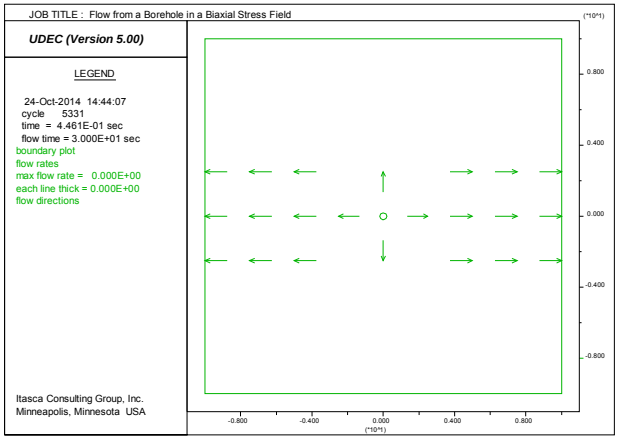
$4*10^{-4}$ m^2/sec



$10*10^{-4}$ m^2/sec



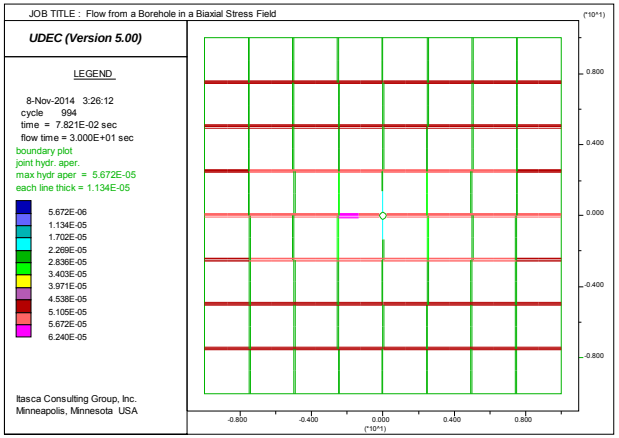
$15*10^{-4}$ m^2/sec



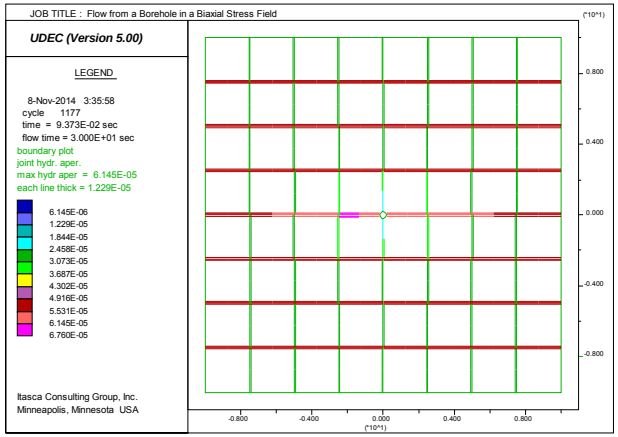
$20*10^{-4}$ m^2/sec

Σχήμα 5.30:Η διεύθυνση της ροής για διαφορετικούς ρυθμούς εισπίεσης

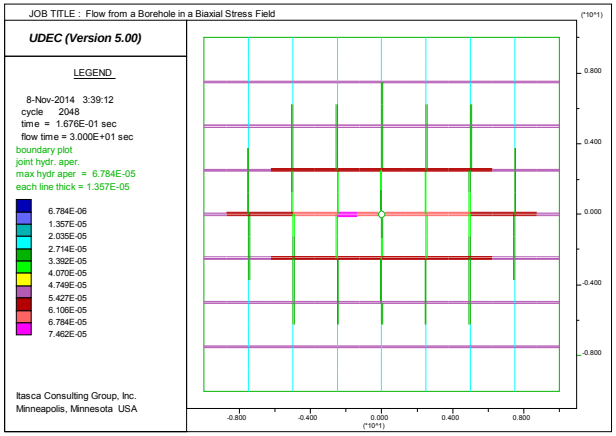
Σύμφωνα με τα διαγράμματα που απεικονίζουν τη διεύθυνση που ακολουθεί η ροή του ρευστού, όσο αυξάνεται ο ρυθμός εισπίεσης, το ρευστό ρέει προς περισσότερες διευθύνσεις



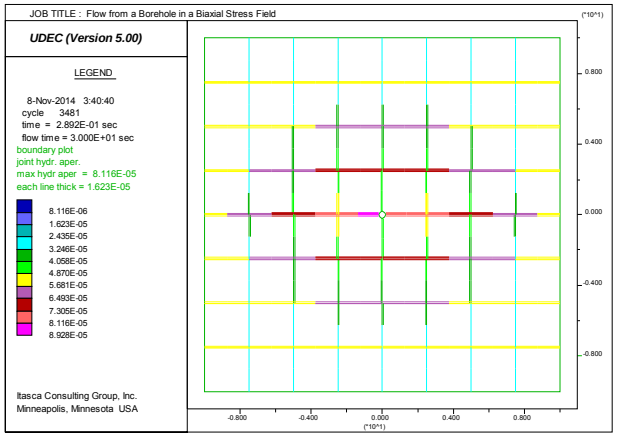
$1*10^{-4}$ m^2/sec



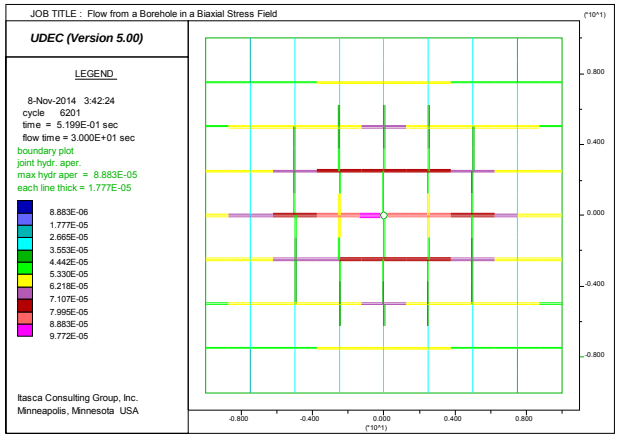
$2*10^{-4}$ m^2/sec



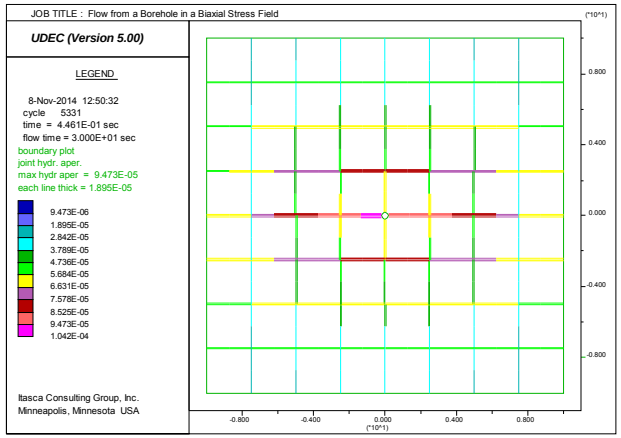
$4*10^{-4}$ m^2/sec



$10*10^{-4}$ m^2/sec



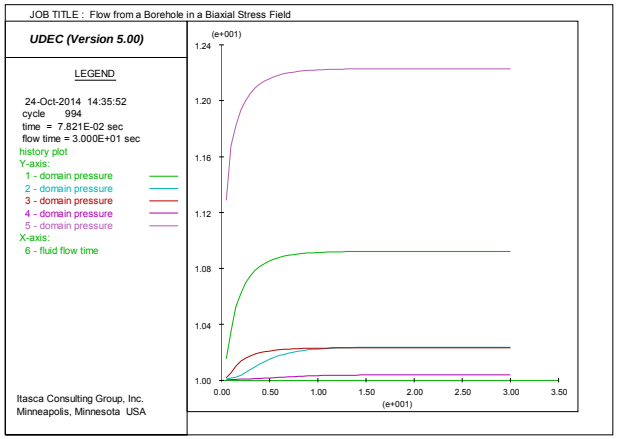
$15*10^{-4}$ m^2/sec



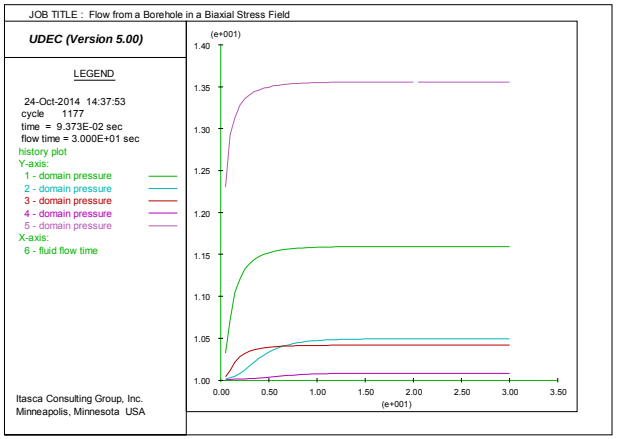
$20*10^{-4}$ m^2/sec

Σχήμα 5.31:Υδραυλικά ανοίγματα ασυνεχειών για διαφορετικές τιμές ρυθμού εισπίεσης

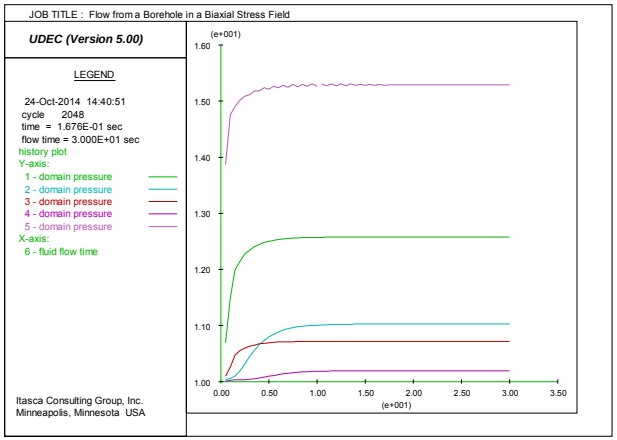
Σύμφωνα με τα διαγράμματα, παρατηρείται ότι με την αύξηση του ρυθμού εισπίεσης, αυξάνεται και το μέγιστο υδραυλικό άνοιγμα που παρατηρείται στις ασυνέχειες



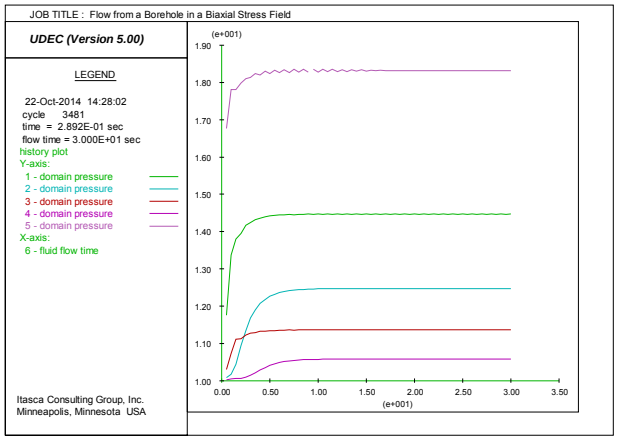
$1*10^{-4}$ m^2/sec



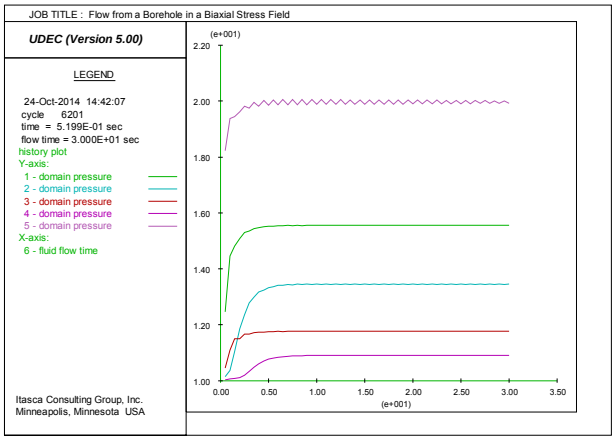
$2*10^{-4}$ m^2/sec



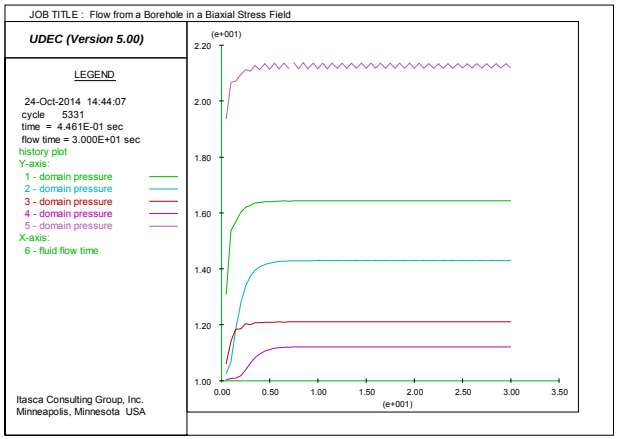
$4*10^{-4}$ m^2/sec



$10*10^{-4}$ m^2/sec



$15*10^{-4}$ m^2/sec



$20*10^{-4}$ m^2/sec

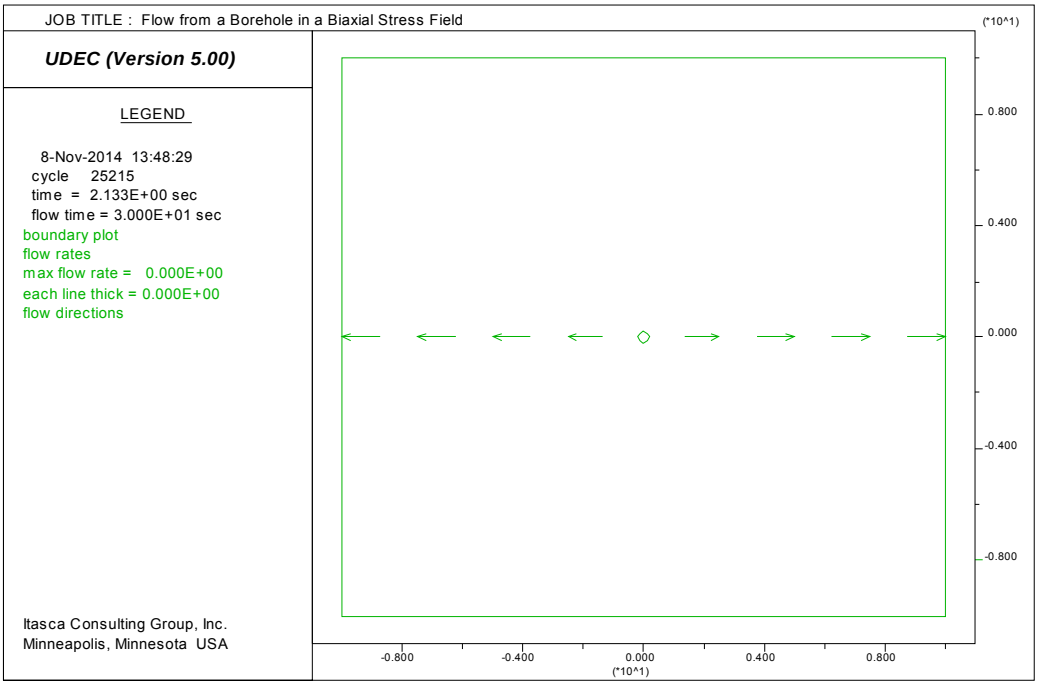
Σχήμα 5.32:Η διακύμανση της πίεσης σε συγκεκριμένα σημεία του ταμιευτήρα για διαφορετικές τιμές του ρυθμού εισπίεσης

Από τα διαγράμματα της πίεσης σε συνάρτηση με τον χρόνο, παρατηρείται ότι με την αύξηση του ρυθμού της εισπίεσης, αυξάνεται και η τιμή της πίεσης σε καθένα από τα σημεία του ταμιευτήρα στα οποία λαμβάνονται μετρήσε

5.2.2 Αποτελέσματα παραμετρικών δοκιμών με μεταβολή του αρχικού ανοίγματος ασυνεχειών

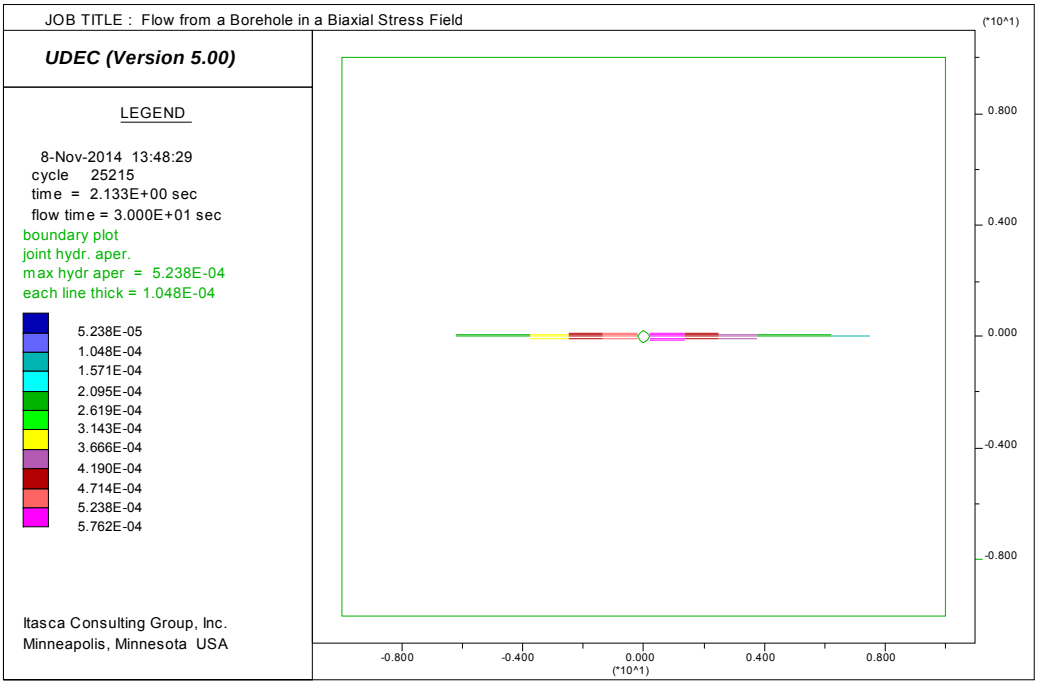
Στην συνέχεια, εξετάζεται η επιρροή του αρχικού ανοίγματος των ασυνεχειών, στη πορεία της ροής, στο υδραυλικό άνοιγμα των ασυνεχειών και στη διακύμανση της πίεσης. Το βασικό μοντέλο έχει αρχικό άνοιγμα ασυνεχειών azero=100μm και ρυθμό εισπίεσης $10*10^{-4}$ m^2/sec. Οι τιμές που θα δοθούν στο αρχικό άνοιγμα ασυνεχειών είναι 25μm,50 μm,250μm και 500μm.

5.2.2.1 Αρχικό άνοιγμα ασυνεχειών 25μ



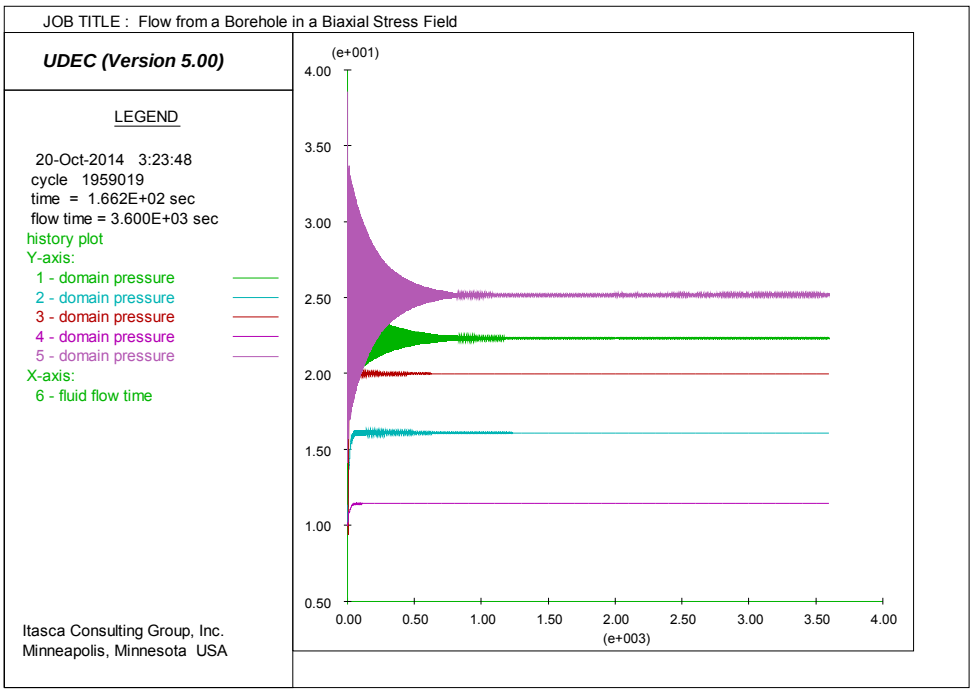
Σχήμα 5.33:Διεύθυνση της ροής για εισπίεση διάρκειας 30 sec

Για αρχικό άνοιγμα των ασυνεχειών 25μm, σύμφωνα με το σχήμα, η ροή περιορίζεται κυρίως στη κεντρική οριζόντια ασυνέχεια.



Σχήμα 5.34:Υδραυλικό άνοιγμα των ασυνεχειών για εισπίεση διάρκειας 30 sec

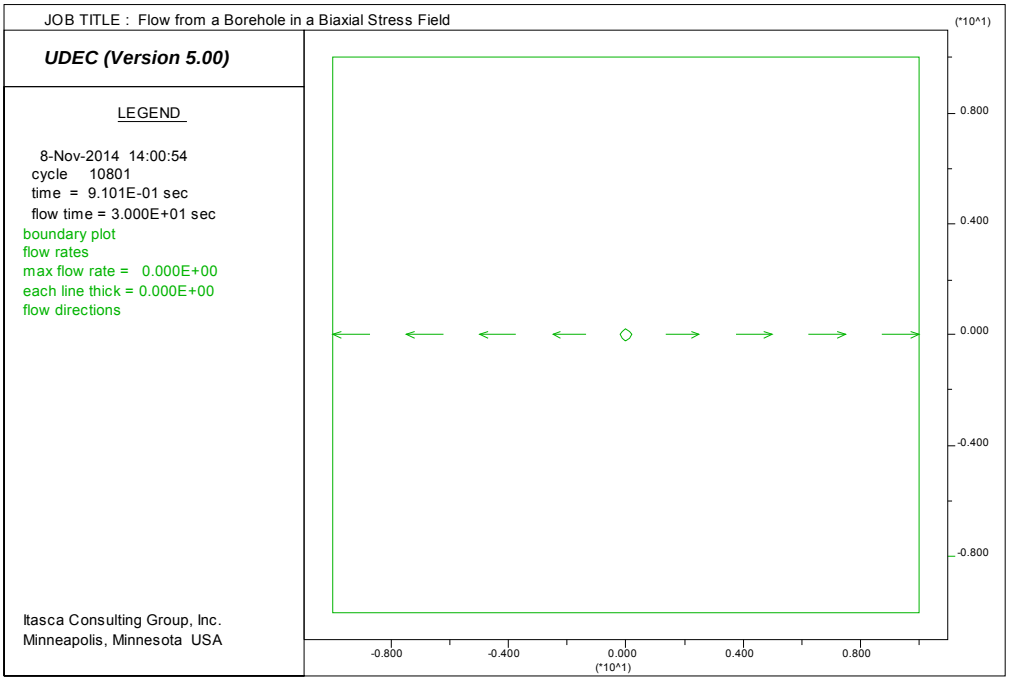
Από το παραπάνω σχήμα, επιβεβαιώνεται ότι οι ασυνέχειες της κεντρικής οριζόντιας ασυνέχειας είναι εκείνες που παρουσιάζουν υδραυλικό άνοιγμα λόγω της ροής. Το μέγιστο υδραυλικό άνοιγμα που παρουσιάζουν είναι περίπου 525.5μ.



Σχήμα 5.35:Διακύμανση της πίεσης στα διάφορα σημεία του ταμιευτήρα για εισπίεση διάρκειας 3600 sec

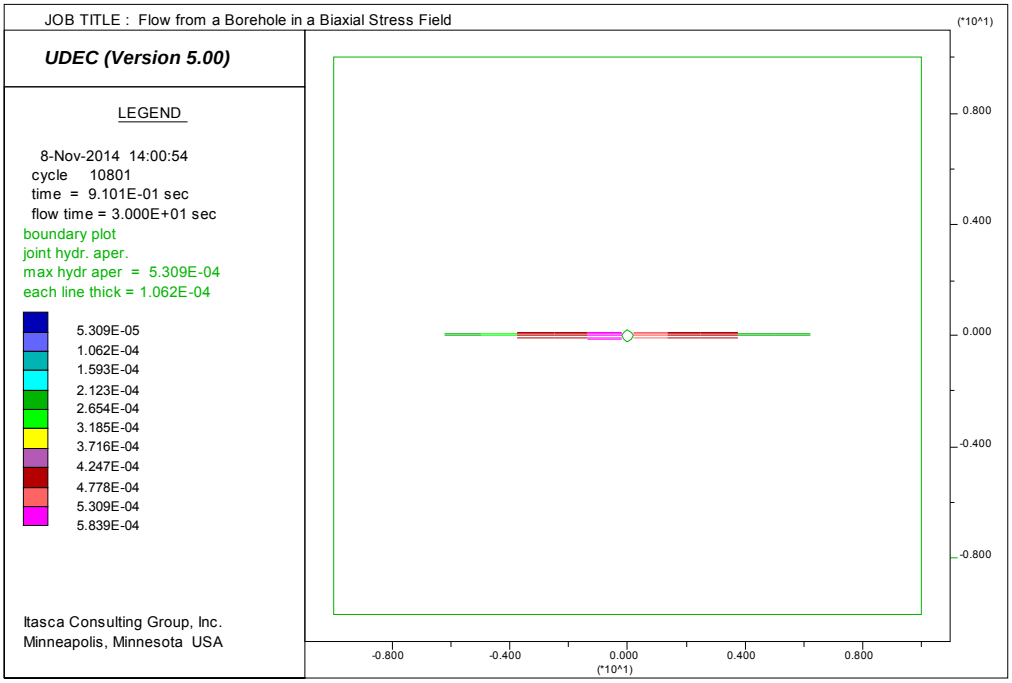
Σύμφωνα με το διάγραμμα, στην οριζόντια ασυνέχεια η μέγιστη τιμή της πίεσης κυμαίνεται ανάμεσα στα 20 MPa (σημείο 3) και 23.5 MPa (σημείο 1), ενώ στη κάθετη ασυνέχεια η μέγιστη τιμή κυμαίνεται ανάμεσα στα 11 MPa (σημείο 4) και στα 16 MPa (σημείο 2). Στην γεώτρηση η μέγιστη τιμή της πίεσης είναι 25.5 MPa (σημείο 5). Παρατηρείται μια μείωση της πίεσης, όσο απομακρυνόμαστε από τη γεώτρηση και στην οριζόντια και στη κατακόρυφη ασυνέχεια. Θα πρέπει να σημειωθεί, ότι η πίεση στα πρώτα λεπτά είναι εξαιρετικά ασταθής και παρουσιάζει έντονη διακύμανση που αποδίδεται στον χρησιμοποιούμενο αλγόριθμο. Για τον λόγο αυτό δεν ήταν δυνατό να ληφθούν τιμές για χρονικό διάστημα 30sec.

5.2.2.2 Αρχικό άνοιγμα ασυνεχειών 50μm



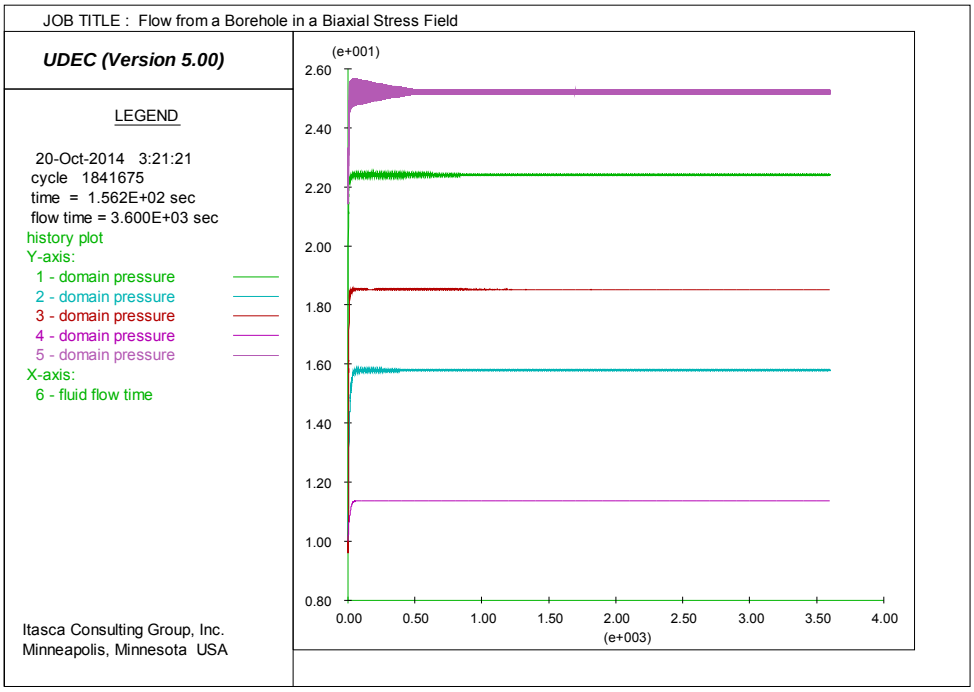
Σχήμα 5.36:Διεύθυνση της ροής για εισπίεση διάρκειας 3600 sec

Για αρχικό άνοιγμα των ασυνεχειών 50μm, σύμφωνα με το σχήμα, η ροή περιορίζεται κυρίως στη κεντρική οριζόντια ασυνέχεια.



Σχήμα 5.37:Υδραυλικό άνοιγμα των ασυνεχειών για εισπίεση διάρκειας 3600 sec

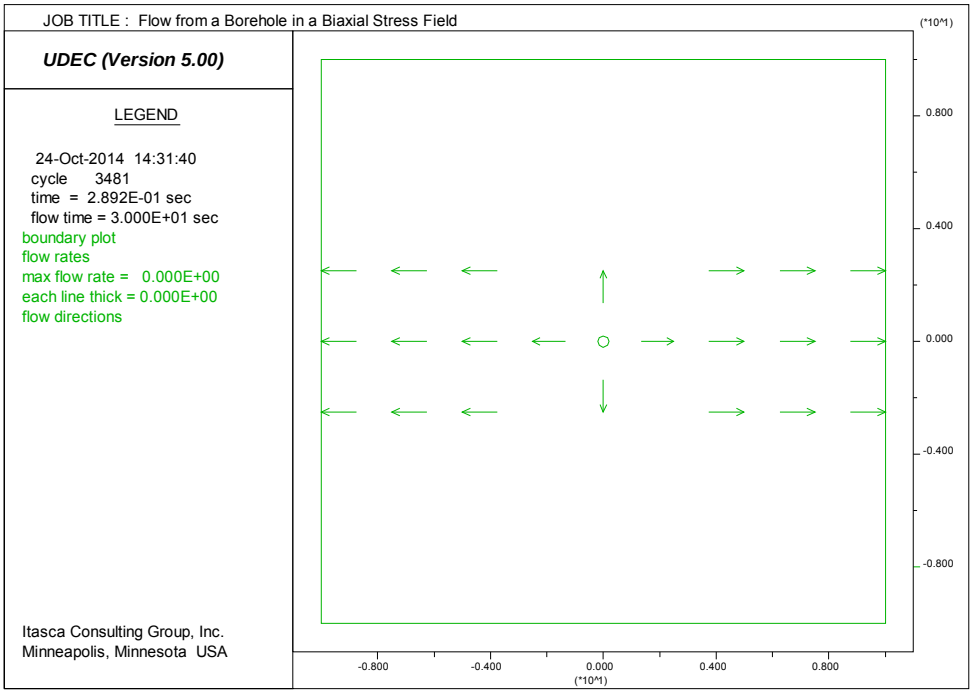
Από το παραπάνω σχήμα, επιβεβαιώνεται ότι οι ασυνέχειες της κεντρικής οριζόντιας ασυνέχειας είναι εκείνες που παρουσιάζουν υδραυλικό άνοιγμα λόγω της ροής, η μέγιστη τιμή του οποίου φτάνει τα 530μm.



Σχήμα 5.38:Διακύμανση της πίεσης στα διάφορα σημεία του ταμιευτήρα για εισπίεση διάρκειας 3600 sec

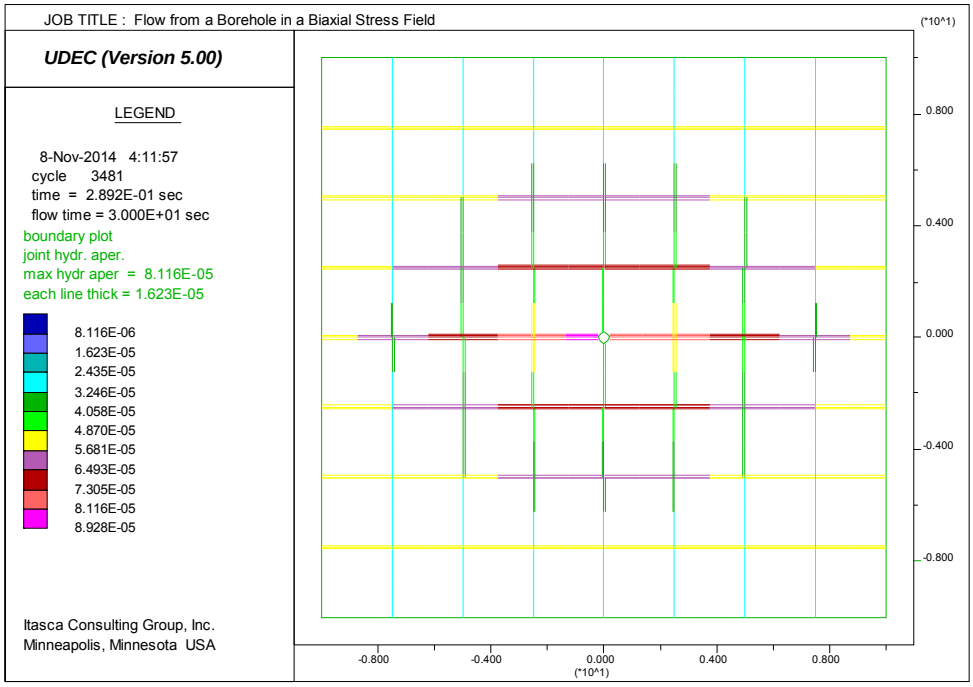
Σύμφωνα με το διάγραμμα, στην οριζόντια ασυνέχεια η μέγιστη τιμή της πίεσης κυμαίνεται ανάμεσα στα 18.4 MPa (σημείο 3) και 22.4 MPa (σημείο 1), ενώ στη κάθετη ασυνέχεια η μέγιστη τιμή κυμαίνεται ανάμεσα στα 11.6 MPa (σημείο 4) και στα 15.8 MPa (σημείο 2). Στην γεώτρηση η μέγιστη τιμή της πίεσης είναι 25.4 MPa (σημείο 5). Παρατηρείται μια μείωση της πίεσης, όσο απομακρυνόμαστε από τη γεώτρηση και στην οριζόντια και στη κατακόρυφη ασυνέχεια. Και σε αυτή τη περίπτωση, η πίεση είναι ασταθής παρουσιάζοντας έντονες διακυμάνσεις και για το λόγο αυτό οι τιμές λαμβάνονται μόνον έπειτα από χρονικό διάστημα 1 ώρας.

5.2.2.3 Αρχικό άνοιγμα ασυνεχειών 100μm



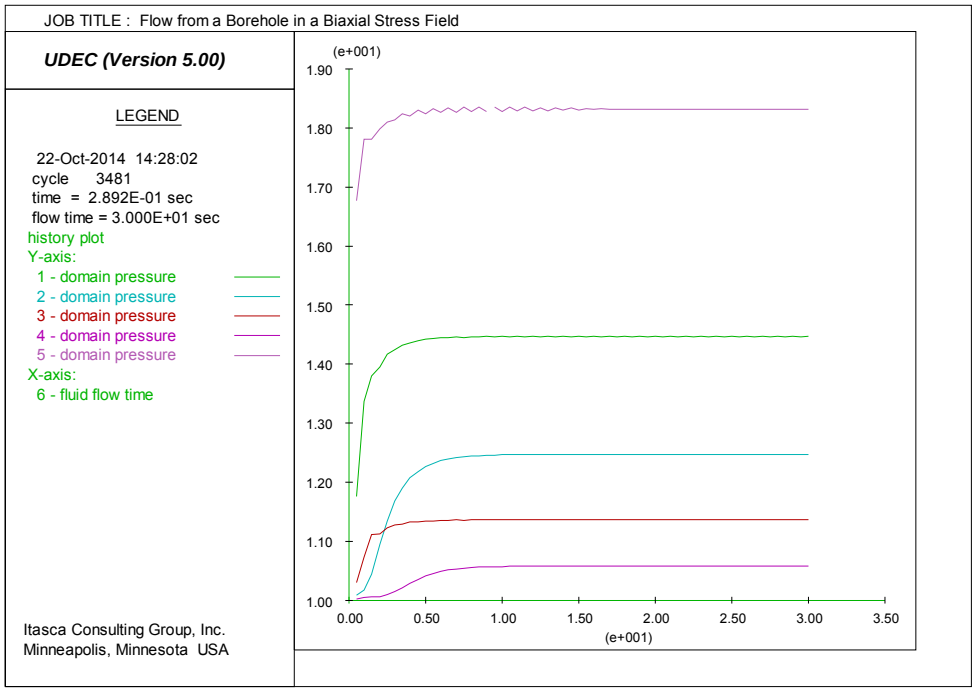
Σχήμα 5.39:Διεύθυνση της ροής για εισπίεση διάρκειας 30 sec

Σύμφωνα με το σχήμα, η ροή εμφανίζεται κυρίως στην οριζόντια κεντρική ασυνέχεια και στις δύο ασυνέχειες εκατέρωθεν της κεντρικής. Εμφανίζεται επίσης περιορισμένη ροή στη κεντρική κατακόρυφη ασυνέχεια.



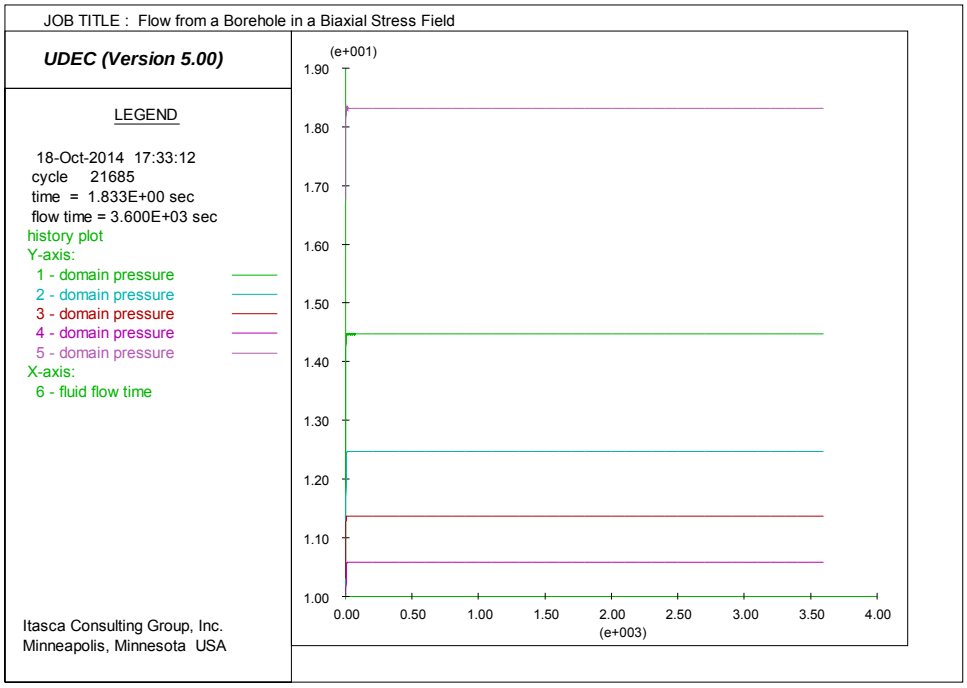
Σχήμα 5.40:Υδραυλικό άνοιγμα των ασυνεχειών για εισπίεση διάρκειας 30 sec

Από το σχήμα φαίνεται ότι στις ασυνέχειες στις οποίες σύμφωνα με το προηγούμενο σχήμα υπάρχει ροή, παρουσιάζεται υδραυλικό άνοιγμα, με μέγιστη τιμή τα 81μm.



