

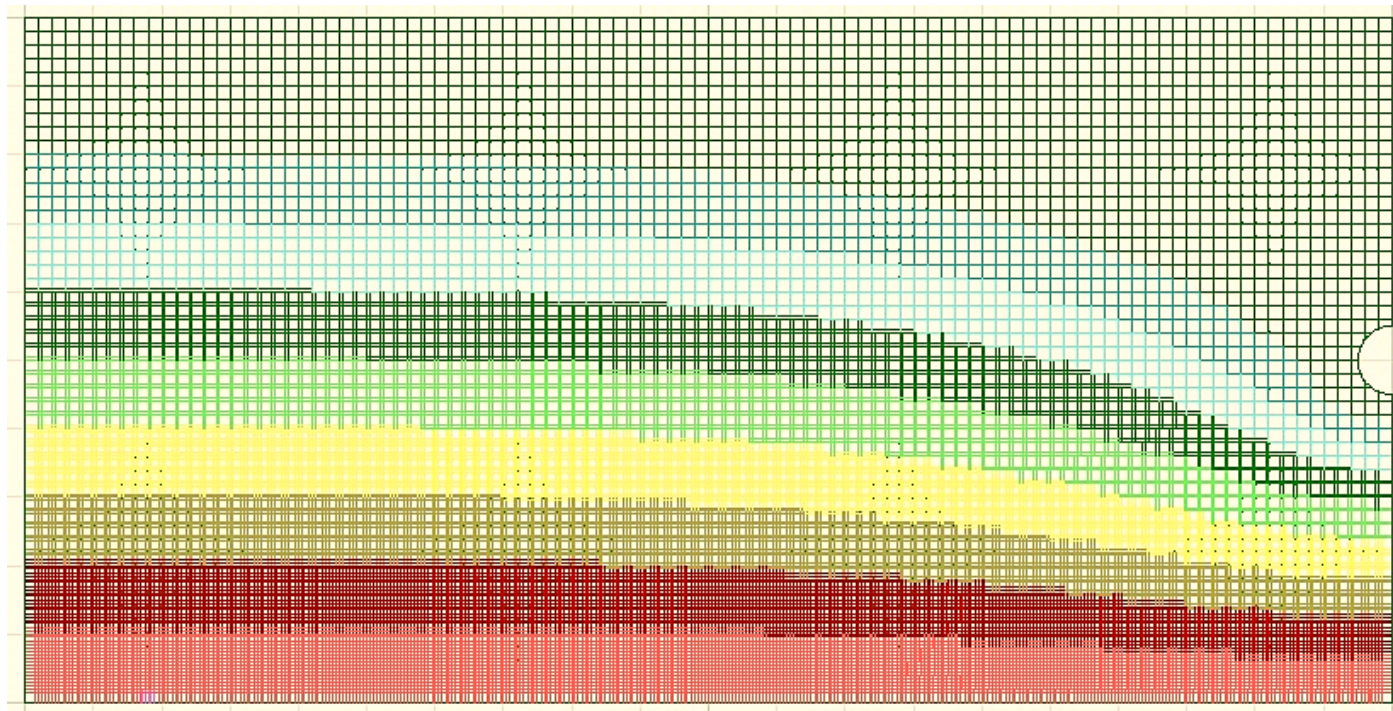


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ - ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΔΙΠΜΣ «ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ & ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΕΡΓΩΝ»

Συμμετέχουσες σχολές : Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών
Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Αριθμητική προσομοίωση σταθερής εισροής υπογείων υδάτων σε
σήραγγα σε ασυνεχή βραχομάζα με κώδικα διακριτών στοιχείων»



Πιταροκοίλης Ιωσήφ

Επιβλέπων Καθηγητής : Παύλος Νομικός
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούνιος 2016



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ - ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ
ΔΙΠΜΣ «ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ & ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΕΡΓΩΝ»

Συμμετέχουσες σχολές : Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών

Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Αριθμητική προσομοίωση σταθερής εισροής υπογείων υδάτων σε σήραγγα σε
ασυνεχή βραχώμαζα με κώδικα διακριτών στοιχείων»

Επιβλέπων : Παύλος Νομικός

Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή

Παύλος Νομικός, Επίκουρος Καθηγητής

Σοφιανός Αλέξανδρος, Καθηγητής

Λουπασάκης Κωνσταντίνος, Επίκουρος Καθηγητής

Copyright © Πιταροκοίλης Ιωσήφ, 2016

Με επιφύλαξη κάθε δικαιώματος. All rights reserved.

Πρόλογος

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία είναι το τελευταία βήμα για την ολοκλήρωση του μεταπτυχιακού προγράμματος σπουδών «Σχεδιασμός και κατασκευή υπογείων έργων» από το οποίο εξέρχομαι πολύ πιο πλούσιος σε γνώσεις και εμπειρίες.

Σκοπός της εργασίας είναι η αριθμητική προσομοίωση της εισροής υδάτων σε σήραγγα σε ασυνεχή βραχώμαζα με κώδικα διακριτών στοιχείων και πιο συγκεκριμένα με τη χρήση του αριθμητικού προγράμματος UDEC (Universal Distinct Elemental Code) της εταιρίας Itasca.

Με την ολοκλήρωση της μεταπτυχιακής μου διπλωματικής εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κύριο Παύλο Νομικό, Επίκουρο Καθηγητή ΕΜΠ για την ανάθεση του θέματος καθώς και για την καθοδήγηση του καθ' όλη την διάρκεια της εκπόνησης της μεταπτυχιακής εργασίας.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για τη συνεχή στήριξη που μου πρόσφερε καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω του φίλους και συναδέλφους Λεοντίτση Φοίβο, Σεραφή Αντρέα, Τσαντάκη Μανώλη, για τη βοήθεια και συμπαράσταση τους κατά τη διάρκεια των μεταπτυχιακών μου σπουδών και της εκπόνησης της μεταπτυχιακής μου εργασίας.

Περίληψη

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία γίνεται μια προσπάθεια, μέσω παραμετρικών αριθμητικών αναλύσεων με διδιάστατα διακριτά στοιχεία, υπολογισμού της σταθερής εισροής υπογείων υδάτων σε σήραγγα.

Στο θεωρητικό μέρος παρατίθενται στοιχεία που αφορούν την επίδραση που έχουν τα υπόγεια ύδατα στα υπόγεια έργα και κατ' επέκταση στις σήραγγες. Στη συνέχεια παρατίθενται οι τρόποι προσδιορισμού της περατότητας και της υδραυλικής αγωγιμότητας καθώς και οι αναλυτικοί τύποι προσδιορισμού της σταθερής εισροής υπογείων υδάτων σε σήραγγα.

Επιπλέον, γίνεται ανάλυση της μεθόδου των διακριτών στοιχείων και των διαφόρων αλγορίθμων που εφαρμόζονται στο UDEC για τη ροή του νερού δια μέσω των ασυνεχειών.

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

Στα πλαίσια της εργασίας πραγματοποιήθηκαν έξι σειρές παραμετρικών αναλύσεων. Εξετάστηκε η επίδραση διαφόρων παραμέτρων (όπως το άνοιγμα των ασυνεχειών, η απόσταση των ασυνεχειών κ.α.) στην σταθερή εισροή και έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν με αυτά των αναλυτικών τύπων.

Τέλος γίνεται μία εκτίμηση της επιβάρυνσης της υποστήριξης λόγω της επαναφοράς της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα στο σημείο που ήταν πριν από την εκσκαφή της σήραγγας.

Abstract

In this thesis an attempt is made in order to estimate the steady state flow into the tunnel through a two – dimensional numerical program based on the distinct element method for discontinuous modeling.

In the theoretical part elements are listed which are related to the effects that groundwater has on underground construction and thus in tunnels. Then the ways of defining the permeability and hydraulic conductivity of discontinuous rock mass are represented. Also analytic formulas for the tunnel inflow assessment are explained.

Additionally the distinct element method that is used via UDEC is analyzed

In the experimental part of this thesis the process of the manufacturing of the numerical models is described and the results for the parametric tests that have been carried out are presented.

For the purposes of this thesis six parametric analysis were completed. For steady state inflow into a tunnel, the influence of various parameters was examined (such as the aperture of discontinuities, the distance of discontinuities etc.). Then the results of the parametric analysis were compared to those of analytic formulas.

Finally an estimation took place of the extra loads that the support has to burden due to of the restore of the groundwater table at the point where it was before of the excavation of the tunnel.

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα	7
Ευρετήριο Εικόνων	9
Ευρετήριο Πινάκων.....	12
Κεφάλαιο 1 - Εισαγωγή.....	13
1.1 Εισαγωγή.....	14
1.2 Το Νερό	14
1.3 Υδρολογικός κύκλος.....	14
1.4 Γεωλογικοί σχηματισμοί και υπόγεια νερά.....	16
1.4.1 Υπόγεια Νερά και Σήραγγες	17
1.4.2 Μέτρα προστασίας – αντιμετώπισης	21
1.4.3 Καρστικά Έγκοιλα.....	24
Κεφάλαιο 2 - Περαιότητα και υδραυλική αγωγιμότητα σε βραχώδεις σχηματισμούς	27
2.1 Ροή νερού (seepage).....	28
2.2 Υδραυλικές ιδιότητες της βραχομάζας.....	29
2.2.1 Περαιότητα σε βραχώδεις σχηματισμούς	29
2.2.2 Υπολογισμός της υδραυλικής αγωγιμότητας της βραχομάζας	31
2.3 Αναλυτικές εξισώσεις υπολογισμού εισροής υδάτων σε σήραγγες	42
2.4 Επαναπροσδιορισμός των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τους αναλυτικούς τύπους με τη βοήθεια εμπειρικών σχέσεων.....	45
Κεφάλαιο 3 - Το Πρόγραμμα UDEC	48
3.1 Εισαγωγικά στοιχεία για το UDEC	49
3.2 Η μέθοδος των διακριτών στοιχείων.....	50
3.3 Εξισώσεις κίνησης.....	52
3.3.1 Διατήρηση της ορμής και της ενέργειας στην μαθηματική διατύπωση της μεθόδου των διακριτών στοιχείων.	55
3.4 Αναπαράσταση των ασυνεχειών στον κώδικα UDEC.....	56
3.4.1 Μηχανική συμπεριφορά των ασυνεχειών.	62
3.5 Παραμορφωσιμότητα των ογκοτεμαχίων.....	64
3.6 Δημιουργία δικτύου ασυνεχειών	68
3.7 Προσομοίωση της ροής μέσω ασυνεχειών στον κώδικα UDEC.....	70
3.8 Συμπιεστή ροή	72

3.9	Ασυμπίεστη ροή.....	78
Κεφάλαιο 4 Αριθμητικά μοντέλα με τη χρήση του προγράμματος UDEC		82
4.1	Γενικές παραδοχές.....	83
4.2	Προετοιμασία των αριθμητικών μοντέλων.....	84
4.3	Πρώτη σειρά αριθμητικών μοντέλων για εισροή υδάτων σε σήραγγα.....	90
4.3.1	Ύψος υδροφόρου ορίζοντα στην επιφάνεια του εδάφους.....	90
4.3.2	Ύψος υδροφόρου ορίζοντα 20 m κάτω από την επιφάνεια του εδάφους.....	98
4.3.3	Σύγκριση αποτελεσμάτων πρώτης σειράς αριθμητικών προσομοιωμάτων.....	102
4.4	Δεύτερη σειρά αριθμητικών μοντέλων για εισροή υδάτων σε σήραγγα.....	102
4.4.1	Συντελεστής πλευρικών πιέσεων $K = 1$	103
4.4.2	Συντελεστής πλευρικών πιέσεων $K = 0,5$	104
4.4.3	Συντελεστής πλευρικών πιέσεων $K = 2$	107
4.5	Τρίτη σειρά αριθμητικών μοντέλων για εισροή υδάτων σε σήραγγα.....	113
4.6	Τέταρτη σειρά αριθμητικών μοντέλων για εισροή υδάτων σε σήραγγα.....	116
4.7	Πέμπτη σειρά αριθμητικών μοντέλων για εισροή υδάτων σε σήραγγα.....	121
4.8	Έκτη σειρά αριθμητικών μοντέλων για εισροή υδάτων σε σήραγγα.....	126
4.8.1	Πρώτη περίπτωση ασυνεχούς οριζόντιου συνόλου.....	127
4.8.2	Δεύτερη περίπτωση ασυνεχούς κατακόρυφου συνόλου.....	130
4.9	Επιβάρυνση της υποστήριξης λόγω επαναφοράς του υδροφόρου ορίζοντα.....	133
Κεφάλαιο 5 – Συμπεράσματα.....		140
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....		143

Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 1-1 Υδρολογικός κύκλος.....	15
Εικόνα 1-2 α) Αστάθεια μετώπου, β) Αστοχία οροφής, γ) Υποβάθμιση υδροφόρου ορίζοντα, δ) Αυξημένες πιέσεις σε διατμημένη ζώνη, ε) Ανάπτυξη θλιπτικών πιέσεων στη μόνιμη υποστήριξη, ζ) Ανύψωση πυθμένα. (G. Anagnostou 2006).....	18
Εικόνα 1-3 Εισροή υδάτων σε σήραγγα υπό κατασκευή (Μαρίνος 2009).....	19
Εικόνα 1-4 Βελτίωση δυσμενούς υπεδαφικής ζώνης στη Σουηδία με το πάγωμα των κεκορεσμένων χαλαρών υλικών	21
Εικόνα 1-5 Τελική επένδυση σήραγγας (Σοφιανός 2007)	22
Εικόνα 1-6 Τοποθετημένη πλαστική μεμβράνη στην οδική σήραγγα Τεμπών.....	23
Εικόνα 1-7 Fantastic Pit, Georgia, Usa. Καρστικό βάθους 190m. (National Geographic).....	24
Εικόνα 1-8 Καρστικό που συναντήθηκε στη σήραγγα της Γκιώνας (τρόπος αντιμετώπισης: γεφύρωση) (Μαρίνος 2009).....	26
Εικόνα 1-9 Καρστικό που συναντήθηκε στη σήραγγα της Γκιώνας (τρόπος αντιμετώπισης: παράκαμψη) (Μαρίνος 2009).....	26
Εικόνα 2-1 Δίκτυο ροής σε βραχομάζα (Π. Μαρίνος 1991).....	28
Εικόνα 2-2 Αρχές δοκιμής Lefranc (Κ. Παπαθεοδώρου, 2001)	33
Εικόνα 2-3 Αρχές δοκιμής Maag (Κ. Παπαθεοδώρου, 2001)	34
Εικόνα 2-4 Συντελεστής F για διάφορες περιπτώσεις προσδιορισμού περατότητας (Hoek - Bray, 1981), (δ): διάγραμμα δοκιμής κατερχόμενου φορτίου, (ε) : διάγραμμα δοκιμής ανερχόμενου φορτίου.....	35
Εικόνα 2-5 Σκαρίφημα διαδικασίας εκτέλεσης δοκιμών Lugeon α. απλό packer β. διπλό packer	36
Εικόνα 2-6 Επίδραση ανοίγματος και συχνότητας των διακλάσεων στο συντελεστή υδραυλικής αγωγιμότητας (κ) κατά τη διεύθυνση μια οικογένειας λείων, παράλληλων διακλάσεων σε βραχομάζα (Hoek & Bray, 1981).....	40
Εικόνα 2-7 Δύο οικογένειες ασυνεχειών με ίδια απόσταση αλλά διαφορετικό άνοιγμα	42
Εικόνα 2-8 Σύγκριση παροχών εισροής για διάφορες τιμές της διεύθυνσης κλίσης των ασυνεχειών UDEC - Goodman.(Gattinoni, 2009)).....	47
Εικόνα 3-1 Σειρά Υπολογισμών στη μέθοδο των διακριτών στοιχείων.	51
Εικόνα 3-2 Κεντρικό διαφορικό σχήμα που χρησιμοποιείται στη μέθοδο των διακριτών στοιχείων.....	53
Εικόνα 3-3 Αναπαράσταση επαφών μεταξύ δύο άκαμπτων ογκοτεμαχίων.....	57
Εικόνα 3-4 Σρογγύλευση γωνιών στο κώδικα UDEC	58
Εικόνα 3-5	59
Εικόνα 3-6	60
Εικόνα 3-7 Σημεία επαφής και περιοχές μεταξύ παραμορφώσιμων ογκοτεμαχίων.....	61
Εικόνα 3-8 Μοντέλο διατμητικής ολίσθησης των ασυνεχειών στο UDEC	64
Εικόνα 3-9 Εικόνα Βραχομάζας με άκαμπτα και παραμορφώσιμα ογκοτεμάχια.	66
Εικόνα 3-10 Βασικές παράμετροι για την απεικόνιση των ασυνεχειών στο UDEC	69
Εικόνα 3-11 Προσομοίωση ροής μέσω ασυνέχειας.....	73
Εικόνα 3-12 Σχέση ροής - κλίσης για νευτώνιο υγρό στο πρόγραμμα UDEC.....	75
Εικόνα 3-13 Συσχέτιση μεταξύ υδραυλικού ανοίγματος α και joint normal stress σ_n στο πρόγραμμα UDEC.	76

Εικόνα 3-14 Ακραία περίπτωση όπου η ταχύτητα διάδωσης εξαρτάται από την ακαμψία του συστήματος.....	80
Εικόνα 4-1 Δημιουργία Block μέσω του γραφικού περιβάλλοντος του UDEC	84
Εικόνα 4-2 Διακριτοποίηση του μοντέλου σε ζώνες πεπερασμένων διαφορών.....	85
Εικόνα 4-3 Εισαγωγή των μηχανικών ιδιοτήτων της βραχώμαζας	86
Εικόνα 4-4 Εισαγωγή των μηχανικών ιδιοτήτων των ασυνεχειών.....	87
Εικόνα 4-5 Διαστάσεις ζωνών που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της δυστροπίας	88
Εικόνα 4-6 Γεωμετρικό μοντέλο με ύψος υδροφόρου ορίζοντα στην επιφάνεια του εδάφους.....	91
Εικόνα 4-7 Μοντέλο με ύψος υδροφόρου ορίζοντα στην επιφάνεια του εδάφους μετά την εκσκαφή της σήραγγας.	92
Εικόνα 4-8 Διανύσματα μετακίνησης μετά τη διάνοιξη της σήραγγας.....	93
Εικόνα 4-9 Σημεία παρατήρησης εισροής νερού στη σήραγγα.	93
Εικόνα 4-10 Διανύσματα ροής υπογείων υδάτων	94
Εικόνα 4-11 Πίεση πόρων μετά την εκσκαφή της σήραγγας.	95
Εικόνα 4-12 Αποτελέσματα σταθερής ροής με ύψος υδροφόρου στην επιφάνεια του εδάφους.....	95
Εικόνα 4-13 Αποτελέσματα σταθερής ροής με ύψος υδροφόρου 20 m κάτω από την επιφάνεια του εδάφους.....	99
Εικόνα 4-14 Πίεση πόρων μετά την εκσκαφή της σήραγγας.	100
Εικόνα 4-15 Διανύσματα ροής υπόγειων υδάτων	101
Εικόνα 4-16 Αποτελέσματα σταθερής ροής για $K=0,5$	105
Εικόνα 4-17 Πίεση πόρων μετά την εκσκαφή της σήραγγας για $K=0,5$	106
Εικόνα 4-18 Διανύσματα ροής υπόγειων υδάτων για $K = 0,5$	107
Εικόνα 4-19 Αποτελέσματα σταθερής ροής για $K=2$	108
Εικόνα 4-20 Πίεση πόρων μετά την εκσκαφή της σήραγγας για $K=2$	109
Εικόνα 4-21 Διανύσματα ροής υπόγειων υδάτων για $K = 2$	110
Εικόνα 4-22 Σημεία μέτρησης πίεσης πόρων μετά την εκσκαφή της σήραγγας.	111
Εικόνα 4-23 Αποτελέσματα σταθερής ροής για $a = 2\text{mm}$	114
Εικόνα 4-24 Πίεση πόρων μετά την εκσκαφή της σήραγγας για $a = 2\text{mm}$	115
Εικόνα 4-25 Διανύσματα ροής υπόγειων υδάτων για $s = 2\text{m}$	117
Εικόνα 4-26 Σημεία παρατήρησης προσομοιώματος για απόσταση ασυνεχειών 2 m.	118
Εικόνα 4-27 Πίεση πόρων μετά την εκσκαφή της σήραγγας για $s = 2\text{m}$	119
Εικόνα 4-28 Αποτελέσματα σταθερής ροής για $s = 2\text{m}$	119
Εικόνα 4-29 Γεωμετρικό μοντέλο με κλίση ασυνεχειών 45 – 135.	122
Εικόνα 4-30 Πίεση πόρων μετά την εκσκαφή για το μοντέλο της πέμπτης σειράς.....	123
Εικόνα 4-31 Διανύσματα ροής υπογείου νερού για το προσομοίωμα της πέμπτης σειράς	124
Εικόνα 4-32 Αποτελέσματα εισροής για το προσομοίωμα της πέμπτης σειράς	125
Εικόνα 4-33 Προσομοίωμα με οριζόντιο ασυνεχές σύνολο.....	127
Εικόνα 4-34 Αποτελέσματα προσομοιώματος για ασυνεχές οριζόντιο σύνολο.....	128
Εικόνα 4-35 Πίεση πόρων για ασυνεχές οριζόντιο σύνολο.....	128
Εικόνα 4-36 Διανύσματα ροής για ασυνεχές οριζόντιο σύνολο.	129
Εικόνα 4-37 Αναλυτικά αποτελέσματα για ασυνεχές οριζόντιο σύνολο	129
Εικόνα 4-38 Προσομοίωμα με κατακόρυφο ασυνεχές σύνολο.	130

Εικόνα 4-39 Αποτελέσματα εισροής για ασυνεχές κατακόρυφο σύνολο.....	131
Εικόνα 4-40 Πίεση πόρων για ασυνεχές κατακόρυφο σύνολο.	131
Εικόνα 4-41 Διανύσματα ροής για ασυνεχές κατακόρυφο σύνολο.....	132
Εικόνα 4-42 Πτώση Υδροφόρου ορίζοντα λόγω διάνοιξης σήραγγας	133
Εικόνα 4-43 Επαναφορά υδροφόρου ορίζοντα λόγω στεγανοποίησης της σήραγγας.	133
Εικόνα 4-44 Ορθές τάσεις ασκούμενες στην υποστήριξη με τον υδροφόρο ορίζοντα υποβαθμισμένο.134	
Εικόνα 4-45 Ορθές τάσεις ασκούμενες στην υποστήριξη μετά την επαναφορά του υδροφόρου ορίζοντα.	135
Εικόνα 4-46 Καμπτικές ροπές που ασκούνται στην υποστήριξη με τον υδροφόρο ορίζοντα υποβαθμισμένο	136
Εικόνα 4-47 Καμπτικές ροπές που ασκούνται στην υποστήριξη μετά την επαναφορά του υδροφόρου ορίζοντα.	137
Εικόνα 4-48 Καμπτικές ροπές με τον υδροφόρο ορίζοντα υποβαθμισμένο.	138
Εικόνα 4-49 Καμπτικές ροπές μετά την επαναφορά του Υδροφόρου.....	139

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 2-1 Hoek and Bray, 1981.....	30
Πίνακας 2-2 Κατηγορίες Υδροπερατότητας με βάση το συντελεστή k	37
Πίνακας 2-3 Κύμανση του συντελεστή περατότητας σε (cm/sec) για διάφορες κατηγορίες γεωλογικών σχηματισμών.....	38
Πίνακας 2-4 Φυσικές ιδιότητες νερού σε μονάδες S.I.	39
Πίνακας 2-5 Αναλυτικές εξισώσεις για την εισροή υδάτων σε σήραγγα (<i>Gattinoni, 2009</i>).	44
Πίνακας 4-1 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά μοντέλου	83
Πίνακας 4-2 Μηχανικές ιδιότητες βραχομάζας και ασυνεχειών	83
Πίνακας 4-3 Αποτελέσματα εισροής υδάτων για ύψος υδροφόρου στην επιφάνεια του εδάφους.	96
Πίνακας 4-4 Αποτελέσματα εισροής υδάτων για ύψος υδροφόρου 20 m κάτω από την επιφάνεια του εδάφους.....	99
Πίνακας 4-5 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα εισροής υδάτων για την πρώτη σειρά αριθμητικών μοντέλων	102
Πίνακας 4-6 Αποτελέσματα εισροής υδάτων για συντελεστή πλευρικών τάσεων $K = 1$	104
Πίνακας 4-7 Αποτελέσματα εισροής υδάτων για συντελεστή πλευρικών τάσεων $K = 0,5$	105
Πίνακας 4-8 Αποτελέσματα εισροής υδάτων για συντελεστή πλευρικών πιέσεων $K = 2$	108
Πίνακας 4-9 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα εισροής υδάτων για τη δεύτερη σειρά αριθμητικών μοντέλων.....	110
Πίνακας 4-10 Αποτελέσματα εισροής υδάτων στη σήραγγα για αρχικό άνοιγμα ασυνεχειών δύο χιλιοστών	114
Πίνακας 4-11 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα εισροής υδάτων για την τρίτη σειρά αριθμητικών μοντέλων	114
Πίνακας 4-12 Αποτελέσματα εισροής υδάτων στη σήραγγα για $s = 2$	120
Πίνακας 4-13 Αποτελέσματα εισροής υδάτων που προκύπτουν από τα σημεία παρατήρησης.	125
Πίνακας 4-14 Αποτελέσματα εισροής υδάτων για ασυνεχές κατακόρυφο σύνολο.....	132

Κεφάλαιο 1 - Εισαγωγή

1.1 Εισαγωγή

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία έχει ως αντικείμενο τη μελέτη της σταθερής εισροής του υπογείου νερού που εισέρχεται σε σήραγγες μέσω των ασυνεχειών της βραχώμαζας.

Οι ασυνέχειες που εξετάζονται θεωρείται ότι δεν είναι πληρωμένες με κάποιο υλικό πλήρωσης και επιτρέπουν ελεύθερα τη ροή του υπογείου νερού. Η ροή η οποία εξετάζεται είναι σταθερή ροή (steady state flow) η οποία αντιστοιχεί στη ροή μετά την υποβάθμιση του υδροφόρου ορίζοντα λόγω της διάνοιξης της σήραγγας.

Η εκτίμηση της εισροής έγινε μέσω των αριθμητικών αναλύσεων και συγκεκριμένα με τη βοήθεια του προγράμματος UDEC (Universal Distinct Elemental Code) της Itasca. Στη συνέχεια θα γίνουν αλλαγές σε διάφορες παραμέτρους με σκοπό την εκτίμηση της επιρροής των παραμέτρων αυτών στην εισροή των υπογείων υδάτων στη σήραγγα.

1.2 Το Νερό

Το νερό είναι ένας από τους πιο θεμελιώδεις παράγοντες της ύπαρξης και διατήρησης των ζωντανών οργανισμών στη γη, και η μεγαλύτερη διαθέσιμη αποθήκη του φρέσκου νερού βρίσκεται στους υδροφορείς κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Αυτό το υπόγειο νερό αντλούμενο στην επιφάνεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί αμέσως για τις διάφορες ανάγκες των ανθρώπων, των ζώων και των φυτών. Τα υπόγεια ύδατα συγχρόνως αποτελούν «εχθρό» για τις υπόγειες κατασκευές και κατά επέκταση τις σήραγγες.

Τα υπόγεια ύδατα προκαλούν δυσμενείς συνθήκες τόσο κατά τη φάση κατασκευής όσο και κατά τη φάση λειτουργίας. Σε γενικές γραμμές, κατά τη φάση κατασκευής η εισροή υδάτων δυσκολεύει τις εργασίες και στη φάση λειτουργίας η υδροστατική πίεση ασκεί πρόσθετα φορτία στην τελική επένδυση της σήραγγας. Εκτενέστερη αναφορά στα προβλήματα που συνοδεύει η παρουσία του νερού στη διάνοιξη και λειτουργία σηράγγων γίνεται παρακάτω στο παρών κεφάλαιο.

1.3 Υδρολογικός κύκλος

Το φρέσκο νερό δεν είναι ορυκτό, σαν το πετρέλαιο, που η κατανάλωση του σημαίνει αποσύνθεση και καταστροφή και τα αποθέματά του εξαντλούνται χωρίς τη δυνατότητα δημιουργίας νέων κοιτασμάτων.

Αντίθετα όταν το νερό χρησιμοποιείται για γεωργικές ή οικιακές και βιομηχανικές ανάγκες μπορεί η ποιότητά του να χειροτερέψει ή και η κατάσταση του να αλλάξει (υδρατμοί), οπωσδήποτε όμως

εξακολουθεί να παραμένει νερό. Το πιο σπουδαίο είναι ότι το νερό που χρησιμοποιήθηκε μπορεί να ξαναγίνει φρέσκο από την ίδια τη φύση είτε με τη διαδικασία της εξάτμισης – συμπύκνωσης – βροχής ή με τη διήθηση στο έδαφος και εμπλουτισμό υδροφόρων στρωμάτων.

Γενικά το νερό της γης, είτε βρίσκεται σαν υδατμοί στην ατμόσφαιρα είτε σαν επιφανειακό νερό στους ποταμούς, στις λίμνες, στις θάλασσες και στους ωκεανούς ή και στα υδροφόρα στρώματα, δεν παραμένει σε ακινησία, αλλά παίρνει μέρος σε μια συνεχή κυκλοφοριακή κίνηση που είναι γνωστή στην υδρογεωλογία σαν *υδρογεωλογικός κύκλος*. Στο παρακάτω σχήμα επεξηγείται σχηματικά ο υδρογεωλογικός κύκλος του νερού της γης.



Εικόνα 1-1 Υδρολογικός κύκλος

Το νερό που σχηματίζεται από τη συμπύκνωση των υδατμών στην ατμόσφαιρα πέφτει στη γη σαν βροχή, χαλάζι ή χιόνι. Ένα μέρος εξατμίζεται στη διάρκεια της πτώσης του. Ένα άλλο μέρος εξατμίζεται από την υγρή επιφάνεια της γης, σχεδόν αμέσως μετά την πτώση του και όσο διάστημα αυτή είναι υγρή. Από το υπόλοιπο, ένα μέρος διηθείται κάτω από την επιφάνεια της γης και ένα άλλο μέρος που περισσεύει μετά από το γέμισμα διαφόρων ανωμαλιών της επιφάνειας της γης, απορρέει επιφανειακά προς τα ρέματα, τους ποταμούς και τις λίμνες για να καταλήξει τελικά στις θάλασσες και στους ωκεανούς ενώ ταυτόχρονα εξατμίζεται από την ελεύθερη επιφάνεια και διηθείται από τον πυθμένα, αν και όποιοι συνθήκες το επιτρέπουν. Από το νερό που διηθήθηκε κάτω από την επιφάνεια της γης, ένα μέρος

χρησιμοποιείται από τα φυτά και τελικά επανέρχεται στην ατμόσφαιρα με την διαπνοή ή την ξήρανση και αποσύνθεση τους, ένα άλλο μέρος επανέρχεται στην επιφάνεια με την τριχοειδή κίνηση και εξατμίζεται και το υπόλοιπο διηθείται βαθύτερα και προστίθεται στα αποθέματα του υπόγειου νερού. Αυτό το υπόγειο νερό δεν παραμένει στάσιμο αλλά κινείται μέσα από τους πόρους του εδάφους σε μία κατεύθυνση από το ψηλότερο προς το χαμηλότερο δυναμικό. Αργά η γρήγορα ένα μέρος επανέρχεται μόνο του στην επιφάνεια της γης είτε σαν επιφανειακή πηγή και είναι ορατό ή σαν υποβρύχια πηγή στις κοίτες των ποταμών, λιμνών και θαλασσών και είναι αόρατο. Ένα άλλο μέρος επανέρχεται στην επιφάνεια με τεχνητά μέσα (άντληση, υδρομάστευση). Οι ποσότητες αυτές του υπόγειου νερού είτε ανακυκλώνονται με την εξάτμιση – συμπύκνωση – βροχόπτωση – διήθηση ή καταλήγουν τελικά στους ωκεανούς με επιφανειακή απορροή, από όπου ξαναρχίζουν τον υδρολογικό κύκλο με την εξάτμιση. Φυσικά ένα μεγάλο μέρος των υπόγειων νερών καταλήγει κατευθείαν στους ωκεανούς, όπου η εξάτμιση τα επαναφέρει στην ατμόσφαιρα και κλείνουν ή επαναρχίζουν τον υδρολογικό τους κύκλο (Γ.Α Τερζίδης και Δ.Ν. Καραμούζης 2001).

1.4 Γεωλογικοί σχηματισμοί και υπόγεια νερά

Τα υπόγεια νερά βρίσκονται αποθηκευμένα μέσα στους πόρους και στα κενά των εδαφών και των γεωλογικών σχηματισμών σε διάφορα βάθη από την επιφάνεια της γης. Ανάλογα με την ύπαρξη ή όχι διαφοράς δυναμικού ανάμεσα σε δύο θέσεις, στο χώρο που υπάρχουν τα υπόγεια νερά, αυτά κινούνται στην κατεύθυνση του μικρότερου δυναμικού με ταχύτητα που είναι ανάλογη της διαφοράς δυναμικού και της διαπερατότητας του πορώδους μέσου.

Ένας γεωλογικός σχηματισμός λέγεται υδροφόρο στρώμα ή υδροφορέας, όταν περιέχει στους πόρους και στα κενά του μεγάλη ποσότητα υπογείου νερού, που μπορεί να μετακινηθεί εύκολα. Τα καλά υδροφόρα στρώματα αποτελούνται συνήθως από αλλουβιακές αποθέσεις άμμων και χαλικιών.

Ένας γεωλογικός σχηματισμός λέγεται αδιαπέρατο ή υδατοστεγές στρώμα, όταν περιέχει στους πόρους του υπόγειο νερό που δεν μπορεί να μετακινηθεί εύκολα σε σημαντική ποσότητα, λόγω της πολύ μικρής διαπερατότητας του. Τα αδιαπέρατα στρώματα αποτελούνται συνήθως από αργιλικές αποθέσεις που περιορίζουν ή απομονώνουν γειτονικά υδροφόρα στρώματα.

Ένα γεωλογικός σχηματισμός λέγεται άνυδρο στρώμα, όταν δεν περιέχει και ούτε επιτρέπει τη μετακίνηση υπογείου νερού. Γεωλογικοί σχηματισμοί από συμπαγή γρανίτη ανήκουν σε αυτή την κατηγορία.

Στην τελευταία κατηγορία αξίζει να σημειωθεί ότι πρόκειται για άρρηκτη βραχομάζα. Διότι σε περίπτωση ρωγματωμένης, το νερό κινείται μέσω των ασυνεχειών, το οποίο πραγματεύεται και η παρούσα διπλωματική εργασία.

1.4.1 Υπόγεια Νερά και Σήραγγες

Το νερό μπορεί να βρεθεί σχεδόν σε όλους τους βραχώδεις σχηματισμούς σε σχετικά μικρό βάθος από την επιφάνεια της γης. Οι ασυνέχειες της βραχομάζα, ακόμα και όταν έχουν μικρό σχετικά άνοιγμα, επιτρέπουν τη ροή του νερού. Όσο, μεγαλύτερο είναι το άνοιγμα των ασυνεχειών τόσο, περισσότερο νερό μπορεί να εισέλθει μέσα σε υπόγειες κατασκευές, όπως οι σήραγγες. Αυτό συμβαίνει διότι η πίεση στο εσωτερικό της σήραγγας είναι ουσιαστικά ατμοσφαιρική με αποτέλεσμα η σήραγγα να συμπεριφέρεται αποστραγγιστικά.

Τα υπόγεια νερά είναι κύρια πηγή προβλημάτων στην κατασκευή σηράγγων τα οποία σχετίζονται με θέματα ευστάθειας και ασφάλειας. Η διαχείριση των υπογείων υδάτων τόσο κατά τη φάση της κατασκευής όσο και κατά τη φάση της λειτουργίας αποτελεί πρόκληση για τους εκάστοτε σχεδιαστές και κατασκευαστές του έργου. Η ξαφνική και μη αναμενόμενη εισροή υδάτων μπορεί να προκαλέσει βλάβες στην κατασκευή καθώς και απώλειες σε ανθρώπινες ζωές. Το νερό μπορεί να επηρεάσει την σταθερότητα του μετώπου και της οροφής. Αν το έδαφος στο οποίο γίνεται η εκσκαφή είναι μαλακό και επιρρεπές στη διάβρωση τότε ο κίνδυνος είναι ακόμα μεγαλύτερος.

Η εισροή υδάτων από τον περιβάλλον υδροφόρο ορίζοντα σε υπόγεια κατασκευή μπορεί επίσης να επιδράσει και στις υπέργειες κατασκευές εφ' όσον το υπόγειο έργο βρίσκεται σε μικρό σχετικά βάθος.

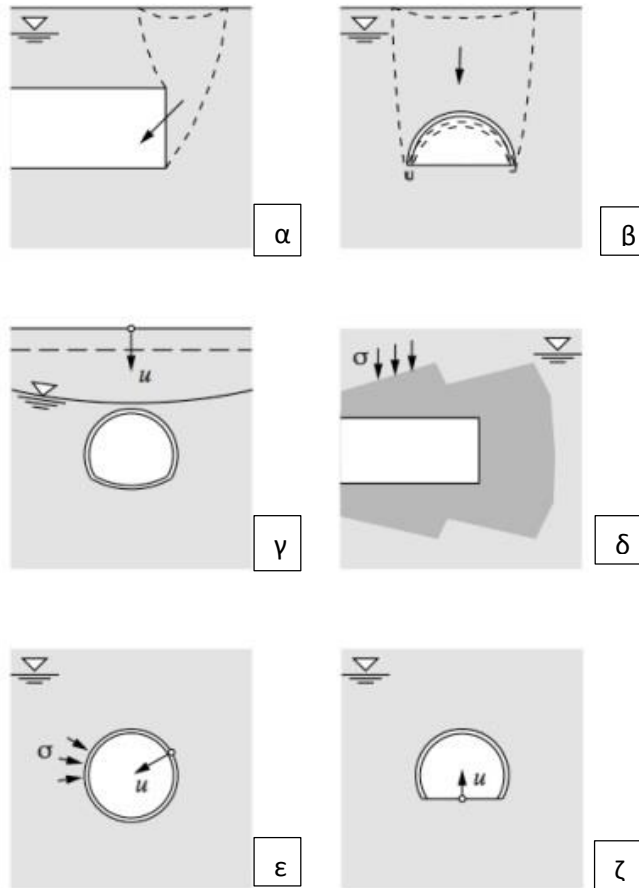
Η σχέση όμως των υπόγειων έργων με το νερό είναι αμφίδρομη. Σήραγγες λειτουργούν ως αποστραγγιστικές και υποβαθμίζουν υδροφόρους ορίζοντες. Επίσης, διαρροές από τις υπόγειες κατασκευές προς τον υδροφόρο ορίζοντα είναι δυνατές, με αποτέλεσμα τη μόλυνση των υπογείων υδάτων.

Όπως γίνεται αντιληπτό, η κατανόηση των υδρογεωλογικών συνθηκών σε μια υπόγεια κατασκευή είναι πολύ σημαντική, τόσο για την ασφαλή κατασκευή και λειτουργία του όσο και για το περιβάλλον αυτού.

Η αλληλεπίδραση των σηράγγων και των μεταλλευτικών στοών με τα υπόγεια ύδατα συνοψίζεται παρακάτω (Μαρίνος, 2001):

➤ **Φάση κατασκευής :**

- Η εισροή υδάτων στον υπόγειο χώρο, ασκεί επίδραση στις σύνηθες κατασκευαστικές διαδικασίες και πιθανόν στην σταθερότητα του μετώπου και της οροφής.
- Ξαφνικές εισροές οι οποίες σχετίζονται με συγκεκριμένα και τοπικά γεωλογικά χαρακτηριστικά, π.χ. ρήγματα, τεκτονισμένες ζώνες, καρστικά ανοίγματα.
- Η υποβάθμιση του υδροφόρου ορίζοντα συνεπάγεται την αύξηση των ενεργών τάσεων το οποίο σε συνδυασμό με γεωλογικό μοντέλο συμπιεστών λεπτομερών εδαφών ή έντονα διατμημένης βραχομάζας, δημιουργεί πρόκληση καθιζήσεων για τις επιφανειακές κατασκευές.
- Προσωρινή μόλυνση των υπογείων υδάτων από κατασκευαστικά υλικά τα οποία εκρέουν από τη σήραγγα.
- Πτώση της απόδοσης των πηγών.



Εικόνα 1-2 α) Αστάθεια μετώπου, β) Αστοχία οροφής, γ) Υποβάθμιση υδροφόρου ορίζοντα, δ) Αυξημένες πιέσεις σε διατμημένη ζώνη, ε) Ανάπτυξη θλιπτικών πιέσεων στη μόνιμη υποστήριξη, ζ) Ανύψωση πυθμένα. (G. Anagnostou 2006)

➤ **Φάση λειτουργίας :**

- Η διείσδυση υγρών ρύπων από σιδηροδρομική ή οδική σήραγγα επηρεάζει την ποιότητα των υπογείων υδάτων εφόσον οι σήραγγες βρίσκονται στην μη κορεσμένη ζώνη.
- Σε αβαθείς σήραγγες εφόσον αυτές βρίσκονται κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα προκύπτει ανύψωση της στάθμης αυτού με αποτέλεσμα υπό ορισμένες συνθήκες να προκαλέσει βλάβες σε υπέργειες κατασκευές (αστικές περιοχές) αλλά και δυσμενή επίδραση στο ριζικό σύστημα της βλάστησης (αγροτικές περιοχές).
- Η επιρροή της υδροστατικής πίεσης στην τελική επένδυση της σήραγγας.
- Πιθανότητα αστοχίας ανυποστήρικτης υδραυλικής σήραγγας, λόγω αυξομειώσεων της υδραυλικής πίεσης.



Εικόνα 1-3 Εισροή υδάτων σε σήραγγα υπό κατασκευή (Μαρίνος 2009)

Όπως έχει αποδειχθεί από τα εργοτάξια των σιδηροδρόμων η παρουσία των υπόγειων νερών δημιουργεί συχνά τις πιο σοβαρές δυσκολίες τόσο εξαιτίας των κινδύνων για απότομη και απρόβλεπτη εισροή μεγάλων ποσοτήτων νερού, όσο και από την υποβάθμιση της ποιότητας της βραχομάζας, αλλά και ακόμη και για τα προβλήματα αντλήσεων, τα οποία καμιά φορά μπορεί να είναι ανυπέρβλητα.

Για τους λόγους αυτούς επιβάλλεται:

- Να μην αρχίσει η εξόρυξη της σήραγγας πριν γίνει η συλλογή του μεγαλύτερου δυνατού αριθμού πληροφοριών για την κατά το δυνατόν καλύτερη γνώση των υπόγειων νερών (προέλευση, τροφοδοσία, παροχές, ταχύτητα ροής, διακυμάνσεις στάθμης, διεύθυνση ροής, ποιότητα).

- Αν το προφίλ της σήραγγας δεν επιτρέπει την απορροή των υπόγειων νερών δια της βαρύτητας (π.χ. πέρασμα σήραγγας κάτω από ποτάμι ή θάλασσα), θα πρέπει να προβλεφθούν οι κατάλληλες κλίσεις του δαπέδου της, ώστε τα νερά να συγκεντρώνονται στα σημεία εξόδων και από εκεί να αντλούνται.

Σε περιπτώσεις που η διερεύνηση δεν έχει επιτρέψει μια πλήρη και σαφή πρόβλεψη των πιθανών κινδύνων από υπόγεια νερά ή δεν έχει με βεβαιότητα εντοπίσει τις αμφίβολες ζώνες, θα πρέπει να γίνεται κατά τη διάρκεια της κατασκευής διερεύνηση του τμήματος που βρίσκεται πίσω από το μέτωπο εξορύξεως με γεωτρήσεις οδηγούς. Αυτή η πρακτική συνιστάται ιδιαίτερα στις βαθιές σήραγγες, γιατί σε αυτές τα υπόγεια νερά βρίσκονται υπό πιέσεις μεγάλες. Σημειώνεται επίσης, ότι σε τέτοιες σήραγγες η παρουσία των θερμών νερών δεν μπορεί γενικά να αποκαλυφθεί έγκαιρα παρά με αυτή την μέθοδο. Το μειονέκτημα αυτής της μεθόδου, πέρα από το κόστος της, είναι η ανάγκη της διακοπής των κύριων εργασιών εκσκαφής της σήραγγας για την εκτέλεση των γεωτρήσεων.

Πέρα από τα παραπάνω, για την ασφάλεια του έργου, πρέπει να γίνεται με μεγάλη επιμέλεια η απογραφή των σημείων ανάβλυσης υπόγειων νερών μέσα στη σήραγγα, κατά τη διάρκεια της κατασκευής. Η απογραφή αυτή θα περιλαμβάνει τη θέση, την παροχή, την πίεση, τη θερμοκρασία, τη χημική σύσταση, κ.λ.π. Μερικές από αυτές τις πληροφορίες μπορεί να επιτρέψουν τον προσδιορισμό της προελεύσεως των υπόγειων νερών, πράγμα που μπορεί να οδηγήσει στην επινόηση του τρόπου παρεμπόδισης της εισροής μέσα στη σήραγγα. Η υδροχημική μελέτη, ακόμα και αν δεν βοηθήσει στον εντοπισμό των ζωνών αυτών, μπορεί να δώσει πληροφορίες για τη δραστικότητα τους και τις επιδράσεις που πιθανόν να έχουν στη μόνιμη επένδυση. Στις περιπτώσεις που οι παροχές είναι μικρές δημιουργούνται μεγάλες δυσκολίες παρά μόνο όταν η σήραγγα πρέπει να περάσει μέσα από πετρώματα είτε θρυμματισμένα ή έντονα διερρηγμένα, είτε πορώδη (μαλακά, ή μη), οπότε υπάρχει ο κίνδυνος τα υλικά αυτά, και βρισκόμενα κάτω από τη στάθμη των υπόγειων νερών, να μεταπέσουν σε ρέοντα. Για τη βελτίωση τέτοιων συνθηκών χρησιμοποιούνται διάφορες μέθοδοι, η κάθε μία από τις οποίες εφαρμόζεται υπό ορισμένες συνθήκες. Δεν μπορεί να εφαρμοστεί π.χ. η μέθοδος τσιμεντενέσεων σε πολύ λεπτόκοκκα υλικά και η μέθοδος του πεπιεσμένου αέρα για βάθος σήραγγας μεγαλύτερο από 30μ κάτω από την υδροστατική στάθμη. Οι μέθοδοι βελτιώσεως των δυσμενών υπεδαφικών ζωνών είναι (Μαρίνος, 1997) :

- Υποβιβασμός της υδροστατικής στάθμης με αποστράγγιση ή άντληση

- Στερεοποίηση και στεγανοποίηση με τσιμεντενέσεις
- Πεπιεσμένος αέρας σε ρέοντα υλικά
- Το πάγωμα των κεκορεσμένων χαλαρών υλικών (κατάψυξη).

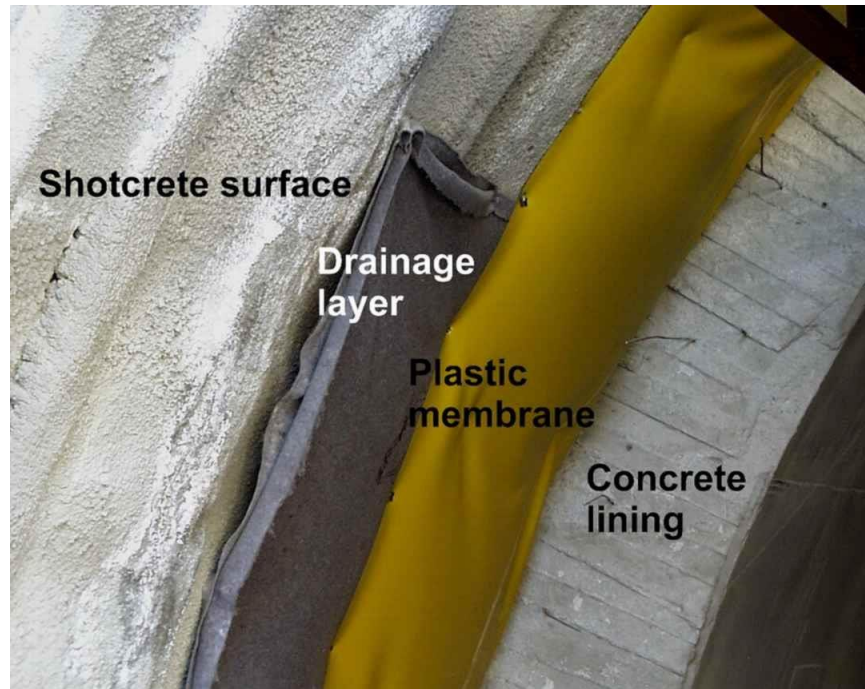


Εικόνα 1-4 Βελτίωση δυσμενούς υπεδάφικης ζώνης στη Σουηδία με το πάγωμα των κεκορεσμένων χαλαρών υλικών

1.4.2 Μέτρα προστασίας – αντιμετώπισης

Όπως προαναφέρθηκε οι σήραγγες όταν βρίσκονται κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα λειτουργούν αποστραγγιστικά. Υπάρχουν περιπτώσεις όμως που το νερό έχει «παγιδευτεί» σε μία αδιαπέρατη ζώνη και δεν εισέρχεται με σταθερή ροή μέσα στη σήραγγα, το οποίο εγκυμονεί κινδύνους. Σε αυτές τις περιπτώσεις γίνονται γεωτρήσεις στο μέτωπο με σκοπό να ανιχνευτούν οι κίνδυνοι αυτοί το συντομότερο δυνατό. Στην παρακάτω εικόνα (Εικ.1-5) παρουσιάζεται η τελική επένδυση με σκοπό τη στεγάνωση της σήραγγας. Από αριστερά προς τα δεξιά διακρίνονται :

- Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα
- Αποστραγγιστικό στρώμα γεωυφάσματος
- Πλαστική μεμβράνη
- Σκυρόδεμα τελικής επένδυσης



Εικόνα 1-5 Τελική επένδυση σήραγγας (Σοφιανός 2007)

Η αδιαπέρατη πλαστική μεμβράνη οδηγεί το νερό σε αποστραγγιστικά δίκτυα στη βάση της σήραγγας το οποίο συνήθως απομακρύνεται βαρυτικά αν υπάρχει αυτή η δυνατότητα. Αυτό το σύστημα λειτουργεί τις περισσότερες φορές ικανοποιητικά οπότε η επένδυση του σκυροδέματος σχεδιάζεται υποθέτοντας ότι δεν θα δέχεται επιπλέον εξωτερικές πιέσεις λόγω του νερού. Υπάρχουν όμως περιπτώσεις στις οποίες η άντληση δεν επιτρέπεται και ο υδροφόρος ορίζοντας θα πρέπει να επανέλθει στο ύψος που ήταν πριν την κατασκευή της σήραγγας. Σε αυτές τις περιπτώσεις η τελική επένδυση από σκυρόδεμα σχεδιάζεται με σκοπό να αναλάβει και τις πιέσεις που ασκούνται λόγω του νερού.



