



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**  
Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων  
Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών:  
«Γεωτεχνολογία & Περιβάλλον»

**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑΣ ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗΣ ΚΑΡΣΤΙΚΟΥ  
ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΜΕΣΩ ΥΔΡΟΜΑΣΤΕΥΤΙΚΗΣ ΣΤΟΑΣ**

**ΒΛΑΧΑΚΗ Α. ΕΛΕΝΗ**

**ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:**

*Στειακάκης Εμμανουήλ, Αναπλ. Καθηγητής (Επιβλέπων)*

*Αλεξόπουλος Απόστολος, Ομότιμος Καθηγητής ΕΚΠΑ*

*Κριτσωτάκης Μαρίνος, Δρ. Υδρογεωλόγος*

Χανιά, 2021

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

## Πρόλογος

---

Με αφορμή την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω αρχικά τον Επιβλέποντα της εργασίας αυτής τον Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Στειακάκη Εμμανουήλ, για την καθοδήγηση και υποστήριξη που μου παρείχε καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου στο μεταπτυχιακό πρόγραμμα, καθώς και τους κ. Κριτωτάκη Μαρίνο, Αλεξόπουλο Απόστολο και Βαβαδάκη Διονύση, για την καθοριστικής σημασίας καθοδήγηση τους.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ επίσης οφείλω στον κ. Σοφίου Παναγιώτη, από το Τμήμα Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος της ΔΕΥΑΗ, που μου παρείχε χρήσιμα στοιχεία για την εκπόνηση της εργασίας.

Στους εργοδότες μου αρχικά για την κατανόηση αλλά και για τη βοήθεια και τη στήριξη που μου προσέφεραν τα χρόνια που διήρκησαν οι μεταπτυχιακές μου σπουδές.

Τέλος, δε θα μπορούσα να μην ευχαριστήσω την οικογένεια μου, για την υποστήριξη, το κουράγιο και την καθοδήγηση που μου παρείχαν σε όλη την διάρκεια των σπουδών μου.

Η διαχείριση των υδατικών πόρων είναι ιδιαίτερα σημαντική εκεί όπου τα διαθέσιμα υδατικά αποθέματα δεν είναι επαρκή. Στην Ελλάδα, η κύρια πηγή κάλυψης των αναγκών του πληθυσμού σε γλυκό νερό είναι τα υπόγεια νερά.

Το καρστικό σύστημα του Αλμυρού Ηρακλείου αποτελεί αντικείμενο έρευνας ήδη από το 1964, όπου διάφοροι ερευνητές προσπάθησαν να κατανοήσουν τον μηχανισμό υφαλμύρισης της πηγής του Αλμυρού, με σκοπό την αξιοποίησή της για την υδροδότηση του Δήμου Ηρακλείου.

Για την εκμετάλλευση του νερού της πηγής του Αλμυρού, έχουν κατατεθεί κατά το παρελθόν, διάφορες προτάσεις. Οι επικρατέστερες είναι: α) δίκτυο γεωτρήσεων, β) αύξηση του υδραυλικού φορτίου του γλυκού νερού της λίμνης στη θέση της πηγής και γ) η απαγωγή του νερού από τον καρστικό υδροφορέα πριν αναμιχθεί με το αλμυρό θαλασσινό νερό με την κατασκευή υδρομαστευτικής στοάς.

Στην παρούσα εργασία διερευνάται η δυνατότητα εκμετάλλευσης του καρστικού υδροφορέα μέσω υδρομαστευτικής στοάς στην περιοχή του οικισμού Κρουσώνα, στις ανατολικές παρειές του Ψηλορείτη.

Διερευνώνται οι υδρογεωλογικές συνθήκες στην περιοχή και επιχειρείται πρόβλεψη της κατάστασης αναφορικά με την υπόγεια ροή, όπως αυτή θα διαμορφωθεί με τη λειτουργία της προτεινόμενης υδρομαστευτικής στοάς.



# Abstract

---

*Water resources management is particularly important where available water resources are insufficient. In Greece, the main source of coverage for the population's freshwater needs is groundwater.*

*The karstic system of Almyros' spring, in Municipality of Heraklion, has been the subject of research since 1964, because of the salinization problem that makes the water not suitable for domestic use.*

*Many researchers have tried to understand the mechanism of salinization of the spring.*

*Various thesis have been formulated over recent years for the enhancement of water quality at the Almyros' spring. Predominant theories are either to increase hydraulic head of fresh water close to the site of discharge, or to extract freshwater from the karstic aquifer before salinization by pumping wells or by infiltration gallery.*

*In this dissertation an infiltration gallery site is being considered near to Krousonas village, on the eastern slopes of Psiloritis Mountain. Initially, the hydrogeological conditions in this area are examined. Following, an attempt was made to predict the flow conditions of groundwater in the area.*

# Πίνακας Περιεχομένων

---

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	Εισαγωγή.....	12
1.1.	Σκοπός - Αντικείμενο εργασίας .....	17
1.2.	Μεθοδολογία .....	18
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	Προγενέστερες έρευνες στον υδροφορέα που εκφορτίζει η πηγή του Αλμυρού - Προτάσεις αξιοποίησης.....	20
2.1.	Παράκτιες καρστικές πηγές .....	20
2.1.1.	Μηχανισμός εισβολής θαλασσινού νερού στην πηγή Αλμυρού .....	22
2.2.	Προτάσεις εκμετάλλευσης .....	24
2.3.	Άλλες Προτάσεις εκμετάλλευσης του υδροφορέα Αλμυρού .....	31
2.4.	Αξιολόγηση των προτάσεων .....	34
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	Περιοχή Μελέτης .....	38
3.1.	Γεωμορφολογία της περιοχής .....	39
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	Γεωλογία και τεκτονική της περιοχής.....	42
4.1.	Έρευνα πεδίου στην περιοχή .....	46
4.2.	Τεκτονική εξέλιξη στην περιοχή έρευνας .....	57
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	Υδρογεωλογία .....	60
5.1.	Υδρογεωλογικές συνθήκες στην περιοχή έρευνας .....	60
5.1.1.	Υδρογεωτρήσεις και πιεζομετρία στην περιοχή μελέτης .....	61
5.1.2.	Πιεζομετρία.....	63
5.1.3.	Υδραυλικές παράμετροι υδροφορέα .....	65
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6	Προσομοίωση της Υδρομαστευτικής Στοάς. Εκτίμηση της απόδοσης .....	67
6.1.	Παραδοχές και θεωρήσεις υπολογισμών για την προσομοίωση της υπόγεια ροής προς την υδρομαστευτική στοά. ....	75
6.1.1.	Επίλυση Σχεδιασμού Α .....	79
6.1.2.	Επίλυση Σχεδιασμού Β .....	82
6.1.3.	Επίλυση Σχεδιασμού Β για συστοιχία δύο πηγαδιών .....	86
6.1.1.	Αποτελέσματα επιλύσεων σχεδιασμών .....	88

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7	Συμπεράσματα - Προτάσεις .....	90
Βιβλιογραφία.....		92
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ .....		98

## Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 1 Η πηγή Αλμυρού αναβλύζει μέσω μικρής φυσικής λίμνης (blog.samaritakis.gr).	13
Εικόνα 2 Καρστικός αγωγός τροφοδοσίας της πηγής Αλμυρού, Ηρακλείου. Φωτογραφίες από την επιχειρήση απόδοσης της γεωμετρίας του καρστικού αγωγού της πηγής ( <a href="http://www.plongeesout.com/sites/monde/crete/almyros/almyros.htm">http://www.plongeesout.com/sites/monde/crete/almyros/almyros.htm</a> ). ....	14
Εικόνα 3 Η πηγή Αλμυρού σε σχέση με την θέση της προτεινόμενης υδρομαστευτικής στοάς στην περιοχή οικισμού Κρουσώνα (απόσπασμα από το GoogleEarth). ....	18
Εικόνα 4 Παρατηρείται το υφιστάμενο φράγμα που κατασκευάστηκε με σκοπό την ανύψωση της στάθμης του νερού στη λίμνη ( <a href="http://www.cretanbeaches.com">www.cretanbeaches.com</a> ). ....	32
Εικόνα 5 Ευρύτερη περιοχή ενδιαφέροντος, για την κατασκευή υδρομαστευτικής στοάς, στις ανατολικές παρειές του Ψηλορείτη (απόσπασμα από το GoogleEarth). Παρουσιάζεται το ίχνος της στοάς, διεύθυνσης Β-N. ....	38
Εικόνα 6 Ευρύτερη περιοχή έρευνας με την προτεινόμενη θέση της υδρομαστευτικής στοάς (απόσπασμα από το GoogleEarth). ....	46
Εικόνα 7 Καθρέπτης ρήγματος Τυλίσου - Κρουσώνα (θέση μέτρησης 2). ....	49
Εικόνα 8 Λεπτοπλακώδη μάρμαρα της Ιόνιας ζώνης, στη θέση 4. Λήψη φωτογραφίας από τη θέση μέτρησης 5. ....	49
Εικόνα 9 Λεπτοπλακώδη μάρμαρα της Ιόνιας ζώνης (θέση μέτρησης 7). ....	49
Εικόνα 10 Πηλίτες (θέση μέτρησης 8). ....	50
Εικόνα 11 Καρστική διάβρωση με διεύρυνση των διακλάσεων στα ανθρακικά της ζώνης Τρίπολης (θέση μέτρησης 10). ....	50
Εικόνα 12 Ανθρακικά πετρώματα της ζώνης Τρίπολης (θέση μέτρησης 11). ....	50
Εικόνα 13 Αποσαθρωμένοι σχηματισμοί του φλύσχη της ζώνης Τρίπολης (θέση μέτρησης 12). ....	51
Εικόνα 14 Λεπτοπλακώδη, ελαφρά πτυχωμέναμαύρα μάρμαρα, της Ιόνιας ζώνης. Χαρακτηρίζονται από λεπτές ενδιαστρώσεις πυριτόλιθων συχνά λευκών (θέση μέτρησης 13). ....	51
Εικόνα 15 Πτυχωμένα μάρμαρα, ανοιχτότεφρα έως μαύρα, Ιόνιας ζώνης (θέση μέτρησης 14). ....	51
Εικόνα 16 Μορφές διακριτοποίησης πεδίων ροής για τη μέθοδο πεπερασμένων διαφορών (α), πεπερασμένων στοιχείων (β) (Τσακίρης, 1995). ....	69

## Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 1 Μετρήσεις προσανατολισμού της στρώσης των γεωλογικών σχηματισμών που ελήφθησαν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, στην περιοχή έρευνας, πλησίον του οικισμού Κρουσώνα. ....	47
Πίνακας 2 Τιμές μεταβιβαστικότητας $T$ και περατότητας $k$ που προέκυψαν από την επεξεργασία των δεδομένων των δοκιμαστικών αντλήσεων στις γεωτρήσεις (Μονόπωλης κ.ά., 1999). ....	66
Πίνακας 3 Αποτελέσματα παροχής σε πηγάδι βάθους 10m (Σχεδιασμός Β). ....	88