Σχήμα 5.41:Διακύμανση της πίεσης στα διάφορα σημεία του ταμιευτήρα για εισπίεση διάρκειας 30 sec

Σύμφωνα με το διάγραμμα του Σχήματος 5.30, στην οριζόντια ασυνέχεια η μέγιστη τιμή της πίεσης κυμαίνεται ανάμεσα στα 11.3 Pa (σημείο 3) και 14.5 MPa (σημείο 1). ενώ στη κάθετη ασυνέχεια η μέγιστη τιμή κυμαίνεται ανάμεσα στα 10.5 MPa (σημείο 4) και στα 12.4 MPa (σημείο 2). Στη γεώτρηση η μέγιστη τιμή της πίεσης είναι 18.3 MPa (σημείο 5). Παρατηρείται μια μείωση της πίεσης, όσο απομακρυνόμαστε από τη γεώτρηση και στην οριζόντια και στη κατακόρυφη ασυνέχεια.

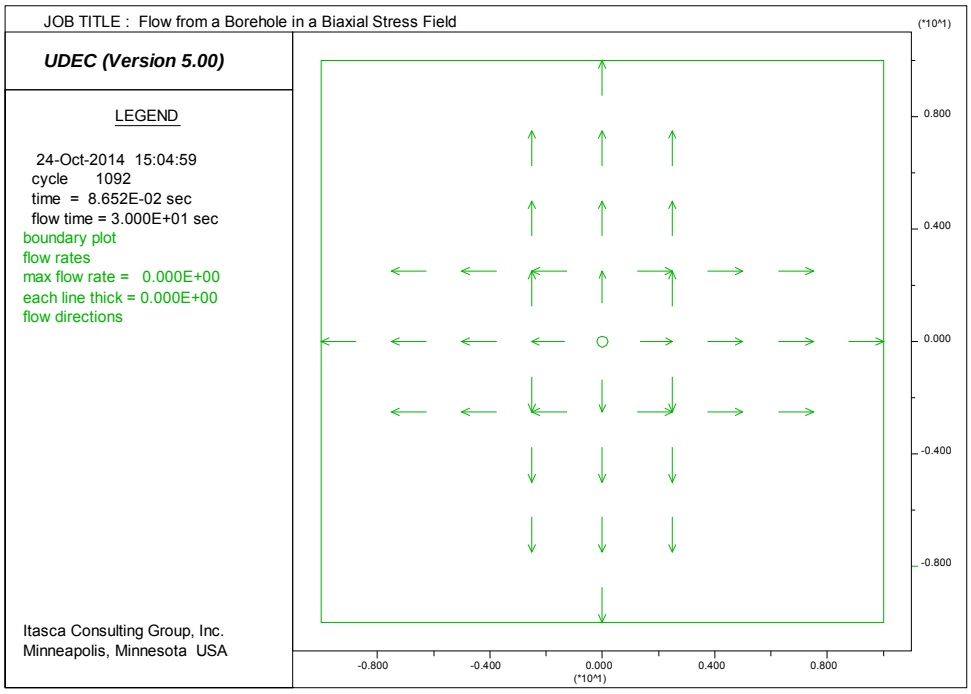


Σχήμα 5.42:Διακύμανση της πίεσης στα διάφορα σημεία του ταμιευτήρα για εισπίεση διάρκειας 3600 sec

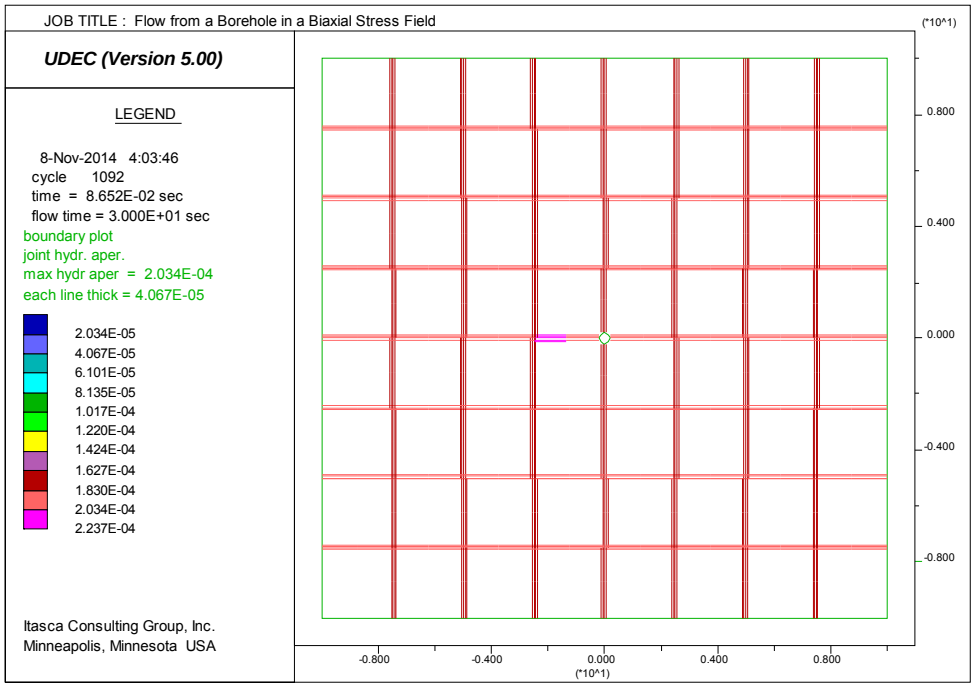
Η τιμή της πίεσης σε όλα τα σημεία, σταθεροποιείται σε σύντομο χρονικό διάστημα και διατηρείται σταθερή για χρονικό διάστημα 1 ώρας

5.2.2.4 Αρχικό άνοιγμα ασυνεχειών 250μm

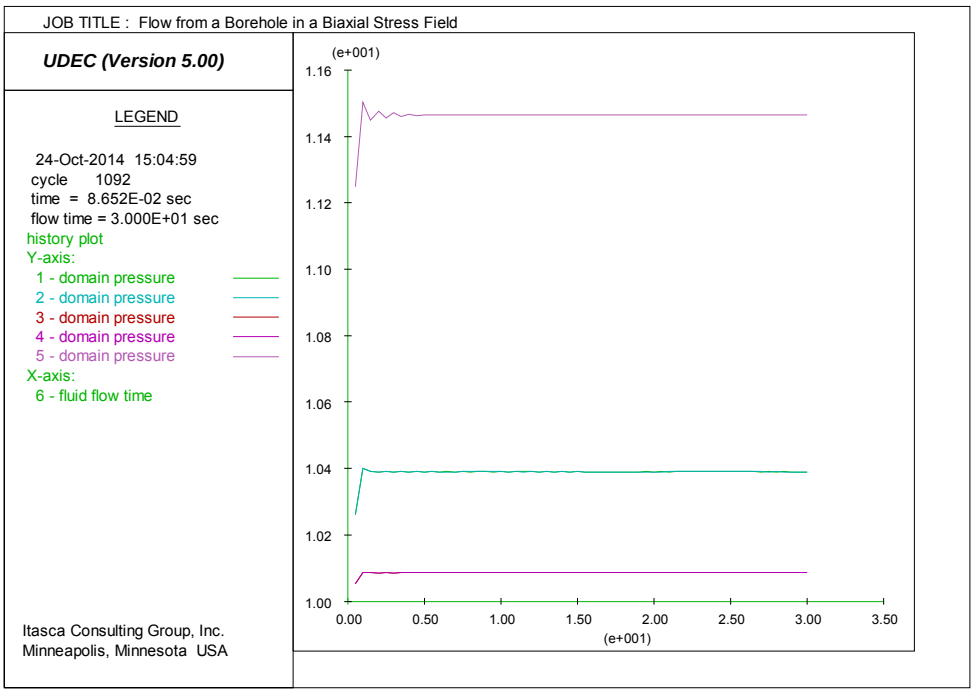
Για μεγαλύτερη τιμή αρχικού ανοίγματος ασυνεχειών (250μm) το ρευστό ρέει προς όλες τις διευθύνσεις (Σχήμα 5.43), ενώ παρουσιάζεται υδραυλικό άνοιγμα σε όλες τις ασυνέχειες, με μέγιστη τιμή που φθάνει τα 203μm (Σχήμα 5.44).



Σχήμα 5.43:Διεύθυνση της ροής για εισπίεση διάρκειας 30 sec

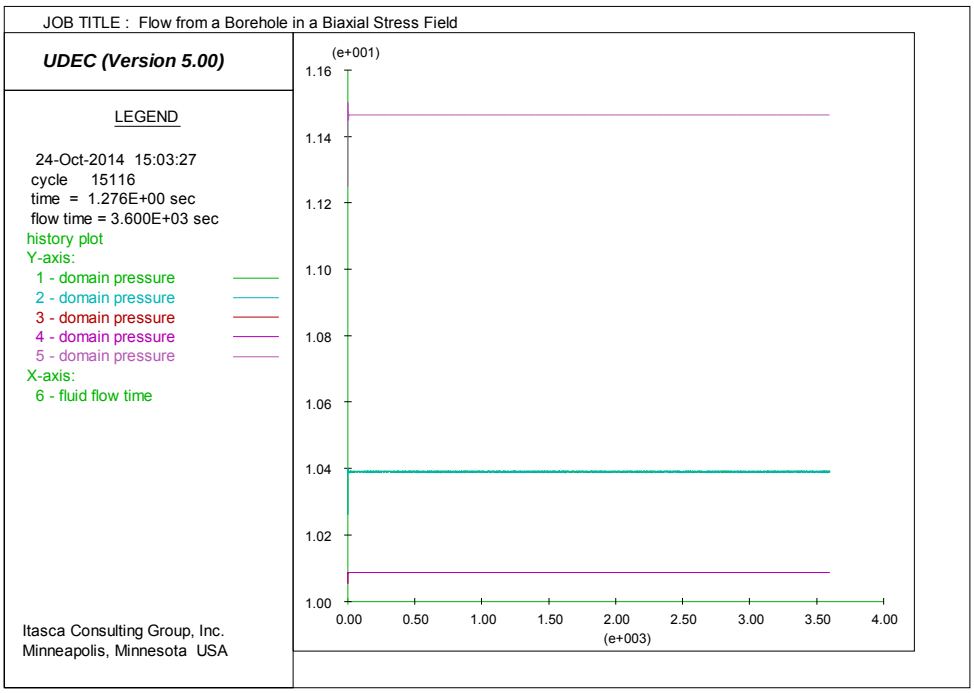


Σχήμα 5.44:Υδραυλικό άνοιγμα των ασυνεχειών για εισπίεση διάρκειας 30 sec



Σχήμα 5.45:Διακύμανση της πίεσης στα διάφορα σημεία του ταμιευτήρα για εισπίεση διάρκειας 30 sec

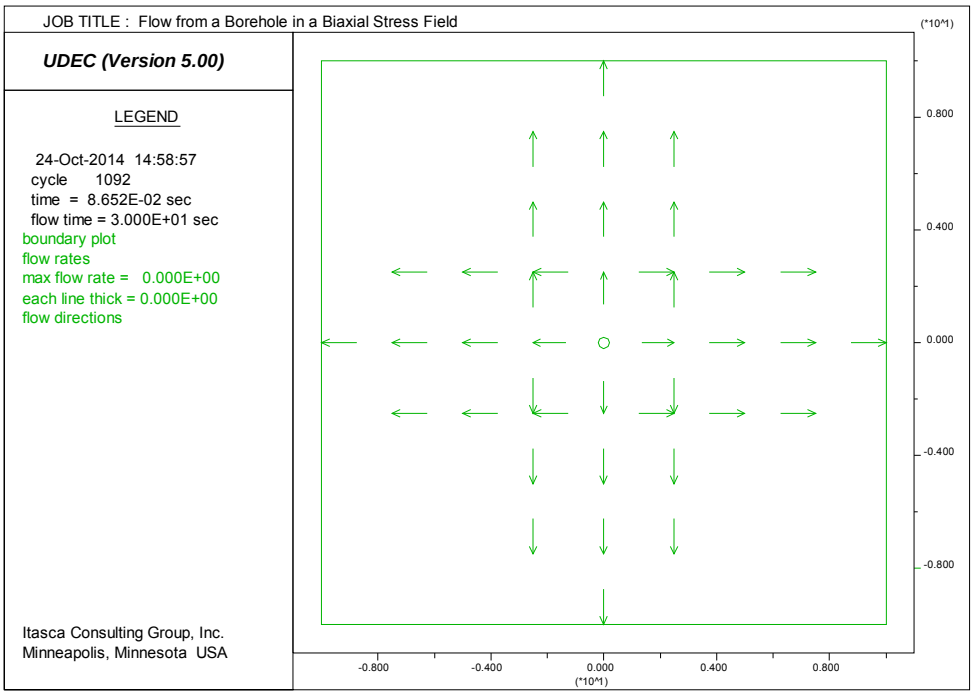
Οι τιμές της πίεσης στα σημεία 1 και 3 (οριζόντια ασυνέχεια) βρίσκονται εκτός κλίμακας. Στο σημείο 2 η τιμή κυμαίνεται στα 10.4 MPa και στο σημείο 4 στα 10.1 MPa περίπου. Στο σημείο 5 (γεώτρηση) η τιμή της πίεσης είναι περίπου 11.45 MPa.



Σχήμα 5.46:Διακύμανση της πίεσης στα διάφορα σημεία του ταμιευτήρα για εισπίεση διάρκειας 3600 sec

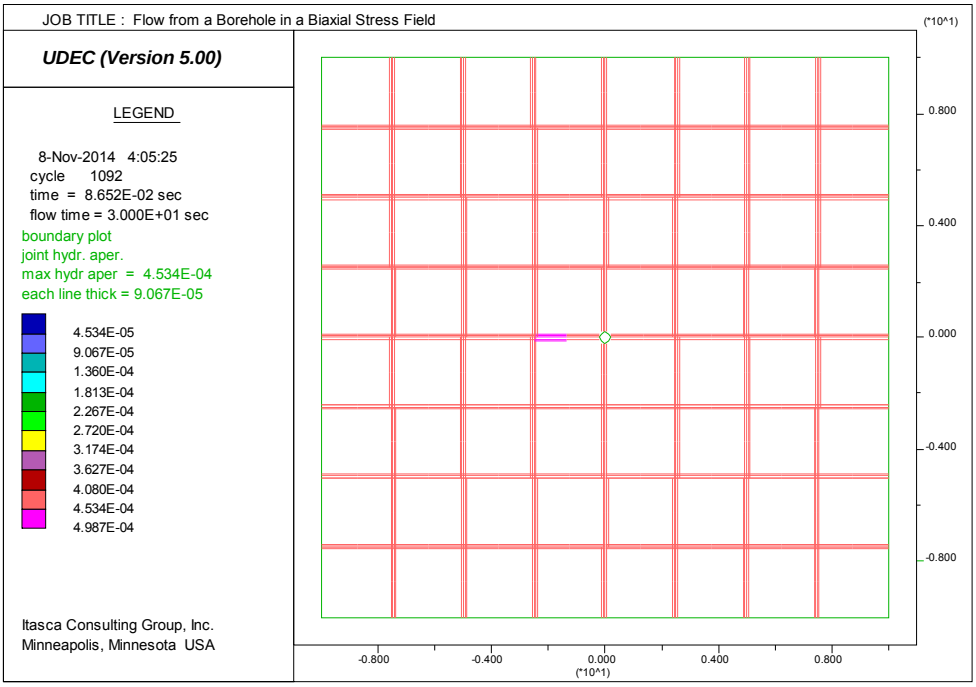
Η τιμή της πίεσης σε όλα τα σημεία (η τιμή στα σημεία 1 και 3 βρίσκονται εκτός κλίμακας), σταθεροποιείται σε σύντομο χρονικό διάστημα και διατηρείται σταθερή για χρονικό διάστημα 1 ώρας

5.2.2.5 Αρχικό άνοιγμα ασυνεχειών 500μ

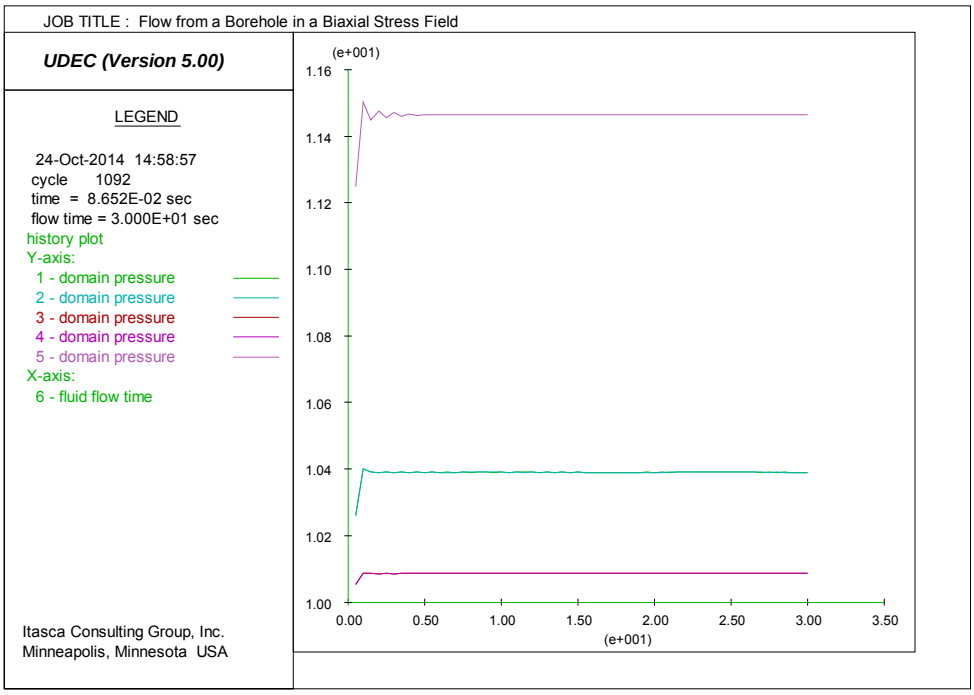


Σχήμα 5.47:Διεύθυνση της ροής για εισπίεση διάρκειας 30 sec

Για μεγαλύτερη τιμή αρχικού ανοίγματος ασυνεχειών (500μm) το ρευστό ρέει προς όλες τις διευθύνσεις (Σχήμα 5.47) ενώ παρουσιάζεται υδραυλικό άνοιγμα σε όλες τις ασυνέχειες, με τη μέγιστη τιμή να φτάνει τα 453μm (Σχήμα 5.48).

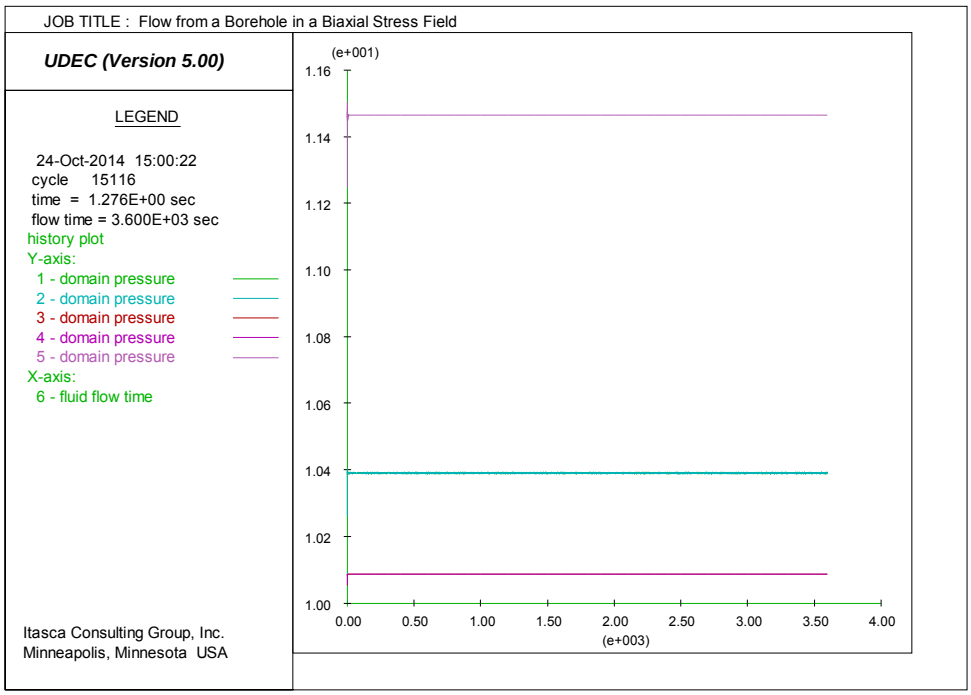


Σχήμα 5.48: Υδραυλικό άνοιγμα των ασυνεχειών για εισπίεση διάρκειας 30 sec



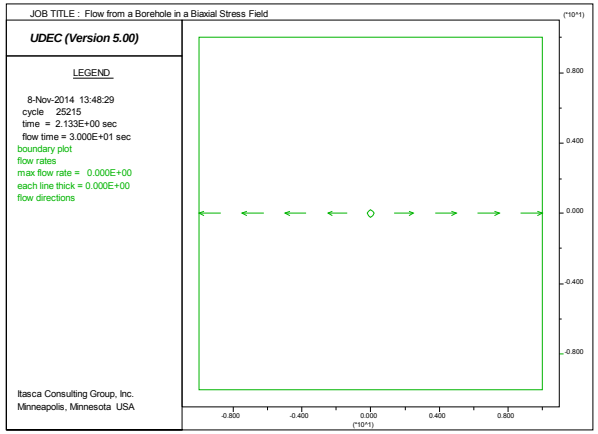
Σχήμα 5.49:Διακύμανση της πίεσης στα διάφορα σημεία του ταμιευτήρα για εισπίεση διάρκειας 30 sec

Σύμφωνα με το διάγραμμα του Σχήματος 5.49, στο σημείο 2 η τιμή κυμαίνεται στα 10.4 MPa και στο σημείο 4 στα 10.1 MPa περίπου. Στο σημείο 5 (γεώτρηση) η τιμή της πίεσης είναι περίπου 11.45 MPa. Οι τιμές της πίεσης στα σημεία 1 και 3 (οριζόντια ασυνέχεια) βρίσκονται εκτός κλίμακας. Η τιμή της πίεσης σε όλα τα σημεία (η τιμή στα σημεία 1 και 3 βρίσκονται εκτός κλίμακας), σταθεροποιείται σε σύντομο χρονικό διάστημα και διατηρείται σταθερή για χρονικό διάστημα 1 ώρας.

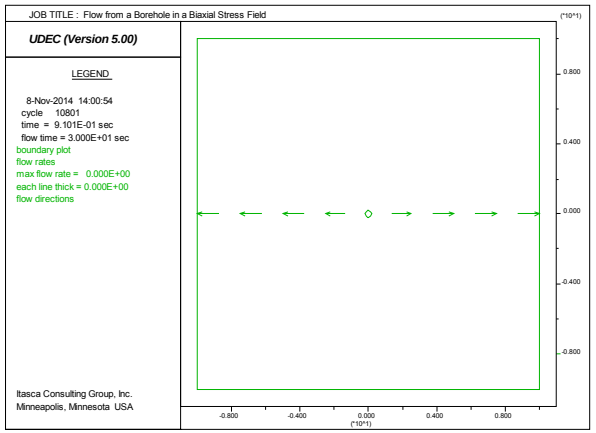


Σχήμα 5.50:Διακύμανση της πίεσης στα διάφορα σημεία του ταμιευτήρα για εισπίεση διάρκειας 3600 sec

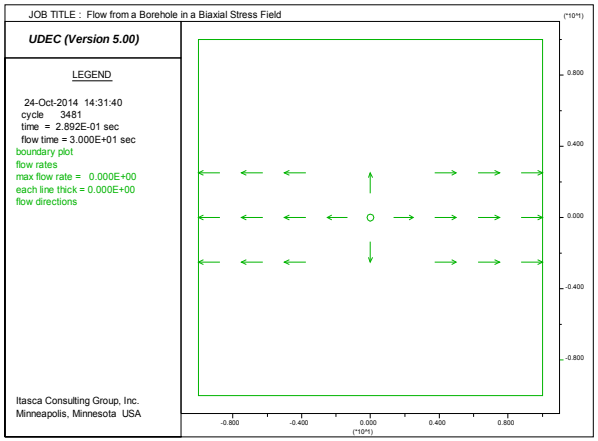
5.2.2.6 Σύγκριση αποτελεσμάτων



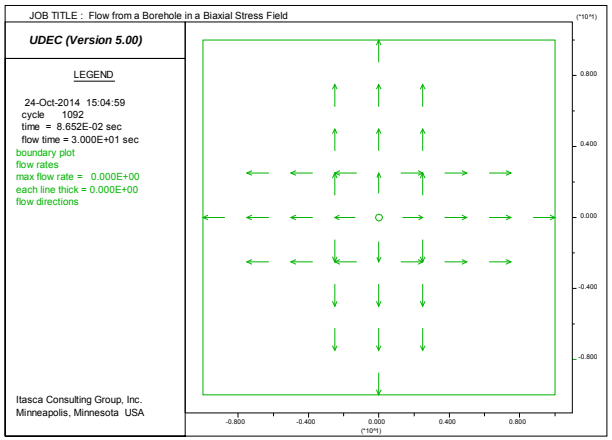
25μ



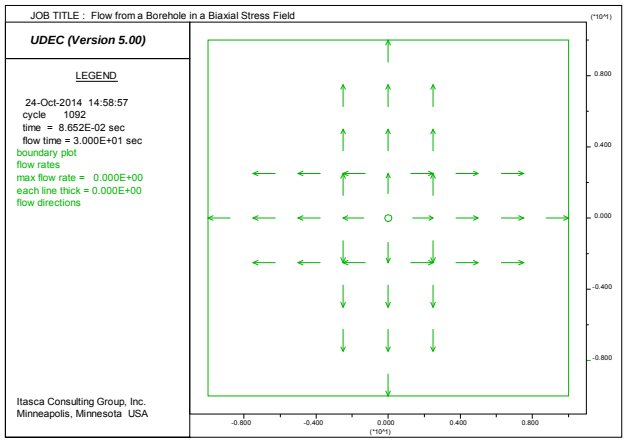
50μ



100μ



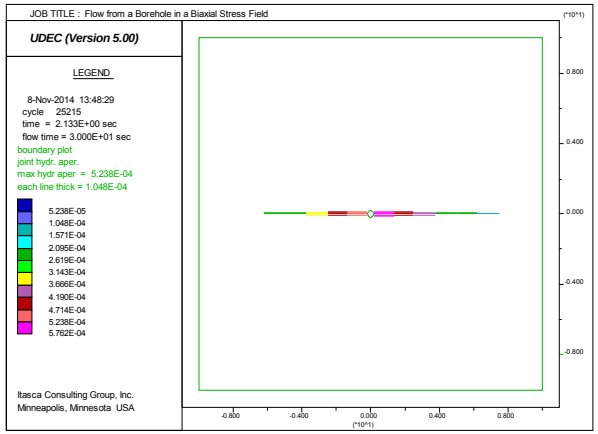
250μ



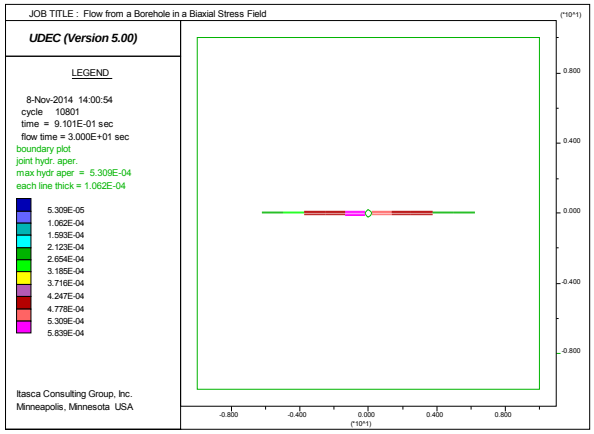
500μ

Σχήμα 5.51:Η διεύθυνση της ροής για διαφορετικούς ρυθμούς εισπίεσης

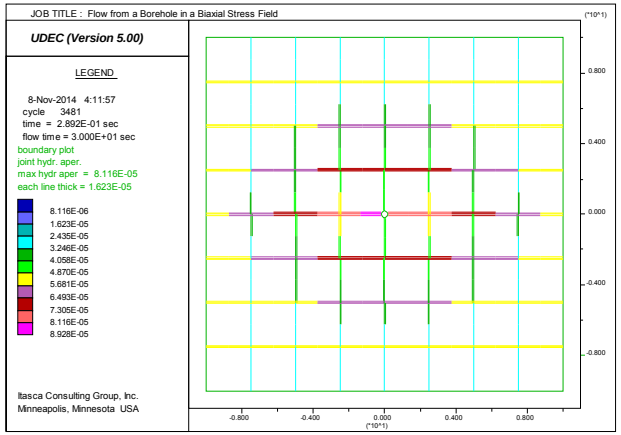
Παρατηρείται ότι για μικρότερο αρχικό άνοιγμα ασυνεχειών, εμφανίζεται μια περιορισμένη ροή. Ωστόσο, με την αύξηση του ανοίγματος των ασυνεχειών, η ροή είναι αισθητά πιο έντονη και διαδίδεται προς περισσότερες κατευθύνσεις.



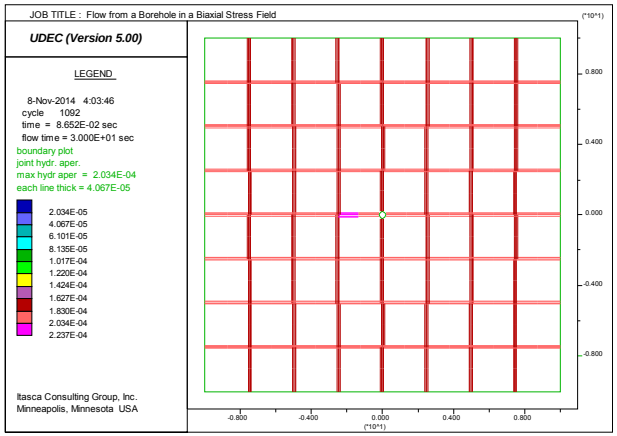
25μ



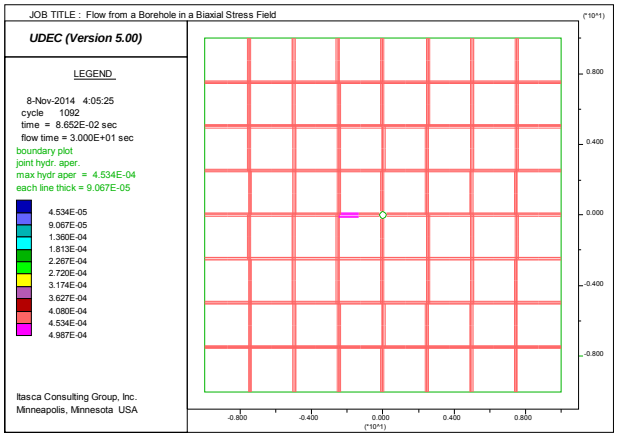
50μ



100μ



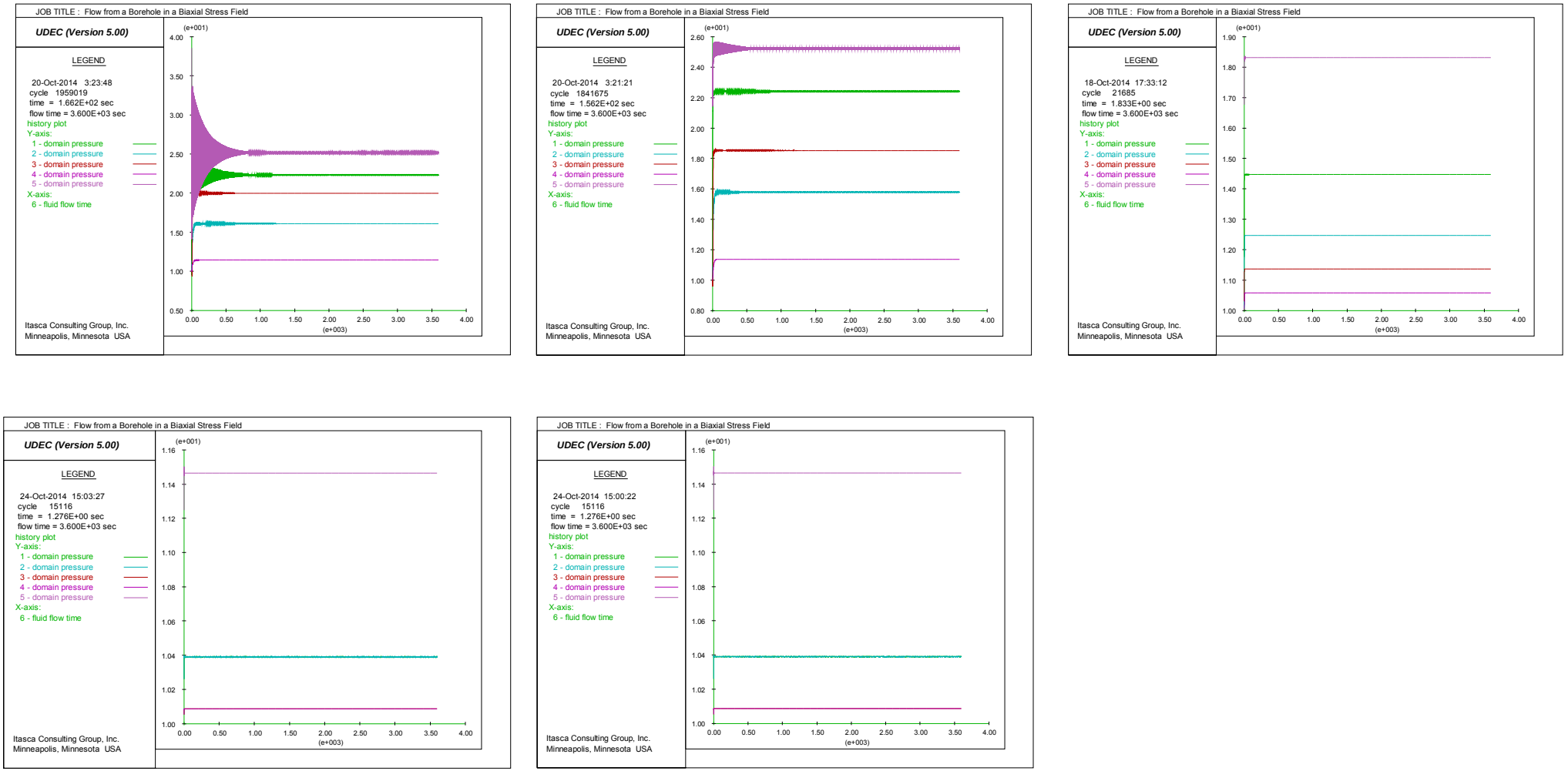
250μ



500μ

Σχήμα 5.52:Υδραυλικά ανοίγματα ασυνεχειών για διαφορετικές τιμές ρυθμού εισπίεσης

Για μικρότερο αρχικό άνοιγμα, οι ασυνέχειες που παρουσιάζουν υδραυλικό άνοιγμα λόγω της εισπίεσης, περιορίζονται μόνο στην κεντρική οριζόντια ασυνέχεια. Αυξάνοντας το αρχικό άνοιγμα των ασυνεχειών, παρατηρείται υδραυλικό άνοιγμα και στα δύο συστήματα ασυνεχειών σε μια ευρύτερη περιοχή γύρω από την γεώτρηση.