Εικόνα 1-6 Τοποθετημένη πλαστική μεμβράνη στην οδική σήραγγα Τεμπών.

Σε υδραυλικές σήραγγες μπορεί να θεωρηθεί επιτρεπτή η επένδυση που αφήνει εισροές. Σε περιοχές με πολύ υψηλές εξωτερικές πιέσεις που οφείλονται λόγω της παρουσίας νερού στην τελική επένδυση διανοίγονται τρύπες με σκοπό τη μείωση των πιέσεων αυτών. Το παραπάνω εφαρμόζεται μόνον όταν η εσωτερική πίεση είναι μικρότερη της εξωτερικής καθώς επίσης και όταν η ποιότητα των εξωτερικών υδάτων που εισρέουν είναι αποδεκτή.

Επίσης, στις σήραγγες συνηθίζεται για τη μείωση των πιέσεων το άνοιγμα οπών . Οι οπές αυτές (αποστραγγιστικές – ανακουφιστικές) , με την εισροή των υδάτων εντός της σήραγγας, αποσκοπούν στη μείωση του υδραυλικού φορτίου που καλείται να αναλάβει η υποστήριξη, ύδατα τα οποία όμως δυσκολεύουν τις εργασίες. Το νερό αυτό συγκεντρώνεται σε φρεάτια και από εκεί αντλείται και απομακρύνεται εκτός του έργου.

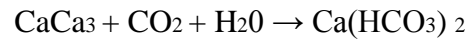
Όμως σε περιπτώσεις που η εισροή υδάτων είναι μεγάλη όπως στην εικόνα 1- 3 η διαχείριση του όγκου του νερού είναι πολύ δυσκολότερη . Πρέπει να είναι επαρκής η άντληση των υδάτων ώστε να μπορούν να συνεχιστούν οι εργασίες. Το πρόβλημα αυτό γίνεται μεγαλύτερο όταν η θερμοκρασία των υδάτων είναι υψηλή λόγω γεωθερμικής δραστηριότητας, τότε η άντληση πρέπει να γίνει το συντομότερο δυνατό με σκοπό τη μείωση της υγρασίας στο μέτωπο εργασιών.

1.4.3 Καρστικά Έγκοιλα

Παρόλο που τα ασβεστολιθικά και τα περισσότερα ανθρακικά πετρώματα παρουσιάζουν καλή γεωτεχνική συμπεριφορά, όταν καρστικοποιούνται ενδέχεται να προκαλέσουν κινδύνους στην κατασκευή σηράγγων, κίνδυνοι που μπορούν να εξελιχθούν σε μεγάλα προβλήματα.

Με τον όρο καρστ (προέρχεται από την ομώνυμη περιοχή των Δαλματικών Άλπεων στη Κροατία και Σλοβενία) περιγράφονται συνοπτικά όλες οι διεργασίες και οι δομές, που συνδέονται με τη χημική αποσάθρωση - διάλυση συγκεκριμένων πετρωμάτων από το νερό. Αρχικά, ο όρος αυτός αναφερόταν στα ανθρακικά πετρώματα (ασβεστόλιθους, δολομίτες και μάρμαρα), στη συνέχεια καθιερώθηκε και για τα θειούχα (γύψους και ανυδρίτες) και τέλος περιέλαβε και τα αλατούχα ιζήματα (ορυκτό άλας).

Ο χημικός τύπος της καρστικοποίησης είναι :



Εικόνα 1-7 Fantastic Pit, Georgia, Usa. Καρστικό βόθρου 190m. (National Geographic)

Αποτέλεσμα των διεργασιών της καρστικοποίησης είναι η δημιουργία επιφανειακών και υπόγειων εγκοίλων (κενών) δομών. Οι κενές αυτές δομές μπορεί να έχουν εντελώς διαφορετικό σχήμα (από κυκλικό μέχρι γραμμικό), μέγεθος, βάθος (από την επιφάνεια του εδάφους μέχρι δεκάδες μέτρα).

Σύμφωνα με τον Μαρίνο (2005) οι ιδιαιτερότητες των καρστικών σχηματισμών συνοψίζονται παρακάτω :

- Υψηλός συντελεστής διήθησης (κατεΐσδυσης)
- Πολύ υψηλή περατότητα. Μη γραμμική υπόγεια ροή.
- Διατήρηση των υψηλών τιμών περατότητας σε μεγάλα βάθη.
- Δυνατότητα ανάπτυξης υδρογεωλογικών λεκανών.
- Ανάπτυξη ακανόνιστου, ετερογενούς δικτύου αγωγών υπόγειας ροής. Προνομιακοί καρστικοί αγωγοί και σωλήνες μεταφέρουν νερό με υψηλές παροχές και αποστραγγίζουν την περιβάλλουσα βραχώμαζα μικρότερης περατότητας.
- Ροή με πλημμυρικούς χαρακτήρες στη ζώνη μεταβίβασης (ακόρεστη).
- Δυνατότητα να διατηρηθούν μεγάλες καρστικές σπηλαιώσεις πληρωμένες με φερτό εδαφικό υλικό.

Οι συνήθεις τρόποι αντιμετώπισης στη διάνοιξη σηράγγων για τα καρστικά είναι :

- Γεφυρώσεις
- Πλήρωση με λιθογόμωση ή με σκυρόδεμα
- Αλλαγή χάραξης – παράκαμψη

Τα δύο καρστικά τα οποία συναντήθηκαν στη διάνοιξη της υδραυλικής σήραγγας της Γκιώνας (1971 – 1975) καθώς και οι τρόποι αντιμετώπισης τους παρουσιάζονται στις παρακάτω εικόνες.



Εικόνα 1-8 Καρστικό που συναντήθηκε στη σήραγγα της Γκιώνας (τρόπος αντιμετώπισης: γεφύρωση) (Μαρίνος 2009).



Εικόνα 1-9 Καρστικό που συναντήθηκε στη σήραγγα της Γκιώνας (τρόπος αντιμετώπισης: παράκαμψη) (Μαρίνος 2009).

Η κατασκευή σήραγγας σε καρστικούς σχηματισμούς απαιτεί την πολύ καλή υδρογεωλογική γνώση της ευρύτερης περιοχής. Οι διατρήσεις προπορείας στο μέτωπο, με βάση τη γνώση του υδρογεωλογικού μοντέλου, αποτελούν ένα βασικό εργαλείο έρευνας για :

- Τις συνθήκες του υπόγειου νερού ως προς την πίεση και τις παροχές του
- Την παρουσία κενών σπηλαιών

Κεφάλαιο 2 - Περαιτότητα και υδραυλική αγωγιμότητα σε βραχώδεις σχηματισμούς

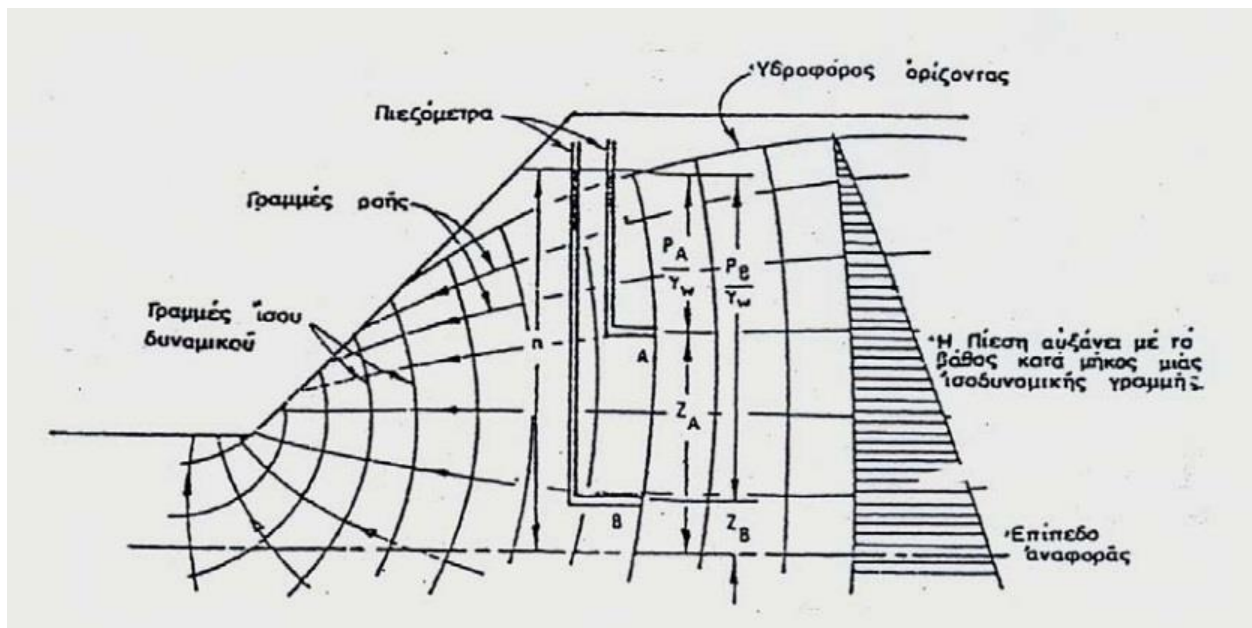
2.1 Ροή νερού (seepage)

Η περατότητα της βραχομάζας οφείλεται κυρίως στις διακλάσεις. Οι ασυνέχειες ανάλογα με το νερό που κυκλοφορεί και σύμφωνα με απλές περιγραφές μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε (Δ. Ρόζος, 2007) :

- Στεγνές (dry)
- Σε υγρή κατάσταση (Damp)
- Σε πολύ υγρή κατάσταση (Wet)
- Ροή στάγδην (Dripping)
- Συνεχής ροή (Flowing)

Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται με την τελευταία κατηγορία (flowing).

Η κίνηση του νερού μέσα στα συστήματα των ασυνεχειών εξαρτάται εκτός από την πυκνότητα και το άνοιγμά τους και από την υδραυλική τους σύνδεση. Έτσι το νερό μπορεί να σχηματίσει ένα κλειστό δίκτυο ροής ή να σχηματίσει ξεχωριστούς ανεξάρτητους υδροφόρους ορίζοντες.



Εικόνα 2-1 Δίκτυο ροής σε βραχομάζα (Π. Μαρίνος 1991)

Η απεικόνιση της υπόγειας ροής ονομάζεται δίκτυο ροής. Στην εικόνα 2-1 παρουσιάζεται ένα δίκτυο ροής στο εσωτερικό ενός πρσανούς. Οι γραμμές ροής είναι η διαδρομή που ακολουθεί το νερό κατά τη ροή του μέσα στη μάζα του πετρώματος, ενώ οι γραμμές ίσου δυναμικού είναι οι γραμμές που ενώνουν τα σημεία όπου το συνολικό φορτίο της υπόγειας ροής έχει την ίδια τιμή. (Μαρίνος 1991)

2.2 Υδραυλικές ιδιότητες της βραχομάζας

Ανάμεσα στο υπόγειο νερό της βραχομάζας και στην ίδια τη βραχομάζα αναπτύσσεται μια αμοιβαία εναλλασσόμενη επίδραση. Το νερό μέσα από τις φυσικές και χημικές ιδιότητες επηρεάζει τη μηχανική συμπεριφορά της βραχομάζας. Αντίστοιχα οι διάφορες ρηξιγενείς δομές που χαρακτηρίζουν τη βραχομάζα επηρεάζουν την κίνηση, την αποθήκευση και την κατανομή του νερού μέσα σε αυτήν. Το νερό που βρίσκεται μέσα στη βραχομάζα διακρίνεται σε (Μαρίνος 1991) :

- **Νερό διακλάσεων και ρωγμών.** Βρίσκεται και κινείται με μικρές ή μεγάλες ταχύτητες στις ανοιχτές ασυνέχειες της βραχομάζας. Σχηματίζει συνήθως φρεάτιους υδροφόρους οριζοντες ενιαίους ή διαχωριζόμενους, που εκφορτίζονται στις ανοιχτές επιφάνειες με τη μορφή πηγών (συνεχής ροής), σταγόνων και εφιδρώσεων. Επηρεάζει τη μηχανική συμπεριφορά της βραχομάζας με την εκδήλωση υδροστατικών πιέσεων μέσα σε αυτήν.
- **Καρστικό νερό.** Παρουσιάζεται σε καρστικούς ανθρακικούς σχηματισμούς και κινείται με μεγάλες σχετικά ταχύτητες μέσα στους ανοιχτούς καρστικούς αγωγούς της βραχομάζας. Εκδηλώνεται στην ελεύθερη επιφάνεια με τη μορφή καρστικών πηγών, που συνήθως παρουσιάζουν μεγάλες παροχές.

2.2.1 Περαιτότητα σε βραχώδεις σχηματισμούς

Η γνώση της διαπερατότητας του εδάφους είναι αναγκαία προκειμένου να αντιμετωπιστούν προβλήματα :

- εισροών νερού μέσα σε εκσκαφές (π.χ. σήραγγες, στοές μεταλλείων - ορυχείων, εκσκαφές θεμελιώσεων, ανοικτές εκσκαφές μεταλλείων)
- διαρροών κάτω από κατασκευές συγκράτησης νερού (π.χ. φράγματα, λιμνοδεξαμενές, αναχώματα λιμνών, κανάλια, κλπ.).

Ως περαιτότητα ορίζεται η ιδιότητα των υλικών να επιτρέπουν την κίνηση ενός ρευστού διαμέσου της μάζας τους. Συνεπώς οποιοσδήποτε σχηματισμός επιτρέπει τη διέλευση ρευστού δια μέσου της μάζας του καλείται **περαιτός (permeable)**, ενώ όταν η κίνηση αυτή μέσα στη μάζα του σχηματισμού είναι πολύ δύσκολη έως αδύνατη, τότε αυτός καλείται **αδιαπέρατος (impermeable)**.

Η εσωτερική ή πραγματική περαιτότητα (intrinsic permeability) φαίνεται να είναι στενά συνδεδεμένη με το πορώδες των διάφορων εδαφικών ή/και βραχωδών σχηματισμών.

Για τους βραχώδεις σχηματισμούς πάντως, πέρα από το πρωτογενές πορώδες, η περατότητα συνδέεται και με την παρουσία άλλων κενών χώρων μέσα στη μάζα τους, όπως για παράδειγμα ρωγμών, διαρρήξεων, καρστικών αγωγών, κλπ, που διαμορφώνουν το δευτερογενές πορώδες. Τέτοια κενά ενδεχομένως να μην επηρεάζουν την περατότητα, αν δεν υπάρχει σύνδεση - επικοινωνία μεταξύ τους, οπότε ο σχηματισμός να είναι αδιαπέρατος.

Συνεπώς, όπως προαναφέρθηκε στους βραχώδεις σχηματισμούς η περατότητα εξαρτάται κυρίως από το δευτερογενές και είναι μόνο έμμεσα συνδεδεμένη με το πρωτογενές πορώδες.

Η περατότητα εκφράζει την ευκολία, με την οποία το νερό κινείται σε ένα γεωλογικό σχηματισμό και εκφράζεται με τον συντελεστή k . Ο πίνακας που ακολουθεί δίνει συγκριτικά τιμές περατότητας για άρρηκτο βράχο, για ρωγματωμένο βράχο και εδαφικούς σχηματισμούς.

	k (cm/sec)	Άρρηκτο πέτρωμα	Ρωγματωμένο Πέτρωμα	Έδαφος
	10^{-10}	Αργιλικός Σχιστόλιθος		Ομοιογενής άργιλος κάτω από την επιφανειακή χαλαρωμένη ζώνη
	10^{-9}	Δολομίτης		
	10^{-8}	Γρανίτης		
	10^{-7}			
Μικρή παροχή – Πτωχή αποστράγγιση	10^{-6}	Ψαμμίτης	Ρωγμές πληρωμένες με άργιλο	Λεπτή άμμος, ιλύς, μίγματα άμμου και αργίλου
	10^{-5}			
	10^{-4}			
	10^{-3}			
Υψηλή παροχή – Ελεύθερη αποστράγγιση	10^{-2}	Ψαμμίτης	Πέτρωμα με διακλάσεις	Καθαρή άμμος – χαλίκια
	10^{-1}			
	1	Πέτρωμα με ανοιχτές διακλάσεις - Πολύ ρωγματωμένο πέτρωμα	Χαλίκια	
	10			
	10^2			

Πίνακας 2-1 Hoek and Bray, 1981

2.2.2 Υπολογισμός της υδραυλικής αγωγιμότητας της βραχομάζας

Ο υπολογισμός της υδραυλικής αγωγιμότητας της βραχομάζας μπορεί να γίνει είτε από την εκτέλεση επί τόπου δοκιμών διαπερατότητας είτε από τα συστήματα ασυνεχειών της βραχομάζας.

2.2.2.1 Επί τόπου δοκιμές διαπερατότητας

Για να μετρηθεί η περατότητα σε κάποιο σημείο της βραχομάζας, μέσω ασωλήνωτης γεώτρησης, είναι απαραίτητο να επιβληθεί αλλαγή στις συνθήκες του υπογείου νερού στο σημείο αυτό και είτε να μετρηθεί ο χρόνος που χρειάζεται για να αποκατασταθούν οι αρχικές συνθήκες, είτε να μετρηθεί η ποσότητα του νερού που χρειάζεται να διατηρηθούν οι αρχικές συνθήκες.

Οι δοκιμές προσδιορισμού της υδροπερατότητας ταξινομούνται σε τρεις κατηγορίες ως ακολούθως:

- **Δοκιμές σταθερού φορτίου.** Δε γίνεται χρήση παρεμβύσματος (packer) και η στάθμη του νερού στη γεώτρηση παραμένει σταθερή με τη διοχέτευση νερού, μετρώντας συγχρόνως τις απώλειες. Η δοκιμή αυτή είναι κατάλληλη για κοκκώδη εδάφη (άμμοι, αμμοχάλικα)
- **Δοκιμές μεταβλητού φορτίου.** Γίνεται χρήση παρεμβυσμάτων σε απομονωμένα τμήματα της γεώτρησης όπου και εκτελείται η δοκιμή. Κατάλληλη για λεπτόκοκκα εδάφη (ιλύες, άργιλοι). Είναι πιο απλή και λιγότερο αξιόπιστη από τη δοκιμή σταθερού φορτίου.
- **Δοκιμές εισπίεσης.** Γίνεται χρήση παρεμβυσμάτων για να απομονωθεί τμήμα της γεώτρησης όπου εκτελείται η δοκιμή, στη διάρκεια της οποίας και εισπιέζεται νερό. Η δοκιμή αυτή είναι κατάλληλη για ρωγματωμένους βράχους.

Οι δοκιμές εισπίεσης νερού (Pumping in tests), αποτελούν τον καταλληλότερο τρόπο εκτίμησης του k και κυρίως για το τμήμα του υπεδάφους που βρίσκεται πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα, δηλαδή στην ακόρεστη ζώνη, στην περίπτωση των γεωτεχνικών μελετών και χαρακτηρίζονται από την ταχύτητα εκτέλεσης, τη δυνατότητα συχνής επανάληψης αυτών κατά τη διάρκεια της διάρτησης, αλλά και για την καλή αξιοπιστία των αποτελεσμάτων.

Οι δοκιμές προσδιορισμού της υδροπερατότητας γεωλογικών σχηματισμών που έχουν ευρεία χρήση είναι οι δοκιμές Lefranc, Maag και Lugeon.

2.2.2.1.1 Δοκιμή Lefranc

Η δοκιμή χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της υδροπερατότητας σε χαλαρούς σχηματισμούς. Η γεώτρηση είναι σωληνωμένη με σωλήνα για συγκράτηση των τοιχωμάτων της, καθαρή από υλικά και

γεμάτη από καθαρό νερό. Κατά τη δοκιμή προστίθεται νερό, έτσι ώστε η πίεση στο πυθμένα της να παραμένει σταθερή.

Όταν η πτώση στάθμης του νερού που μετρείται μέσα στη γεώτρηση είναι μικρή τότε εφαρμόζεται πρόσθετη πίεση στο νερό που διοχετεύεται με τη βοήθεια παρεμβύσματος. Έτσι ο συντελεστής υδροπερατότητας k θα είναι :

$$k = \frac{Q}{2.7 d H} \quad (2.1)$$

Όπου:

H το ύψος της φορτίζουσας στήλης νερού (cm)

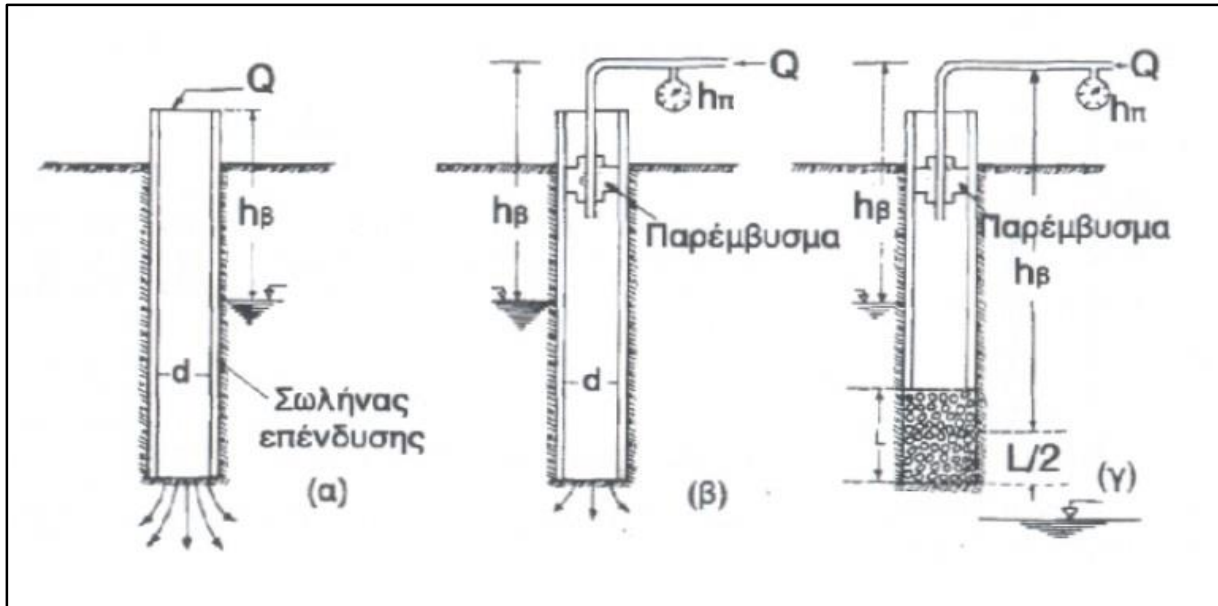
d η διάμετρος της γεώτρησης (cm)

Q η παροχή (cm³/sec)

Με την παραπάνω διάταξη προσδιορίζεται ο συντελεστής k του γεωλογικού σχηματισμού, που βρίσκεται στον πυθμένα της γεώτρησης. Αν χρειάζεται να προσδιοριστεί ο συντελεστής για τους υπερκείμενους του δαπέδου γεωλογικού σχηματισμούς, τότε η σωλήνωση ανυψώνεται κατά L και το τμήμα αυτό πληρώνεται με χαλικόφιλτρο. Επαναλαμβάνεται η ίδια διαδικασία και ο συντελεστής k προσδιορίζεται από τις ακόλουθες σχέσεις.

$$k = \frac{Q}{2 \pi L H} \times \ln \frac{2L}{d} \quad \text{για } L > 5d \quad (2.2)$$

$$k = \frac{Q}{2 \pi L H} \times \sinh^{-1} \frac{L}{d} \quad \text{όταν } 5d > L > \frac{d}{2} \quad (2.3)$$



Εικόνα 2-2 Αρχές δοκιμής Lefranc (Κ. Παπαθεοδώρου, 2001)

2.2.2.1.2 Δοκιμή Maag

Κατά τη δοκιμή αυτή γεμίζεται με νερό η σωληνωμένη γεώτρηση δημιουργώντας στάθμη h_1 . Έπειτα χρονομετρείται το διάστημα μέσα στο οποίο η στάθμη θα κατέβει σε στάθμη h_2 . Ο συντελεστής k υπολογίζεται από τη σχέση:

$$k = \frac{A}{F t} \times \ln \frac{h_1}{h_2} \quad (2.4)$$

Όπου :

A η διατομή της στήλης του νερού (cm)

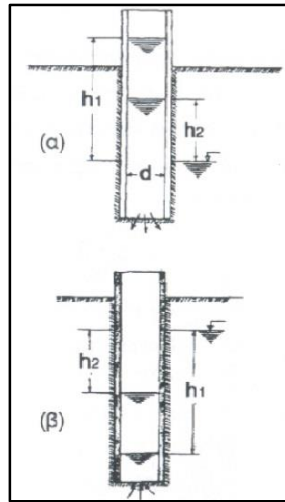
t το χρονικό διάστημα που χρειάστηκε η στάθμη για να κατέβει από h_1 σε h_2

F συντελεστής που δίνεται από πίνακες της εικόνας 2-4

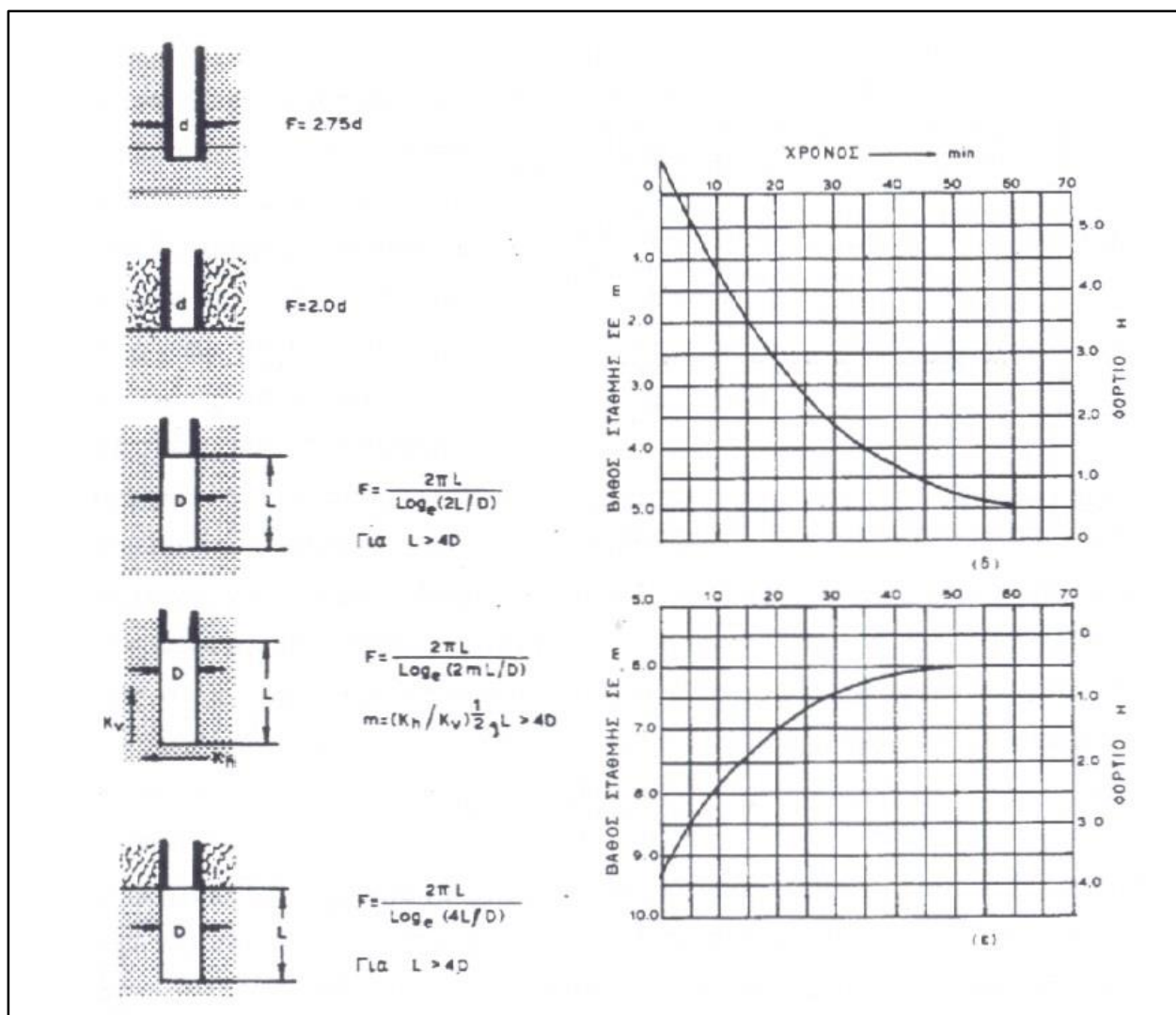
Παραλλαγή της μεθόδου Maag είναι να γίνεται άντληση νερού από τη γεώτρηση και να μετριέται ο χρόνος που απαιτείται να για να επανέλθει η στάθμη στην αρχική της θέση.

Για μεγαλύτερη ακρίβεια αποτελεσμάτων και μείωση σφαλμάτων συνήθως εκτελούνται τρεις δοκιμές για το ίδιο τμήμα με διαφορετικές υδροστατικές στάθμες και διαφορετικές παροχές. Τα σημεία των ζευγών τα πρέπει να βρίσκονται πάνω στην ίδια ευθεία σε άξονες Q-h (δοκιμή Lefranc) ή άξονες $\ln(h_1/h_2)$

– t (δοκιμή Maag). Αν δε συμβαίνει αυτό τότε υπάρχουν σφάλματα που μπορεί να οφείλονται σε απώλειες φορτίου ή σε γραμμική ροή του νερού μέσα στο γεωλογικό σχηματισμό.



Εικόνα 2-3 Αρχές δοκιμής Maag (Κ. Παπαθεοδώρου, 2001)

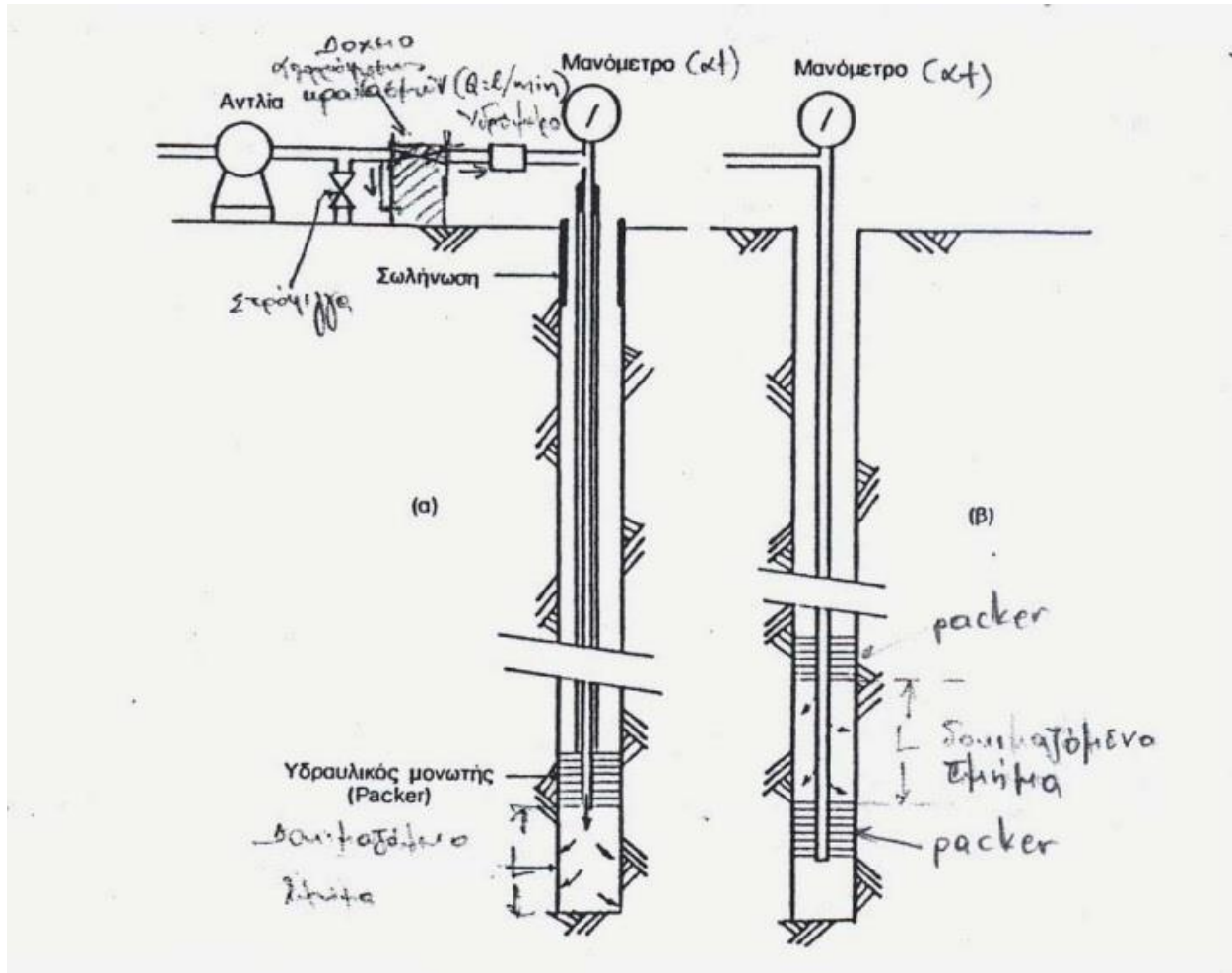


Εικόνα 2-4 Συντελεστής F για διάφορες περιπτώσεις προσδιορισμού περατότητας (Hoek - Bray, 1981), (δ): διάγραμμα δοκιμής κατερχόμενου φορτίου, (ε) : διάγραμμα δοκιμής ανερχόμενου φορτίου

2.2.2.1.3 Δοκιμή Lugeon

Η δοκιμή αυτή εκτελείται αποκλειστικά σε βραχομάζα. Σκοπός της είναι η ποσοτική εκτίμηση της διαπερατότητας της βραχομάζας είτε με τον υπολογισμό του συντελεστή υδραυλικής αγωγιμότητας k , είτε εμπειρικά με τιμές Lugeon, προκειμένου να εντοπιστούν και να χαρτογραφηθούν ζώνες υψηλής διαπερατότητας της βραχομάζας που έχουν ανάγκη στεγανοποίησης. Σύμφωνα με αυτήν τη δοκιμή, το νερό δεν αφήνεται ελεύθερα (όπως στις δοκιμές Maag και Le Franc) να εισέλθει στη βραχομάζα, αλλά εισπιέζεται στο δοκιμαζόμενο τμήμα σε καθορισμένα στάδια πιέσεων που διαρκούν, το καθένα, καθορισμένο χρόνο. Με τη βοήθεια υδρομέτρου μετράται η προσλαμβανόμενη ποσότητα νερού από τη

βραχομάζα εκφρασμένη σε l/min.m, ενώ με τη βοήθεια μανόμετρου σημειώνεται η αντίστοιχη πίεση εισπίεσης νερού που εφαρμόστηκε, εκφρασμένη σε ύψος στήλης νερού και at. Η δοκιμή εκτελείται σε ασωλήνωτη γεώτρηση, κατά τα στάδια της διάτρησης ή και μετά την ολοκλήρωσή της. Διεξάγεται με ανοδικά στάδια πιέσεων και συνεχίζεται με αντίστοιχα καθοδικά στάδια πιέσεων. Το δοκιμασμένο τμήμα απομονώνεται με packers (μονωτές), είτε μόνο από πάνω (απλό packer) είτε από πάνω και από κάτω (διπλό packer) (Εικ.2-5).



Εικόνα 2-5 Σκαρίφημα διαδικασίας εκτέλεσης δοκιμών Lugeon α. απλό packer β. διπλό packer

Ο συντελεστής περατότητας k υπολογίζεται από τη σχέση :

$$k = \frac{Q}{2 \pi PL} \times \ln \frac{2L}{D} \quad \text{για } L > 4D \text{ (m/sec)} \quad (2.5)$$

Όπου:

- Q η εισπνεζόμενη παροχή νερού στην οπή της γεώτρησης (m^3/sec)
- L το μήκος του δοκιμαζόμενου τμήματος (m)
- P η πραγματική τελική εφαρμοζόμενη πίεση στο δοκιμαζόμενο τμήμα εκφρασμένη σε kgf/cm^2 , αλλά κυρίως σε στήλη νερού, όπου $1 at = 10m$ νερού. Η τιμή της προκύπτει από διαγράμματα και αναγωγές
- D η διάμετρος της οπής (m)

Ο χαρακτηρισμός της υδροπερατότητας γίνεται σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα (Bulletin of IAEG, No19,pp364-371,1979)

Κατηγορία	cm/sec	m/sec
Πολύ Υψηλής Υδροπερατότητας	>1	> 10^{-2}
Υψηλής Υδροπερατότητας	1 έως 10^{-2}	10^{-2} έως 10^{-4}
Μέσης Υδροπερατότητας	10^{-2} έως 10^{-3}	10^{-4} έως 10^{-5}
Χαμηλής Υδροπερατότητας	10^{-3} έως 10^{-5}	10^{-5} έως 10^{-7}
Πόλη Χαμηλής Υδροπερατότητας	10^{-5} έως 10^{-7}	10^{-7} έως 10^{-9}
Πρακτικά Αδιαπέρατος	< 10^{-7}	< 10^{-9}

Πίνακας 2-2 Κατηγορίες Υδροπερατότητας με βάση το συντελεστή k.

Στον πίνακα 3 δίνεται το εύρος κύμανσης του συντελεστή περατότητας k για μερικές από τις πλέον σημαντικές κατηγορίες εδαφών ή και βραχωδών μαζών.

100	10	1	10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	10 ⁻⁷	10 ⁻⁸	
Καθαρά χαλίκια	Καθαρές άμμοι & αμμο-χαλίκια			Πολύ λεπτόκοκκες άμμοι, ιλύες & φυλλώδεις αργιλο-ιλύες.		Μη ρωγματομένες άργιλοι & αργιλοϊλύες (με άργιλο >20%)		Συνεκτικές άργιλοι & χωρίς ρωγμάτωση			
Ξηρές και ρωγματομένες άργιλοι											
Βραχομάζα πορωδών και σπηλαιωδών βασαλτών ή και σπηλαιωδών ανθρακικών πετρωμάτων		Βραχομάζα ψαμμιτών και κερματισμένων και εκρηξιγενών και μεταμορφωμένων πετρωμάτων			Βραχομάζα αργιολίθων, ιλυολιθικών και σχιστολίθων		Μαζώδη σχιστολιθικών & γρανιτικών πετρωμάτων				
Σχηματισμοί πολύ υψηλής έως υψηλής υδροπερατότητας				Σχηματισμοί υδροπερατότητας				πτωχής		Πρακτικά στεγανοί σχηματισμοί	
1 Μονάδα Lugeon (1UL)πρακτικά ισοδυναμεί με $k = 1 \times 10^{-5} \text{ cm/sec}$											

Πίνακας 2-3 Κύμανση του συντελεστή περατότητας σε (cm/sec) για διάφορες κατηγορίες γεωλογικών σχηματισμών.

Δεν θα πρέπει να γίνεται σύγχυση μεταξύ της υδραυλικής αγωγιμότητας K , και του συντελεστή περατότητας (k), ο οποίος είναι γνωστός και σαν περατότητα κατά Darcy. Η περατότητα αποτελεί χαρακτηριστικό του πορώδους μέσου μόνο και επομένως εξαρτάται από το σχήμα, το μέγεθος και τη διάταξη των κόκκων και είναι ανεξάρτητη από τις ιδιότητες του ρευστού. Τα δύο αυτά μεγέθη συνδέονται με τη σχέση (Κουμαντάκης 1997) :

$$K = k \frac{\gamma}{\mu} \quad (2.6)$$

Όπου:

γ το ειδικό βάρος του υγρού

μ το ιξώδες του υγρού

Δεδομένου όμως ότι για τις συνηθισμένες συνθήκες των υπογείων υδάτων, οι διακυμάνσεις της θερμοκρασίας, του ιξώδους και του ειδικού βάρους του νερού είναι πολύ μικρές, δεν θεωρείται σφάλμα εάν γίνει ταύτιση της υδραυλικής αγωγιμότητας με το συντελεστή περατότητας, δηλαδή $K=k$.

2.2.2.2 Υπολογισμός του συντελεστή υδραυλικής αγωγιμότητας της βραχομάζας από τα συστήματα των ασυνεχειών της

Σύμφωνα με το Louis (1969), ο συντελεστής υδραυλικής αγωγιμότητας (K) σε ένα σύστημα ρωγμών παράλληλων, επίπεδων και λείων δίνεται από τον τύπο :

$$K = \frac{gf^3}{12vb} \quad (2.7)$$

Όπου:

g η επιτάχυνση της βαρύτητας (981 cm/sec²)

f το άνοιγμα της ρωγμής (cm)

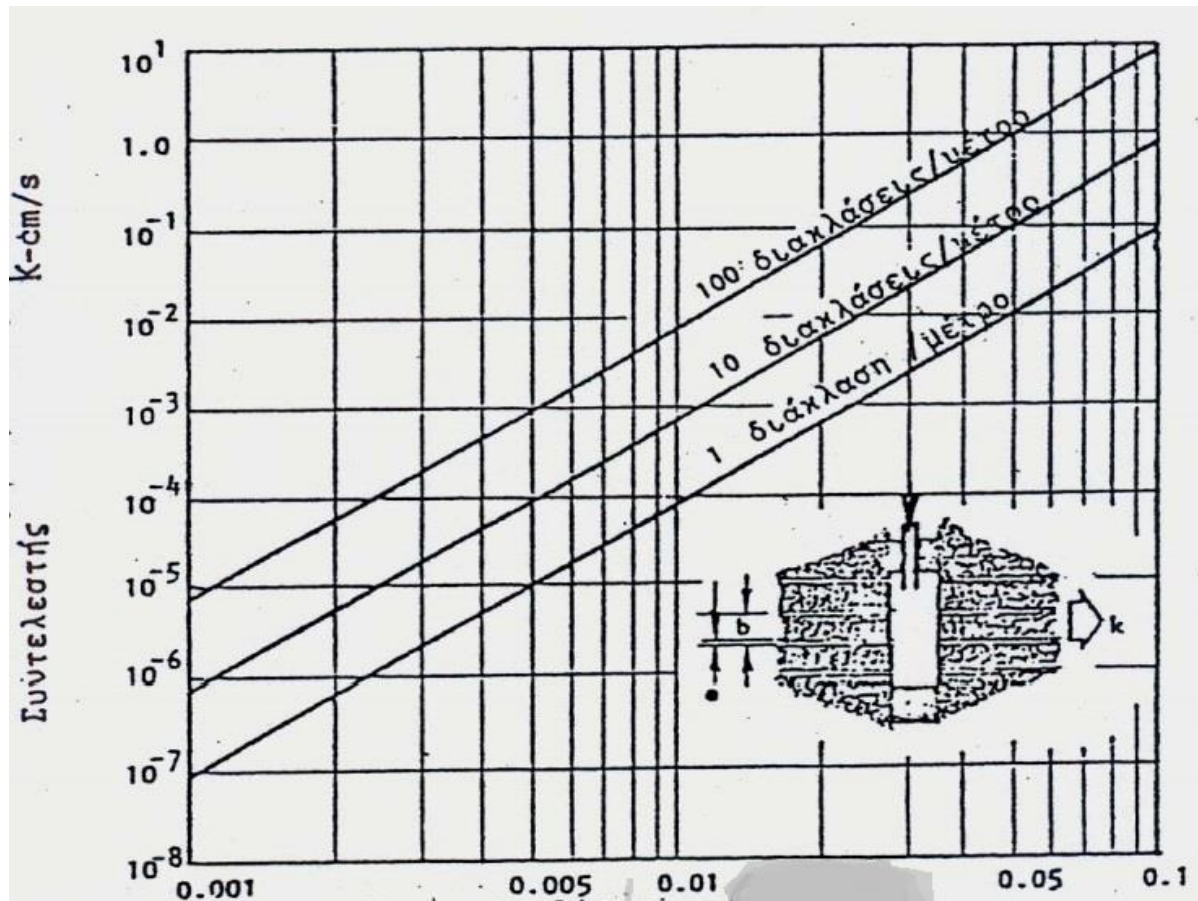
b η μέση απόσταση των ρωγμών του συστήματος (cm)

v ο συντελεστής κινηματικού ιξώδους (0,0101 cm²/sec για καθαρό νερό 20°C) (πίνακας 4)

και αποδίδεται με το παρακάτω Νομόγραμμα της εικόνας 6.

θερμ. °C	Ειδικό Βάρος γ, kN/m ³	Πυκνότη. ρ, kg/m ³	Ιξώδες μ×10 ³ , N s/m ²	Κινημα- τικό ιξώδες ν×10 ⁶ , m ² /s	επιφαν. τάση σ, N/m	πίεση ατμών ρ _v kN/m ² , abs	ύψος πίεσης ατμών ρ _v /γ m	Μέτρο διόγκω- σης ή ελαστ. E _v ×10 ⁻⁶ kN/m ²
0	9.805	999.8	1.781	1.781	0.0756	0.61	0.06	2.02
5	9.807	1000.0	1.518	1.519	0.0749	0.87	0.09	2.06
10	9.804	999.7	1.307	1.306	0.0742	1.23	0.12	2.10
15	9.798	999.1	1.139	1.139	0.0735	1.70	0.17	2.15
20	9.789	998.2	1.002	1.003	0.0728	2.34	0.25	2.28
25	9.777	997.0	0.890	0.893	0.0720	3.17	0.33	2.22
30	9.764	995.7	0.798	0.800	0.0712	4.24	0.44	2.25
40	9.730	992.2	0.653	0.658	0.0696	7.38	0.76	2.28
50	9.689	988.0	0.547	0.553	0.0679	12.33	1.26	2.29
60	9.642	983.2	0.466	0.474	0.0662	19.92	2.03	2.28
70	9.589	977.8	0.404	0.413	0.0644	31.16	3.20	2.25
80	9.530	971.8	0.354	0.364	0.0626	47.34	4.96	2.20
90	9.466	965.3	0.315	0.326	0.0608	70.10	7.18	2.14
100	9.399	958.4	0.282	0.294	0.0589	101.33	10.33	2.07

Πίνακας 2-4 Φυσικές ιδιότητες νερού σε μονάδες S.I.