## Ευρετήριο Σχημάτων

Σχήμα 1 Τομή του καρστικού αγωγού τροφοδοσίας της Πηγής Αλμυρού Ηρακλείου ( <a href="http://www.plongeesout.com/sites/monde/crete/almyros/almyros.htm">http://www.plongeesout.com/sites/monde/crete/almyros/almyros.htm</a> ). .....	14
Σχήμα 2 Περιοχές τροφοδοσίας της πηγής Αλμυρού (Arfib et al., 2007).....	15
Σχήμα 3 Η πηγή Αλμυρού και η λεκάνη τροφοδοσίας της (Arfib et al., 2007). .....	16
Σχήμα 4 Υδρογεωλογικός χάρτης του ορεινού όγκου Ίδης. 1. Η περιοχή τροφοδοσίας της Ίδης (περίπου 7,3% αποστραγγίζεται από την πηγή Αλμυρού Ηρακλείου), 2. Εμφανίσεις Οφιόλιθων, 3. Κύριες πηγές, 4. Τροφοδοσία πηγής, 5. Ισοϋέτιες καμπύλες (mm / έτος), 6. Ισοϋψείς καμπύλες (m) (Maire, 1990). .....	16
Σχήμα 5 Μοντέλο Kuscser (Καλλέργης 2001, με τροποποιήσεις από Kuscser 1950). S και P οι υδροστατικές πιέσεις που ασκούνται σε υποθετικά διαφράγματα A και B αντίστοιχα, υποθετικού αγωγού C, που ξεκινά στη συμβολή δυο αγωγών γλυκού και θαλασσινού νερού και καταλήγει στη θέση της πηγής P <sub>0</sub> . .....	21
Σχήμα 6 Διαγράμματα σύγκρισης των αποτελεσμάτων από την προσομοίωση του μηχανισμού φαλμύρισης με το μαθηματικό μοντέλο MODKARST και των μετρήσεων πεδίου, για το χρονικό διάστημα από το 1989 - 1997, στην πηγή Αλμυρού: (α) παροχή συναρτήσει του χρόνου και (β) περιεκτικότητα του νερού σε χλωριόντα συναρτήσει του χρόνου (Maramathas et al., 2006). .....	22
Σχήμα 7 Διάγραμμα συσχέτισης της ποσότητας εκφόρτισης του αλμυρού και του γλυκού νερού στην πηγή Αλμυρού (Maramathas et al., 2006). .....	23
Σχήμα 8 Νομόγραμμα σχέσης βροχόπτωσης και ημερών γλυκού νερού για τα πλήρη υδρολογικά έτη από το 1967 έως το 1994 (Μονόπωλης κ.ά., 1996). .....	24
Σχήμα 9 Συσχέτιση μεταξύ παροχής, στάθμης νερού και αλατότητας της πηγής Αλμυρού, σύμφωνα με την έρευνα από το Ελληνικό Δημόσιο, τα Ηνωμένα Έθνη –UNDP, FAO (1968 - 1971) (Breznik, 1973). .....	26
Σχήμα 10 Χωροθέτηση προτεινόμενων θέσεων κατασκευής υδρομαστευτικής στοάς (Μονόπωλης και Κλειδοπούλου, 2001). .....	29
Σχήμα 11 Σχηματική τομή προτεινόμενου υδρομαστευτικού έργου, στην οποία διακρίνονται (α) Κεκλιμένη στοά προσπέλασης, (β) Συλλεκτήριο πηγάδι, (γ) Υπο-οριζόντια (κλίσης περίπου 1%) υδρομαστευτική στοά (Μονόπωλης και Κλειδοπούλου, 2001). .....	30
Σχήμα 12 Σχηματική γεωλογική - υδρογεωλογική τομή διεύθυνσης ΔΝΔ →ΑΒΑ που διέρχεται από το ύψωμα Στρούμπουλα, τη λαγκάδα Αγίου Γεωργίου, το λόφο Κέρης και την πηγή Αλμυρού στην περιοχή του Αλμυρού. Με κίτρινο συμβολίζονται οι καρστικοί αγωγοί γλυκού νερού, με πράσινο είναι οι καρστικοί αγωγοί με υφάλμυρο νερό και με γαλάζιο οι καρστικοί αγωγοί θαλασσινού νερού. Τα βέλη εντός των αγωγών δείχνουν την κίνηση του νερού. Στην τομή με μπλέ γραμμές αποτυπώνονται γεωτρήσεις που έχουν διανοιχθεί.	

(Κλειδοπούλου, 2003, βελτιωμένη απόδοση σχήματος των Μονόπωλη και Μάστορη, 1969).	31
Σχήμα 13 Διάγραμμα παροχής - συγκέντρωσης χλωριόντων μετά την κατασκευή του φράγματος, για τα υδρολογικά έτη 1977-78 έως 1993-94 (περίοδοι λειτουργίας του σταθερού υπερχειλιστή) (Μονόπωλης κ.α., 1995).	33
Σχήμα 14 Ψηφιακό μοντέλο αναγλύφου στην περιοχή ενδιαφέροντος, με ταξινόμηση του αναγλύφου κατά Dikau (1989).	40
Σχήμα 15 Κλίση μορφολογίας εδάφους στην περιοχή μελέτης (ταξινόμηση κατά Demek, 1972).	41
Σχήμα 16 Ανθρακικοί σχηματισμοί στους ορεινούς όγκους των Ταλέων Όρεων και του Ψηλορείτη (ΙΓΜΕ, 1995).	42
Σχήμα 17 Απόσπασμα Γεωλογικού Χάρτη ΙΓΜΕ, Φύλλο Τυμπάκι (κλίμακα 1:50.000) με τη θέση της ευρύτερης περιοχής ενδιαφέροντος (ΙΓΜΕ, 1984).	45
Σχήμα 18 Γεωλογικός χάρτης της ευρύτερης περιοχής. Προτεινόμενη θέση κατασκευής της υδρομαστευτικής στοάς. Ο χάρτης δημιουργήθηκε στο πρόγραμμα ArcMap. Βασίζεται στους Γεωλογικούς Χάρτες ΙΓΜΕ φύλλο Τυμπάκι (κλ. 1:50.000), φύλλο Επάνω Αρχάναι (κλ. 1:50.000) και στην γεωλογική έρευνα πεδίου.	53
Σχήμα 19 Γεωλογική τομή Α-Α', η οποία διέρχεται από την περιοχή μελέτης και είναι εγκάρσια της προτεινόμενης υδρομαστευτικής στοάς.	55
Σχήμα 20 Γεωλογική τομή Β-Β', η οποία διέρχεται από την περιοχή μελέτης και είναι παράλληλη της προτεινόμενης υδρομαστευτικής στοάς.	56
Σχήμα 21 Στερεοδιάγραμμα στατιστικής επεξεργασίας των πόλων των μετρήσεων του ρήγματος Κρουσώνα, στην περιοχή ανάντη της Ι.Μ. Αγίας Ειρήνης. Ο μέγιστος κύκλος του ρήγματος $F1 = 47/084$ (Μέγιστη κλίση / Φορά μέγιστης κλίσης).	57
Σχήμα 22 Στερεοδιάγραμμα στατιστικής επεξεργασίας των πόλων των μετρήσεων της στρώσης στους ανθρακικούς σχηματισμούς της ζώνης Τρίπολης.	58
Σχήμα 23 Στερεοδιάγραμμα στατιστικής επεξεργασίας των πόλων των μετρήσεων της στρώσης στο φλύσχη της ζώνης Τρίπολης.	59
Σχήμα 24 Χάρτης ιχνηθέτησεων καρστικών συστημάτων Ψηλορείτη και Ταλέων Όρεων (ΙΓΜΕ, 1995).	61
Σχήμα 25 Χάρτης της ευρύτερης περιοχής με τις θέσεις των υφιστάμενων υδρογεωτρήσεων που είναι λειτουργικές, σε κλίμακα 1:50.000. (Α-Α' και Β-Β' είναι οι γεωλογικές τομές παράλληλα και εγκάρσια στη σχεδιαζόμενη υδρομαστευτική στοά).	63
Σχήμα 26 Θεωρητικά μοντέλα κατακερματισμένων πετρωμάτων (α. Πραγματικός υδροφορέας, b. Ισοδύναμο πορώδες μέσο (EPM), c. διακριτοποιημένες ρωγματώσεις (DF), d. διπλό πορώδες (DP)) (Κλειδοπούλου, 2003 με πηγή: Gale, 1982).	73

Σχήμα 27 Διατομή εγκάρσια στην υδρομαστευτική στοά (AA') με προσανατολισμό Α-Δ, η οποία εισάγεται στο πρόγραμμα Phase2. ....	75
Σχήμα 28 Εγκάρσια τομή της προτεινόμενης υδρομαστευτικής στοάς.....	77
Σχήμα 29 Εγκάρσια τομή της προτεινόμενης υδρομαστευτικής στοάς και της δευτερεύουσας στοάς με ένα πηγάδι. ....	78
Σχήμα 30 Δημιουργία του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων (meshing). Η διεύθυνση της τομής εγκάρσια στη στοά, με διεύθυνση ΔΒΔ-ΑΝΑ (απόσπασμα από το Phase2). ....	79
Σχήμα 31 Δημιουργία του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων (meshing) με πύκνωση στην περιοχή της στοάς (απόσπασμα από το Phase2). ....	79
Σχήμα 32 Ορισμός πιεζομετρικής στάθμης στα όρια του μοντέλου.....	80
Σχήμα 33 Ισοκαμπύλες ολικού υδραυλικού φορτίου στην περιοχή της στοάς.....	81
Σχήμα 34 Δημιουργία του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων (meshing) με πύκνωση δικτυώματος πλησίον του πηγαδιού και των στοών (απόσπασμα από το Phase2). ....	82
Σχήμα 35 Ισοκαμπύλες ολικού υδραυλικού φορτίου στην περιοχή του πηγαδιού, με πτώση στάθμης στο πηγάδι, λόγω άντλησης, ίση με 2m.....	85
Σχήμα 36 Ισοκαμπύλες ολικού υδραυλικού φορτίου στην περιοχή του έργου με πτώση στάθμης στα πηγάδια, λόγω άντλησης, ίση με 0,5m.....	87
Σχήμα 37 Δίκτυο πηγαδιών σε αποστάσεις μεταξύ τους 20m, πολλαπλάσιο της εκάστοτε ακτίνας επίδρασης.....	89



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 Εισαγωγή

Στην Ελλάδα, η κύρια πηγή κάλυψης των αναγκών του πληθυσμού σε γλυκό νερό είναι τα υπόγεια νερά. Ιδιαίτερα τους καλοκαιρινούς μήνες οι απαιτήσεις σε νερό είναι πολύ υψηλές με αποτέλεσμα την υπεράντληση των υπόγειων υδροφορέων. Το γεγονός αυτό έχει ως συνέπεια την υφαλμύριση των υδροφόρων στρωμάτων και την υποβάθμιση της ποιότητας του γλυκού νερού στις παράκτιες περιοχές.

Σύμφωνα με το εγκεκριμένο "Σχέδιο Διαχείρισης των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Κρήτης" (ΦΕΚ Β'570/2015), τα υπόγεια υδατικά συστήματα της Κρήτης στην πλειονότητα τους βρίσκονται σε άμεση υδραυλική επικοινωνία με την θάλασσα.

Ένα ακόμη ιδιαίτερο χαρακτηριστικό είναι οι υφάλμυρες καρστικές πηγές που εμφανίζονται κυρίως στο Βόρειο τμήμα του νησιού. Πρόκειται κατά κανόνα για μεγάλου δυναμικού πηγές, η αξιοποίηση των οποίων είναι περιορισμένη λόγω των υψηλών συγκεντρώσεων ιόντων χλωρίου (Cl<sup>-</sup>).

Οι σημαντικότεροι λόγοι που επιτείνουν το πρόβλημα της υφαλμύρισης στην Κρήτη, σύμφωνα με το εγκεκριμένο Σχέδιο Διαχείρισης των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Κρήτης (ΦΕΚ Β'570/2015), είναι:

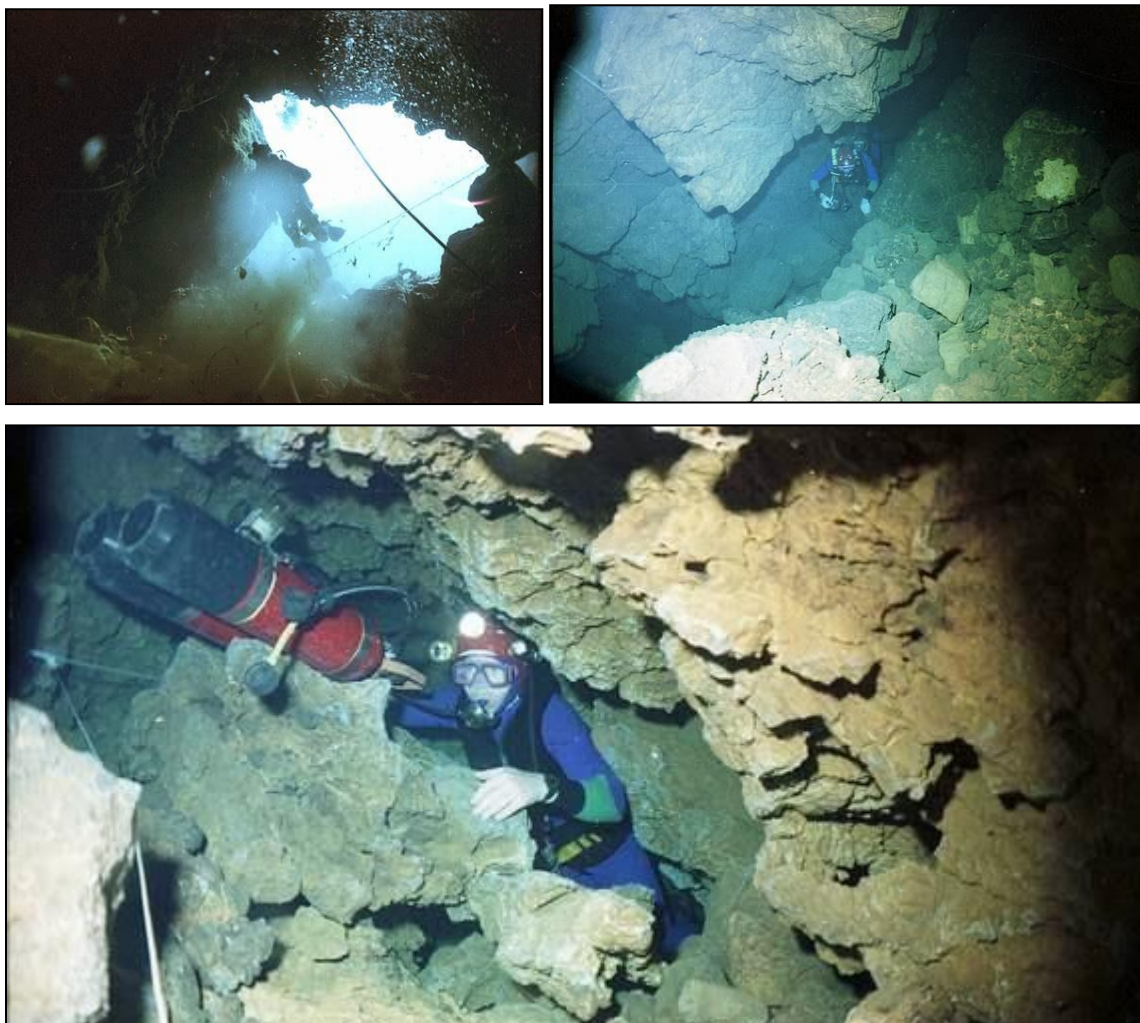
- ✓ το μεγάλο μήκος της ακτογραμμής
- ✓ η εκτεταμένη επαφή περατών σχηματισμών με την θάλασσα
- ✓ η τεκτονική δομή της Κρήτης
- ✓ η εκτεταμένη ανάπτυξη ανθρακικών σχηματισμών υψηλού βαθμού καρστικοποίησης σε άμεση επαφή με την θάλασσα
- ✓ η ταπείνωση / διαμόρφωση του επιπέδου καρστικοποίησης κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας, λόγω τεκτονικών και ευστατικών κινήσεων στον πρόσφατο γεωλογικό χρόνο
- ✓ η ανεξέλεγκτη εκμετάλλευση των υπόγειων υδροφορέων μέσω αντλήσεων
- ✓ οι εμφανίσεις εβαποριτών και γύψων
- ✓ οι κλιματικές αλλαγές με συνεπακόλουθη την μείωση των κατεισδύσεων
- ✓ η ενδεχόμενη μεταβολή της στάθμης της θάλασσας

Το πρόβλημα υφαλμύρισης είναι πιο έντονο στο βόρειο τμήμα του νησιού και κυρίως στους νομούς Ηρακλείου και Λασιθίου, καθώς η ζώνη υφαλμύρισης εκτιμάται ότι εισέρχεται προς την ενδοχώρα σε απόσταση τουλάχιστον 2-3 km από τις ακτές (Κριτσωτάκης κ.α., 2013, Περλέρους κ.α., 2004).

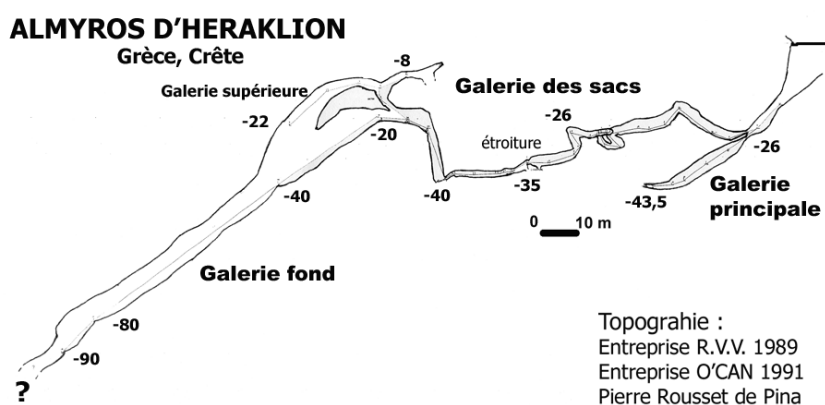
Στο πλαίσιο αξιοποίησης των διαθέσιμων πόρων στην περιοχή του Ηρακλείου, έχει δοθεί ιδιαίτερη έμφαση στην υφάλμυρη καρστική πηγή Αλμυρού, που βρίσκεται σε απόσταση περίπου 8km δυτικά της πόλης του Ηρακλείου. Η πηγή αυτή αναβλύζει μέσω μικρής φυσικής λίμνης (Εικόνα 1) η οποία σχηματίζεται σε χοανοειδές άνοιγμα στην έξοδο καρστικού αγωγού (Εικόνα 2, Σχήμα 1) ο οποίος ανέρχεται προς ΒΑ. Εκφορτίζει γύρω στα 250 εκ. m<sup>3</sup> νερού τον χρόνο, δηλαδή περίπου το ¼ της συνολικής κατανάλωσης ολόκληρης της Κρήτης (Κλειδοπούλου, 2003).



Εικόνα 1 Η πηγή Αλμυρού αναβλύζει μέσω μικρής φυσικής λίμνης (blog.samaritakis.gr).

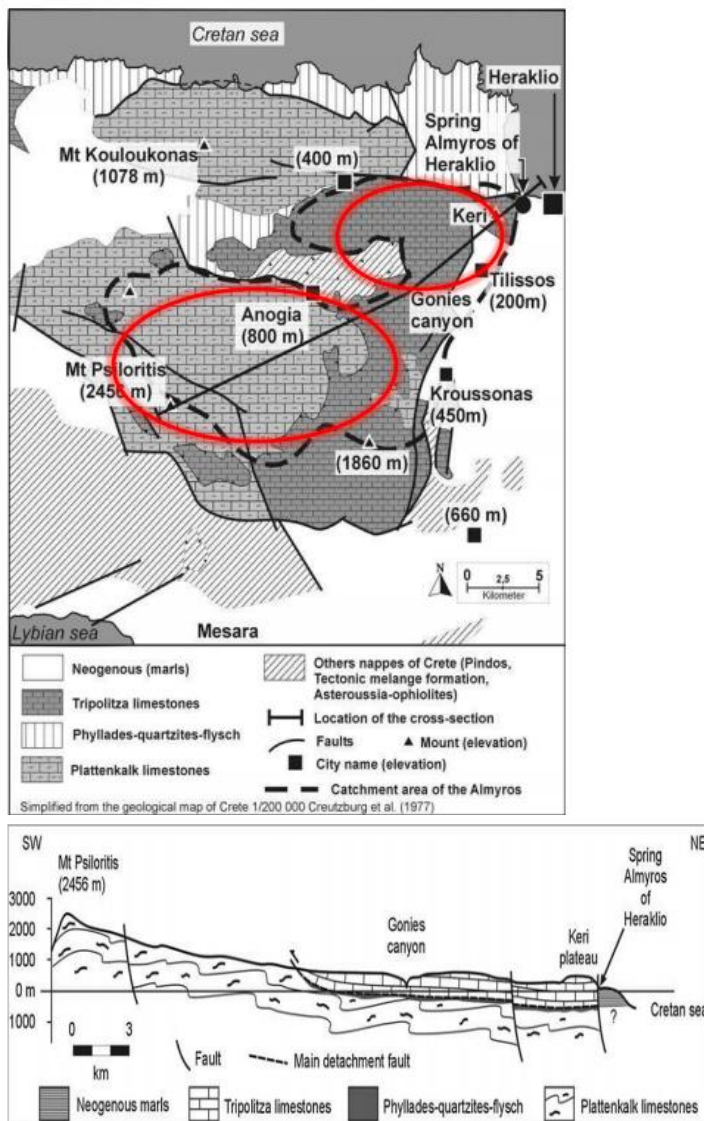


Εικόνα 2 Καρστικός αγωγός τροφοδοσίας της πηγής Αλμυρού, Ηρακλείου. Φωτογραφίες από την επιχειρήση απόδοσης της γεωμετρίας του καρστικού αγωγού της πηγής (<http://www.plongeesout.com/sites/monde/crete/almyros/almyros.htm>).



Σχήμα 1 Τομή του καρστικού αγωγού τροφοδοσίας της Πηγής Αλμυρού Ηρακλείου (<http://www.plongeesout.com/sites/monde/crete/almyros/almyros.htm>).

Τα όρια της λεκάνης τροφοδοσίας της πηγής του Αλμυρού Ηρακλείου, δεν είναι πλήρως γνωστά, καθώς η πηγή αποτελεί την έξοδο ενός πολύπλοκου υδρογεωλογικού συστήματος. Υπάρχουν διάφορες υποθέσεις σχετικά με την έκταση της. Σύμφωνα με τους Arfib et al. (2001, 2002) το καρστικό σύστημα του Αλμυρού εκτείνεται σε μία περιοχή ίση με 305 km<sup>2</sup> του ορεινού όγκου Ίδη. Η περιοχή αυτή εκτείνεται προς Βορρά έως το Κρητικό πέλαγος, την κορυφή του Ψηλορείτη προς το Νότο και την τεκτονική λεκάνη του Ηρακλείου προς τα Ανατολικά, η οποία καλύπτεται από ιζήματα του Νεογενούς και κυρίως Μάργες (Arfib et al., 2001, 2002).

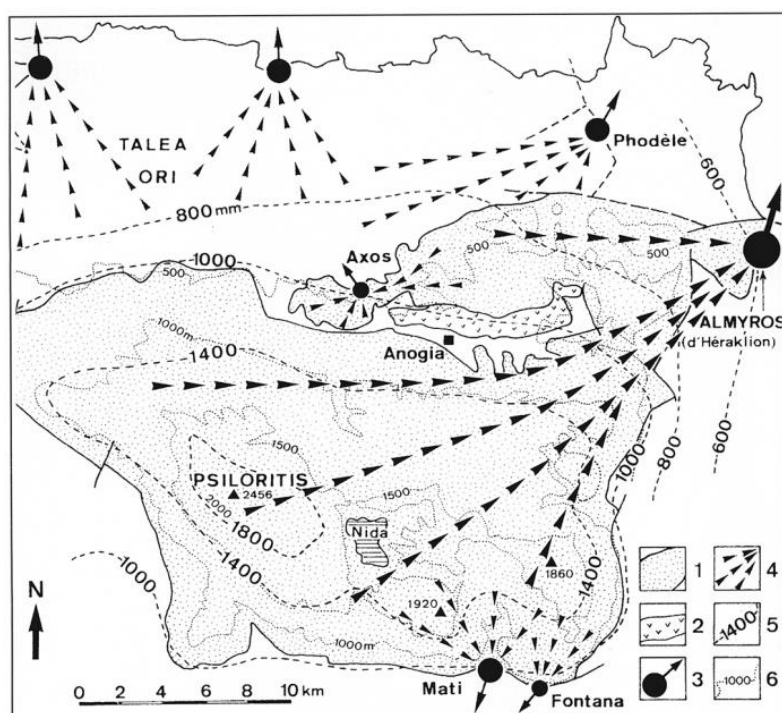


Σχήμα 2 Περιοχές τροφοδοσίας της πηγής Αλμυρού (Arfib et al., 2007).



Σχήμα 3 Η πηγή Αλμυρού και η λεκάνη τροφοδοσίας της (Arfib et al., 2007).

Σύμφωνα με τους Arfib et al. (2001, 2002, 2007) και Μπεζέ (1992) η πηγή του Αλμυρού εκτιμάται ότι τροφοδοτείται από δύο πηγές τροφοδοσίας (βλ. Σχήμα 2). Η μια αποτελεί την οροσειρά του Ψηλορείτη και τα οροπέδια του, όπως η Νίδα και η άλλη τους κοντινούς ορεινούς όγκους (Στρούμπουλα, Κέρη). Το μεγαλύτερο ποσοστό του νερού προέρχεται από τις καταβόθρες του Ψηλορείτη (Μπεζές, 1992).



Σχήμα 4 Υδρογεωλογικός χάρτης του ορεινού όγκου Ίδης. 1. Η περιοχή τροφοδοσίας της Ίδης (περίπου 7,3% αποστραγγίζεται από την πηγή Αλμυρού Ηρακλείου), 2. Εμφανίσεις Οφιόλιθων, 3. Κύριες πηγές, 4. Τροφοδοσία πηγής, 5. Ισοϋέτιες καμπύλες (mm / έτος), 6. Ισοϋψείς καμπύλες (m) (Maire, 1990).