Σχήμα 5.53:Η διακύμανση της πίεσης σε συγκεκριμένα σημεία του ταμιευτήρα για διαφορετικές τιμές του ρυθμού εισπίεσης

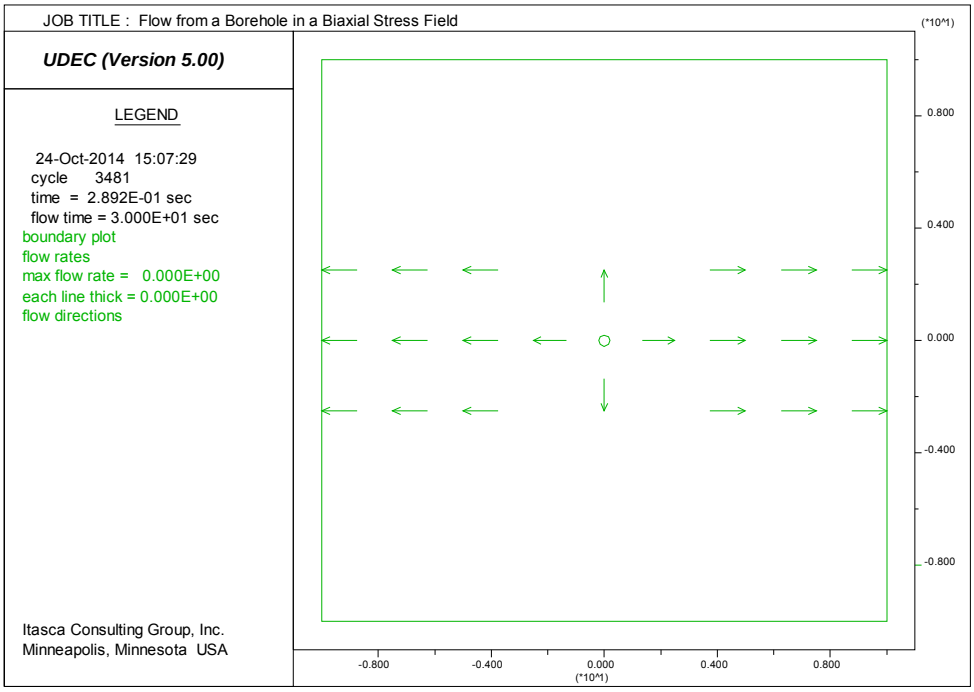
Σύμφωνα με τα παραπάνω διαγράμματα, για μικρό άνοιγμα ασυνεχειών (25μm και 50μm), η πίεση εμφανίζει μια ιδιαίτερη αστάθεια και για να σταθεροποιηθεί σε μια τιμή χρειάζεται ένα μεγάλο χρονικό διάστημα. Για μεγαλύτερα ανοίγματα (250μm και 500μm), η τιμή της πίεσης σε ορισμένα σημεία του μοντέλου είναι τόσο υψηλή, που βρίσκεται εκτός κλίμακ

5.2.3 Αποτελέσματα παραμετρικών δοκιμών για διαφορετικά εντατικά πεδία

Αφού εξετάστηκε η επίδραση των διαφορετικών ρυθμών εισπίεσης, καθώς και του αρχικού ανοίγματος των ασυνεχειών, στην συνέχεια θα ερευνηθεί η επιρροή του είδους του εντατικού πεδίου. Το βασικό μοντέλο έχει άνοιγμα ασυνεχειών 100μ και ρυθμό εισπίεσης $10*10^{-4}$ m^2/sec. Τα εντατικά πεδία θα είναι τα εξής:

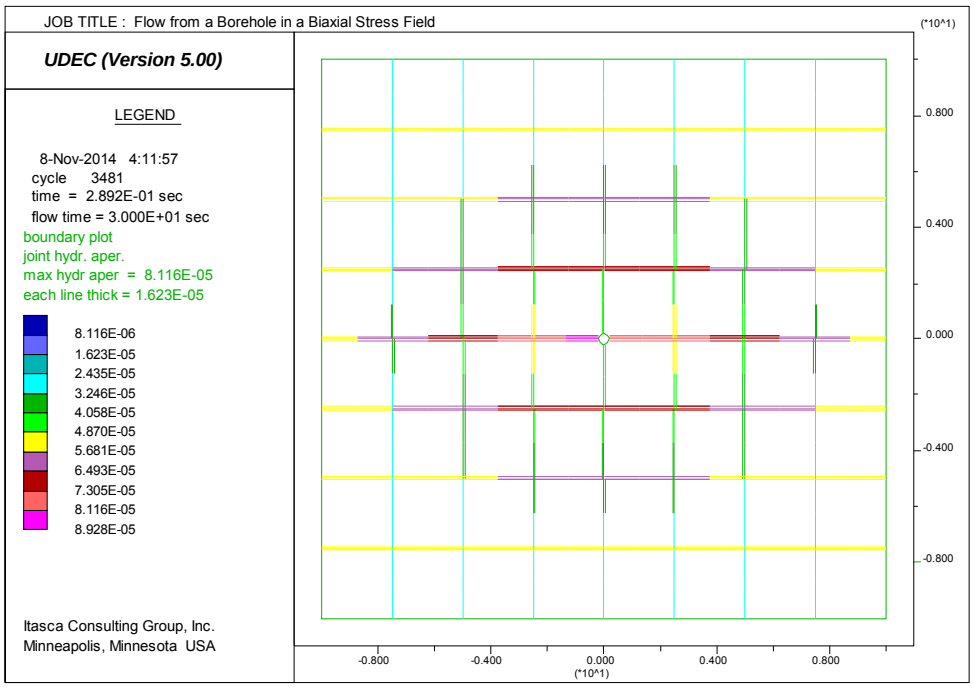
- Ανισότροπο με τον λόγο της μέγιστης κύριας οριζόντιας τάσης προς την ελάχιστη οριζόντια κύρια τάση ίσο με 1.25 (σxx=25 MPa σyy=20 MPa σzz=0 MPa)
- Ανισότροπο με την τιμή της μέγιστης κύριας οριζόντιας τάσης διπλάσια από εκείνη της ελάχιστης κύριας οριζόντιας τάσης (σxx=30 MPa σyy=15 MPa σzz=26 MPa)
- Ισότροπο όπου η μέγιστη κύρια οριζόντια τάση είναι ίση με την ελάχιστη κύρια οριζόντια τάση (σxx=25 MPa σyy=25 MPa σzz=0 MPa)

5.2.3.1 Ανισότροπο εντατικό πεδίο (σxx 25 MPa σyy 20 MPa)



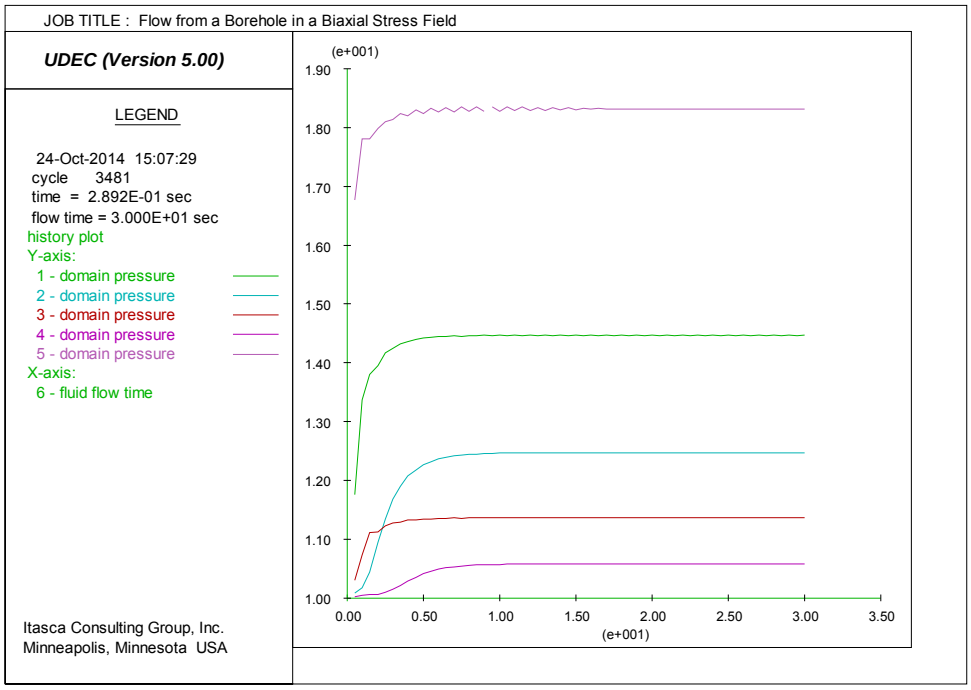
Σχήμα 5.54:Διεύθυνση της ροής για εισπίεση διάρκειας 30 sec

Σύμφωνα με το Σχήμα 5.54, η ροή εμφανίζεται κυρίως στην οριζόντια κεντρική ασυνέχεια και στις δύο ασυνέχειες εκατέρωθεν της κεντρικής. Εμφανίζεται επίσης περιορισμένη ροή στην κεντρική κατακόρυφη ασυνέχεια .



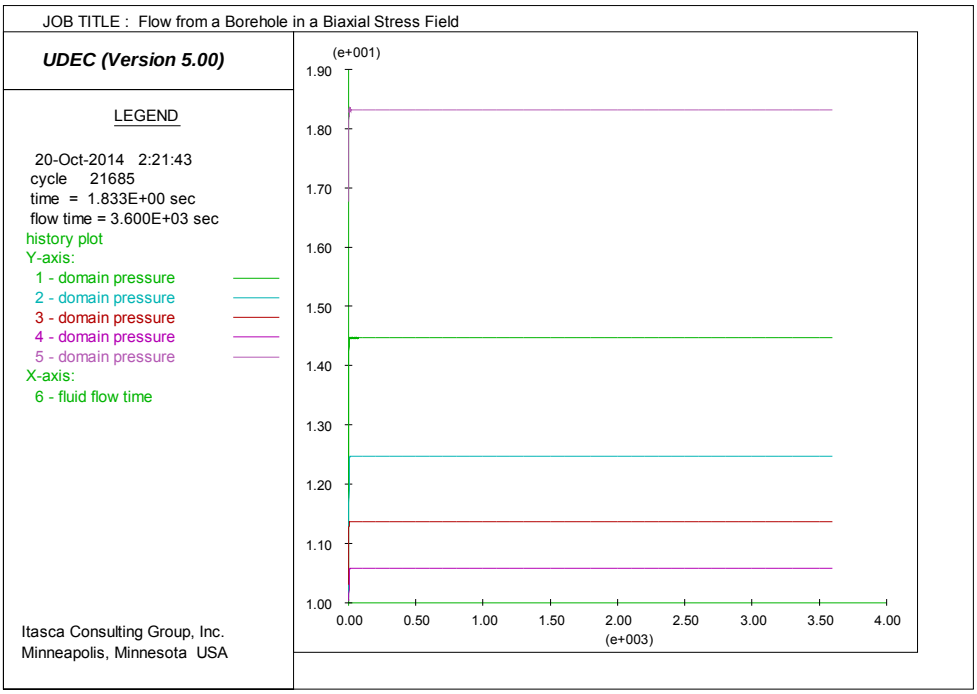
Σχήμα 5.55:Υδραυλικό άνοιγμα των ασυνεχειών για εισπίεση διάρκειας 30 sec

Από το Σχήμα 5.55 φαίνεται ότι οι ασυνέχειες στις οποίες σύμφωνα με το προηγούμενο σχήμα υπάρχει ροή, παρουσιάζουν υδραυλικό άνοιγμα, με μέγιστη τιμή τα 81μm.



Σχήμα 5.56:Διακύμανση της πίεσης στα διάφορα σημεία του ταμιευτήρα για εισπίεση διάρκειας 30 sec

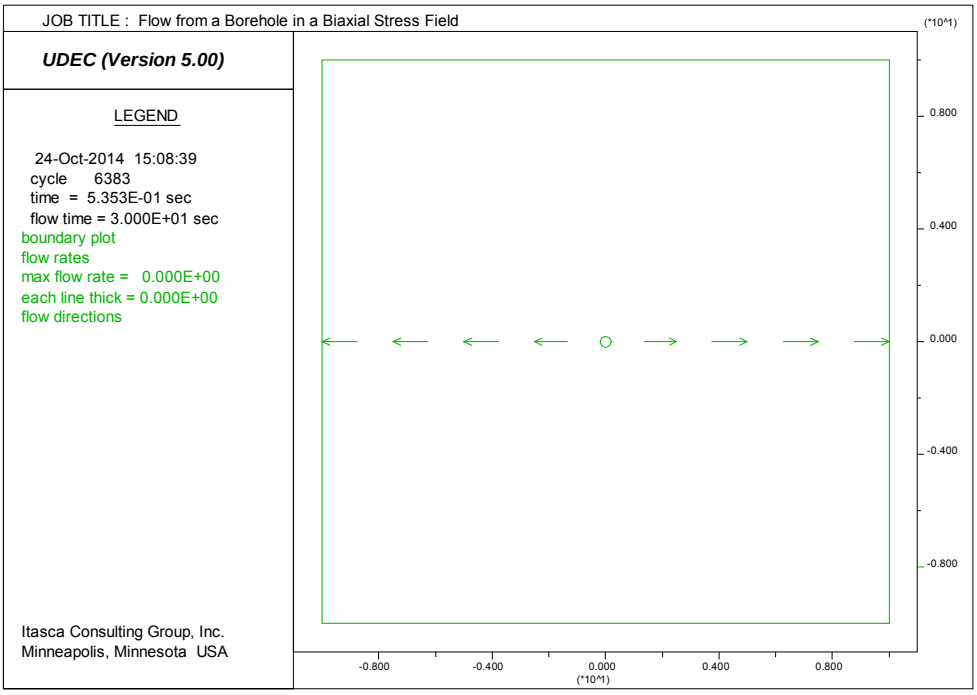
Σύμφωνα με το διάγραμμα του Σχήματος 5.57, στην οριζόντια ασυνέχεια η μέγιστη τιμή της πίεσης κυμαίνεται ανάμεσα στα 11.3 MPa (σημείο 3) και 14.5 MPa (σημείο 1). ενώ στην κάθετη ασυνέχεια η μέγιστη τιμή κυμαίνεται ανάμεσα στα 10.5 MPa (σημείο 4) και στα 12.4 MPa (σημείο 2). Στην γεώτρηση η μέγιστη τιμή της πίεσης είναι 18.3 MPa (σημείο 5). Παρατηρείται μια μείωση της πίεσης, όσο απομακρυνόμαστε από την γεώτρηση και στην οριζόντια και στην κατακόρυφη ασυνέχεια.



Σχήμα 5.57:Διακύμανση της πίεσης στα διάφορα σημεία του ταμιευτήρα για εισπίεση διάρκειας 3600 sec

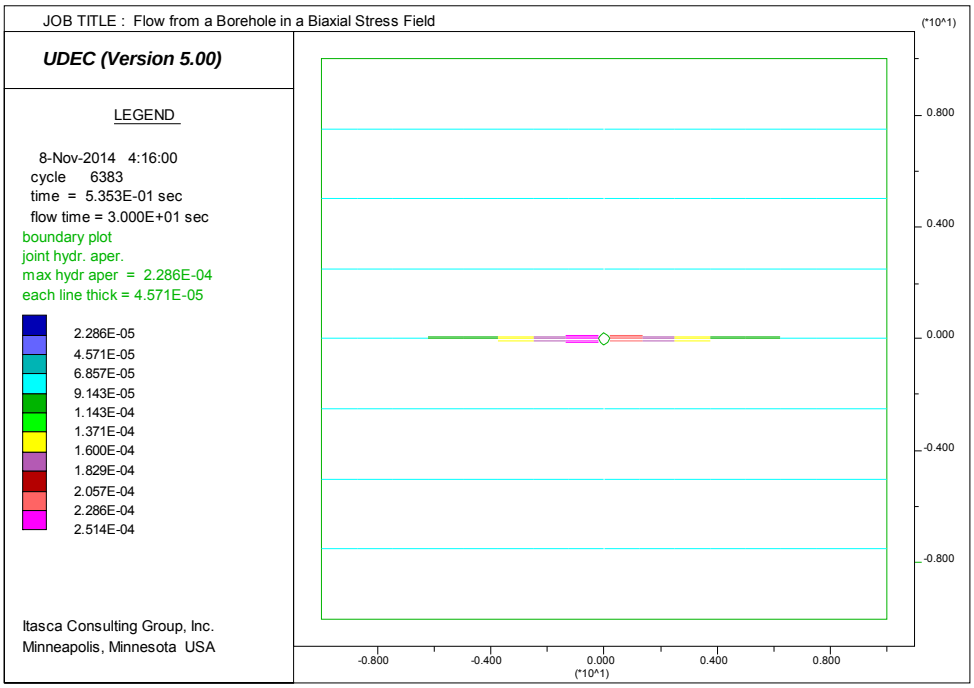
Η τιμή της πίεσης σε όλα τα σημεία, σταθεροποιείται σε σύντομο χρονικό διάστημα και διατηρείται σταθερή για χρονικό διάστημα 1 ώρας

5.2.3.2 Ανισότροπο εντατικό πεδίο (σxx 30 MPa σyy 15 MPa)



Σχήμα 5.58:Διεύθυνση της ροής για εισπίεση διάρκειας 30 sec

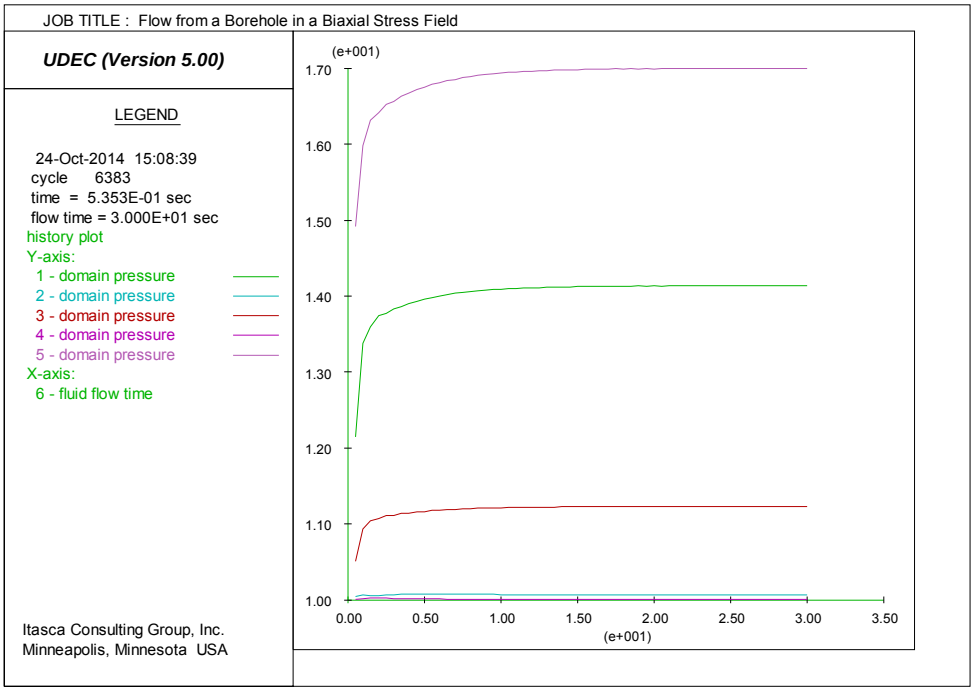
Η διεύθυνση της ροής περιορίζεται στην κεντρική οριζόντια ασυνέχεια (Σχήμα 5.58).



Σχήμα 5.59:Υδραυλικό άνοιγμα των ασυνεχειών για εισπίεση διάρκειας 30 sec

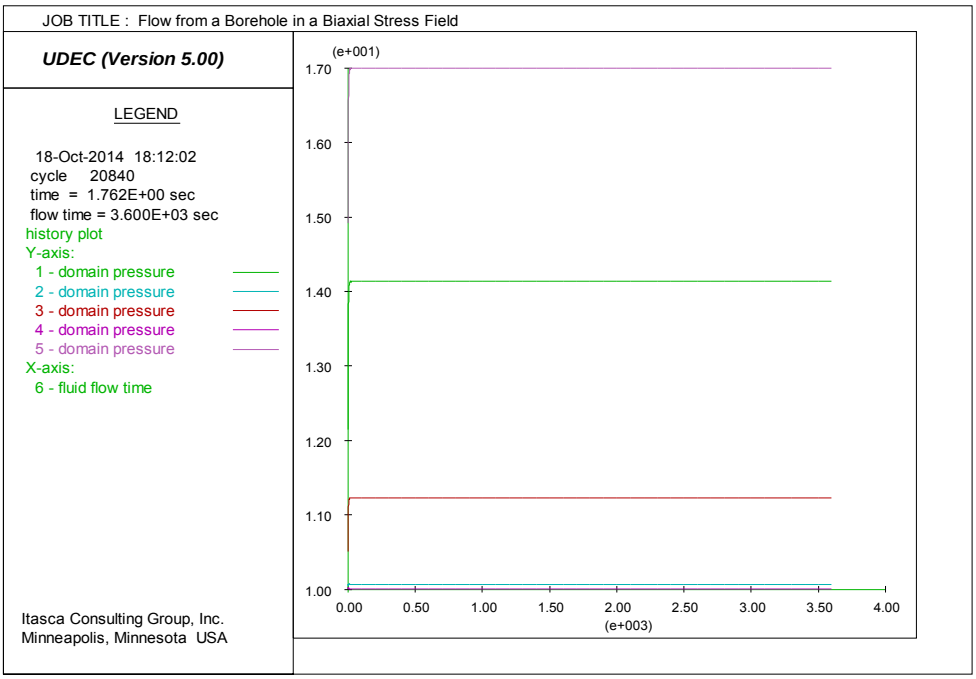
Το γεγονός ότι η διεύθυνση της ροής περιορίζεται στην κεντρική οριζόντια ρωγμή, πιστοποιείται και από το Σχήμα 5.59 που απεικονίζει το υδραυλικό άνοιγμα των

ασυνεχειών. Η μέγιστη τιμή που παρατηρείται είναι τα 228.6μm στην κεντρική οριζόντια ρωγμή πλησίον της γεώτρησης.



Σχήμα 5.60:Διακύμανση της πίεσης στα διάφορα σημεία του ταμιευτήρα για εισπίεση διάρκειας 30 sec

Σύμφωνα με το διάγραμμα του Σχήματος 5.60, στην οριζόντια ασυνέχεια η μέγιστη τιμή της πίεσης κυμαίνεται ανάμεσα στα 11.2 MPa (σημείο 3) και 14.2 MPa (σημείο 1). ενώ στην κάθετη ασυνέχεια η μέγιστη τιμή κυμαίνεται ανάμεσα στα 10 MPa (σημείο 4) και στα 10.1 MPa (σημείο 2). Στην γεώτρηση η μέγιστη τιμή της πίεσης είναι 17 MPa (σημείο 5). Παρατηρείται μια μείωση της πίεσης, όσο απομακρυνόμαστε από την γεώτρηση και στην οριζόντια και στην κατακόρυφη ασυνέχεια.

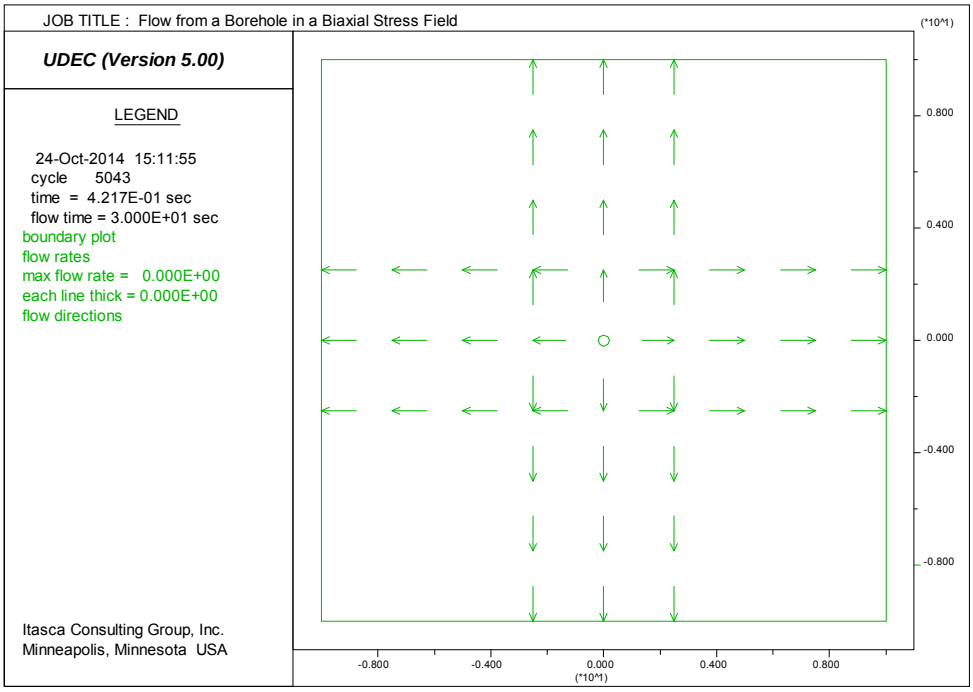


Σχήμα 5.61:Διακύμανση της πίεσης στα διάφορα σημεία του ταμιευτήρα για εισπίεση διάρκειας 3600 sec

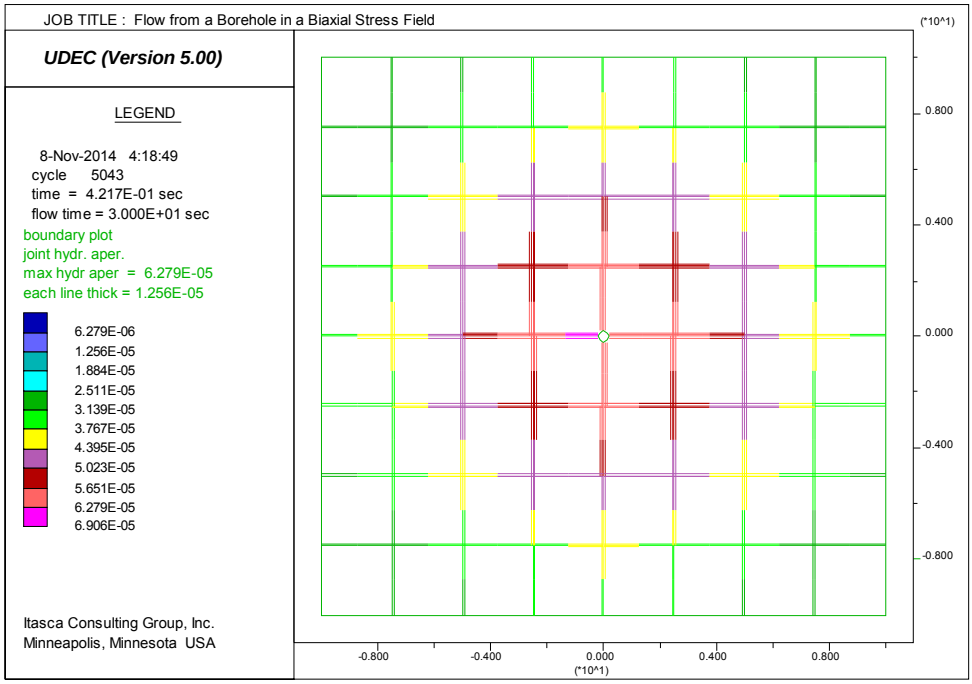
Η τιμή της πίεσης σε όλα τα σημεία, σταθεροποιείται σε σύντομο χρονικό διάστημα και διατηρείται σταθερή για χρονικό διάστημα 1 ώρας

5.2.3.3 Ισότροπο εντατικό πεδίο (σxx 25 MPa σyy 25 MPa)

Όταν το εντατικό πεδίο είναι ισότροπο, το ρευστό ρέει προς όλες τις διευθύνσεις (Σχήμα 5.62).

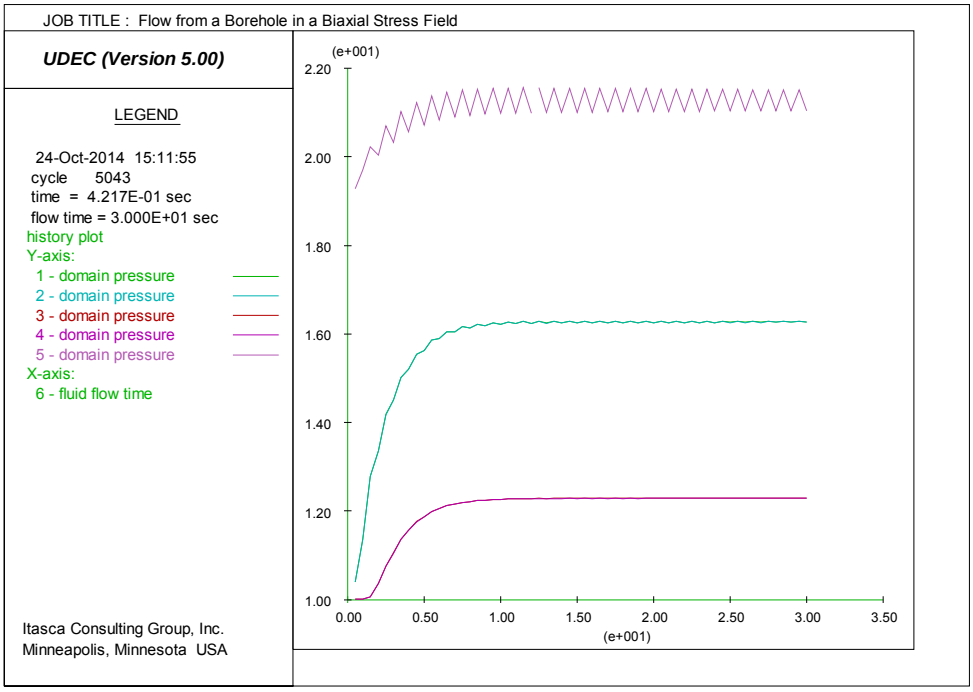


Σχήμα 5.62:Διεύθυνση της ροής για εισπίεση διάρκειας 30 sec



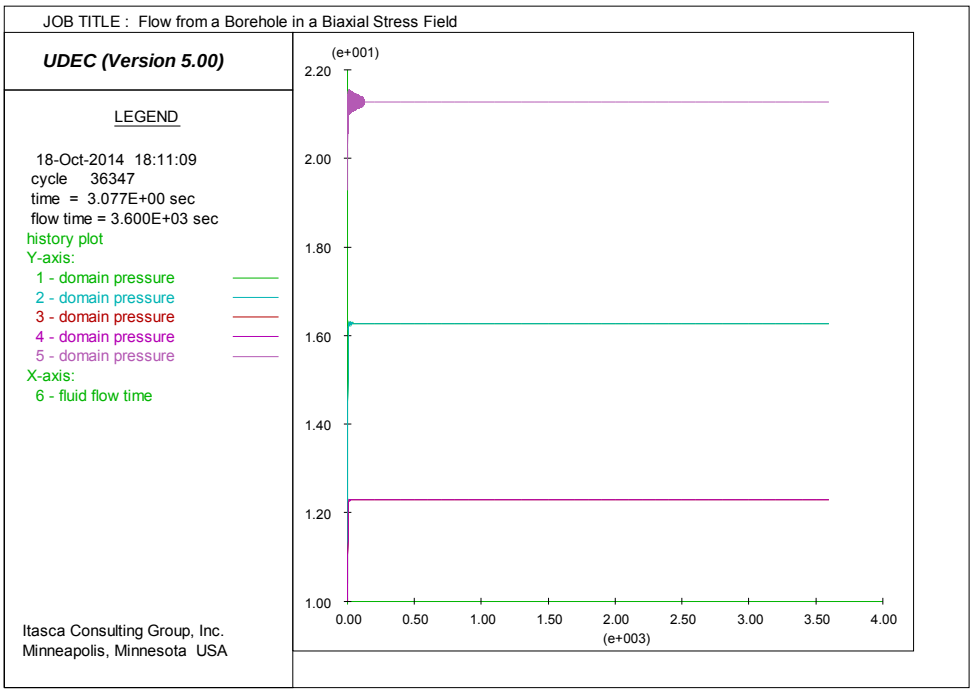
Σχήμα 5.63:Υδραυλικό άνοιγμα των ασυνεχειών για εισπίεση διάρκειας 30 sec

Από το Σχήμα 5.63 φαίνεται ότι οι ασυνέχειες στις οποίες σύμφωνα με το προηγούμενο σχήμα υπάρχει ροή, παρουσιάζουν υδραυλικό άνοιγμα, με την μέγιστη τιμή να φτάνει περίπου τα 62.8μm.



Σχήμα 5.64:Διακύμανση της πίεσης στα διάφορα σημεία του ταμιευτήρα για εισπίεση διάρκειας 30 sec

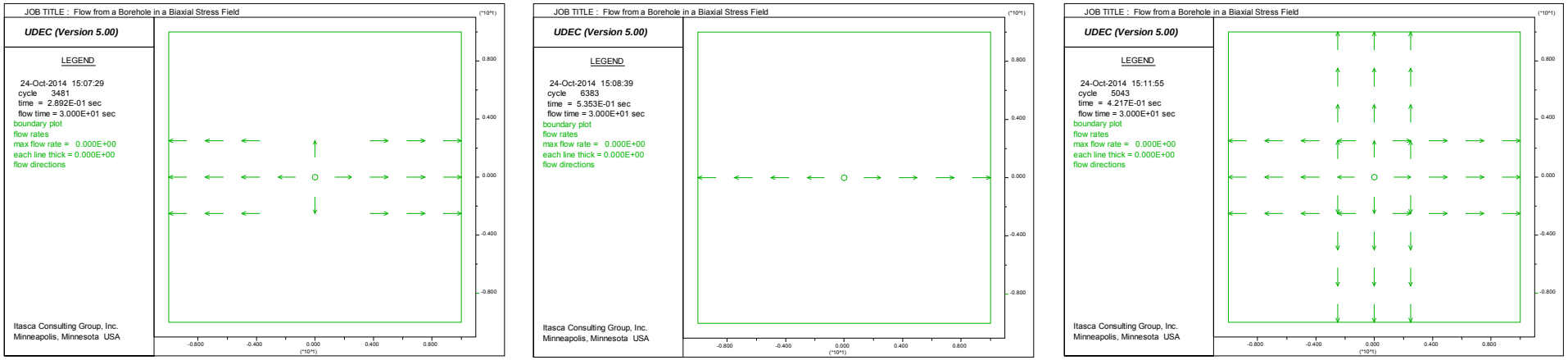
Σύμφωνα με το διάγραμμα του Σχήματος 5.64, στην οριζόντια ασυνέχεια η τιμή της πίεσης βρίσκεται εκτός κλίμακας, ενώ στην κάθετη ασυνέχεια η μέγιστη τιμή κυμαίνεται ανάμεσα στα 12.2 MPa (σημείο 4) και στα 16.2 MPa (σημείο 2). Στην γεώτρηση η μέγιστη τιμή της πίεσης είναι 21 MPa (σημείο 5). Αξίζει να σημειωθεί ότι οι τιμές της πίεσης στα σημεία 1 και 3 βρίσκονται εκτός κλίμακας, ενώ η πίεση στο σημείο 5 είναι ιδιαίτερα ασταθής



Σχήμα 5.65:Διακύμανση της πίεσης στα διάφορα σημεία του ταμιευτήρα για εισπίεση διάρκειας 3600 sec

Η τιμή της πίεσης στα σημεία 2 και 4 σταθεροποιείται σε σύντομο χρονικό διάστημα, ενώ στο σημείο 5 αν και η τιμή παρουσιάζεται ασταθής, στην συνέχεια σταθεροποιείται για χρονικό διάστημα 1 ώρας

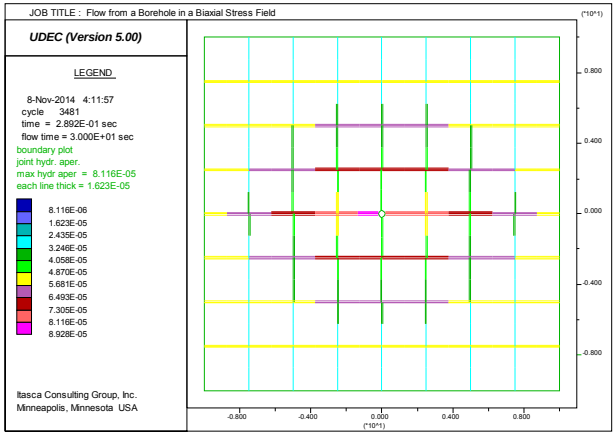
5.2.3.4 Σύγκριση αποτελεσμάτων



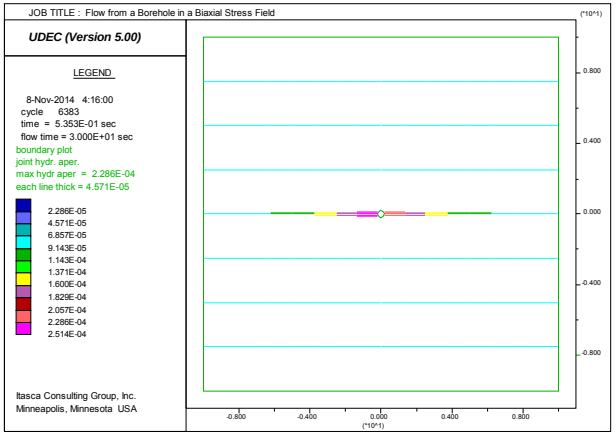
ανισότροπο Ανισότροπο με σxx=2σyy ισότροπο

Σχήμα 5.66:Η διεύθυνση της ροής για διαφορετικούς ρυθμούς εισπίεσης

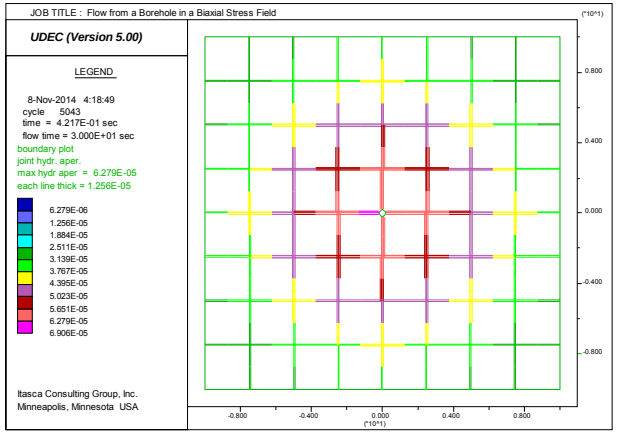
Στο πρώτο σχήμα, όπου το εντατικό πεδίο είναι ανισότροπο με σxx=25 MPa και σyy=20 MPa, το ρευστό ρέει κυρίως στην κεντρική οριζόντια ασυνέχεια και στις δύο εκατέρωθεν αυτής και λιγότερο στην κεντρική κατακόρυφη. Όταν αυξάνεται η τιμή της μέγιστης κύριας οριζόντιας τάσης και μειώνεται η τιμή της ελάχιστης κύριας οριζόντιας τάσης (ο λόγος τους ισούται με 2), η ροή περιορίζεται στην κεντρική οριζόντια ασυνέχεια. Όταν το πεδίο είναι ισότροπο, το ρευστό ρέει προς όλες τις διευθύνσεις.



ανισότροπο



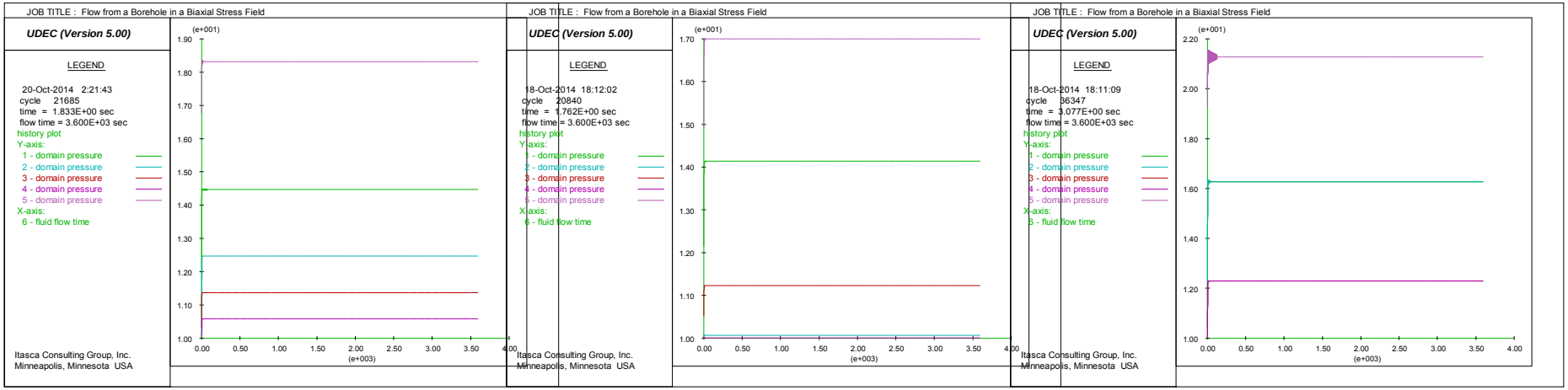
Ανισότροπο με σxx=2σyy



ισότροπο

Σχήμα 5.67:Υδραυλικά ανοίγματα ασυνεχειών για διαφορετικές τιμές ρυθμού εισπίεσης

Στο πρώτο σχήμα, όπου το εντατικό πεδίο είναι ανισότροπο με σxx=25 MPa και σyy=20 MPa, το ρευστό ρέει κυρίως στην κεντρική οριζόντια ασυνέχεια και στις δύο εκατέρωθεν αυτής όπου και παρουσιάζεται υδραυλικό άνοιγμα. Όταν αυξάνεται η τιμή της μέγιστης κύριας οριζόντιας τάσης και μειώνεται η τιμή της ελάχιστης κύριας οριζόντιας τάσης (ο λόγος τους ισούται με 2), υδραυλικό άνοιγμα παρουσιάζεται μόνο στην κεντρική οριζόντια ασυνέχεια. Όταν το πεδίο είναι ισότροπο, το υδραυλικό άνοιγμα είναι ίδιο (ή παρόμοιο) προς όλες τις διευθύνσεις



ανισότροπο

Ανισότροπο με σxx=2σyy

ισότροπο

Σχήμα 5.68:Η διακύμανση της πίεσης σε συγκεκριμένα σημεία του ταμιευτήρα για διαφορετικές τιμές του ρυθμού εισπίεσης

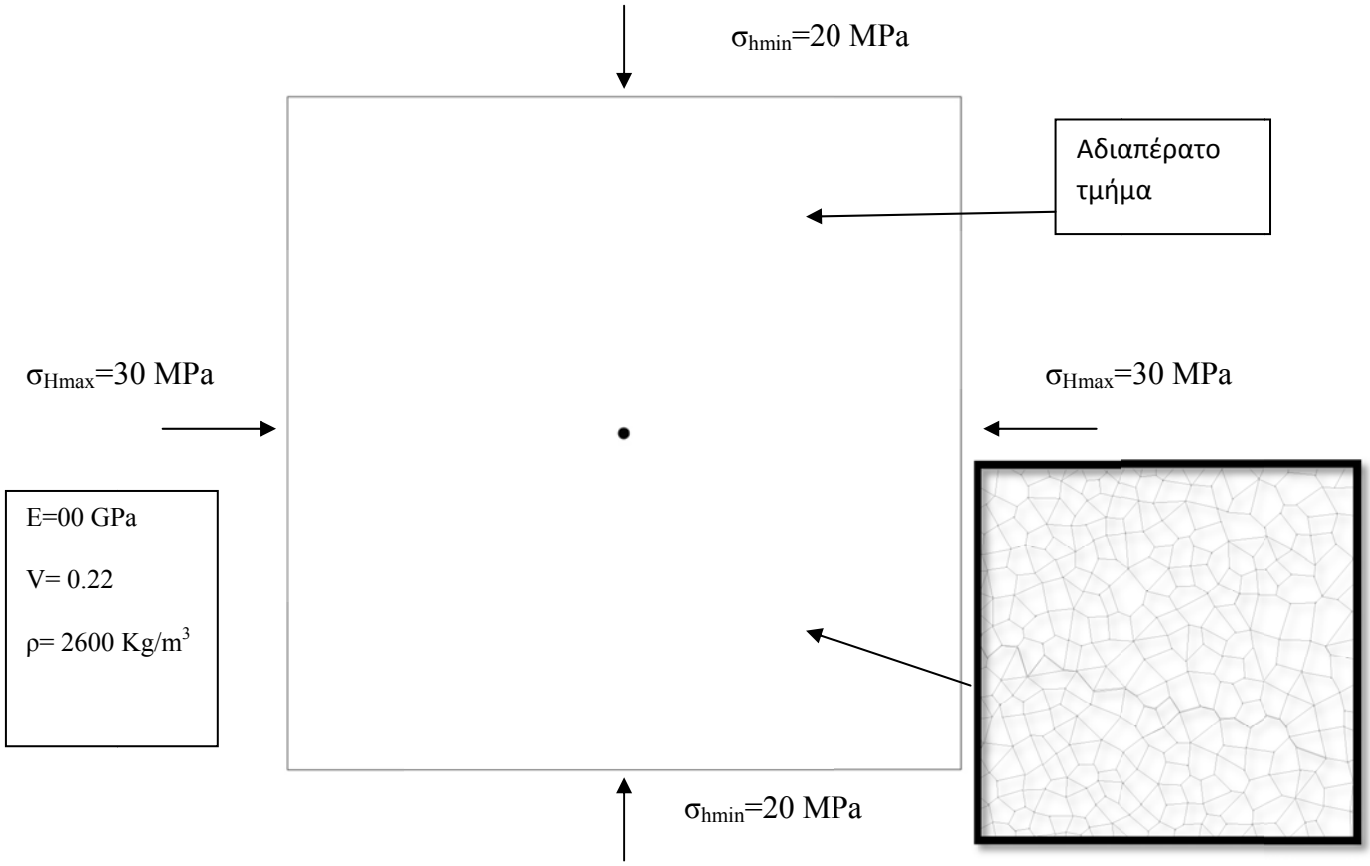
Σύμφωνα με τα δύο πρώτα διαγράμματα (ανισότροπο εντατικό πεδίο), παρατηρείται ότι η χαμηλώτερη τιμή της πίεσης αντιστοιχεί στο μοντέλο με την μεγαλύτερη τιμή της μέγιστης οριζόντιας κύριας τάσης. Για ισότροπο εντατικό πεδίο, η πίεση εμφανίζεται ασταθής, ενώ ορισμένες τιμές της βρίσκονται εκτός κλίμακας.