Εικόνα 2-6 Επίδραση ανοίγματος και συχνότητας των διακλάσεων στο συντελεστή υδραυλικής αγωγιμότητας (k) κατά τη διεύθυνση μια οικογένειας λείων, παράλληλων διακλάσεων σε βραχομάζα (Hoek & Bray, 1981)

Η παραπάνω σχέση του Louis ισχύει όταν γίνεται λόγος για γραμμική ροή. Σε αντίθετη περίπτωση, τα σφάλματα που προκύπτουν είναι σημαντικά. Επίσης παρουσιάζονται σφάλματα στις περιπτώσεις που εξετάζονται τραχείες επιφάνειες ασυνεχειών καθώς και σε ασυνέχειες με υλικό πλήρωσης. Στην τελευταία περίπτωση συστήματος ασυνεχειών με υλικό πλήρωσης η ισοδύναμη υδραυλική αγωγιμότητα της βραχομάζας δίνεται από τη σχέση:

$$K = \frac{f}{b} K_f + K_r \quad (\text{cm/sec}) \quad (2.8)$$

Όπου :

K_f ο συντελεστής υδραυλικής αγωγιμότητας του υλικού πλήρωσης της ασυνέχειας

K_r ο συντελεστής υδραυλικής αγωγιμότητας του άρρηκτου πετρώματος

Ο κώδικας διακριτών στοιχείων UDEC (Universal Distinct Elemental Code), της εταιρίας Itasca (Itasca Co. 2012) ο οποίος χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία, για τον υπολογισμό της υδραυλικής αγωγιμότητας για μία ρωγμή σε βραχώδη σχηματισμό, βασίζεται στην σχέση του Louis (2.7) και χρησιμοποιεί τη παρακάτω σχέση :

$$K_f = \frac{a^2 g}{12\nu} \quad (2.9)$$

Όπου:

- a το πλάτος της ρωγμής
- ν το κινηματικό ιξώδες του υγρού
- g η επιτάχυνση της βαρύτητας

Αντίστοιχα η ισοδύναμη υδραυλική αγωγιμότητα για βραχώμαζα με μία οικογένεια παράλληλων ασυνεχειών εκφράζεται με τον παρακάτω τύπο (B.B.S Singhal, R.P.Gupta,2010) :

$$K_s = \frac{a}{s} K_f + K_m = \frac{a^3 g}{12\nu s} + K_m \quad (2.10)$$

Όπου:

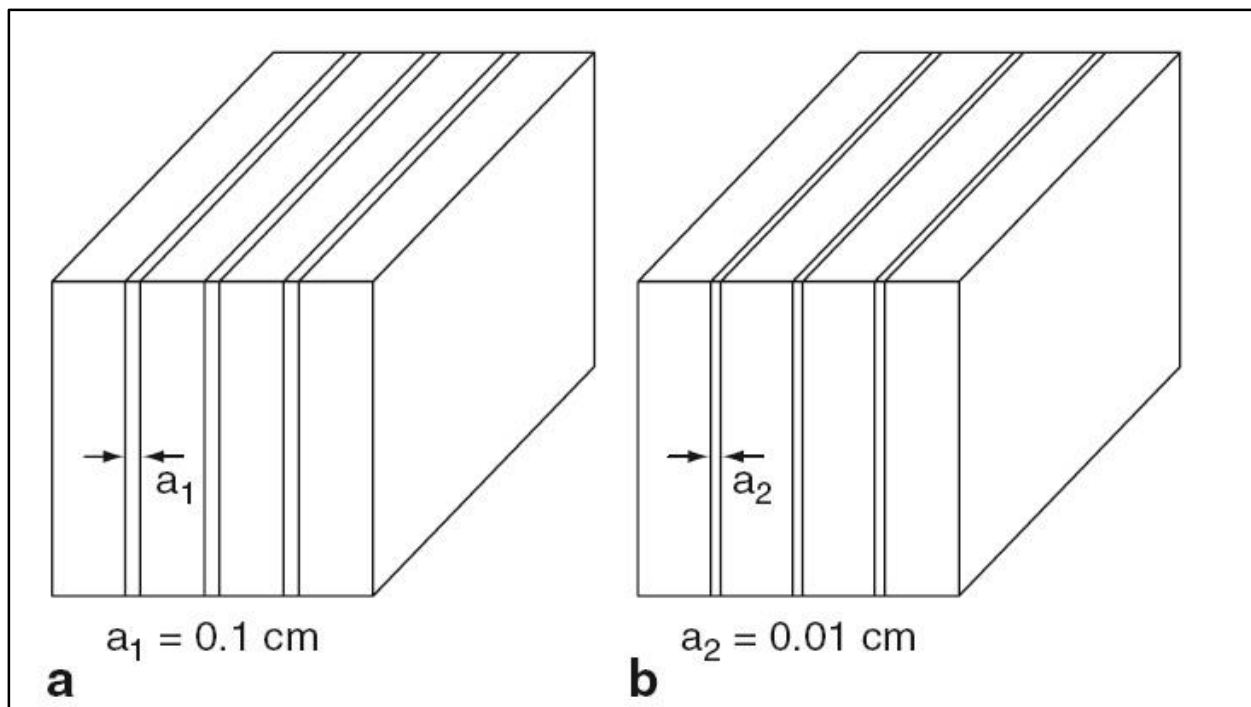
- s η απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών
- K_m η υδραυλική αγωγιμότητα της βραχομάζας λόγω ενεργού πορώδους.

Συνήθως η τιμή του K_m είναι αμελητέα εκτός εάν η βραχομάζα έχει υψηλό πορώδες ή/και το υλικό των ασυνεχειών είναι αδιαπέρατο, οπότε η τιμή του K_m είναι κοντά στην τάξη μεγέθους του K_f . Άρα η σχέση (2.10) γίνεται (B.B.S Singhal, R.P.Gupta,2010) :

$$K_s = \frac{a^3 g}{12\nu s} \quad (2.11)$$

Αξίζει να σημειωθεί ότι η τιμή του κινηματικού ιξώδους ν για καθαρό νερό θερμοκρασίας $20^\circ C$ ισούται με $1 \times 10^{-6} m^2 / sec$.

Σε πληρωμένες ασυνέχειες, η υδραυλική αγωγιμότητα εξαρτάται επί το πλείστον από την περατότητα του υλικού πλήρωσης.



Εικόνα 2-7 Δύο οικογένειες ασυνεχειών με ίδια απόσταση αλλά διαφορετικό άνοιγμα

Το άνοιγμα των ασυνεχειών όπως προκύπτει από τα παραπάνω έχει τη μεγαλύτερη επιρροή στην υδραυλική αγωγιμότητα της βραχομάζας. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτό της εικόνας 7 που στην πρώτη περίπτωση (a) προκύπτει ότι το $K_1 = 8.1 \times 10^{-4} m/s$ και στην δεύτερη περίπτωση (b) $K_2 = 8.1 \times 10^{-7} m/s$ δηλαδή τρεις τάξεις μεγέθους μικρότερη υδραυλική αγωγιμότητα σε σχέση με την πρώτη περίπτωση.

Από τις τιμές του συντελεστή υδραυλικής αγωγιμότητας που υπολογίζεται για κάθε ξεχωριστό σύστημα ρωγμών (διακλάσεων) στη βραχομάζα προσδιορίζεται και ο προσανατολισμός του ευνοϊκότερου συστήματος υπόγειας αποστράγγισης της βραχομάζας. Γεγονός πολύ σημαντικό στις περιπτώσεις επέμβασης σε έργα αποστράγγισης ή αντίστοιχα σε έργα, όπως οι σήραγγες, στεγανοποίησης της βραχομάζας, κλπ.

2.3 Αναλυτικές εξισώσεις υπολογισμού εισροής υδάτων σε σήραγγες

Ο συντελεστής υδραυλικής αγωγιμότητας, που εξετάστηκε παραπάνω, αποτελεί βασική παράμετρο για τον υπολογισμό της εισροής του υπογείου νερού στις σήραγγες, μέσω των αναλυτικών τύπων. Ο πίνακας 4 χωρίζεται σε εξισώσεις σταθερής και μεταβατικής ροής. Αξίζει να σημειωθεί ότι στους παρακάτω τύπους δεν μπορεί να συμπεριληφθεί η μεγάλη αύξηση της διαπερατότητας, λόγω κερματισμένων ή έντονα τεκτονισμένων ζωνών.

Επίσης τα αναλυτικά μοντέλα που παρουσιάζονται στον πίνακα 4 επιτρέπουν τον υπολογισμό της εισροής των υπογείων υδάτων για ομογενές μέσο. Η μάζα των πετρωμάτων όμως είναι σπάνια ομοιογενής, ισότροπη και συνεχής. Σε αυτές τις περιπτώσεις είναι απαραίτητη η «ολοκλήρωση» των αναλυτικών μεθόδων με τα αριθμητικά μοντέλα ή η προσαρμογή των αναλυτικών τύπων στην εκάστοτε υδρολογική δομή.

Σταθερή κατάσταση		
$Q = \frac{2\pi KL(H-h)}{\ln\left(\frac{2H-2h}{r}\right)}$	Goodman (1965)	Η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα κάτω από την επιφάνεια της γης. Συνεχές πιεζομετρικό φορτίο στα όρια της σήραγγας.
$Q = \frac{2\pi KL(H-h)}{\ln\left(\frac{H-D-h}{r} + \sqrt{\left(\frac{H-D-h}{r}\right)^2 - 1}\right)}$	Lei (1999)	Η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα στην επιφάνεια της γης. Συνεχές πιεζομετρικό φορτίο στα όρια της σήραγγας.
$Q = \frac{2\pi KL(H-h)}{\ln\frac{R}{r_e}} \left(1 + \frac{\ln\frac{r_e}{r_i} K}{\ln\frac{R}{r_e} K_i}\right)^{-1}$	Ribacchi et al. (2002)	Σήραγγα με επένδυση. Συνεχές πιεζομετρικό φορτίο στα όρια της σήραγγας.
$Q = \frac{2\pi KL(A+D)}{\ln\left(\frac{(H-D)}{r} + \sqrt{\frac{(H-D)^2}{r^2} - 1}\right)}$ <p>Όπου $A = (H-D) \frac{(1-a^2)}{(1+a^2)}$</p> $\alpha = \frac{1}{r} (H-D - \sqrt{(H-D)^2 - r^2})$	Park et al. (2008)	Η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα στην επιφάνεια της γης. Το πιεζομετρικό φορτίο κατά μήκος της σήραγγας και εξαρτώμενο από το στάδιο.
$Q = 2\pi KL \frac{\lambda^2 - 1}{\lambda^2 + 1} \frac{(H-h)}{\ln \lambda}$ <p>Όπου $\lambda = \frac{(H-h)}{r} - \sqrt{\frac{(H-h)^2}{r^2} - 1}$</p>	El Tani (2003)	Η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα κάτω από την επιφάνεια. Εξαρτώμενο πιεζομετρικό φορτίο από το στάδιο. Χρήση και για

		μη οριζόντιους υδροφόρους.
Μεταβατική κατάσταση		
$Q_{(t)} = \frac{4\pi KL (H_{(t)} - h)}{\ln \frac{2.25 KLt}{Sr^2}}$	Jacob & Lohman (1952)	Συνεχές πιεζομετρικό φορτίο στα όρια της σήραγγας.
$Q_{(t)} = 2\pi \int_0^{vt} \frac{K[H_{(t)} - h]\theta(L - x)}{\ln \left[1 + \sqrt{\frac{\pi K}{Sr^2}} \left(t - \frac{x}{v} \right) \right]}$	Perrochet et al. (2005)	Συνεχές πιεζομετρικό φορτίο στα όρια της σήραγγας. Χρήση και για ετερογενείς υδροφορείς. Perrochet et al. (2007)

Πίνακας 2-5 Αναλυτικές εξισώσεις για την εισροή υδάτων σε σήραγγα (Gattinoni, 2009).

Πρέπει να σημειωθεί ότι όλοι οι παραπάνω τύποι βασίζονται στην υπόθεση ομογενούς και ισότροπου υδροφορέα, οριζόντιου υδροφόρου ορίζοντα και για $r \ll H$.

K	η υδραυλική αγωγιμότητα
L	το μήκος της σήραγγας
H	η απόσταση του κέντρου της σήραγγας από τον υδροφόρο ορίζοντα
h	το υδραυλικό φορτίο στη σήραγγα
r	η ακτίνα της σήραγγας
r_i, r_e	η εσωτερική και η εξωτερική ακτίνα αντίστοιχα της σήραγγας με επένδυση.
R	η ακτίνα επιρροής της σήραγγας
K_i	η υδραυλική αγωγιμότητα της επένδυσης της σήραγγας
D	το υδραυλικό φορτίο πάνω από την επιφάνεια της γης
t	ο χρόνος
x	χωρική συντεταγμένη κατά μήκος του άξονα της σήραγγας στο σημείο έναρξης της περατής ζώνης

Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται με τις περιπτώσεις της μόνιμης σταθερής ροής και συγκεκριμένα η εκτίμηση των εισροών του υπόγειου νερού γίνεται με τους τύπους του Goodman (1965) και El Tani (2003).

2.4 Επαναπροσδιορισμός των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τους αναλυτικούς τύπους με τη βοήθεια εμπειρικών σχέσεων.

Οι παροχές που υπολογίζονται από τους αναλυτικούς τύπους του πίνακα 4 σε σύγκριση με τις αντίστοιχες παροχές των αριθμητικών μοντέλων έχουν μεγάλες διαφορές. Παρακάτω παρουσιάζεται ο τρόπος – μετατροπή των παροχών που δίνει η σχέση του Goodman, με σκοπό πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα από τα συνήθως πολύ συντηρητικά που παρέχει ο τύπος. Ο τρόπος αυτός βασίστηκε στα αποτελέσματα που προκύπτουν από τα αριθμητικά μοντέλα και πιο συγκεκριμένα από το αριθμητικό πρόγραμμα UDEC (Universal Distinct Elemental Code) της εταιρίας Itasca. Η ανάλυση του τρόπου λειτουργίας του προγράμματος θα γίνει στο επόμενο κεφάλαιο.

Αξίζει να σημειωθεί ότι οι εξισώσεις των Goodman και El Tani έχουν μικρές διαφορές μεταξύ τους. Για αυτό το λόγο προτιμήθηκε ο απλός τύπος του Goodman . Πιο συγκεκριμένα ο τύπος του El Tani δίνει λίγο πιο ακριβή αποτελέσματα.

Σύμφωνα με την εμπειρική σχέση (Gattinoni, 2009) :

$$Q = \alpha Q_G^b \quad (2.12)$$

Όπου :

Q η εισροή υπόγειου νερού σε σήραγγα για ασυνεχή βραχώμαζα (m^3/sec).

Q_G η εισροή υπόγειου νερού σε σήραγγα με τη χρήση του τύπου του Goodman (m^3/sec).

α, b εμπειρικοί αδιάστατοι συντελεστές οι οποίοι εξαρτώνται από το γεωλογικό μοντέλο.

Πιο συγκεκριμένα οι εμπειρικοί αυτοί συντελεστές εξαρτώνται από :

- Την κλίση των ασυνεχειών.
- Την υδραυλική αγωγιμότητα.
- Τον προσανατολισμό του ταυυστή της υδραυλικής αγωγιμότητας.

Για τον υπολογισμό των παραμέτρων a , b ορίστηκε ένας αδιάστατος συντελεστής F .

$$F = \frac{\sum_{i=1}^n \cos a_i}{n} \left(\frac{K_{min}}{K_{max}} \right)^{0.5\varphi} \quad (2.13)$$

Όπου :

n ο αριθμός των οικογενειών των ασυνεχειών

a_i η μέγιστη κλίση της i -οστής οικογένειας ασυνεχειών

K_{min}, K_{max} είναι αντίστοιχα η ελάχιστη και μέγιστη τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας.

Για την παράμετρο φ ισχύει :

$$\varphi = \begin{cases} -1 & \text{για } \theta_{min} > 45^\circ \\ 1 & \text{για } \theta_{min} \leq 45^\circ \end{cases} \quad (2.14)$$

Όπου :

θ_{min} η γωνία της διεύθυνσης του K_{min} και του οριζόντιου πεδίου.

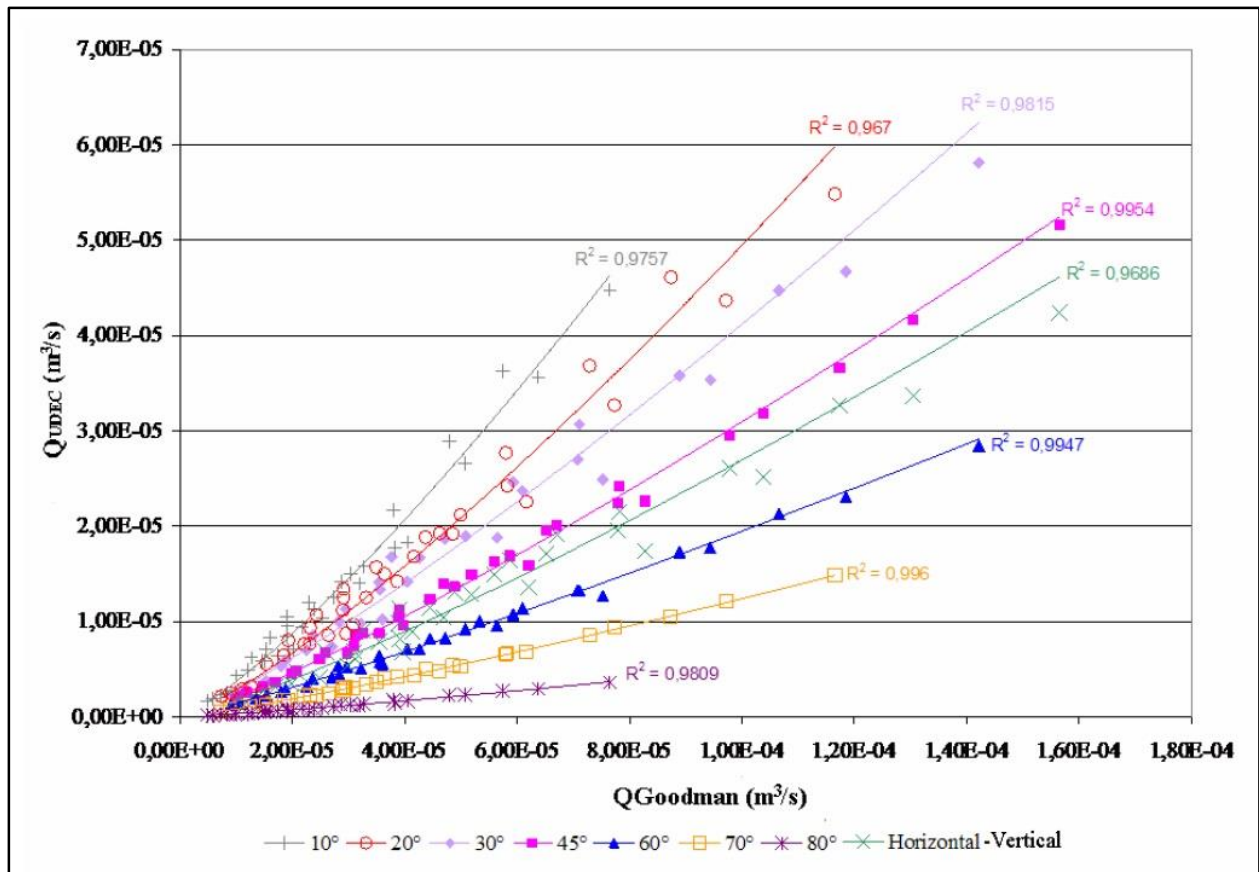
Επομένως οι εμπειρικοί αδιάστατοι συντελεστές a , b καθορίζονται συναρτήσει του F , και ισχύουν τα παρακάτω :

$$b = \ln 3.463F^{0.0342} \quad (2.15)$$

$$\alpha = \begin{cases} 3.448F^{0.8834} & \text{για } F < 1 \\ 3.2411F^{0.6805} & \text{για } F \geq 1 \end{cases} \quad (2.16)$$

Στην εικόνα 2-8 παρουσιάζεται η χρησιμοποίηση των παραπάνω σχέσεων με σκοπό τη σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ αριθμητικών μοντέλων και αναλυτικών τύπων.

Στον άξονα των x παρουσιάζεται η παροχή που προκύπτει από τον τύπο του Goodman και στον άξονα των y η παροχή που υπολογίζεται από το πρόγραμμα UDEC. Η σύγκριση γίνεται για διάφορες τιμές της διεύθυνσης κλίσης των ασυνεχειών.



Εικόνα 2-8 Σύγκριση παροχών εισροής για διάφορες τιμές της διεύθυνσης κλίσης των ασυνεχειών UDEC - Goodman.(Gattinoni, 2009))

Κεφάλαιο 3 - Το Πρόγραμμα UDEC

3.1 Εισαγωγικά στοιχεία για το UDEC

Το UDEC, (Universal Distinct Elemental Code) της εταιρίας Itasca, 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 UDEC προσομοιώνει την απόκριση ενός ασυνεχούς μέσου (όπως μία ρωγματοωμένη 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 τεμαχίων, 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 συγκεκριμένο πρόγραμμα διαθέτει εντολή για την αυτόματη δημιουργία ζωνών (στοιχείων πεπερασμένων διαφορών) για τη διακριτοποίηση των παραμορφώσιμων τεμαχίων.

Η γλώσσα προγραμματισμού που περιέχεται στο UDEC, ονομάζεται FISH συντομογραφία του FlakISH (γλώσσα που αρχικά σχεδιάστηκε με σκοπό να χρησιμοποιηθεί 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.

3.2 Η μέθοδος των διακριτών στοιχείων

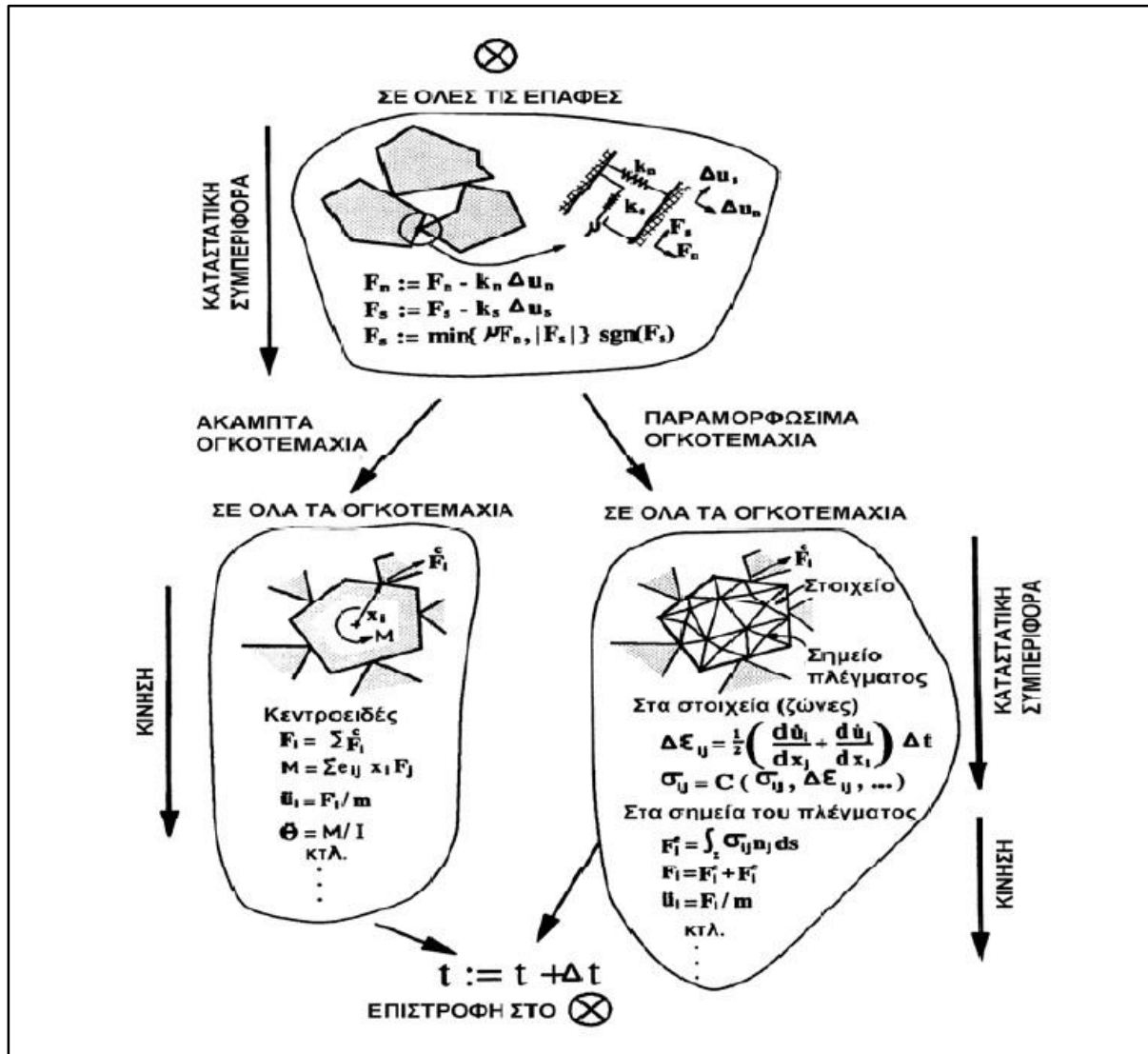
Στη μέθοδο των διακριτών στοιχείων, η μάζα του πετρώματος αναπαρίσταται από ένα σύστημα διακριτών ογκοτεμαχίων που χωρίζονται μεταξύ τους από ασυνέχειες. Οι ασυνέχειες θεωρούνται ως διεπιφάνειες μεταξύ των ογκοτεμαχίων δηλαδή η ασυνέχεια θεωρείται ως σύνορο του ογκοτεμαχίου, στο οποίο αντιστοιχεί μία συνοριακή εντατική συνθήκη. Οι δυνάμεις και οι μετατοπίσεις στις διεπιφάνειες αυτές βρίσκονται μέσω μια σειράς υπολογισμών, που αποτυπώνουν τις διαδοχικές κινήσεις των ογκοτεμαχίων. Οι μετακινήσεις είναι αποτέλεσμα της διάδοσης δια μέσου του συστήματος διαταραχών εξαιτίας των εφαρμοσμένων συνοριακών φορτίων ή των μαζικών δυνάμεων. Με τον τρόπο αυτό συντελείται μια 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, 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 στη 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 παρακάτω σχήμα 3.1 αποτυπώνεται σχηματικά ο κύκλος υπολογισμού της μεθόδου διακριτών στοιχείων.



Εικόνα 3-1 Σειρά Υπολογισμών στη μέθοδο των διακριτών στοιχείων.

3.3 Εξισώσεις κίνησης

Η κίνηση ενός μεμονωμένου ογκοτεμαχίου καθορίζεται από το μέγεθος και τη διεύθυνση της συνισταμένης δύναμης και ροπής που ασκούνται σε 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 $F = F(t)$. Σύμφωνα με το δεύτερο νόμο του Νεύτωνα ισχύει :

$$\frac{d\dot{u}}{dt} = \frac{F}{m} \quad (3.1)$$

Όπου :

\dot{u} η ταχύτητα του σώματος

t ο χρόνος

m η μάζα του σώματος

Το κεντρικό διαφορικό σχήμα για το αριστερό μέλος της εξίσωσης 3.1 σε χρόνο t γράφεται ως εξής :

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

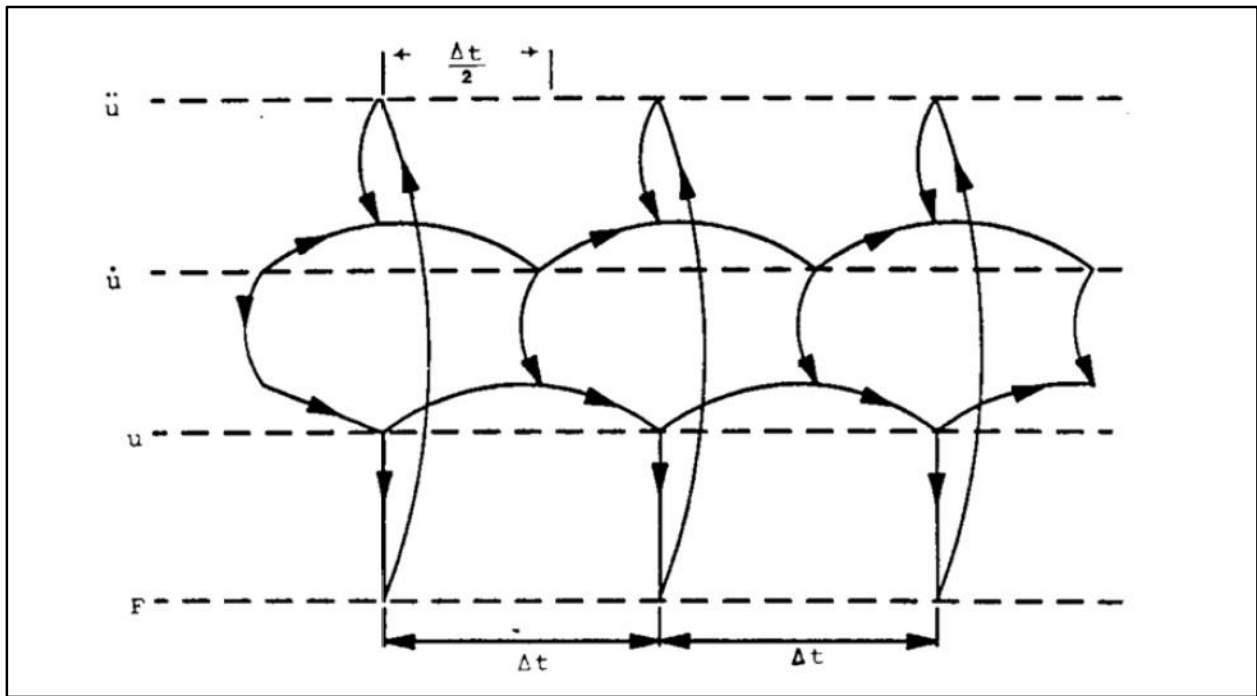
Αντικαθιστώντας την εξίσωση (3.2) στην (3.1) προκύπτει :

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

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

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

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).



Εικόνα 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 :

$$\dot{u}_i \left(t + \frac{\Delta t}{2} \right) = \dot{u}_i \left(t - \frac{\Delta t}{2} \right) + \left(\frac{\sum F_i(t)}{m} + g_i \right) \Delta t \quad i = 1,2 \quad (3.5)$$

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

Όπου :

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

I ροπή αδράνειας 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 εξίσωση 3.5 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 εξίσωση 3.5 χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της νέας θέσης του ογκοτεμαχίου με βάση τις σχέσεις :

$$x_i(t + \Delta t) = x_i(t) + \dot{u}_i(t + \Delta t / 2) \Delta t \quad (3.6)$$

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

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.

3.3.1 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 3ο 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:

$$m_a \dot{u}_a = F \quad (3.7)$$

$$m_b \dot{u}_b = -F \quad (3.8)$$

Συνδυάζοντας τις παραπάνω εξισώσεις και ολοκληρώνοντας προκύπτει :

$$\int_0^T m_a \cdot \ddot{u}_a dt = - \int_0^T m_b \cdot \ddot{u}_b dt \quad (3.9)$$

$$m_a \cdot [u_a(T) - u_a(0)] = -m_b \cdot [u_b(T) - u_b(0)] \quad (3.10)$$

$$m_a \cdot u_a(T) + m_b \cdot u_b(T) = m_a \cdot u_a(0) + m_b \cdot u_b(0) \quad (3.11)$$

Η εξίσωση (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_0 και τελική ταχύτητα u που διανύει απόσταση S υπό την επίδραση της δύναμης F .

Έχουμε:

$$m \cdot \dot{u} = F \quad (3.12)$$

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

$$m \int_{u_0}^u u du = \int_0^S F ds \quad (3.13)$$

Όπου η μάζα θεωρείται σταθερή. Προκύπτει :

$$\frac{1}{2} m(u^2 - u_0^2) = FS \quad (3.14)$$

Από την εξίσωση 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 $F=-k \cdot s$, όπου το k εκφράζει τη ελαστική σταθερά του συστήματος, τότε η εξίσωση (3.13) γίνεται :

$$m \int_{u_0}^u u du = - \int_0^S k s ds \quad (3.15)$$

Επομένως :

$$\frac{1}{2} m(u^2 - u_0^2) = \frac{1}{2} k s^2 \quad (3.16)$$

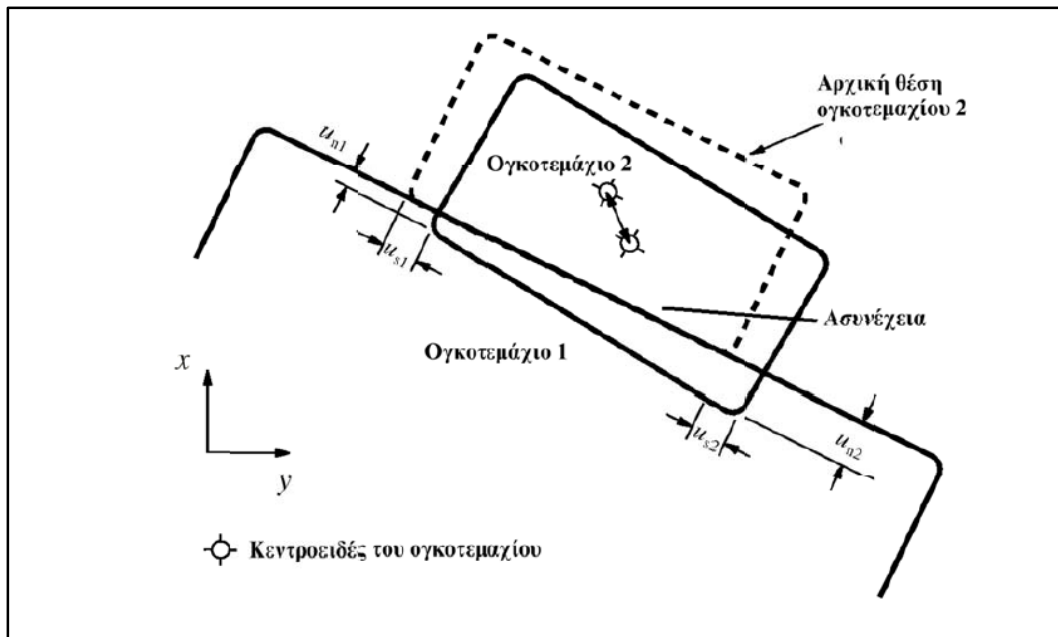
Στην περίπτωση αυτή, η μείωση της κινητικής ενέργειας ισούται με την ενέργεια που αποθηκεύεται στο σύστημα . Το ίδιο επιχείρημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί αντίστροφα για να δείξει ότι η κινητική ενέργεια που απορροφάται από ένα σώμα ισούται με τη μείωση της ενέργειας που βρίσκεται αποθηκευμένη στο σύστημα.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

3.4 Αναπαράσταση των ασυνεχειών στον κώδικα UDEC

Μια ασυνέχεια πετρώματος αναπαρίσταται αριθμητικά σαν μια 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 ανοιχτών 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 σχήμα 3.2. 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.



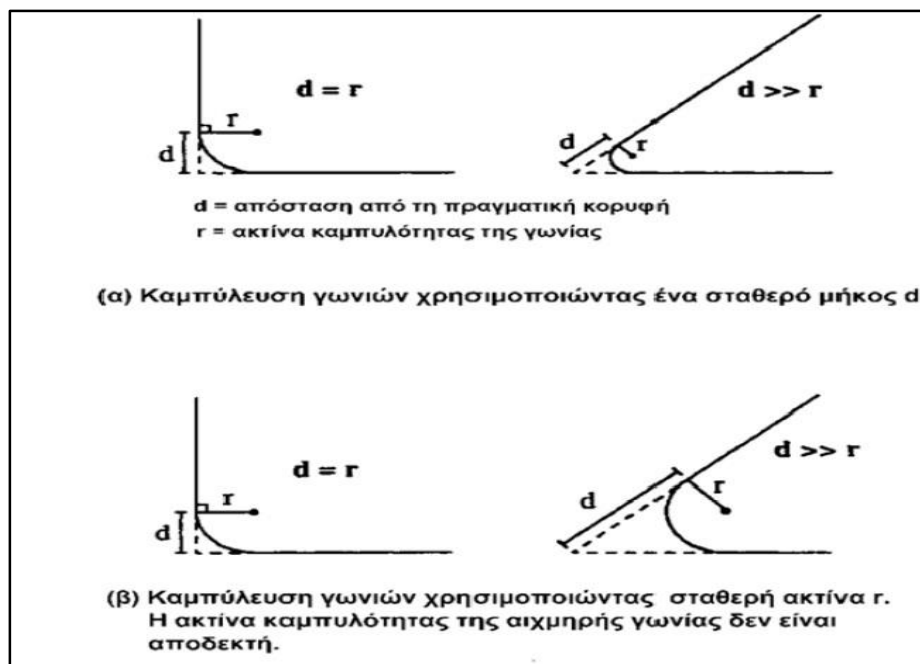
Εικόνα 3-3 Αναπαράσταση επαφών μεταξύ δύο άκαμπτων ογκοτεμαχίων.

Ένα πρόβλημα που προκύπτει με τον παραπάνω τρόπο αναπαράστασης των επαφών σχετίζεται με την περίπτωση που δύο ογκοτεμάχια βρίσκονται σε επαφή δια μέσου δύο γωνιών τους. Εάν οι γωνίες θεωρηθούν απολύτως αιχμηρές ή με άπειρη αντοχή (όπως στην περίπτωση των 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 τάσεων 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 σε απόσταση d της αρχής του κυκλικού τόξου από την πραγματική κορυφή, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.4. Καθορίζοντας μια σταθερή απόσταση d για όλα τα ογκοτεμάχια (η οποία ονομάζεται “μήκος στρογγύλευσης”) αποφεύγεται η περίπτωση υπερβολικής στρογγύλευσης πολύ οξείων γωνιών (Σχήμα 3.4 α) όπως θα συνέβαινε εάν αντί για την απόσταση d καθοριζόταν μία κοινή κυκλική ακτίνα για όλα τα ογκοτεμάχια (Σχήμα 3.4 β).

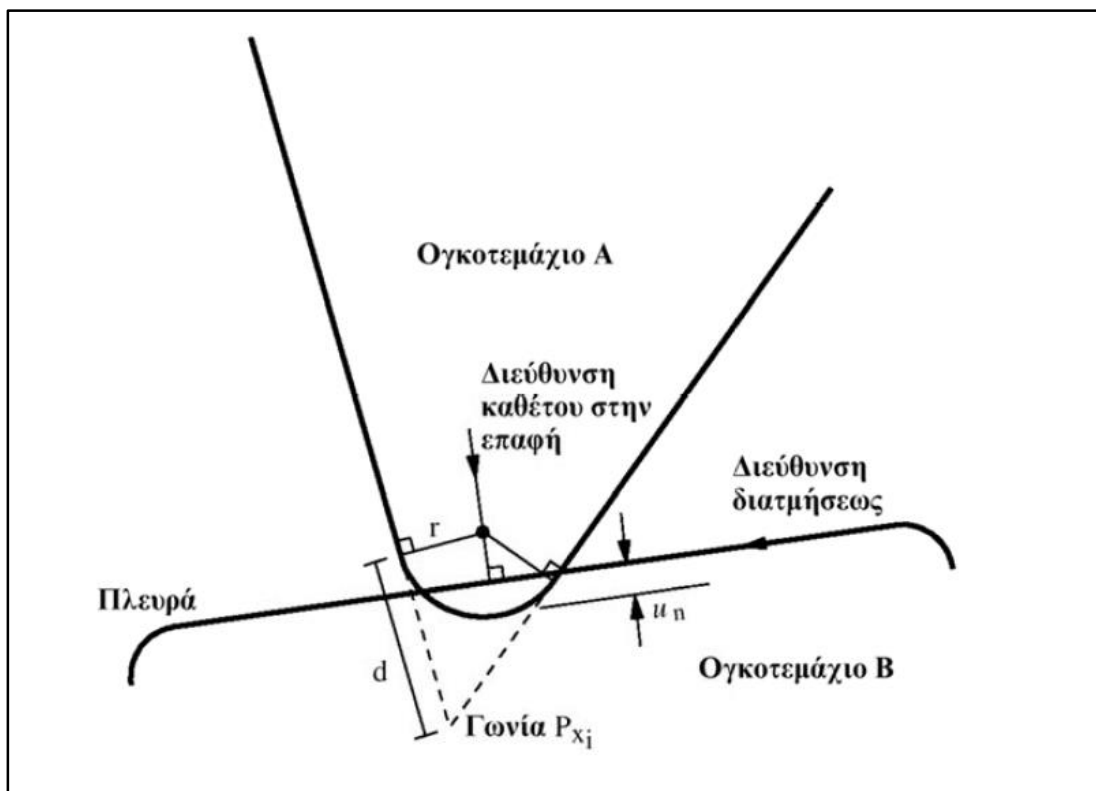


Εικόνα 3-4 Στρογγύλευση γωνιών στο κώδικα UDEC

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 3.5). Αντίστοιχα για επαφή τύπου γωνίας με γωνία, το σημείο επαφής τοποθετείται στην τομή της ευθείας που ενώνει τα

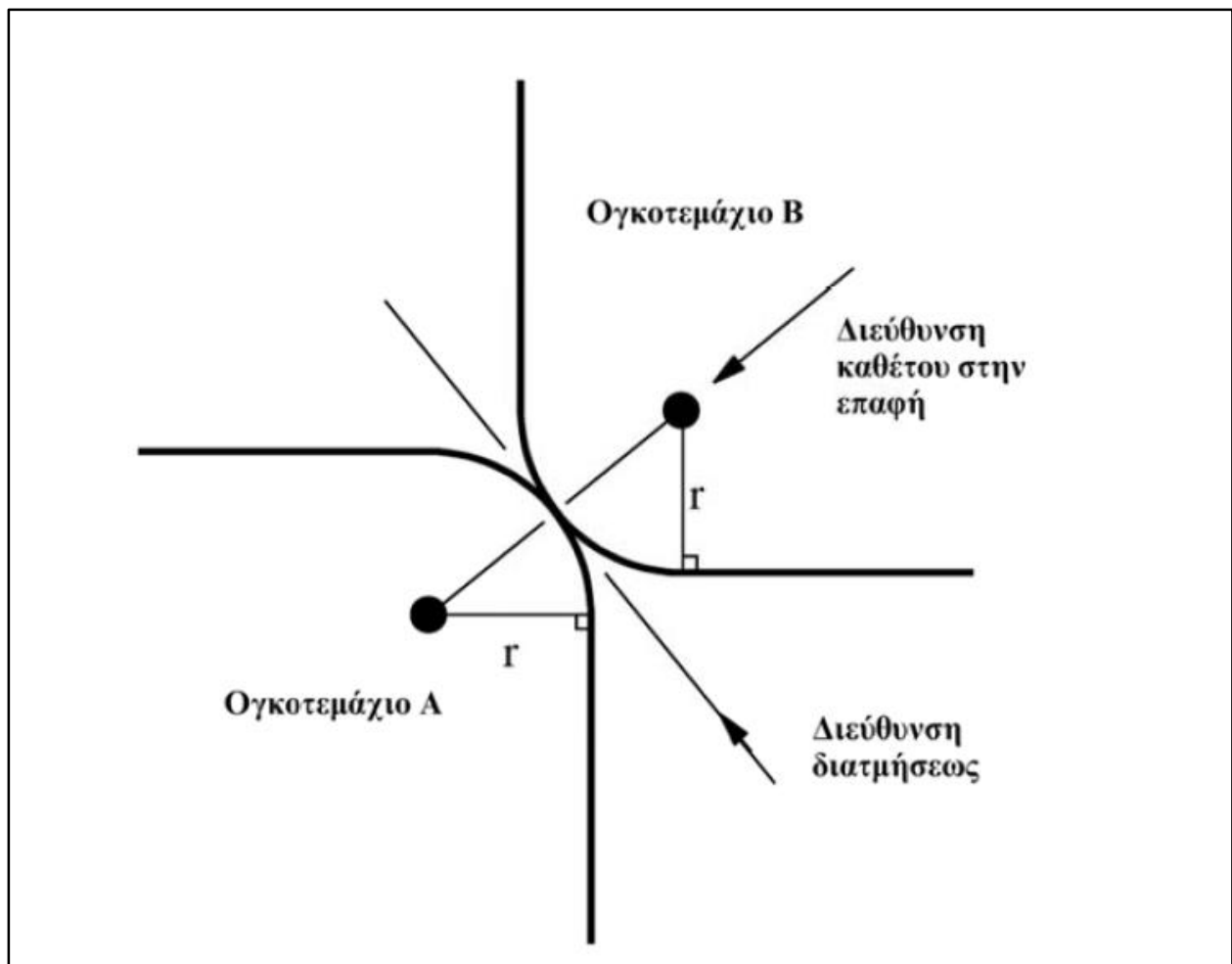
δύο απέναντι κέντρα καμπυλότητας των κυκλικών τόξων με τα κυκλικά τόξα (Σχήμα 3.6). Όπως φαίνεται από το Σχήμα 3.5, οι διευθύνσεις της κάθετης διατμητικής δύναμης που δρουν σε μία επαφή καθορίζονται σε σχέση με τη διεύθυνση της καθέτου στην επαφή.

Σε παραμορφώσιμα ογκοτεμάχια που εφάπτονται κατά μήκος μίας πλευράς τους τα σημεία τοποθετούνται στην τομή της καθέτου από κάθε πλεγματικό σημείο προς την πλευρά του γειτονικού ογκοτεμαχίου. Η αντιμετώπιση αυτή είναι χρήσιμη γιατί παρέχει τη δυνατότητα καλύτερης αναπαράστασης μία πιθανής ολίσθησης μεταξύ των δύο ογκοτεμαχίων.



Εικόνα 3-5

Τοποθέτηση σημείων επαφής για επαφή τύπου γωνίας με πλευρά και ορισμός των διευθύνσεων στις επαφές των ογκοτεμαχίων



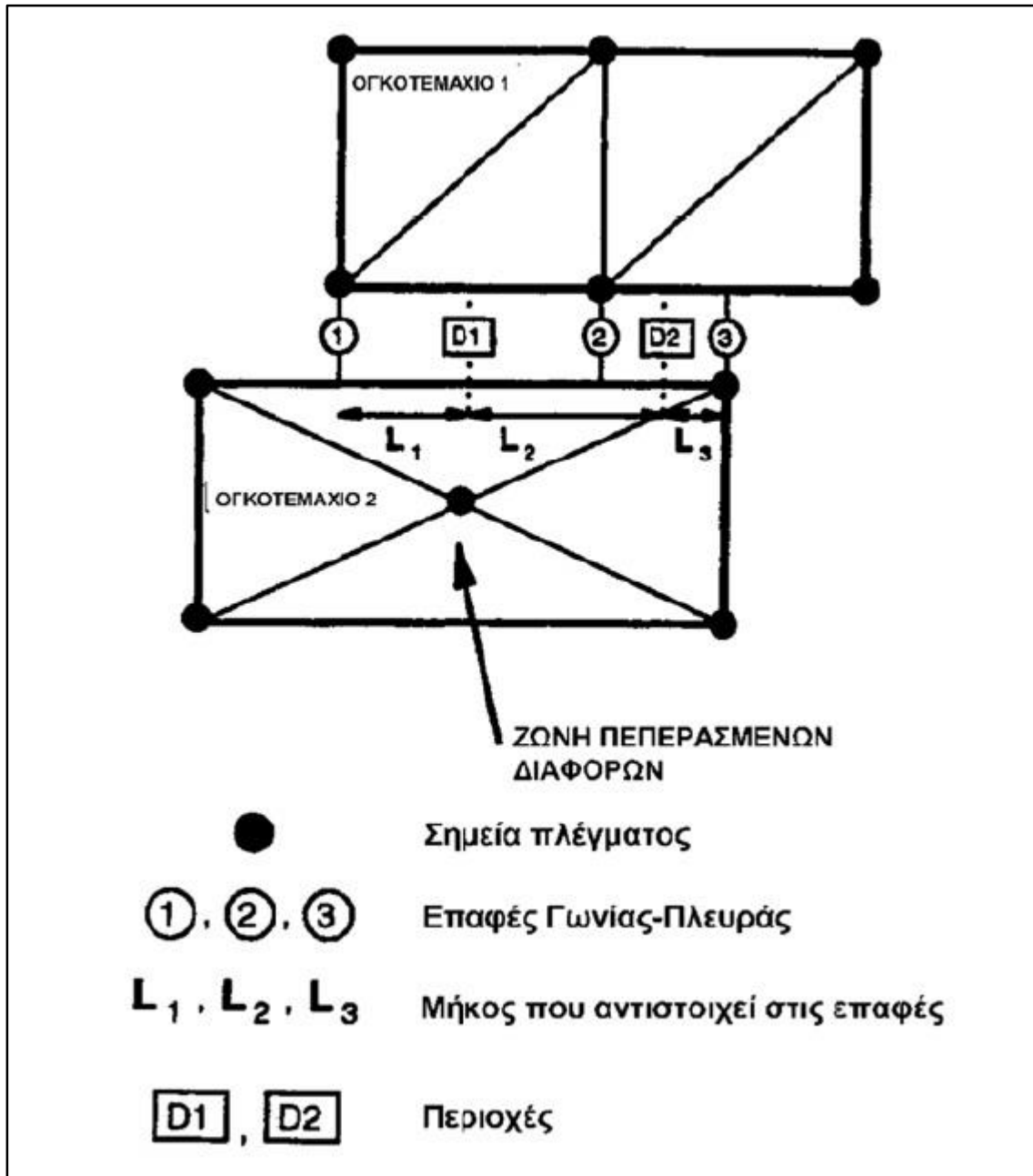
Εικόνα 3-6

Τοποθέτηση σημείων επαφής για επαφή τύπου γωνίας με γωνία και ορισμός των διευθύνσεων στις επαφές των ογκοτεμαχίων

Η στρογγύλευση των γωνιών επηρεάζει μόνο την θέση των σημείων επαφής, όπως αναφέρθηκε 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 προσομοίωσης και συνεπώς για την αποφυγή σφαλμάτων κατά την επίλυση, πρέπει να διατηρείται στο 1% περίπου του μήκους της 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 μια γειτονιά ογκοτεμαχίων. Σαν περιοχές λαμβάνονται οι χώροι μεταξύ των ογκοτεμαχίων που ορίζονται από τα σημεία επαφής όπως τα σημεία D1 και D2 του Σχήματος 3.7.



Εικόνα 3-7 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.

3.4.1 Μηχανική συμπεριφορά των ασυνεχειών.

Η αριθμητική αναπαράσταση του συστήματος των ογκοτεμαχίων και των ασυνεχειών πραγματοποιείται θεωρώντας δύο τύπους επαφών : επαφή γωνίας με γωνία και 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 ($L1$, $L2$ και $L3$ του Σχ. 3.7).