Αναφορικά με την τροφοδοσία των καρστικών αγωγών που τροφοδοτούν την πηγή Αλμυρού αναφέρεται από τον Μπεζέ (1992, 1993) ότι το νερό του καρστικού υδροφόρου συστήματος της περιοχής Τυλίσου - Κέρης, πριν φθάσει στην πηγή του Αλμυρού, αναμιγνύεται με μεγάλη ποσότητα ψυχρότερου νερού από τον "υδροφορέα της Ίδης".

Το σπουδαιότερο έργο που έγινε στην περιοχή τα τελευταία 50 έτη και αφορά στην εκμετάλλευση του υδροφορέα που τροφοδοτεί την πηγή Αλμυρού είναι η ανόρυξη υδρογεωτρήσεων. Το εγχείρημα ξεκίνησε το 1987 από την περιοχή της Τυλίσου, ενώ στη συνέχεια, το 1991 και το 1992 ανορύχθηκαν επί πλέον υδρογεωτρήσεις στην περιοχή της Κέρης και Γωνιανού Φαραγγιού και οι απολήψεις αυξήθηκαν.

Λόγω της αυξανόμενης ζήτησης ποσοτήτων νερού για ύδρευση, στον συνεχώς αναπτυσσόμενο Δήμο Ηρακλείου και εξαιτίας της υπαλμύρισης του υπόγειου νερού στο βόρειο τμήμα του νομού από τις υπεραντλήσεις, προκύπτει η ανάγκη εύρεσης νέων μεθόδων εκμετάλλευσης των υπόγειων καρστικών υδροφορέων, με σκοπό την εξυπηρέτηση των υδρευτικών αναγκών.

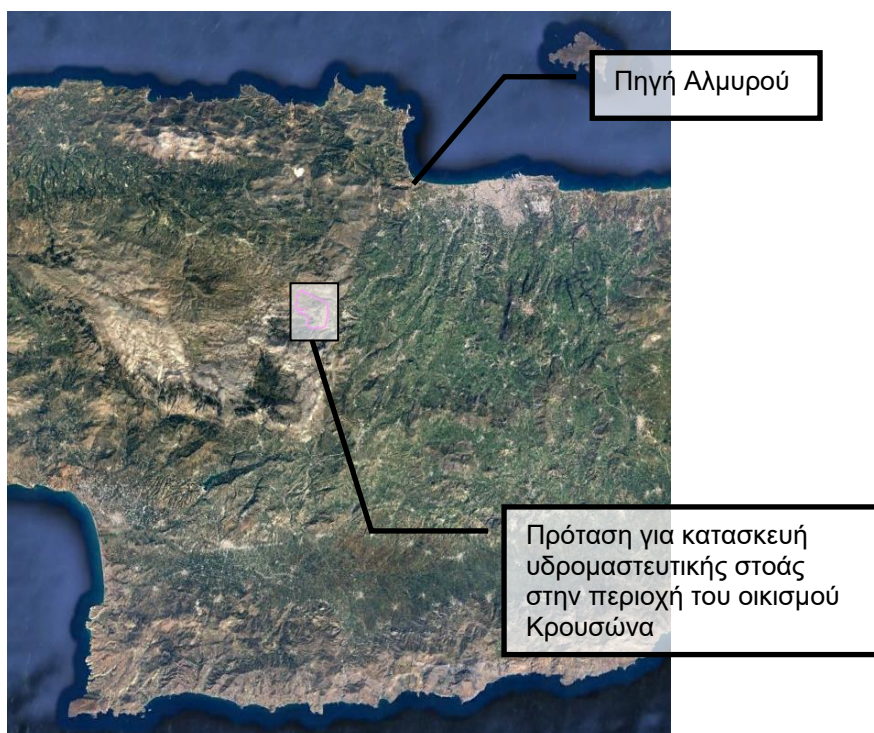
### **1.1. Σκοπός - Αντικείμενο εργασίας**

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να πραγματοποιηθεί μια πρώτη προσέγγιση της απόδοσης μίας υδρομαστευτικής στοάς στις ανατολικές παρειές του Ψηλορείτη, στο πλαίσιο εκμετάλλευσης του υδροφορέα της πηγής Αλμυρού. Η περιοχή αυτή παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον λόγω των υδρογεωλογικών συνθηκών που επικρατούν σε αυτή.

Βασικό αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η προσομοίωση της υπόγειας ροής προς μια προτεινόμενη υδρομαστευτική στοά και η εκτίμηση της απόδοσης του υδρομαστευτικού έργου.

Η προσέγγιση πραγματοποιείται σε δισδιάστατο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων. Για την κατασκευή του μοντέλου προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Phase2. Το μοντέλο προσομοίωσης του υπόγειου υδροφορέα κατασκευάστηκε με βάση τα γεωμορφολογικά, γεωλογικά, υδρογεωλογικά και υδρολογικά δεδομένα της περιοχής.

Στην Εικόνα 3 παρουσιάζεται η θέση της πηγής Αλμυρού σε σχέση με την θέση της προτεινόμενης υδρομαστευτικής στοάς στις ανατολικές παρειές του Ψηλορείτη (περιοχή οικισμού Κρουσώνα).



Εικόνα 3 Η πηγή Αλμυρού σε σχέση με την θέση της προτεινόμενης υδρομαστευτικής στοάς στην περιοχή οικισμού Κρουσώνα (απόσπασμα από το GoogleEarth).

## 1.2. Μεθοδολογία

Το πρώτο βήμα για την εκπόνηση της παρούσας εργασίας αποτέλεσε η συλλογή, ανάλυση, επεξεργασία των διαθέσιμων στοιχείων από την επισκόπηση της σχετικής βιβλιογραφίας. Έγινε ενδελεχής μελέτη σχετικά με τη λειτουργία των παράκτιων καρστικών πηγών και τα φαινόμενα υφαλμύρινσης καθώς και προτάσεων που έχουν διατυπωθεί για την αντιμετώπιση του υδρευτικού προβλήματος του Ν. Ηρακλείου με την αξιοποίηση της πηγής Αλμυρού.

Στη συνέχεια συγκεντρώθηκαν στοιχεία πιεζομετρίας της περιοχής μελέτης. Τα δεδομένα των μετρήσεων της στάθμης ηρεμίας στην ευρύτερη περιοχή, από τη Δ.Ε.Υ.Α.Η. αποτελούν έναν από τους βασικότερους παράγοντες επιλογής της περιοχής.

Πραγματοποιήθηκε έρευνα πεδίου, προκειμένου να γίνει συλλογή γεωλογικών, υδρογεωλογικών και τεκτονικών στοιχείων που θα βοηθήσουν στην αποσαφήνιση των γεωλογικών και τεκτονικών συνθηκών που επικρατούν στην περιοχή.

Εξετάστηκε επίσης η γεωμορφολογία της περιοχής και λήφθηκε υπόψη στη χωροθέτηση της υδρομαστευτικής στοάς και την προσβασιμότητα στη θέση αυτής, καθώς η στοά σχεδιάζεται στο επίπεδο της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα.

Εν συνεχεία, οριστικοποιήθηκε η θέση για την κατασκευή υδρομαστευτικής στοάς, στην περιοχή πλησίον του οικισμού Κρουσώνα (ανατολικές παρειές του Ψηλορείτη).

Εξετάζονται δύο σενάρια. Στο πρώτο σενάριο θεωρείται υδρομαστευτική στοά με τάφρο για τη συλλογή και τη μεταφορά του νερού, βάθους 1m. Ο πυθμένας της τάφρου βρίσκεται 1m κάτω από την θεωρούμενη πιεζομετρία. Στο δεύτερο σενάριο η κύρια στοά θεωρείται 1m πάνω από την πιεζομετρία και η εκμετάλλευση γίνεται με την κατασκευή πηγαδιών μικρού βάθους που ανοίγονται σε δευτερεύουσες στοές κάθετες στην κύρια στοά. Το πρώτο σενάριο πραγματοποιήθηκε για συγκριτικούς λόγους.

Για την κίνηση του νερού μέσω βαρύτητας προς την έξοδο της στοάς, η υδρομαστευτική στοά θεωρείται με κλίση ( $6-8^\circ$ ), καταδύομενη προς τα Βορρά.

Ακολουθως, για να γίνει εκτίμηση της απόδοσης της υδρομαστευτικής στοάς στην προτεινόμενη θέση, πραγματοποιήθηκε προσομοίωση της υπόγειας ροής με το υπολογιστικό πρόγραμμα Phase2, της εταιρίας Rocscience.



## **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 Προγενέστερες έρευνες στον υδροφορέα που εκφορτίζει η πηγή του Αλμυρού - Προτάσεις αξιοποίησης**

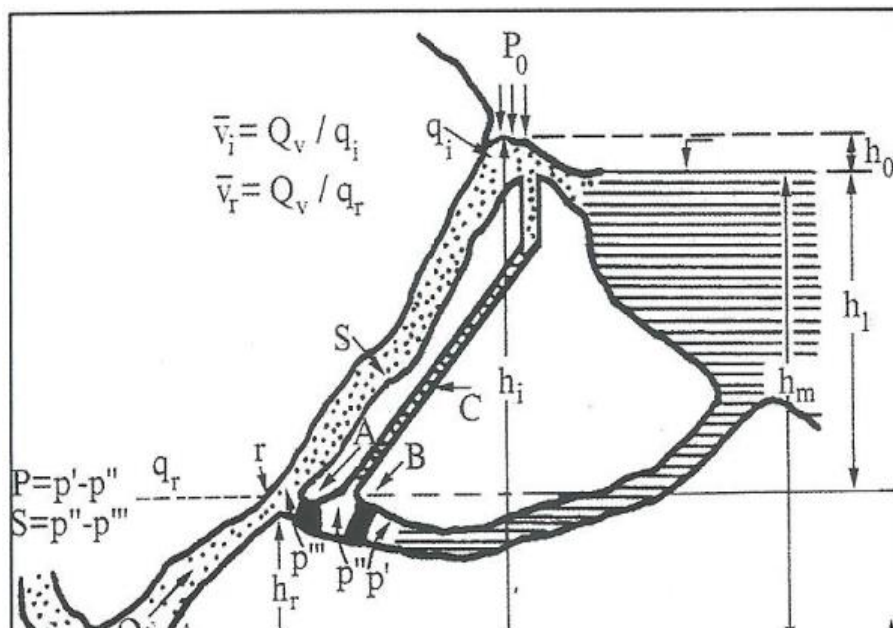
### **2.1. Παράκτιες καρστικές πηγές**

Με τον όρο καρστικές πηγές εννοούνται τα σημεία εκροής νερού των υπόγειων καρστικών συστημάτων, τα οποία αποτελούν συστήματα αποθήκευσης και μεταφοράς υπογείων υδάτων που περιλαμβάνουν μεγάλο αριθμό αγωγών διαφόρων σχημάτων και μεγεθών. Οι υπόγειες καρστικές μορφές εξαρτώνται από δύο παράγοντες: (α) τις υδραυλικές συνθήκες που διαμορφώνουν ομαλές επιμήκεις μορφές υπόγειων καρστικών εγκοίλων και (β) την τεκτονική (πάσης φύσεως ασυνέχειες) που ελέγχει το σχήμα της διατομής των καρστ (Βουβαλίδης, 2011).

Χαρακτηριστικό γνώρισμα των καρστικών πηγών είναι οι μεγάλες διακυμάνσεις της παροχής τους. Όσο μεγαλύτερος είναι ο βαθμός καρστικής διάβρωσης μιας ασβεστολιθικής μάζας (μεγαλύτερο δευτερογενές πορώδες) τόσο πιο έντονες μπορεί να είναι οι διακυμάνσεις αυτές (Βουβαλίδης, 2011).

Οι παράκτιοι καρστικοί υδροφόροι, άλλοτε επικοινωνούν άμεσα με τη θάλασσα και άλλοτε είναι απομονωμένοι. Αυτό καθορίζεται κυρίως από τη γεωλογία της περιοχής.