6 Τρίτη σειρά αριθμητικών μοντέλων με ψηδίδωση Voronoi

Στην τρίτη σειρά αριθμητικών προσομοιώσεων, επιχειρείται η προσομοίωση της υδραυλικής θραύσης του πετρώματος, αναπαριστάνοντας το in situ πέτρωμα ως ένα σύνολο από block Voronoi. Σκοπός των προσομοιώσεων είναι αφ΄ενός η παρατήρηση της συμπεριφοράς του αλγορίθμου ασυμπίεσης ροής του UDEC κατά την προσομοίωση ενός προβλήματος που έχει πρακτική σημασία, αφετέρου η διερεύνηση της επίδρασης παραμέτρων της προσομοίωσης (π.χ. round length), του αρχικού ανοίγματος των ασυνεχειών (azero) και του φυσικού εντατικού πεδίου, στον τρόπο και στο μήκος της διάδοσης της υδραυλικής θραύσης.

Για την απεικόνιση του πετρώματος, θα εφαρμοστεί όπως αναφέρθηκε η ψηφίδωση Voronoi. Τα τεμάχια Voronoi είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους μέσω των διεπιφανειών στις οποίες αποδίδονται πεπερασμένες τιμές διατμητικής και εφελκυστικής αντοχής. Η διάδοση της υδραυλικής θραύσης απεικονίζεται με την αστοχία (σε εφελκυσμό ή σε διάτμηση) των διεπιφανειών μεταξύ των τεμαχίων Voronoi.

Το μοντέλο του *UDEC*, αναπαριστά ένα δισδιάστατο οριζόντιο τμήμα ενός ταμιευτήρα, πάχους 350 m. Οι διαστάσεις του μοντέλου είναι 100x100 m. Η εισπίεση, πραγματοποιείται μέσω μιας κατακόρυφης γεώτρησης που βρίσκεται στο κέντρο του μοντέλου. Στο βασικό αριθμητικό μοντέλο, το εντατικό πεδίο θεωρείται ανισότροπο, με σxx=30 MPa και σyy=20 MPa. Έτσι, ο λόγος της μέγιστης οριζόντιας κύριας τάσης ως προς την ελάχιστη οριζόντια κύρια τάση να είναι ίσος με 1.5. Στη γεώτρηση εισπιέζεται ρευστό με ρυθμό εισπίεση 0.07 m^3/s ή αλλιώς 35 kg ρευστού ανά δευτερόλεπτο. Η συγκεκριμένη τιμή μπορεί να μεταφραστεί σε 26.4 βαρέλια το λεπτό (bpm).



Σχήμα 6.1 Σχηματική απεικόνιση του ταμιευτήρα που αναπαριστά το αριθμητικό μοντέλο του UDEC

6.1 Προετοιμασία των αριθμητικών μοντέλων

Για την κατασκευή του μοντέλου, πρέπει πρώτα να καθορισθεί το μήκος στο οποίο θα γίνει στρογγύλευση των γωνιών του κάθε ογκοτεμαχίου στο UDEC. Με την χρήση της εντολής **ROUND**, ορίζεται το μήκος αυτό ως ίσο με 0.04 m. Στην συνέχεια, με την εντολή **BLOCK**, κατασκευάζεται το δισδιάστατο τμήμα του ταμιευτήρα, διαστάσεων 100x100 m. Για την απεικόνιση του in situ πετρώματος, θα εφαρμοστεί η ψηφίδωση Voronoi. Μέσω της εντολής **VORONOI EDGE l ROUND v**, γίνεται η διακριτοποίηση του μοντέλου σε block Voronoi. Με την χρήση της εντολής, θα πρέπει να προσδιοριστεί ένα μέσο μήκος πλευράς, που θα έχουν τα πολύγωνα Voronoi, καθώς και το μήκος στρογγυλοποίησης των ογκοτεμαχίων, που

πρέπει να είναι 20 φορές τουλάχιστον μικρότερο από το μέσο μήκος πλευράς. Συγκεκριμένα, το μέσο μήκος πλευράς (edge) είναι 1 m και το μήκος στρογγυλοποίησης (round) είναι 0.04m (δηλαδή, 25 φορές μικρότερο). Τέλος, μέσω της εντολής **GENERATE EDGE,** πραγματοποιείται η διακριτοποίηση του μοντέλου σε ζώνες πεπερασμένων διαφορών.

Αφού ολοκληρώθηκε η γεωμετρία του μοντέλου, στην συνέχεια θα πρέπει να καθοριστούν οι μηχανικές ιδιότητες του πετρώματος και των διεπιφανειών μεταξύ των πολυγώνων Voronoi. Με την εντολή **prop mat 1** δίνονται τα βασικά μηχανικά χαρακτηριστικά του πετρώματος. Ορίζεται η πυκνότητα του πετρώματος 2600 kg/m^3, το μέτρο ελαστικότητας 10 GPa και ο λόγος Poisson 0.22. Στον κώδικα όμως, πρέπει να εισαχθεί το μέτρο συμπίεσης K (bulk modulus) και το μέτρο διάτμησης (shear modulus).

Όλα τα αριθμητικά μοντέλα για παραμορφώσιμα ογκοτεμάχια στο *UDEC*, διέπονται από μια ισότροπη συμπεριφορά υλικού, σε ελαστικό εύρος που περιγράφεται από τις δύο ελαστικές σταθερές K και G. Οι ελαστικές σταθερές K και G, χρησιμοποιούνται στα αριθμητικά μοντέλα του *UDEC*, αντί για το μέτρο ελαστικότητας και τον λόγο Poisson. Σύμφωνα με το εγχειρίδιο χρήσης του κώδικα UDEC, τα K και G αντιστοιχούν σε πιο θεμελιώδεις πτυχές της συμπεριφοράς του υλικού, σε σχέση με το μέτρο ελαστικότητας και τον λόγο Poisson. Ο υπολογισμός των δύο μεγεθών, γίνεται με την χρήση των παρακάτω εξισώσεων:

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \qquad 6.1$$

όπου:

K είναι το μέτρο συμπίεσης

E είναι το μέτρο ελαστικότητας

ν είναι ο λόγος Poisson

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \qquad 6.2$$

όπου G είναι το μέτρο διάτμησης.

Από τις εξισώσεις 6.1 και 6.2 υπολογίζονται οι τιμές των K και G και μέσω των εντολών dens bulk και shear, εισάγονται οι τιμές 2600 kg/m^3, 8.33*10^9 Pa 3.85*10^9 Pa αντίστοιχα.

Στην συνέχεια, ορίζονται οι μηχανικές ιδιότητες των διεπιφανειών. Με την εντολή **joint** ορίζονται οι παρακάτω παράμετροι:

- jkn: η τιμή της ορθής δυστροπίας (joint normal stiffness)
- jks: η τιμή της διατμητικής δυστροπίας (joint shear stiffness)
- jcoh: η τιμή της συνοχής
- jfric: η γωνία τριβής των διεπιφανειών
- jten: η αντοχή σε εφελκυσμό
- jperm: η σταθερά περατότητας των διεπιφανειών που χρησιμοποιείται στο UDEC για αριθμητικές προσομοιώσεις ροής
- azero: το αρχικό άνοιγμα των διεπιφανειών υπό μηδενική ορθή τάση
- ares: είναι το παραμένον άνοιγμα των διεπιφανειών. Το άνοιγμα των διεπιφανειών δεν μπορεί να μειωθεί κάτω του ares ανεξαρτήτως του φυσικού εντατικού πεδίου.

Στις διεπιφάνειες θα μπρούσαν να δοθούν υψηλές τιμές ορθής και διατμητικής δυστροπίας, για να αποφευχθούν οι ορθές και διατμητικές μετατοπίσεις στις διεπιφάνειες. Ωστόσο, το χρονικό βήμα υπολογισμού της αριθμητικής προσομοίωσης, βασίζεται στην τιμή της δυστροπίας. Αν οι τιμές της είναι πολύ υψηλές, η υπολογιστική διαδικασία θα είναι πολύ αργή. Για μηχανικούς υπολογισμούς, η βέλτιστη τιμή των **jkn** και **jks** θα πρέπει να είναι δέκα φορές μικρότερη από την αντίστοιχη ακαμψία των γειτονικών ζωνών. Οι τιμές υπολογίζονται από την εξίσωση:

$$k_n \; και \; k_s \leq 10\left[\max\left[\frac{K+\frac{4}{3}G}{\Delta z_{min}}\right]\right] \qquad 6.3$$

όπου:

kn και ks	είναι οι τιμές της ορθής και διατμητικής δυστροπίας
K	είναι το μέτρο συμπίεσης
G	είναι το μέτρο διάτμησης
Δzmin	είναι το ελάχιστο πλάτος της παρακείμενης ζώνης

Η τιμή που προέκυψε είναι 130 $*10^9$ Pa.

Οι παράμετροι διατμητικής και εφελκυστικής αντοχής των διεπιφανειών επιλέγονται έτσι ώστε τυχόν διατμητική ή εφελκυστική αστοχία να αντιπροσωπεύει την θραύση του πετρώματος κατά την υδραυλική θραύση. Για τις παραμέτρους διατμητικής αντοχής επιλέχθηκαν τιμές συνοχής και γωνίας τριβής των διεπιφανειών $10*10^6$ Pa και 30° αντίστοιχα. Η αντοχή σε εφελκυσμό επιλέχθηκε ως ίση με $5*10^6$ Pa.

Ο υπολογισμός της σταθεράς περατότητας των ασυνεχειών έγινε με χρήση της εξίσωσης:

$$k_j = \frac{1}{12\mu} \qquad 6.4$$

όπου:

kj	είναι η σταθερά περατότητας των ασυνεχειών
μ	είναι η τιμή του δυναμικού ιξώδους του ρευστού

Στην συγκεκριμένη αριθμητική προσμομοίωση, θεωρείται πως το ρευστό είναι νερό με κινηματικό ιξώδες (ν) 10^{-6} m^2/s και πυκνότητας (ρ) 1000 kg/m^3. Το δυναμικό ιξώδες υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \qquad 6.5$$

μ= 10^{-3} Pa*s και αντικαθιστώντας στην εξίσωση 6.4 ο συντελεστής περατότητας ισούται με 83.33$Pa^{-1}*s^{-1}$.

Το αρχικό άνοιγμα των ασυνεχειών τίθεται ως azero= $5*10^{-5}$m και το παραμένον άνοιγμα ως ares= $2*10^{-5}$m.

Τέλος, με την εντολή **set jcondf** , δίνονται οι ίδιες τιμές παραμέτρων και στις νέες επαφές που θα προκύψουν.

Το επόμενο βήμα είναι να καθοριστεί το εντατικό πεδίο με την εντολή **insitu stress**. Το πεδίο είναι ανισότροπο με τιμές των τάσεων σxx=-30*10^6 Pa, σyy=-20*10^6 Pa και σzz=-25*10^6 Pa. Τα άρρηκτα block στο UDEC είναι εξ' ορισμού αδιαπέρατα, ενώ το εξωτερικό όριο του μοντέλου ορίζεται ως αδιαπέρατο μέσω της εντολής **bound imperm**. Έπειτα πρέπει να οριστεί το είδος του αλγορίθμου ροής που θα χρησιμοποιηθεί μέσω της εντολής **set flow**. Επιλέγεται ο αλγόριθμος ασυμπίεστης ροής (**incrompressible**). Η πυκνότητα του υγρού είναι 1000 kg/m^3. Με την εντολή **well flow atdomain**, δίνονται ο ρυθμός εισπίεσης (0.0002 m^2/sec/m) και οι συντεταγμένες πάνω στις οποίες θα τοποθετηθεί η γεώτρηση (τοποθετείται στο κέντρο του μοντέλου). Είναι σημαντικό να επισημανθεί ότι το αριθμητικό μοντέλο διαθέτει μια ειδική εντολή, **j5flow**, η οποία για την συγκεκριμένη ανάλυση τίθεται **off**. Αυτό σημαίνει ότι η ροή επιτρέπεται μόνο μέσα από διεπιφάνειες που έχουν αστοχήσει είτε σε διάτμηση είτε σε εφελκυσμό.

Προτού γίνει ο υπολογισμός της αριθμητικής προσομοίωσης, πρέπει να οριστούν τα χρονικά βήματα του συζευγμένου μηχανικού-υδραυλικού υπολογισμού. Τα χρονικά βήματα ισούνται με ένα δευτερόλεπτο ροής και λαμβάνονται αποτελέσματα στα 1,2,5,10,30,45 και 60 λεπτά ροής.

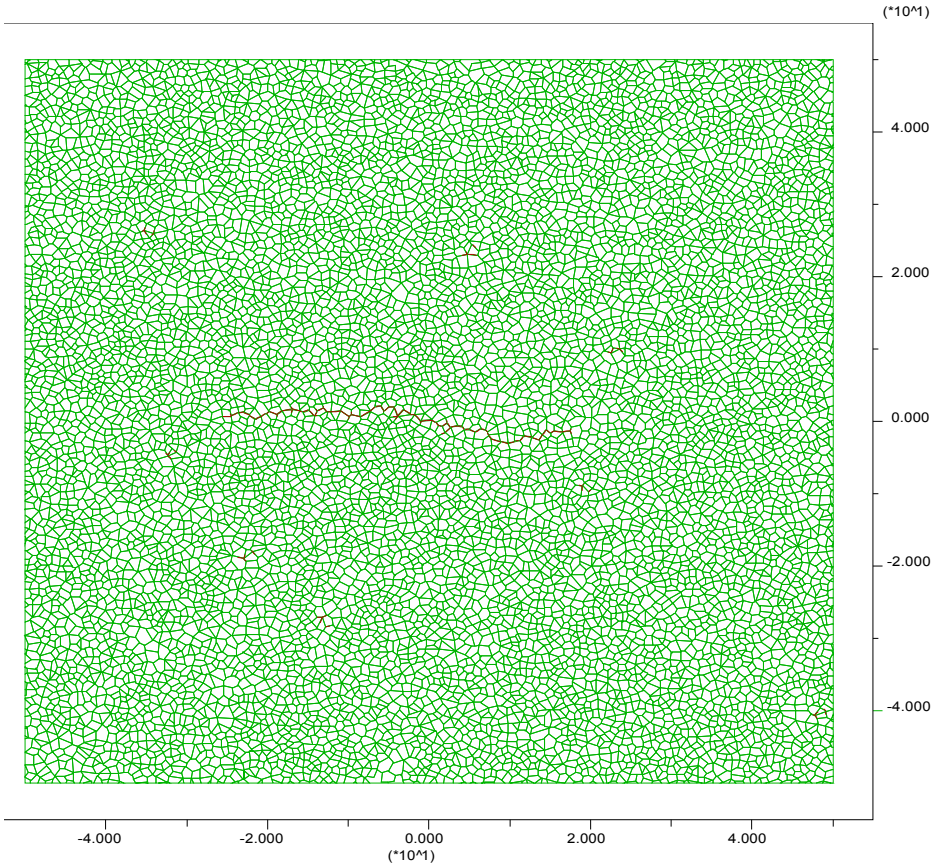
Σε πρώτη φάση, θα εξεταστεί, η επίδραση του φυσικού εντατικού πεδίου και του μήκους στρογγυλοποίησης των γωνιών των ογκοτεμαχίων (**round**), στο μήκος και την μορφή διάδοσης της υδραυλικής θραύσης. Για τον ποσοτικό χαρακτηρισμό της μορφής διάδοσης της ρωγμάτωσης, θα χρησιμοποιηθεί ως μέτρο σύγκρισης ο λόγος του μήκους της κύριας ρωγμής της υδραυλικής θραύσης προς το μήκος της ευθείας γραμμής στη διεύθυνση διάδοσης της υδραυλικής θραύσης. Ο λόγος αυτός θα αναφέρεται στα επόμενα ως δείκτης ευθυγραμμίας.

Στην παραμετρική ανάλυση θα εξεταστεί η επίδραση του μήκους στρογγυλοποίησης για δύο τιμές: 0.02 m και 0.04 m. Επίσης, η παραμετρική ανάλυση θα πραγματοποιηθεί για τα εξής τρία εντατικά πεδία:

1. Ανισότροπο με τον λόγο της μέγιστης κύριας οριζόντιας τάσης προς την ελάχιστη οριζόντια κύρια τάση ίσο με 1.5 (σxx=30 MPa σyy=20 MPa, σzz=25 MPa)
2. Ανισότροπο με την τιμή της μέγιστης κύριας οριζόντιας τάσης διπλάσια από εκείνη της ελάχιστης κύριας οριζόντιας τάσης (σxx=35 MPa σyy=17.5 MPa σzz=25 MPa)
3. Ισότροπο όπου η μέγιστη κύρια οριζόντια τάση είναι ίση με την ελάχιστη κύρια οριζόντια τάση (σxx=25 MPa σyy=25 MPa σzz=25 MPa)

6.2 Αποτελέσματα βασικού μοντέλου

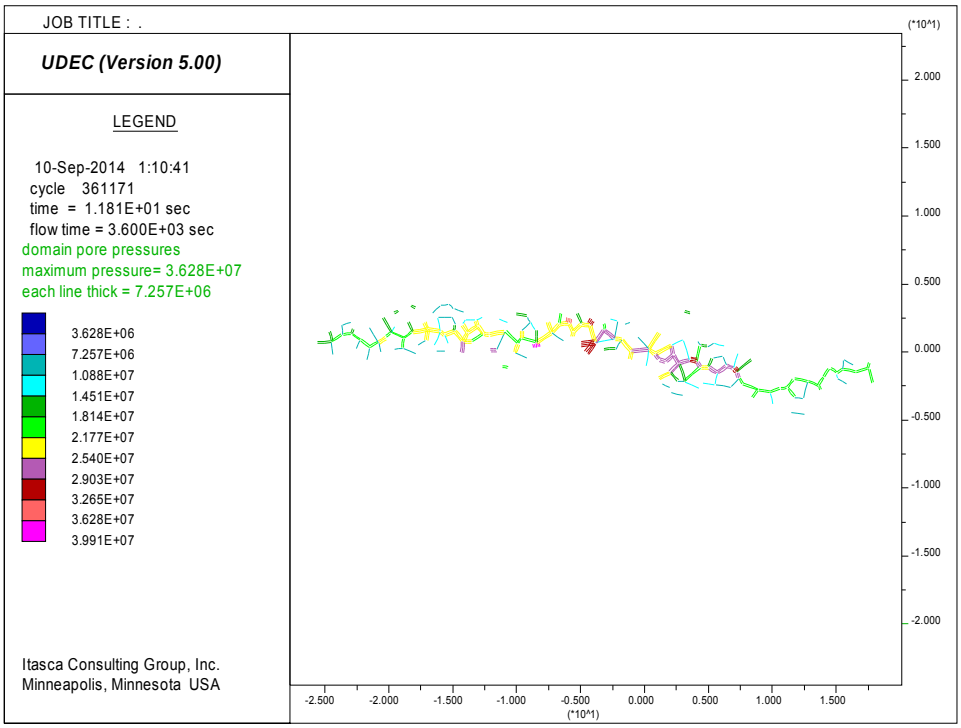
Το βασικό αριθμητικό μοντέλο έχει τιμή μήκους στρογγυλοποίησης (round length) 0.04m, ρυθμό εισπίεσης 0.0002 m^2/sec και αρχικό άνοιγμα ασυνεχειών 50μm. Παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων και συγκεκριμένα, η διάδοση της υδραυλικής θραύσης και η αναπτυσσόμενη πίεση στις διεπιφάνειες.



Σχήμα 6. 2 Αριθμητικό μοντέλο του UDEC που αναπαριστά τον ταμιευτήρα και η διάδοση της υδραυλικής θραύσης δια μέσω των διεπιφανειών των πολύγωνων Voronoi.

Στο Σχήμα 6.2 φαίνεται ο διαχωρισμός του αριθμητικού μοντέλου σε πολύγωνα Voronoi και η διάδοση της υδραυλικής θραύσης (κόκκινο χρώμα) δια μέσω των διεπιφανειών τους, σε χρόνο εισπίεσης 1 ώρας. Αριστερά της θέσης εισπίεσης, η διάδοση έχει φτάσει τα 25m περίπου και δεξιά τα 18m.

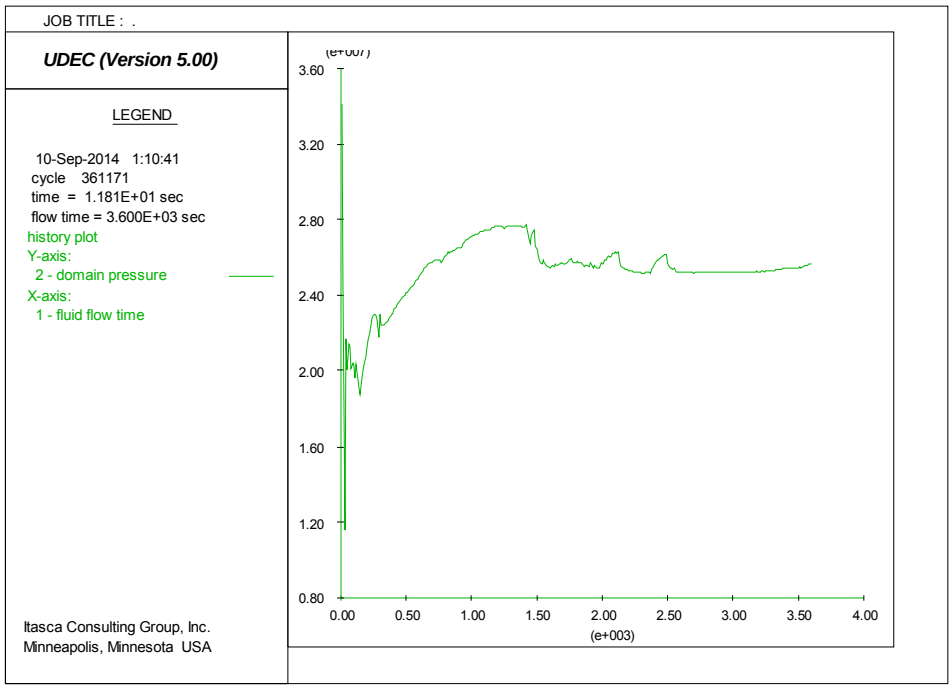
Από το Σχήμα 6.3, παρατηρείται ότι η πίεση του ρευστού στους τομείς (domains) ανάμεσα στις διεπιφάνειες αναπτύσσεται κατά μήκος της διάδοσης της υδραυλικής θραύσης και σε μία ζώνη πάχους 2-3 m κυρίως αριστερά της θέσης εισπίεσης (σημείο 0,0). Η πίεση είναι μεγαλύτερη πλησίον της θέσης της εισπίεσης και μειώνεται με την αύξηση της απόστασης από αυτή.



Σχήμα 6. 3 Σχηματική αναπαράσταση της πίεσης των πόρων

Στο διάγραμμα του Σχήματος 6.4 δίνεται η μεταβολή της πίεσης στη θέση της εισπίεσης συναρτήσει του χρόνου εισπίεσης. Παρατηρείται ότι, στα πρώτα δευτερόλεπτα της εισπίεσης (χρόνος ροής έως 20 sec), η πίεση αυξάνεται ραγδαία έως ότου επιτευχθεί η υδραυλική θραύση γειτονικά της θέσης εισπίεσης. Στη συνέχεια μειώνεται απότομα, καθώς η θραύση διαδίδεται, και παρουσιάζει μια έντονη διακύμανση. Στη συνέχεια σταδιακά αυξάνεται με το χρόνο ροής έως ότου λάβει μία

σχεδόν σταθερή τιμή, η οποία στο τέλος της εισπίεσης (3600sec) είναι 26MPa περίπου.



Σχήμα 6. 4 Η διακύμανση της πίεσης για 3600sec εισπίεσης

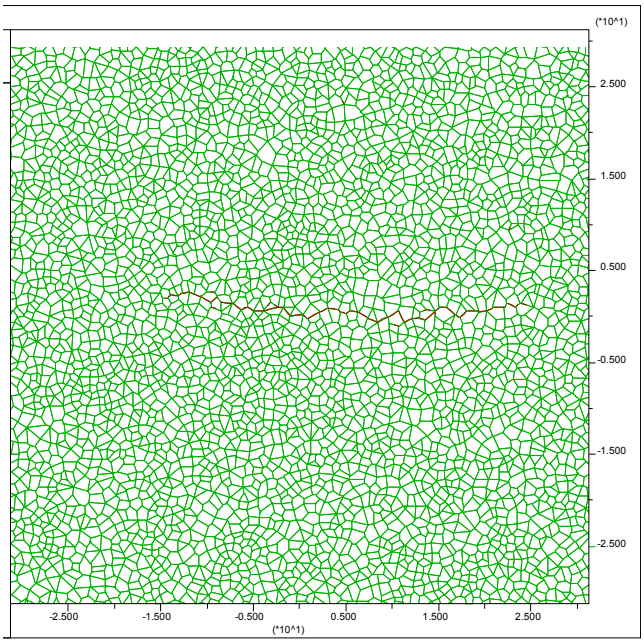
Η επίδραση της παραμέτρου j5flow

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, στο UDEC τα ογκοτεμάχια είναι αδιαπέρατα και η ροή του ρευστού επιτρέπεται μόνο μέσα από ασυνέχειες. Θέτοντας την εντολή j5flow=off καθορίζεται κατά την προσομοίωση ότι, η ροή του ρευστού θα επιτρέπεται μόνο μέσα από ασυνέχειες οι οποίες έχουν αστοχήσει είτε σε διάτμηση είτε σε εφελκυσμό. Ωστόσο, έχει ενδιαφέρον η παράθεση των αντίστοιχων αποτελεσμάτων του βασικού μοντέλου για j5flow=on, δηλαδή να επιτρέπεται ροή και διαμέσου των ασυνεχειών που δεν έχουν αστοχήσει.

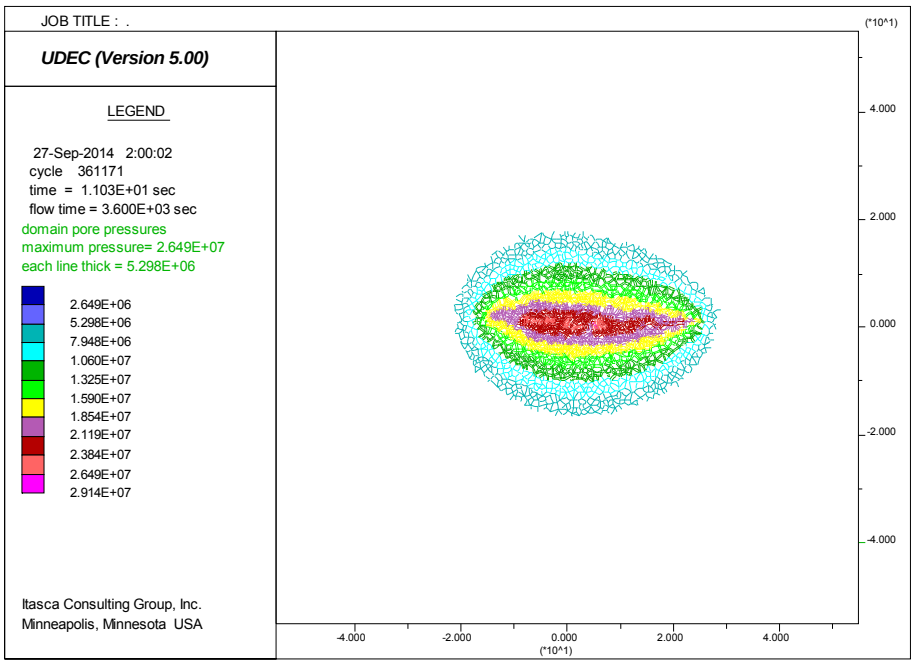
Σύμφωνα με το Σχήμα 6.5, η διάδοση της υδραυλικής θραύσης, για j5flow=on, πραγματοποιείται συνολικά για περίπου ίδια απόσταση σε σχέση με τα αντίστοιχα αποτελέσματα για j5flow=off, αριστερά για 18m και δεξιά για 25m. Εντούτοις, από το Σχήμα 6.6 φαίνεται ότι η πίεση αναπτύσσεται ομοιόμορφα γύρω από την διάδοση της υδραυλικής θραύσης (σαν να διαχέεται). Εξάλλου, από το Σχήμα 6.7 προκύπτει ότι η πίεση στη γεώτρηση παρουσιάζει αρχικά μια έντονη διακύμανση και στην

συνέχεια σταδιακά σταθεροποιείται. Η τιμή που λαμβάνει στο τέλος της εισπίεσης (3600sec) είναι 24MPa περίπου.

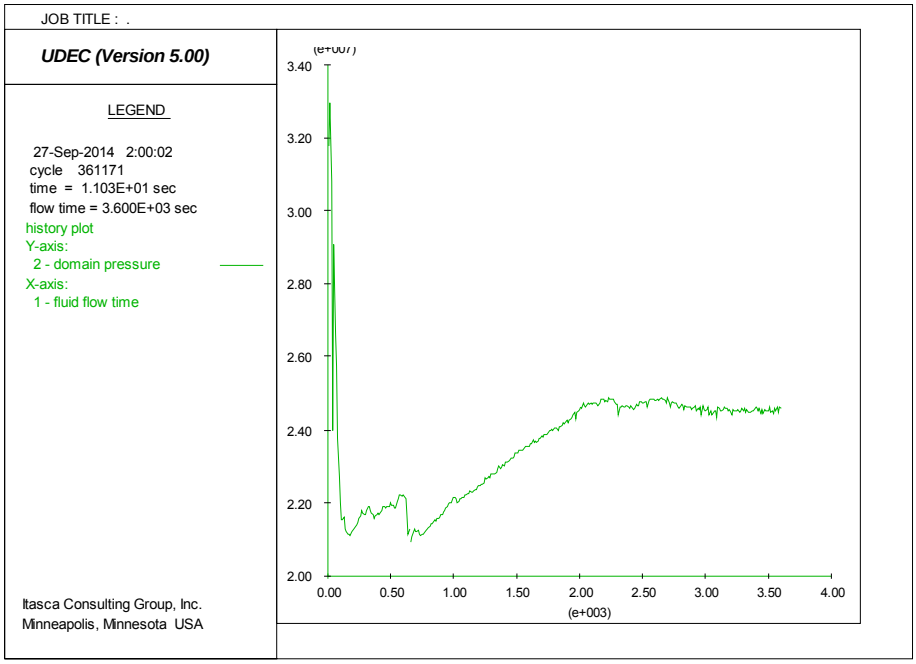
Στα Σχήματα 6.8 και 6.9 φαίνεται η εξέλιξη της υδραυλικής θραύσης σε διάφορους χρόνους μέχρι χρόνου εισπίεσης 1 ώρα, για τιμές της παραμέτρου j5flow=off και j5flow=on αντίστοιχα.



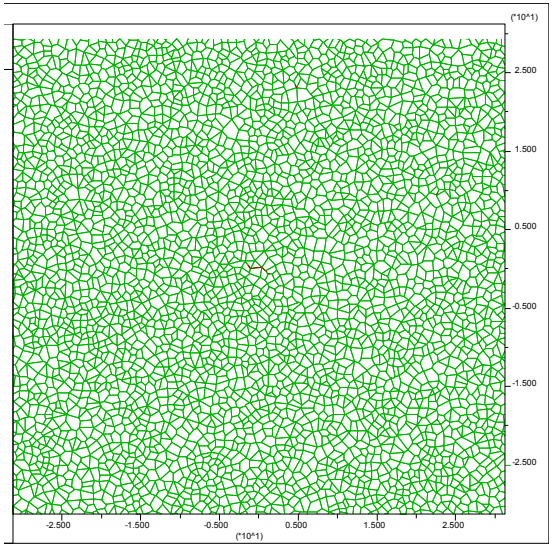
Σχήμα 6. 5 Η διάδοση της υδραυλικής θραύσης (κόκκινο χρώμα) για τιμή j5flow=on.



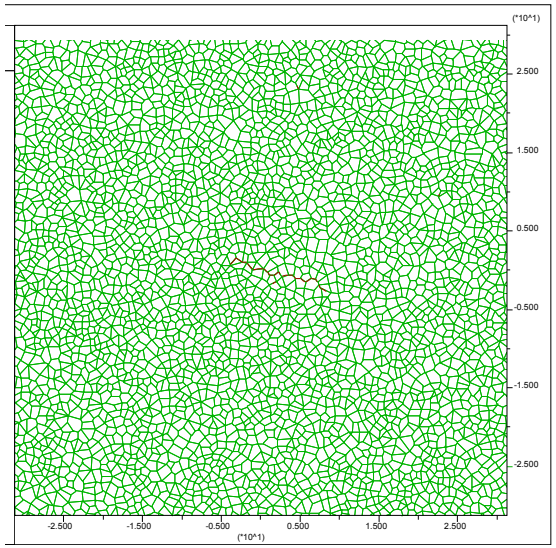
Σχήμα 6. 6. Σχηματική αναπαράσταση της πίεσης πόρων για j5flow=on.