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:

$$\Delta\sigma = -k_n\Delta u_n \quad (3.17)$$

Όπου :

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

Δu_n αντίστοιχη αύξηση της κάθετης μετατοπίσεως

k_n 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:

$$\Delta\tau_s = k_s \Delta u_s^e \quad (3.18)$$

Όπου :

$\Delta\tau_s$	η απειροστή αύξηση της τάσεως κατά την παράλληλη διεύθυνση
k_s	η διατμητική ακαμψία του επιπέδου της ασυνέχειας
Δu_s^e	η ελαστική συνιστώσα της απειροστής αύξησης της διατμητικής μετατόπισης

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

$$\tau_{max} = C + \sigma_n \tan\varphi \quad (3.19)$$

Όπου :

τ_{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, δηλαδή $|\tau_s| \leq \tau_{max}$ τότε η απειροστή αύξηση της δύναμης διατμήσεως δίνεται από την εξίσωση (18). Διαφορετικά, εάν $|\tau_s| \geq \tau_{max}$ τότε αυτή παραμένει σταθερή και ίση με τη διατμητική αντοχή, ενώ το πρόσημό της καθορίζεται από τη σχέση:

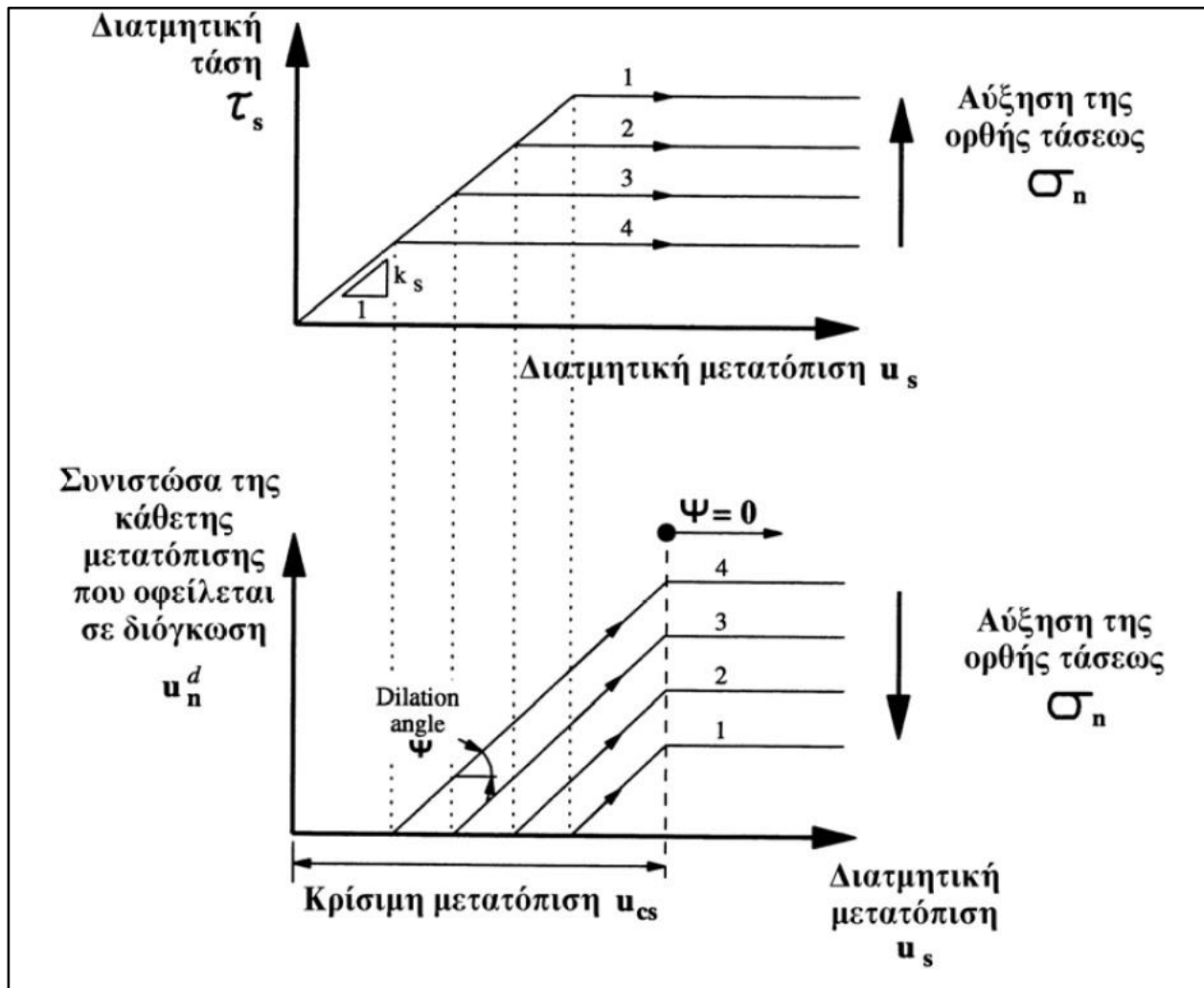
$$\tau_s = \text{sign}(\Delta U_s) \tau_{max} \quad (3.20)$$

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:

A) εάν $|\tau_s| \leq \tau_{max}$, τότε $\psi = 0$

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

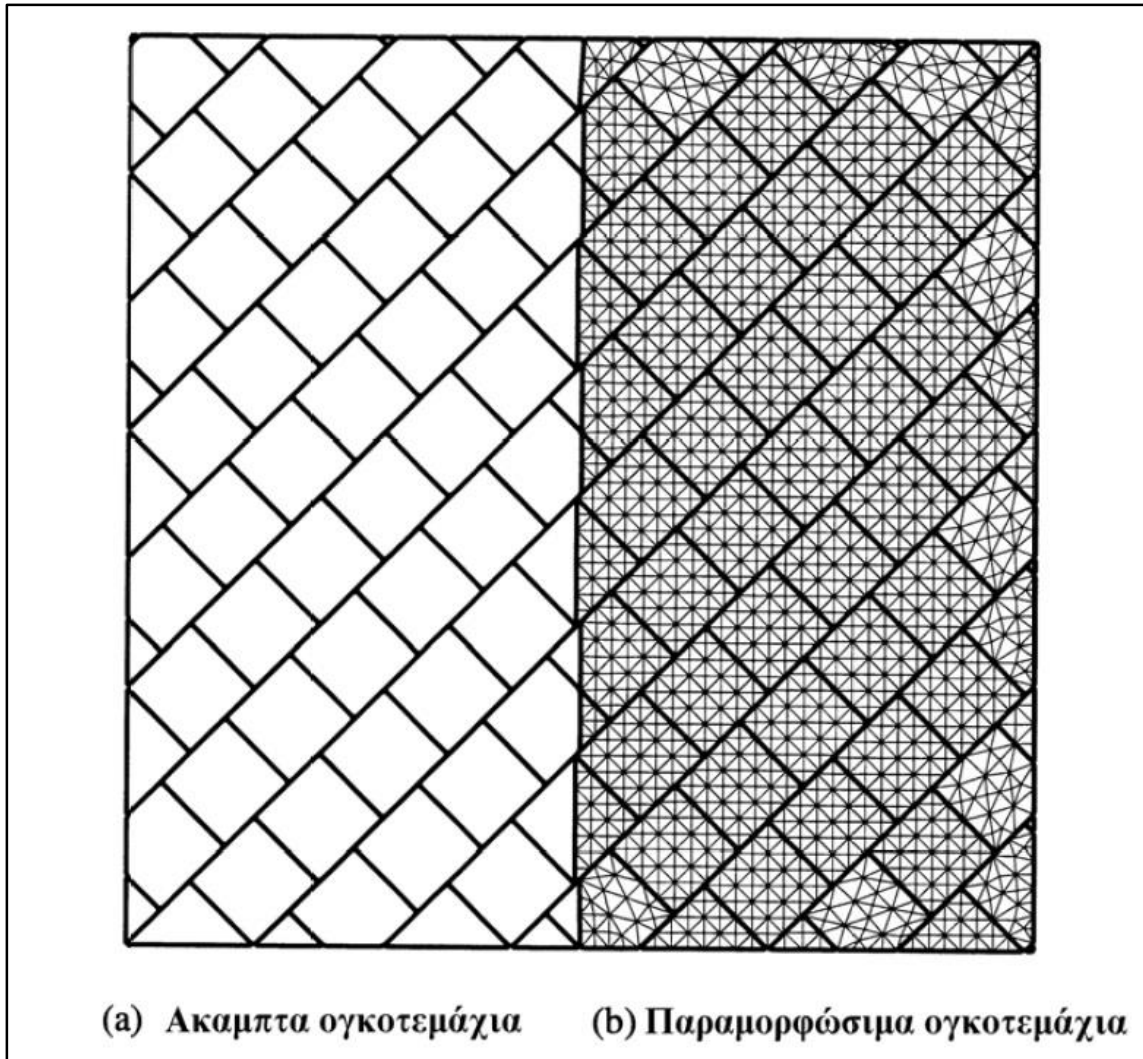


Εικόνα 3-8 Μοντέλο διατμητικής ολίσθησης των ασυνεχειών στο UDEC

3.5 Παραμορφωσιμότητα των ογκοτεμαχίων

Στη μέθοδο διακριτών στοιχείων τα ογκοτεμάχια του πετρώματος μπορεί να είναι άκαμπτα ή παραμορφώσιμα. Στην πρώτη περίπτωση η βραχομάζα περιγράφεται σαν ένα σύστημα άρρηκτων ογκοτεμαχίων το γεωμετρικό σχήμα των οποίων παραμένει αμετάβλητο. Άκαμπτα ογκοτεμάχια μπορούν να χρησιμοποιηθούν όταν η μηχανική συμπεριφορά της βραχομάζας καθορίζεται κυρίως από τη μηχανική συμπεριφορά των ασυνεχειών της, όπως στην περίπτωση ογκοτεμαχισμένης βραχομάζας 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 να θεωρηθούν ως παραμορφώσιμα. Στην περίπτωση αυτή το εσωτερικό των ογκοτεμαχίων διαιρείται (διακριτοποιείται) σε τριγωνικές ζώνες πεπερασμένων διαφορών. Στο Σχήμα 3.9 δίνεται για σύγκριση η εικόνα μίας βραχομάζας με άκαμπτα ογκοτεμάχια (αριστερά) και μίας με παραμορφώσιμα (δεξιά).



Εικόνα 3-9 Εικόνα Βραχομάζας με άκαμπτα και παραμορφώσιμα ογκοτεμάχια.

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 :

$$u_i = \frac{\int \sigma_{ij} n_j ds + F_i}{m} + g_i \quad (3.21)$$

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 στο κόμβο
g_i	η επιτάχυνση της βαρύτητας

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

$$F_i = F_i^Z + F_i^C + F_i^l \quad (3.22)$$

Όπου F_i^l οι εξωτερικές δυνάμεις που ασκούνται στο 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 ογκοτεμαχίων. Οι δυνάμεις λόγω εσωτερικής έντασης των ζωνών υπολογίζονται από τη σχέση :

$$F_i^Z = \int_C \sigma_{ij} n_j ds \quad (3.23)$$

Όπου σ_{ij} ο τανυστής των τάσεων 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 αναφέρθηκαν παραπάνω καθώς και η δύναμη λόγω βαρύτητας που ασκείται στον κόμβο και που υπολογίζεται από τη σχέση :

$$F_i^g = m_g + g_i \quad (3.24)$$

Όπου :

g_i	η επιτάχυνση της βαρύτητας
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:

$$u_i^{(t+\frac{\Delta t}{2})} = u_i^{(t-\frac{\Delta t}{2})} + \sum F_i^t \Delta t/m \quad (3.25)$$

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

$$e_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (3.26)$$

$$\theta_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} - u_{j,i}) \quad (3.27)$$

3.6 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.

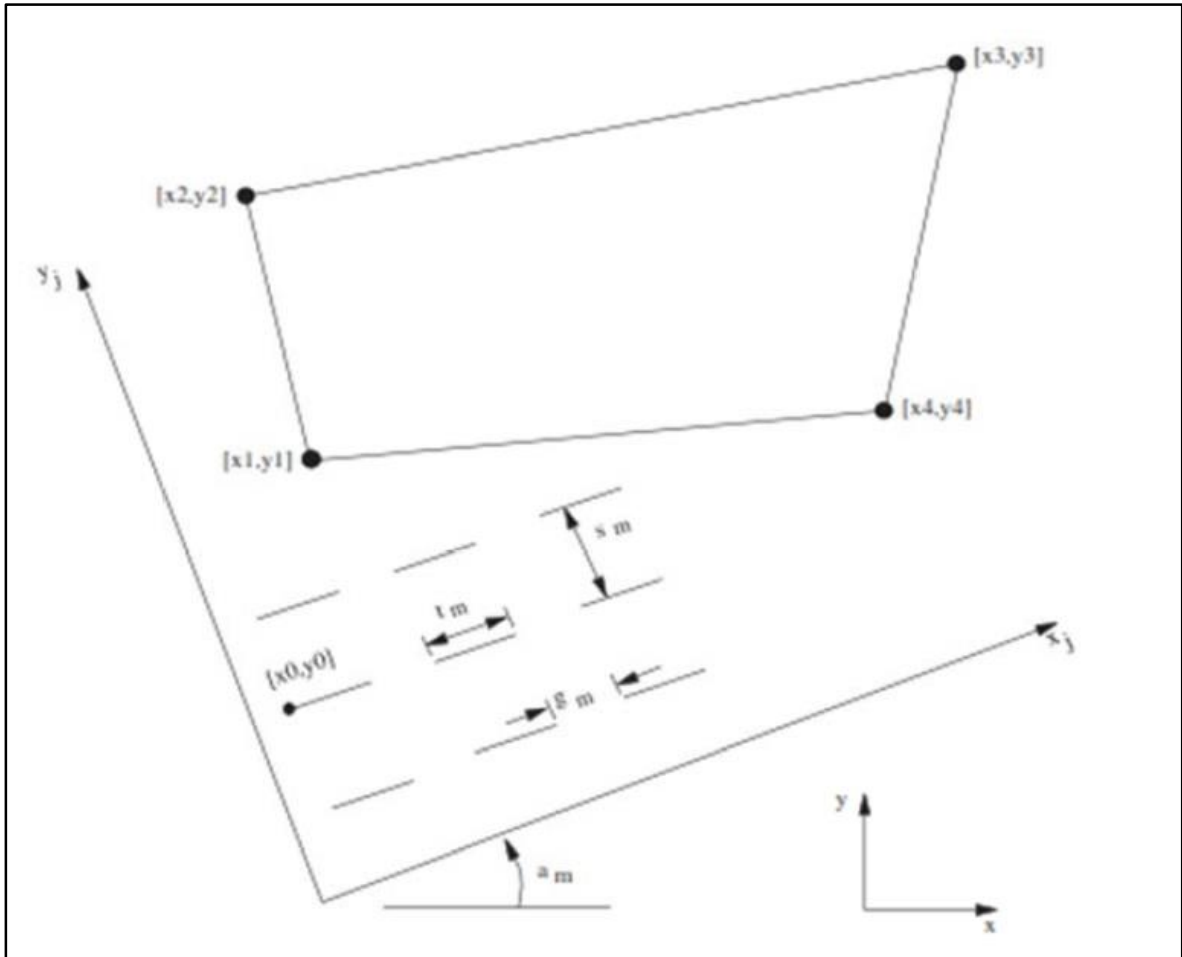
Ένα σύστημα ασυνεχειών καθορίζεται από 8 παραμέτρους (4 από τις οποίες ελέγχουν τις μέσες γεωμετρικές ιδιότητες και οι υπόλοιπες 4 ελέγχουν την τυπική απόκλιση της τυχαίας διακύμανσης των γεωμετρικών ιδιοτήτων. Οι παράμετροι που δίνονται μέσω της εντολής **JSET** :

JSET angle $a_m <a_d>$ gap $g_m <g_d>$ spac $s_m <s_d>$ trace $t_m <t_d>$ origin $x_0 y_0$ adev ad_0

Όπου :

- A η γωνία του ίχνους της ασυνέχειας με τον άξονα x
- g το μήκος του κενού ανάμεσα στις εκατέρωθεν επιφάνειες των τοιχωμάτων των ασυνεχειών
- s η απόσταση ανάμεσα στα ίχνη των ασυνεχειών
- t το μήκος του ίχνους στα τμήματα των 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 τη μέση τιμή. Οι παράμετροι που προαναφέρθηκαν απεικονίζονται στο σχήμα 3.10



Εικόνα 3-10 Βασικές παράμετροι για την απεικόνιση των ασυνεχειών στο UDEC

Οι εντολές **origin** και **adev** αποτελούν χρήσιμο εργαλείο για τον προσανατολισμό του ίχνους της ασυνέχειας, στην περιοχή του μοντέλου. Οι παράμετροι των εντελών είναι :

- x_0, y_0 : 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

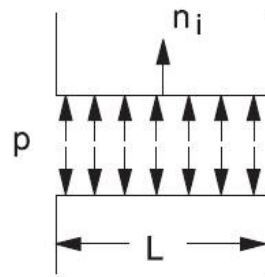
Στα αριθμητικά μοντέλα, χρησιμοποιήθηκε κυρίως, η μέθοδος της ψηφίδωσης Voronoi, διότι η συγκεκριμένη μέθοδος είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για την προσομοίωση της διάδοσης της ρωγμάτωσης. Η ρωγμάτωση επιτυγχάνεται όταν υπερβαίνεται η αντοχή των ασυνεχειών μεταξύ των τεμαχίων Voronoi. Κατά την ψηφίδωση Voronoi, 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 v , το οποίο πρέπει να είναι τουλάχιστον 20 φορές μικρότερο από το μήκος ακμής των ογκοτεμαχίων.

Η ψηφίδωση Voronoi εκτελείται μέσω της εντολής **VORONOI**. Ο αλγόριθμος Voronoi, στην αρχή διανέμει τυχαία σημεία μέσα στην περιοχή ψηφίδωσης 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 ψηφίδωσης.

3.7 Προσομοίωση της ροής μέσω ασυνεχειών στον κώδικα UDEC

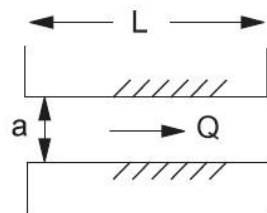
Το UDEC έχει τη δυνατότητα να πραγματοποιήσει την ανάλυση της ροής ενός ρευστού μέσα από τις ασυνέχειες ενός συστήματος αδιαπέρατων ογκοτεμαχίων (blocks). Κατά την αριθμητική προσομοίωση διενεργείται μια πλήρως συζευγμένη υδραυλική και μηχανική ανάλυση, στην οποία η υδραυλική αγωγιμότητα των ασυνεχειών 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



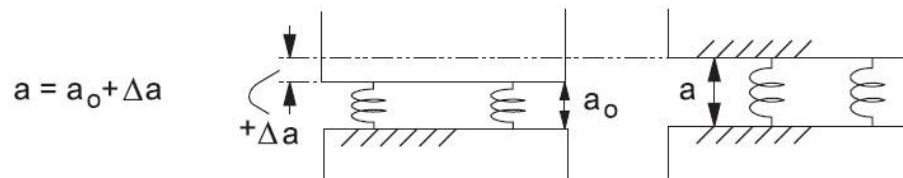
$$F_i = p n_i L$$

2. Ροή

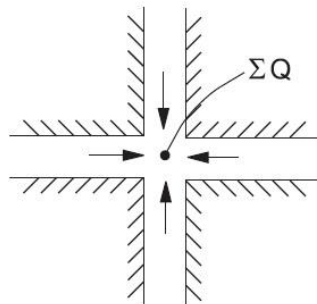


$$Q = -k_j a^3 \frac{\Delta p}{L}$$

3. Μηχανικό επίδραση στο άνοιγμα



4. Δημιουργία πίεσης



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

Όπου:

ΣQ	η ροή μέσα στον κόμβο
ΔV	μεταβολή μηχανικού όγκου
V	μέσος όγκος

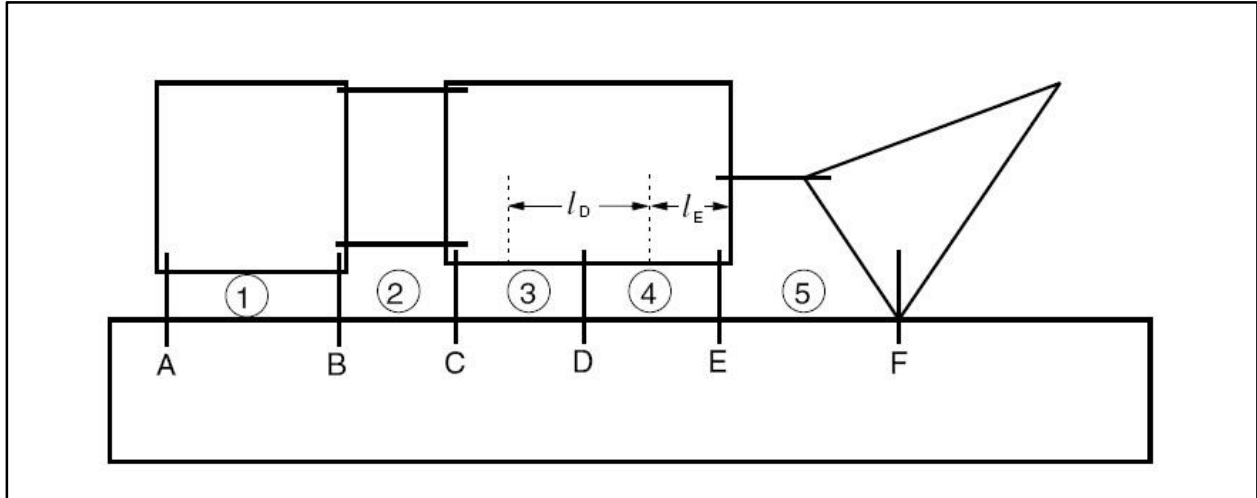
Στο UDEC , περιέχονται τέσσερις βασικοί αλγόριθμοι για την αριθμητική προσομοίωση της ροής ενός ρευστού :

- 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 τη διφασική ροή ρευστού – αερίου (liquid/gas flow)

3.8 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 3.11 οι τομείς είναι αριθμημένοι από το ένα 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 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 αναπαριστάται από δύο τομείς (3 και 4). Αν επιλεγόταν ένα πιο λεπτομερές πλέγμα πεπερασμένων διαφορών, η ασυνέχεια θα αναπαραστεί από έναν μεγαλύτερο συνεχόμενων τομέων. Συμπερασματικά, το πόσο λεπτομερές 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.



Εικόνα 3-11 Προσομοίωση ροής μέσω ασυνέχειας.

Σε περίπτωση που θεωρείται απύουσα η βαρύτητα, σε κάθε τομέα υπάρχει μια ομοιόμορφη πίεση ρευστού. Σε προβλήματα όπου λαμβάνεται υπόψιν η βαρύτητα, η πίεση ποικίλει γραμμικά, σύμφωνα με την υδροστατική κλίση και η πίεση του τομέα ορίζεται ως 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

Ο ρυθμός ροής από ένα τομέα με πίεση p_1 σε έναν τομέα με πίεση p_2 δίνεται από τον τύπο :

$$q = -k_c \Delta p \quad (3.28)$$

Όπου :

k_c συντελεστής περατότητας

Και

$$\Delta p = p_2 - p_1 + \rho_w g (y_2 - y_1) \quad (3.29)$$

Όπου :

ρ_w η πυκνότητα του ρευστού

g η επιτάχυνση της βαρύτητας και

γ_1, γ_2 οι συντεταγμένες γ 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 που ακολουθεί :

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

Όπου :

k_j ο συντελεστής περατότητας των ασυνεχειών (η θεωρητική του τιμή είναι $\frac{1}{12\mu}$, όπου μ το δυναμικό ιξώδες του ρευστού.

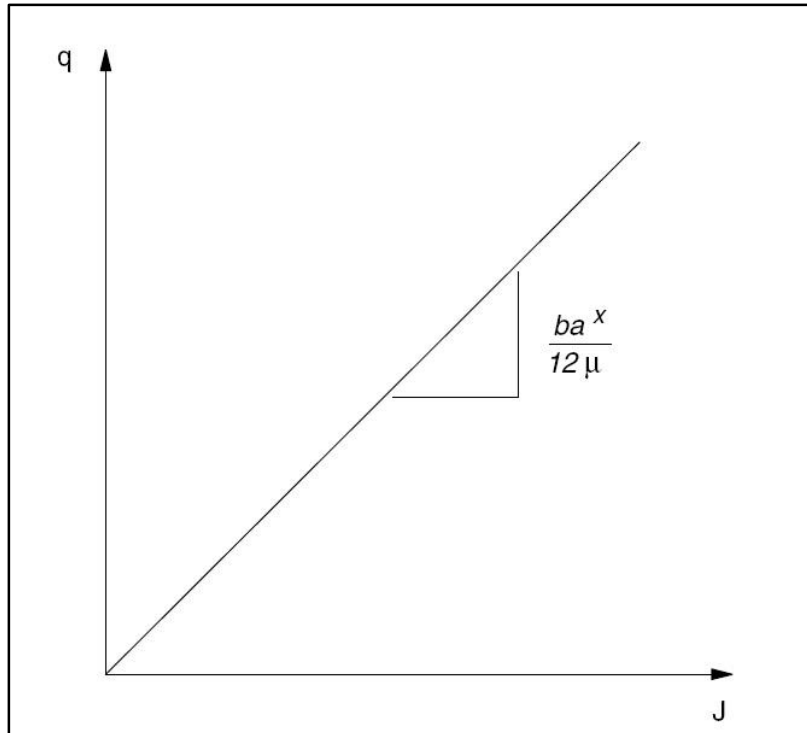
a το υδραυλικό άνοιγμα της επαφής

l 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 πρόγραμμα UDEC ο χρήστης μπορεί να αλλάξει τον συντελεστή περατότητας και το υδραυλικό άνοιγμα της ασυνέχειας.

Για νευτωνική ροή, ο ρυθμός ροής ανά μονάδα πλάτους q , σχετίζεται γραμμικά με την κλίση πίεσης J , όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (3.12)



Εικόνα 3-12 Σχέση ροής - κλίσης για νευτώνιο υγρό στο πρόγραμμα UDEC

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

$$q = \frac{ba^x J}{12\mu} \quad (3.31)$$

όπου:

- α το πλάτος της ρωγμής (άνοιγμα)
- b εμπειρικός συντελεστής
- μ το δυναμικό ιξώδες του ρευστού
- x 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 **Δρ** 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, f_s , συνάρτηση του βαθμού κορεσμού, s ,

$$f_s = s^2(3 - 2s) \quad (3.32)$$

Η εξίσωση είναι εμπειρική και $f_s=0$ αν $s=0$ και $f_s=1$ 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:

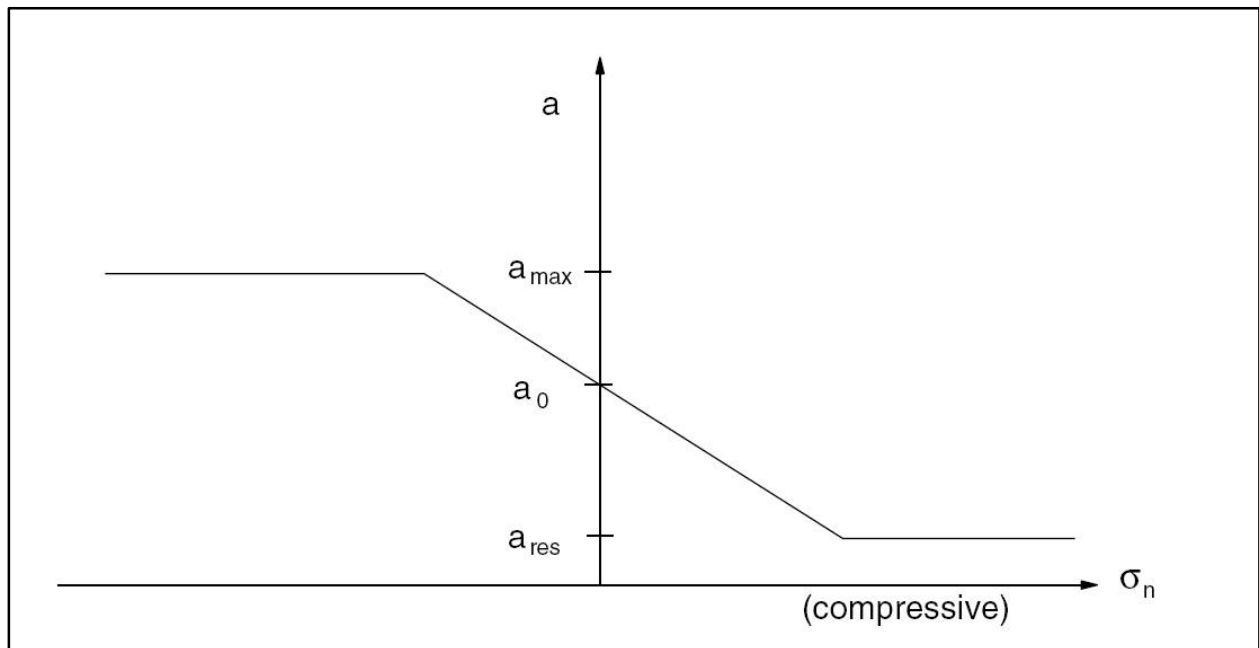
$$\alpha = \alpha_0 + u_n \quad (3.33)$$

Όπου :

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

u_n 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} (η οποία είναι εξ' ορισμού 5 φορές μεγαλύτερη από την παραμένουσα αλλά μπορεί να οριστεί και από το χρηστή). Η παραπάνω έκφραση είναι μια πολύ απλή συσχέτιση ανάμεσα στο μηχανικό και υδραυλικό άνοιγμα των ασυνεχειών. Εντούτοις, μπορούν να χρησιμοποιηθούν περισσότερο λεπτομερείς συσχετίσεις, όπως ο εμπειρικός νόμος του Barton (1985).



Εικόνα 3-13 Συσχέτιση μεταξύ υδραυλικού ανοίγματος α και joint normal stress σ_n στο πρόγραμμα 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 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 οριακή κίνησης των γειτονικών ογκοτεμαχίων. Η νέα πίεση του τομέα που προκύπτει είναι :

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

Όπου :

p_0	η πίεση του τομέα στο προηγούμενο χρονικό βήμα
Q	το άθροισμα ρυθμού ροής στον τομέα από τις γειτονικές επαφές
K_w	το μέτρο συμπίεσης του ρευστού
ΔV	$V - V_0$
V_m	$\frac{V + V_0}{2}$

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

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

Όπου :

s_0	ο βαθμός κορεσμού του τομέα στο προηγούμενο χρονικό βήμα.
-------	---

Όσο $s < 1$, η πίεση παραμένει μηδέν και εφαρμόζεται ο τύπος 3.34. Για τιμές του $s > 1$ το s θέτεται 1 και εφαρμόζεται ο τύπος 3.35.

3.9 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:

- α) Το ρευστό μέσα στην ασυνέχεια έχει μεγάλη ακαμψία, λόγω του μικρού ανοίγματος
- β) 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.

$$\Delta V_f = \Sigma q \Delta t_f \quad (3.36)$$

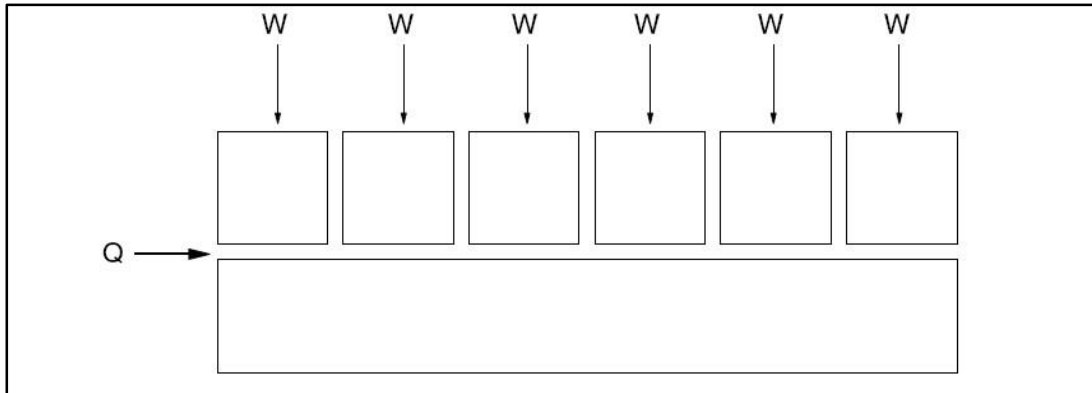
Ο όγκος που υπολογίζεται δεν μεταφράζεται αμέσως σε μετατοπίσεις ογκοτεμαχίων βραχόμαζας, αλλά σύμφωνα με το πρόγραμμα αποθηκεύεται σε ένα «μπαλόνι» το οποίο είναι συνδεδεμένο με τον αντίστοιχο τομέα. Στη συνέχεια, ο χρόνος ροής διατηρείται σταθερός και επιτρέπεται στο περιεχόμενο του κάθε «μπαλονιού» 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 μία επιπρόσθετη οριακή συνθήκη πίεσης, που προέρχεται από την διαρροή του ρευστού μέσα στον τομέα. Το σύστημα διαρροής περιγράφεται στην παρακάτω εξίσωση :

$$p' = p^0 + F_p(\Delta V_{stored} - \Delta V_{domain}) \quad (3.37)$$

Όπου :

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

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



Εικόνα 3-14 Ακραία περίπτωση όπου η ταχύτητα διάδωσης 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 ρωγματομένη 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 :

$$u = k_f J \quad (3.38)$$

Όπου :

J η υδραυλική κλίση

Η υδραυλική αγωγιμότητα της ρωγμής δίνεται από την εξίσωση :

$$k_f = \frac{a^2 g}{12\nu} \quad (3.39)$$

Όπου :

α το πλάτος της ρωγμής
 ν το κινηματικό ιξώδες του υγρού
 g η επιτάχυνση της βαρύτητας

Ο ρυθμός ροής ανά μονάδα πλάτους εκφράζεται ως :

$$q = \nu \alpha = \frac{\alpha^3 g}{12\nu} J \quad (3.40)$$

συνήθως αναφέρεται ως κυβικός νόμος της ροής.

Κεφάλαιο 4 Αριθμητικά μοντέλα με τη χρήση του προγράμματος UDEC

4.1 Γενικές παραδοχές

Για την προετοιμασία των προσομοιωμάτων έπρεπε να ληφθούν ορισμένες παραδοχές. Αυτές αφορούν στα γεωμετρικά στοιχεία των μοντέλων, τα μηχανικά χαρακτηριστικά βραχομάζας και των ασυνεχειών. Όλα αυτά γίνονται για να υπάρχει ισοδυναμία μεταξύ των προσομοιωμάτων με σκοπό να καθίστανται συγκρίσιμα τα εξαγόμενα αποτελέσματα. Στους πίνακες 4-1 και 4-2 παρουσιάζονται αντιστοίχως η γεωμετρία του μοντέλου και οι μηχανικές ιδιότητες της βραχομάζας και των ασυνεχειών που χρησιμοποιήθηκαν στα μοντέλα του προγράμματος του UDEC.

Διαστάσεις μοντέλου (block)	200m X 100m
Οικογένειες ασυνεχειών	2
Προσανατολισμός ασυνεχειών	0° και 90° (ως προς το οριζόντιο επίπεδο)
Απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών (spacing) (m)	6 m
Διάμετρος σήραγγας d (m)	10 m
Βάθος σήραγγας (m)	50 m
Συντεταγμένες κέντρου σήραγγας	(200,150)
Διατομή σήραγγας	Κυκλική
Αδιαπέρατα όρια μοντέλου	Επάνω, Δεξιό

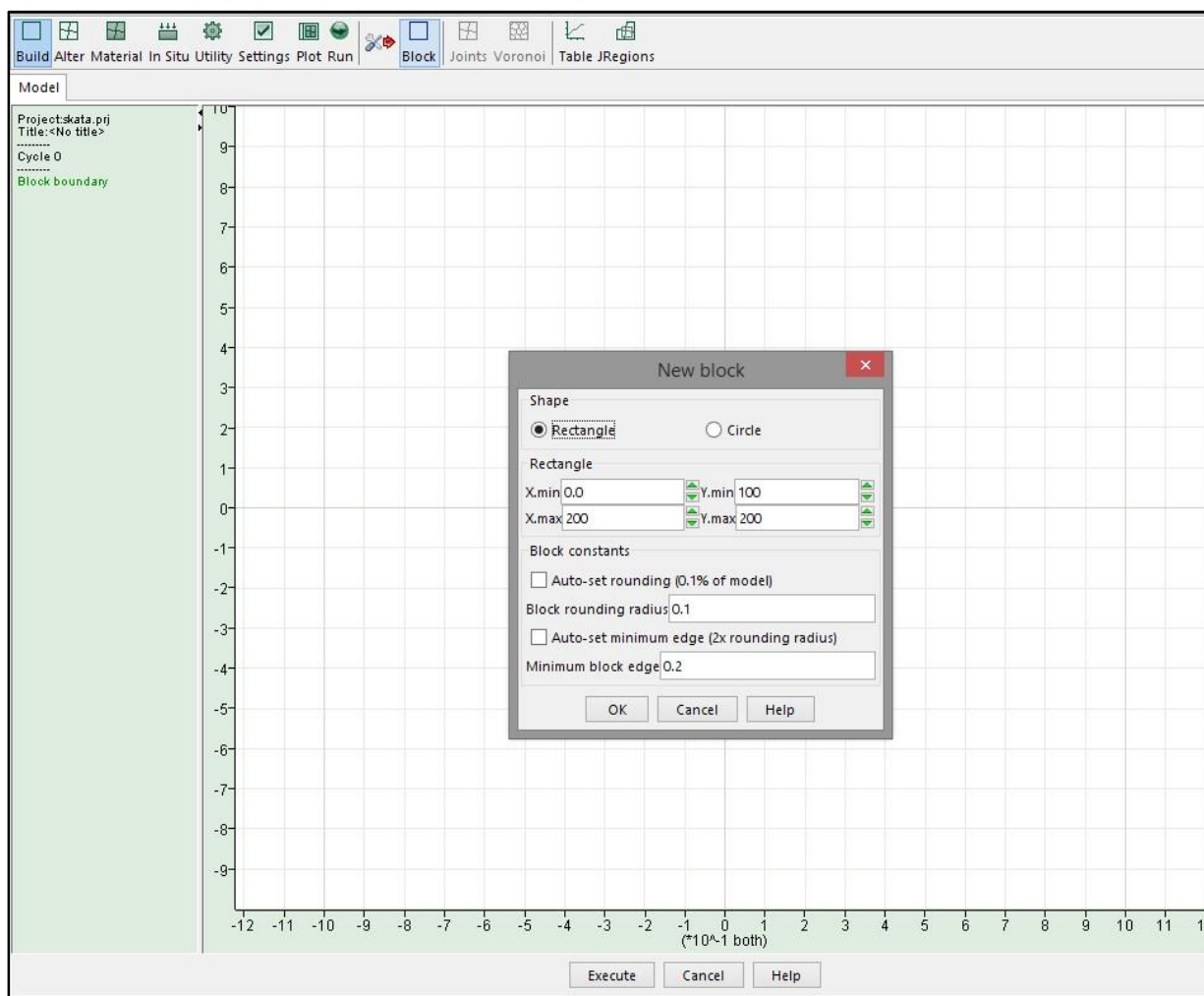
Πίνακας 4-1 Γεωμετρικά χαρακτηριστικά μοντέλου

Μέτρο διάτμησης (G)	$2.26 \cdot 10^{10}$ Pa
Μέτρο συμπίεσης (E)	$1.10 \cdot 10^{10}$ Pa
Πυκνότητα πετρώματος (ρ)	2700 kg/m ³
Ορθή δυστροπία (jk_n)	$1 \cdot 10^{10}$ Pa
Διατμητική δυστροπία (jk_s)	$1 \cdot 10^{10}$ Pa
Αρχικό άνοιγμα ασυνεχειών (a_0)	$1 \cdot 10^{-3}$ m
Παραμένον άνοιγμα ασυνεχειών (a_r)	$5 \cdot 10^{-4}$ m
Περατότητα ασυνέχειας (k_j)	83,33 Pa ⁻¹ s ⁻¹
Πυκνότητα νερού (ρ_w)	1000 kg/m ³

Πίνακας 4-2 Μηχανικές ιδιότητες βραχομάζας και ασυνεχειών

4.2 Προετοιμασία των αριθμητικών μοντέλων

Το πρώτο βήμα είναι να δοθεί στο UDEC η κατάλληλη εντολή ώστε να προσομοιώσει ροή μέσω των ασυνεχειών της βραχομάζας. Το παραπάνω πραγματοποιείται με την εντολή **config gwflow**. Στη συνέχεια η επιλογή της σταθερής μόνιμης ροής γίνεται μέσω της εντολής **set flow steady on**. Για την κατασκευή του μοντέλου, πρέπει πρώτα να προσδιοριστεί η γωνία στρογγυλοποίησης του κάθε ογκοτεμαχίου. Με τη χρήση της εντολής **ROUND** ορίζεται το μήκος στο οποίο θα πραγματοποιηθεί στρογγύλευση των γωνιών των ογκοτεμαχίων του UDEC σε 0.1 m και μέσω της εντολής **EDGE** ορίζεται η ελάχιστη τιμή του μήκους της πλευράς του κάθε ογκοτεμαχίου 0.2 m. Οι τέσσερις αυτές εντολές ήταν οι αρχικές για όλα τα μοντέλα της παρούσας διπλωματική εργασίας. Στη συνέχεια με την εντολή **BLOCK**, κατασκευάζεται το δισδιάστατο τμήμα της βραχομάζας που διανοίγεται η σήραγγα. Για όλα τα αριθμητικά μοντέλα χρησιμοποιήθηκε block διαστάσεων 200m x 100m (εικόνα 4-1).

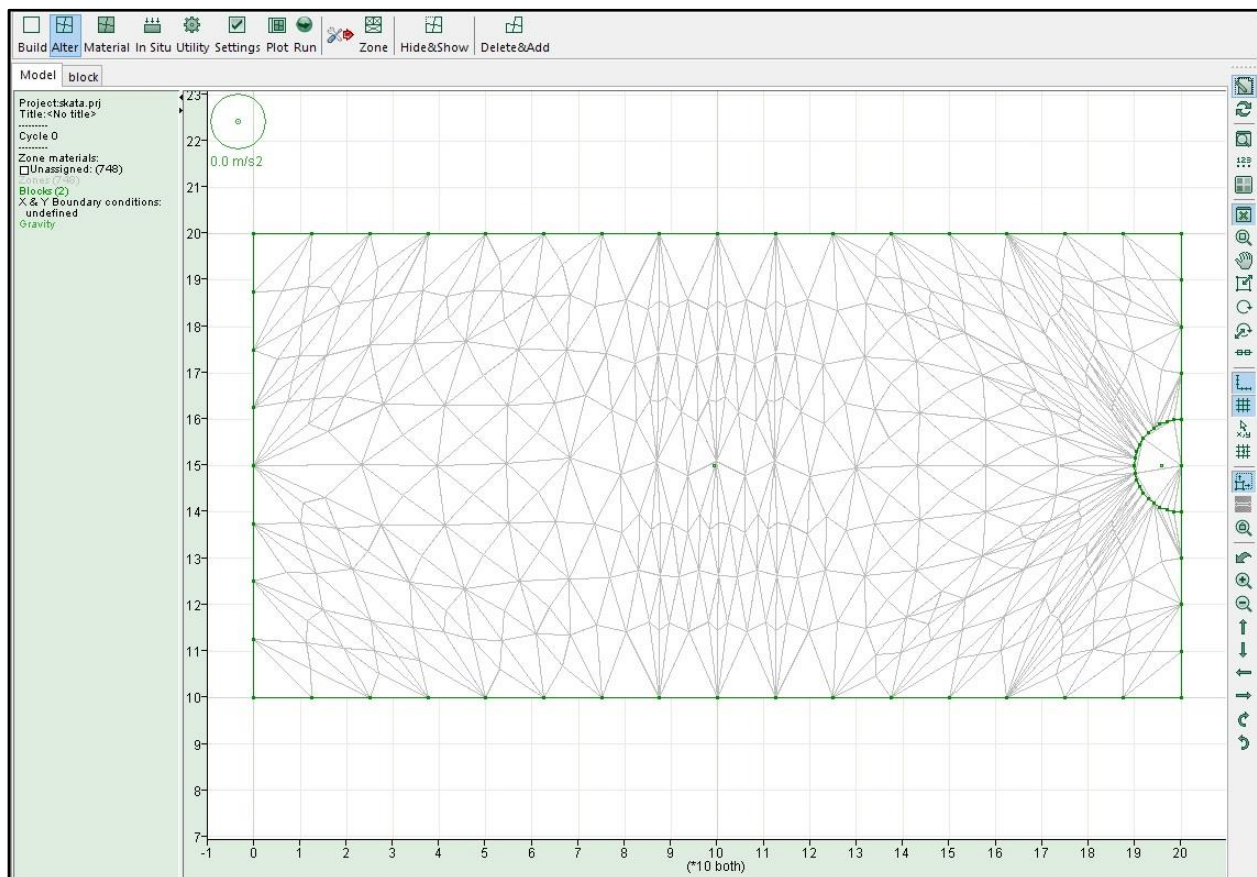


Εικόνα 4-1 Δημιουργία Block μέσω του γραφικού περιβάλλοντος του UDEC

Έπειτα, μέσω της εντολής **arc** τοποθετείται η μισή σήραγγα, η οποία είναι ακτίνας 5 m βρίσκεται σε βάθος 50 m και έχει άξονα συμμετρίας το δεξί άκρο του μοντέλου.

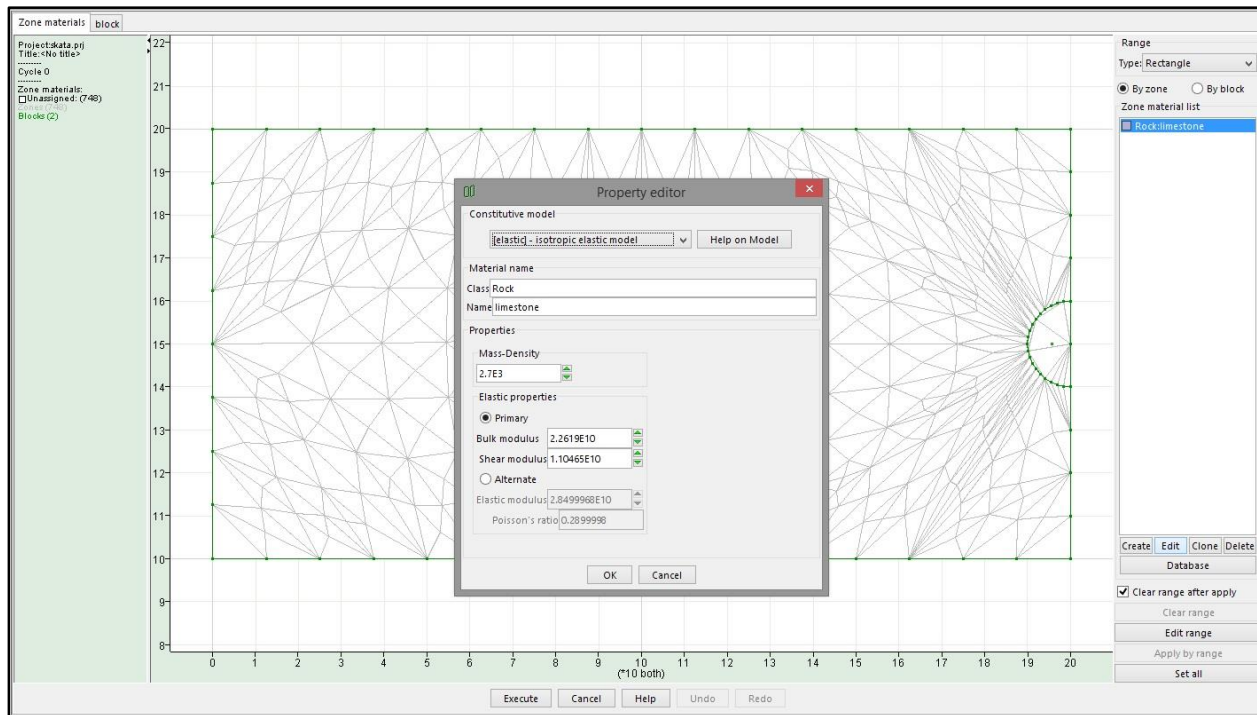
Τέλος μέσω της εντολής **GENERATE EDGE**, πραγματοποιείται η διακριτοποίηση του μοντέλου σε ζώνες πεπερασμένων διαφορών, ορίζοντας ως μέγιστο μήκος πλευράς μιας ζώνης πεπερασμένων διαφορών ίση με 20. Στην εικόνα 4-2 παρουσιάζεται το αριθμητικό μοντέλο όπως θα χρησιμοποιηθεί σε όλα τα μοντέλα της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Αξίζει να σημειωθεί ότι όσο πιο μικρό οριστεί αυτό το μήκος τόσο μεγαλύτερος θα είναι ο υπολογιστικός χρόνος. Επίσης σε μικρά block με μεγάλο μήκος πλευράς ζώνης πεπερασμένων διαφορών τα αποτελέσματα μπορεί να είναι ανακριβή. Μετά από πολλαπλές δοκιμές το μήκος που προαναφέρθηκε θεωρήθηκε επαρκές και με ακριβή αποτελέσματα για τα προσομοιώματα που δημιουργήθηκαν.



Εικόνα 4-2 Διακριτοποίηση του μοντέλου σε ζώνες πεπερασμένων διαφορών

Μετά την ολοκλήρωση της γεωμετρίας του μοντέλου, στην συνέχεια θα πρέπει να καθοριστούν οι ιδιότητες της βραχομάζας και των ασυνεχειών. Θεωρείται ότι η διάνοιξη γίνεται μέσα σε ασβεστόλιθο και οι μηχανικές του ιδιότητες της βραχομάζας παρουσιάζονται στην εικόνα 4-3. Οι τιμές στις παραμέτρους που παρουσιάζονται στην παρακάτω εικόνα αντιστοιχούν στις τιμές που δίνει η βάση δεδομένων του UDEC για ασβεστολιθική βραχομάζα. Οι τιμές αυτές μπορούν να εισαχθούν στο αριθμητικό μοντέλο και μέσω της εντολής **prop mat 1**.