Σύμφωνα με τον Καλλέργη (2001) για την ερμηνεία της υφαλμύρισης και της μεταβολής της ποιότητας του νερού υποθαλασσίων και παράκτιων πηγών μπορεί να χρησιμοποιηθεί το μοντέλο Kuscser (1950) που παρουσιάζεται στο Σχήμα 5. Αποδίδει το φαινόμενο είτε στη διαφορά πυκνότητας μεταξύ γλυκού και αλμυρού νερού, είτε στην ύπαρξη στένωσης στη συμβολή δύο αγωγών που φέρνουν γλυκό νερό από την λεκάνη τροφοδοσίας και αλμυρό νερό από την θάλασσα, οπότε δημιουργείται αναρρόφηση του θαλασσινού νερού λόγω της υποπίεσης που αναπτύσσεται.



Σχήμα 5 Μοντέλο Kuscser (Καλλέργης 2001, με τροποποιήσεις από Kuscser 1950). S και P οι υδροστατικές πιέσεις που ασκούνται σε υποθετικά διαφράγματα A και B αντίστοιχα, υποθετικού αγωγού C, που ξεκινά στη συμβολή δυο αγωγών γλυκού και θαλασσινού νερού και καταλήγει στη θέση της πηγής  $P_0$ .

Ο Kuscser, δέχεται την ύπαρξη ενός αγωγού που φέρνει γλυκό νερό στο στόμιο της πηγής και ενός αγωγού που τον συνδέει με τη θάλασσα. Το θαλασσινό νερό μπορεί να εισέρχεται στον αγωγό του γλυκού νερού είτε εξαιτίας της διαφοράς πυκνότητας, εφόσον η συμβολή των δύο αγώνων βρίσκεται σε μεγάλο βάθος, είτε λόγω αναρρόφησης του θαλασσινού νερού στην περίπτωση που η διατομή της συμβολής των αγωγών είναι μικρής διαμέτρου. Με αυτό το σκεπτικό υπολόγισε τη διαφορά της υδροστατικής πίεσης στον αγωγό του γλυκού νερού.

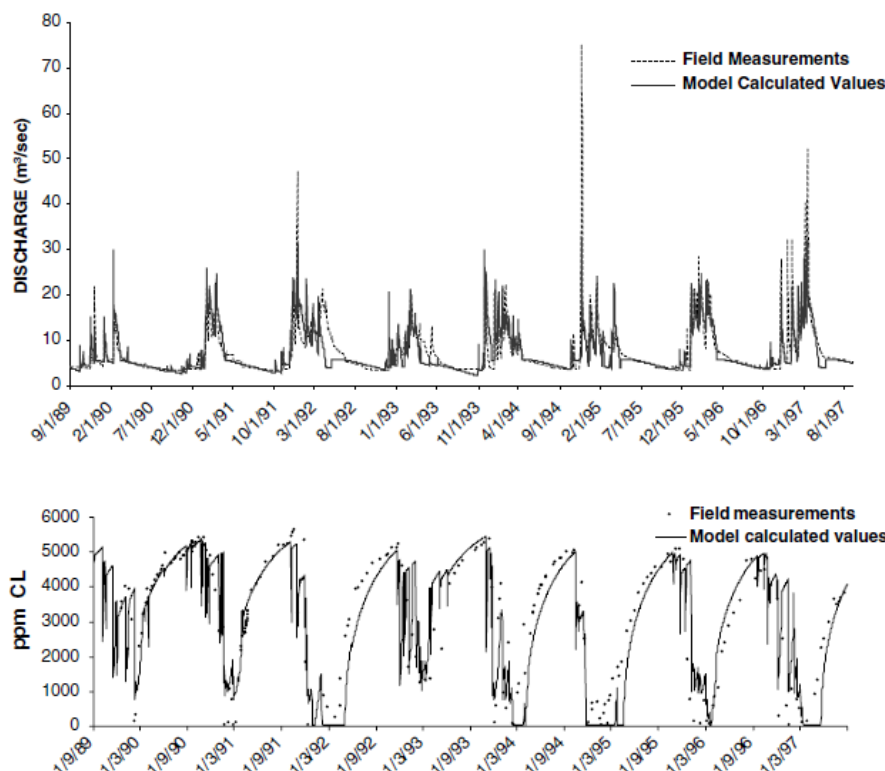
Και οι δύο μηχανισμοί πιθανόν να λαμβάνουν χώρα, αλλά είναι πολύ σημαντικό να γνωρίζουμε ποιος είναι ο κυρίαρχος μηχανισμός.

Σε κάθε περίπτωση, υπάρχει η δυνατότητα αύξησης της πίεσης του γλυκού νερού τεχνητά, οπότε η διαφορά μεταξύ της πυκνότητας θαλασσινού νερού και της πυκνότητας γλυκού νερού είναι ο κυρίαρχος μηχανισμός. Αυτό θα μπορούσε να επιτευχθεί μέσω της κατασκευής φράγματος μπροστά από την πηγή για να αυξηθεί η στάθμη του νερού στην καρστική δεξαμενή αυξάνοντας την πίεση του γλυκού νερού.

### 2.1.1. Μηχανισμός εισβολής θαλασσινού νερού στην πηγή Αλμυρού

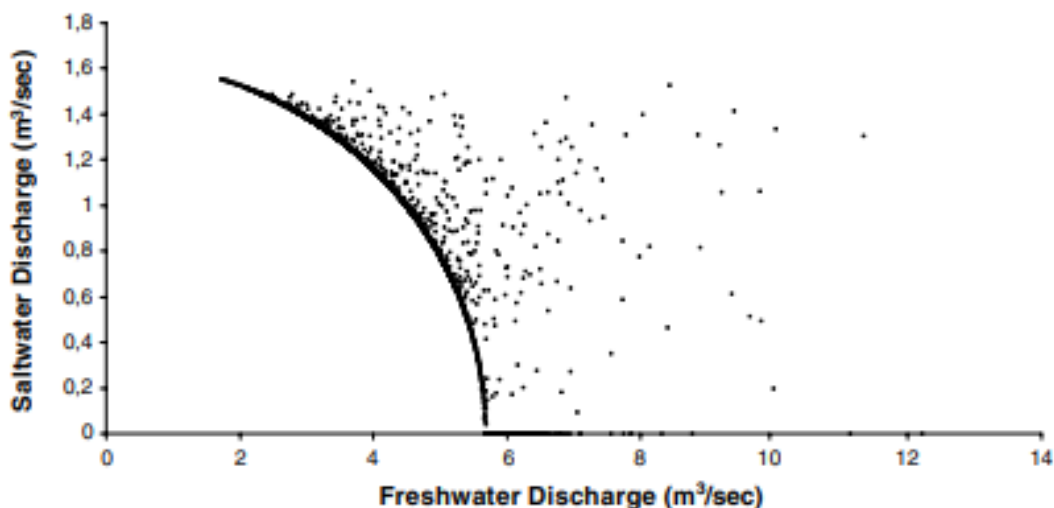
Οι Maramathas et al. (2006) επιχείρησαν την προσομοίωση του μηχανισμού υφαλμύρινσης στην πηγή Αλμυρού, χρησιμοποιώντας το μαθηματικό μοντέλο MODKARST.

Στα πλαίσια της έρευνας κατασκευάστηκαν για την πηγή Αλμυρού τα διαγράμματα παροχής συναρτήσεως του χρόνου (Σχήμα 6α) και της περιεκτικότητας του νερού σε χλωριόντα συναρτήσεως του χρόνου (Σχήμα 6β), για το χρονικό διάστημα από το 1989 έως το 1997.



Σχήμα 6 Διαγράμματα σύγκρισης των αποτελεσμάτων από την προσομοίωση του μηχανισμού υφαλμύρινσης με το μαθηματικό μοντέλο MODKARST και των μετρήσεων πεδίου, για το χρονικό διάστημα από το 1989 - 1997, στην πηγή Αλμυρού: (α) παροχή συναρτήσεως του χρόνου και (β) περιεκτικότητα του νερού σε χλωριόντα συναρτήσεως του χρόνου (Maramathas et al., 2006).

Οι ερευνητές Maramathas et al. (2006) διατύπωσαν την άποψη ότι όταν αυξάνεται η ποσότητα εκφόρτισης γλυκού νερού στη θέση της πηγής, παρατηρείται μείωση στην εκφόρτιση αλμυρού νερού. Αυτό αποτυπώνεται στο Σχήμα 7.



Σχήμα 7 Διάγραμμα συσχέτισης της ποσότητας εκφόρτισης του αλμυρού και του γλυκού νερού στην πηγή Αλμυρού (Maramathas et al., 2006).

Επίσης, από την έρευνα προέκυψε ότι όταν αυξάνεται η διαφορά πίεσης μεταξύ θαλασσινού και γλυκού νερού, αυξάνει η εκροή αλμυρού νερού. Στην περίπτωση αυτή, η διαφορά της πυκνότητας του γλυκού και του θαλασσινού νερού είναι ο κυρίαρχος μηχανισμός διεύθυνσης (Maramathas et al., 2006).

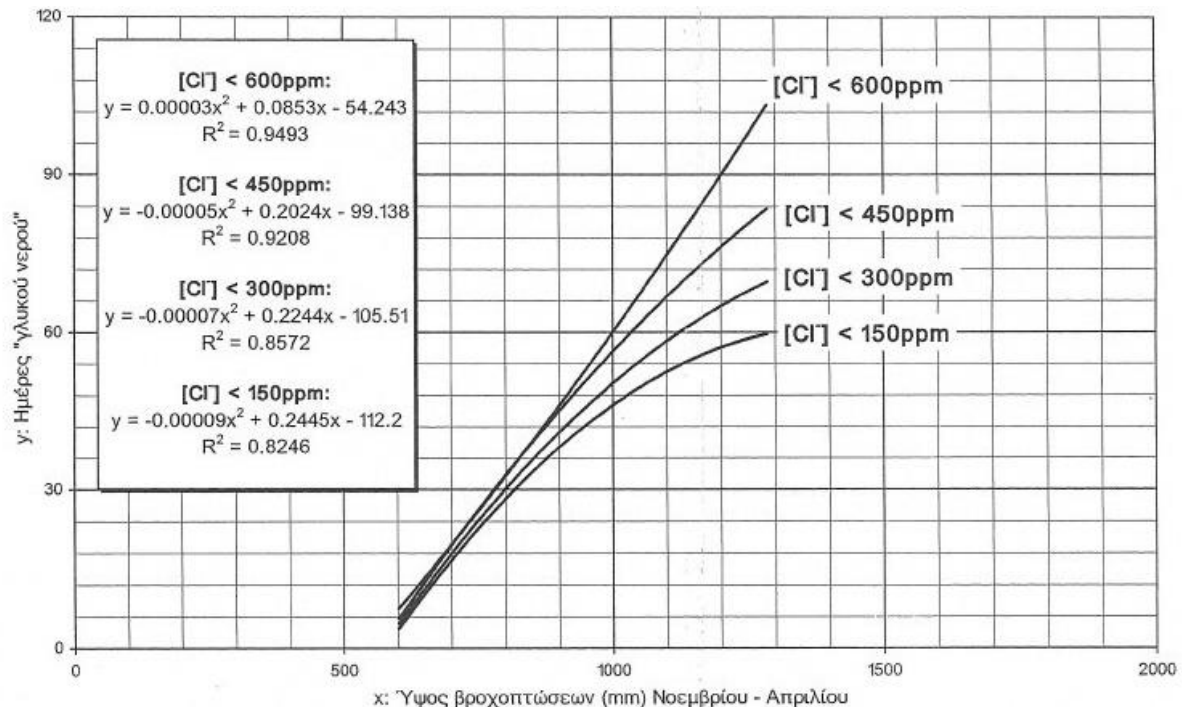
Τέλος, από την προσομοίωση της υφαλμύρισης (Maramathas et al., 2006) προέκυψε ότι αμοιβαία αύξηση εκφόρτισης αλμυρού και γλυκού νερού προκύπτει όταν ο κυρίαρχος μηχανισμός οφείλεται στο φαινόμενο Venturi. Το φαινόμενο Venturi λαμβάνει χώρα έπειτα από την αύξηση της ταχύτητας του γλυκού νερού που οφείλεται στην ανύψωση της στάθμης του στη θέση της πηγής εξαιτίας των βροχοπτώσεων (Maramathas et al., 2006).

#### **2.1.1.1. Συσχέτιση ποσότητας - ποιότητας νερού στην πηγή Αλμυρού**

Σύμφωνα με μετρήσεις της Υ.Ε.Β. τα τελευταία 30 χρόνια (Παράρτημα – Πίνακας Α.4), ο όγκος του νερού που εκφορτίζει η πηγή Αλμυρού κυμαίνεται από 165 έως 292.5 hm<sup>3</sup> ανά έτος (με μέση ετήσια τιμή 235.5 hm<sup>3</sup>). Η παροχή της πηγής σε υφάλμυρο νερό κυμαίνεται από 3.5 έως και 50 m<sup>3</sup>/sec (μέση ημερήσια παροχή 7-8 m<sup>3</sup>/sec). Την περίοδο εμφάνισης των υψηλών παροχών της πηγής, όταν δηλαδή η παροχή ξεπερνάει τα 12 m<sup>3</sup>/sec, τότε το νερό είναι σχεδόν γλυκό (ημέρες γλυκού νερού).