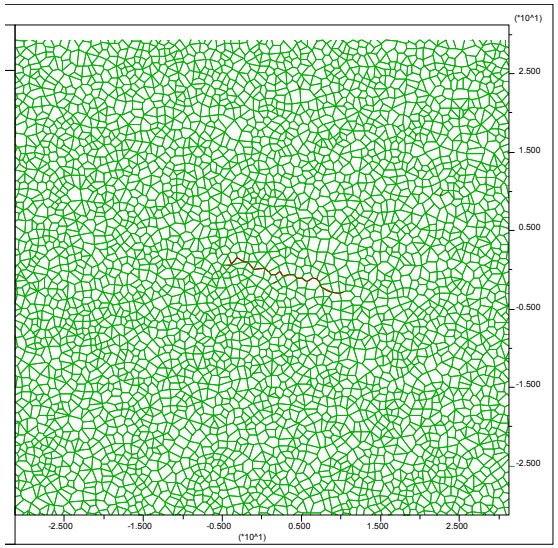
Σχήμα 6. 7 Η διακύμανση της πίεσης για 3600sec εισπίεσης για j5flow=on



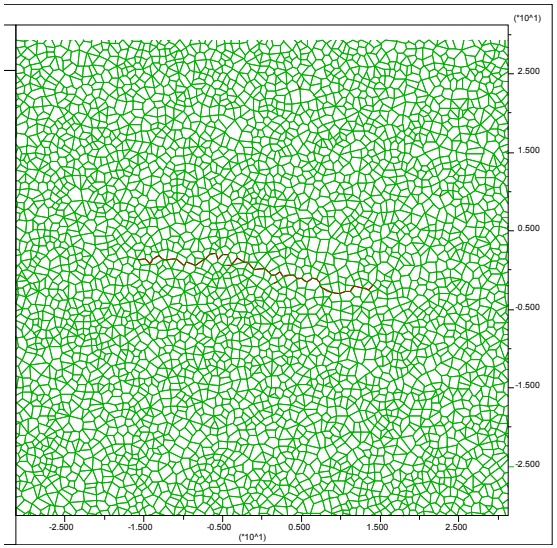
1 λεπτό



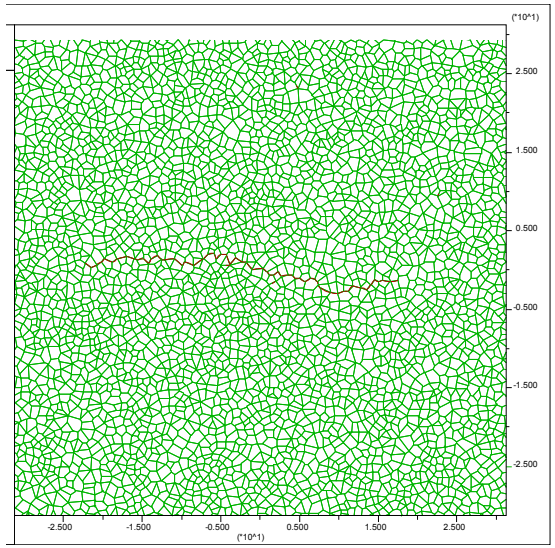
5 λεπτά



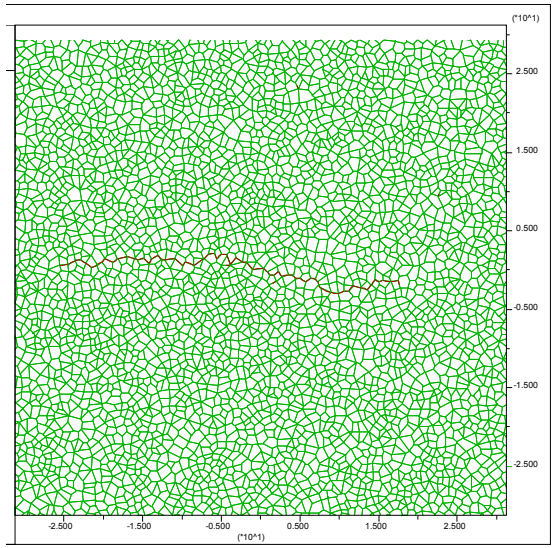
10 λεπτά



30 λεπτά

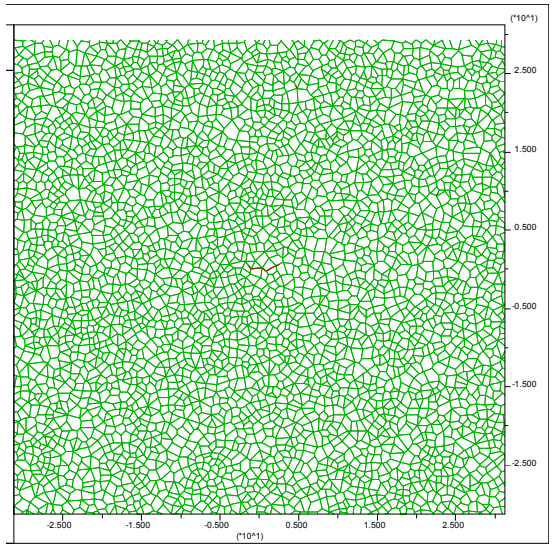


45 λεπτά

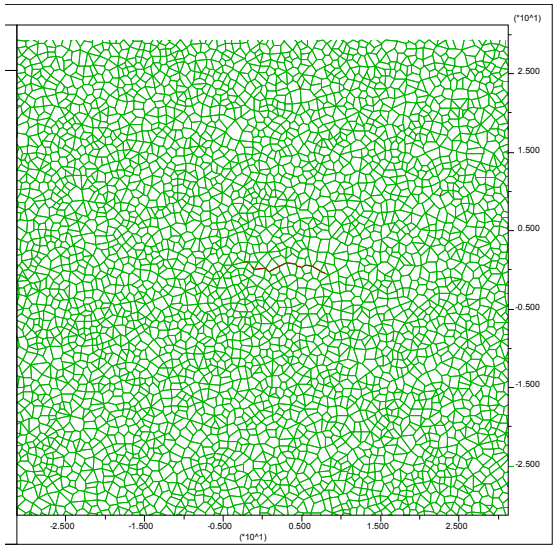


60 λεπτά

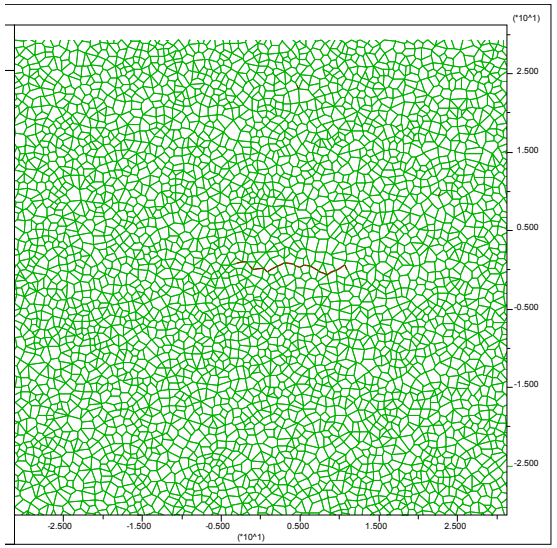
Σχήμα 6. 8 Σχηματική απεικόνιση της διάδοσης της υδραυλικής θραύσης σε διάφορα χρονικά βήματα (j5flow=off)



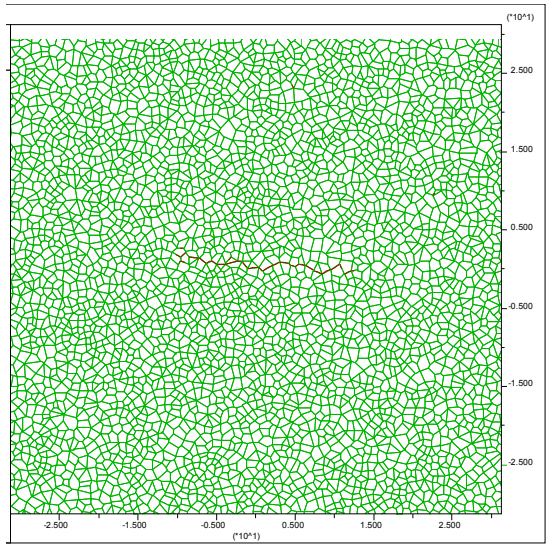
1 λεπτό



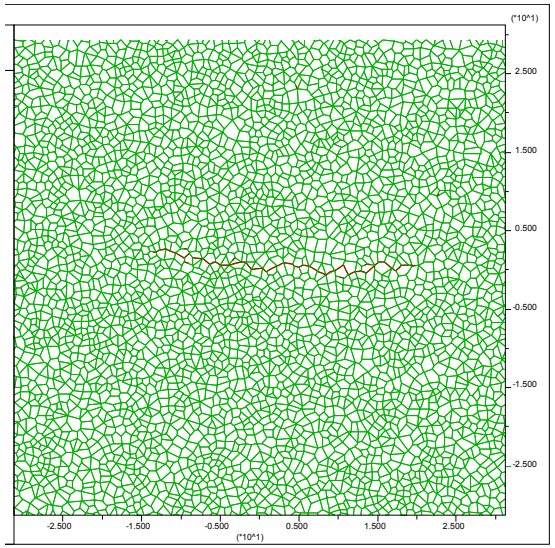
5 λεπτά



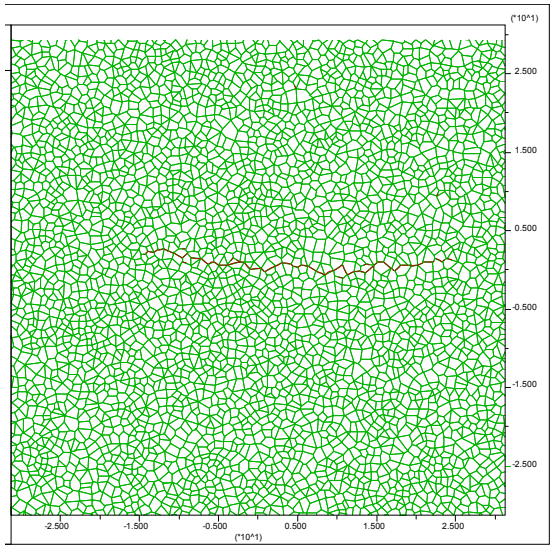
10 λεπτά



30 λεπτά



45 λεπτά



60 λεπτά

Σχήμα 6. 9 Σχηματική απεικόνιση της διάδοσης της υδραυλικής θραύσης σε διάφορα χρονικά βήματα (j5flow=on)

6.3 Αποτελέσματα παραμετρικών δοκιμών με μεταβολη του μήκους στρογγυλοποίησης των ογκοτεμαχίων (round length)

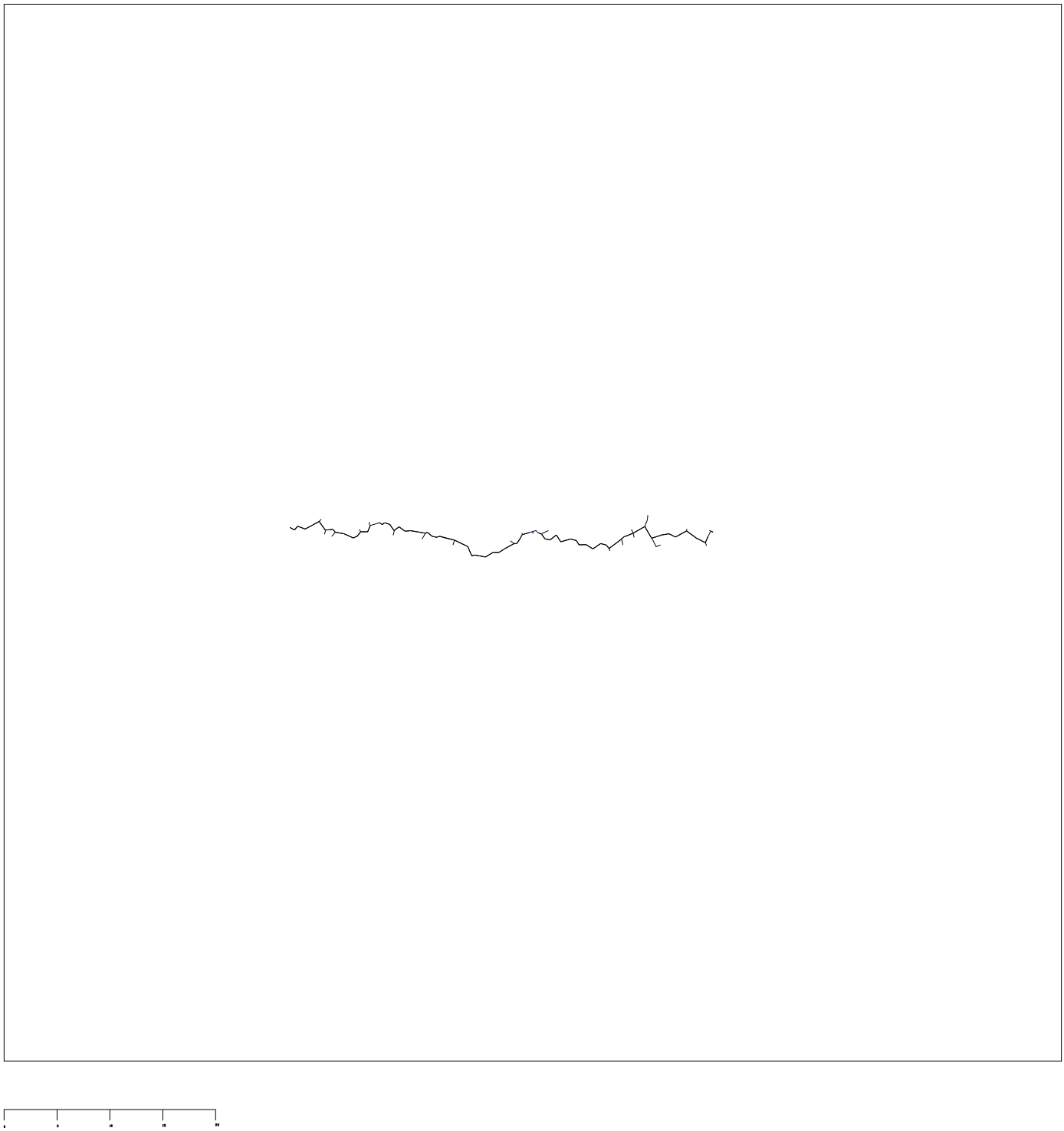
Όπως έχει ήδη αναφερθεί, στο UDEC πραγματοποιείται μία στρογγυλοποίηση των γωνιών των ογκοτεμαχίων, ώστε να αποφεύγονται μη ρεαλιστικές συγκεντρώσεις τάσεων εκεί. Το μήκος αυτό επηρεάζει σημαντικά τα αποτελέσματα των μηχανικών αναλύσεων. Στην παράγραφο αυτή θα εξεταστεί κατά πόσο το μήκος στρογγυλοποίησης επηρεάζει και τα αποτελέσματα της συνδυασμένης μηχανικής-υδραυλικής ανάλυσης.

Σε πρώτη φάση, θα εξεταστεί, σε διαφορετικά εντατικά πεδία, η επίδραση που έχει το μήκος στρογγυλοποίησης, στη διάδοση της υδραυλικής θραύσης δια μέσω των διεπιφανειών. Για να εκτιμηθεί ποσοτικά ο τρόπος διάδοσης της ρωγμάτωσης, κατά την υδραυλική θραύση θα χρησιμοποιηθούν ως μέτρα σύγκρισης: 1) το μήκος διάδοσης της θραύσης δια μέσω των διεπιφανειών των τεμαχίων voronoi, 2) ο λόγος του μήκους της θραύσης προς το μήκος της προβολής της στον άξονα των x, που ορίζεται ως ο δείκτης ευθυγραμμίας. Όσο πιο μεγάλη η τιμή του δείκτη, τόσο περισσότερο θα αποκλίνει η διάδοση της θραύσης από ένα μέσο επίπεδο. Ο δείκτης αυτός, σε συνδυασμό με το μήκος διάδοσης της ρωγμής, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της δυσκολίας διάδοσης της υδραυλικής θραύσης.

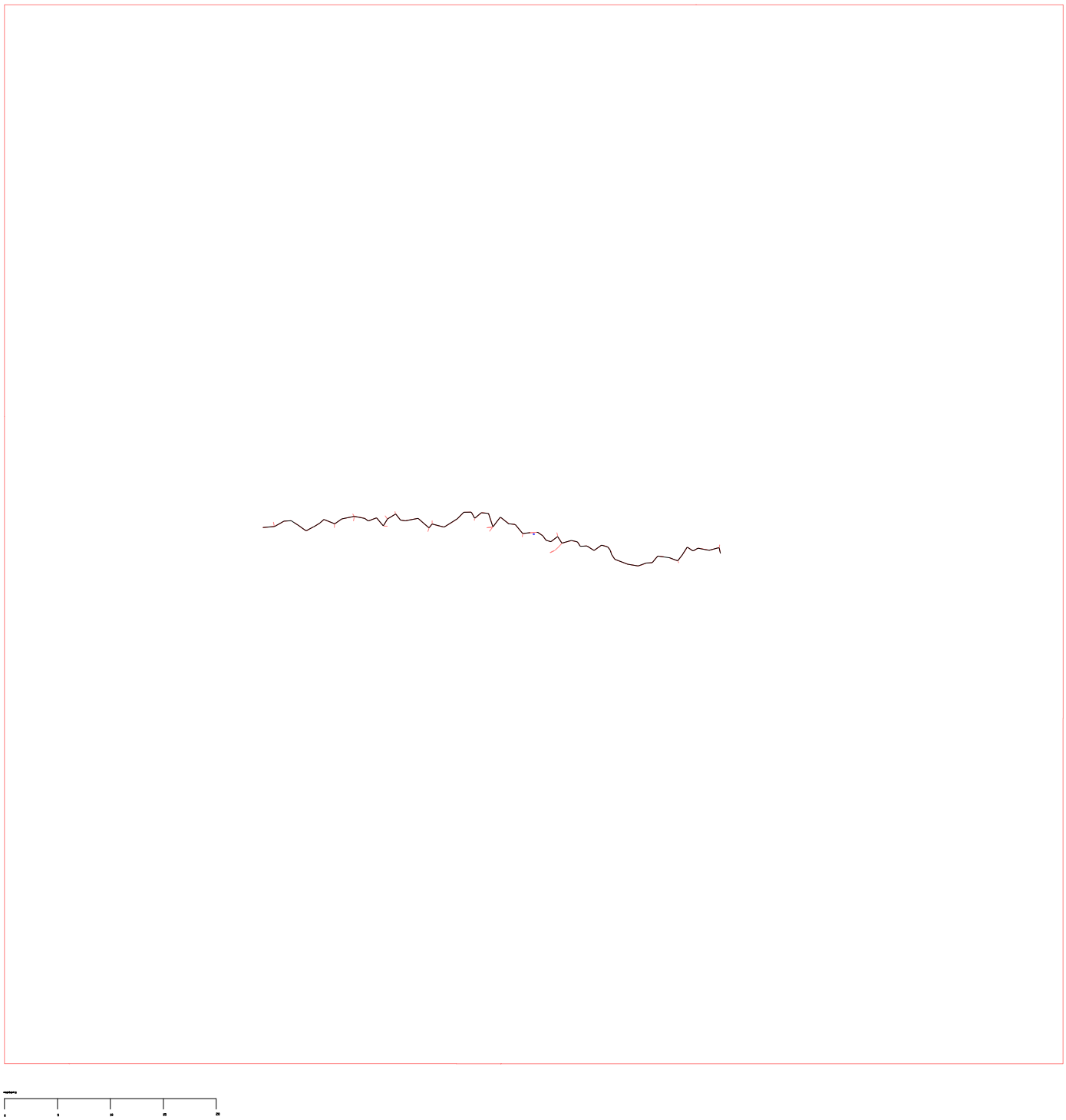
Οι υπόλοιπες παράμετροι της προσομοίωσης θα διατηρηθούν ίδιες με εκείνες του βασικού μοντέλου. Για το μήκος στρογγυλοποίησης θα δοθούν οι τιμές 0.02m και 0.04m, ενώ τα εντατικά πεδία θα είναι τρία:

1. Ανισότροπο με τον λόγο της μέγιστης κύριας οριζόντιας τάσης προς την ελάχιστη οριζόντια κύρια τάση ίσο με 1.5 (σxx=30 MPa σyy=20 MPa σzz=25 MPa)
2. Ανισότροπο με την τιμή της μέγιστης κύριας οριζόντιας τάσης διπλάσια από εκείνη της ελάχιστης κύριας οριζόντιας τάσης (σxx=35 MPa σyy=17.5 MPa σzz=25 MPa)
3. Ισότροπο όπου η μέγιστη κύρια οριζόντια τάση είναι ίση με την ελάχιστη κύρια οριζόντια τάση (σxx=25 MPa σyy=25 MPa σzz=25 MPa)

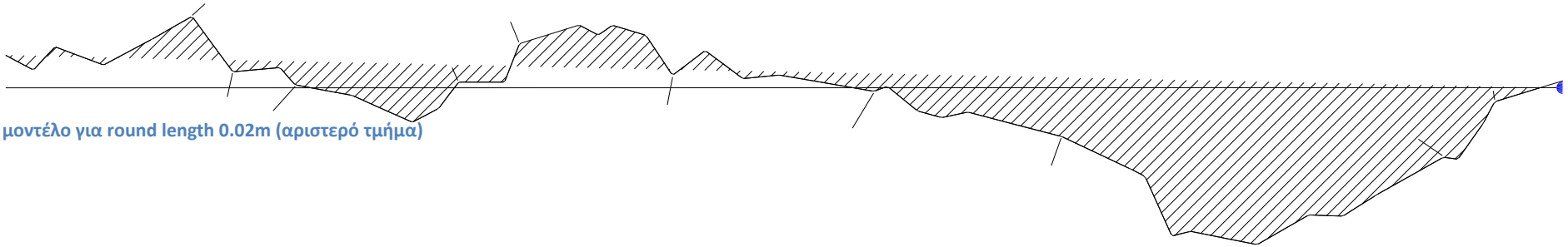
Αρχικά, θα εξεταστεί η περίπτωση όπου το εντατικό πεδίο είναι ανισότροπο με τον λόγο μέγιστης και ελάχιστης κύριας οριζόντιας τάσης ίσο με 1.5. Για μήκος στρογγυλοποίησης 0.02m και 0.04m, αριστερά της γεώτρησης (μπλε κουκίδα) προκύπτουν τα παρακάτω σχήματα



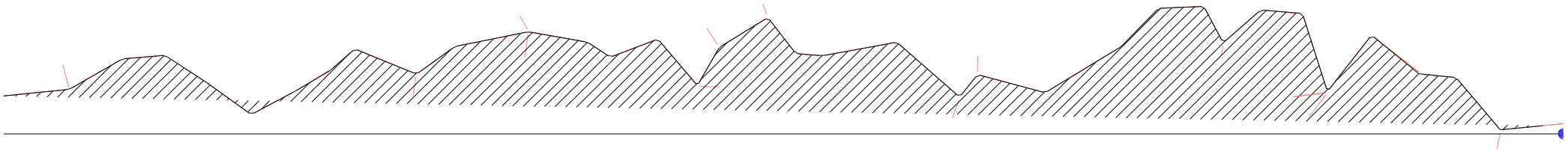
Σχήμα 6. 10 Αριθμητικό μοντέλο για round length 0.02 m και ανισότροπο εντατικό πεδίο όπου ο λόγος της μέγιστης προς την ελάχιστη κύρια οριζόντια τάση είναι ίσος με 1.5



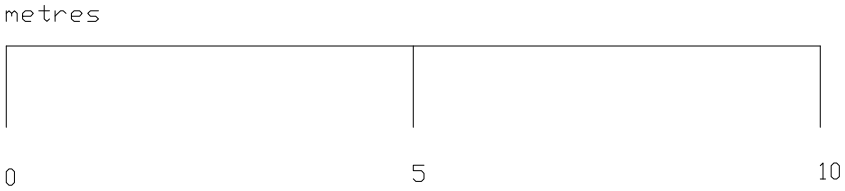
Σχήμα 6. 11 Αριθμητικό μοντέλο για round length 0.04m και ανισότροπο εντατικό πεδίο όπου ο λόγος της μέγιστης προς την ελάχιστη κύρια οριζόντια τάση είναι ίσος με 1.5



Σχήμα 6. 12 Αριθμητικό μοντέλο για round length 0.02m (αριστερό τμήμα)



Σχήμα 6. 13 Αριθμητικό μοντέλο για round length 0.04m (αριστερό τμήμα)

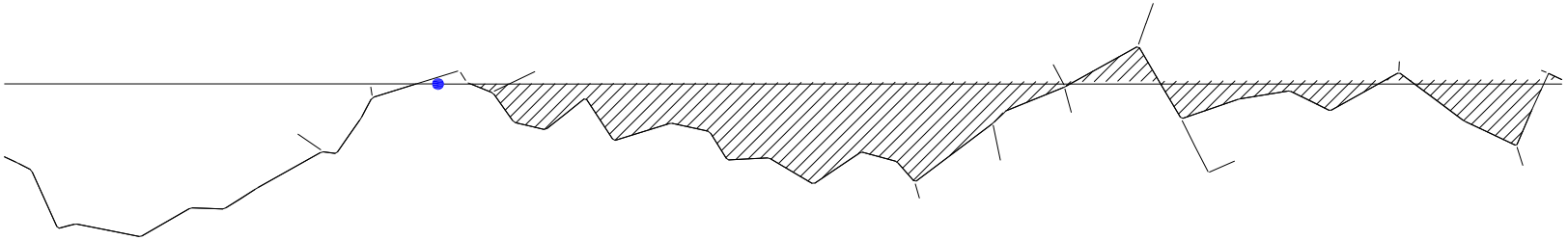


Σύμφωνα με το σχήμα, για μήκος στρογγυλοποίησης 0.02m, αριστερά της γεώτρησης παρατηρείται διάδοση της ρωγμής εκατέρωθεν της οριζόντιας ευθείας, για περίπου 22.95 m. Το μήκος της ρωγμής φτάνει τα 26.69 m, ενώ ο δείκτης ευθυγραμμίας διάδοσης της ρωγμής 1.163

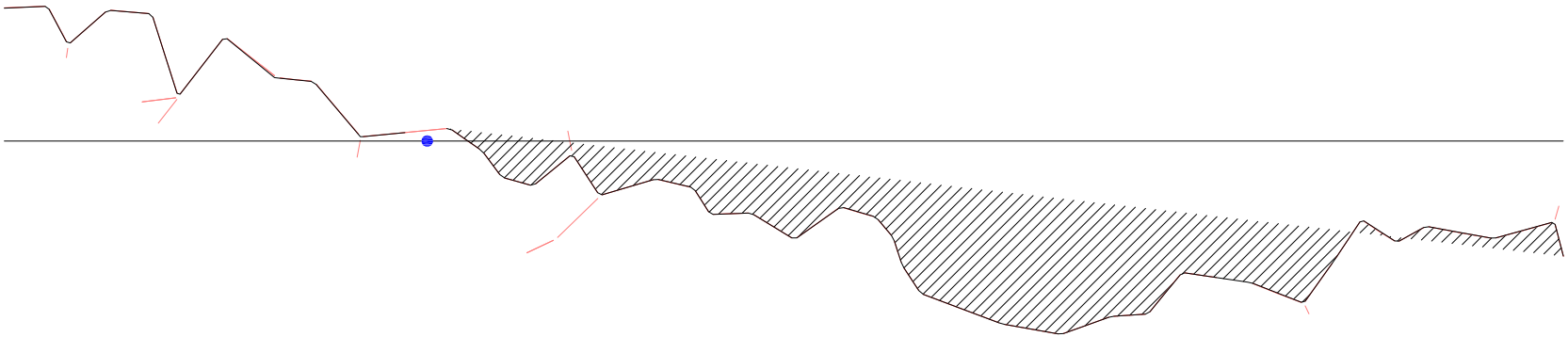
Για μήκος στρογγυλοποίησης 0.04, παρατηρείται διάδοση της ρωγμής πάνω από το επίπεδο της οριζόντιας ευθείας, για περίπου 25.56 m. Το μήκος της ρωγμής φτάνει τα 30.78 m, ενώ ο δείκτης ευθυγραμμίας διάδοσης της ρωγμής είναι 1.204.

Ανάμεσα στα δύο αριθμητικά μοντέλα, για μήκος στρογγυλοποίησης 0.04, το μήκος στο οποίο διαδόθηκε η ρωγμή είναι μεγαλύτερο, ωστόσο και ο δείκτης ευθυγραμμίας είναι μεγαλύτερος.

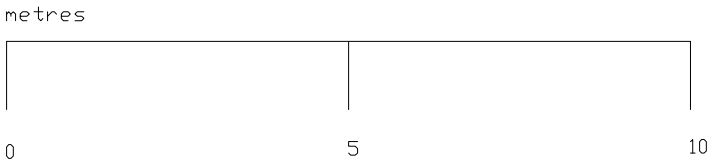
Έπειτα θα εξεταστεί η πορεία της ρωγμής σε κάθε αριθμητικό μοντέλο, δεξιά της γεώτρησης.



Σχήμα 6. 14 Αριθμητικό μοντέλο για round length 0.02m (δεξιό τμήμα)



Σχήμα 6. 15 Αριθμητικό μοντέλο για round length 0.04m (δεξιό τμήμα)

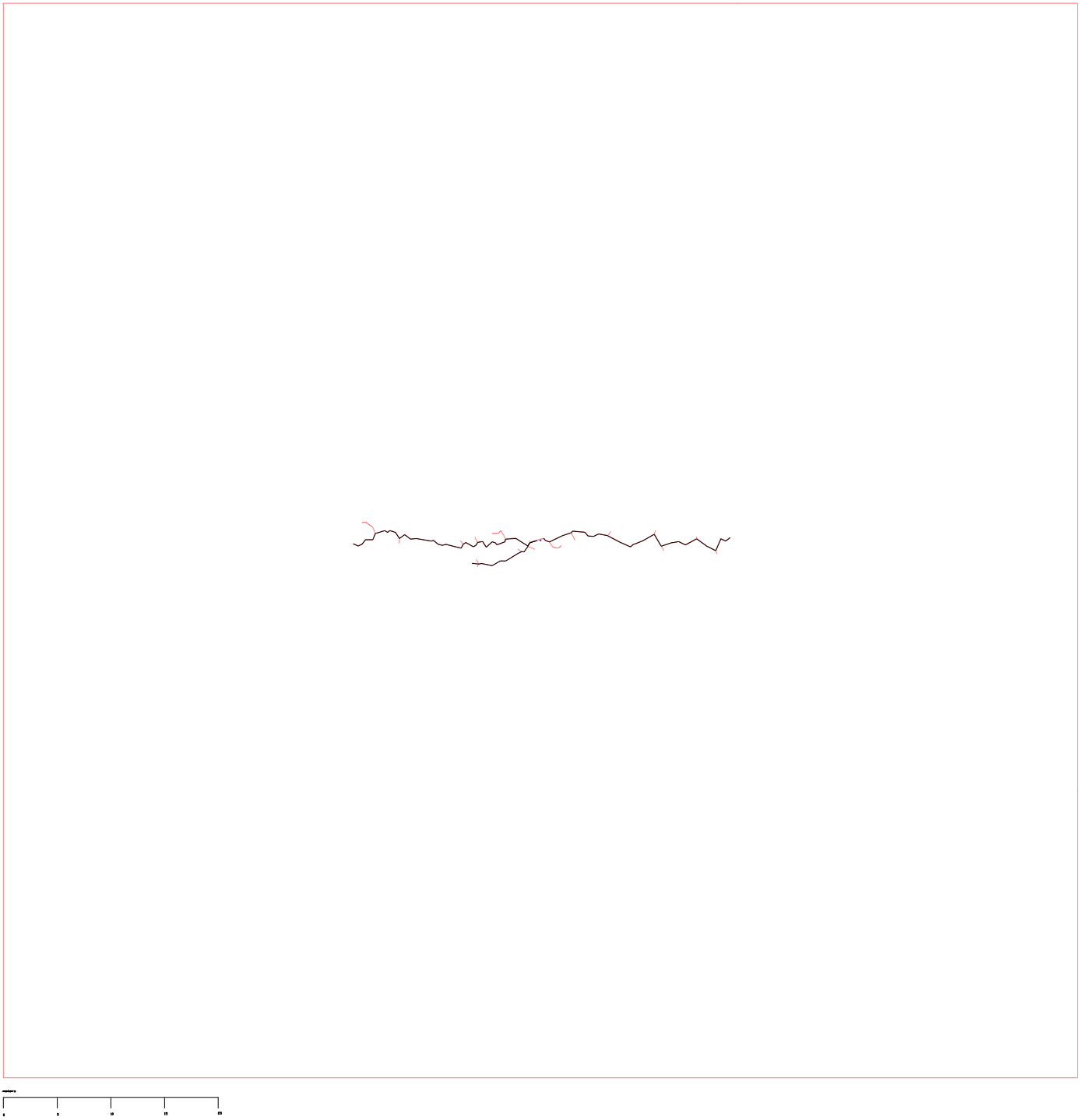


Σύμφωνα με το σχήμα, για μήκος στρογγυλοποίησης 0.02m, δεξιά της γεώτρησης παρατηρείται διάδοση της ρωγμής κυρίως κάτω από το επίπεδο της οριζόντιας ευθείας, για περίπου 17.02 m. Το μήκος της ρωγμής φτάνει τα 20.46 m, ενώ ο δείκτης ευθυγραμμίας διάδοσης της ρωγμής είναι 1.20

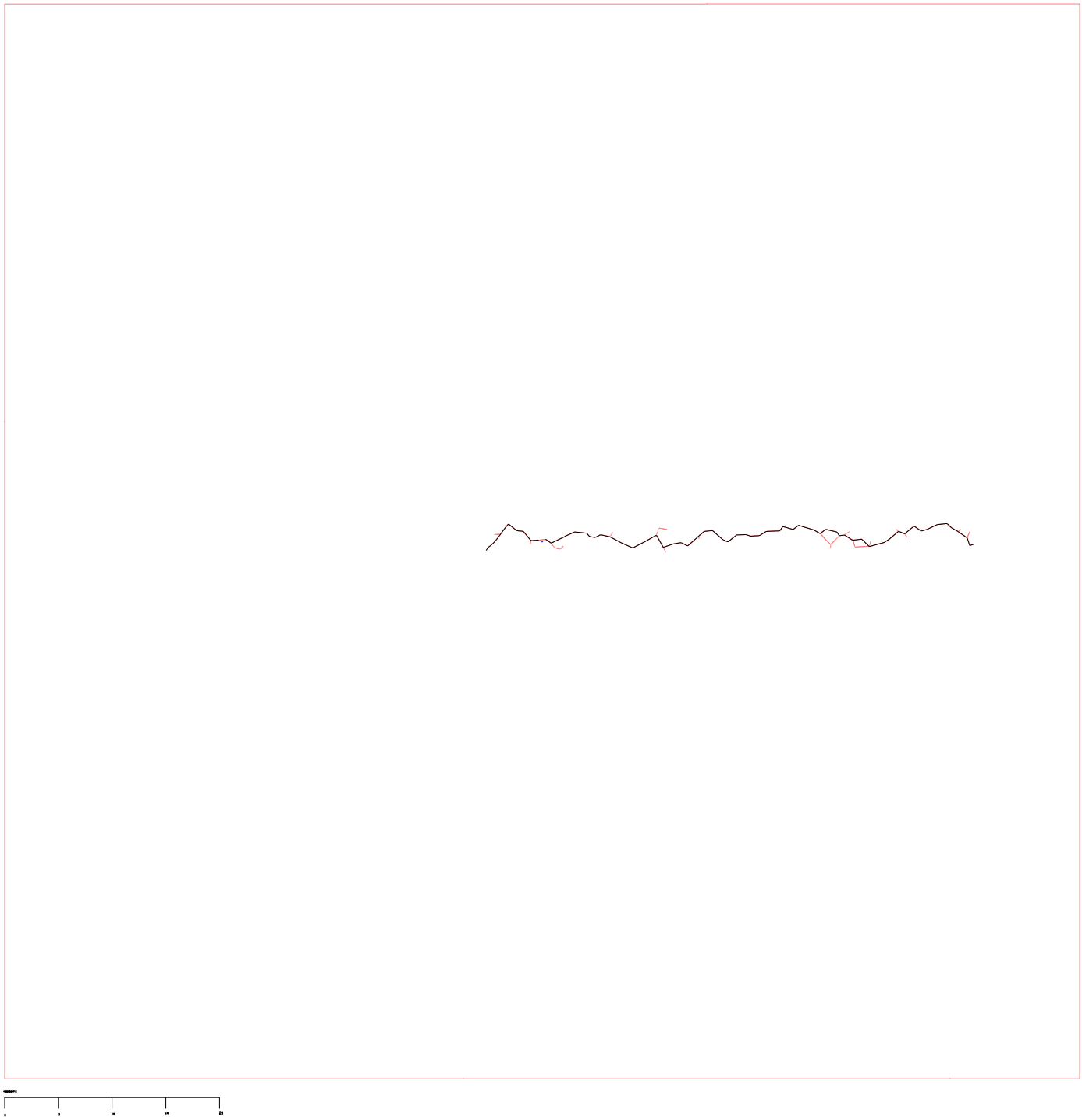
Για μήκος στρογγυλοποίησης 0.04m, παρατηρείται διάδοση της ρωγμής κάνω από την οριζόντια ευθεία, για περίπου 17.64 m. Το μήκος της ρωγμής φτάνει τα 21.07 m, ενώ ο δείκτης ευθυγραμμίας διάδοσης της ρωγμής είναι 1.195.

Συγκρίνοντας τα δύο αριθμητικά μοντέλα, για μήκος στρογγυλοποίησης 0.04 m, το μήκος της διάδοσης της ρωγμής είναι μεγαλύτερο, ωστόσο ο δείκτης ευθυγραμμίας είναι μικρότερος.

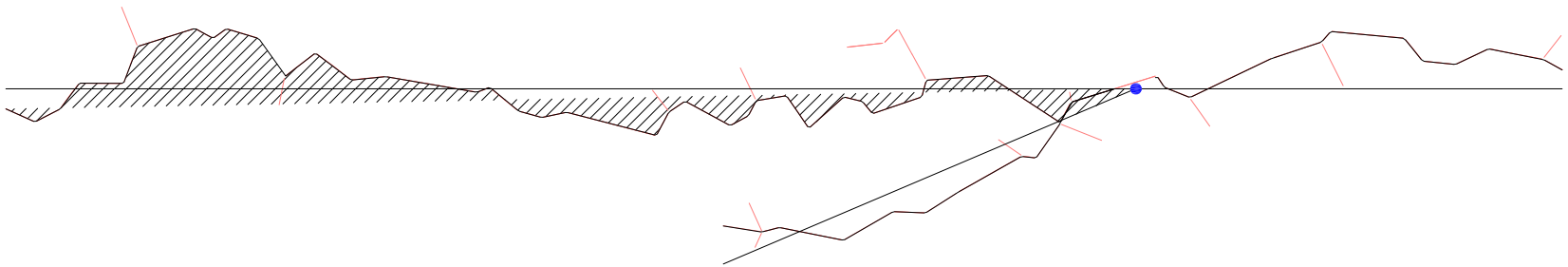
Στην συνέχεια, θα εξεταστεί η περίπτωση όπου το εντατικό πεδίο είναι ανισότροπο με τον λόγο μέγιστης προς ελάχιστης οριζόντιας κύριας τάσης ίσο με 2.



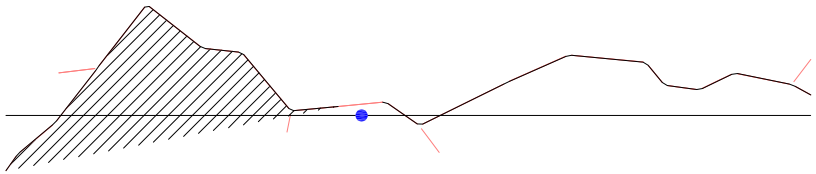
Σχήμα 6. 16 Αριθμητικό μοντέλο για round length 0.02m και ανισότροπο εντατικό πεδίο όπου ο λόγος της μέγιστης προς την ελάχιστη κύρια οριζόντια τάση είναι ίσος με 2



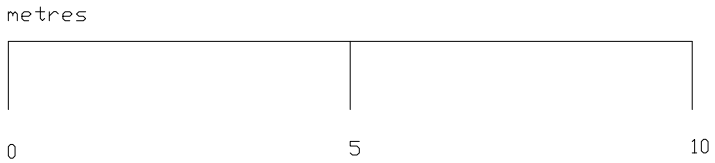
Σχήμα 6. 17 Αριθμητικό μοντέλο για round length 0.04m και ανισότροπο εντατικό πεδίο όπου ο λόγος της μέγιστης προς την ελάχιστη κύρια οριζόντια τάση είναι ίσος με 2



Σχήμα 6. 18 Αριθμητικό μοντέλο για round length 0.02 m (αριστερό τμήμα)



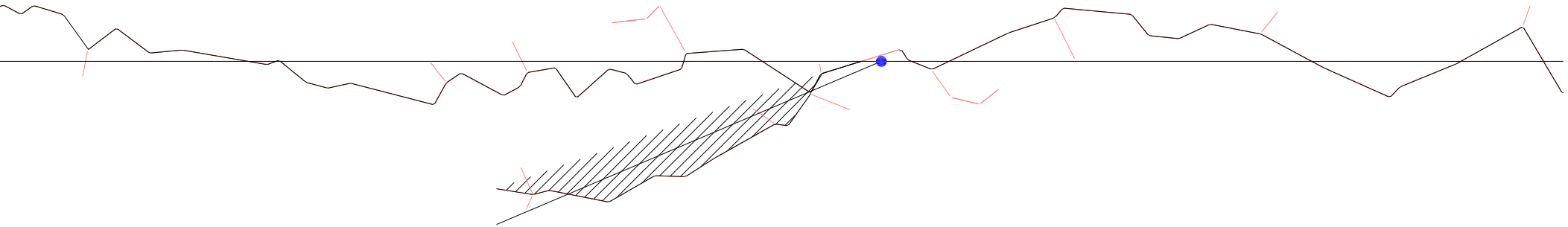
Σχήμα 6. 19 Αριθμητικό μοντέλο για round length 0.04m (αριστερό τμήμα)



Σύμφωνα με το σχήμα, για γωνία στρογγυλοποίησης 0.02, αριστερά της γεώτρησης παρατηρείται διάδοση της ρωγμής εκατέρωθεν της οριζόντιας ευθείας, για περίπου 17.41 m. Το μήκος της ρωγμής φτάνει τα 20.28 m, ενώ ο δείκτης ευθυγραμμίας διάδοσης της ρωγμής 1.165

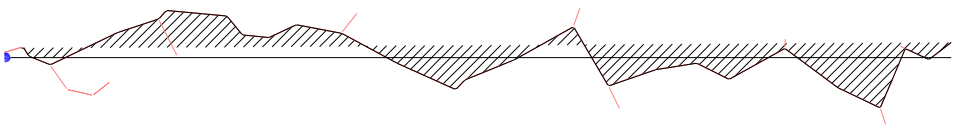
Για γωνία στρογγυλοποίησης 0.04, παρατηρείται διάδοση της ρωγμής πάνω από την οριζόντια ευθεία, για περίπου 5.2 m. Το μήκος της ρωγμής φτάνει τα 6.58 m, ενώ ο δείκτης ευθυγραμμίας διάδοσης της ρωγμής είναι 1.265

Στο αριθμητικό μοντέλο για γωνία στρογγυλοποίησης 0.02, παρατηρείται ότι η ρωγμή διαδίδεται σε μεγαλύτερη απόσταση και ταυτόχρονα παρουσιάζεται μικρότερη αντίσταση στην διάδοση της ρωγμάτωσης.