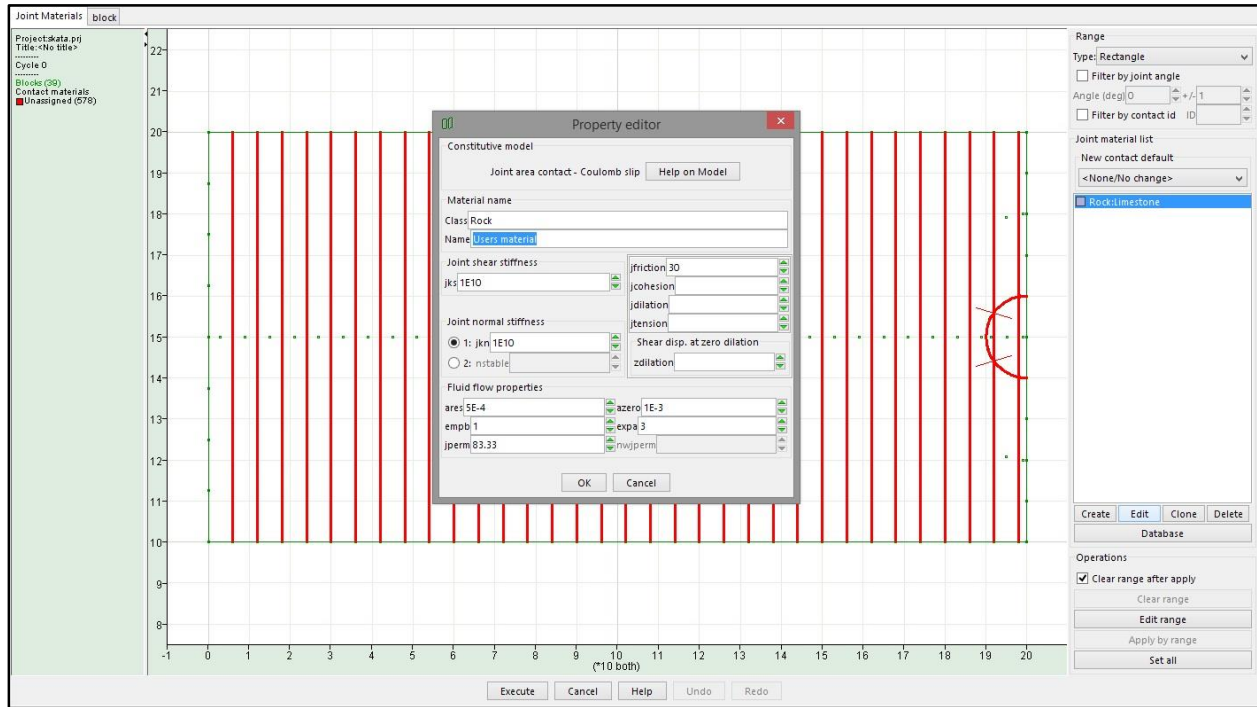
Εικόνα 4-3 Εισαγωγή των μηχανικών ιδιοτήτων της βραχομάζας

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 η σταθερά περατότητας που χρησιμοποιεί το UDEC για αριθμητικές προσομοιώσεις ροής
- $azero$: είναι το αρχικό άνοιγμα των ασυνεχειών υπό μηδενική ορθή τάση

- a_{res} : είναι το παραμένον άνοιγμα των ασυνεχειών. Το άνοιγμα των δεν μπορεί να μειωθεί κάτω του a_{res} ανεξαρτήτως του φυσικού εντατικού πεδίου.

Όπως για τις μηχανικές ιδιότητες της βραχομάζας αντίστοιχα υπάρχει η δυνατότητα εισαγωγής των μηχανικών ιδιοτήτων των ασυνεχειών μέσω του γραφικού περιβάλλοντος του UDEC εικόνα 4-4. Στην εισαγωγή των ιδιοτήτων των ασυνεχειών δεν χρησιμοποιήθηκαν τιμές από τη βάση δεδομένων του προγράμματος.



Εικόνα 4-4 Εισαγωγή των μηχανικών ιδιοτήτων των ασυνεχειών

Στο δίκτυο ασυνεχειών θα μπορούσαν να δοθούν υψηλές τιμές ορθής και 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 j_{kn} και j_{ks} θα πρέπει να είναι δέκα φορές μικρότερη από την αντίστοιχη ακαμψία των γειτονικών ζωνών. Οι τιμές υπολογίζονται από την εξίσωση :

$$k_n \text{ και } k_s \leq 10 \left[\max \left[\frac{K + \frac{4}{3}G}{\Delta z_{min}} \right] \right] \quad (4.1)$$

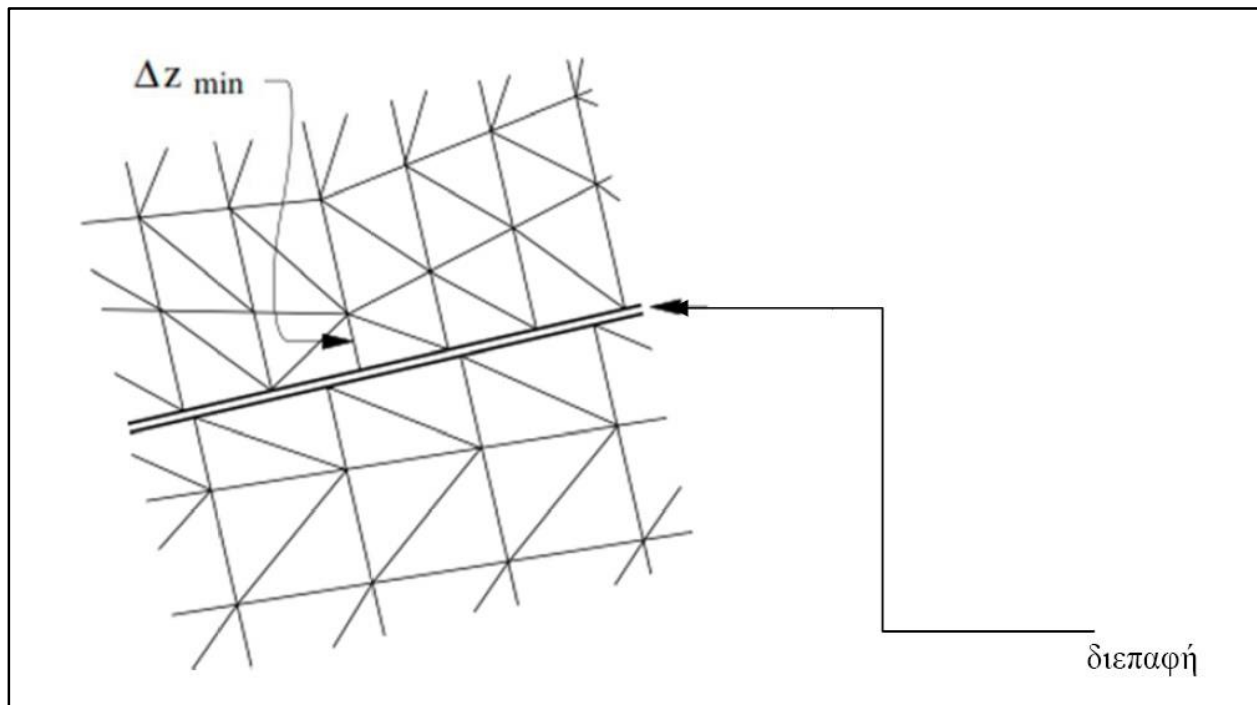
Όπου :

k_n και k_s 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



Εικόνα 4-5 Διαστάσεις ζωνών που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της δυστροπίας

Ωστόσο, λόγω της μικρής περατότητας των ασυνεχειών, εμποδίζεται η κίνηση του ρευστού, 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 χρήστη τιμή. Όταν η αλληλοεπικάλυψη ξεπεράσει την επιτρεπόμενη τότε εμφανίζεται σφάλμα κατά την επίλυση, το οποίο αναφέρεται ως «contact overlap». Για να αποφύγουμε το overlap, θα δώσουμε μεγαλύτερη τιμή ακαμψίας, δηλαδή $1 \cdot 10^{10}$.

Σχετικά με τις παραμέτρους $jcoh$ και $jfri$ στις ασυνέχειες αποδίδονται μηδενική συνοχή και γωνία τριβής 30° .

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

$$k_j = \frac{1}{12\mu} \quad (4.1)$$

Όπου :

k_j είναι η σταθερά περατότητας των ασυνεχειών

μ είναι η τιμή του δυναμικού ιξώδους του ρευστού

Στην συγκεκριμένη αριθμητική προσομοίωση, θεωρείται πως το ρευστό είναι νερό με κινηματικό ιξώδες (ν) 10^{-6} m²/sec και πυκνότητα (ρ) 1000 kg/m³. Όπως προαναφέρθηκε στο κεφάλαιο 2 η τιμή αυτή του κινηματικού ιξώδους είναι για καθαρό νερό 20° C.

Το δυναμικό ιξώδες υπολογίζεται από τον τύπο :

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (4.2)$$

Προκύπτει $\mu = 10^{-3}$ Pa*s και αντικαθιστώντας την τιμή αυτή στη σχέση (4.1) ο συντελεστής περατότητας ισούται με $k_j = 83.33$ Pa⁻¹*s⁻¹.

4.3 Πρώτη σειρά αριθμητικών μοντέλων για εισροή υδάτων σε σήραγγα

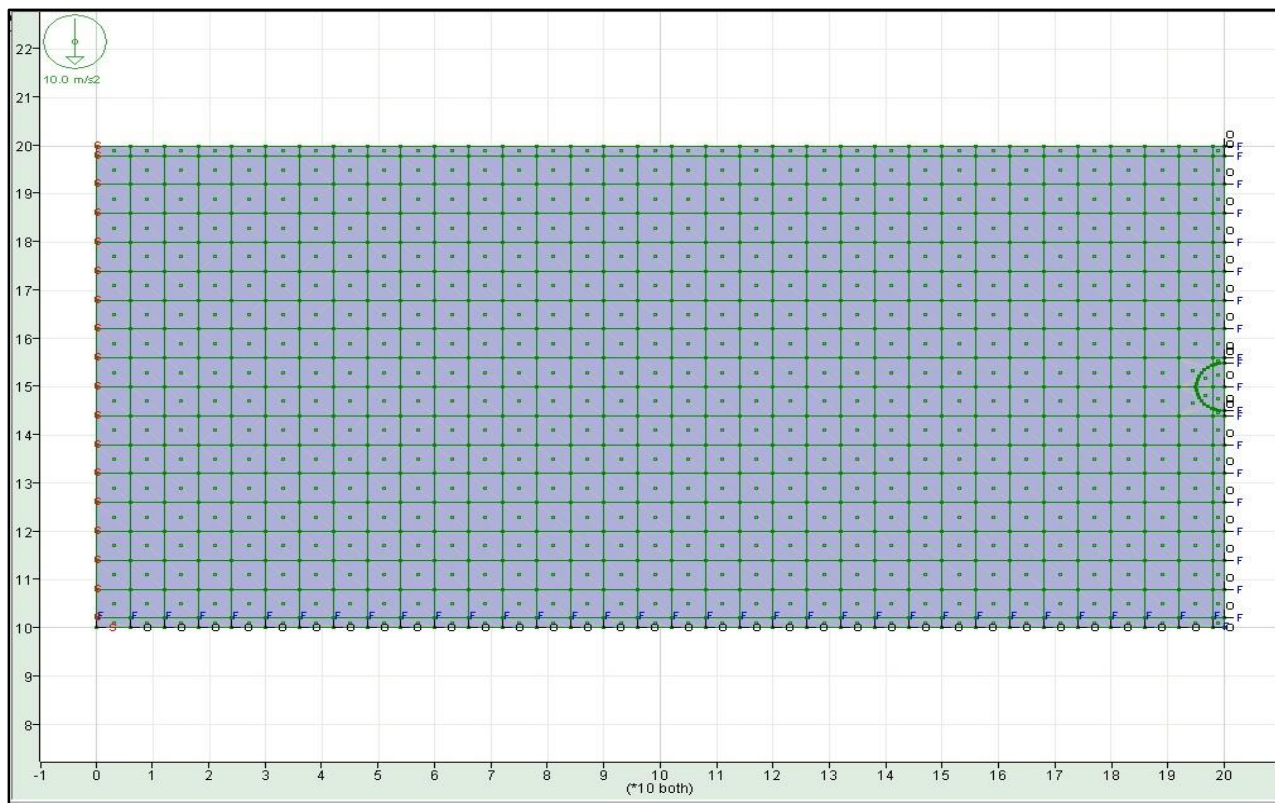
Στην πρώτη σειρά των αριθμητικών μοντέλων, θα εξεταστεί η επιρροή που ασκεί το ύψος του υδροφόρου ορίζοντα στην εισροή υδάτων μέσα στη σήραγγα.

Θα οριστούν δύο διαφορετικά ύψη για τον υδροφορέα στο ίδιο γεωμετρικό μοντέλο με σκοπό τη σύγκριση των αποτελεσμάτων. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο συντελεστής πλευρικών πιέσεων για αυτή τη σειρά αριθμητικών μοντέλων είναι ίσος με τη μονάδα ($K=1$) και ότι η σήραγγα είναι ανυποστήρικτη, χωρίς επένδυση με σκοπό να μην εμποδίζεται η εισροή υπόγειων υδάτων μέσα σε αυτή. Οι υπολογισμοί γίνονται εντός του χρόνου αυτό-υποστήριξης της σήραγγας.

4.3.1 Ύψος υδροφόρου ορίζοντα στην επιφάνεια του εδάφους

Στο πρώτο προσομοίωμα της πρώτης σειράς αριθμητικών μοντέλων ο υδροφόρος ορίζοντας ορίστηκε στο ύψος της επιφάνειας του εδάφους (200m).

Στην παρακάτω εικόνα (εικόνα 4-6) παρουσιάζεται το τελικό γεωμετρικό αποτέλεσμα του προσομοιωμάτως πριν την εκσκαφή της σήραγγας με τις παραδοχές που προαναφέρθηκαν στην αρχή του κεφαλαίου.



Εικόνα 4-6 Γεωμετρικό μοντέλο με ύψος υδροφόρου ορίζοντα στην επιφάνεια του εδάφους.

Στο UDEC για τη διευκόλυνση του προγράμματος με σκοπό τον υπολογισμό του τελικού αποτελέσματος πρέπει να δοθούν οι αρχικές συνθήκες του μοντέλου καθώς και οι συνθήκες στα όρια αυτού πριν από την αρχική επίλυση. Αυτό πραγματοποιείται μέσω των εντολών **Insitu** και **boundary**. Εκτός από τα απαραίτητα μεγέθη που πρέπει να εισαχθούν πρέπει να γίνει και εισαγωγή των συντεταγμένων που θα εφαρμοστεί η εντολή. Παραδείγματος χάρη για να τεθεί το κάτω όριο του προσομοιώματος σταθερό κατά τη διάρκεια της επίλυσης δίνεται η εξής εντολή :

boundary y velocity 0 range -0.1,200.1 99.9,100.1

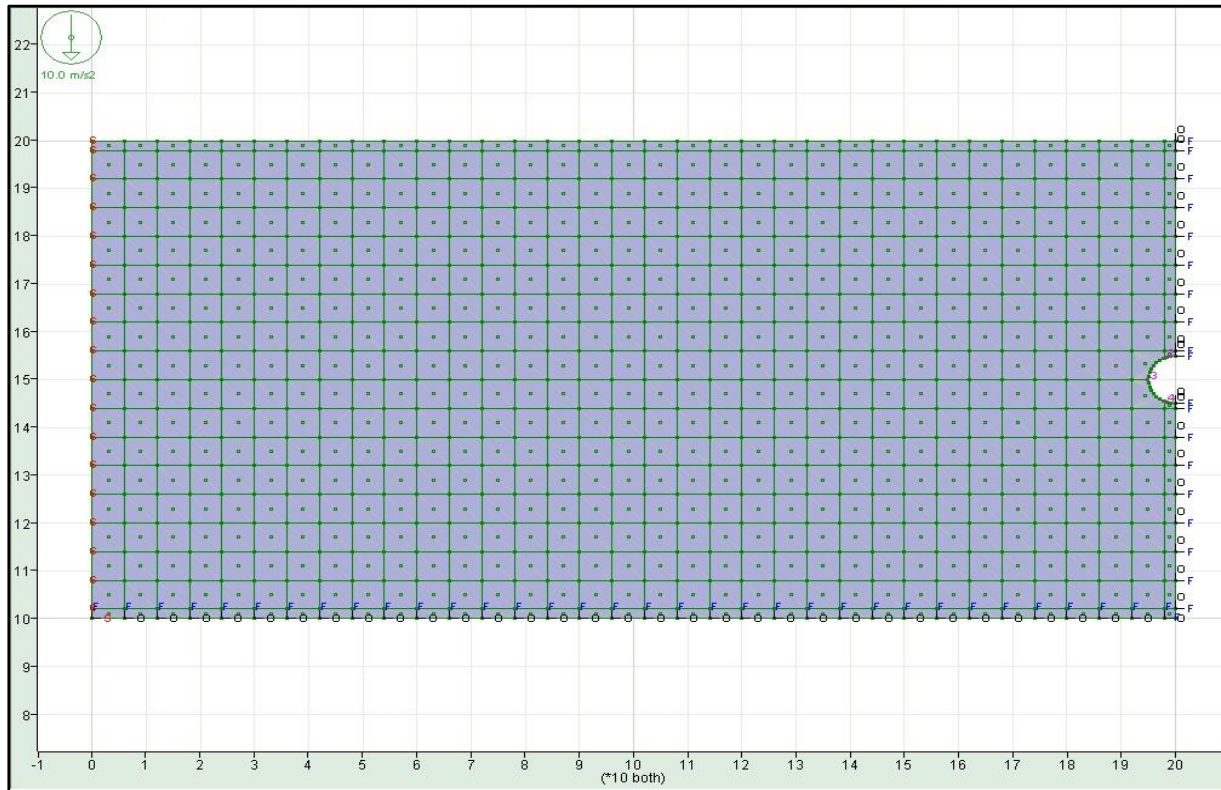
Εν συνεχεία πραγματοποιείται επίλυση του μοντέλου υπό το αρχικός καθεστώς.

Μετάπειτα γίνεται εκσκαφή (εικόνα 4-7) και επιλύεται εκ νέου το μοντέλο με σκοπό τον εντοπισμό τυχών αστοχιών μετά τη διάνοιξη της σήραγγας.

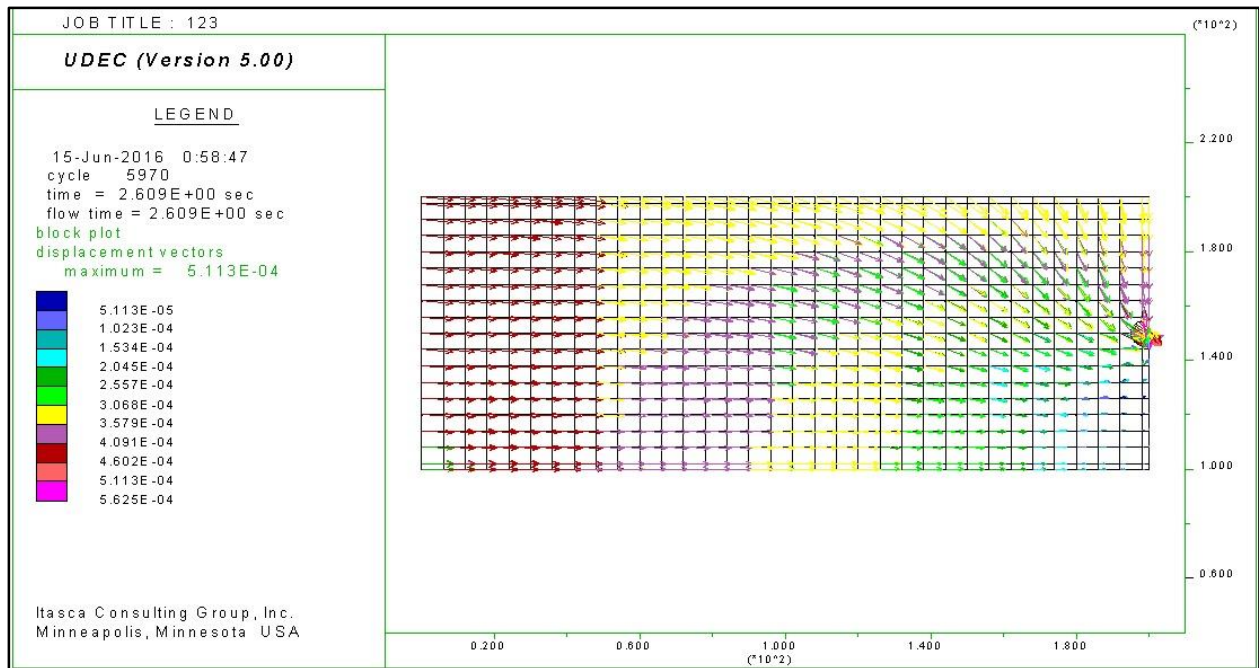
Μετά την επίλυση δεν υπήρξαν αστοχίες οπότε θεωρήθηκε περιττό σε πρώτη φάση η υποστήριξη να περιλαμβάνει μέτρα υποστήριξης στο συγκεκριμένο γεωμετρικό προσομοίωμα. Στην εικόνα 4-8

παρουσιάζονται οι μετακινήσεις μετά την εκσκαφή με τις μέγιστες να ξεπερνάνε κατά λίγο το μισό χιλιοστό και να εμφανίζονται στη στέψη της σήραγγας.

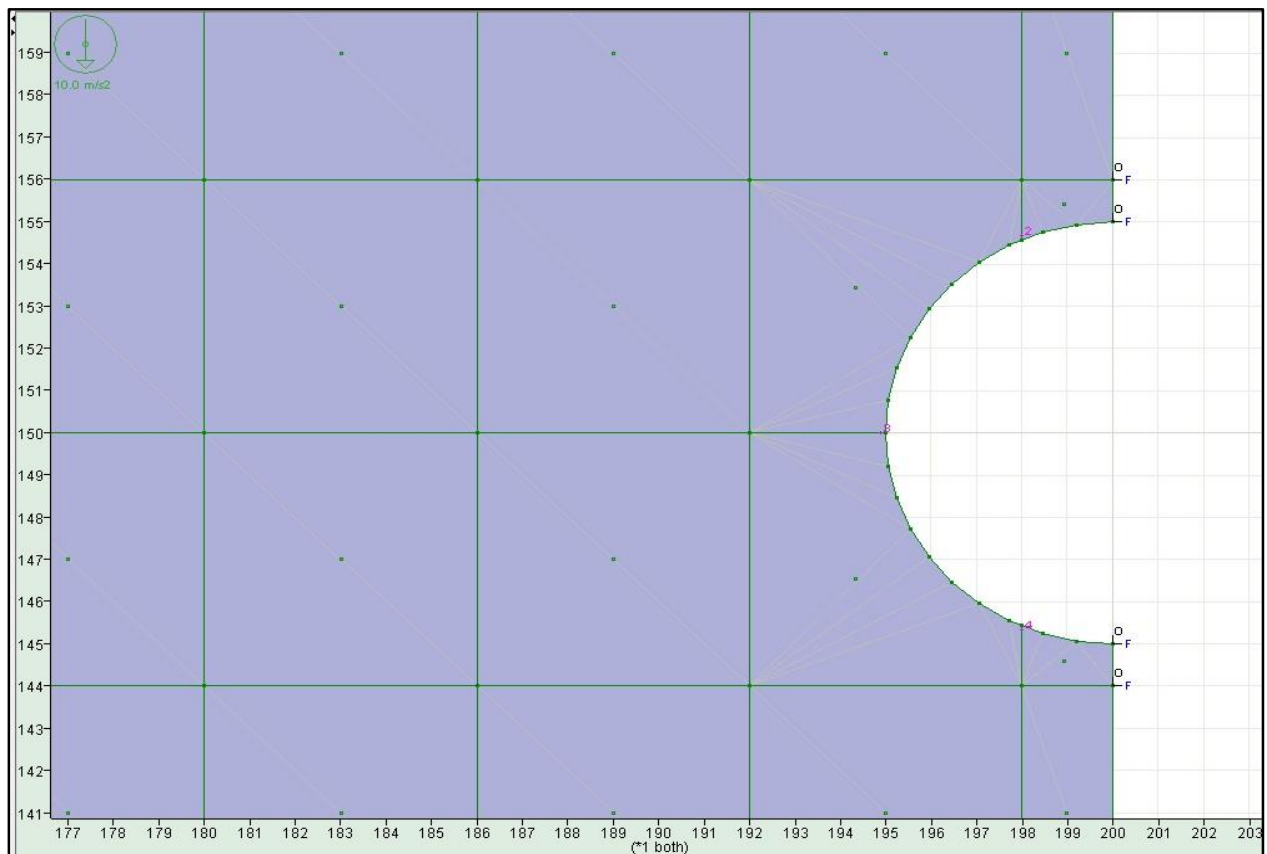
Στη συνέχεια ορίστηκαν σημεία παρατήρησης εισροής νερού. Τα σημεία αυτά τοποθετούνται στις επαφές των ασυνχειών και της σήραγγας με σκοπό τη μέτρηση της ροής του νερού (εικόνα 4-9).



Εικόνα 4-7 Μοντέλο με ύψος υδροφόρου ορίζοντα στην επιφάνεια του εδάφους μετά την εκσκαφή της σήραγγας.



Εικόνα 4-8 Διανύσματα μετακίνησης μετά τη διάνοιξη της σήραγγας.

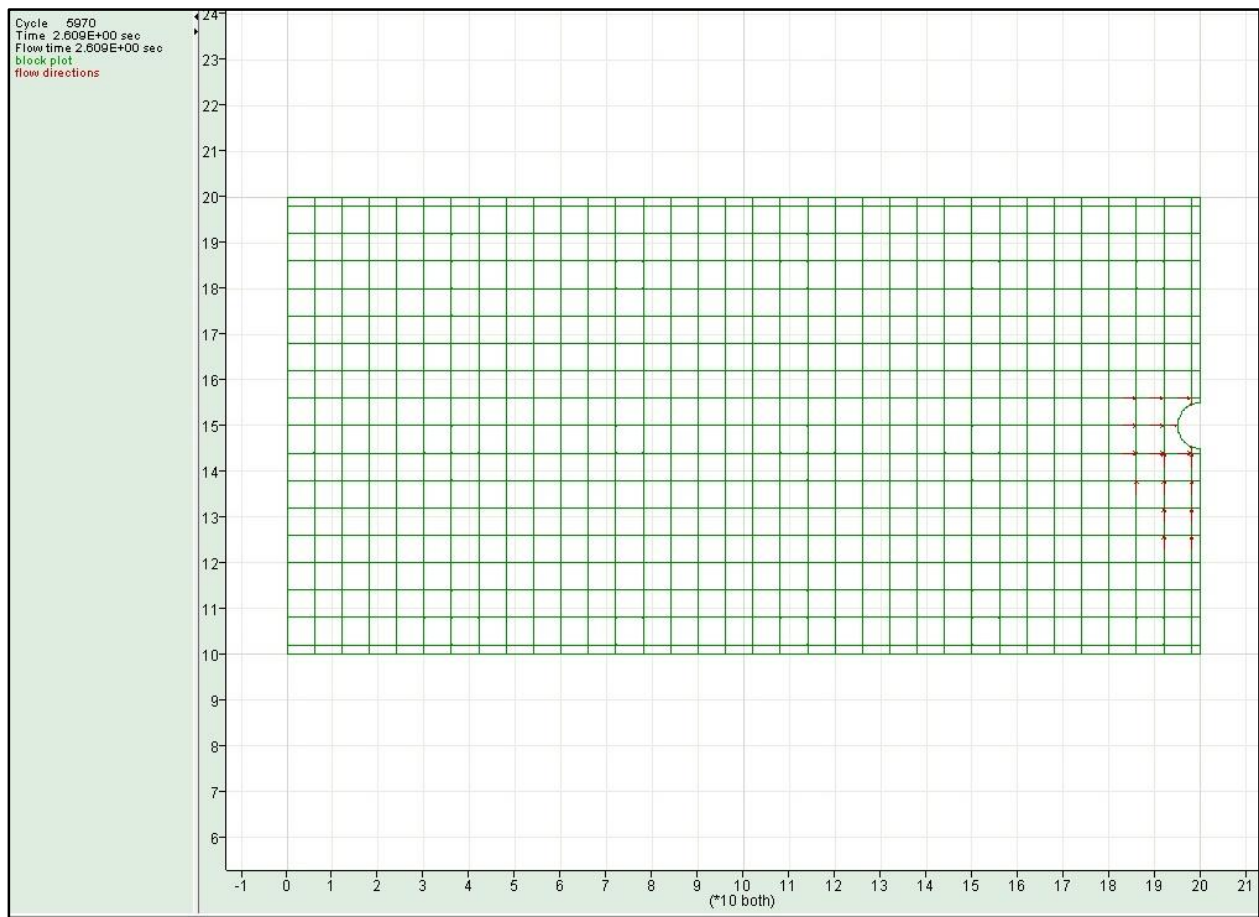


Εικόνα 4-9 Σημεία παρατήρησης εισροής νερού στη σήραγγα.

Μετά τον ορισμό των σημείων παρατήρησης στο μοντέλο δόθηκε η εντολή **cycle 5000** η οποία επιλύει το μοντέλο μηχανικά αλλά και προσομοιώνοντας τη ροή μέσα σε αυτό.

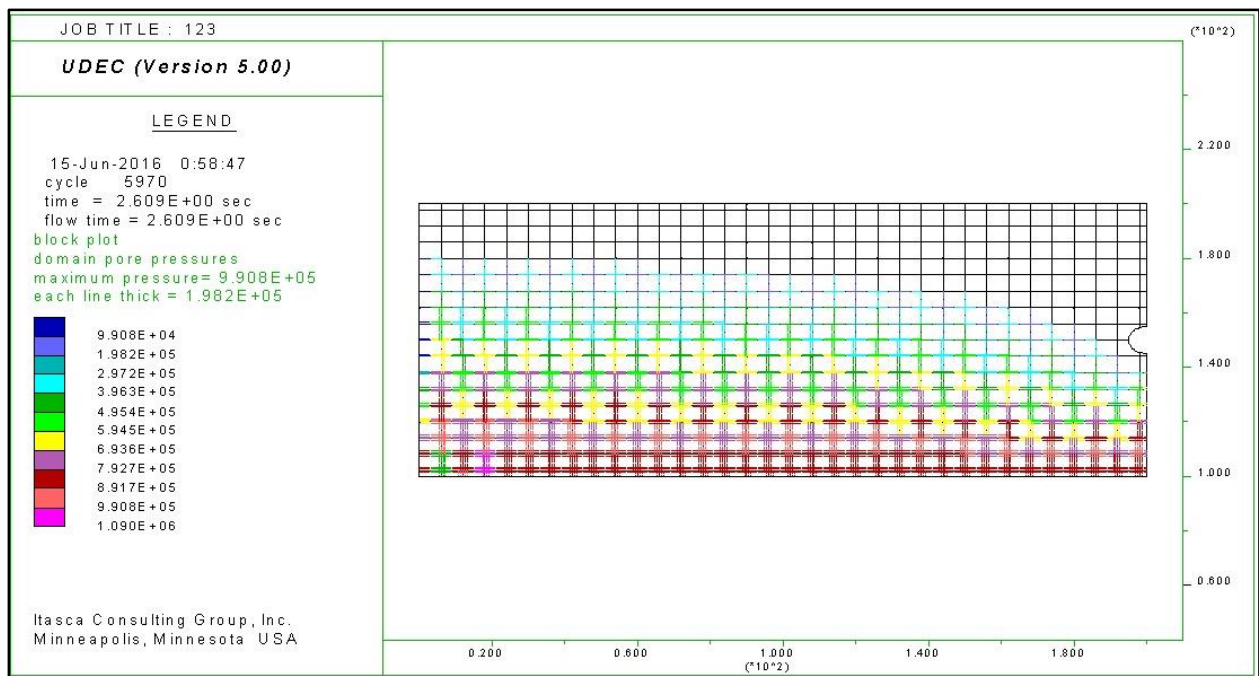
Στην εικόνα 4-10 παρουσιάζεται η κίνηση του νερού προς τη σήραγγα για συνθήκες σταθερής ροής. Παρατηρείται πως στις κατακόρυφες ασυνέχειες δεν υπάρχουν τα αντίστοιχα βέλη – διανύσματα ροής. Αυτό συμβαίνει διότι η σήραγγα έχει λειτουργήσει αποστραγγιστικά με αποτέλεσμα την πτώση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα.

Στην εικόνα 4-11 αποτυπώνεται η πτώση αυτή μέσω της πίεσης πόρων.

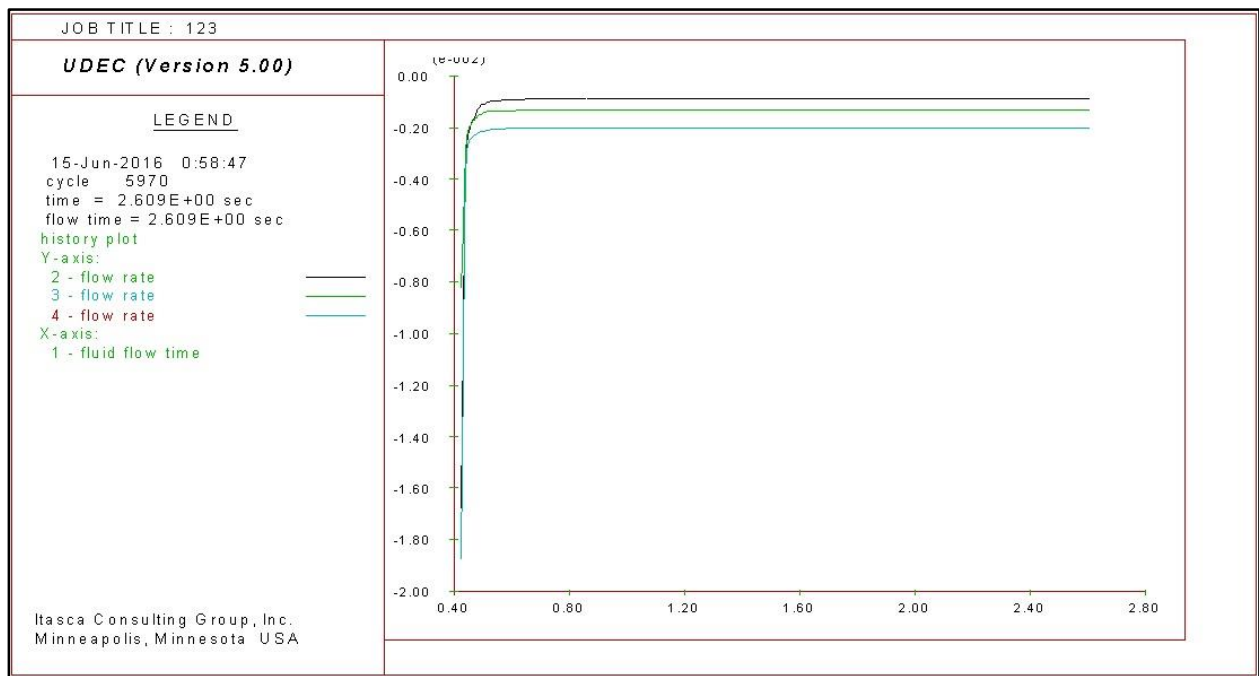


Εικόνα 4-10 Διανύσματα ροής υπογείων υδάτων

Τέλος τα αποτελέσματα σταθερής ροής για κάθε σημείο παρατήρησης παρουσιάζονται στην εικόνα 4-12 και αναλυτικότερα στον πίνακα 4-3.



Εικόνα 4-11 Πίεση πόρων μετά την εκσκαφή της σήραγγας.



Εικόνα 4-12 Αποτελέσματα σταθερής ροής με ύψος υδροφόρου στην επιφάνεια του εδάφους.

Σημείο παρατήρησης	Εισροή Q (m ³ /sec)
2	0,9 x 10 ⁻³
3	1,3 x 10 ⁻³
4	2 x 10 ⁻³
Σύνολο	4,2 x 10⁻³
Τελικό αποτέλεσμα	8,4 x 10⁻³

Πίνακας 4-3 Αποτελέσματα εισροής υδάτων για ύψος υδροφόρου στην επιφάνεια του εδάφους.

Όπως προαναφέρθηκε η σήραγγα έχει άξονα συμμετρίας το δεξί άκρο του προσομοιώματος. Άρα η συνολική εισροή είναι η διπλάσια από αυτή που αναγράφεται ως σύνολο στον παραπάνω πίνακα.

4.3.1.1 Υπολογισμός σταθερής ροής του πρώτου προσομοιώματος με τη χρήση αναλυτικών τύπων.

Ο υπολογισμός της σταθερής εισροής έγινε με τη χρήση του παρακάτω αναλυτικού τύπου (Goodman 1965)

$$Q = \frac{2\pi KL(H_0)}{\ln\left(\frac{2H_0}{r}\right)} \quad (4.3)$$

Όπου :

Q η εισροή

K η υδραυλική αγωγιμότητα

L το μήκος της σήραγγας

H₀ η απόσταση του κέντρου της σήραγγας από τον υδροφόρο ορίζοντα

r η ακτίνα της σήραγγας

Για την εκτίμηση της υδραυλικής αγωγιμότητας χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω εξίσωση :

$$K = \frac{a^3 g}{12vs} \quad (4.4)$$

Όπου :

K η υδραυλική αγωγιμότητα

α	το παραμένον άνοιγμα της ασυνέχειας
ν	το κινηματικό ιξώδες του υγρού
g	η επιτάχυνση της βαρύτητας
s	η απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών

Το μοντέλο έχει σταθερή υδραυλική αγωγιμότητα στον κατακόρυφο και στον οριζόντιο άξονα λόγω της γεωμετρίας του.

Για το συγκεκριμένο προσομοίωμα ισχύουν οι παρακάτω τιμές :

$$\alpha = 0,001 \text{ m}$$

$$\nu = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec}$$

$$s = 6 \text{ m}$$

$$g = 10 \text{ m/ sec}^2$$

Από τα παραπάνω προκύπτει :

$$K = 1,38 \times 10^{-4} \text{ m/sec}$$

Οπότε η εισροή που αντιστοιχεί στο μοντέλο υπολογίζεται από τον τύπο 4.3

$$Q = 14,557 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{sec}$$

Συγκρίνοντας την εισροή που προέκυψε από τον αναλυτικό τύπο του Goodman με την παροχή που εκτίμησε το πρόγραμμα UDEC διαπιστώνεται η υπερεκτίμηση της εισροής από τον αναλυτικό τύπο κατά 75 %.

Υπολογίστηκε η εισροή και με τον αναλυτικό τύπο του El Tani (2003), τύπος ο οποίος αναφέρεται ως πιο ακριβής βιβλιογραφικά σε σύγκριση με τον τύπο του Goodman.

$$Q = 2\pi KL \frac{\lambda^2 - 1}{\lambda^2 + 1} \frac{(H_0)}{\ln \lambda} \quad (4.5)$$

Όπου :

$$\lambda = \frac{(H_0)}{r} - \sqrt{\frac{(H_0)^2}{r^2} - 1} \quad (4.6)$$

Η εισροή που προκύπτει με τη χρήση του τύπου 4.5 είναι :

$$Q = 14,449 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{sec}$$

Με άλλα λόγια τα αναλυτικά μοντέλα είναι πιο συντηρητικά στις εκτιμήσεις τους σε σύγκριση με τα αριθμητικά.

4.3.1.2 Επαναπροσδιορισμός των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τους αναλυτικούς τύπους.

Όπως προαναφέρθηκε στο κεφάλαιο 2 της παρούσας διπλωματικής εργασίας έχει διαμορφωθεί η εξής εμπειρική σχέση :

$$Q = \alpha Q_G^b \quad (4.7)$$

Η οποία έχει διαμορφωθεί εμπειρικά και έχει σκοπό να κάνει τα αποτελέσματα της εισροής υδάτων που προκύπτουν από τους αναλυτικούς τύπους ρεαλιστικότερα.

$$F = \frac{\sum_{i=1}^n \cos a_i}{n} \left(\frac{K_{min}}{K_{max}} \right)^{0.5\varphi} \quad (4.8)$$

$$b = \ln 3.463 F^{0.0342} \quad (4.9)$$

$$\alpha = \begin{cases} 3.448 F^{0.8834} & \text{για } F < 1 \\ 3.2411 F^{0.6805} & \text{για } F \geq 1 \end{cases} \quad (4.10)$$

Με τη χρήση των τύπων 4.8, 4.9, 4.10 προκύπτει ότι :

$$F = 0,5$$

$$a = 1,869$$

$$b = 1,218$$

Αντικαθιστώντας τα παραπάνω αποτελέσματα στην εξίσωση (4.7) καθώς και την εισροή που υπολογίστηκε από τον τύπο του Goodman, η νέα τιμή της εισροής που προκύπτει είναι :

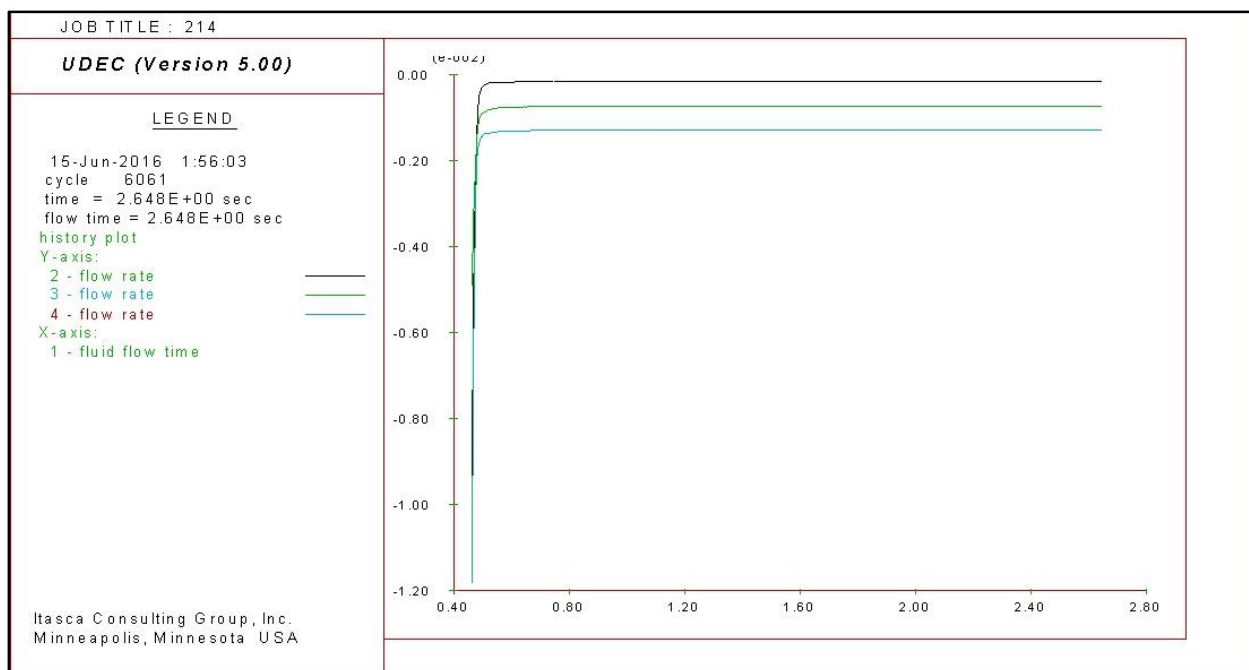
$$Q = 10,81 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{sec}$$

Τιμή η οποία είναι λιγότερο συντηρητική σε σχέση με τις τιμές που προέκυψαν από τους αναλυτικούς τύπους του Goodman και El Tani, αλλά ταυτόχρονα υπερεκτιμάει την εισροή σε σχέση με τα αποτελέσματα του προγράμματος UDEC κατά 28 %.

4.3.2 Ύψος υδροφόρου ορίζοντα 20 m κάτω από την επιφάνεια του εδάφους

Στο δεύτερο προσομοίωμα της πρώτης σειράς αριθμητικών μοντέλων ο υδροφόρος ορίζοντας ορίστηκε είκοσι μέτρα κάτω από τη επιφάνεια του εδάφους (180m). Ακολουθήθηκαν οι ίδιες διαδικασίες για το στήσιμο του μοντέλου και ο ίδιος τρόπος επίλυσης αυτού.

Στην εικόνα 4-13 και στον πίνακα 4-4 παρουσιάζονται οι παροχές που μετρήθηκαν από τα σημεία παρατήρησης για το συγκεκριμένο προσομοίωμα. Οι συντεταγμένες τοποθέτησης για τα σημεία παρατήρησης είναι ίδιες με το προηγούμενο μοντέλο αφού δεν έγιναν αλλαγές στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του προσομοιώματος.

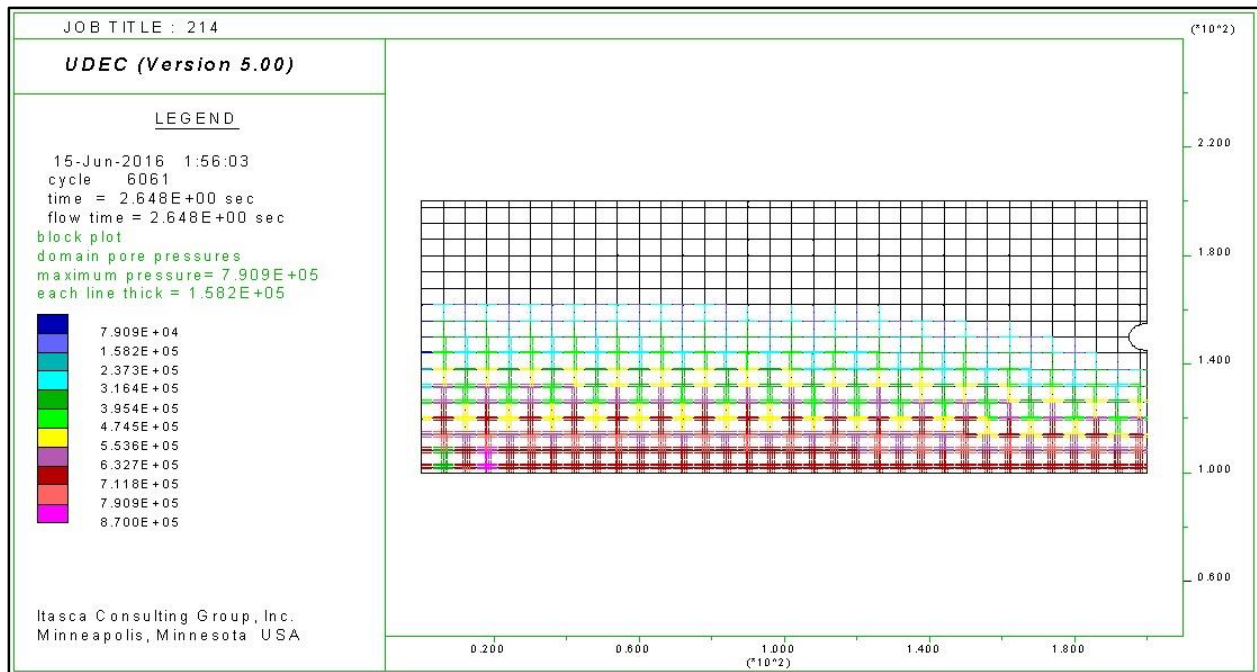


Εικόνα 4-13 Αποτελέσματα σταθερής ροής με ύψος υδροφόρου 20 m κάτω από την επιφάνεια του εδάφους.

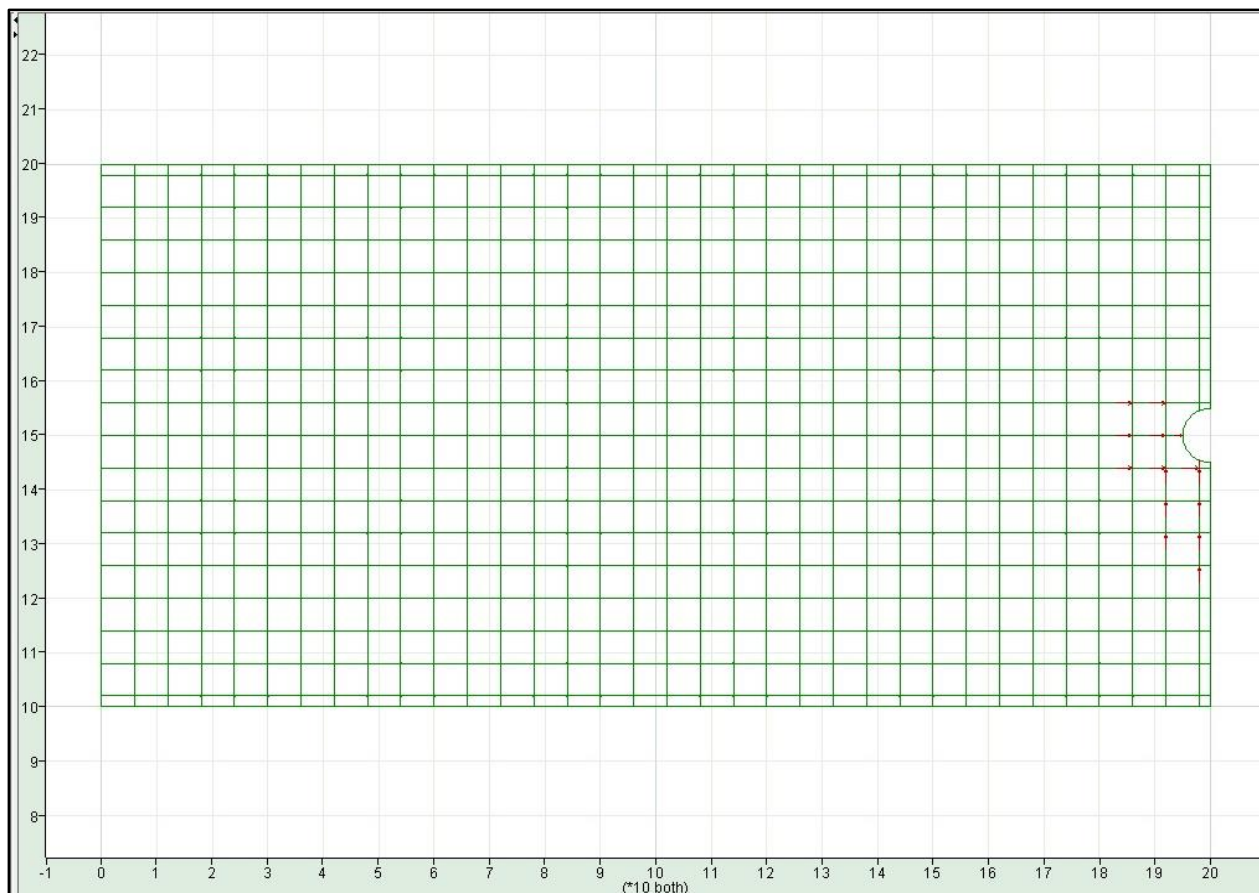
Σημείο παρατήρησης	Εισροή Q (m ³ /sec)
2	1,7 x 10 ⁻⁴
3	7,6 x 10 ⁻⁴
4	13 x 10 ⁻⁴
Σύνολο	2,23 x 10⁻³
Τελικό αποτέλεσμα	4,46 x 10⁻³

Πίνακας 4-4 Αποτελέσματα εισροής υδάτων για ύψος υδροφόρου 20 m κάτω από την επιφάνεια του εδάφους.