Το φαινόμενο εμφάνισης γλυκού νερού στην πηγή Αλμυρού μελετήθηκε από τον Μονόπωλη κ.α. (1996), με σκοπό να αποσαφηνιστούν η συχνότητα, η διάρκεια και το ενδεχόμενο πρόβλεψης του φαινομένου. Στην έρευνα χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από το 1967 έως το 1994 (27 υδρολογικά έτη), τα οποία συμπεριέλαβαν βροχομετρικά στοιχεία (1968 - 1993) από τους σταθμούς Ανωγείων και Κρουσώνα, συγκεντρώσεις χλωριόντων του νερού της πηγής, μετρήσεις παροχών της πηγής και μετρήσεις στάθμης της λίμνης.

Προέκυψε μαθηματική σχέση βροχόπτωσης με ημέρες γλυκού νερού (συγκέντρωση χλωριόντων  $\text{Cl}^- < 300 \text{ ppm}$ ) (Σχήμα 8), η οποία είναι  $y = 0,00007x^2 + 0,2244x - 105,51$ , με συντελεστή συσχέτισμού  $R^2 = 0,8572$  και τυπικό σφάλμα εκτίμησης  $s = 9,4733$  (Μονόπωλης κ.ά., 1996)



Σχήμα 8 Νομόγραμμα σχέσης βροχόπτωσης και ημερών γλυκού νερού για τα πλήρη υδρολογικά έτη από το 1967 έως το 1994 (Μονόπωλης κ.ά., 1996).

Επομένως για διάφορα επίπεδα συγκέντρωσης χλωριόντων ( $\text{Cl}^-$ ), ο αριθμός ημερών "γλυκού νερού" θα μπορούσε να καθίσταται προβλέψιμος (Μονόπωλης κ.ά., 1996).

## 2.2. Προτάσεις εκμετάλλευσης

Δεδομένης της σπουδαιότητας που έχει για την πόλη του Ηρακλείου και για όλη την κεντρική και ανατολική Κρήτη το νερό, έγιναν κατά καιρούς, διάφορες έρευνες για τη δυνατότητα εκμετάλλευσης της πηγής.

Οι προσπάθειες αυτές αξιοποίησης της πηγής Αλμυρού βασίζονται είτε στην απόληψη γλυκού νερού που αναβλύζει η πηγή, είτε στην εκμετάλλευση του υδροφορέα που τροφοδοτεί την πηγή.

Ξεκινώντας το **1964**, το ΙΓΕΥ (ΙΓΜΕ) σε συνεργασία με τον FAO (Food and Agriculture Organization) και το Υπουργείο Γεωργίας ασχολήθηκαν με το πρόβλημα εκμετάλλευσης της

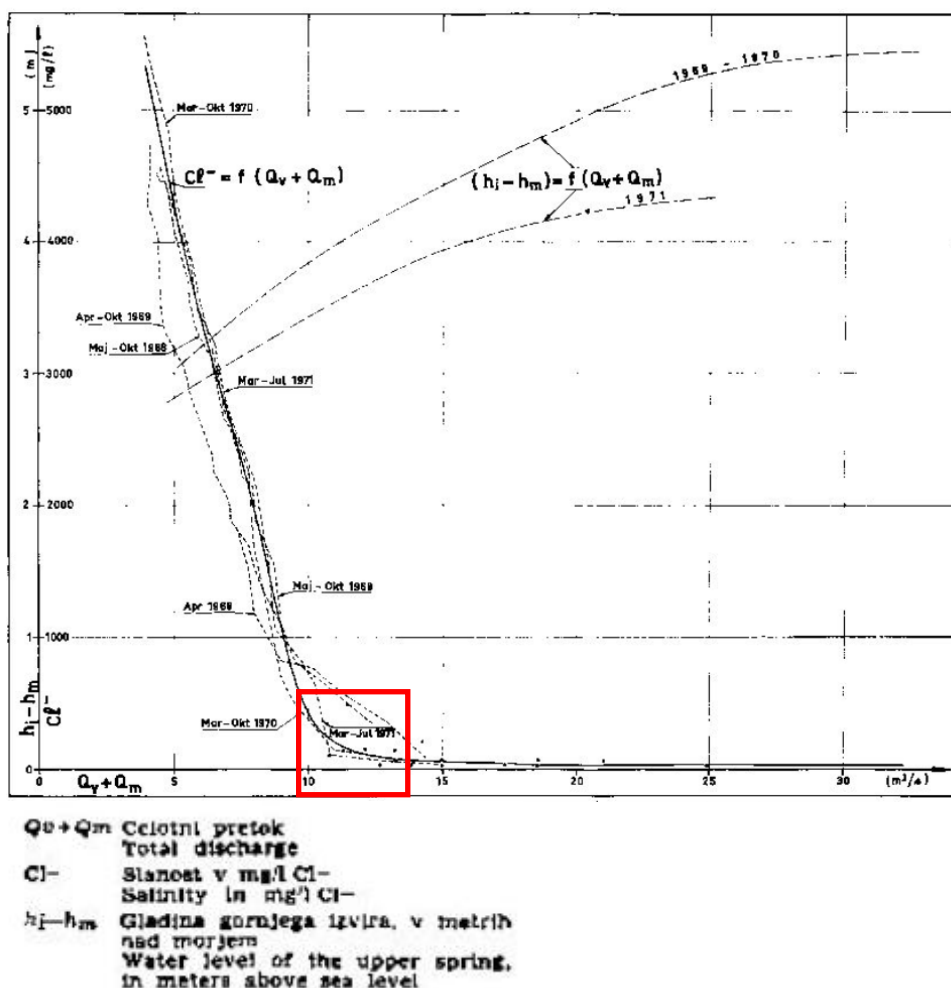
πηγής και εισηγήθηκαν την περαιτέρω συστηματική έρευνα (Burdon και Παπάκης, 1964). Τότε προέκυψε η ιδέα της κατασκευής ρυθμιστικού φράγματος για την τεχνητή ανύψωση της στάθμης της λίμνης στη θέση ανάβλυσσης της πηγής, μέχρι του υψομέτρου των +10 m. Με τον τρόπο αυτό, θεώρησαν ότι θα ήταν δυνατόν να ελαττωθεί ή και να εμποδιστεί η ανάμιξη του γλυκού με το αλμυρό θαλασσινό νερό (Κλειδοπούλου, 2003).

Το χρονικό διάστημα από το **1968** έως το **1972** πραγματοποιήθηκαν, από το Ελληνικό Δημόσιο, τα Ηνωμένα Έθνη και FAO ειδικές έρευνες στην περιοχή της πηγής. Οι έρευνες αυτές περιελάμβαναν μέτρηση παροχών, μετρήσεις αλατότητας, μετρήσεις πιεζομετρίας και θερμοκρασίας της πηγής και των γεωτρήσεων. Κατά τη διάρκεια των ερευνών πραγματοποιήθηκαν επίσης δειγματοληπτικές γεωτρήσεις και δοκιμές περατότητας, γεωηλεκτρικές γεωφυσικές έρευνες, δειγματοληψία νερού από τις γεωτρήσεις με σκοπό τη διενέργεια χημικών αναλύσεων, αναλύσεις ισοτόπων, διερεύνηση της επίδρασης της θαλάσσιας παλιρροιακής κίνησης στην πιεζομετρία της πηγής και των γεωτρήσεων. Επιπλέον διερευνήθηκε η επίδραση της ανόδου της στάθμης της πηγής κατά 1,0m στην αλατότητα και την πιεζομετρία της πηγής και των γεωτρήσεων. Τέλος έγινε διάτρηση δύο βαθιών γεωτρήσεων, σε αποστάσεις 3,4 km και 9,3 km από τη θάλασσα, για τη μέτρηση αλατότητας, θερμοκρασίας και πιεζομετρίας (Breznik, 1973).

Από την παραπάνω έρευνα (1968 - 1971), προέκυψε το συμπέρασμα ότι χαρακτηριστικό της πηγής Αλμυρού αποτελεί η αργή και σταθερή αύξηση της αλατότητας κατά τη διάρκεια μείωσης της παροχής (καλοκαίρι). Η αλατότητα μειώνεται γρήγορα όταν η παροχή αυξάνει ραγδαία, το οποίο φαίνεται στο Σχήμα 15 (Breznik, 1973).

Στο σχήμα 9 παρατηρείται ότι όταν η παροχή μειώνεται από 13,5 m<sup>3</sup>/s σε 9,5 m<sup>3</sup>/s (περιοχή διαγράμματος με κόκκινο περίγραμμα), η συγκέντρωση Cl<sup>-</sup> (mg/l), δηλαδή η αλατότητα, αυξάνεται πολύ. Η αύξηση αυτή της αλατότητας δείχνει ότι ο μηχανισμός που ρυθμίζει την εισροή του θαλασσινού νερού, σταδιακά ανοίγει πολλά κανάλια που βρίσκονται σε διαφορετικά βάθη όταν η παροχή μειώνεται. Το νερό της θάλασσας διεισδύει μέσω αυτών των καναλιών με παροχές μικρότερες από 9,5 m<sup>3</sup>/s (Breznik, 1973).

Η επιρροή αυτή έχει διαπιστωθεί σε απόσταση 1,0 km από την ακτή, όπου εμφανίζονται πολλές φλέβες (καρστικοί αγωγοί με υφάλμυρο νερό) (Re, 1968, Breznik, 1973, 1998, Breznik and Steinman, 2008, Σούλιος, 1989).



Σχήμα 9 Συσχέτιση μεταξύ παροχής, στάθμης νερού και αλατότητας της πηγής Αλμυρού, σύμφωνα με την έρευνα από το Ελληνικό Δημόσιο, τα Ηνωμένα Έθνη –UNDP, FAO (1968 - 1971) (Breznik, 1973).

Επίσης στα πλαίσια των ερευνών, διατρήθηκαν 15 γεωτρήσεις μεγάλου βάθους (240 m), από τη θέση ανάβλυσης της πηγής μέχρι και τη ακτή της θάλασσας, που σκοπό είχαν να βρουν και να σφραγίσουν με μια κουρτίνα τσιμεντενέσεων την εισροή θαλασσινού νερού. Το συμπέρασμα της έρευνας αυτής ήταν ότι καρστικοί αγωγοί αναπτύσσονται και κάτω από τις νεογενείς αποθέσεις και σε βάθος 800 m κάτω από το επίπεδο της θάλασσας γεγονός που καθιστά το αποτέλεσμα της κουρτίνας τσιμεντενέσεων ένα αρκετά δαπανηρό εγχείρημα.

Στη συνέχεια, το 1969, οι Μονόπωλης και Μάστορης σε συνεργασία με την εταιρεία Litton / Benelux (1968), μετά από δοκιμές άντλησης σε δύο γεωτρήσεις δειγματοληψίας - παρατήρησης, κατέληξαν ότι η πρόταση του ρυθμιστικού φράγματος δεν είναι η καλύτερη και πρότειναν να εξετασθεί κατά προτεραιότητα το θέμα των γεωτρήσεων και η υδρομαστευτική στοά ανάντη της πηγής Αλμυρού. Οι ερευνητές διαπίστωσαν ότι η κατασκευή της ανάντη της πηγής Αλμυρού, θα μπορούσε να δώσει μεγάλη παροχή νερού με τη βοήθεια της βαρύτητας.

Εν τω μεταξύ, στο πλαίσιο της συνεργασίας Υπουργείου Γεωργίας - FAO, η Υ.Ε.Β. (1973) προχωρά στην ανέγερση ρυθμιστικού φράγματος, το οποίο ολοκληρώθηκε τον Ιούλιο **1977**. Το φράγμα έχει την δυνατότητα τεχνητής ανύψωσης της στάθμης της λίμνης ανάβλυσσης της πηγής περί τα +10 m, το οποίο επιφέρει μικρή μόνο ή και αμφίβολη βελτίωση στην αλμυρότητα της ανάβλυσσης (Κλειδοπούλου, 2003).