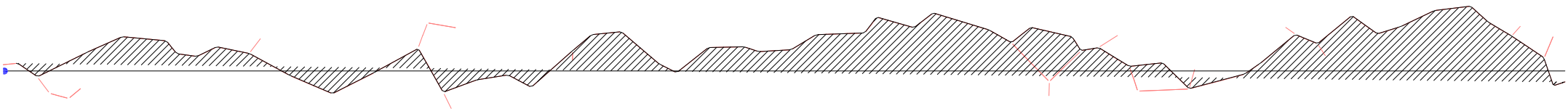


Σχήμα 6. 20 Αριθμητικό μοντέλο για round length 0.02 (κεντρικό τμήμα)

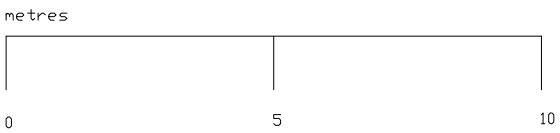
Στο συγκεκριμένο αριθμητικό μοντέλο, εκτός από την συνήθη διάδοση της ρωγμής, δεξιά και αριστερά της γεώτρησης, παρατηρείται και η δημιουργία μιας διαφορετικής ρωγμής προς μια διαφορετική κατεύθυνση για περίπου 6.9m, η οποία είναι προς τα αριστερά και κάτω. Το μήκος της ρωγμής φτάνει τα 6.89 m , ενώ ο δείκτης ευθυγραμμίας διάδοσης της ρωγμής είναι 0.99



Σχήμα 6. 21 Αριθμητικό μοντέλο για round length 0.02 (δεξιό τμήμα)



Σχήμα 6. 22 Αριθμητικό μοντέλο για round length 0.04 (δεξιό τμήμα)



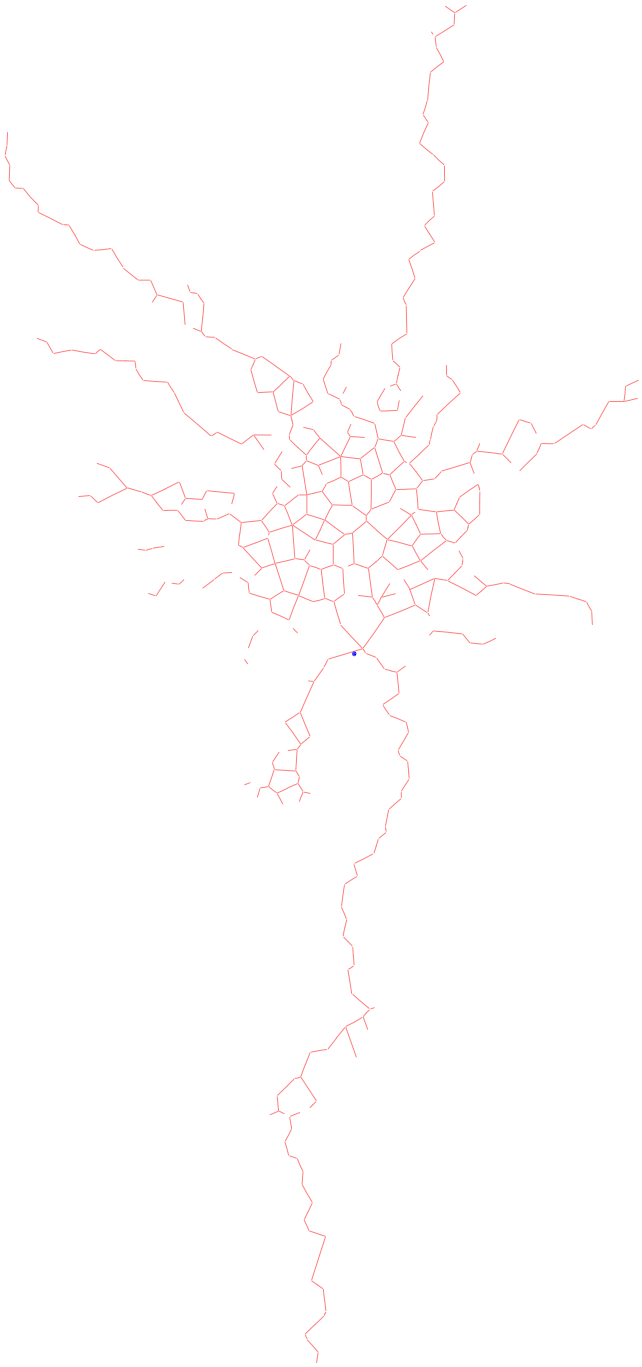
Σύμφωνα με το σχήμα, για γωνία στρογγυλοποίησης 0.02, δεξιά της γεώτρησης παρατηρείται διάδοση της ρωγμής εκατέρωθεν της οριζόντιας ευθείας, για περίπου 17.65 m. Το μήκος της ρωγμής φτάνει τα 20.53 m, ενώ ο δείκτης ευθυγραμμίας διάδοσης της ρωγμής είναι 1.163

Για γωνία στρογγυλοποίησης 0.04, παρατηρείται διάδοση της ρωγμής, κυρίως πάνω από το επίπεδο της οριζόντιας ευθείας, για περίπου 40.07 m. Το μήκος της ρωγμής φτάνει τα 45.79 m, ενώ ο δείκτης ευθυγραμμίας διάδοσης της ρωγμής 1.14.

Στο αριθμητικό μοντέλο όπου η γωνία στρογγυλοποίησης έχει οριστεί 0.04, παρατηρείται ότι η ρωγμή διαδίδεται σε ένα αρκετά μεγάλο μήκος, περίπου στα όρια του μοντέλου (που βρίσκονται στα 50 m), πολύ μεγαλύτερο σε σχέση με το αριθμητικό μοντέλο για γωνία στρογγυλοποίησης 0.02. Ο δείκτης ευθυγραμμίας διάδοσης της ρωγμάτωσης είναι μικρότερος.

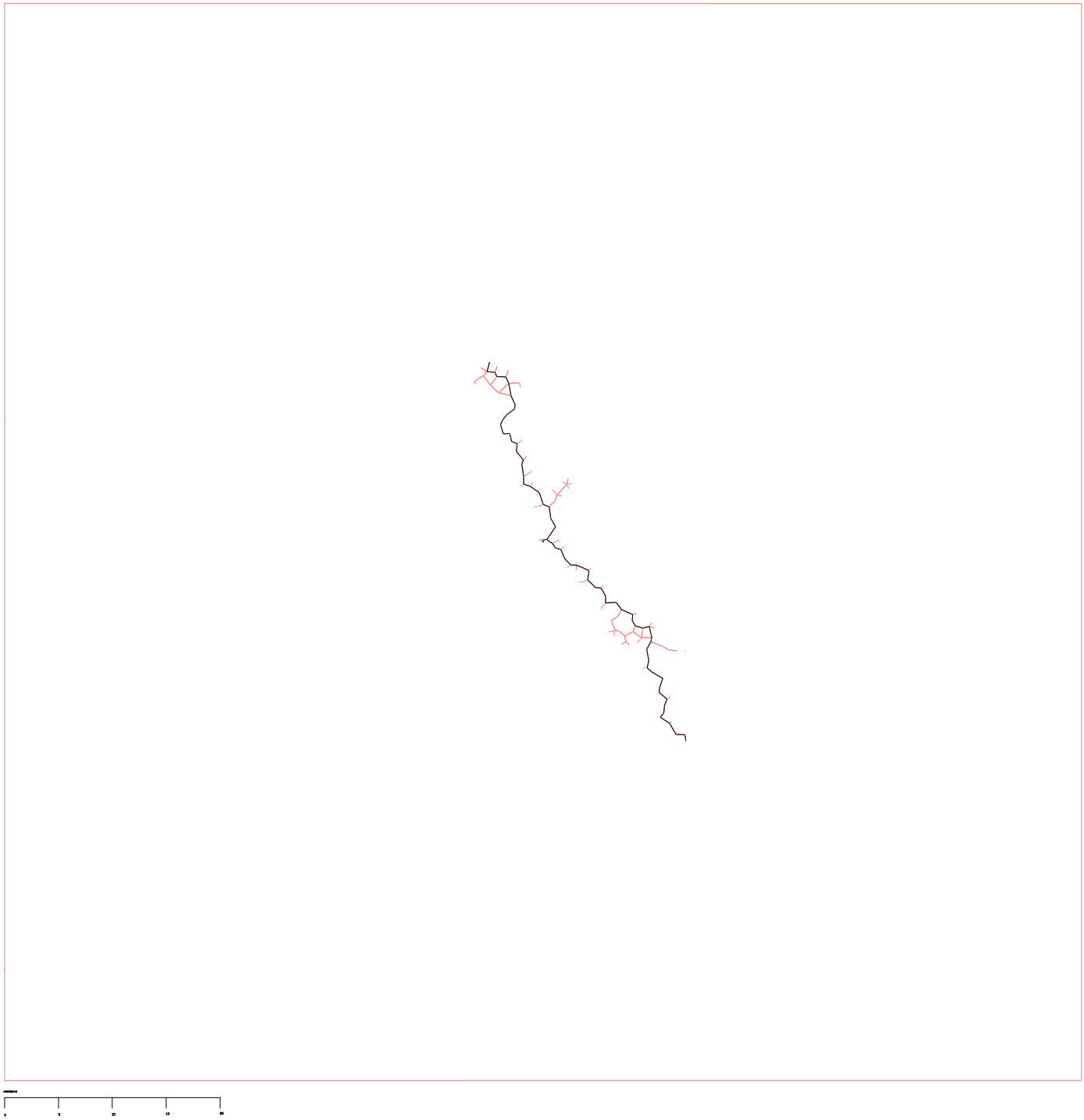
Τέλος, θα διερευνηθεί η περίπτωση όπου το εντατικό πεδίο είναι ισότροπο

Σχήμα 6. 23 Αριθμητικό μοντέλο για round length 0.02 και ισότροπο εντατικό πεδίο

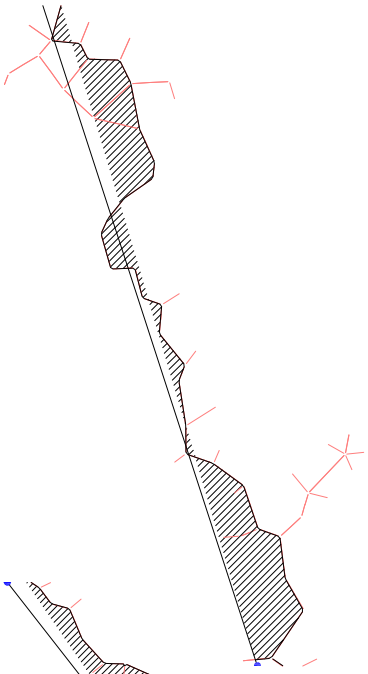


Σχήμα 6. 24 Αριθμητικό μοντέλο για round length 0.02 και ισότροπο εντατικό πεδίο (μεγενθυμένο)

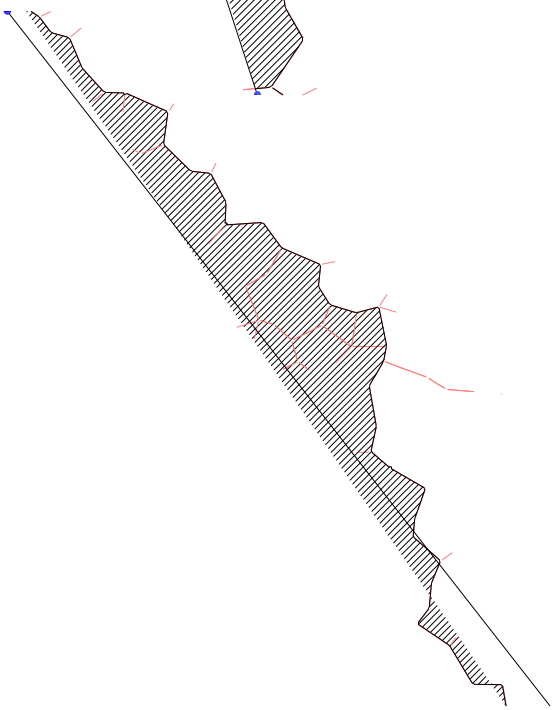
Στο αριθμητικό μοντέλο, που έχει οριστεί η τιμή του μήκους στρογγυλοποίησης (round length) 0.02 και το εντατικό πεδίο είναι ισότροπο, παρατηρείται μια πολύπλοκη διάδοση της υδραυλικής θραύσης προς πολλαπλές κατευθύνσεις



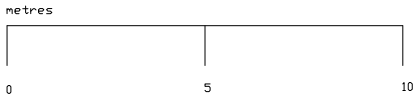
Σχήμα 6. 25 Αριθμητικό μοντέλο για round length 0.04 και ισότροπο εντατικό πεδίο



Σχήμα 6. 26 Αριθμητικό μοντέλο για round 0.04 (ανώτερο τμήμα)



Σχήμα 6. 27 Αριθμητικό μοντέλο για round 0.04 (κατώτερο τμήμα)



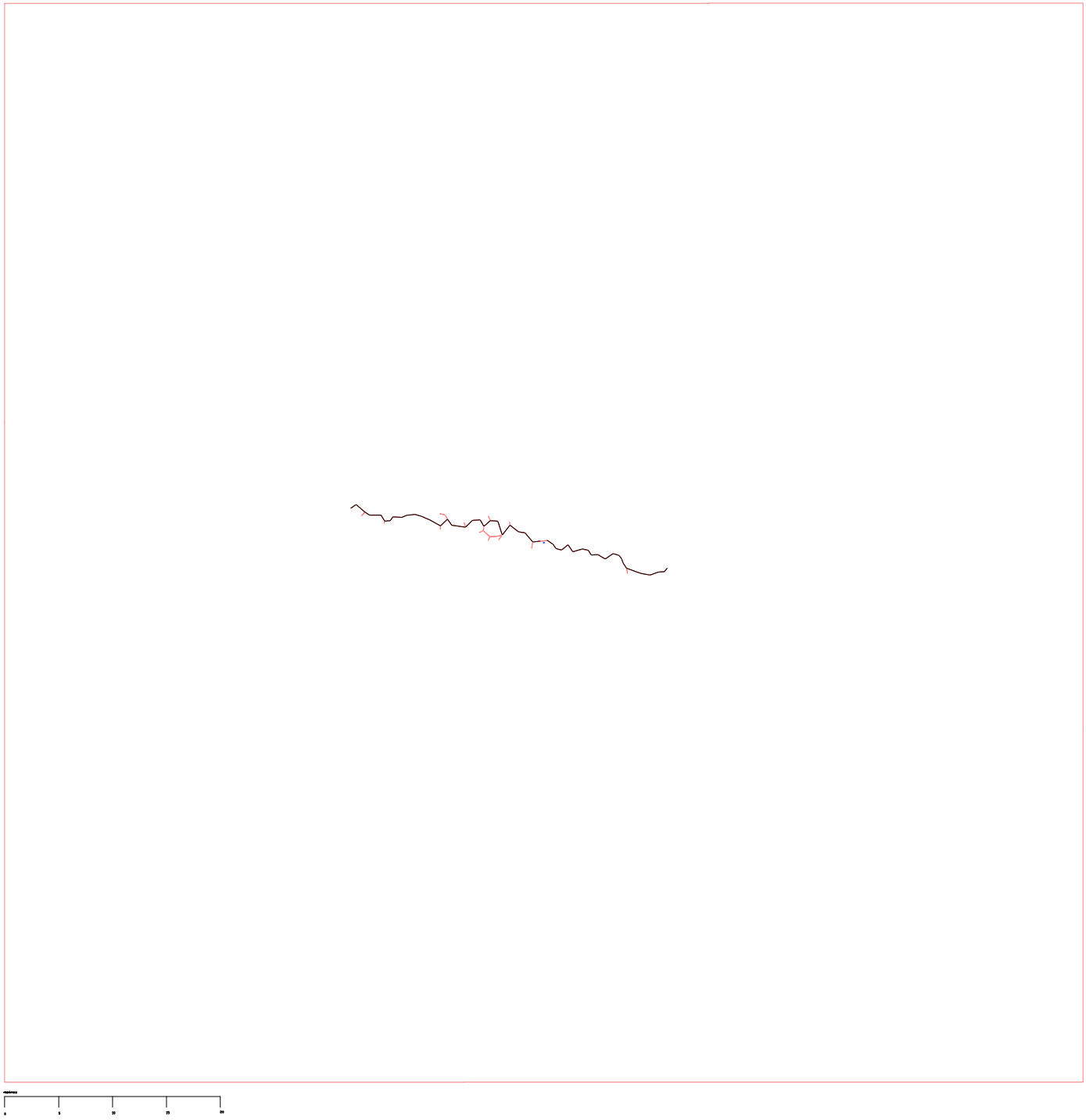
Όταν στο αριθμητικό μοντέλο οριστεί η τιμή του μήκους στρογγυλοποίησης σε 0.04 και το εντατικό πεδίο είναι ισότροπο, παρατηρείται η διάδοση της υδραυλικής θραύσης προς δύο κατευθύνσεις (διαγώνια).

Στο ανώτερο τμήμα, το μήκος της ρωγμάτωσης είναι 21.9m περίπου, ενώ ο δείκτης ευθυγραμμίας διάδοσης της ρωγμής είναι 1.25

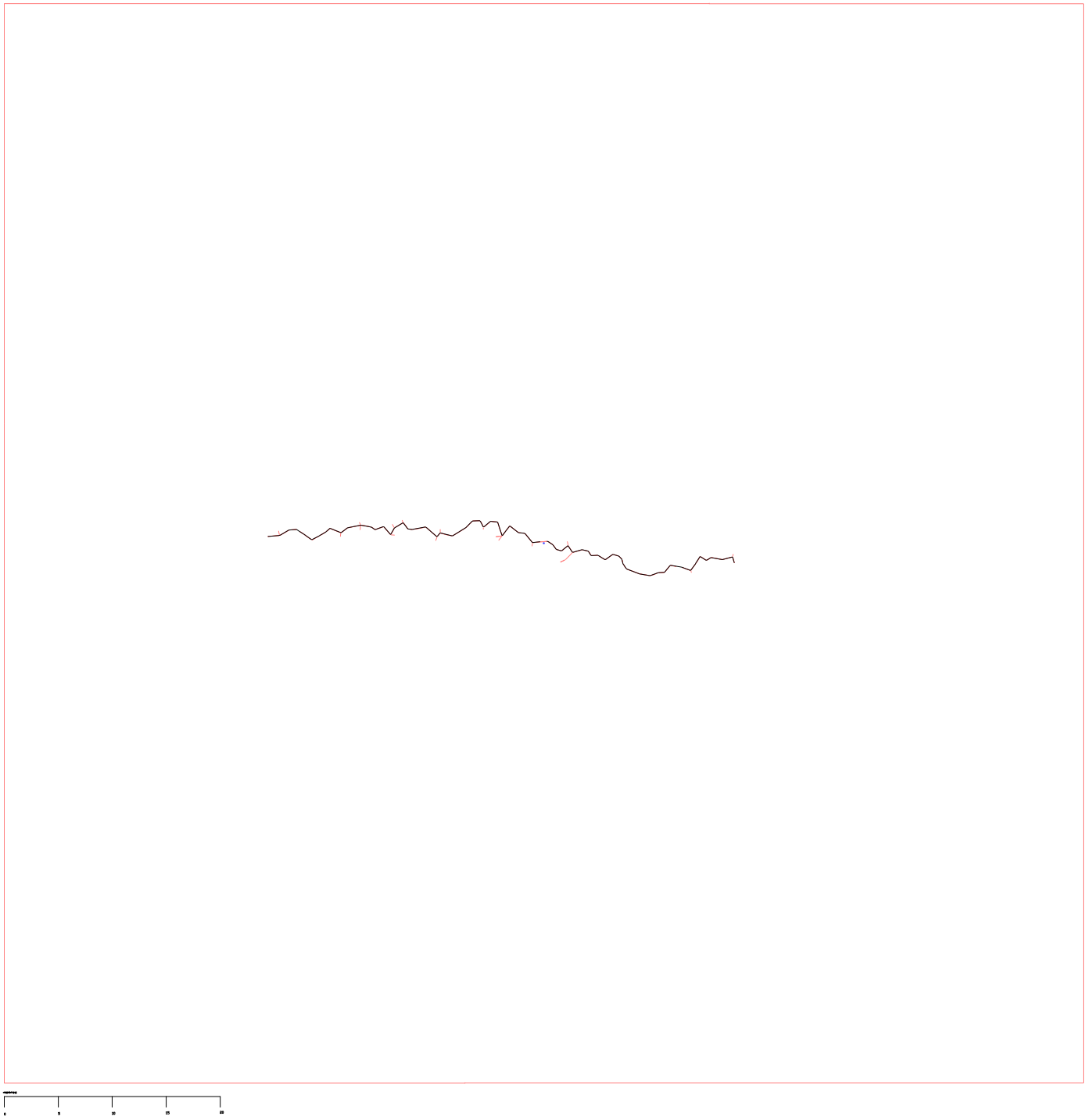
Στο κατώτερο τμήμα, το μήκος της ρωγμάτωσης φτάνει τα 27.8m, ενώ ο δείκτης ευθυγραμμίας διάδοσης της ρωγμής είναι 1.187

6.4 Αποτελέσματα παραμετρικών δοκιμών με μεταβολή του αρχικού ανοίγματος των ασυνεχειών

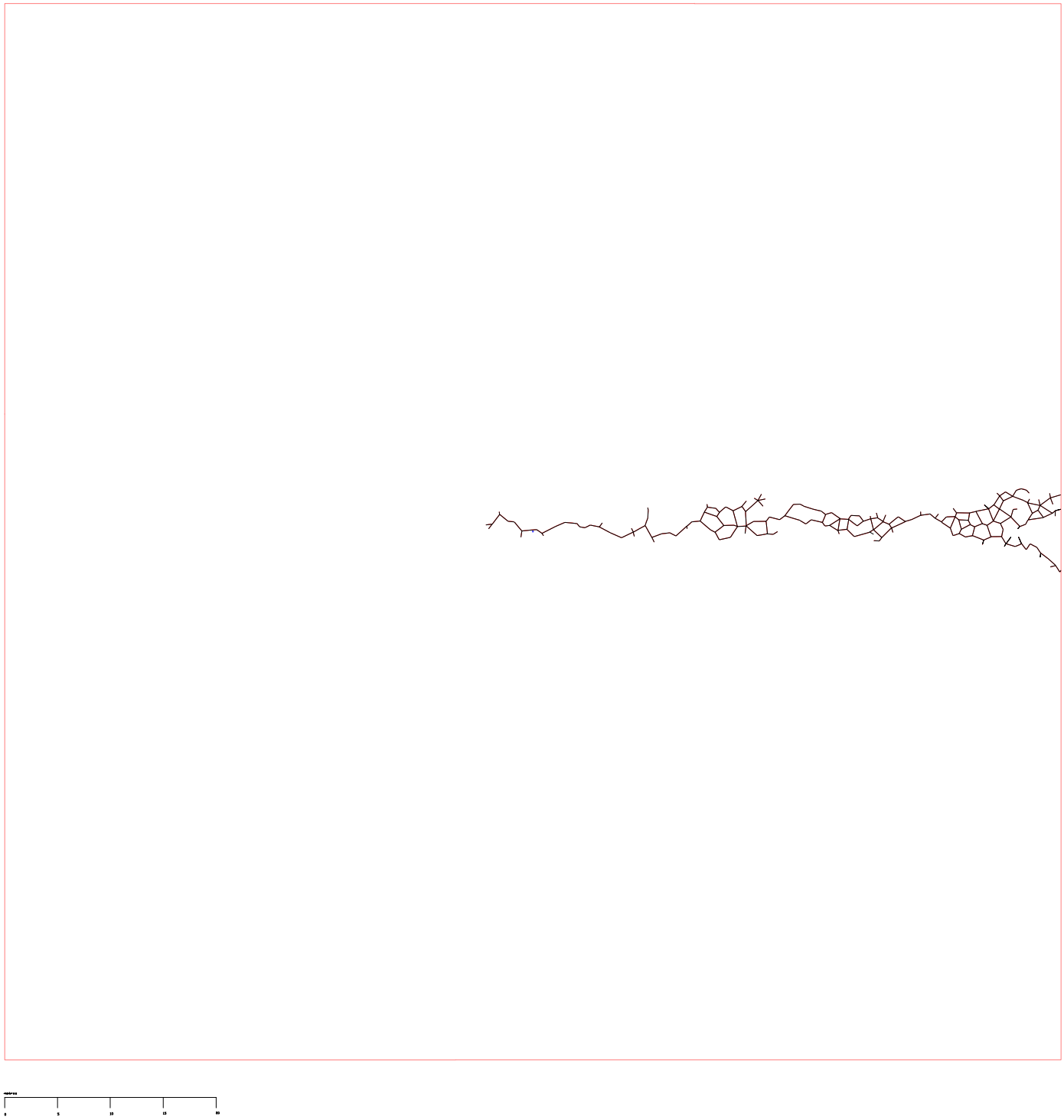
Στην συνέχεια, διατηρώντας ως βασικό μοντέλο εκείνο με τιμή μήκους στρογγυλοποίησης 0.04 m , και το εντατικό πεδίο είναι ανισότροπο με τον λόγο της μέγιστης κύριας οριζόντιας τάσης προς την ελάχιστη οριζόντια κύρια τάση ίσο με 1.5, μεταβάλεται η τιμή (αρχική τιμή 50μm) του αρχικού ανοίγματος των ασυνεχειών. Συγκεκριμένα, ορίζονται οι τιμές 25μm και 100μm.



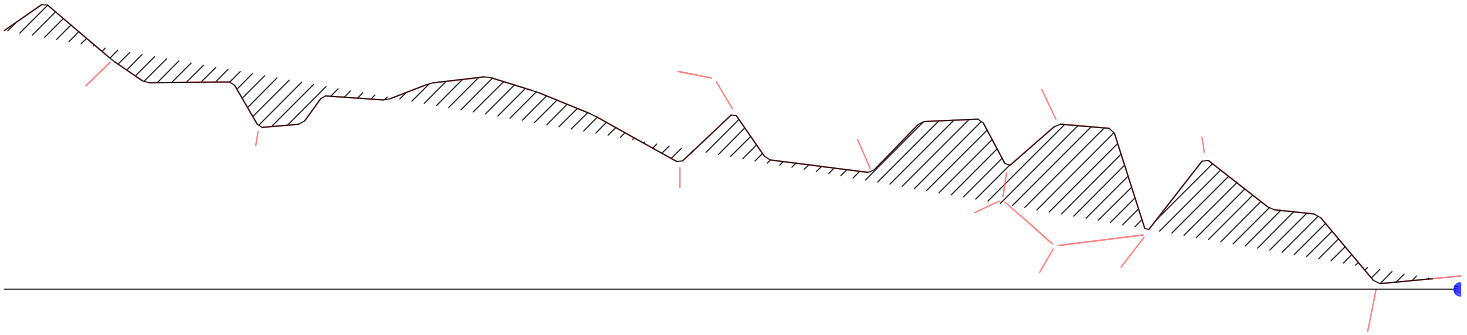
Σχήμα 6. 28 Αριθμητικό μοντέλο με αρχικό άνοιγμα ασυνεχειών 25μm



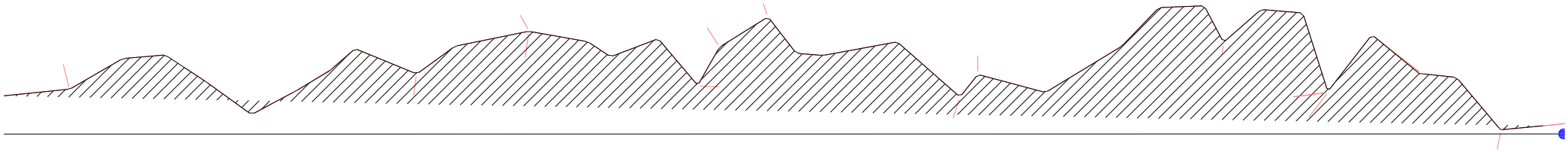
Σχήμα 6. 29 Αριθμητικό μοντέλο με αρχικό άνοιγμα ασυνεχειών 50μm



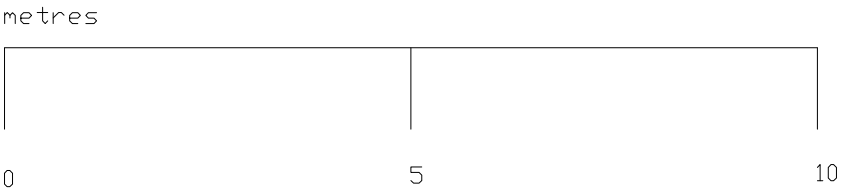
Σχήμα 6. 30 Αριθμητικό μοντέλο με αρχικό άνοιγμα ασυνεχειών 100μm

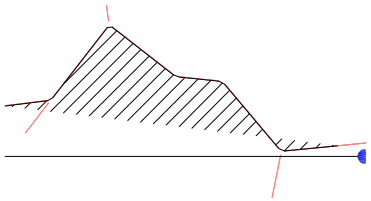


Σχήμα 6. 31 Αριθμητικό μοντέλο με αρχικό άνοιγμα ασυνεχειών 25μm (αριστερό τμήμα)



Σχήμα 6. 32 Αριθμητικό μοντέλο με αρχικό άνοιγμα ασυνεχειών 50μm (αριστερό τμήμα)





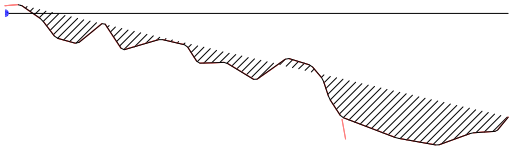
Σχήμα 6. 33 Αριθμητικό μοντέλο με αρχικό άνοιγμα ασυνεχειών 100μ m (αριστερό τμήμα)

Σύμφωνα με το σχήμα, για αρχικό άνοιγμα ασυνεχειών 25μm, αριστερά της γεώτρησης παρατηρείται διάδοση της ρωγμής πάνω από το επίπεδο της οριζόντιας ευθείας, για περίπου 17.9 m. Το μήκος της ρωγμής φτάνει τα 21.87 m, ενώ ο δείκτης ευθυγραμμίας διάδοσης της ρωγμής 1.22

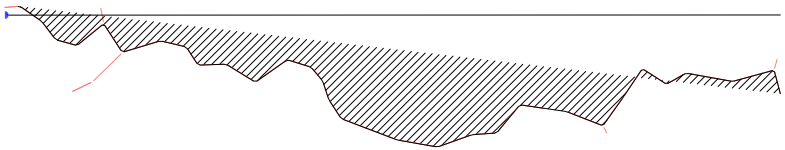
Για αρχικό άνοιγμα ασυνεχειών 50μm, παρατηρείται διάδοση της ρωγμής πάνω από την οριζόντια ευθεία, για περίπου 25.56 m. Το μήκος της ρωγμής φτάνει τα 30.78 m, ενώ ο δείκτης ευθυγραμμίας διάδοσης της ρωγμής 1.2.

Για αρχικό άνοιγμα ασυνεχειών 100μm, η διάδοση της ρωγμής πραγματοποιείται για 4.43m, πάνω από το οριζόντιο επίπεδο της ευθείας. Το μήκος της ρωγμής, φτάνει τα 5.12m και ο δείκτης ευθυγραμμίας διάδοσης της ρωγμής 1.156.

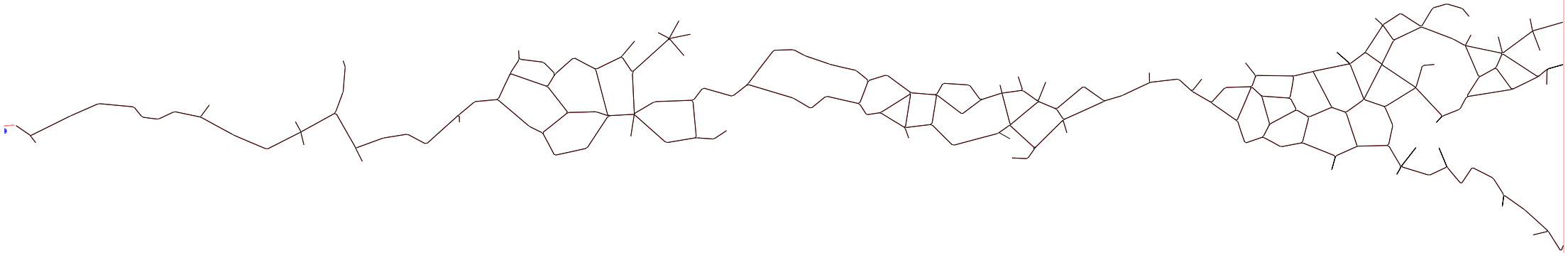
Συγκρίνοντας τα αριθμητικά μοντέλα, το μοντέλο που παρουσιάζεται ο μεγαλύτερος δείκτης ευθυγραμμίας είναι αυτό στο οποίο έχει οριστεί αρχικό άνοιγμα ασυνεχειών 25 μm. Όμως, για αρχικό άνοιγμα ασυνεχειών 50 μm παρουσιάζεται το μεγαλύτερο μήκος που έχει διαδοθεί η ρωγμή.



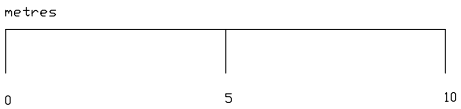
Σχήμα 6. 34 Αριθμητικό μοντέλο με αρχικό άνοιγμα ασυνεχειών 25μm (δεξιό τμήμα)



Σχήμα 6. 35 Αριθμητικό μοντέλο με αρχικό άνοιγμα ασυνεχειών 50μm (δεξιό τμήμα)



Σχήμα 6. 36 Αριθμητικό μοντέλο με αρχικό άνοιγμα ασυνεχειών 100μ m (δεξιό τμήμα)



Σύμφωνα με το σχήμα, για άνοιγμα ασυνεχειών 25μm, δεξιά της γεώτρησης παρατηρείται διάδοση της ρωγμής κάτω από το επίπεδο της οριζόντιας ευθείας, για περίπου 11.45 m. Το μήκος της ρωγμής φτάνει τα 13.43 m, ενώ ο δείκτης ευθυγραμμίας διάδοσης της ρωγμής 1.17

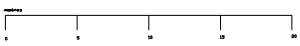
Για άνοιγμα ασυνεχειών 50μm, παρατηρείται διάδοση της ρωγμής κάτω από την οριζόντια ευθεία, για περίπου 17.64 m. Το μήκος της ρωγμής φτάνει τα 21.07 m, ενώ ο δείκτης ευθυγρμμίας διάδοσης της ρωγμής 1.194.

Για άνοιγμα ασυνεχειών 100μm, η ρωγμή διαδίδεται μέχρι το όριο του μοντέλου, περίπου 50m.

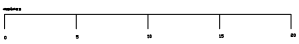
Ο μικρότερος δείκτης ευθυγραμμίας διάδοσης της ρωγμης, παρουσιάζεται στο πρώτο μοντέλο (αρχικό άνοιγμα ασυνεχειών 25 μm). Στο μοντέλο με αρχικό άνοιγμα ασυνεχειών 100 μm, η ρωγμή διαδίδεται μέχρι τα όρια του μοντέλου, στα 50 m, και μετά διαχέεται.

6.5 Αποτελέσματα παραμετρικών δοκιμών με μεταβολή του ρυθμού εισπίεσης

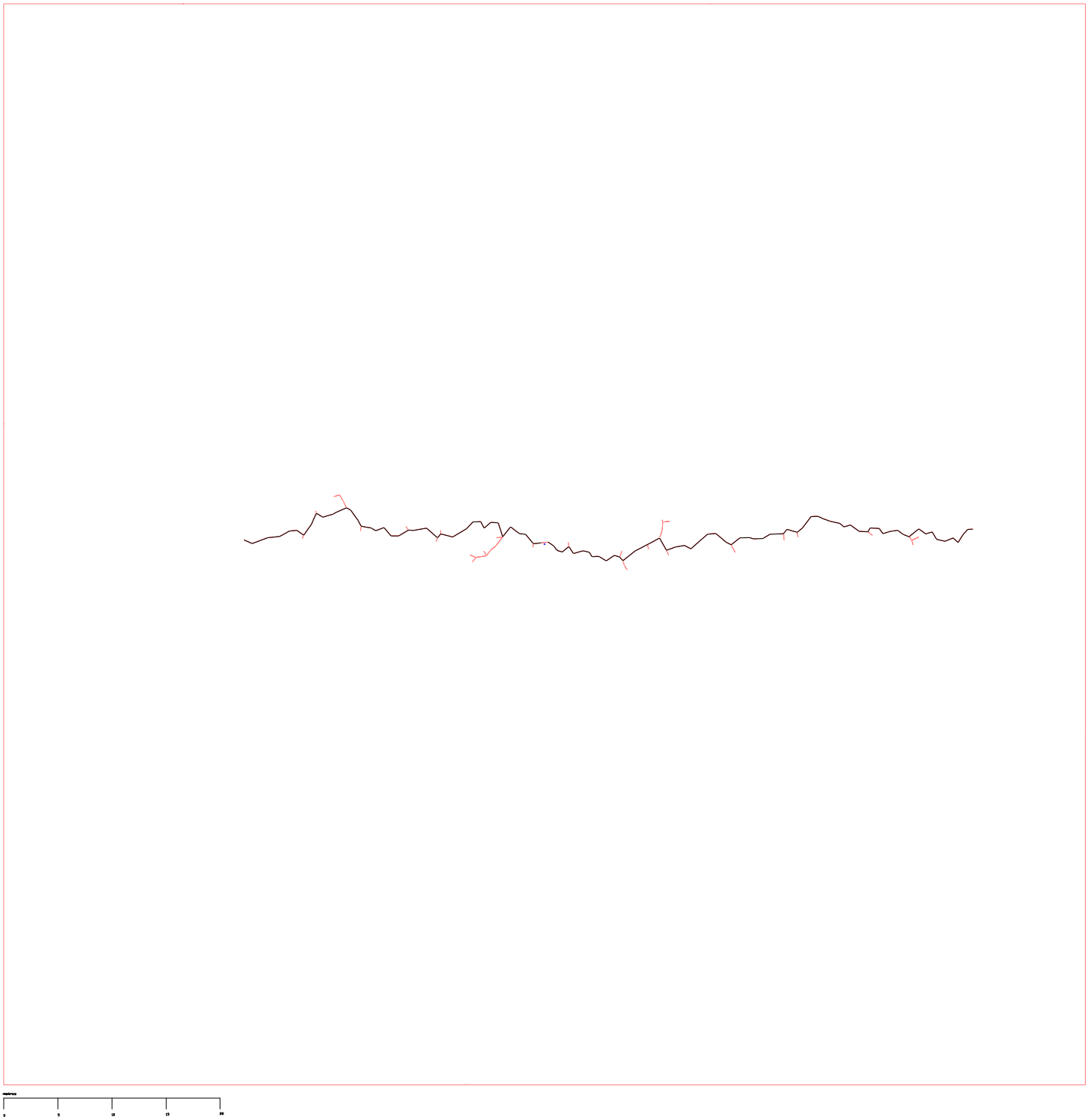
Στην συνέχεια, διατηρώντας ως βασικό μοντέλο εκείνο με τιμή μήκους στρογγυλοποίησης 0.04m , και το εντατικό πεδίο είναι ανισότροπο με τον λόγο της μέγιστης κύριας οριζόντιας τάσης προς την ελάχιστη οριζόντια κύρια τάση ίσο με 1.5, μεταβάλεται η τιμή του ρυθμού εισπίεσης. Συγκεκριμένα, η τιμή (0.0002 m^2/sec) διπλασιάζεται (0.0004 m^2/sec) και υποδιπλασιάζεται (0.0001 m^2/sec).