Στην παρακάτω εικόνα (εικόνα 4-14) απεικονίζεται η πίεση πόρων μετά την εκσκαφή της σήραγγας. Σε σύγκριση με την αντίστοιχη εικόνα του πρώτο προσομοιώματος (εικόνα 4-11) είναι εμφανείς οι μικρότερες πιέσεις πόρων λόγω της μείωσης της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα κατά 20 m με αποτέλεσμα την ακόμα μεγαλύτερη υποβάθμιση αυτού μετά τη διάνοιξη της σήραγγας.



Εικόνα 4-14 Πίεση πόρων μετά την εκσκαφή της σήραγγας.



Εικόνα 4-15 Διανύσματα ροής υπόγειων υδάτων

Η εικόνα 4-15 παρουσιάζει τα διανύσματα της ροής των υπογείων υδάτων ως προς τη σήραγγα. Παρατηρείται ότι υφίστανται διαφορές με την αντίστοιχη εικόνα του πρώτου προσομοιώματος.

Οι διαφορές αυτές επιβεβαιώνονται και με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τα σημεία μέτρησης της εισροής.

4.3.2.1 Υπολογισμός σταθερής ροής του πρώτου προσομοιώματος με τη χρήση αναλυτικών τύπων.

Ο υπολογισμός της σταθερής εισροής όπως και στο πρώτο προσομοίωμα έγινε με τη χρήση του αναλυτικού τύπου (Goodman 1965) και προέκυψε το ακόλουθο αποτέλεσμα :

$$Q = 10,46 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{sec}$$

4.3.2.2 Επαναπροσδιορισμός των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τους αναλυτικούς τύπους.

Με τη χρήση της εμπειρικής σχέσης (4.7) όπως και για το πρώτο προσομοίωμα προκύπτει η επαναπροσδιορισμένη παροχή η οποία είναι :

$$Q = 7,23 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{sec}$$

Οι αδιάστατοι συντελεστές F, a και b έχουν τις ίδιες τιμές με το πρώτο προσομοίωμα διότι είναι εξαρτώμενοι από τη γεωμετρία του μοντέλου η οποία δεν άλλαξε.

4.3.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων πρώτης σειράς αριθμητικών προσομοιωμάτων

Σημείο παρατήρησης	Εισροή Q (m ³ /sec)	
	Πρώτου προσομοιώματος	Δεύτερου προσομοιώματος
2	0,9 x 10 ⁻³	0,17 x 10 ⁻³
3	1,3 x 10 ⁻³	0,76 x 10 ⁻³
4	2 x 10 ⁻³	1,3 x 10 ⁻³
Σύνολο	4,2 x 10⁻³	2,23 x 10⁻³
Τελικό αποτέλεσμα	8,4 x 10⁻³	4,46 x 10⁻³

Πίνακας 4-5 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα εισροής υδάτων για την πρώτη σειρά αριθμητικών μοντέλων

Στον παραπάνω πίνακα συνοψίστηκαν τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τα δύο πρώτα προσομοιώματα.

Με μία πρώτη ματιά παρατηρείται η συνολικά μικρότερη σταθερή εισροή (σχεδόν μισή) στο δεύτερο μοντέλο σε σχέση με το πρώτο παρόλο που η εκσκαφή γίνεται και στις δύο περιπτώσεις κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα.

Μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι για το σημείο παρατήρησης δύο (το οποίο αντιστοιχεί στην κατακόρυφη ασυνέχεια) στο δεύτερο προσομοίωμα η τιμή είναι πολύ μικρή και οφείλεται, εκτός από την αποστράγγιση που έχει προαναφερθεί στην κατακόρυφη ασυνέχεια, αλλά και στη γενική υποβάθμιση του υδραυλικού δικτύου με αποτέλεσμα η συγκεκριμένη ασυνέχεια να μην τροφοδοτείται αντίστοιχος όπως στο πρώτο προσομοίωμα.

Σε όλα τα σημεία παρατήρησης οι μετρήσεις παροχής στο δεύτερο μοντέλο είναι μικρότερες σε σχέση με τα αντίστοιχα σημεία του πρώτου.

4.4 Δεύτερη σειρά αριθμητικών μοντέλων για εισροή υδάτων σε σήραγγα

Στη δεύτερη σειρά αριθμητικών μοντέλων, εξετάζεται η επιρροή που ασκεί ο συντελεστής ουδετέρων ωθήσεων (K) στην εισροή υδάτων στη σήραγγα. Χρησιμοποιήθηκαν τα ίδια γεωμετρικά χαρακτηριστικά όπως και στα μοντέλα της πρώτης σειράς.

Έγιναν δοκιμές για τρεις διαφορετικές τιμές του συντελεστή πλευρικών πιέσεων

- $K = 1$
- $K = 0,5$
- $K = 2$

Για τον προσδιορισμό του συντελεστή K χρησιμοποιήθηκε ο παρακάτω τύπος :

$$K = \frac{\sigma_h}{\sigma_v} \quad (4.3)$$

Όπου :

σ_h οι οριζόντιες εδαφικές τάσεις

σ_v οι κατακόρυφες εδαφικές τάσεις

Για την επίτευξη των παραπάνω τιμών του συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων ο υπολογισμός των κατακόρυφων εδαφικών τάσεων έγιναν με τον τύπο :

$$\sigma_v = p_0 = \gamma * h \quad (4.4)$$

Όπου :

γ η φαινόμενη πυκνότητα

h το βάθος

Εν συνεχεία οι τιμές των οριζόντιων τάσεων προέκυψαν σύμφωνα με τον τύπο (4.3)

Η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα ορίστηκε στην επιφάνεια του εδάφους όπως και στο πρώτο προσομοίωμα της πρώτης σειράς των αριθμητικών μοντέλων.

4.4.1 Συντελεστής πλευρικών πιέσεων $K = 1$

Το συγκεκριμένο προσομοίωμα αποτελεί μία αναπαραγωγή του πρώτου μοντέλου της πρώτης σειράς αριθμητικών προσομοιωμάτων. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται εκ νέου τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την επίλυση.

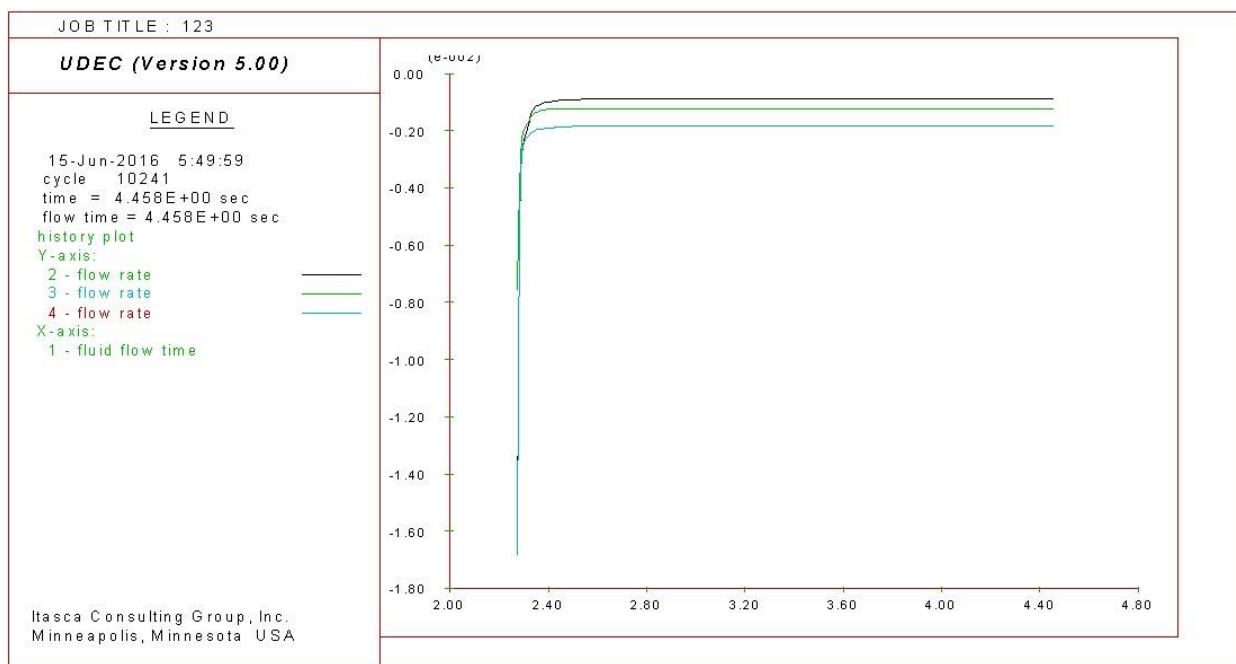
Σημείο παρατήρησης	Εισροή Q (m ³ /sec)
2	0,9 x 10 ⁻³
3	1,3 x 10 ⁻³
4	2 x 10 ⁻³
Σύνολο	4,2 x 10⁻³
Τελικό αποτέλεσμα	8,4 x 10⁻³

Πίνακας 4-6 Αποτελέσματα εισροής υδάτων για συντελεστή πλευρικών τάσεων K = 1

4.4.2 Συντελεστής πλευρικών πιέσεων K = 0,5

Στο συγκεκριμένο μοντέλο μειώθηκαν οι οριζόντιες τάσεις στο μισό. Η μείωση αυτή θεωρητικά επιτρέπει την ευκολότερη ροή στις κατακόρυφες ασυνέχειες λόγω μικρότερη ασκούμενης δύναμης στο άνοιγμα των ασυνεχειών, οπότε το κλείσιμο του ανοίγματος θα είναι μικρότερο. Όλα τα παραπάνω οδηγούν στο συμπέρασμα μεγαλύτερης υδραυλικής αγωγιμότητας ως προς τον κατακόρυφο άξονα σε σχέση με αυτήν του οριζοντίου. Η μεγαλύτερη αυτή υδραυλική αγωγιμότητα δεν μπορεί όμως να αποτυπωθεί για συνθήκες σταθερής ροής που εξετάζει η παρούσα διπλωματική εργασία λόγω της πτώσης της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα.

Στην παρακάτω εικόνα και στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την επίλυση του μοντέλου.



Εικόνα 4-16 Αποτελέσματα σταθερής ροής για K=0,5

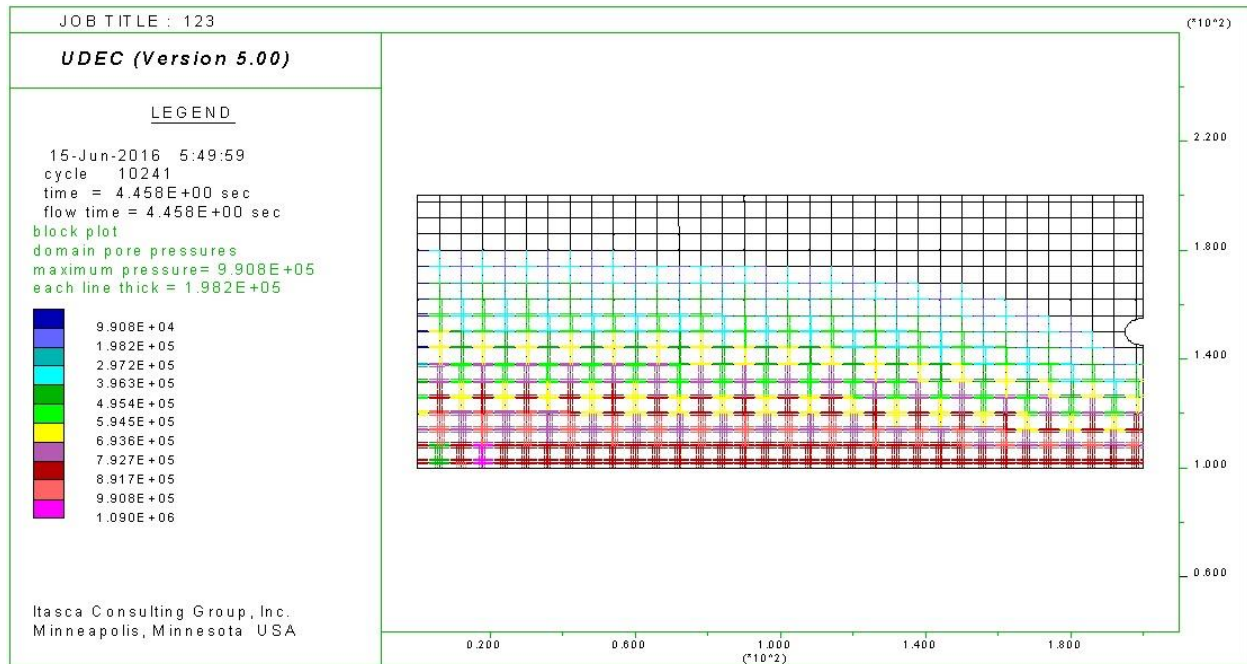
Σημείο παρατήρησης	Εισροή Q (m ³ /sec)
2	0,9 x 10 ⁻³
3	1,2 x 10 ⁻³
4	1,8 x 10 ⁻³
Σύνολο	3,9 x 10⁻³
Τελικό αποτέλεσμα	7,8 x 10⁻³

Πίνακας 4-7 Αποτελέσματα εισροής υδάτων για συντελεστή πλευρικών τάσεων K = 0,5

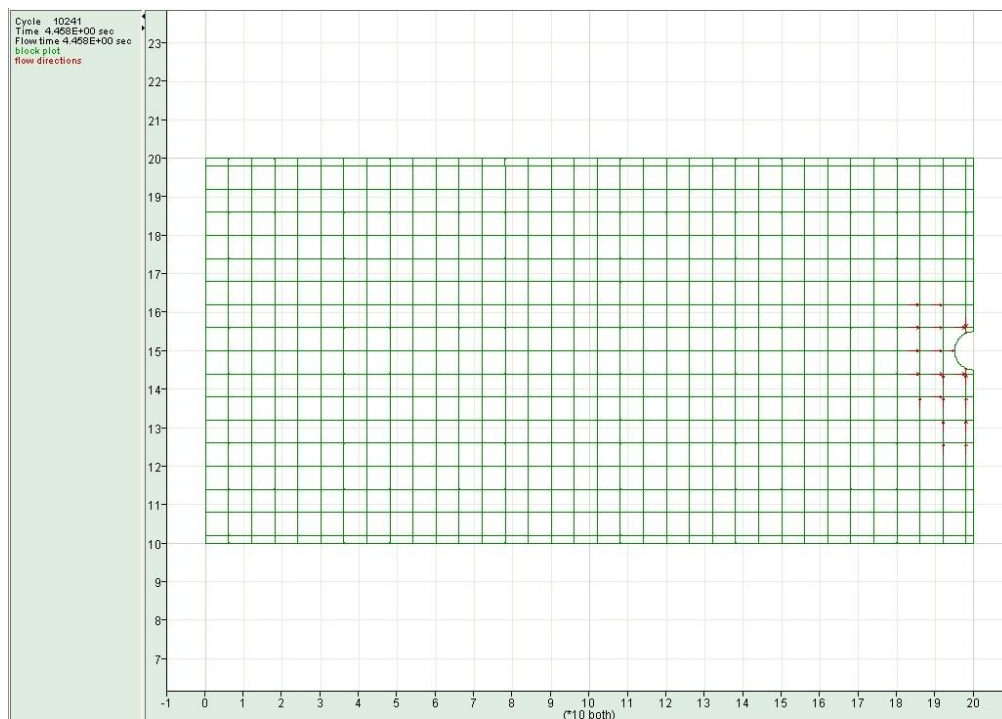
Όπως παρατηρείται τα αποτελέσματα για K = 1 και για K = 0,5 δεν έχουν μεγάλες διαφορές. Στο συνολικό αποτέλεσμα καθώς και στα αποτελέσματα από τα τρία σημεία παρατήρησης οι τιμές είναι αντίστοιχες για τα δύο μοντέλα.

Εκτιμάται πώς οι οριζόντιες τάσεις στο πρώτο μοντέλο, δεν είναι αρκετά μεγάλες (λόγω μικρού σχετικά βάθους που βρίσκεται η σήραγγα) ώστε να κλείσουν κατά ένα ποσοστό οι κατακόρυφες ασυνέχειες, το οποίο θα οδηγούσε στην αλλαγή της μορφής του υδραυλικού δικτύου και περαιτέρω στην διαφοροποίηση του μεγέθους εισροής υδάτων στη σήραγγα.

Στην παρακάτω εικόνα (εικόνα 4-17) παρουσιάζεται η πίεση πόρων που προέκυψε για την μείωση των οριζόντιων τάσεων. Στην εικόνα 4-18 παρατηρούνται τα διανύσματα ροής του υπόγειου νερού για το συγκεκριμένο μοντέλο.



Εικόνα 4-17 Πίεση πόρων μετά την εκσκαφή της σήραγγας για $K=0,5$.



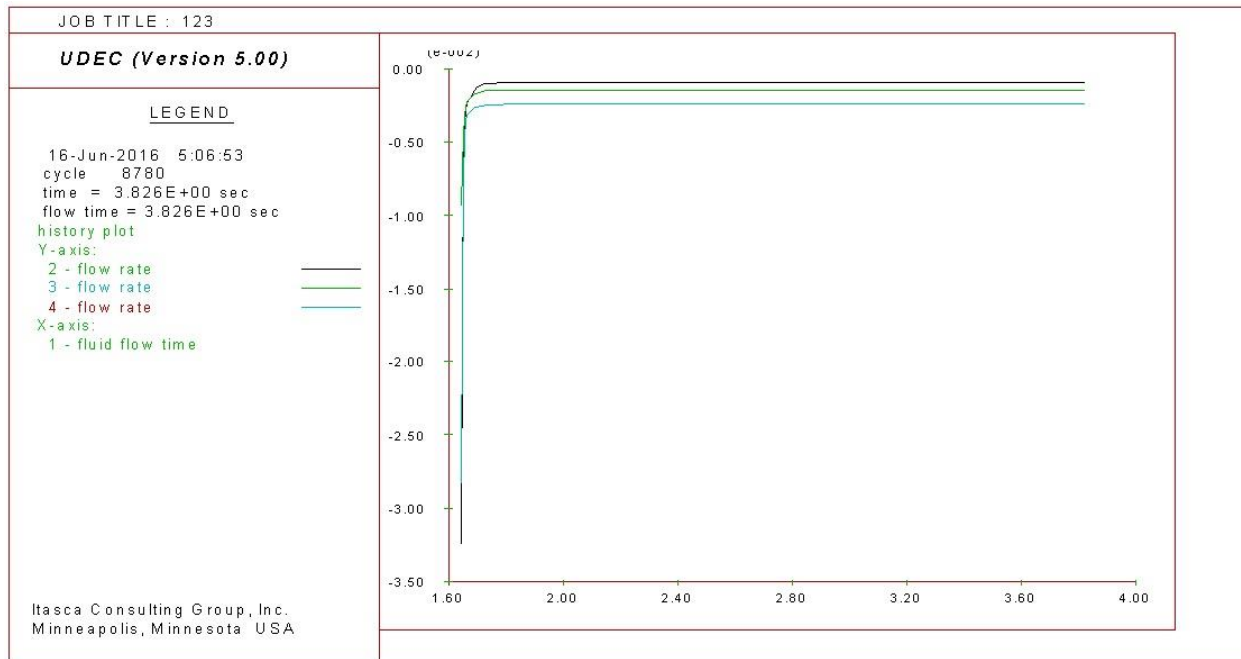
Εικόνα 4-18 Διανύσματα ροής υπόγειων υδάτων για $K = 0,5$

4.4.3 Συντελεστής πλευρικών πιέσεων $K = 2$

Στο συγκεκριμένο μοντέλο αυξήθηκαν οι οριζόντιες τάσεις στη διπλάσια τιμή σε σχέση με τη τιμή των κατακόρυφων. Με την αύξηση αυτή αναμένεται μικρότερη υδραυλική αγωγιμότητα στον κατακόρυφο άξονα σε σύγκριση με την υδραυλική αγωγιμότητα του οριζοντίου άξονα. Αυτό συμβαίνει διότι οι αυξημένες οριζόντιες τάσεις θα κλείσουν έως ένα σημείο τις κατακόρυφες ασυνέχειες.

Όπως όμως έχει προαναφερθεί για σταθερή εισροή υδάτων τον κυρίαρχο ρόλο τον έχουν οι οριζόντιες ασυνέχειες οπότε δεν αναμένεται απαραίτητα μικρότερη εισροή υδάτων στο προσομοίωμα αυτό σε σύγκριση με τα δύο προηγούμενα.

Στην παρακάτω εικόνα και στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την επίλυση του μοντέλου για συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων ίσο με 2.



Εικόνα 4-19 Αποτελέσματα σταθερής ροής για K=2

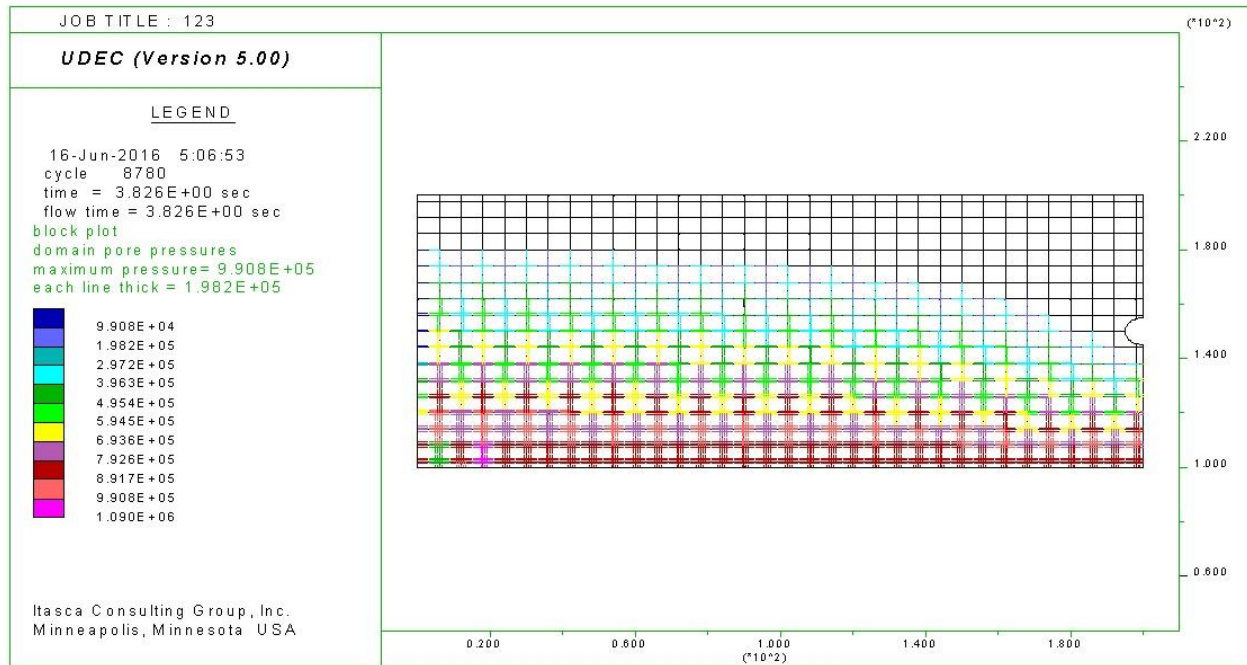
Σημείο παρατήρησης	Εισροή Q (m ³ /sec)
2	0,9 x 10 ⁻³
3	1,4 x 10 ⁻³
4	2,4 x 10 ⁻³
Σύνολο	4,7 x 10⁻³
Τελικό αποτέλεσμα	9,4 x 10⁻³

Πίνακας 4-8 Αποτελέσματα εισροής υδάτων για συντελεστή πλευρικών πιέσεων K = 2

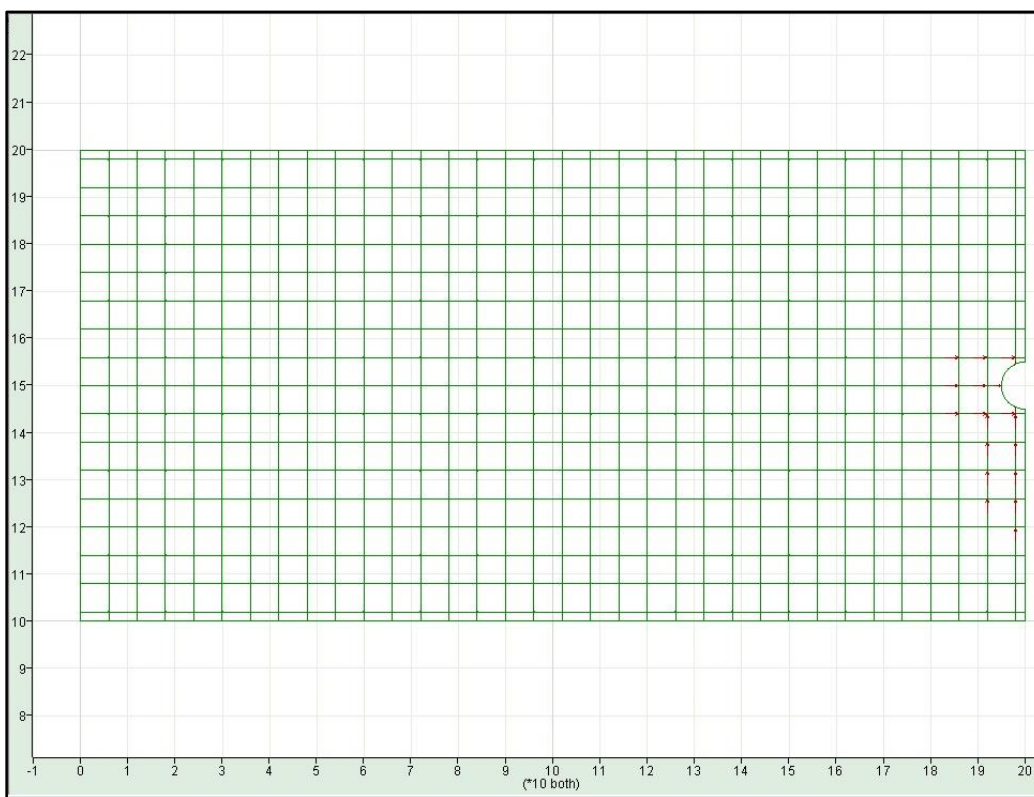
Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στον πίνακα 4-8 με αυτά που προέκυψαν από την επίλυση του μοντέλου για συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων ίσο με τη μονάδα, παρατηρείται η

μεγαλύτερη συνολική εισροή στο προσομοίωμα με τις διπλάσιες οριζόντιες εδαφικές τάσεις. Αυτό οφείλεται στη διαφοροποίηση του υδραυλικού δικτύου των ασυνεχειών.

Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται οι αντίστοιχες πιέσεις πόρων και τα διανύσματα ροής υπογείων υδάτων για το συγκεκριμένο αριθμητικό μοντέλο.



Εικόνα 4-20 Πίεση πόρων μετά την εκσκαφή της σήραγγας για K=2.



Εικόνα 4-21 Διανύσματα ροής υπόγειων υδάτων για $K = 2$

Σημείο παρατήρησης	Εισροή Q (m^3/sec) $K = 1$	Εισροή Q (m^3/sec) $K = 0,5$	Εισροή Q (m^3/sec) $K = 2$
2	$0,9 \times 10^{-3}$	$0,9 \times 10^{-3}$	$0,9 \times 10^{-3}$
3	$1,3 \times 10^{-3}$	$1,2 \times 10^{-3}$	$1,4 \times 10^{-3}$
4	2×10^{-3}	$1,8 \times 10^{-3}$	$2,4 \times 10^{-3}$
Σύνολο	$4,2 \times 10^{-3}$	$3,9 \times 10^{-3}$	$4,7 \times 10^{-3}$
Τελικό αποτέλεσμα	$8,4 \times 10^{-3}$	$7,8 \times 10^{-3}$	$9,4 \times 10^{-3}$

Πίνακας 4-9 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα εισροής υδάτων για τη δεύτερη σειρά αριθμητικών μοντέλων

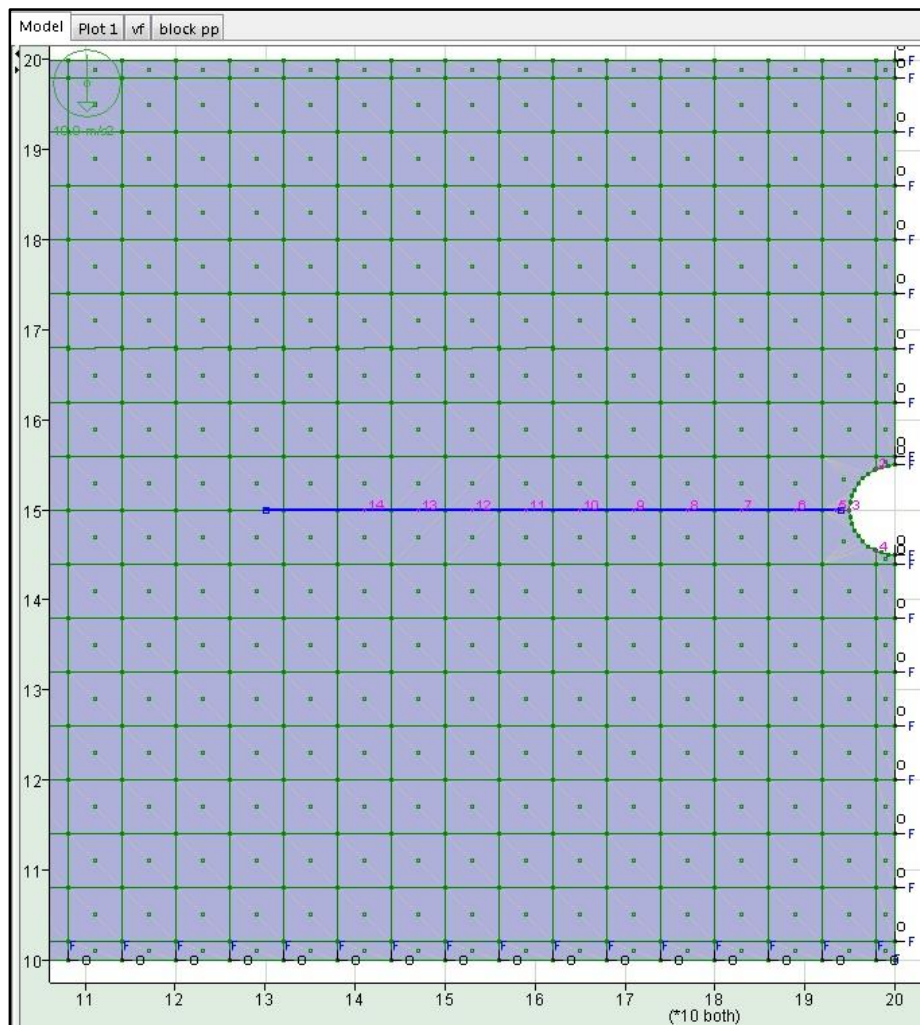
Στον παραπάνω πίνακα παρουσιάζονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα για τη δεύτερη σειρά αριθμητικών μοντέλων.

Η μεγαλύτερη εισροή εντοπίζεται για το προσομοίωμα με τις μεγαλύτερες οριζόντιες εδαφικές πιέσεις και η μικρότερη για το προσομοίωμα με τις μικρότερες. Η παροχή στο μοντέλο με συντελεστή ουδετέρων ωθήσεων ίσο με τη μονάδα λαμβάνει μία ενδιάμεση τιμή.

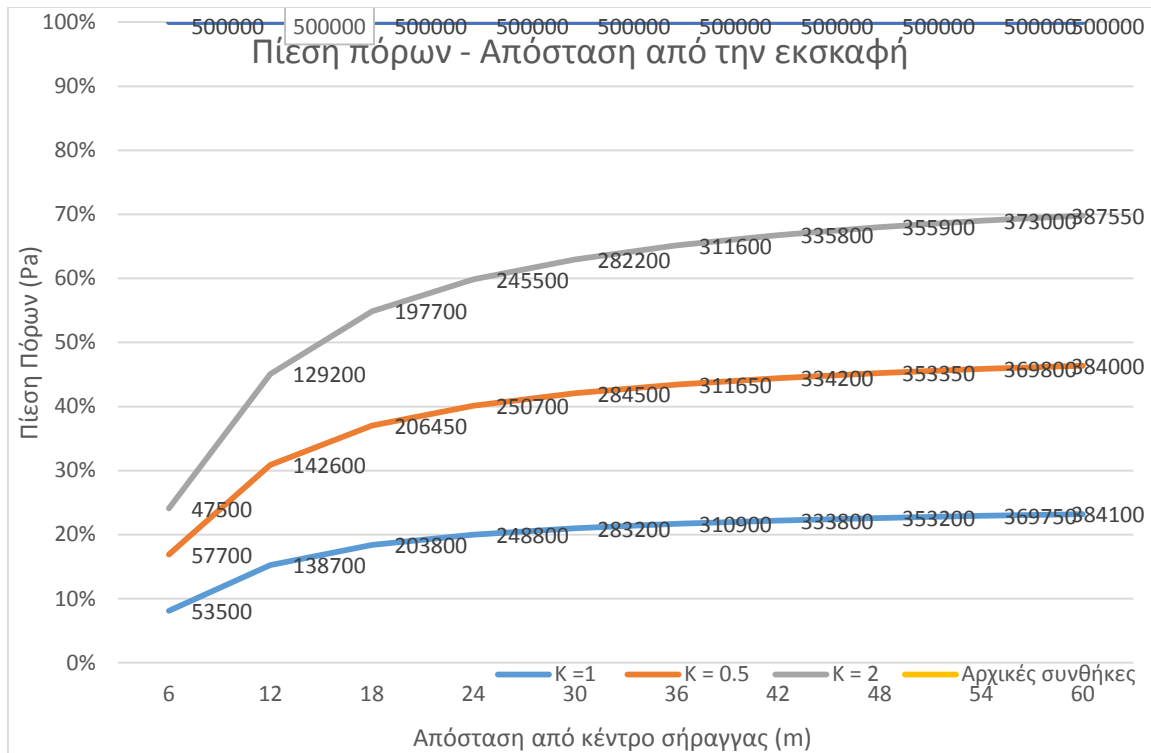
Εκτιμάται ότι διαφορετικές παροχές που προκύπτουν είναι αποτέλεσμα της αλλαγής που υφίσταται στο υδραυλικό δίκτυο λόγω της αλλαγής των οριζόντιων εδαφικών τάσεων.

Για την καλύτερη κατανόηση του υδραυλικού δικτύου ορίστηκαν εκ νέου δέκα σημεία παρατήρησης στα τρία προσομοιώματα.

Τα σημεία παρατήρησης έχουν ως στόχο την μέτρηση της πίεσης των πόρων. Τα σημεία αυτά τοποθετήθηκαν ανά 6 m από το κέντρο της σήραγγας σε έναν νοητό οριζόντιο άξονα όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 4-22 Σημεία μέτρησης πίεσης πόρων μετά την εκσκαφή της σήραγγας.



Διάγραμμα 1 Πιέσεις πόρων συναρτήσει της οριζόντιας απόστασης από την εκσκαφή

Στο παραπάνω διάγραμμα παρατηρείται η σταδιακή αύξηση της πίεσης των πόρων και στα τρία μοντέλα όσο απομακρύνονται τα σημεία παρατήρησης από την εκσκαφή. Το οποίο είναι λογικό και έχει αποτυπωθεί και στις εικόνες της πίεσης των πόρων για τα προσομοιώματα.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η ακτίνα επιρροής της σήραγγας υπολογίστηκε για το συγκεκριμένο βάθος στα 190 m απόσταση από την εκσκαφή.

Επίσης παρατηρείται πως για το μοντέλο $K=2$ η πρώτη μέτρηση είναι μικρότερη σε σύγκριση με τις άλλες δύο μετρήσεις, το οποίο δικαιολογείται και στον πίνακα των αποτελεσμάτων για το σημείο παρατήρησης 3 που αντιστοιχεί στην οριζόντια ασυνέχεια που τέμνει τη σήραγγα και δίνει μεγαλύτερη παροχή (μεγάλη παροχή – μικρή πίεση πόρων).

Σε απόσταση περίπου 25 περίπου μέτρων από την εκσκαφή παρατηρούνται μικρές διαφορές στις πιέσεις πόρων για τα τρία μοντέλα.

Εν κατακλείδι οι διαφορές που παρουσιάζονται στα τρία μοντέλα μπορούν να θεωρηθούν μικρές. Καλύτερα αποτελέσματα πιθανόν να πρόκυπταν για μεγαλύτερο βάθος κατασκευής της σήραγγας, όπου οι κατακόρυφες εδαφικές τάσεις θα ήταν μεγαλύτερες οπότε αντιστοίχως και οι οριζόντιες.

4.5 Τρίτη σειρά αριθμητικών μοντέλων για εισροή υδάτων σε σήραγγα

Στη τρίτη σειρά αριθμητικών μοντέλων, εξετάζεται η επιρροή που ασκεί το αρχικό άνοιγμα των ασυνεχειών στην εισροή υδάτων στη σήραγγα. Χρησιμοποιήθηκαν τα ίδια γεωμετρικά χαρακτηριστικά όπως και στα μοντέλα της πρώτης σειράς εκτός από το άνοιγμα των ασυνεχειών.

Έγιναν δοκιμές για 2 διαφορετικές τιμές ανοίγματος

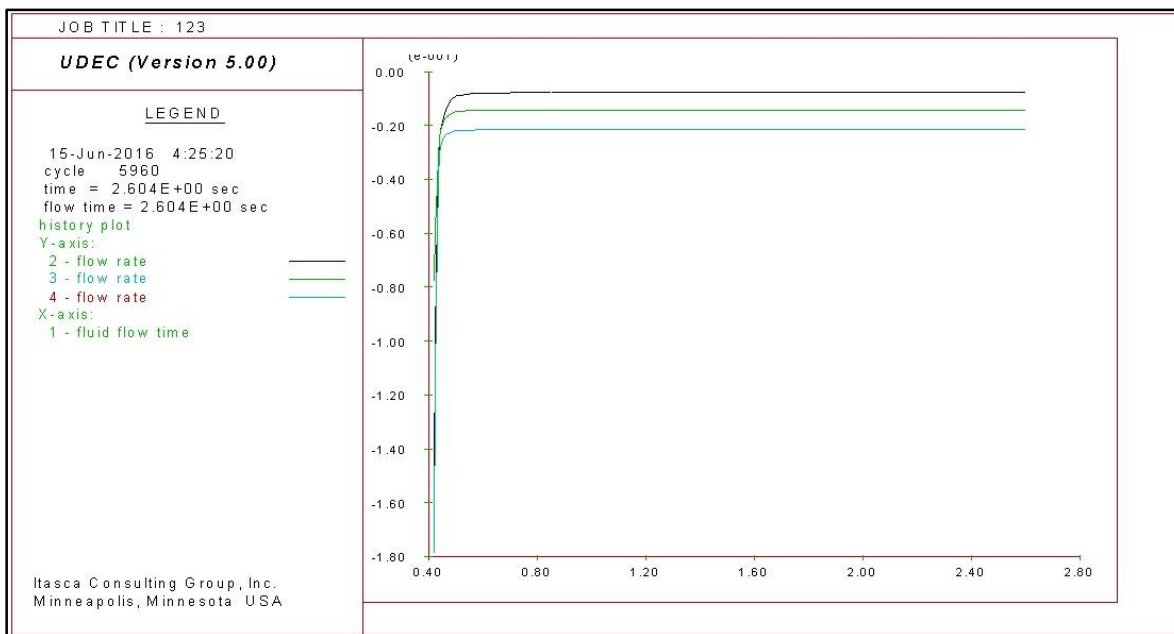
- Ενός χιλιοστού (1mm)
- Δύο χιλιοστών (2mm)

Η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα ορίστηκε στην επιφάνεια του εδάφους όπως και στο πρώτο προσομοίωμα της πρώτης σειράς των αριθμητικών μοντέλων.

Για την πρώτη περίπτωση ανοίγματος ενός χιλιοστού θα χρησιμοποιηθούν τα αποτελέσματα του πρώτου προσομοιώματος της πρώτης σειράς (πίνακας 4-3).

Στη δεύτερη περίπτωση εκτός από τον διπλασιασμό του αρχικού ανοίγματος διπλασιάστηκε και το παραμένον άνοιγμα. Δηλαδή η νέα τιμή του παραμένοντος ανοίγματος, $a_{res} = 1\text{mm}$.

Για τη δεύτερη περίπτωση ανοίγματος δύο χιλιοστών τα αποτελέσματα που προέκυψαν μετά την επίλυση του προσομοιώματος παρουσιάζονται στην παρακάτω εικόνα και πιο αναλυτικά στον παρακάτω πίνακα.



Εικόνα 4-23 Αποτελέσματα σταθερής ροής για $a = 2\text{mm}$

Σημείο παρατήρησης	Εισροή Q (m ³ /sec)
2	8×10^{-3}
3	14×10^{-3}
4	21×10^{-3}
Σύνολο	43×10^{-3}
Τελικό αποτέλεσμα	86×10^{-3}

Πίνακας 4-10 Αποτελέσματα εισροής υδάτων στη σήραγγα για αρχικό άνοιγμα ασυνεχειών δύο χιλιοστών

Σημείο παρατήρησης	Εισροή Q (m ³ /sec)	
	Πρώτου προσομοιώματος	Δεύτερου προσομοιώματος
2	$0,9 \times 10^{-3}$	8×10^{-3}
3	$1,3 \times 10^{-3}$	14×10^{-3}
4	2×10^{-3}	21×10^{-3}
Σύνολο	$4,2 \times 10^{-3}$	43×10^{-3}
Τελικό αποτέλεσμα	$8,4 \times 10^{-3}$	86×10^{-3}

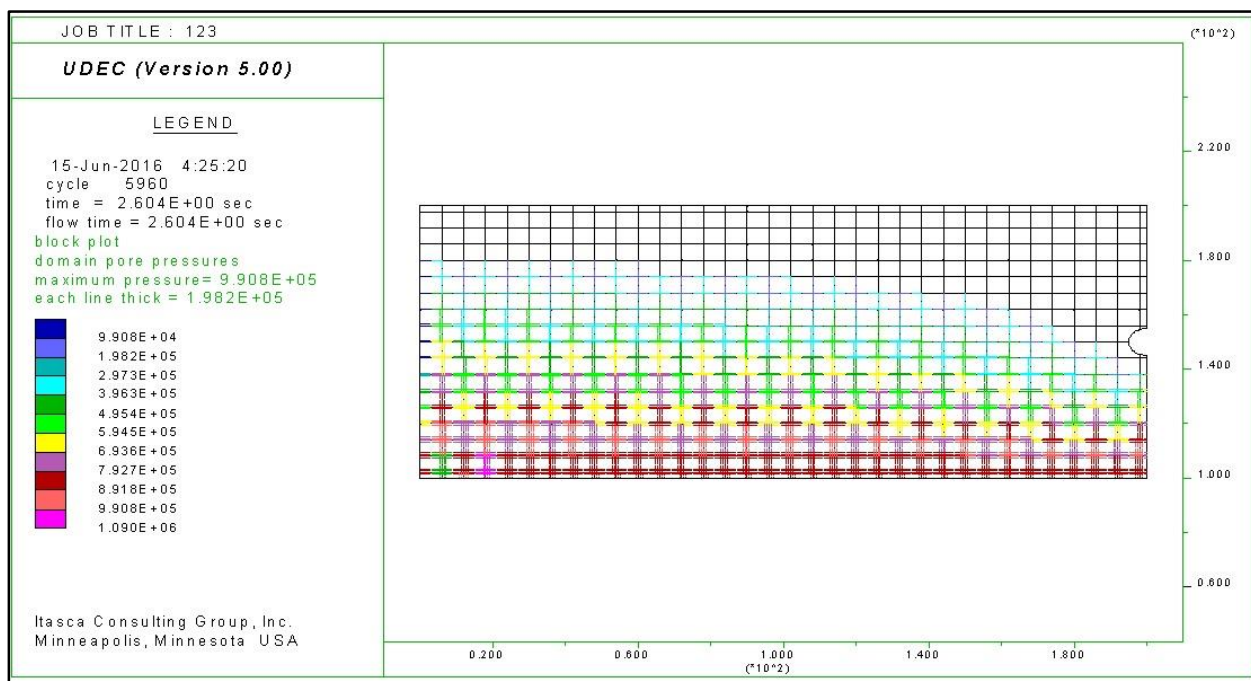
Πίνακας 4-11 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα εισροής υδάτων για την τρίτη σειρά αριθμητικών μοντέλων

Στον παραπάνω πίνακα παρουσιάζονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα της τρίτης σειράς αριθμητικών μοντέλων.

Παρατηρείται ότι για αύξηση του ανοίγματος κατά ένα χιλιοστό η παροχή που προκύπτει είναι κατά μία τάξη μεγέθους μεγαλύτερη.

Αυτό συμβαίνει διότι η υδραυλική αγωγιμότητα βραχώδους σχηματισμού είναι άμεσα συνδεδεμένη με το άνοιγμα των ασυνεχειών όπως έχει προαναφερθεί στο δεύτερο κεφάλαιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας (τύπος 2.11).

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται η πίεση πόρων στο προσομοίωμα για άνοιγμα ασυνεχειών δύο χιλιοστών.



Εικόνα 4-24 Πίεση πόρων μετά την εκσκαφή της σήραγγας για $a = 2\text{ mm}$

4.5.1.1 Υπολογισμός σταθερής ροής του τρίτου προσομοιώματος με τη χρήση αναλυτικών τύπων.

Με τη χρήση του τύπου (4.4) υπολογίζουμε την υδραυλική αγωγιμότητα η οποία αντιστοιχεί σε άνοιγμα 2 mm και προκύπτει :

$$K = 3,33 \times 10^{-3} \text{ m/sec}$$

Οπότε αντικαθιστώντας στο τύπο (4.3) η εισροή είναι :

$$Q = 349,38 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{sec}$$

Παρατηρείται πως και σε αυτή την περίπτωση το αποτέλεσμα που προκύπτει από τους αναλυτικούς τύπου είναι πιο συντηρητικό.

4.5.1.2 Επαναπροσδιορισμός των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τους αναλυτικούς τύπους.

Οι αδιάστατοι συντελεστές a , b οι οποίοι είναι εξαρτώμενοι από το F λαμβάνουν τις ίδιες τιμές όπως και στην πρώτη σειρά αριθμητικών μοντέλων δηλαδή :

$$a = 1,869$$

$$b = 1,218$$

Αντικαθιστώντας τα παραπάνω αποτελέσματα στην εξίσωση (4.7) καθώς και την εισροή που υπολογίστηκε από τον τύπο του Goodman, η νέα τιμή της εισροής που προκύπτει είναι :

$$Q = 519,21 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{sec}$$

Παρατηρείται πως η εμπειρική σχέση για σχετικά μεγάλες εισροές παρουσιάζει λάθος και υπερεκτιμάει ακόμα περισσότερο την εισροή

4.6 Τέταρτη σειρά αριθμητικών μοντέλων για εισροή υδάτων σε σήραγγα

Σε αυτή τη σειρά των αριθμητικών μοντέλων εξετάστηκε η επιρροή που ασκεί η απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών της ίδιας οικογένειας.