Το φράγμα τίθεται σε πειραματική λειτουργία το υδρολογικό έτος **1978 - 79** και στη συνέχεια το έτος **1987**. Οι ερευνητές, στηριζόμενοι στις παρατηρήσεις του πειράματος προτείνουν την κατασκευή μόνιμου ρυθμιστικού φράγματος, το οποίο να μπορεί να ανεβάσει τη στάθμη της λίμνης μέχρι το υψόμετρο των +30 m. Στο υψόμετρο αυτό εκτιμούν ότι το νερό που θα εκρέει από την πηγή θα είναι σταθερά "γλυκό" (Κλειδοπούλου, 2003).

Κατά τη διάρκεια των δεκαετιών **'70 και '80**, είχαν επιχειρηθεί από άλλους φορείς (AGRIDEV, ΓΕΜΕΕ, ΤΟΕΒ, ΙΓΜΕ κ.ά.) ερευνητικές γεωτρήσεις σε διάφορες θέσεις ανάντη της πηγής (Βουλισμένο Αλώνι, Γωνιανό Φαράγγι κ.ά.). Οι γεωτρήσεις αυτές, άλλοτε για τεχνικούς λόγους ή έλλειψη τεχνικών μέσων και άλλοτε λόγω θέσεως, είχαν πρακτικά αποτύχει, παρ' ότι σε μερικές περιπτώσεις διαφαίνονταν θετικές ενδείξεις (γεώτρηση Δήμου και Συνδέσμου Τυλίσου, γεωτρήσεις ΓΕΜΕΕ) (Κλειδοπούλου, 2003).

Έτσι, από το **1986**, περίοδο αναστολής στην περιοχή αυτή των γεωτρητικών εργασιών του Ι.Γ.Μ.Ε., η Δ.Ε.Υ.Α.Η., ξεκινάει εκτενές γεωτρητικό πρόγραμμα στις επαρχίες Μαλεβιζίου και Τεμένους και ειδικότερα στις περιοχές Τυλίσου, Γωνιανού Φαραγγιού, Κέρης, Λουτρακίου, Κρουσώνα, Αγίου Μύρωνα, Γιούχτα κ.ά. Εκτελέσθηκαν, σε διαδοχικά στάδια, πάνω από 50 γεωτρήσεις.

Από τα τέλη του **1992**, η Δ.Ε.Υ.Α.Η. συνεργάζεται με το Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωλογίας του Πολυτεχνείου Κρήτης (ερευνητικό έργο με τίτλο "Υδρευση Ηρακλείου: Αξιοποίηση πηγών Αλμυρού ποταμού"). Η συνεργασία αυτή έχει ως σκοπό την συνέχιση του προγράμματος γεωτρήσεων και σε άλλες καρστικές υδατοπιθικές περιοχές των Επαρχιών Μαλεβιζίου και Τεμένους (Λουτράκι, Κρουσώνας, Άγιος Μύρωνας, κ.λπ.) (Κλειδοπούλου, 2003).

Από το **1995** η μελέτη της πηγής Αλμυρού εντάσσεται σαν υποέργο στο Β' Κ.Π.Σ. με συλλογή μετρήσεων μέχρι και το 1997. Για τη σωστή αξιοποίηση των υπόγειων υδάτων και την κάλυψη υδρευτικών αναγκών, η Δ.Ε.Υ.Α.Η. και άλλοι φορείς κατασκεύασαν δίκτυα παραγωγικών υδρογεωτρήσεων κατανεμημένα σε πεδία εκμετάλλευσης ανάντη της πηγής Αλμυρού.

Έγινε διάνοιξη 78 γεωτρήσεων. Από αυτές, οι 57 κατασκευάσθηκαν από τη Δ.Ε.Υ.Α.Η. και παρέμειναν στη δικαιοδοσία της ή παραχωρήθηκαν σε άλλους φορείς (Κοινότητες) και οι



υπόλοιπες 21 διανοίχθηκαν από άλλους φορείς (π.χ. ΥΕΒ, ΙΓΜΕ, Κοινότητες, Ιδιώτες). Η επιλογή των θέσεων ανόρυξης των γεωτρήσεων της Δ.Ε.Υ.Α.Η. έχει γίνει με γεωλογικά και παλαιογεωγραφικά κριτήρια και όχι τυχαία.

Το μεγαλύτερο ποσοστό των γεωτρήσεων διέτρησε ανθρακικούς σχηματισμούς της ζώνης Τρίπολης και σε ορισμένες περιπτώσεις έφτασαν και στους υποκείμενους Πλακώδεις ασβεστόλιθους. Ορισμένες από τις γεωτρήσεις διέτρησαν κλαστικά ιζήματα και μαργαίικούς ασβεστόλιθους του Νεογενούς, τα οποία υπέρκεινται των ανθρακικών σχηματισμών της ζώνης Τρίπολης.

Από τις γεωτρήσεις προέκυψε ότι η κύρια υδροφορία απαντάται στους ασβεστόλιθους και τους δολομίτες της ζώνης Τρίπολης ή / και στους Πλακώδεις Ασβεστόλιθους (περιοχή Γωνιανού Φαραγγιού). Σπανιότερα και μικρότερης δυναμικότητας υδροφορείς απαντώνται σε Νεογενείς σχηματισμούς και σχηματισμούς του Φλύσχη.

Σε συνεργασία της Δ.Ε.Υ.Α.Η. με το Πολυτεχνείο Κρήτης (Εργαστήριο Εφαρμοσμένης Γεωλογίας) και στα πλαίσια ερευνητικού έργου, υποβλήθηκαν τρεις εκθέσεις (1995-97), από το Πολυτεχνείο Κρήτης, οι οποίες περιλάμβαναν τα αποτελέσματα από την επεξεργασία των δοκιμαστικών αντλήσεων στις υδρογεωτρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στις περιοχές Κέρης, Τυλίσου, Γωνιανού Φαραγγιού, Κρουσώνα, Αγίου Μύρωνα Βασιλειών κ.λπ..

Όλες οι γεωτρήσεις συνάντησαν την καρστική υδροφορία περίπου στο επίπεδο της στάθμης της θάλασσας, συνήθως σε ζώνες κατακερματισμού ή αποκάρσωσης. Η στάθμη ηρεμίας βρίσκεται λίγο υψηλότερα. Παρατηρήθηκαν μεγάλες διακυμάνσεις της στάθμης ηρεμίας που οφείλονταν στην "τοπική" κατάσταση του πετρώματος. Η υδροφορία φαινόταν να αυξάνει ασυνεχώς με το βάθος.

Η εξέλιξη της αποκάρσωσης συναρτήσει του βάθους αποτελεί σημαντική πληροφορία για την αξιολόγηση ενός παράκτιου καρστικού υδροφορέα που είναι επιδεκτικός σε αλμύριση. Οι τιμές περατότητας εκτιμήθηκαν μεταξύ  $10^{-4}$  έως  $10^{-6}$  m/sec.

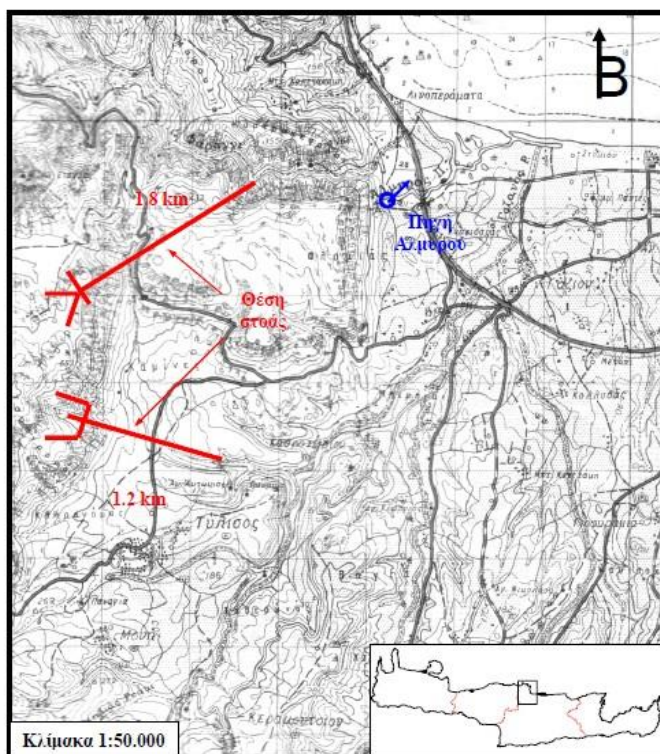
Ποιοτικά, μετά από πολυετείς και παρατεταμένες αντλήσεις παραγωγής, τα νερά των βορειότερων και πλέον παράκτιων γεωτρήσεων (πεδία Κέρης και Τυλίσου) είναι σε μερικές γεωτρήσεις επηρεασμένα από τη θάλασσα, ενώ των νοτιότερων και πλέον ενδοχώριων, σταθερά "γλυκά" (Μονόπωλης και Κλειδοπούλου, 2001).

Επέκταση της γεωτρητικής έρευνας σε υδατοπιθανές περιοχές που έχουν υποδειχθεί από την ερευνητική ομάδα συνεργασίας Δ.Ε.Υ.Α.Η. και Πολυτεχνείου Κρήτης, πιθανόν να προσέφερε μακροπρόθεσμη αξιοποίηση του υδροφορέα.

### Υδρομαστευτική στοά

Το 1995 επαναδιατυπώθηκε από την ερευνητική ομάδα του Πολυτεχνείου Κρήτης η παλαιότερη πρόταση των Μονόπωλη και Μάστορη (1969), η οποία αφορά στην αξιοποίηση του υδροφόρου ορίζοντα με την κατασκευή υδρομαστευτικής στοάς. Η πρόταση αυτή μπορεί να συνοψιστεί στις παρακάτω φράσεις: «Εξόρυξη υδρομαστευτικής στοάς ανάντη των πηγών Αλμυρού και εκείθεν των ζωνών υφαλμύρισης». Η υδρομαστευτική στοά θα παίζει το ρόλο του συλλέκτη νερού. Στη συνέχεια, το νερό θα μεταφέρεται, με τη βοήθεια της βαρύτητας, σε συλλεκτήριο πηγάδι από το οποίο θα αντλείται" (Μονόπωλης και Κλειδοπούλου, 2001).

Από τους Μονόπωλη και Κλειδοπούλου, (2001) προτάθηκαν περιοχές για να φιλοξενήσουν την υδρομαστευτική στοά με τα επιμέρους τεχνικά μέρη της σε δύο διαφορετικές θέσεις μεταξύ Γωνιανού Φαραγγιού και υψώματος Στρούμπουλα. Η μία βρίσκεται δυτικά από την Τύλισσο και η άλλη στην λαγκάδα Αγίου Γεωργίου, δυτικά από τον λόφο της Κέρης (Σχήμα 10).

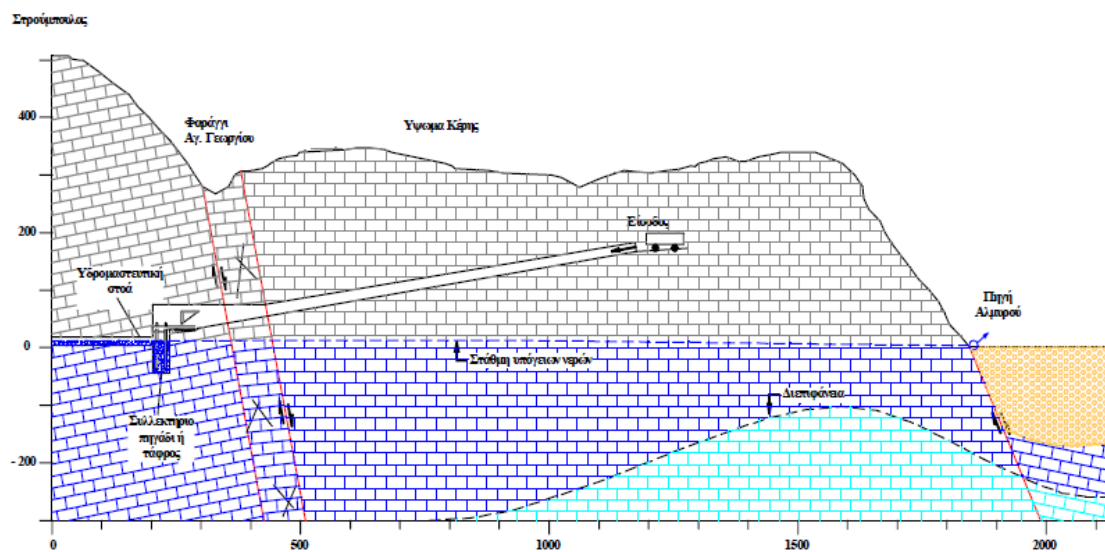


Σχήμα 10 Χωροθέτηση προτεινόμενων θέσεων κατασκευής υδρομαστευτικής στοάς (Μονόπωλης και Κλειδοπούλου, 2001).