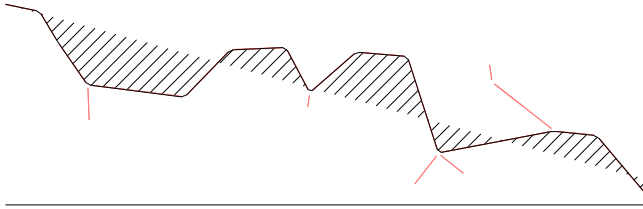
Σχήμα 6. 37 Αριθμητικό μοντέλο με ρυθμό εισπίεσης 0.0001 m^2/sec



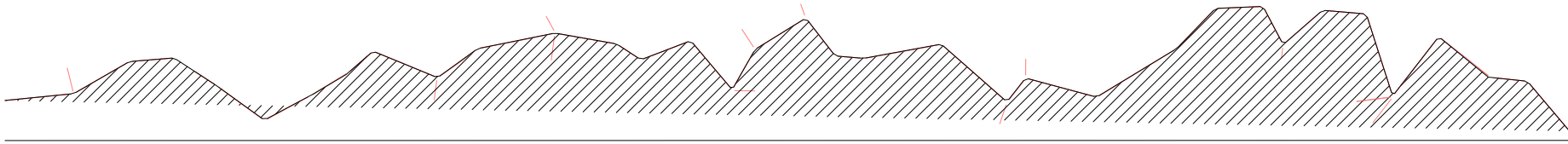
Σχήμα 6. 38 Αριθμητικό μοντέλο με ρυθμό εισπίεσης 0.0004 m^2/sec

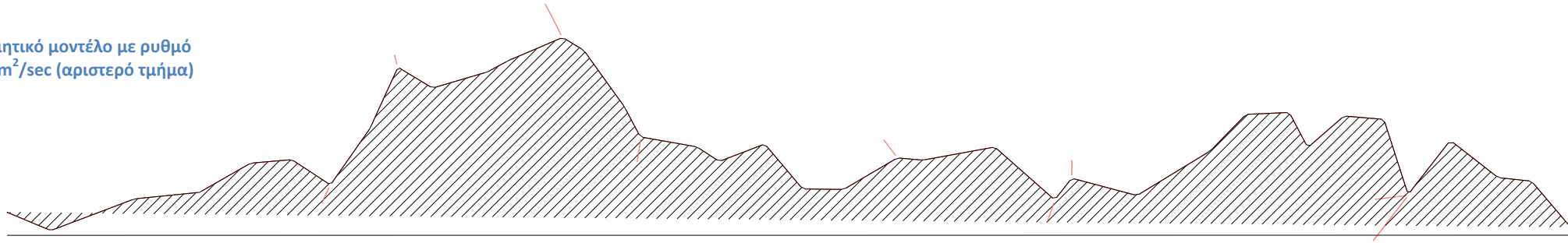


Σχήμα 6. 39 Αριθμητικό μοντέλο με ρυθμό εισπίεσης 0.0004 m^2/sec



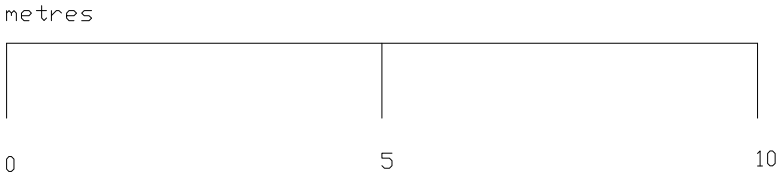
Σχήμα 6. 40 Αριθμητικό μοντέλο με ρυθμό εισπίεσης 0.0001 m^2/sec (αριστερό τμήμα)





Σχήμα 6. 41 Αριθμητικό μοντέλο με ρυθμό εισπίεσης 0.0002 m^2/sec (αριστερό τμήμα)

Σχήμα 6. 42 Αριθμητικό μοντέλο με ρυθμό εισπίεσης 0.0004 m^2/sec (αριστερό τμήμα

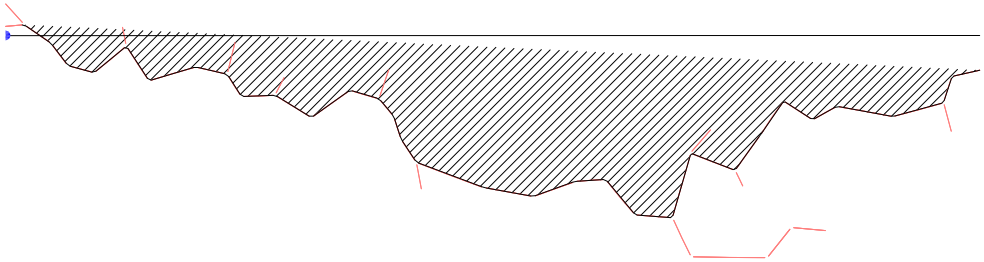


Σύμφωνα με το σχήμα, για ρυθμό εισπίεσης 0.035 m^3/sec , αριστερά της γεώτρησης παρατηρείται διάδοση της ρωγμής πάνω από το επίπεδο της οριζόντιας ευθείας, για περίπου 9.62 m. Το μήκος της ρωγμής φτάνει τα 11.89 m, ενώ ο δείκτης ευθυγραμμίας διάδοσης της ρωγμής 1.24

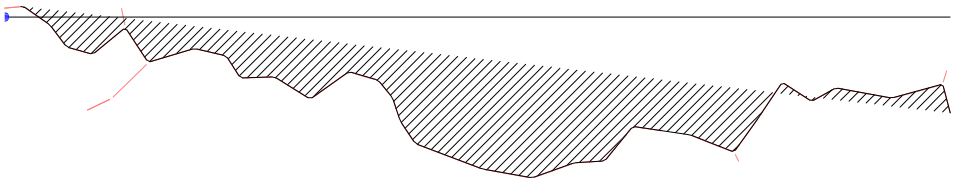
Για ρυθμό εισπίεσης 0.07 m^3/sec , παρατηρείται διάδοση της ρωγμής πάνω από την οριζόντια ευθεία, για περίπου 25.56 m. Το μήκος της ρωγμής φτάνει τα 30.78 m, ενώ ο δείκτης ευθυγραμμίας διάδοσης της ρωγμής 1.20.

Για ρυθμό εισπίεσης 0.14 m^3/sec, η διάδοση της ρωγμής πραγματοποιείται για 27.77 m, πάνω από το οριζόντιο επίπεδο της ευθείας. Το μήκος της ρωγμής, φτάνει τα 34.06 m και ο δείκτης ευθυγραμμίας διάδοσης της ρωγμής 1.23.

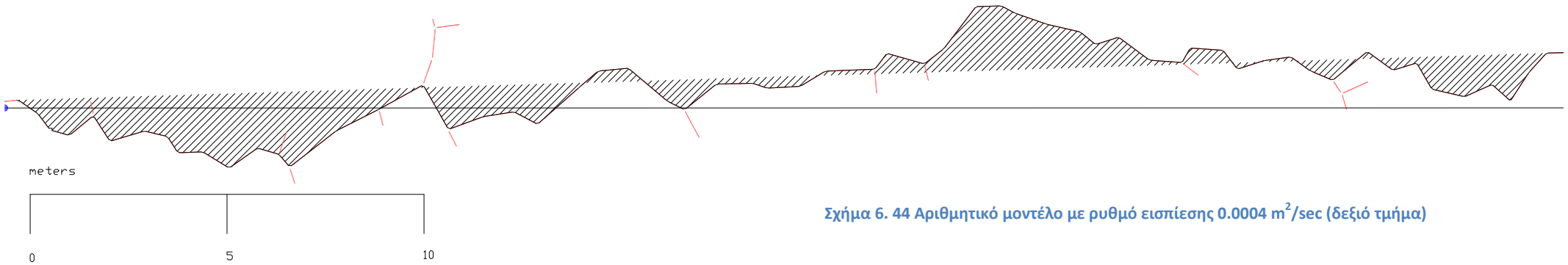
Από τα αποτελέσματα συμπεραίνεται ότι όσο αυξάνεται ο ρυθμός εισπίεσης, αυξάνεται και το μήκος που διαδίδεται η ρωγμή, για τον ίδιο χρόνο ροής.



Σχήμα 6. 43 Αριθμητικό μοντέλο με ρυθμό εισπίεσης 0.0001 m^2/sec (δεξιό τμήμα)



Σχήμα 6. 45 Αριθμητικό μοντέλο με ρυθμό εισπίεσης 0.0001 m^2/sec (δεξιό τμήμα)



Σχήμα 6. 44 Αριθμητικό μοντέλο με ρυθμό εισπίεσης 0.0004 m^2/sec (δεξιό τμήμα)

Σύμφωνα με το σχήμα, για ρυθμό εισπίεσης 0.035 m^3/sec , δεξιά της γεώτρησης παρατηρείται διάδοση της ρωγμής κάτω από το επίπεδο της οριζόντιας ευθείας, για περίπου 18.17 m. Το μήκος της ρωγμής φτάνει τα 22.43 m, ενώ ο συντελεστής είναι 1.23

Για ρυθμό εισπίεσης 0.07 m^3/sec , παρατηρείται διάδοση της ρωγμής κάτω από την οριζόντια ευθεία, για περίπου 17.64 m. Το μήκος της ρωγμής φτάνει τα 21.07 m, ενώ ο συντελεστής είναι 1.194.

Για ρυθμό εισπίεσης 0.14 m^3/sec, η διάδοση της ρωγμής πραγματοποιείται για 39.57 m, εκατέρωθεν της οριζόντιας ευθείας. Το μήκος της ρωγμής, φτάνει τα 46.71 m και ο συντελεστής είναι 1.18.

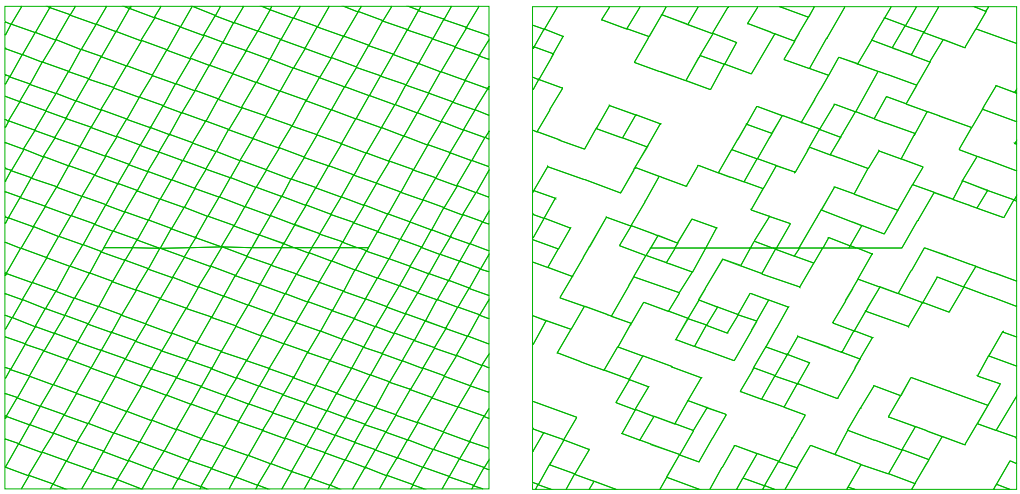
Στα συγκεκριμένα μοντέλα, η ρωγμή με το μεγαλύτερο μήκος διάδοσης, παρατηρήθηκε στο μοντέλο με τον υψηλότερο ρυθμό εισπίεσης. Ωστόσο, σε αντίθεση με τα προηγούμενα αριθμητικά μοντέλα, με την παράλληλη αύξηση του ρυθμού εισπίεσης, μειώνεται ο δείκτης ευθυγραμμίας διάδοσης της υδραυλικής θραύσης.

7 Τέταρτη σειρά αριθμητικών μοντέλων με δίκτυο ασυνεχειών

Στην τέταρτη σειρά αριθμητικών προσομοιώσεων, επιχειρείται η προσομοίωση της αλληλεπίδρασης της υδραυλικής θραύσης με ένα υπάρχον δίκτυο ασυνεχειών. Σκοπός των προσομοιώσεων είναι η διερεύνηση της επίδρασης παραμέτρων της γεωμετρίας των ασυνεχειών και του φυσικού εντατικού πεδίου, στον τρόπο διάδοσης της υδραυλικής θραύσης. Εξετάζονται δύο περιπτώσεις δικτύων ασυνεχειών. Στην πρώτη περίπτωση οι ασυνέχειες έχουν μεγάλη εμμονή και διασχίζουν τα όρια του μοντέλου. Στη δεύτερη περίπτωση η εμμονή τους, όπως καθορίζεται από το μήκος του ίχνους τους στο επίπεδο του μοντέλου, είναι περιορισμένη, ούτως ώστε οι ασυνέχειες να εμφανίζονται ως διακεκομμένες.

Εξετάζονται δύο εντατικά πεδία, ένα ανισότροπο με λόγο μέγιστης προς ελάχιστη οριζόντια κύρια τάση ίσο με 1.5 και ένα ισότροπο.

Η υδραυλική θραύση προσομοιώνεται ως μία επίπεδη ασυνέχεια με συνοχή και εφελκυστική αντοχή.



(α) (β)

Σχήμα 7.46 Αριθμητικό μοντέλο στο UDEC για την τέταρτη σειρά αριθμητικών μοντέλων: (α) μοντέλο με ασυέχειες μεγάλης εμμονής, (β) μοντέλο με ασυνέχειες πεπερασμένης εμμονής.

7.1 Προετοιμασία των αριθμητικών μοντέλων

Για την κατασκευή του μοντέλου, πρέπει πρώτα να καθορισθεί το μήκος στο οποίο θα γίνει στρογγύλευση των γωνιών του κάθε ογκοτεμαχίου στο UDEC. Με την χρήση της εντολής **ROUND**, ορίζεται το μήκος αυτό ως ίσο με 0.04 m. Στην συνέχεια, με την εντολή **BLOCK**, κατασκευάζεται το δισδιάστατο τμήμα του ταμιευτήρα, διαστάσεων 100x100 m. Στην συνέχεια, με την εντολή **jset** κατασκευάζεται ένα δίκτυο ασυνεχειών από δύο σύνολα ασυνεχειών. Το πρώτο σύνολο έχει κλίση 60° και το δεύτερο 160°. Εξετάζονται δύο περιπτώσεις:

(α) ασυνέχειες μεγάλης εμμονής

(β) ασυνέχειες περιορισμένης εμμονής

Μέσω της εντολής **angle** ορίζεται η κλίση του συνόλου ασυνεχειών, ενώ με τις εντολές **trace** και **gap** ορίζεται το μήκος του ίχνους της ασυνέχειας και το μήκος του κενού ανάμεσα στις ασυνέχειες. Τέλος, μέσω της εντολής **GENERATE EDGE,** πραγματοποιείται η διακριτοποίηση του μοντέλου σε ζώνες πεπερασμένων διαφορών.

Αφού ολοκληρώθηκε η γεωμετρία του μοντέλου, στην συνέχεια θα πρέπει να καθοριστούν οι μηχανικές ιδιότητες του πετρώματος και των διεπιφανειών των ασυνεχειών. Με την εντολή **prop mat 1** δίνονται τα βασικά μηχανικά χαρακτηριστικά του πετρώματος. Ορίζεται η πυκνότητα του πετρώματος 2600 kg/m^3, το μέτρο ελαστικότητας 10 GPa και ο λόγος Poisson 0.3. Στον κώδικα όμως, πρέπει να εισαχθεί το μέτρο συμπίεσης K (bulk modulus) και το μέτρο διάτμησης (shear modulus).

Όλα τα αριθμητικά μοντέλα για παραμορφώσιμα ογκοτεμάχια στο *UDEC*, διέπονται από μια ισότροπη συμπεριφορά υλικού, σε ελαστικό εύρος που περιγράφεται από τις δύο ελαστικές σταθερές K και G. Οι ελαστικές σταθερές K και G, χρησιμοποιούνται στα αριθμητικά μοντέλα του *UDEC*, αντί για το μέτρο ελαστικότητας και τον λόγο Poisson. Σύμφωνα με το εγχειρίδιο χρήσης του κώδικα UDEC, τα K και G αντιστοιχούν σε πιο θεμελιώδεις πτυχές της συμπεριφοράς του υλικού, σε σχέση με το μέτρο ελαστικότητας και τον λόγο Poisson. Ο υπολογισμός των δύο μεγεθών, γίνεται με την χρήση των παρακάτω εξισώσεων:

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \qquad 7.1$$

όπου:

K είναι το μέτρο συμπίεσης

E είναι το μέτρο ελαστικότητας

ν είναι ο λόγος Poisson

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \qquad 7.2$$

όπου G είναι το μέτρο διάτμησης.

Από τις εξισώσεις 7.1 και 7.2 υπολογίζονται οι τιμές των K και G και μέσω των εντολών dens bulk και shear, εισάγονται οι τιμές 2600 kg/m^3, 8.33*10^9 Pa 3.85*10^9 Pa αντίστοιχα.

Στην συνέχεια, ορίζονται οι μηχανικές ιδιότητες των διεπιφανειών. Με την εντολή **joint** ορίζονται οι παρακάτω παράμετροι:

- jkn: η τιμή της ορθής δυστροπίας (joint normal stiffness)
- jks: η τιμή της διατμητικής δυστροπίας (joint shear stiffness)
- jcoh: η τιμή της συνοχής
- jfric: η γωνία τριβής των διεπιφανειών
- jten: η αντοχή σε εφελκυσμό
- jperm: η σταθερά περατότητας των διεπιφανειών που χρησιμοποιείται στο UDEC για αριθμητικές προσομοιώσεις ροής
- azero: το αρχικό άνοιγμα των διεπιφανειών υπό μηδενική ορθή τάση
- ares: είναι το παραμένον άνοιγμα των διεπιφανειών. Το άνοιγμα των διεπιφανειών δεν μπορεί να μειωθεί κάτω του ares ανεξαρτήτως του φυσικού εντατικού πεδίου.

Στις διεπιφάνειες θα μπρούσαν να δοθούν υψηλές τιμές ορθής και διατμητικής δυστροπίας, για να αποφευχθούν οι ορθές και διατμητικές μετατοπίσεις στις διεπιφάνειες. Ωστόσο, το χρονικό βήμα υπολογισμού της αριθμητικής προσομοίωσης, βασίζεται στην τιμή της δυστροπίας. Αν οι τιμές της είναι πολύ υψηλές, η υπολογιστική διαδικασία θα είναι πολύ αργή. Για μηχανικούς υπολογισμούς, η βέλτιστη τιμή των **jkn** και **jks** θα πρέπει να είναι δέκα φορές μικρότερη από την αντίστοιχη ακαμψία των γειτονικών ζωνών. Οι τιμές υπολογίζονται από την εξίσωση:

$$k_n \; \kappa\alpha\iota \; k_s \leq 10 \left[\max \left[\frac{K + \frac{4}{3} G}{\Delta z_{min}} \right] \right] \qquad 7.3$$

όπου:

kn και ks	είναι οι τιμές της ορθής και διατμητικής δυστροπίας
K	είναι το μέτρο συμπίεσης
G	είναι το μέτρο διάτμησης
Δzmin	είναι το ελάχιστο πλάτος της παρακείμενης ζώνης

Η τιμή που προέκυψε είναι 130 $*10^9$ Pa.

Οι παράμετροι διατμητικής και εφελκυστικής αντοχής των διεπιφανειών επιλέγονται έτσι ώστε τυχόν διατμητική ή εφελκυστική αστοχία να αντιπροσωπεύει την θραύση του πετρώματος κατά την υδραυλική θραύση. Για τις παραμέτρους διατμητικής αντοχής επιλέχθηκαν τιμές συνοχής και γωνίας τριβής των διεπιφανειών μηδέν και 30° αντίστοιχα. Η αντοχή σε εφελκυσμό επιλέχθηκε ως μηδενική. Η ασυνέχεια που μελλοντικά θα αποτελέσει το επίπεδο της υδραυλικής θραύσης, έχει τιμή συνοχής $10*10^6$ Pa και αντοχή σε εφελκυσμό με $5*10^6$ Pa.

Ο υπολογισμός της σταθεράς περατότητας των ασυνεχειών έγινε με χρήση της εξίσωσης:

$$k_j = \frac{1}{12\mu} \qquad 7.4$$

όπου:

kj είναι η σταθερά περατότητας των ασυνεχειών

μ είναι η τιμή του δυναμικού ιξώδους του ρευστού

Στην συγκεκριμένη αριθμητική προσμομοίωση, θεωρείται πως το ρευστό είναι νερό με κινηματικό ιξώδες (ν) 10^{-6} m^2/s και πυκνότητας (ρ) 1000 kg/m^3. Το δυναμικό ιξώδες υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \qquad 7.5$$

μ= 10^{-3} Pa*s και αντικαθιστώντας στην εξίσωση 7.4 ο συντελεστής περατότητας ισούται με 83.33$Pa^{-1}*s^{-1}$.

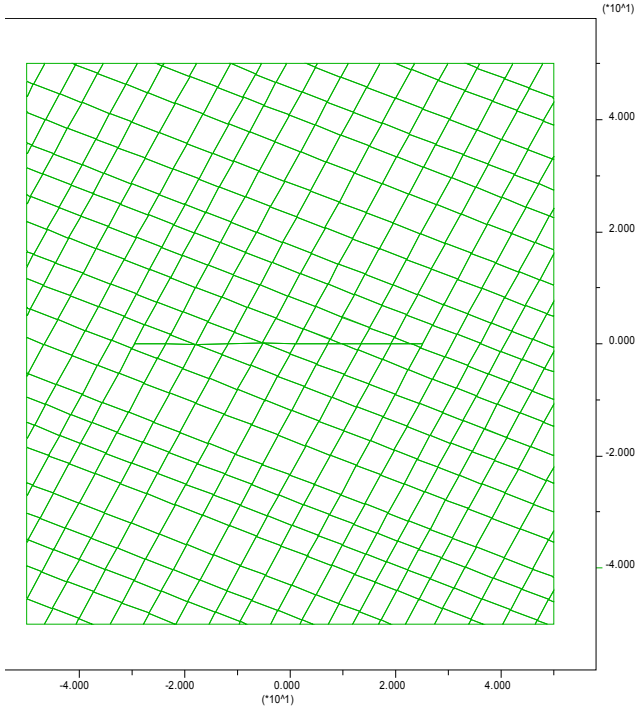
Το αρχικό άνοιγμα των ασυνεχειών τίθεται ως azero= $5*10^{-5}$m και το παραμένον άνοιγμα ως ares= $2*10^{-5}$m.

Τέλος, με την εντολή **set jcondf** , δίνονται οι ίδιες τιμές παραμέτρων και στις νέες επαφές που θα προκύψουν.

Το επόμενο βήμα είναι να καθοριστεί το εντατικό πεδίο με την εντολή **insitu stress**. Το πεδίο είναι ανισότροπο με τιμές των τάσεων σxx=-30*10^6 Pa, σyy=-20*10^6 Pa και σzz=-25*10^6 Pa. Τα άρρηκτα block στο UDEC είναι εξ' ορισμού αδιαπέρατα, ενώ το εξωτερικό όριο του μοντέλου ορίζεται ως αδιαπέρατο μέσω της εντολής **bound imperm**. Έπειτα πρέπει να οριστεί το είδος του αλγορίθμου ροής που θα χρησιμοποιηθεί μέσω της εντολής **set flow**. Επιλέγεται ο αλγόριθμος ασυμπίεστης ροής (**incrompressible**). Η πυκνότητα του υγρού είναι 1000 kg/m^3. Με την εντολή **well flow atdomain**, δίνονται ο ρυθμός εισπίεσης (0.0002 m^2/sec/m) και οι συντεταγμένες πάνω στις οποίες θα τοποθετηθεί η γεώτρηση (τοποθετείται στο κέντρο του μοντέλου). Είναι σημαντικό να επισημανθεί ότι το αριθμητικό μοντέλο διαθέτει μια ειδική εντολή, **j5flow**, η οποία για την συγκεκριμένη ανάλυση τίθεται

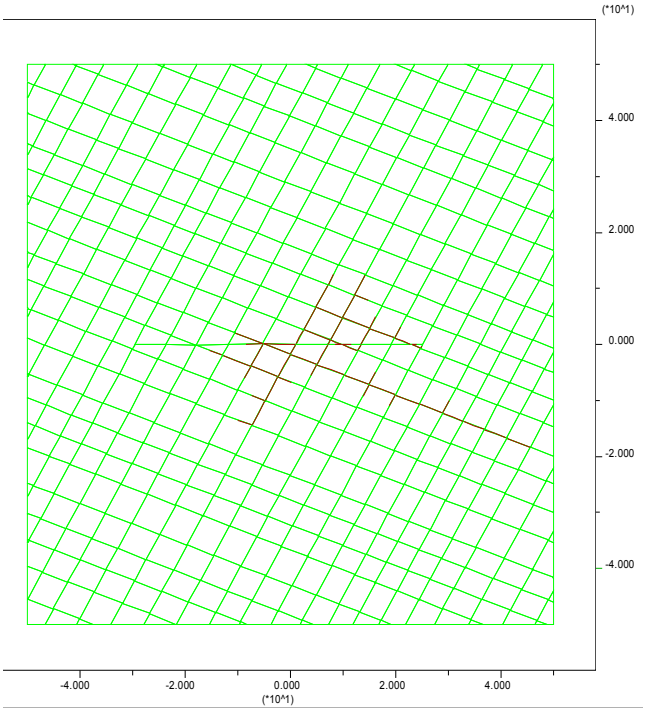
off. Αυτό σημαίνει ότι η ροή επιτρέπεται μόνο μέσα από διεπιφάνειες που έχουν αστοχήσει είτε σε διάτμηση είτε σε εφελκυσμό.

7.2 Μοντέλο με δίκτυο ασυνεχειών μεγάλης εμμονής



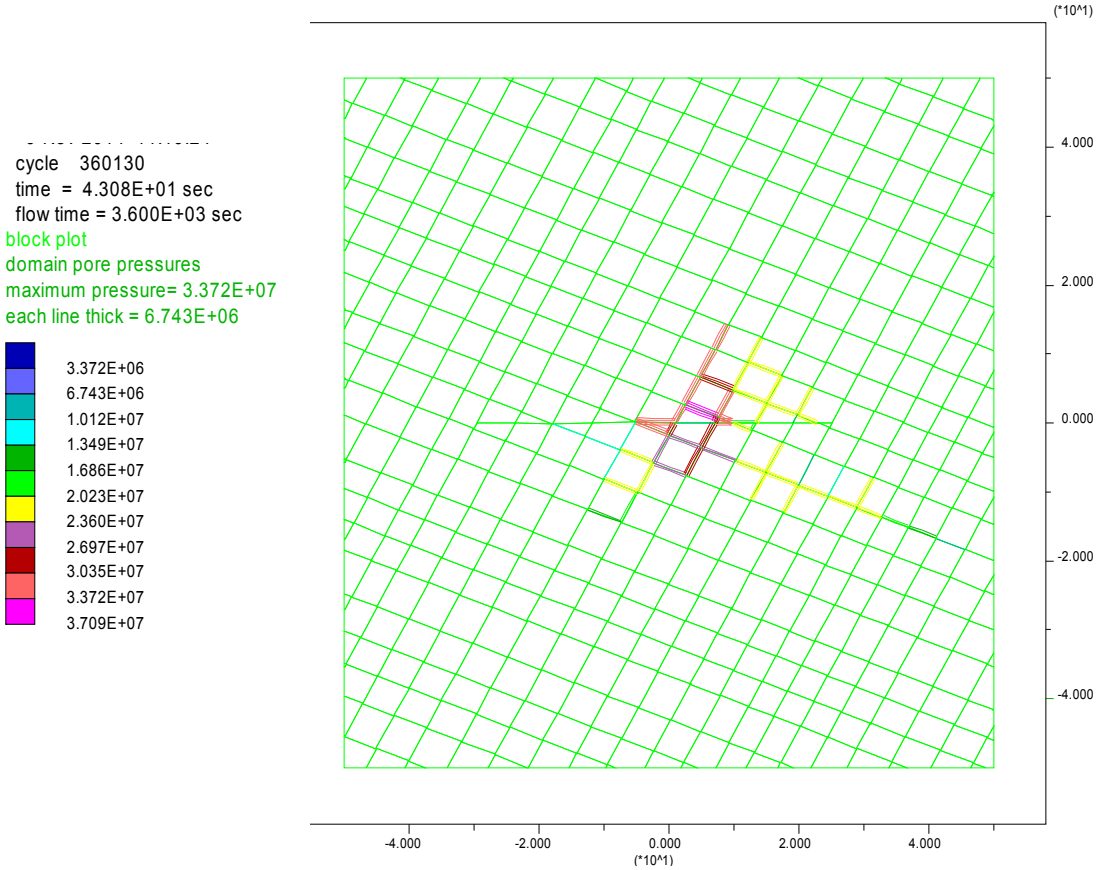
Σχήμα 7.47 Απεικόνιση του μοντέλου UDEC

Σύμφωνα και με το σχήμα 7.2, το δίκτυο ασυνεχειών είναι αρκετά πυκνό, ενώ υπάρχουν δύο σύνολα ασυνεχειών. Στο κέντρο έχει τοποθετηθεί μια ρωγμή, η οποία θα αποτελέσει το μελλοντικό επίπεδο της υδραυλικής θραύσης



Σχήμα 7.48 Υδραυλική θραύση και ασυνέχειες με διατμητική αστοχία

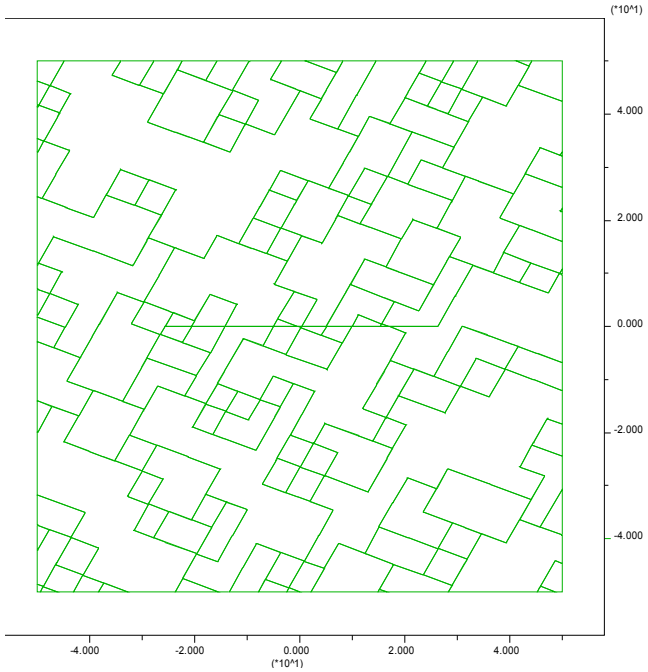
Σύμφωνα με το σχήμα 7.3, η υδραυλική θραύση φαίνεται να έχει διαδοθεί στην ρωγμή, μέχρι το σημείο όπου συνάντησε τις ασυνέχειες του δικτύου και διαδόθηκε σε εκείνες. Η διάδοση γίνεται κυρίως προς μια ασυνέχεια δεξιά και διάγωνια, επάνω σε επίπεδο ασυνέχειας που σχηματίζει γωνία μικρότερη των 45° ως προς τη διεύθυνση της μέγιστης κύριας τάσης.



Σχήμα 7.49 Η διακύμανση της πίεσης

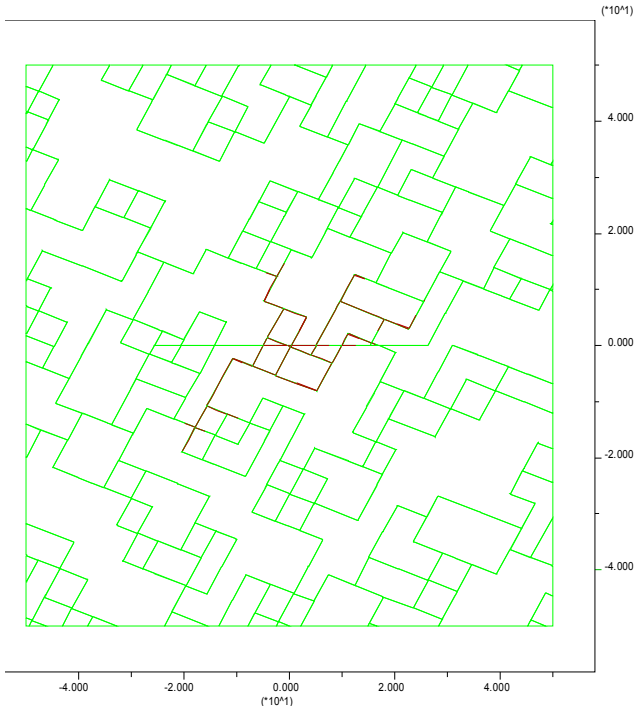
Η πίεση εμφανίζεται κατά μήκος των ασυνεχειών που παρουσιάστηκε η θραύση, με την μέγιστη τιμή να εντοπίζεται στο σημείο της εισπίεσης

7.3 Μοντέλο με δίκτυο ασυνεχειών περιριορισμένης εμμονής



Σχήμα 7.50 Απεικόνιση του μοντέλου UDEC

Σύμφωνα και με το σχήμα 7.5, το δίκτυο ασυνεχειών είναι αραιό, ενώ υπάρχουν δύο σύνολα ασυνεχειών. Στο κέντρο έχει τοποθετηθεί μια ρωγμή, η οποία θα αποτελέσει το μελλοντικό επίπεδο της υδραυλικής θραύσης



Σχήμα 7.51 Υδραυλική θραύση και ασυνέχειες με διατμητική αστοχία

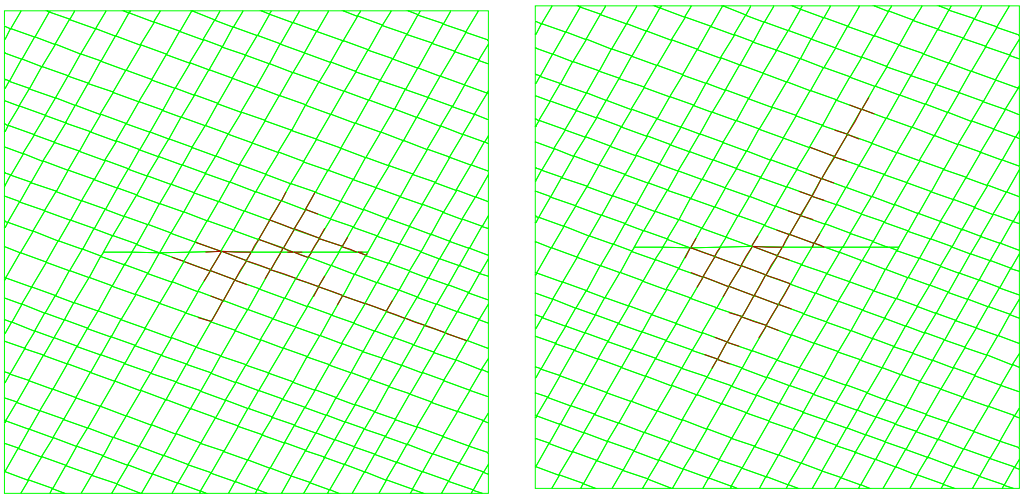
Όπως φαίνεται και στο σχήμα 7.6, η διάδοση της υδραυλικής θραύσης εξαρτάται από την συνδεσιμότητα των ασυνεχειών. Η περιορισμένη συνδεσιμότητα του δικτύου ασυνεχειών

έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερο μήκος υδραυλικής θραύσης (σχεδόν τριπλάσιο) σε σχέση με το μοντέλο με συνεχείς ασυνέχειες.

Σχήμα 7.52 Η διακύμανση της πίεσης

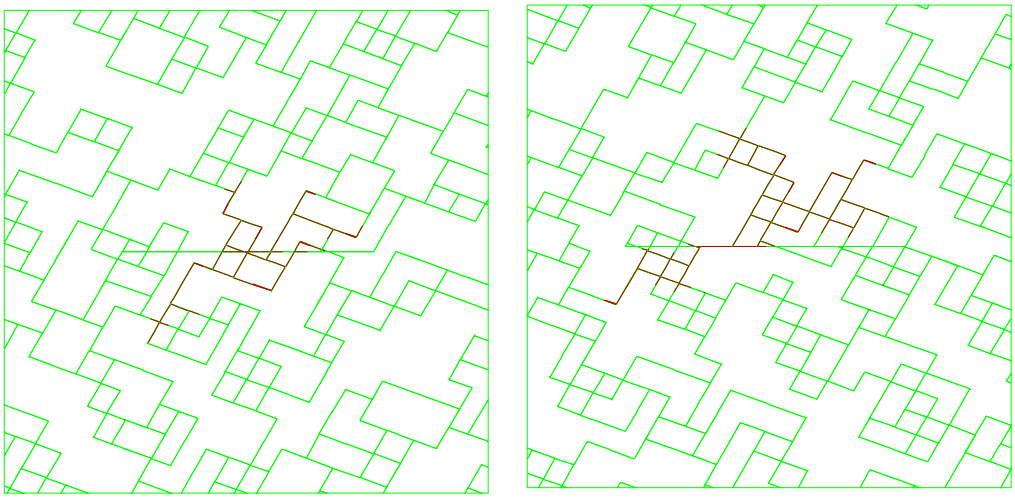
Η πίεση εμφανίζεται κατά μήκος των ασυνεχειών που παρουσιάστηκε η θραύση, με την μέγιστη τιμή να εντοπίζεται στο σημείο της εισπίεσης

- **Επίδραση εντατικού πεδίου**



(α) (β)

Σχήμα 7.53 Διατμητική αστοχία στις ασυνέχειες για δίκτυο με ασυνέχειες μεγάλης εμμονής: (α) για ανισότρπο εντατικό πεδίο, (β) για ισότροπο εντατικό πεδίο



Σχήμα 7.54 Διατμητική αστοχία στις ασυνέχειες για δίκτυο με ασυνέχειες περιορισμένης εμμονής: (α) για ανισότρπο εντατικό πεδίο, (β) για ισότροπο εντατικό πεδίο

Σύμφωνα με το σχήμα 7.8, στο μοντέλο με ασυνέχειες μεγάλης εμμονής, το εντατικό πεδίο επηρεάζει την διεύθυνση της διάδοσης της υδραυλικής και όχι το μήκος διάδοσής της.

Σύμφωνα με το σχήμα 7.9, το είδος του εντατικού πεδίου δεν επηρεάζει την διάδοση της θραύσης αισθητά, αφού η διάδοση εξαρτάται από την συνδεσιμότητα των ασυνεχειών

7.4 Συμπεράσματα

Στο μοντέλο με ασυνέχειες μεγάλης εμμονής, η υδραυλική θραύση διαδίδεται μέχρι να συναντήσει τις ασυνέχειες του δικτύου ασυνεχειών. Στη συνέχεια , η πίεση του ρευστού σε αυτές προκαλεί τη διατμητική τους αστοχία (shear stimulation), και η ίδια η υδραυλική θραύση δεν διαδίδεται περαιτέρω.

Στο μοντέλο με ασυνέχειες περιορισμένης εμμονής, η υδραυλική θραύση διαδίδεται περισσότερο, σε τριπλάσιο περίπου μήκος καθώς η υδραυλική συνδεσιμότητα του δικτύου είναι περιορισμένη. Όταν συναντήσει και διεγείρει τις ασυνέχειες του δικτύου ασυνεχειών, παύει να διαδίδεται, τουλάχιστο για το χρόνο που εξετάσαμε.

Στο μοντέλο με ασυνέχειες μεγάλης εμμονής, η διεύθυνση των κυρίων τάσεων του φυσικού εντατικού πεδίου έχει ως αποτέλεσμα την αλλαγή της διεύθυνσης διάδοσης της διατμητικής διέγερσης των ασυνεχειών. Δεν επιδρά όμως στο μήκος της υδραυλικής θραύσης.

Στο μοντέλο με ασυνέχειες περιορισμένης εμμονής, η αλλαγή του εντατικού πεδίου από ανισότρπο σε ισότρπο δεν έχει αισθητή επίδραση στα αποτελέσματα, αφού η διέγερση εκδηλώνεται εκεί όπου υπάρχει συνδεσιμότητα των ασυνεχειών. Επίσης, δεν επιδρά στο μήκος της υδραυλικής θραύσης.