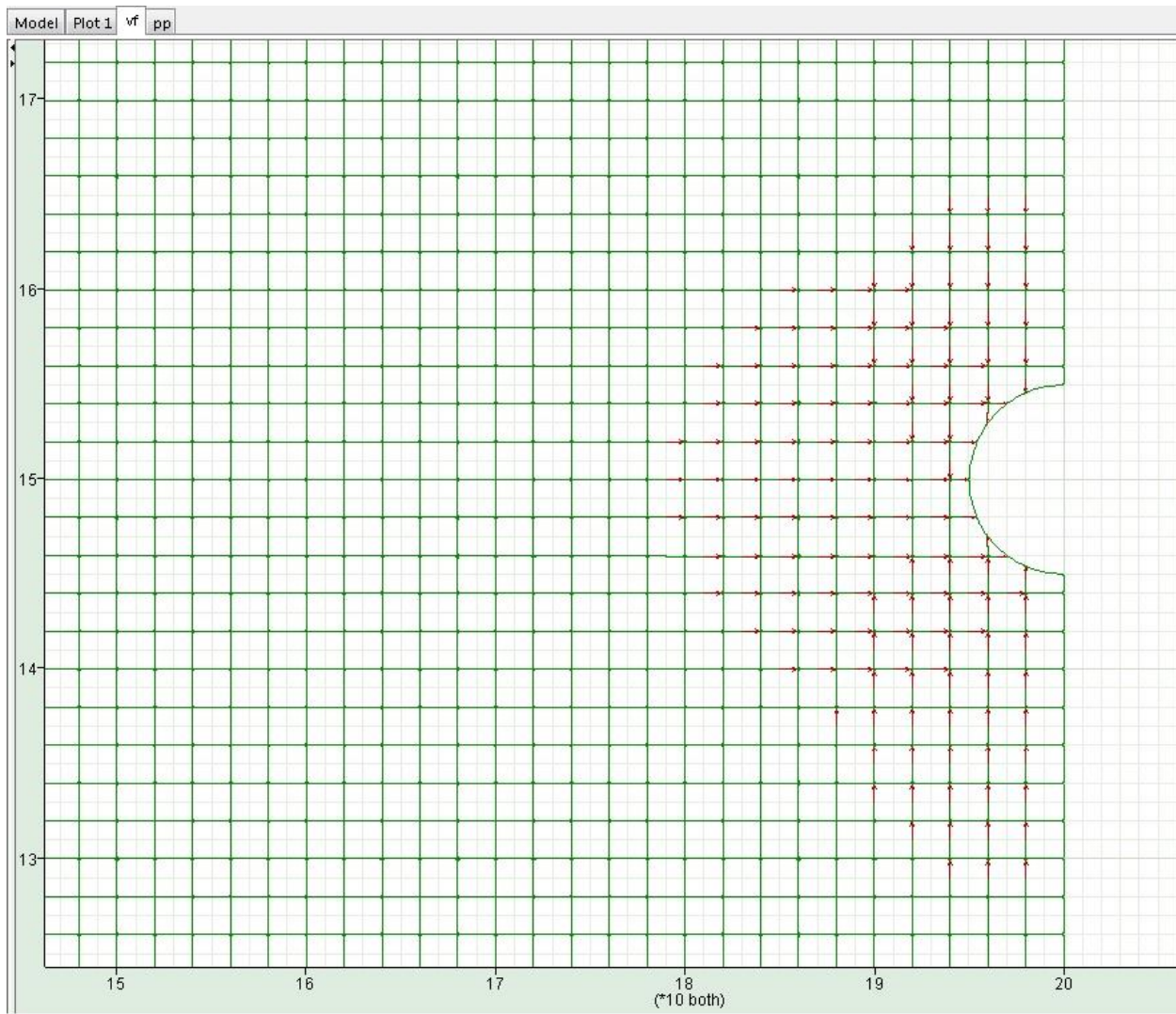
Κατασκευάστηκε ένα προσομοίωμα με δύο οικογένειες ασυνεχειών κλίσης 0 και 90 ως προς τον οριζόντιο άξονα αντίστοιχα και απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών δύο μέτρα.

Το ύψος του υδροφόρου ορίζοντα παραμένει στην επιφάνεια του εδάφους και το βάθος της σήραγγας στα 50 m.

Δεν έγιναν αλλαγές στις μηχανικές ιδιότητες της βραχομάζας και των ασυνεχειών.

Αξίζει να σημειωθεί πως για το συγκεκριμένο προσομοίωμα απαιτήθηκε πολύ μεγαλύτερος υπολογιστικός χρόνος σε σχέση με τα υπόλοιπα προσομοιώματα. Αυτός είναι και ο λόγος που αποφασίστηκε να μην μειωθεί η απόσταση των ασυνεχειών κάτω των 2 μέτρων καθώς ο υπολογιστικός χρόνος θα ήταν εξαιρετικά μεγάλος.

Στην παρακάτω εικόνα (εικόνα 4-25) παρατηρούνται οι σημαντικές διαφοροποιήσεις στο υδραυλικό δίκτυο σε σύγκριση με τα μοντέλα στα οποία η απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών ήταν 6 m.



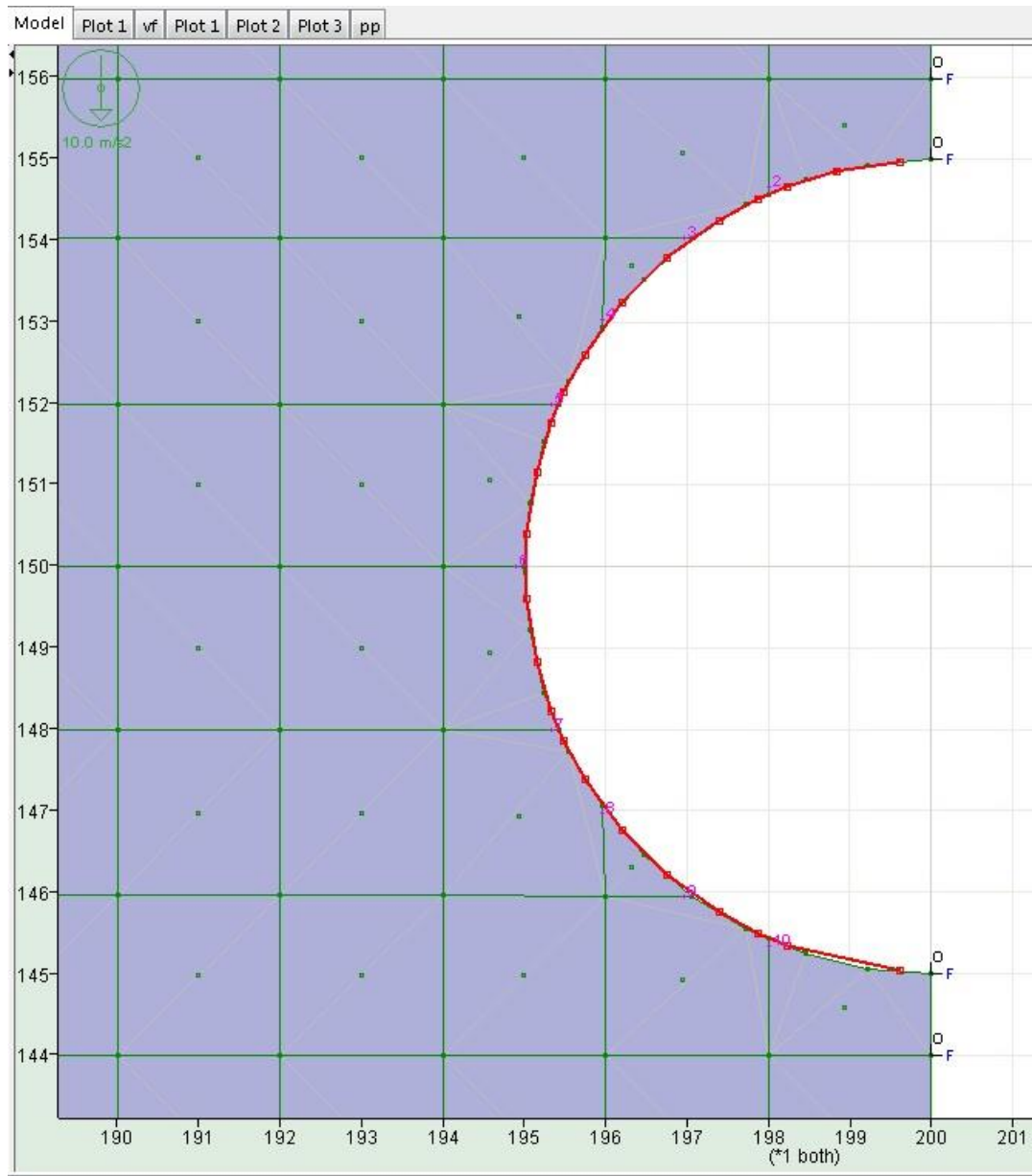
Εικόνα 4-25 Διανύσματα ροής υπόγειων υδάτων για $s = 2m$

Οι διαφορές αυτές οφείλονται στην αλλαγή της υδραυλικής αγωγιμότητας λόγω της μείωσης της απόστασης των ασυνεχειών και κατ' επέκταση του πλάτους της άρρηκτης – αδιαπέρατης ζώνης.

Το μικρότερο πλάτος άρρηκτου πετρώματος μεταφράζεται σε καλύτερη επικοινωνία του δικτύου των ασυνεχειών και σε μεγαλύτερη υδραυλική αγωγιμότητα.

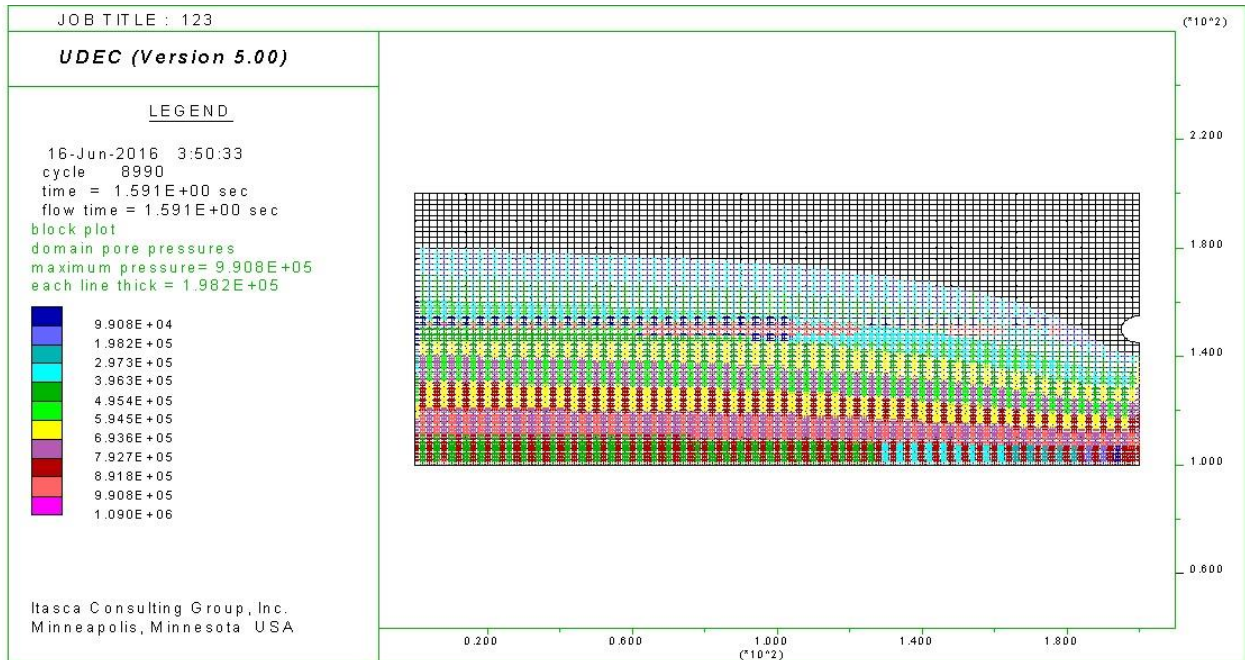
Επίσης για τη μέτρηση της εισροής του υπόγειου νερού στο συγκεκριμένο προσομοίωμα οριστήκαν εννέα σημεία παρατήρησης που αντιστοιχούν στα εννέα σημεία επαφής της σήραγγας και των ασυνεχειών (εικόνα 25). Στην συγκεκριμένη περίπτωση λόγω πολύ μικρού χρόνου αυτό – υποστήριξης

της σήραγγας θεωρήθηκε απαραίτητη η χρήση μέτρων υποστήριξης με σκοπό την αποφυγή αστοχιών. Οι αστοχίες που αποφεύχθηκαν ήταν τύπου σφήνας.

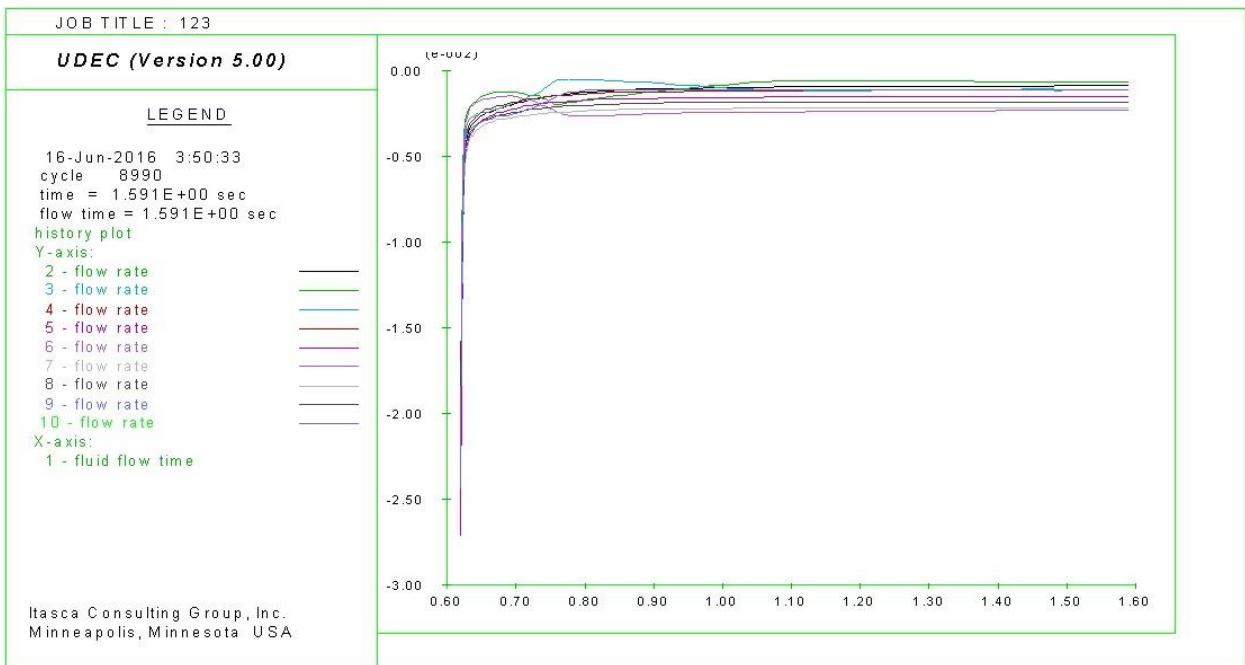


Εικόνα 4-26 Σημεία παρατήρησης προσομοιώματος για απόσταση ασυνεχειών 2 m.

Στην εικόνα 4-26 παρουσιάζεται η πίεση πόρων όπως διαμορφώθηκε για το συγκεκριμένο μοντέλο και στην εικόνα 4-27 το φύλλο των αποτελεσμάτων έτσι όπως εξάγεται από το UDEC.



Εικόνα 4-27 Πίεση πόρων μετά την εκσκαφή της σήραγγας για $s = 2m$



Εικόνα 4-28 Αποτελέσματα σταθερής ροής για $s = 2m$

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται αναλυτικά οι παροχές εισροής των σημείων παρατήρησης.

Σημείο παρατήρησης	Εισροή Q (m ³ /sec)
2	0,9 x 10 ⁻³
3	0,5 x 10 ⁻³
4	1,2 x 10 ⁻³
5	1,1 x 10 ⁻³
6	1,7 x 10 ⁻³
7	1,9 x 10 ⁻³
8	1,2 x 10 ⁻³
9	2 x 10 ⁻³
10	2,2 x 10 ⁻³
Σύνολο	1,27 x 10⁻²
Τελικό αποτέλεσμα	2,54 x 10⁻²

Πίνακας 4-12 Αποτελέσματα εισροής υδάτων στη σήραγγα για s = 2

Το τελικό αποτέλεσμα που προκύπτει σε σύγκριση με το αποτέλεσμα για απόσταση ασυνεχειών 6 m είναι κατά τρεις φορές μεγαλύτερο.

Το αποτέλεσμα αυτό επιβεβαιώνει τους τύπους (4.3) και (4.4). Με την μείωση της απόστασης των ασυνεχειών από τα έξι μέτρα στα δύο προκύπτει, σύμφωνα με τον τύπο υπολογισμού της υδραυλικής αγωγιμότητας, τριπλάσια υδραυλική αγωγιμότητα η οποία συνεπάγει τριπλάσια εισροή.

4.6.1.1 Υπολογισμός σταθερής ροής του τέταρτου προσομοιώματος με τη χρήση αναλυτικών τύπων.

Με τη χρήση του τύπου (4.4) υπολογίζουμε την υδραυλική αγωγιμότητα η οποία αντιστοιχεί σε απόσταση ασυνεχειών 2 m και προκύπτει :

$$K = 4,16 \times 10^{-4} \text{ m/sec}$$

Οπότε αντικαθιστώντας στο τύπο (4.3) η εισροή είναι :

$$Q = 4,36 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{sec}$$

Παρατηρείται πως και σε αυτή την περίπτωση το αποτέλεσμα που προκύπτει από τους αναλυτικούς τύπου είναι πιο συντηρητικό.

4.6.1.2 Επαναπροσδιορισμός των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τους αναλυτικούς τύπους.

$$F = 0,5$$

$$a = 1,869$$

$$b = 1,218$$

Αντικαθιστώντας τα παραπάνω αποτελέσματα στην εξίσωση (4.7) καθώς και την εισροή που υπολογίστηκε από τον τύπο του Goodman, η νέα τιμή της εισροής που προκύπτει είναι :

$$Q = 4,12 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{sec}$$

4.7 Πέμπτη σειρά αριθμητικών μοντέλων για εισροή υδάτων σε σήραγγα

Σε αυτή τη σειρά των αριθμητικών προσομοιωμάτων εξετάστηκε η επιρροή που ασκεί η κλίση των ασυνεχειών στην εισροή υδάτων.

Για αυτή τη σειρά προσομοιώσεων στα μοντέλα χρησιμοποιήθηκαν δύο οικογένειες ασυνεχειών κάθετες μεταξύ τους όπως στα προηγούμενα.

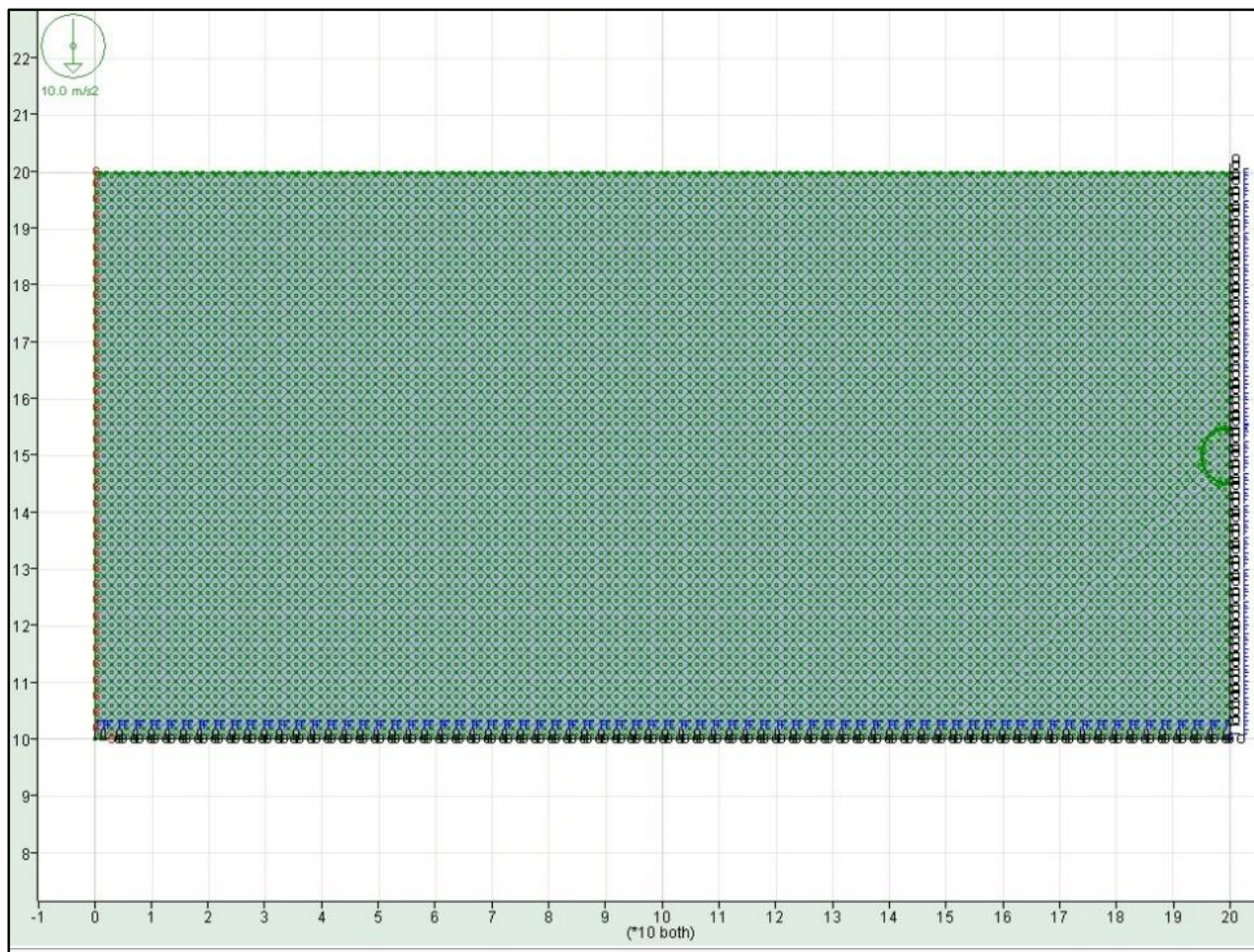
Η γεωμετρία που χρησιμοποιήθηκε είναι αντίστοιχη με αυτή της τέταρτης σειράς αριθμητικών μοντέλων δηλαδή για απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών ίση με 2 m.

Θεωρήθηκε απαραίτητη η μικρότερη απόσταση των ασυνεχειών για την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων, διότι σε προσομοίωμα το οποίο λύθηκε για απόσταση ασυνεχειών ίση με 6 m τα σημεία τομής ασυνεχειών και σήραγγας ήταν λιγότερα οπότε κρίθηκε ακατάλληλο προς σύγκριση με το αντίστοιχο.

Στο συγκεκριμένο μοντέλο λόγω πολύ μικρού χρόνου αυτό – υποστήριξης της σήραγγας θεωρήθηκε απαραίτητη η χρήση μέτρων υποστήριξης με σκοπό την αποφυγή αστοχιών όπως και στη προηγούμενη περίπτωση.

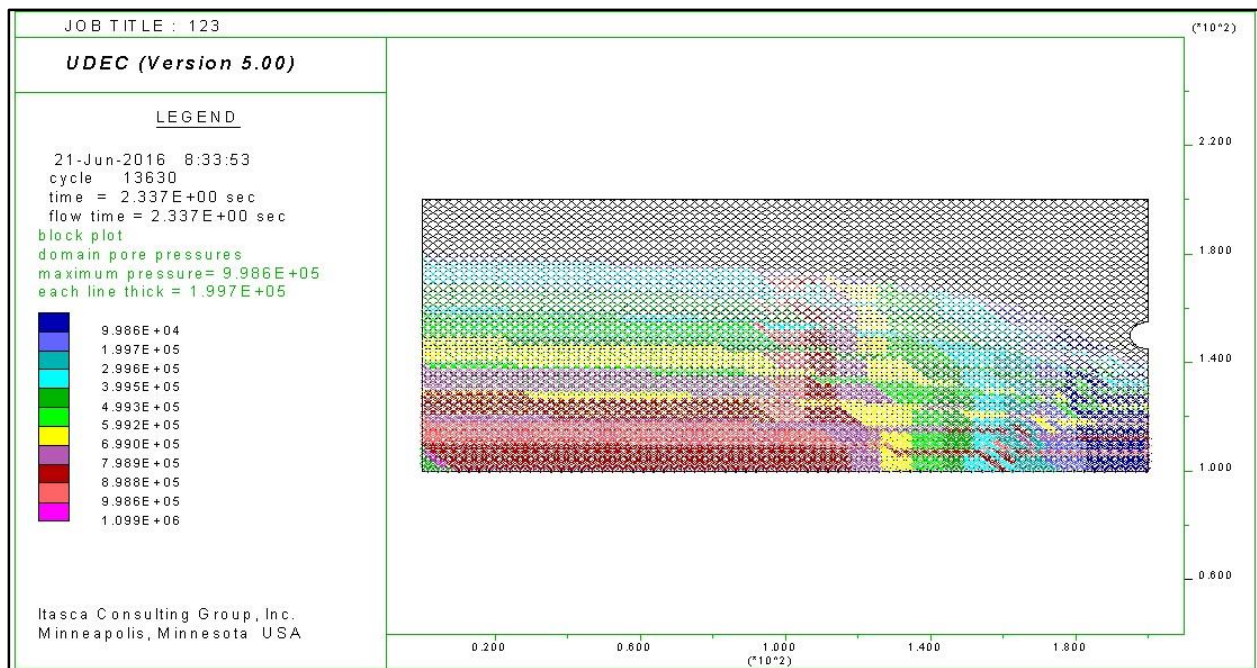
Τα δύο σύνολα των ασυνεχειών όπως προαναφέρθηκε είναι κάθετα μεταξύ τους και έχουν διεύθυνση κλίσης 45 και 135 μοίρες αντίστοιχα.

Στην εικόνα 4-29 απεικονίζεται η γεωμετρία του μοντέλου πριν την εκσκαφή της σήραγγας.



Εικόνα 4-29 Γεωμετρικό μοντέλο με κλίση ασυμμετρίας 45 – 135.

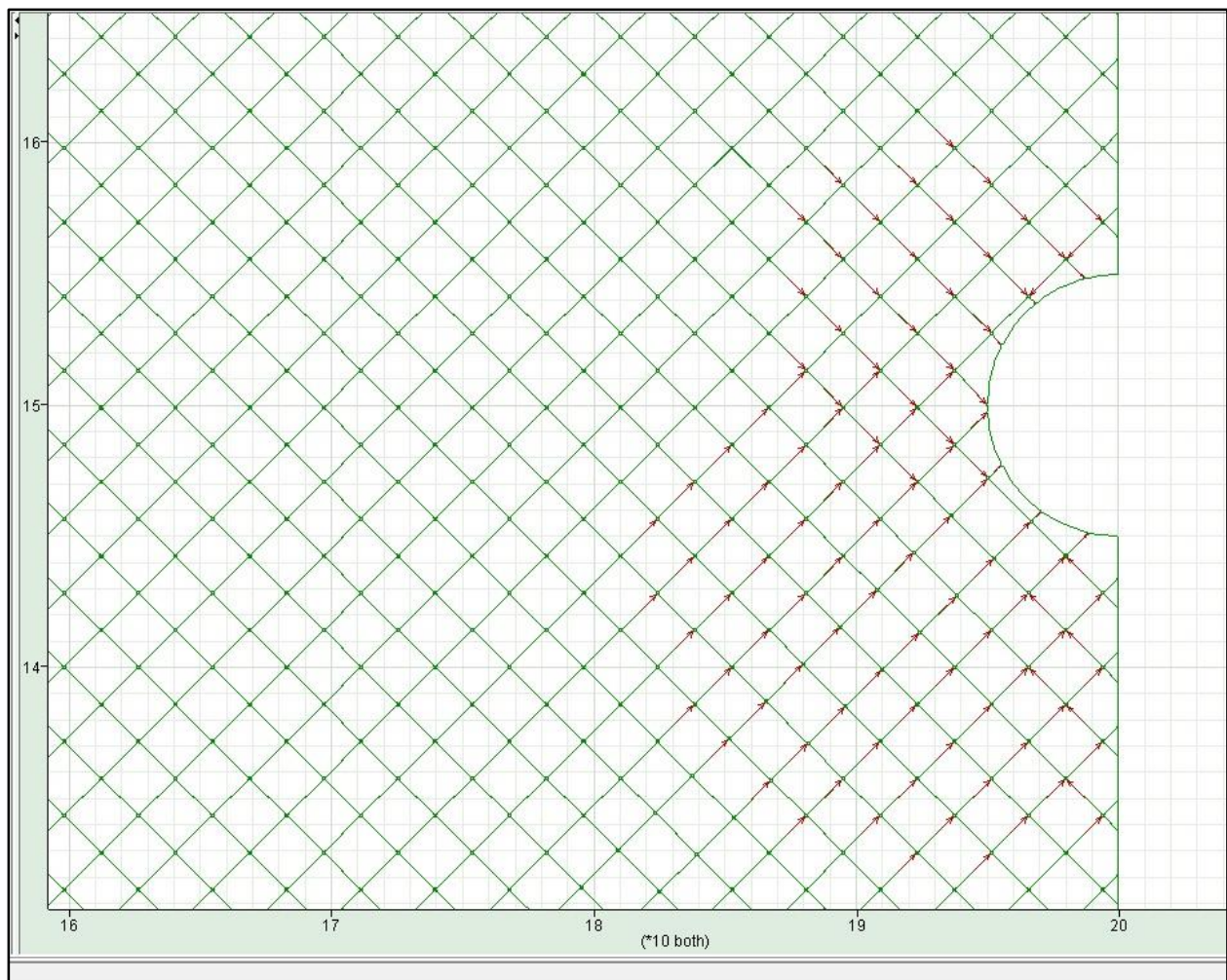
Στην εικόνα 30 παρουσιάζεται η πτώση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα μέσω της πίεσης των πόρων για το συγκεκριμένο προσομοίωμα.



Εικόνα 4-30 Πίεση πόρων μετά την εκσκαφή για το μοντέλο της πέμπτης σειράς

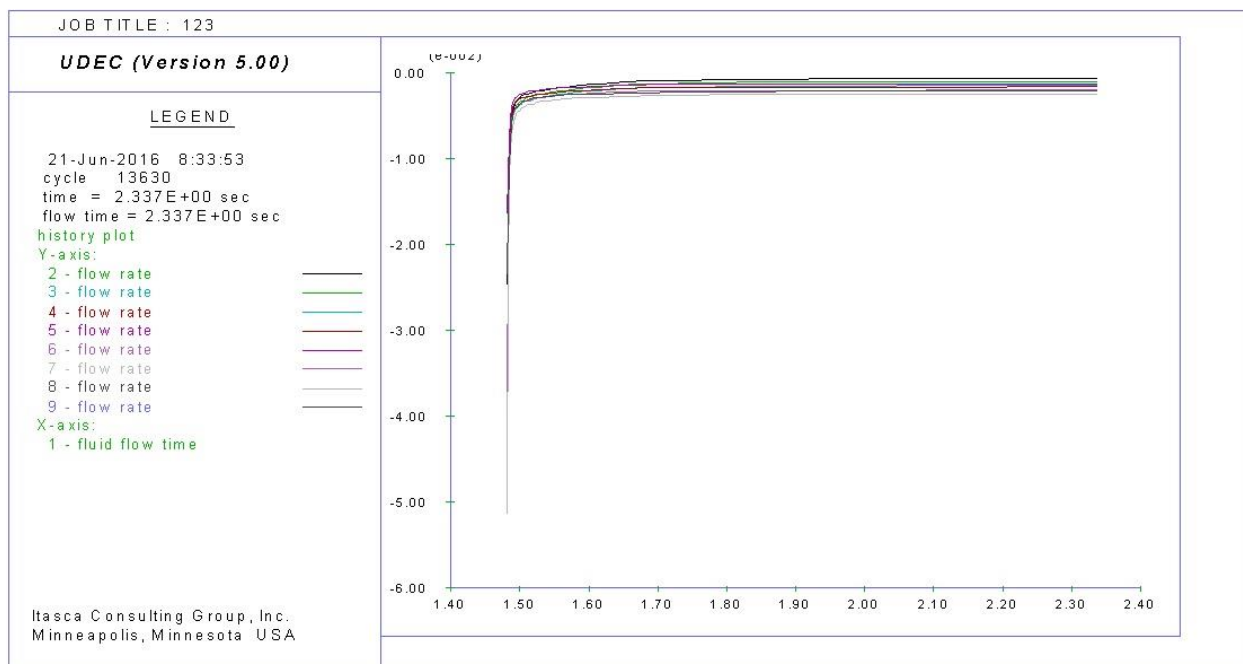
Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζονται τα διανύσματα ροής. Παρατηρείται το γεγονός ότι υπάρχει ροή σε όλες τις ασυνέχειες. Η εικόνα 4-31 σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τα σημεία παρατήρησης και παρουσιάζονται στον πίνακα 4-13 οδηγούν στο συμπέρασμα πως η κλίση των ασυνεχειών παίζει μεγάλο ρόλο στη σταθερή εισροή.

Όσο πιο κατακόρυφη είναι η ασυνέχεια ως προς τον οριζόντιο άξονα του μοντέλου τόσο λιγότερα είναι τα m^3/sec τα οποία αναμένονται να εισρέουν υπό συνθήκες σταθερής ροής στη σήραγγα.



Εικόνα 4-31 Διανύσματα ροής υπογείου νερού για το προσομοίωμα της πέμπτης σειράς

Στην εικόνα 4-32 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα τα οποία προέκυψαν από την επίλυση του παρόντος προσομοιώματος.



Εικόνα 4-32 Αποτελέσματα εισροής για το προσομοίωμα της πέμπτης σειράς

Σημείο παρατήρησης	Εισροή Q (m ³ /sec)
2	0,71 x 10 ⁻³
3	1,05 x 10 ⁻³
4	1,52 x 10 ⁻³
5	1,64 x 10 ⁻³
6	1,3 x 10 ⁻³
7	2,03 x 10 ⁻³
8	2,5 x 10 ⁻³
9	2,19 x 10 ⁻³
Σύνολο	1,294 x 10⁻²
Τελικό αποτέλεσμα	2,588 x 10⁻²

Πίνακας 4-13 Αποτελέσματα εισροής υδάτων που προκύπτουν από τα σημεία παρατήρησης.

Στον παραπάνω πίνακα παρουσιάζονται αναλυτικά τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την επίλυση του προσομοιώματος. Παρατηρείται ότι η εισροή είναι λίγο μεγαλύτερη από την αντίστοιχη εισροή του μοντέλου της τέταρτης σειράς παρόλο που οι ασυνέχειες τέμνουν τη σήραγγα κατά ένα λιγότερο σημείο.

4.7.1.1 Υπολογισμός σταθερής ροής του πέμπτου προσομοιώματος με τη χρήση αναλυτικών τύπων.

Με τη χρήση του τύπου (4.4) υπολογίζουμε την υδραυλική αγωγιμότητα η οποία αντιστοιχεί σε απόσταση ασυνεχειών 2 m και προκύπτει :

$$K = 4,16 \times 10^{-4} \text{ m/sec}$$

Οπότε αντικαθιστώντας στο τύπο (4.3) η εισροή είναι :

$$Q = 4,36 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{sec}$$

Παρατηρείται πως και σε αυτή την περίπτωση το αποτέλεσμα που προκύπτει από τους αναλυτικούς τύπου είναι πιο συντηρητικό.

4.7.1.2 Επαναπροσδιορισμός των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τους αναλυτικούς τύπους.

Λόγω της αλλαγής της κλίσης των συνόλων των ασυνεχειών προέκυψε τα εξής αποτελέσματα για τους αδιάστατους συντελεστές F, a, b.

$$F = 0,35$$

$$a = 1,36$$

$$b = 1,20$$

Αντικαθιστώντας τα παραπάνω αποτελέσματα στην εξίσωση (4.7) καθώς και την εισροή που υπολογίστηκε από τον τύπο του Goodman, η νέα τιμή της εισροής που προκύπτει είναι :

$$Q = 3,16 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{sec}$$

4.8 Έκτη σειρά αριθμητικών μοντέλων για εισροή υδάτων σε σήραγγα

Σε αυτή τη σειρά αριθμητικών προσομοιωμάτων εξετάστηκε η περίπτωση ένα από τα δύο σύνολα ασυνεχειών να είναι ασυνεχές.

Δεν εξετάστηκε η περίπτωση και τα δύο σύνολα να είναι ασυνεχείς διότι δεν θα υπήρχε σταθερή ροή λόγω μη συνδεσιμότητας του δικτύου των ασυνεχειών.

Το ύψος του υδροφόρου ορίζοντα ορίστηκε στην επιφάνεια του εδάφους και η απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών του ίδιου συνόλου στα 6 m.

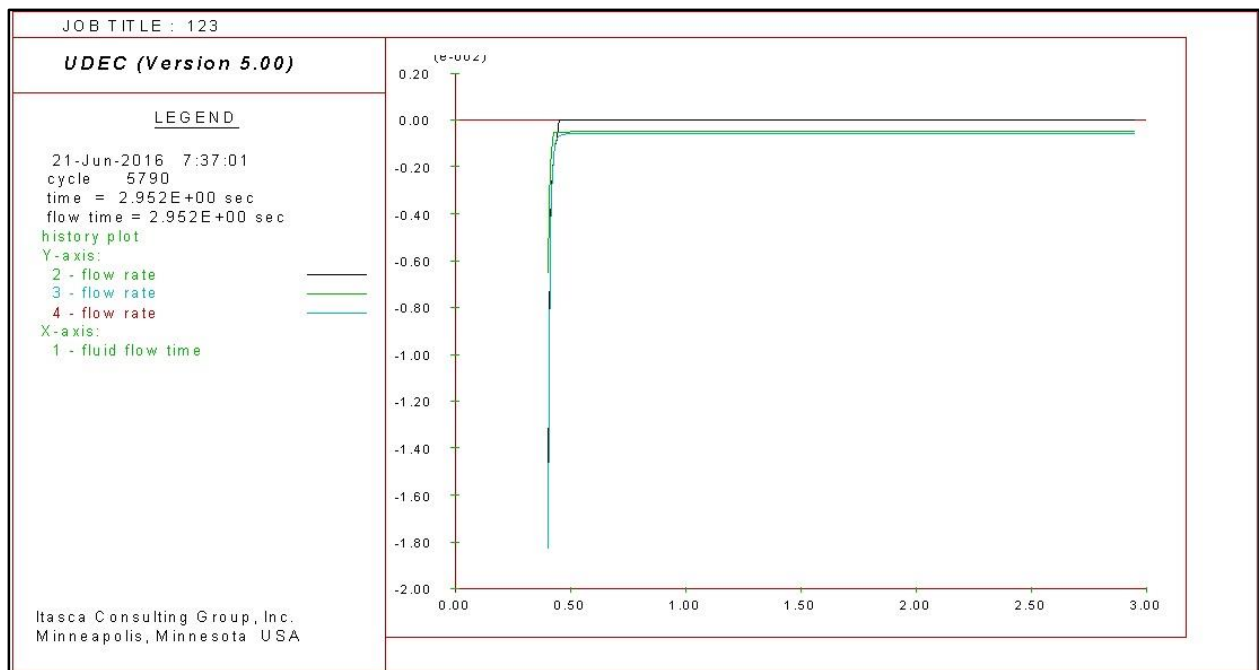
Στην πρώτη περίπτωση ως ασυνεχές σύνολο ορίστηκε το οριζόντιο και στη δεύτερη περίπτωση το κατακόρυφο.

4.8.1 Πρώτη περίπτωση ασυνεχούς οριζώντιου συνόλου

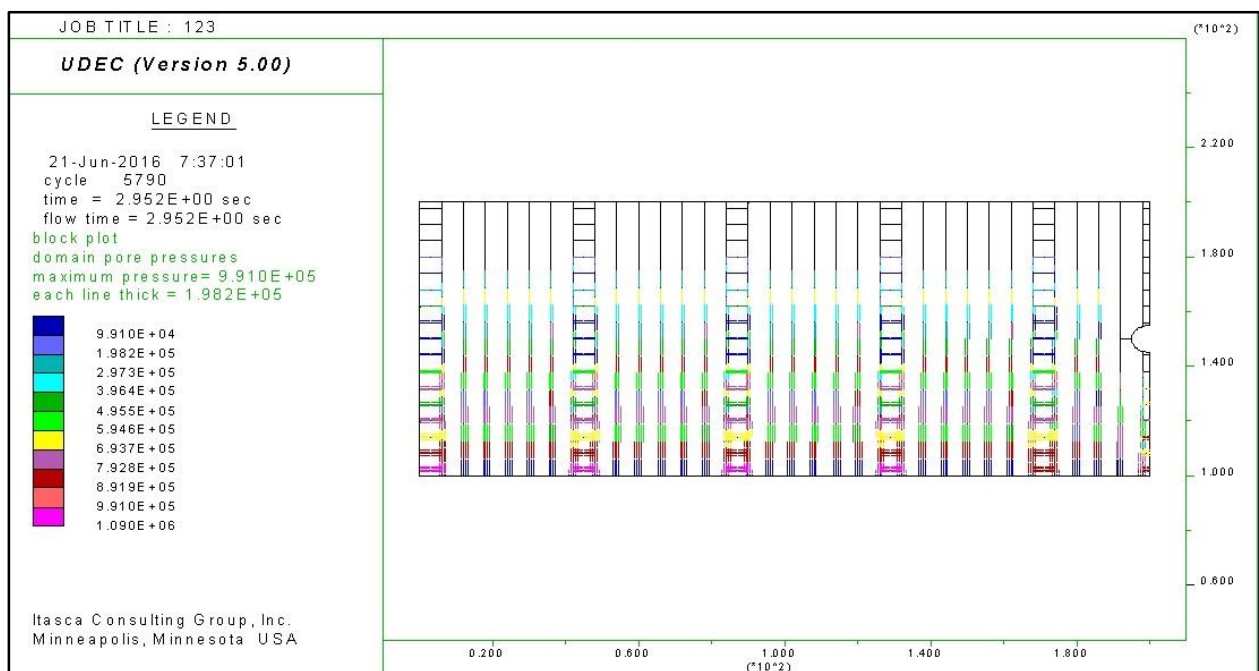
Στην πρώτη περίπτωση της έκτης σειράς ως ασυνεχές σύνολο τέθηκε το οριζόντιο. Το κενό μεταξύ των ασυνεχειών του ασυνεχούς συνόλου τέθηκε 1 m και το στίγμα της ασυνέχειας τέθηκε 6m. Το γεωμετρικό μοντέλο που προέκυψε απεικονίζεται στην εικόνα..



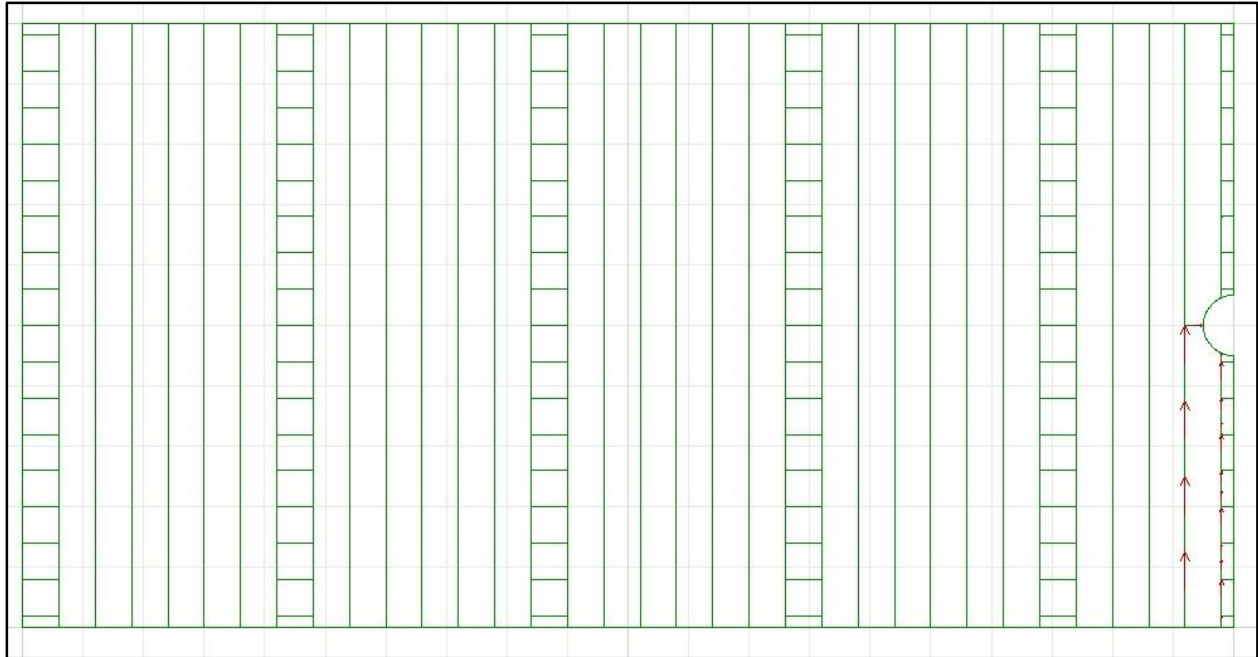
Εικόνα 4-33 Προσομοίωμα με οριζόντιο ασυνεχές σύνολο.



Εικόνα 4-34 Αποτελέσματα προσομοιώματος για ασυνεχές οριζόντιο σύνολο.



Εικόνα 4-35 Πίεση πόρων για ασυνεχές οριζόντιο σύνολο.



Εικόνα 4-36 Διανύσματα ροής για ασυνεχές οριζόντιο σύνολο.

Σημείο παρατήρησης	Εισροή Q (m ³ /sec)
2	0
3	0,48 x 10 ⁻³
4	0,58 x 10 ⁻³
Σύνολο	1,06 x 10⁻³
Τελικό αποτέλεσμα	2,12 x 10⁻³

Εικόνα 4-37 Αναλυτικά αποτελέσματα για ασυνεχές οριζόντιο σύνολο

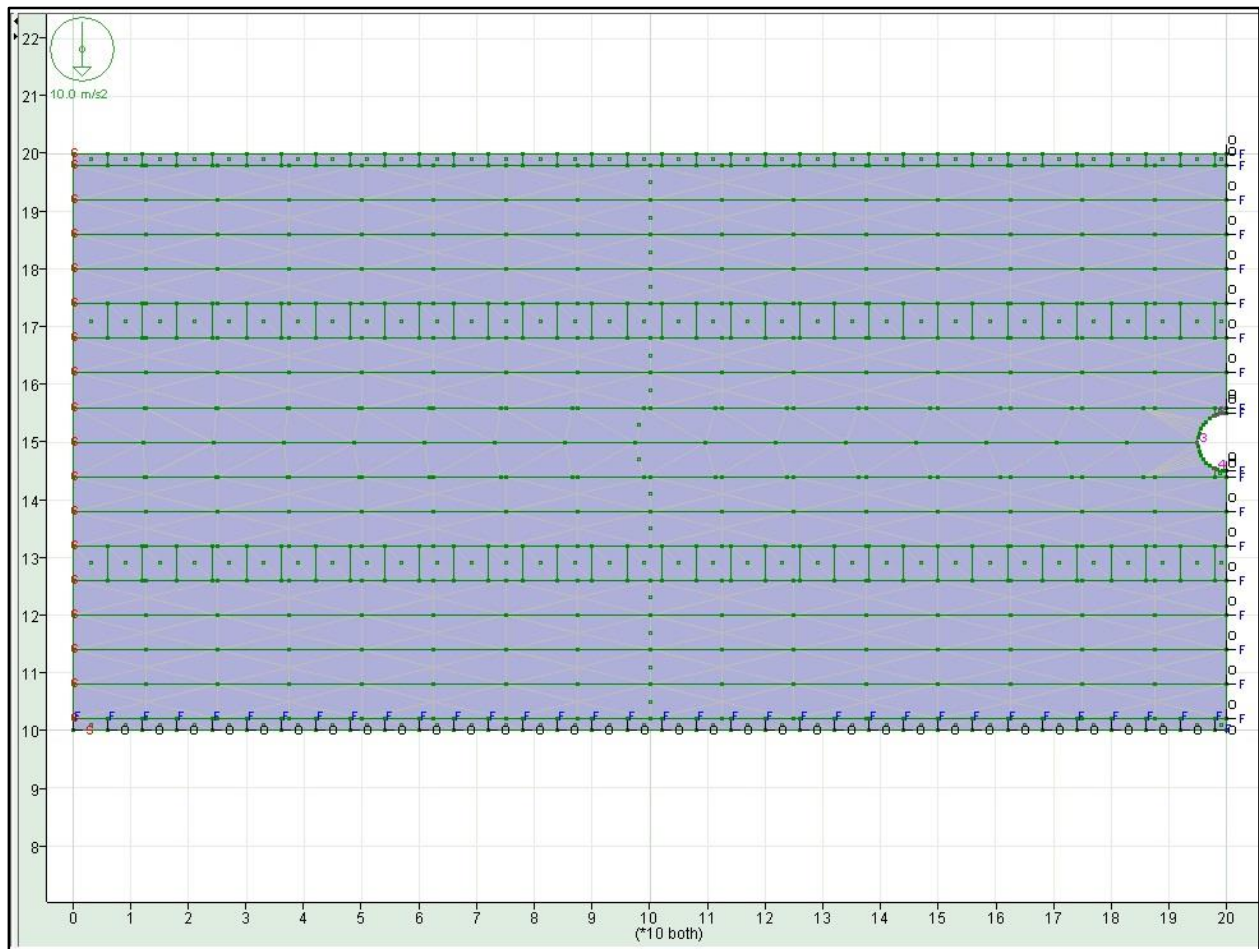
Στον παραπάνω πίνακα διαπιστώνεται η πλήρης αποστράγγιση της κατακόρυφης ασυνέχειας η οποία τέμνει στην οροφή τη σήραγγα.

Όπως έχει προαναφερθεί το δεξί όριο των προσομοιωμάτων είναι άξονας συμμετρίας, οπότε από την εικόνα ροής των υπογείων υδάτων διαπιστώνεται ότι η κατακόρυφη ασυνέχεια η οποία τέμνει την σήραγγα στην οροφή θα τροφοδοτείται από την επόμενη κατακόρυφη μέσω των ασυνεχών οριζοντίων. Όμως το αποτέλεσμα στο σημείο παρατήρησης θα παραμείνει 0 διότι για τους λόγους που έχουν προαναφερθεί θα αποστραγγιστεί και η συμμετρική ασυνέχεια.

Τα παραπάνω αποτελέσματα σε σύγκριση με τα αποτελέσματα των συνεχών οικογενειών ασυνεχειών είναι ευμενέστερα για τη διάνοιξη σήραγγων.