8 Συζήτηση-Συμπεράσματα

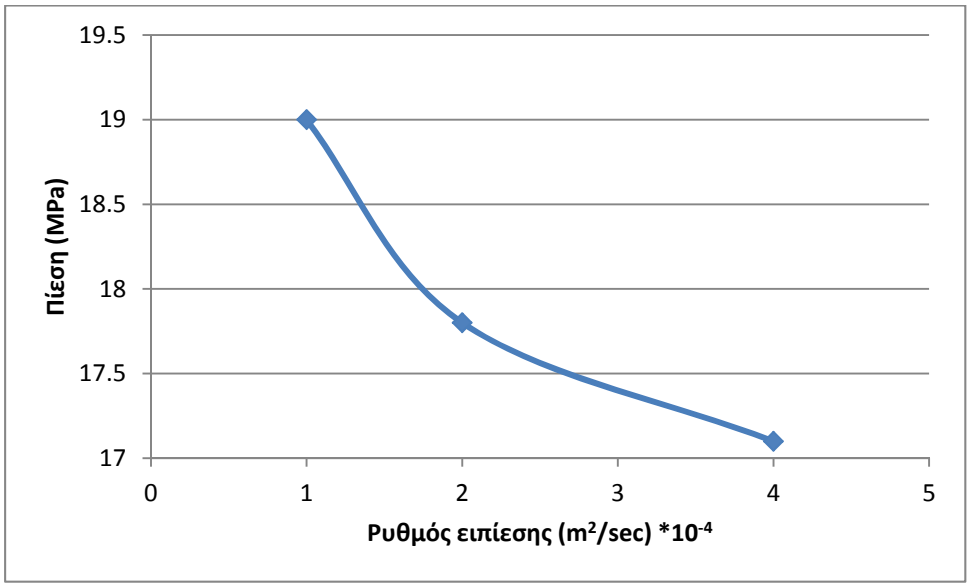
Πραγματοποιήθηκαν τρεις σειρές αριθμητικών πειραμάτων, προκειμένου να διαπιστωθεί η συμπεριφορά της πίεσης, το υδραυλικό άνοιγμα των ασυνεχειών που προκαλείται λόγω της υδραυλικής θραύσης και το μήκος διάδοσης της ρωγμάτωσης, με την μεταβολή διαφόρων παραμέτρων όπως το είδος του ρυθμού εισπίεσης και το αρχικό άνοιγμα των ασυνεχειών. Χρησιμοποιήθηκαν δύο τύποι αλγορίθμων για την προσομοίωση του είδους της ροής:

- Αλγόριθμος συμπιεστής ροής: για την προσομοίωση της διάδοσης της υδραυλικής θραύσης σε ένα προϋπάρχον επίπεδο ασυνέχειας
- Αλγόριθμος ασυμπίεστης ροής: για την προσομοίωση της ροής σε δίκτυα ασυνεχειών και της υδραυλικής θραύσης σε μοντέλα με ψηφίδωση Voronoi.

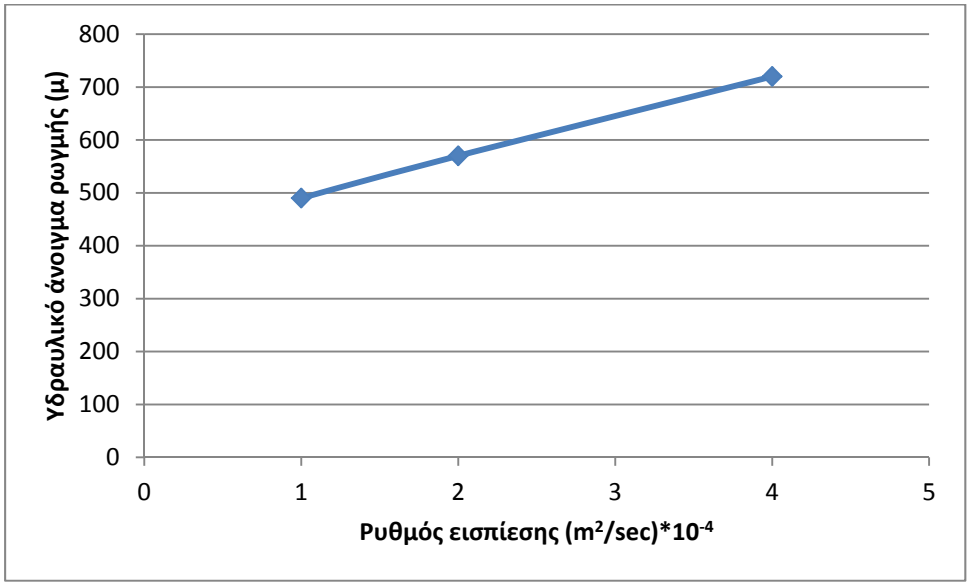
8.1 Προσομοίωση της διάδοσης της υδραυλικής θραύσης σε ένα προϋπάρχον επίπεδο ασυνέχειας

Αρχικά, επιλέχθηκε ο αλγόριθμος συμπιεστής ροής και παρατηρήθηκε η διακύμανση της πίεσης και του υδραυλικού ανοίγματος για προσομοίωση της υδραυλικής θραύσης ως ένα μόνο επίπεδο σε ένα συμπαγές και ομοιογενές πέτρωμα. Από τις προσομοιώσεις αυτές προέκυψε ότι, όσο αυξάνεται η τιμή του ρυθμού εισπίεσης, παρατηρείται σταδιακή μείωση της πίεσης στη γεώτρηση (Σχήμα 8.1). Σύμφωνα με το διάγραμμα του Σχήματος 8.2, για μεγαλύτερες τιμές ρυθμού εισπίεσης, προκαλείται μεγαλύτερο υδραυλικό άνοιγμα στη θέση της εισπίεσης. Επιπλέον, αυξάνοντας την τιμή του ρυθμού εισπίεσης, αυξάνεται και η απόσταση που διαδίδεται η υδραυλική θραύση (Σχήμα 8.3) και κατ' αντιστοιχία και η ταχύτητα διάδοσης της υδραυλικής θραύσης (Σχήμα 8.4).

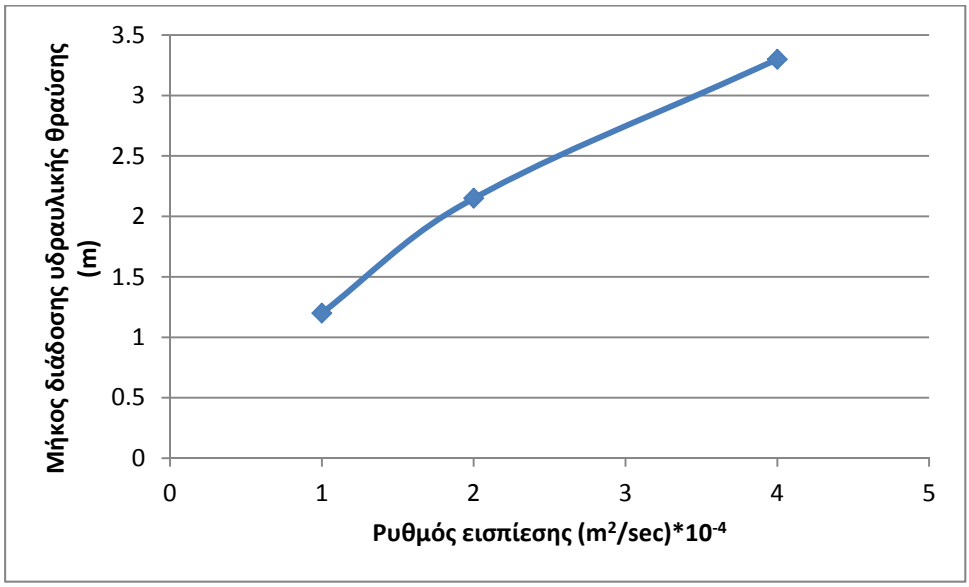
Μετά την ολοκλήρωση των αριθμητκών μοντέλων όπου μεταβάλοταν η τιμή του ρυθμού εισπίεσης, πραγματοποιήθηκαν δοκιμές για διαφορετικές τιμές αρχικού ανοίγματος της ρωγμής, ωστόσο δεν παρατηρήθηκε κάποια μεταβολή στις τιμές της πίεσης ή του υδραυλικού ανοίγματος σε σχέση με εκείνες του βασικού μοντέλου (για ρυθμό εισπίεσης $4*10^{-4}$ m^2/sec).



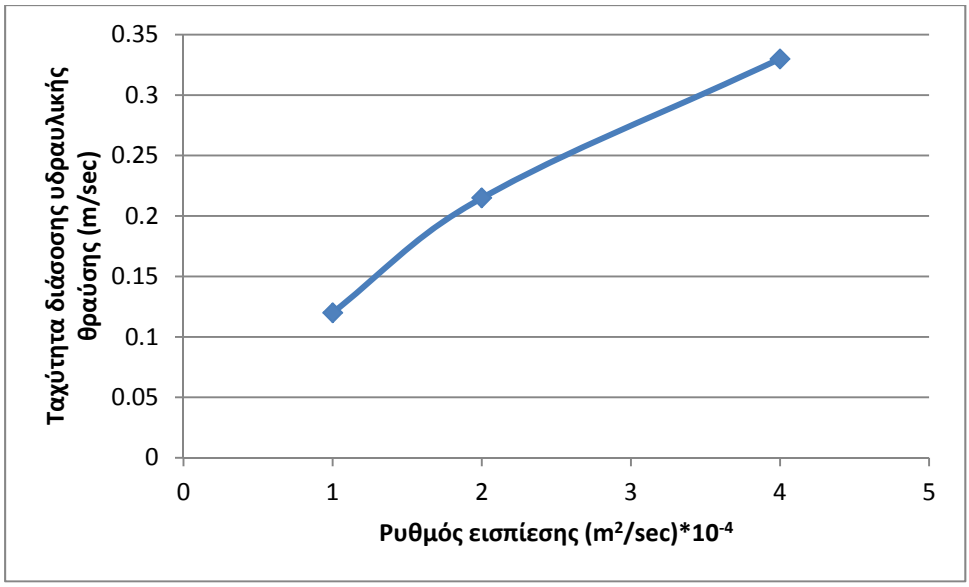
Σχήμα 8. 1 Διάγραμμα μεταβολής της πίεσης για διαφορετικές τιμές ρυθμού εισπίεσης



Σχήμα 8. 2 Διάγραμμα μεταβολής του υδραυλικού ανοίγματος για διαφορετικές τιμές ρυθμού εισπίεσης



Σχήμα 8. 3 Διάγραμμα μήκους διάδοσης της υδραυλικής θραύσης για διαφορετικές τιμές ρυθμού εισπίεσης



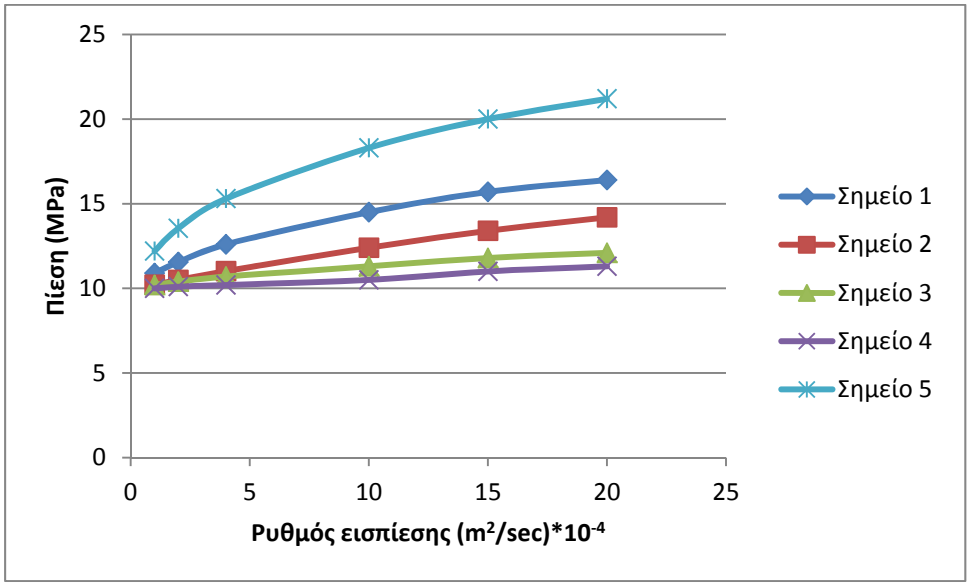
Σχήμα 8. 4 Διάγραμμα ταχύτητας διάδοσης της υδραυλικής θραύσης για διαφορετικές τιμές του ρυθμού εισπίεσης

Πίνακας 8.1. Αποτελέσματα αριθμητικών μοντέλων για διαφορετικές τιμές ρυθμού εισπίεσης

ρυθμός εισπίεσης (m^2/sec)	πίεση (Mpa)	Υδραυλικό άνοιγμα (μ)	μήκος διάδοσης (m)	ταχύτητα διάδοσης (m/sec)
0,0001	19	490	1,2	0,12
0,0002	17,8	570	2,15	0,215
0,0004	17,1	720	3,3	0,33

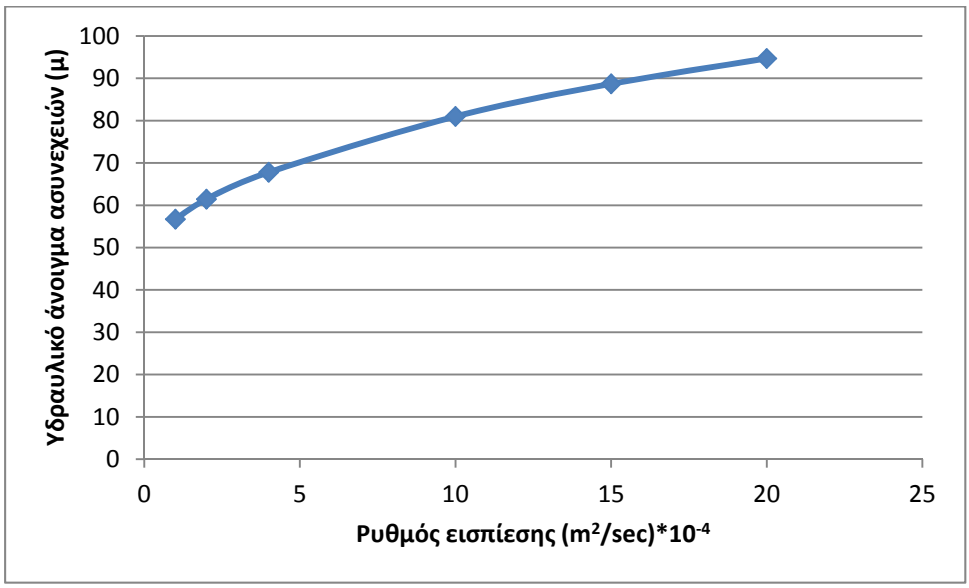
8.2 Προσομοίωση της ροής σε δίκτυο ασυνεχειών με αλγόριθμο ασυμπίεστης ροής

Στην συνέχεια, παρατίθενται τα αποτελέσματα για ασυμπίεστη ροή σε δίκτυο ασυνεχειών:



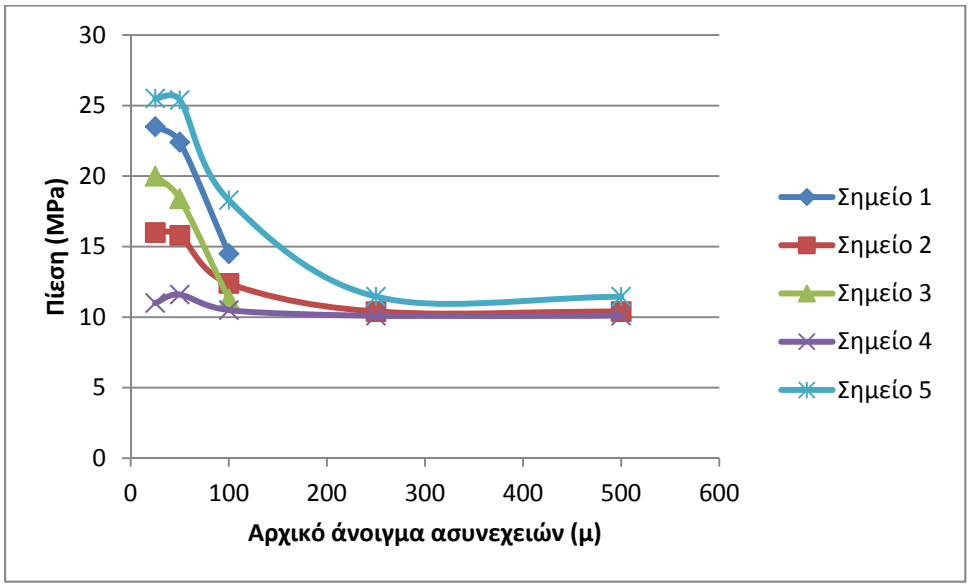
Σχήμα 8. 5 Διάγραμμα μεταβολής της πίεσης στα διαφορετικά σημεία του ταμιευτήρα για διαφορετικές τιμές ρυθμού εισπίεσης

Σύμφωνα με το διάγραμμα, με την αύξηση της τιμής του ρυθμού εισπίεσης, αυξάνεται και η τιμή της πίεσης. Αξίζει να υπενθυμιστεί ότι τα σημεία 1 και 3 βρίσκονται στην οριζόντια ρωγμή, τα σημεία 2 και 4 βρίσκονται στην κατακόρυφη και το σημείο 5 στην γεώτρηση.



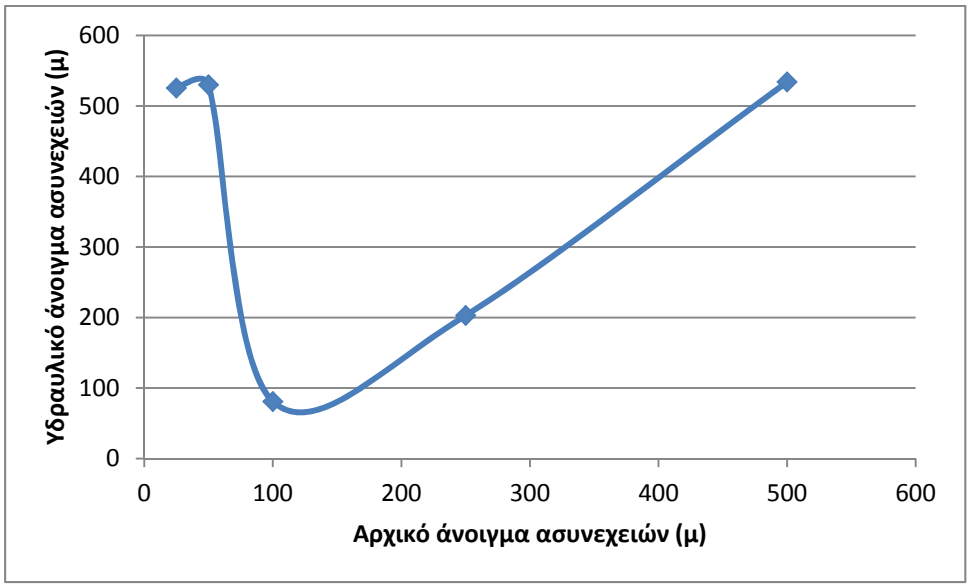
Σχήμα 8. 6 Διάγραμμα μεταβολής του υδραυλικού ανοίγματος στο σημείο της γεώτρησης για διαφορετικές τιμές ρυθμού εισπίεσης

Σύμφωνα με το διάγραμμα, με την αύξηση του ρυθμού εισπίεσης, αυξάνεται παράλληλα και το υδραυλικό άνοιγμα των ασυνεχειών.



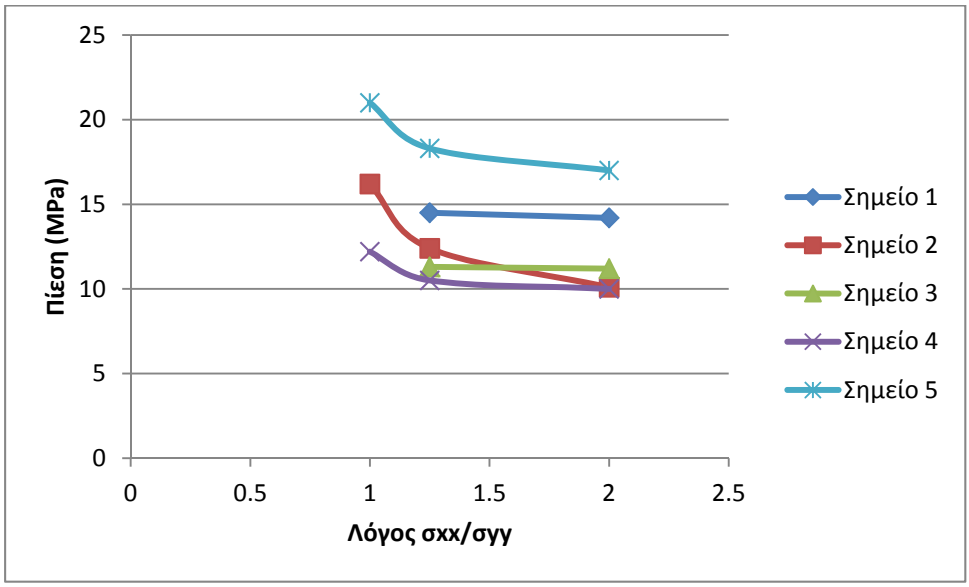
Σχήμα 8. 7 Διάγραμμα μεταβολής της πίεσης στα διαφορετικά σημεία του ταμιευτήρα για διαφορετικές τιμές αρχικού ανοίγματος ασυνεχειών

Από το διάγραμμα παρατηρείται μια μείωση της πίεσης για μεγαλύτερες τιμές αρχικού ανοίγματος ασυνεχειών



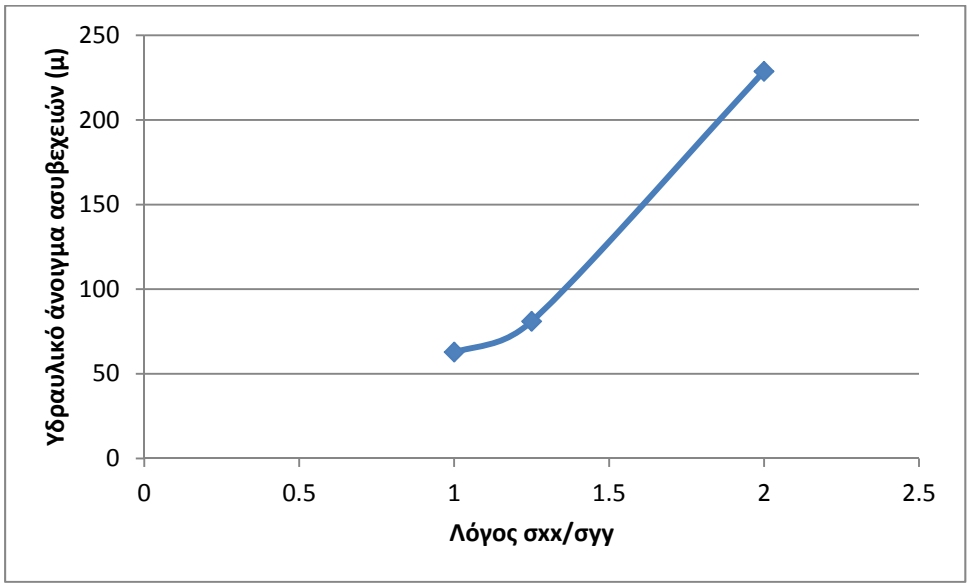
Σχήμα 8. 8 Διάγραμμα μεταβολής του υδραυλικού ανοίγματος στο σημείο της γεώτρησης για διαφορετικές τιμές αρχικού ανοίγματος ασυνεχειών

Σύμφωνα με το διάγραμμα, για μείωση ή αύξηση της τιμής του αρχικού ανοίγματος των ασυνεχειών, σε σχέση με την τιμή του βασικού μοντέλου (100μm), παρατηρείται αύξηση του υδραυλικού ανοίγματος των ασυνεχειών.



Σχήμα 8. 9 Διάγραμμα μεταβολής της πίεσης στα διαφορετικά σημεία του ταμιευτήρα για διαφορετικές τιμές του λόγου της μέγιστης προς την ελάχιστη κύρια οριζόντια τάση

Με την αύξηση του λόγου σxx/σyy, παρατηρείται μια σταδιακή μείωση της πίεσης



Σχήμα 8. 10 Διάγραμμα μεταβολής του υδραυλικού ανοίγματος στο σημείο της γεώτρησης για διαφορετικές τιμές του λόγου της μέγιστης προς την ελάχιστη κύρια οριζόντια τάση

Με την αύξηση του λόγου σxx/σyy, παρατηρείται μια αύξηση στις τιμές που προκύπτουν από την αύξηση του υδραυλικού ανοίγματος των ασυνεχειών

Πίνακας 8.2. Αποτελέσματα αριθμητικών πειραμάτων για ασυμπίεστη ροή (όπου δεν αναγράφεται τιμή, σημαίνει ότι βρίσκεται εκτός κλίμακας)

ρυθμός εισπίεσης (m2/sec)*10^{-4}	Πίεση (MPa) στο σημείο 1	πίεση (MPa) στο σημείο 2	πίεση (MPa) στο σημείο 3	πίεση (MPa) στο σημείο 4	πίεση (MPa) στο σημείο 5	υδραυλικό άνοιγμα (μm)
1	10,9	10,22	10,2	10	12,2	56,7
2	11,55	10,5	10,4	10,1	13,55	61,45
4	12,6	11,02	10,7	10,2	15,3	67,8
10	14,5	12,4	11,3	10,5	18,3	81
15	15,7	13,4	11,8	11	20	88,7
20	16,4	14,2	12,1	11,3	21,2	94,7
Αρχικό άνοιγμα ασυνεχειών (μm)						
25	23,5	16	20	11	25,5	525,5
50	22,4	15,8	18,4	11,6	25,4	530
100	14,5	12,4	11,3	10,5	18,3	81
250	-	10,4	-	10,1	11,45	203
500	-	10,4	-	10,1	11,45	534
Λόγος σxx/σyy						
2	14,2	10,1	11,2	10	17	228,7
1,25	14,5	12,4	11,3	10,5	18,3	81
1	-	16,2	-	12,2	21	62,8

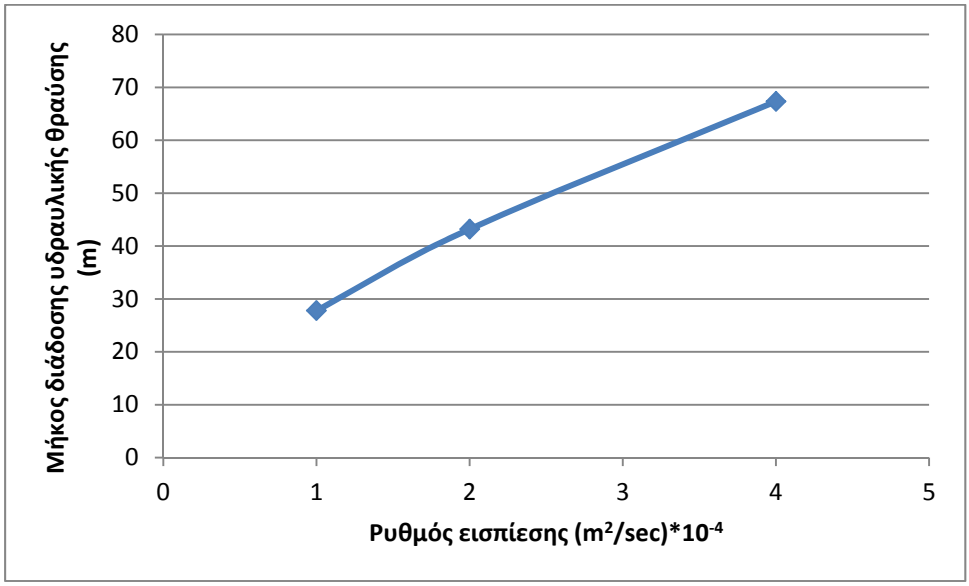
Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των αριθμητικών πειραμάτων για ασυμπίεστη ροή, με την αύξηση της τιμής του ρυθμού εισπίεσης, παρατηρείται και μια σταδιακή αύξηση της πίεσης και του υδραυλικού ανοίγματος στις ασυνέχειες.

Για διαφορετικές τιμές του αρχικού ανοίγματος ασυνεχειών, παρατηρείται μείωση της τιμής της πίεσης. Όσον αφορά το υδραυλικό άνοιγμα των ασυνεχειών, είτε για αύξηση είτε για μείωση της τιμής του βασικού μοντέλου, παρατηρείται σημαντική αύξηση στην τιμή του υδραυλικού ανοίγματος που προκύπτει. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι ορισμένες τιμές των μετρήσεων στα σημεία 1 κι 3 βρίσκονται εκτός κλίμακας.

Τέλος, με την μείωση του λογου μέγιστης προς ελάχιστης κύριας οριζόντιας τάσης, η πίεση αυξάνεται , ενώ το υδραυλικό άνοιγμα μειώνεται

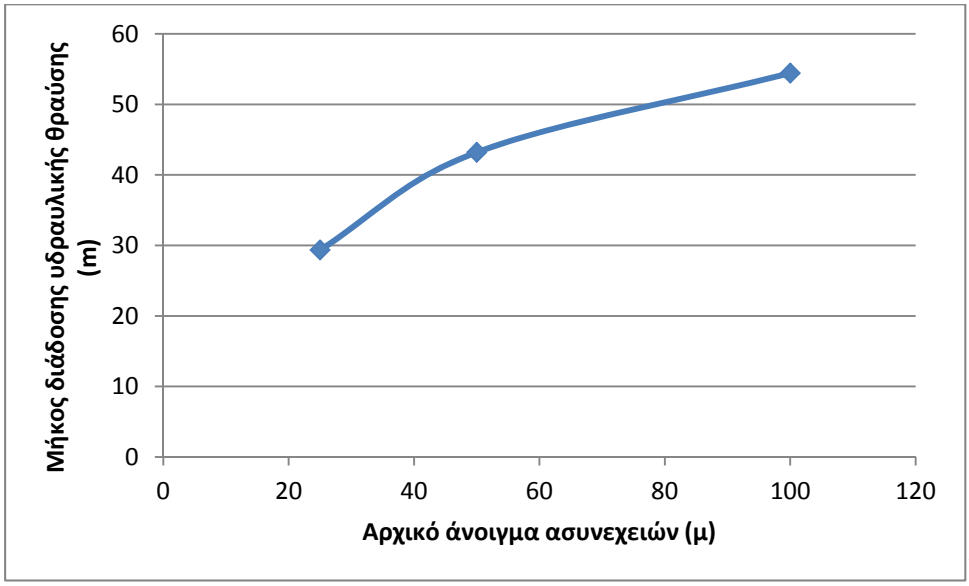
8.3 Προσομοίωση υδραυλικής θραύσης σε μοντέλο με ψηφίδωση Voronoi

Για το τέλος, παρατίθενται τα αποτελέσματα της τρίτης σειράς αριοθμητικών μοντέλων, όπου εφαρμόστηκε ο αλγόριθμος ασυμπίεστης ροής και η ψηφίδωση Voronoi.



Σχήμα 8. 11 Διάγραμμα μεταβολής του μήκους διάδοσης της ρωγμάτωσης για διαφορετικές τιμές ρυθμού εισπίεσης

Σύμφωνα με το διάγραμμα, αυξάνοντας τον ρυθμό εισπίεσης, αυξάνεται και το μήκος που διαδίδεται η υδραυλική θραύση



\

Σχήμα 8. 12 Διάγραμμα μεταβολής του μήκους διάδοσης της ρωγμάτωσης για διαφορετικές τιμές αρχικού ανοίγματος ασυνεχειών

Σύμφωνα με το διάγραμμα, το μήκος διάδοσης της υδραυλικής θραύσης αυξάνεται, με την παράλληλη αύξηση της τιμής του αρχικού ανοίγματος ασυνεχειών.

Πίνακας 7.3 Πίνακας αποτελεσμάτων αριθμητικών πειραμάτων για ασυμπίεστη ροή και ψηφίδωση Voronoi

	αριστερό τμήμα			δεξιό τμήμα				
Εντατικό πεδίο	μήκος ρωγμής (m)	μήκος ευθείας (m)	δείκτης ευθυγραμμίας	μήκος ρωγμής (m)	μήκος οριζόντιας ευθείας (m)	δείκτης ευθυγραμμίας	συνολικό μήκος ρωγμής (m)	Συνολικό μήκος οριζόντιας ευθείας (m)
ανισότροπο με λόγο 1.5/round2	26,6937	22,9500	1,1631	20,4659	17,0200	1,20246181	47,1596	39,9700
ανισότροπο με λόγο 2/round2	20,2763	17,4100	1,1646	20,5275	17,6500	1,163031161	40,8038	35,0600
ισότροπο/round2								
ανισότροπο με λόγο 1.5/round4	30,7779	25,5600	1,2041	21,0718	17,6400	1,194546485	51,8497	43,2000
ανισότροπο με λόγο 2/round4	6,5771	5,2010	1,2646	45,7934	40,0700	1,142835039	52,3705	45,2710
ισότροπο/round4	21,8971	17,5384	1,2485	27,8090	23,4261	1,187094736	49,7061	40,9645
Ρυθμός εισπίεσης m2/sec								
1*10-4	11,8942	9,6190	1,2365	22,4292	18,1700	1,234408365	34,3234	27,7890
2*10-4	30,7779	25,5600	1,2041	21,0718	17,6400	1,194546485	51,8497	43,2000
4*10-4	34,0631	27,7700	1,2266	46,7082	39,5700	1,180394238	80,7713	67,3400
Αρχικό άνοιγμα ασυνεχειών (μ)								
25	21,8679	17,9000	1,2217	13,4335	11,4500	1,173231441	35,3014	29,3500
50	30,7779	25,5600	1,2041	21,0718	17,6400	1,194546485	51,8497	43,2000
100	5,1166	4,4250	1,1563				55,1166	54,4250

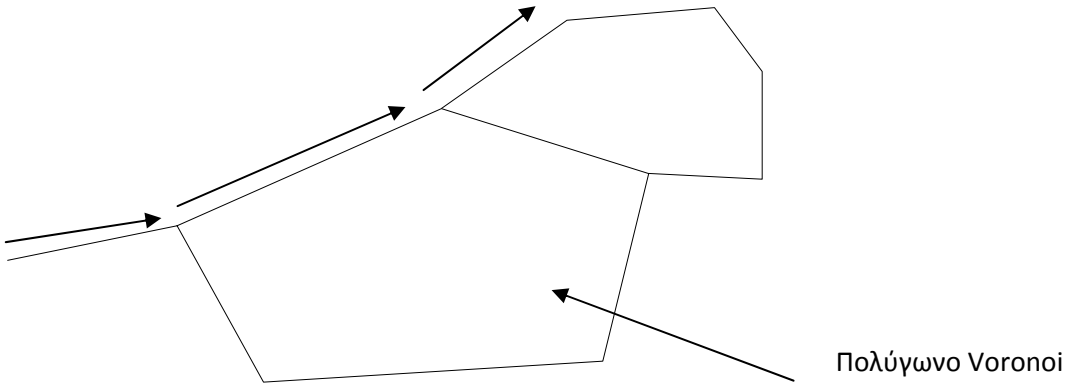
Σε γενικές γραμμές παρατηρείται ότι, με την αύξηση του ρυθμού εισπίεσης, αυξάνεται η τιμή της πίεσης και τα υδραυλικά ανοίγματα των ασυνεχειών. Για διαφορετικές τιμές αρχικού ανοίγματος των ασυνεχειών, παρουσιάζεται μια μεταβολή στις τιμές της πίεσης και του υδραυλικού ανοίγματος των ασυνεχειών. Το ίδιο παρατηρείται και για διαφορετικά είδη εντατικού πεδίου.

8.4 Συμπεράσματα

Ανακεφαλαιώνοντας, ο αλγόριθμος της συμπιεστής ροής, χρειάζεται ένα πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα για να προσομοιώσει το χρονικό βήμα ενός δευτερολέπτου εισπίεσης του ρευστού. Για την προσομοίωση ενός ικανοποιητικού χρονικου διαστήματος απαιτείται πολύ μεγάλος υπολογιστικός χρόνος. Για τον λόγο αυτό η εφαρμογή του συγκεκριμένου αλγόριθμου ενδείκνυται μόνο για προσομοιώσεις πολύ μικρής διάρκειας.

Για προσομοιώσεις μεγαλύτερης διάρκειας, προτιμάται ο αλγόριθμος ασυμπίεστης ροής. Στα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν παρατηρήθηκε σε γενικές γραμμές ότι με την αύξηση του ρυθμού εισπίεσης, αυξάνεται η τιμή της πίεσης και τα υδραυλικά ανοίγματα των ασυνεχειών. Για διαφορετικές τιμές αρχικού ανοίγματος των ασυνεχειών, παρουσιάζεται μια μεταβολή στις τιμές της πίεσης και του υδραυλικού ανοίγματος των ασυνεχειών. Το ίδιο παρατηρείται και για διαφορετικά είδη εντατικού πεδίου.

Για προσομοιώσεις ασυμπίεστης ροής και με την εφαρμογή της ψηφίδωσης Voronoi, γενικά η αύξηση του ρυθμού εισπίεσης και του αρχικού ανοίγματος ασυνεχειών, συμβάλει στην αύξηση του μήκους που διαδίδεται η υδραυλική θραύση. Όσον αφορά την απόκλιση της ρωγμής από την ευθυγραμμία, σημαντικό ρόλο παίζει η γεωμετρία του μοντέλου. Το ρευστό τείνει να ακολουθεί μια ευθεία πορεία, οπότε η διάταξη των block Voronoi επηρεάζει το πόσο θα αποκλίνει από την ευθυγραμμία, όπως φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 8. 13 Η πορεία που θα ακολουθήσει το ρευστό

Εντούτοις, αξίζει να αναφερθεί ότι, παρόλο που η θραύση καθοδηγείται από τη γεωμετρία των πολυγώνων Voronoi, το μέσο επίπεδο προσανατολισμού της υδραυλικής θραύσης αναπτύσσεται κάθετα στη διεύθυνση της ελάχιστης κύριας τάσης, όπως αναμένοταν, για την περίπτωση ανισότροπου εντατικού πεδίου, ενώ διαχέεται προς περισσότερες κατευθύνσεις, για την περίπτωση του ισότροπου εντατικού πεδίου. Εξάλλου, κατά την ανάπτυξη της υδραυλικής θραύσης, συχνά αναπτύσσονται διακλαδώσεις, μία εκ των οποίων κυριαρχεί και αναπτύσσεται σε μήκος μεγαλύτερο από το μήκος πλευράς ενός ή δύο block, ενώ οι άλλες σταματάνε να διαδίδονται.

Ευχαριστίες

Η δημιουργία της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας θα ήταν αδύνατη χωρίς την βοήθεια, καθοδήγηση και υποστήριξη κάποιων ανθρώπων, η προσφορά των οποίων ήταν καταλυτική στην εκτέλεση του μεγάλου όγκου αριθμητικών μοντέλων αλλά και στην συγγραφή της εργασίας. Για το λόγο αυτό νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω:

- Την κα Azadeh Riahi και τον κ. Branco Damjanac, μηχανικούς της εταιρείας Itasca Consulting Group, Inc, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγηση που προσέφεραν σε ζητήματα που αφορούσαν την κατασκευή των αριθμητικών μοντέλων
- Τον Dr F. DEDECKER της εταιρείας Itasca Consulting Group, Inc, για τις επεξηγήσεις του όποτε τις χρειαστήκαμε σχετικά με τις εντολές για προσομοίωση υδραυλικής ροής στο UDEC.
- Την οικογένειά μου, που με στήριξε με κάθε τρόπο, σε όλα τα χρόνια των σπουδών μου
- Και τέλος, θα ήθελα ιδιαίτερα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου κ. Παύλο Νομικό, για την αμέριστη βοήθεια του και συνεχή συμπαράσταση καθ’όλη τη διάρκεια της εκπόνησης.

9 Βιβλιογραφία

[1] RIAHI A., DAMJANAC B. (2013). Numerical study of interaction between hydraulic fracture and discrete fracture network. In: A.P. Bunger, J. McLennan, R. Jeffrey (Ed), Proc. Effective and Sustainable Hydraulic Fracturing, InTech pub.

[2] FJAR E., R.M. HOLT, A.M. RAAEN, R. RISNES, P. HORSRUD (2008). Petroleum Related Rock Mechanics, 2nd Edition, Elsevier.

[3] DUSSEAULT M.B. (2013). Geomechanical aspects of shale gas development. In: Kwaśniewski M., Łydżba D. (Ed), Eurock 2013: Rock Mechanics for Resources, Energy and Environment, CRC Press, pp 39–56.

[4] Itasca Co. (2012) Universal Distrinct Elements Code (UDEC): User's manual. Minneapolis, Minnesota, USA.

[5] E. ESEME, J.L. URAI, B.M. KROOSS,R LITTKE (2007). Review of mechanical properties of oil shales: implications for exploitation and basin modelling. Oil Shale, 24(2), pp. 159–174.

[6] U.S. Energy Information Administration