4.8.2 Δεύτερη περίπτωση ασυνεχούς κατακόρυφου συνόλου

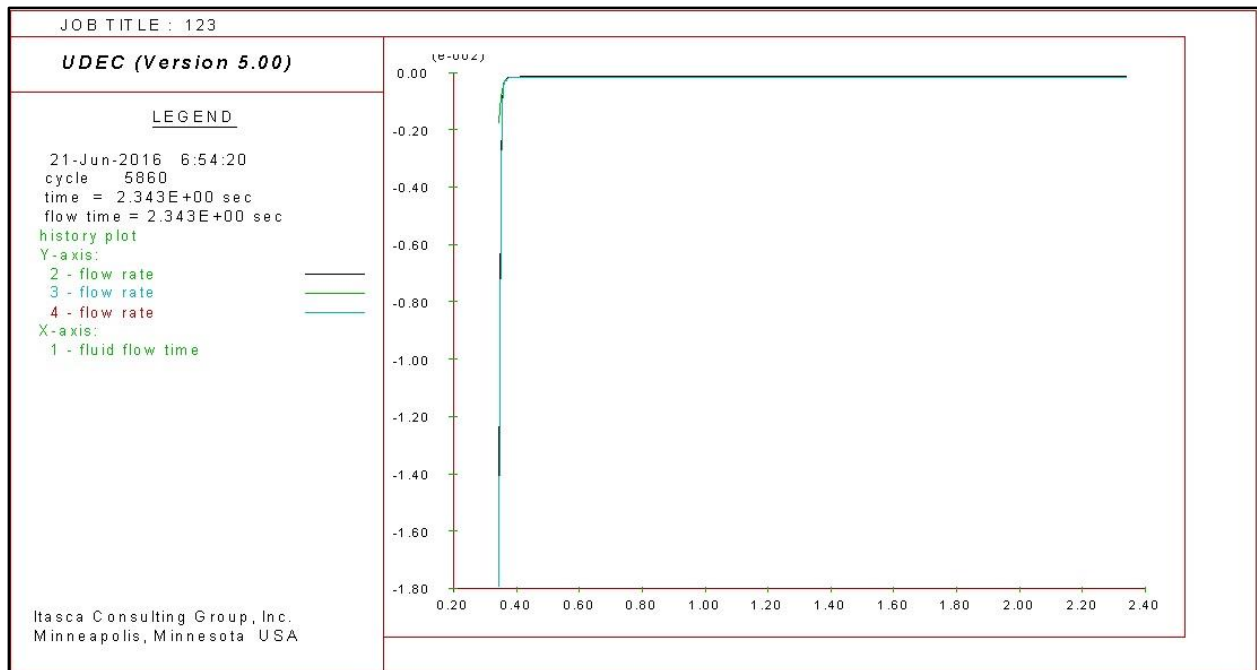
Στη δεύτερη περίπτωση της έκτης σειράς ως ασυνεχές σύνολο τέθηκε το κατακόρυφο. Το κενό μεταξύ των ασυνεχειών του ασυνεχούς συνόλου τέθηκε 1 m και το στίγμα της ασυνέχειας τέθηκε 6m ακριβώς όπως και στην προηγούμενη περίπτωση. Το γεωμετρικό μοντέλο που προέκυψε παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα.



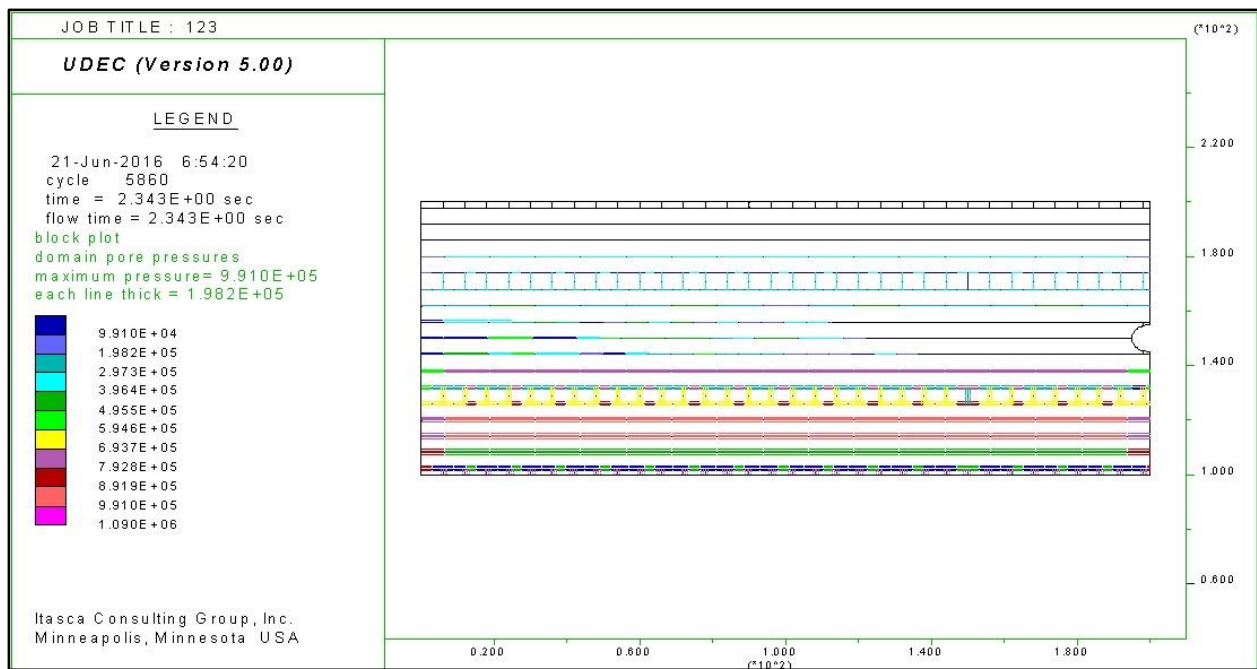
Εικόνα 4-38 Προσομοίωμα με κατακόρυφο ασυνεχές σύνολο.

Τα αποτελέσματα τα οποία υπολόγισε το UDEC απεικονίζονται γραφικά στην εικόνα 39 και η πίεση των πόρων όπως προέκυψε μετά την εκσκαφή της σήραγγας παρουσιάζεται στην εικόνα 40.

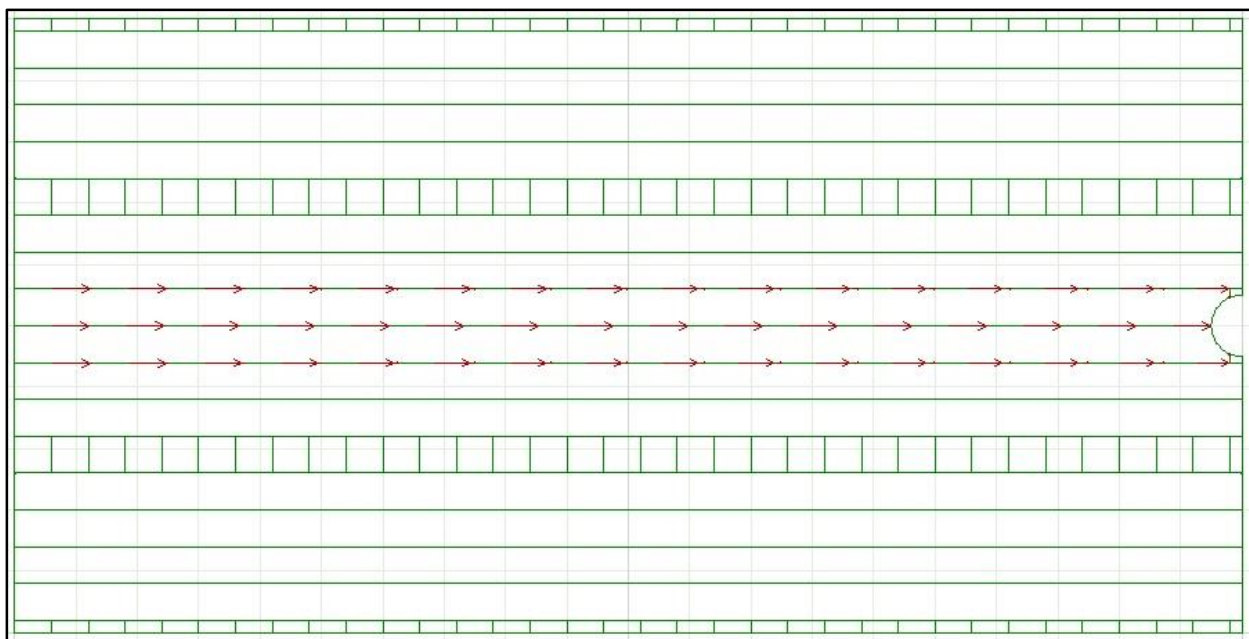
Στην εικόνα 4-41 είναι διακριτά τα διανύσματα της εισροής και παρατηρείται η οριζόντια ροή προς τη σήραγγα.



Εικόνα 4-39 Αποτελέσματα εισροής για ασυνεχές κατακόρυφο σύνολο.



Εικόνα 4-40 Πίεση πόρων για ασυνεχές κατακόρυφο σύνολο.



Εικόνα 4-41 Διανύσματα ροής για ασυνεχές κατακόρυφο σύνολο.

Σημείο παρατήρησης	Εισροή Q (m ³ /sec)
2	0,135 x 10 ⁻³
3	0,15 x 10 ⁻³
4	0,155 x 10 ⁻³
Σύνολο	0,44 x 10⁻³
Τελικό αποτέλεσμα	0,88 x 10⁻³

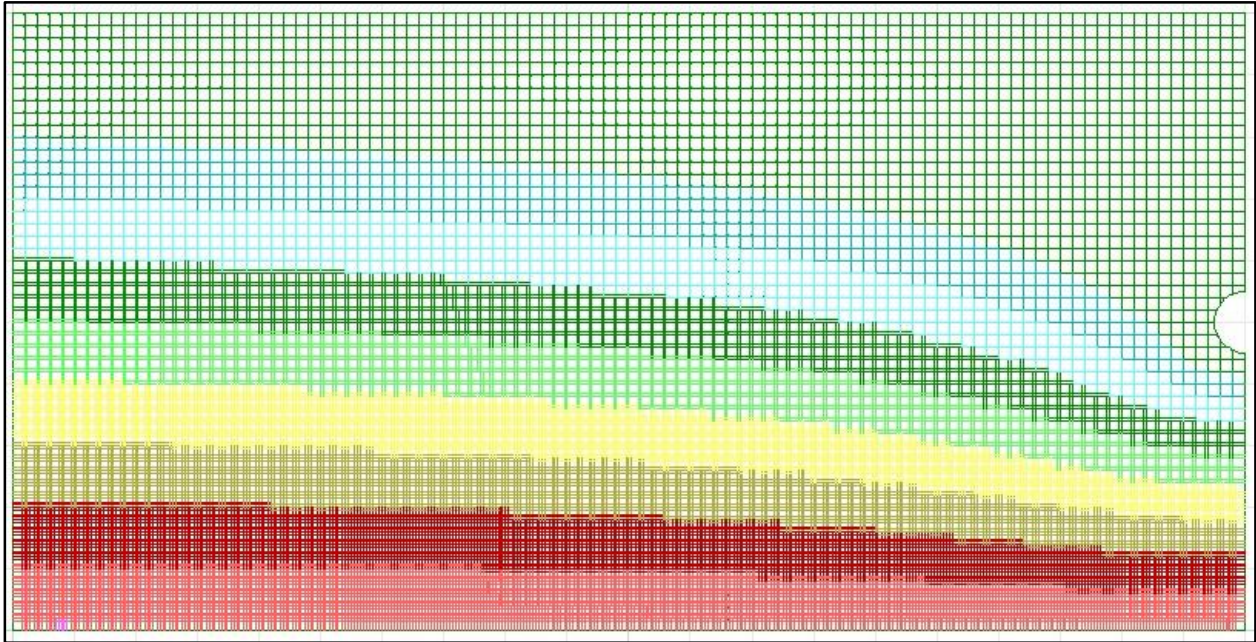
Πίνακας 4-14 Αποτελέσματα εισροής υδάτων για ασυνεχές κατακόρυφο σύνολο

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την επίλυση του προσομοιώματος αποδεικνύουν πως ένα ασυνεχές σύνολο μειώνει την εισροή σε πολύ μεγάλο βαθμό και θεωρείται πολύ πιο φιλικό για τις σήραγγες αλλά και για τον υδροφόρο ορίζοντα ο οποίος δεν υποβαθμίζεται όπως στα συνεχή σύνολα.

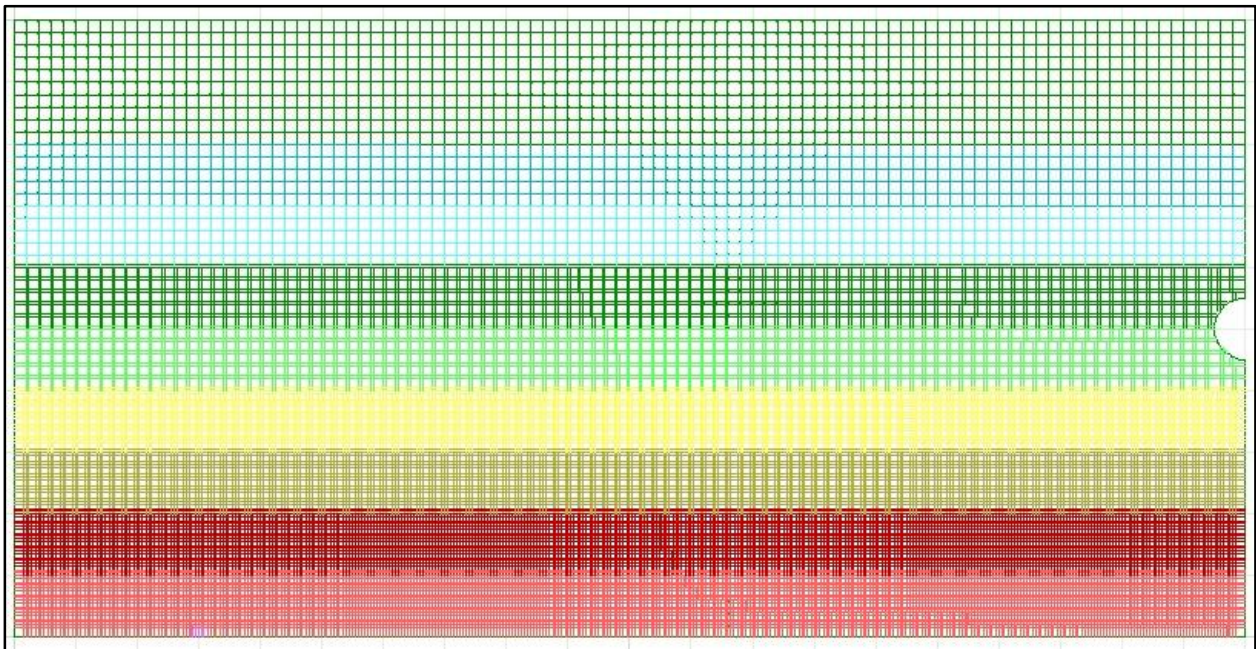
Η ύπαρξη του ασυνεχούς συνόλου μειώνει κατά πολύ την υδραυλική αγωγιμότητα του βραχώδους σχηματισμού το οποίο συνεπάγει και τη μείωση της εισροής των υπογείων υδάτων στις υπόγειες κατασκευές και κατά επέκταση στις σήραγγες.

4.9 Επιβάρυνση της υποστήριξης λόγω επαναφοράς του υδροφόρου ορίζοντα

Μετά την τοποθέτηση της αδιαπέρατης υποστήριξης ο υδροφόρος ορίζοντας έχει την τάση να επανέλθει στο αρχικό σημείο πριν την εκσκαφή όπως παρουσιάζεται στις παρακάτω εικόνες.



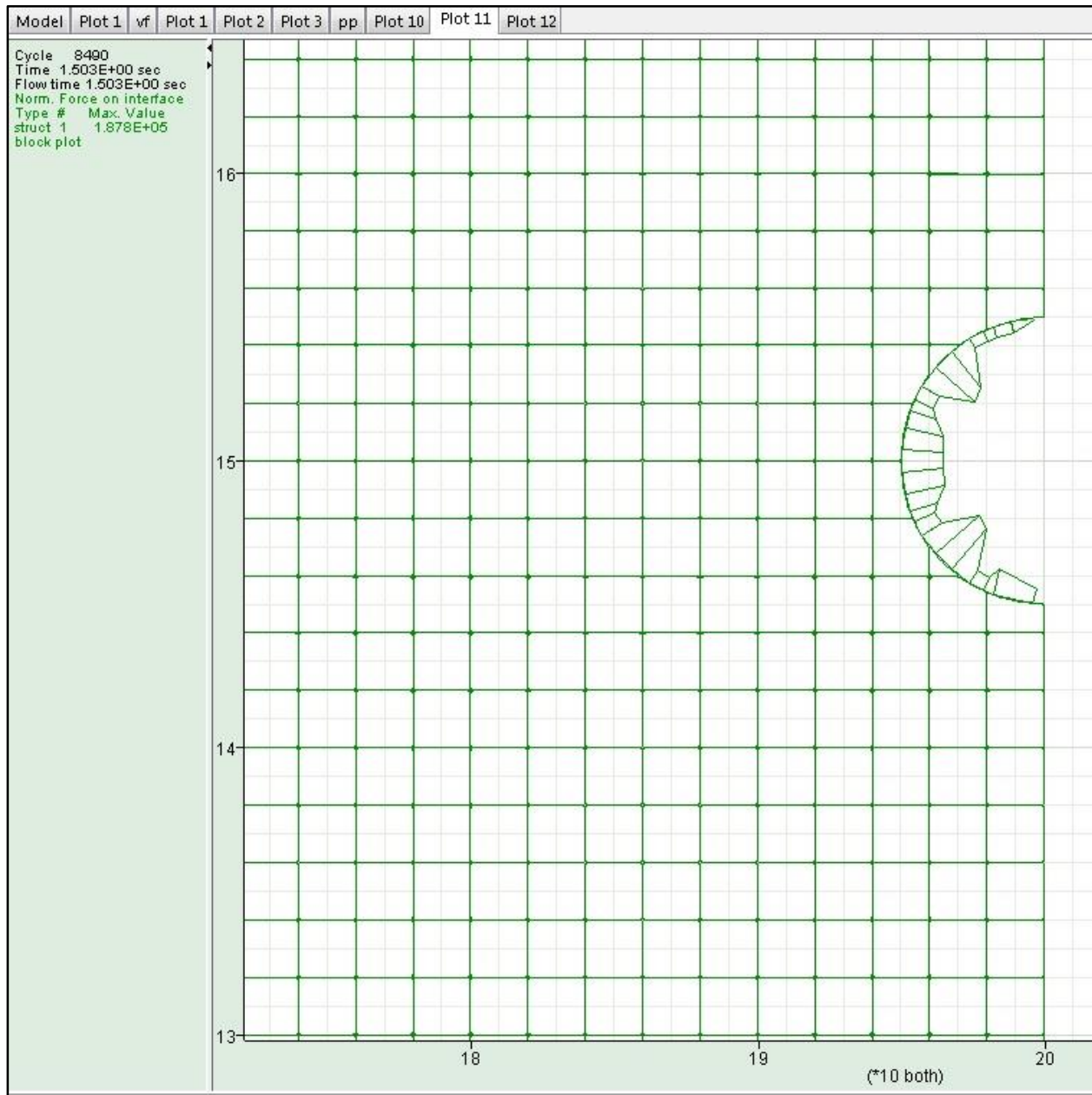
Εικόνα 4-42 Πτώση Υδροφόρου ορίζοντα λόγω διάνοιξης σήραγγας



Εικόνα 4-43 Επαναφορά υδροφόρου ορίζοντα λόγω στεγανοποίησης της σήραγγας.

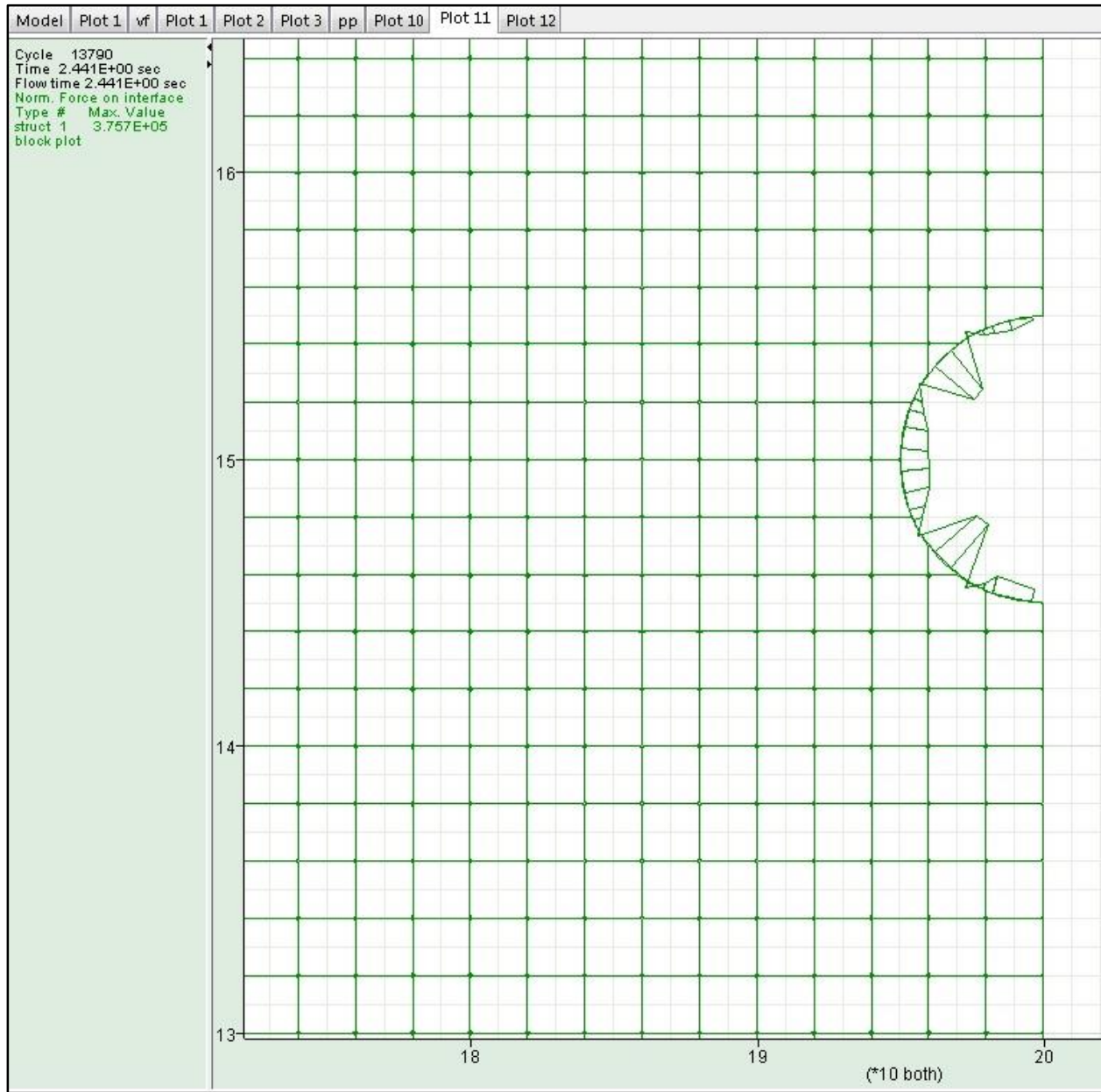
Η υποστήριξη της σήραγγας αναμένεται να αναλάβει όπως είναι φυσικό μεγαλύτερα φορτία μετά την επαναφορά του υδροφόρου ορίζοντα. Για την μέτρηση των φορτιών αυτών επιλέχθηκε το δυσμενέστερο αριθμητικό μοντέλο το οποίο αντιστοιχεί στο προσομοίωμα της τέταρτης σειράς του κεφαλαίου, δηλαδή για απόσταση ασυνεχειών 2 m και αρχικό ύψος υδροφόρου ορίζοντα αυτό της επιφάνειας.

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζονται οι ορθές δυνάμεις που ασκούνται στην υποστήριξη με τον υδροφόρο ορίζοντα υποβαθμισμένο.

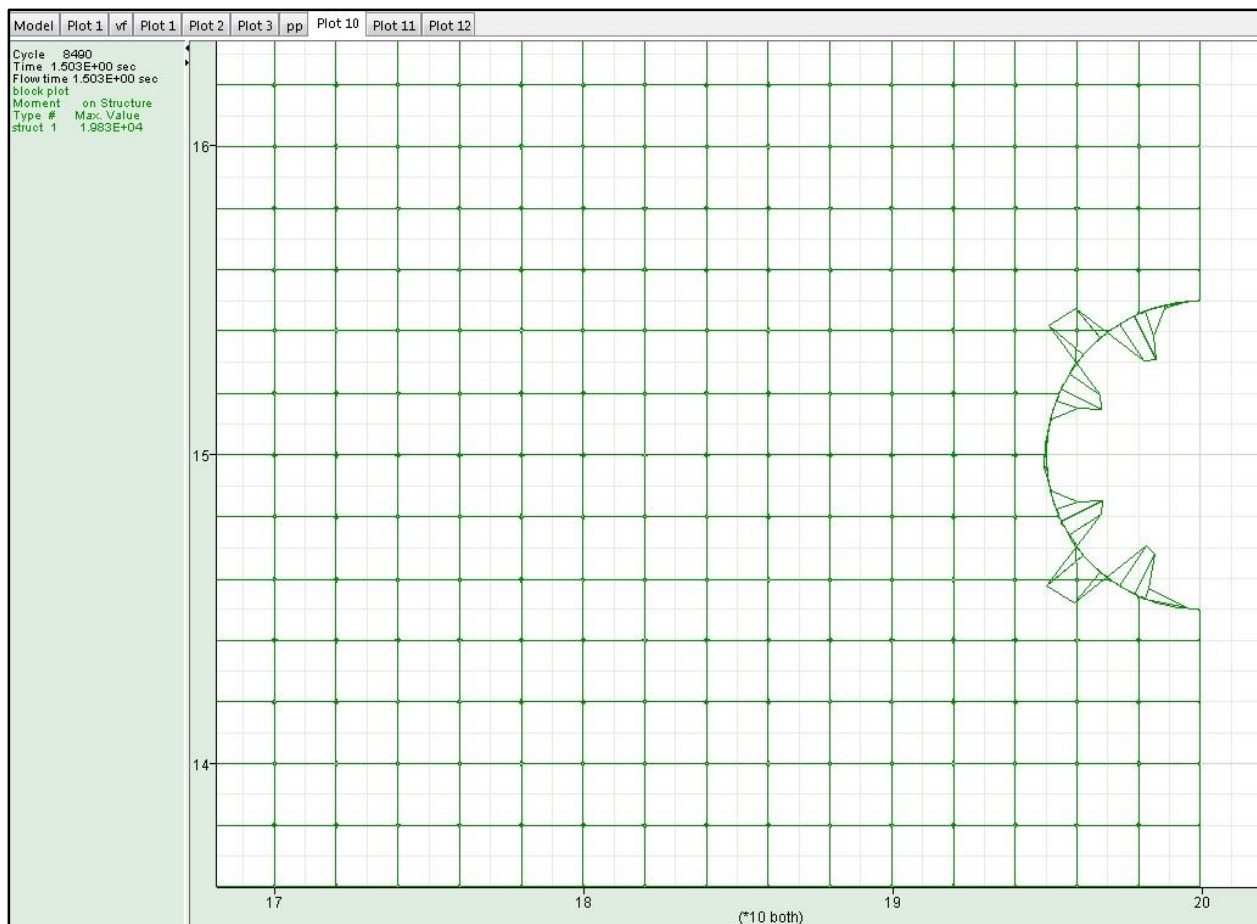


Εικόνα 4-44 Ορθές τάσεις ασκούμενες στην υποστήριξη με τον υδροφόρο ορίζοντα υποβαθμισμένο.

Οι μέγιστες τιμές που λαμβάνουν οι ορθές δυνάμεις για την πρώτη περίπτωση αντιστοιχούν σε 187 KN. Με την επαναφορά του υδροφόρου ορίζοντα παρατηρείται αύξηση των ορθών – θλιπτικών δυνάμεων που πρέπει να αναλάβει η υποστήριξη με τη μέγιστη τιμή αυτών να αντιστοιχεί σε 375 KN. Παρατηρείται επίσης ότι υπάρχουν και σημεία μηδενισμού των δυνάμεων αυτών.



Εικόνα 4-45 Ορθές τάσεις ασκούμενες στην υποστήριξη μετά την επαναφορά του υδροφόρου ορίζοντα.



Εικόνα 4-46 Καμπτικές ροπές που ασκούνται στην υποστήριξη με τον υδροφόρο ορίζοντα υποβαθμισμένο

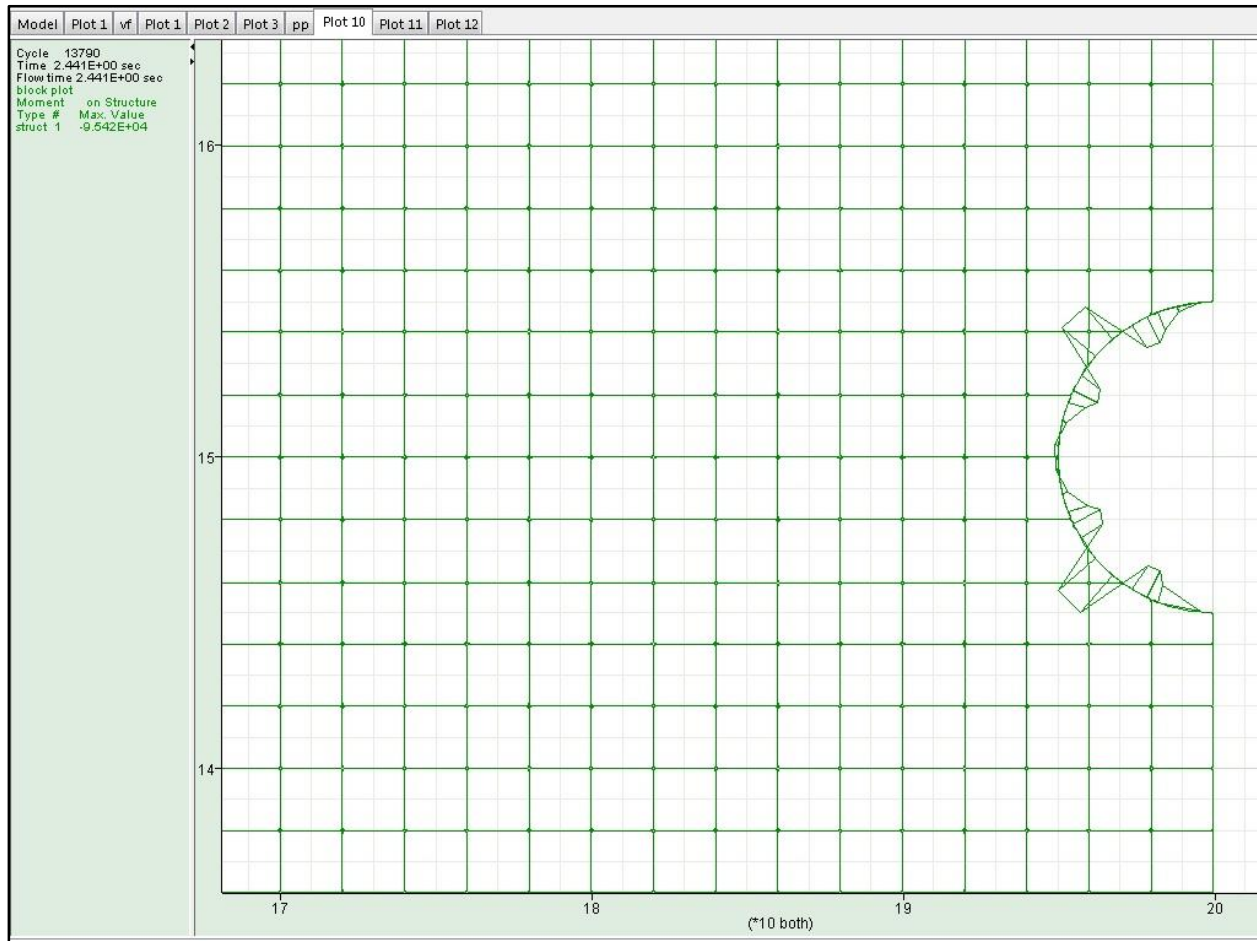
Οι ροπές που ασκούνται στην υποστήριξη τείνουν να κάμψουν την υποστήριξη και να την οδηγήσουν στην αστοχία. Στην εικόνα 4-46 παρουσιάζονται οι ροπές αυτές με τον υδροφόρο ορίζοντα υποβαθμισμένο. Παρατηρείται ότι η μέγιστη τιμή που λαμβάνουν είναι 1.983×10^4 Nm δηλαδή 19.83 KNm και ασκούνται στο εσωράχιο της σήραγγας. Επίσης παρατηρείται και μία σχετική συμμετρία στην κατανομή τους.

Η εικόνα 4-47 παρουσιάζει την κατανομή των ροπών μετά την επαναφορά του υδροφόρου ορίζοντα. Παρατηρείται αύξηση της μέγιστης τιμής από 19.83 KN m σε 95.42 KN m. Το αξιοσημείωτο είναι ότι πλέον τις μέγιστες ροπές καλείται να τις αναλάβει το εξωράχιο της σήραγγας.

Αξίζει να αναφερθεί ότι :

- Οι ροπές προκαλούν εφελκυσμό. Υποστήριξη όπως το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα είναι επιρρεπής σε αστοχία λόγω εφελκυσμού διότι έχει πολύ μικρή εφελκυστική αντοχή.

- Σε αβαθείς σήραγγες τα προβλήματα παρουσιάζονται στο δάπεδο της σήραγγας λόγω των μεγαλύτερων ροπών που δέχεται σε σύγκριση με την οροφή.



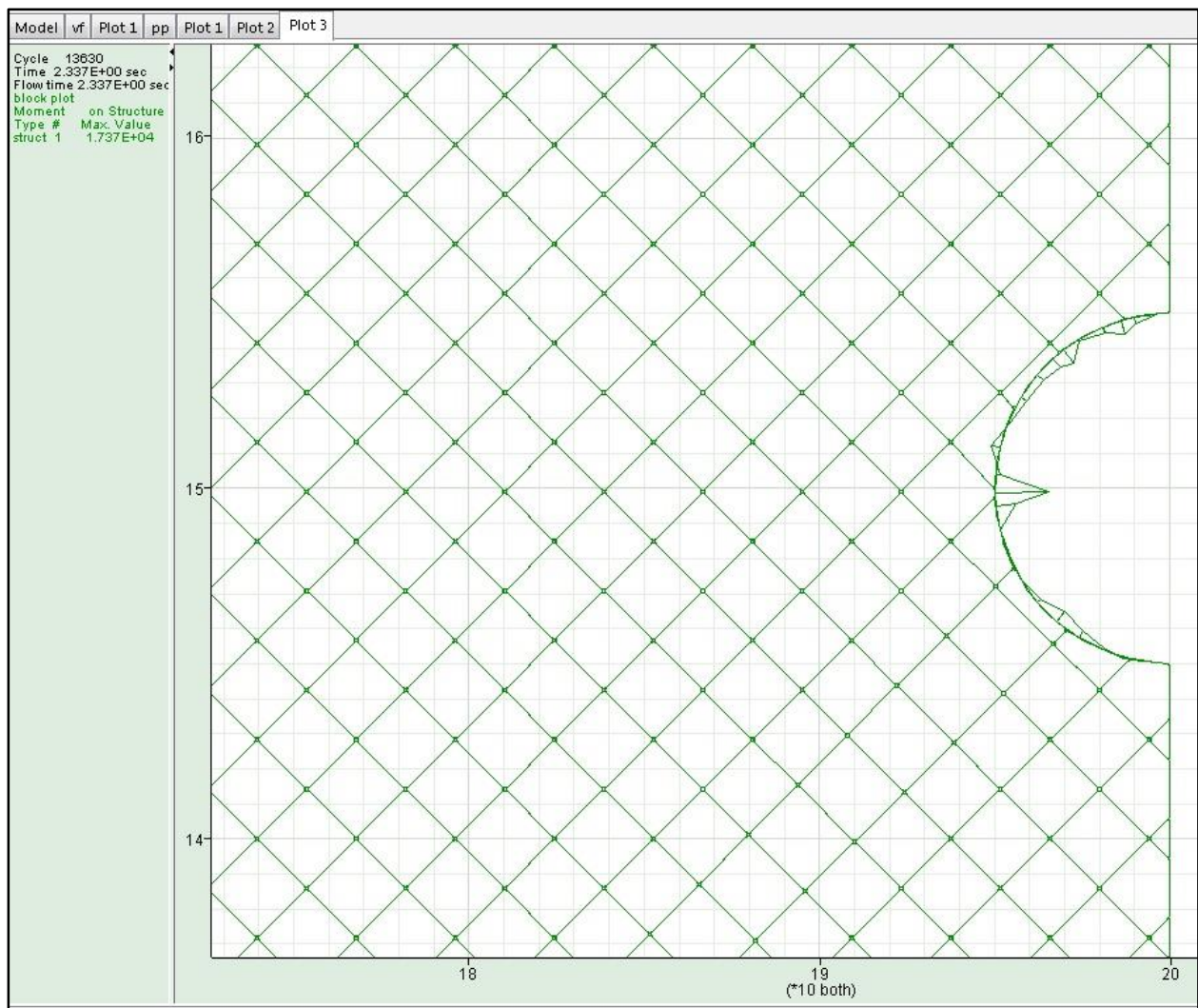
Εικόνα 4-47 Καμπτικές ροπές που ασκούνται στην υποστήριξη μετά την επαναφορά του υδροφόρου οριζοντα.

Στις εικόνες 4-48 και 4-49 που ακολουθούν παρουσιάζονται οι αντίστοιχες κατανομές καμπτικών ροπών για το γεωμετρικό μοντέλο της πέμπτης σειράς, το οποίο διαφοροποιείται στην κλίση των ασυνεχειών.

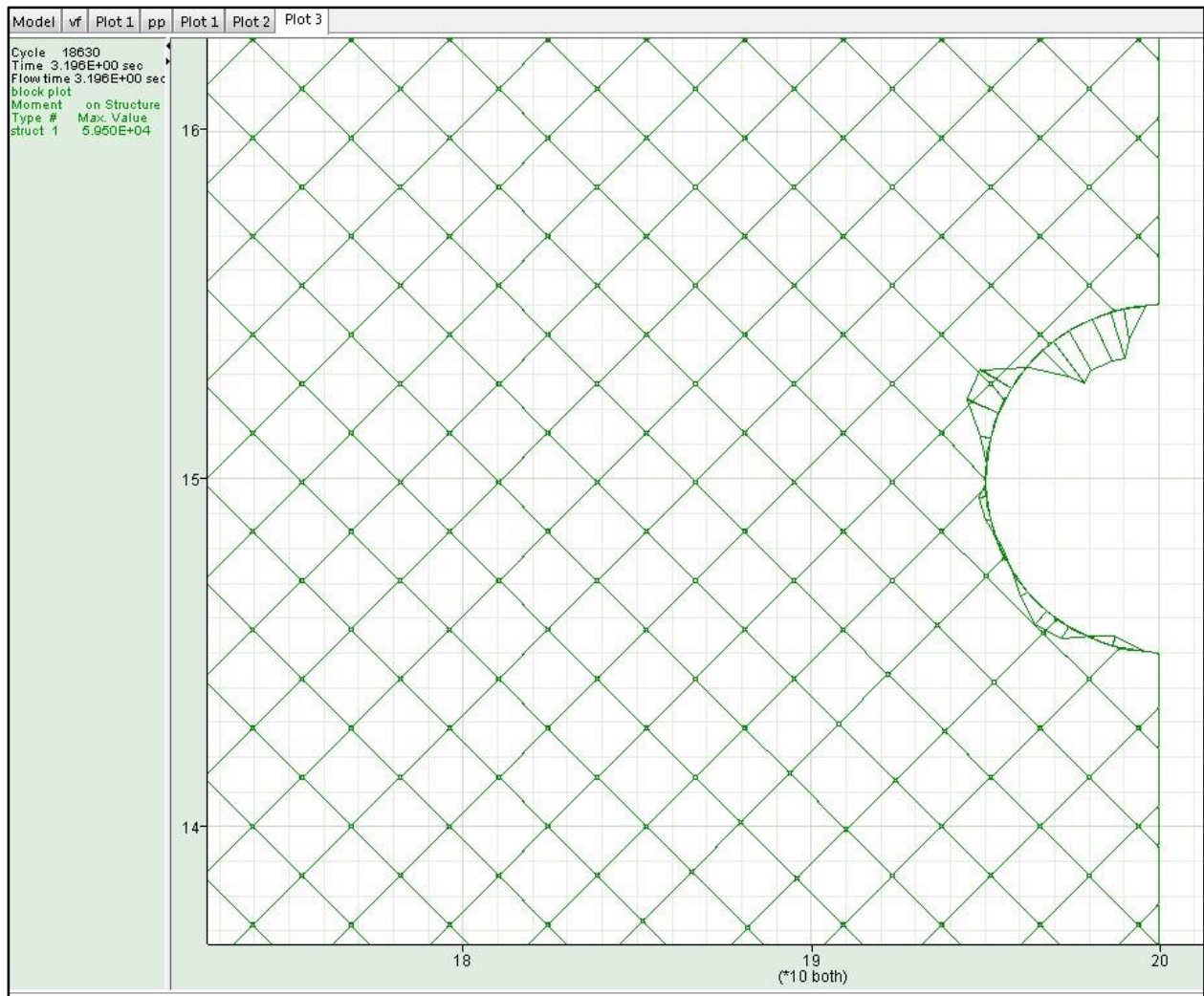
Οι μέγιστες τιμές των ροπών για τα δύο μοντέλα σε συνθήκες υποβαθμισμένου υδροφόρου οριζοντα είναι παρεμφερείς, μόλις 2 KN m διαφορά.

Οι μέγιστες τιμές όμως των ροπών μετά την επαναφορά παρουσιάζει διαφορά της τάξεως των 40 KN m και είναι μικρότερη στη δεύτερη περίπτωση.

Στο δεύτερο προσομοίωμα εκτός της μέγιστης τιμής της ροπής έχει αλλάξει και η συνολική κατανομή των ροπών, πλέον οι μέγιστες δεν βρίσκονται στο δάπεδο της σήραγγας αλλά στην οροφή και μάλιστα στο εσωράχιο (εικόνα 4-49)



Εικόνα 4-48 Καμπτικές ροπές με τον υδροφόρο ορίζοντα υποβαθμισμένο.



Εικόνα 4-49 Καμπικές ροπές μετά την επαναφορά του Υδροφόρου

Κεφάλαιο 5 – Συμπεράσματα

Από τα αποτελέσματα των αναλύσεων με τη χρήση του προγράμματος UDEC για συνθήκες μόνιμης ροής εξήχθησαν τα ακόλουθα συμπεράσματα :

- Η ποσότητα της εισροής είναι άμεσα εξαρτώμενη από το ύψος του υδροφόρου ορίζοντα. Στις παραμετρικές αναλύσεις για προσομοιώματα με την ίδια γεωμετρία διαπιστώθηκε ότι αλλαγές στο ύψος του υδροφόρου ορίζοντα πριν την εκσκαφή της σήραγγας έχουν σαν αποτέλεσμα σημαντικές διαφοροποιήσεις στη μόνιμη ροή
- Για αλλαγές στο αρχικό εντατικό πεδίο δεν παρουσιάστηκαν μεγάλες αποκλίσεις στα αποτελέσματα. Οι διαφορές ήταν μικρές και αύξουσες όσο αυξανόντουσαν οι οριζόντιες εδαφικές τάσεις. Αξίζει να σημειωθεί ότι ακόμα και για διπλάσιες οριζόντιες τάσεις δεν παρατηρήθηκε αισθητό κλείσιμο των ασυνεχειών.
- Το άνοιγμα των ασυνεχειών είναι η παράμετρος η οποία με την αλλαγή της επιφέρει τις μεγαλύτερες αλλαγές στην εισροή υδάτων. Η αύξηση του ανοίγματος κατά ένα χιλιοστό επέφερε αυξημένη εισροή κατά μία τάξη μεγέθους.
- Η απόσταση μεταξύ των ασυνεχειών ασκεί επιρροή στην συνολική υδραυλική αγωγιμότητα του βραχώδους σχηματισμού. Μικρή απόσταση μεταφράζεται σε μεγάλη υδραυλική αγωγιμότητα το οποίο συνεπάγεται υψηλή εισροή.
- Η ύπαρξη ασυνεχών συνόλων ασυνεχειών αντιστοιχεί σε μικρές εισροές λόγω της κακής σύνδεσης του υδραυλικού δικτύου. Ένα υδραυλικό δίκτυο το οποίο δεν είναι συνδεδεμένο είναι φιλικό για την διάνοιξη σηράγγων.
- Τα αναλυτικά μοντέλα, και πιο συγκεκριμένα για τους αναλυτικούς τύπους Goodman και El Tani διαπιστώθηκε ότι πρόκειται για συντηρητικούς τρόπους εκτίμησης της εισροής σε σύγκριση με τα αριθμητικά μοντέλα. Σε όλες τις περιπτώσεις που εφαρμόστηκαν υπερεκτίμησαν την εισροή σε πολλές περιπτώσεις ακόμα και κατά μία τάξη μεγέθους. Με τον εμπειρικό τύπο της Gattinoni (2009), επαναπροσδιορισμού της εισροής, τα αποτελέσματα ήταν λιγότερο συντηρητικά και ταυτόχρονα παρόμοια με αυτά των αριθμητικών μοντέλων. Σε κάποιες περιπτώσεις όπως σε αυτή της αλλαγής της παραμέτρου του ανοίγματος της ασυνέχειας ο διορθωτικός εμπειρικός τύπος παρουσίασε σφάλμα.
- Θα πρέπει να γίνεται προσεκτική μελέτη του δικτύου των ασυνεχειών, ώστε να μην υποτιμηθεί ή υπερεκτιμηθεί αντίστοιχα η εισροή – τα φορτία που θα πρέπει να αναλάβει η υποστήριξη της σήραγγας.

- Η κατανομή και η μέγιστη τιμή των καμπτικών ροπών που ασκούνται στην υποστήριξη της σήραγγας είναι άμεσα εξαρτώμενες από τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα και την κλίση των ασυνεχειών της βραχομάζας.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Μαρίνος, Π. Γ. (2007 – 2008) - Υπόγεια Νερά και Αντιμετώπιση τους, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Διατμηματικό πρόγραμμα μεταπτυχιακών σπουδών, Σχεδιασμός και κατασκευή υπογείων έργων.
2. Marinos P. (2001) – Tunnelling and mining in karstic terrane ; An engineering challenge, Geotechnical & Environmental Applications of Karst Geology & Hydrology, Beck & Herring (eds)
3. Τερζίδης, Γ. Α. - Καραμούζης, Δ. Ν. (2001) - Υδραυλική Υπογείων Νερών, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.
4. Gattinoni, P. (2009) – Tunnel inflow assessment in discontinuous rock masses : from numerical modeling to empirical equations, Politecnico di Milano (Dept. of Environmental, Hydraulic, Infrastructures and Surveying Engineering)
5. Κουμαντάκης, Ι. (1997) – Πραγματική διαπερατότητα – Υδραυλική αγωγιμότητα, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών, Τομέας Γεωλογικών Επιστημών.
6. Ρόζος, Δ. (2007) – Τεχνική Γεωλογία ΙΙ, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών, Τομέας Γεωλογικών Επιστημών.
7. Μαρίνος, Π. Γ. (2009) – Σήραγγες σε καρστικά πετρώματα, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Διατμηματικό πρόγραμμα μεταπτυχιακών σπουδών, Σχεδιασμός και κατασκευή υπογείων έργων.
8. Μαρίνος, Π. Γ (1991) – Σημειώσεις Τεχνικής Γεωλογίας.
9. Σοφιανός Α.Ι. (2007) – Υποστήριξη υπογείων έργων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών
10. B.B.S Singhal, R.P.Gurpta (2010) – Applied Hydrogeology of Fractured Rocks second edition
11. G. Anagnostou (2006) – Tunnel stability and deformations in water – bearing ground
12. Ιακωβάτος, Δ. (2014) – Αριθμητική προσομοίωση υδραυλική θραύσης σε φυσικά ρωγματωμένους ταμιευτήρες με τη μέθοδο διακριτών στοιχείων, Διπλωματική εργασία, Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
13. Itasca Co. (2012) Universal Distinct Elements Code (UDEC): User’s manual. Minneapolis, Minnesota, USA.
14. E. Hoek & J. W. Bray (1981) – Rock Slope Engineering, Revised Third Edition.

15. Goodman, R.E., Moye, D.G., Van Schalkwyg, A. and Javandel, I. (1965), "Ground water inflow during tunnel driving", *Eng. Geol*, 2, pp. 39-56
16. Lei, S. (1999), " An analytical solution for steady flow into a tunnel", *Ground Water*, 37 (1), pp. 23-26
17. Louis C (1969) Rock hydraulics, in *Rock Mechanics*, (Muller L.ed.), Springer, Verlag, Wien pp 299 – 387.
18. Ribacchi, R., Graziani, A and Boldini, D. (2002), "Previsione degli afflussi d' acqua in galleria e influenza sull' ambiente", *Meccanica e Ingegneria delle rocce*, pp. 143-199
19. Park, K.H., Owatsiriwong, A. and Lee, G.G. (2008), " Analytical solution for steady – state groundwater inflow into a drained circular tunnel in a semi – infinite aquifer : a revisit", *Tunneling and Underground Space Technology*, 23, pp. 206 – 209
20. El Tani, M. (2003), "Circular tunnel in a semi – infinite aquifer", *Tunneling and Groundwater Space Technology*, 18, pp. 49 – 55
21. Jacob, C.E. and Lohman, S.W. (1952), "Nonsteady flow to a well of constant drawdown in an extensive aquifer", *Transaction of the American Geophysical Union*, 33(4), pp. 559 – 569
22. Perrochet, P. (2005), " A simple solution to tunnel or well discharge under constant drawdown" *Hydrogeology Journal*, 13, pp. 886 – 888.