Οι προτεινόμενες θέσεις κατασκευής της στοάς δίνουν τη δυνατότητα προσέγγισης του υψόμετρου της πιεζομετρίας, απευθείας από το φαράγγι της Κέρης που βρίσκεται λίγα εκατοντάδες μέτρα δυτικά της πηγής. Ωστόσο, ο όγκος νερού που ενδέχεται να

αποστραγγίζει μπορεί να είναι πολύ μικρός. Ο ορεινός όγκος της Κέρης αντιστοιχεί σε μια υπόγεια λεκάνη του Αλμυρού περιορισμένης όμως έκτασης. Ο ετήσιος όγκος νερού που διεισδύει στις περιοχές αυτές εκτιμάται έως 32 εκ. m<sup>3</sup> νερού. Η στοά, με σχετικά περιορισμένη χωρική ανάπτυξη, θα μπορούσε να συλλάβει κατά προσέγγιση το 10% του νερού που διηθείται, το οποίο φθάνει από 1,3 έως 3,2 εκ. m<sup>3</sup> ετησίως (Arfib, 2001).

Η υδρομαστευτική στοά προτάθηκε να εξορυχθεί στην περιοχή δυτικά από το «Βουλισμένο Αλώνι» (περίπου 15 χλμ δυτικά του Ηρακλείου, δίπλα στην παλιά εθνική οδό Ηρακλείου - Ρεθύμνου, κοντά στο χωριό Μάραθος). Η στοά αυτή θα συναντά την υδροφορία περίπου στο επίπεδο της θάλασσας και η προσπέλασή της θα γινόταν με κεκλιμένη στοά από το Φαράγγι της Κέρης (Σχήμα 11).

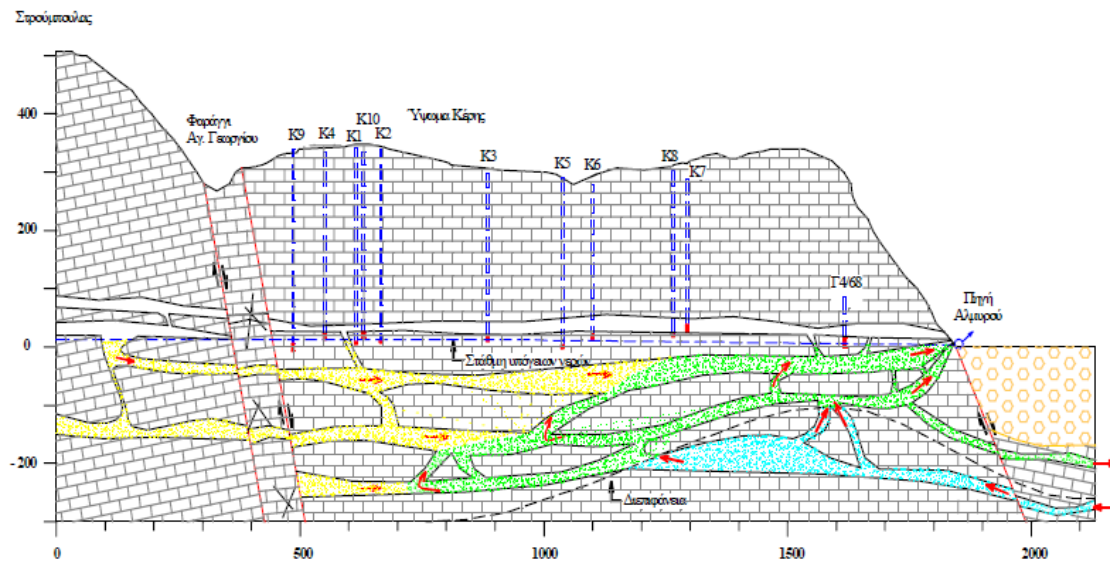


Σχήμα 11 Σχηματική τομή προτεινόμενου υδρομαστευτικού έργου, στην οποία διακρίνονται (α) Κεκλιμένη στοά προσπέλασης, (β) Συλλεκτήριο πηγάδι, (γ) Υπο-οριζόντια (κλίσης περίπου 1%) υδρομαστευτική στοά (Μονόπληης και Κλειδοπούλου, 2001).

Η σημαντική υδροφορία των ασβεστόλιθων Ζώνης Τρίπολης, που δομούν την περιοχή, θα έδινε δυνατότητα απαγωγής σημαντικών ποσοτήτων νερού.

Η τομή του σχήματος 12 (Κλειδοπούλου, 2003, βελτιωμένη απόδοση του Σχ.8-1 των Μονόπληη και Μάστορη, 1969) αποδίδει υπό κλίμακα την γεωλογία και υδρογεωλογία της περιοχής και εμπλουτίζεται με υποθετικό δίκτυο καρστικών αγωγών.

Τα "κανάλια προνομιακής ροής" του νερού είχαν σχεδιαστεί αυθαίρετα και όχι στις πραγματικές τους διαστάσεις, καθώς δε θα ήταν ορατά σε γεωλογική τομή. Το Σχήμα 12, σκοπό έχει κυρίως να περιγράψει τον μηχανισμό υφαλμύρισης του υδροφορέα της πηγής Αλμυρού.



Σχήμα 12 Σχηματική γεωλογική - υδρογεωλογική τομή διεύθυνσης ΔΝΔ → ΑΒΑ που διέρχεται από το ύψωμα Στρούμπουλας, τη λαγκάδα Αγίου Γεωργίου, το λόφο Κέρης και την πηγή Αλμυρού στην περιοχή του Αλμυρού. Με κίτρινο συμβολίζονται οι καρστικοί αγωγοί γλυκού νερού, με πράσινο είναι οι καρστικοί αγωγοί με υφάλμυρο νερό και με γαλάζιο οι καρστικοί αγωγοί θαλασσινού νερού. Τα βέλη εντός των αγωγών δείχνουν την κίνηση του νερού. Στην τομή με μπλέ γραμμές αποτυπώνονται γεωτρήσεις που έχουν διανοιχθεί. (Κλειδοπούλου, 2003, βελτιωμένη απόδοση σχήματος των Μονόπωλη και Μάστορη, 1969).

Με βάση τα συμπεράσματα της έρευνας του Πολυτεχνείου Κρήτης και της Δ.Ε.Υ.Α.Η. (1995) προτάθηκε μια υδρομαστευτική στοά η οποία θα αποτελείται από δυο επιμέρους επίπεδα εκ των οποίων μια κεκλιμένη στοά προσπέλασης και μια υπό-οριζόντια ως κύρια στοά. Η στοά προσπέλασης θα ξεκινάει από το υψόμετρο των +7 m και θα καταλήγει η κύρια πλέον στοά στο υψόμετρο των +4,0 m. Η πρόταση περιελάμβανε την κατασκευή δυο στοών κάθετων στην κύρια στοά. Η κύρια υδρομαστευτική στοά θα πρέπει να έχει μήκος της τάξης των 1000 m με διατομή εκσκαφής 20 - 40 m<sup>2</sup>. Οι κάθετες στοές προτείνεται να έχουν κατεύθυνση προς την έξοδο του Φαραγγιού της Κέρης, με μήκος 1200m η καθεμία. Η απόδοση της υδρομαστευτικής στοάς εκτιμήθηκε ότι θα έχει παροχές από 800 έως 1800 m<sup>3</sup>/h ανά km στοάς.

### 2.3. Άλλες Προτάσεις εκμετάλλευσης του υδροφορέα Αλμυρού

Τα τελευταία 40 χρόνια έχουν διατυπωθεί προτάσεις εκμετάλλευσης του υδροφορέα της πηγής Αλμυρού (Κλειδοπούλου, 2003). Η ανύψωση τεχνητού φράγματος στη λίμνη της πηγής Αλμυρού, η άμεση χρήση παροχών "γλυκού νερού" από την πηγή Αλμυρού και η κατασκευή μονάδας αφαλάτωσης είναι κάποιες από αυτές.

### **Ανύψωση τεχνητού φράγματος στη λίμνη της πηγής Αλμυρού**

Στην κατάντη πλευρά της λίμνης της πηγής Αλμυρού υπήρχε υδατοφράκτης με σταθερό υπερχειλιστή. Το υδρολογικό έτος 1976-1977, με πρόταση των FAO – ΠΔΕΒ, έγινε ανύψωση του φράγματος (Εικόνα 4) με σκοπό να φτάσει η στάθμη της λίμνης τα +10,0 m, θεωρώντας ότι θα βελτιωθεί η ποιότητα του νερού της πηγής, μέσω της αύξησης της πίεσης στους καρστικούς αγωγούς.



Εικόνα 4 Παρατηρείται το υφιστάμενο φράγμα που κατασκευάστηκε με σκοπό την ανύψωση της στάθμης του νερού στη λίμνη ([www.cretanbeaches.com](http://www.cretanbeaches.com)).

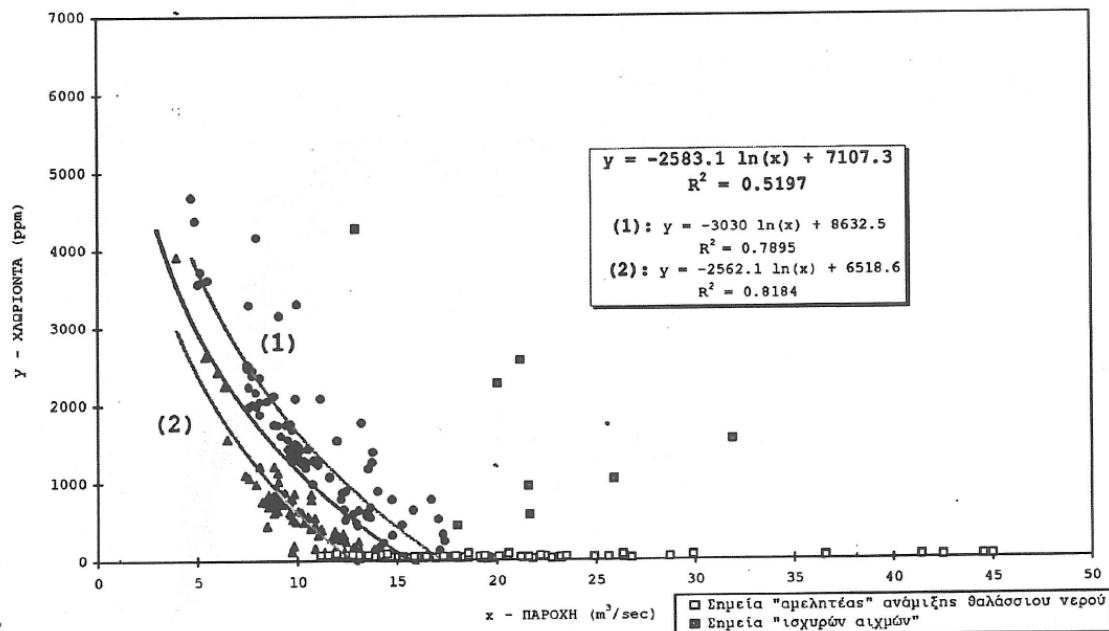
Κατά τους ερευνητές, η πραγματοποίηση του εγχειρήματος, έφερε τα αναμενόμενα αποτελέσματα, καθώς απέδειξε ότι η ποιότητα του νερού εξαρτάται από τη στάθμη της λίμνης. Όμως από διάφορους ερευνητές έχουν διατυπωθεί κατά καιρούς αμφιβολίες για την αποτελεσματικότητα της πρότασης ανύψωσης τεχνητού φράγματος.

Κατόπιν επεξεργασίας μεγάλου πλήθους δεδομένων μακροχρόνιας προέλευσης από Μονόπωλης κ.α. (1995), εξετάστηκαν οι φυσικές παράμετροι ποιότητας, στάθμης και παροχής της πηγής τις οποίες θεωρούν «συμμεταβλητές και αλληλένδετα εξαρτημένες».

Έχοντας στη διάθεση τους μετρήσεις παροχής και ποιότητας του νερού της πηγής Αλμυρού πριν και μετά την κατασκευή του ρυθμιστικού φράγματος κατασκεύασαν σχέση για τη σχέση παροχής και ποιότητας.

Στο Σχήμα 13 δίδεται η συσχέτιση μεταξύ της παροχής του νερού και της συγκέντρωσης χλωριόντων, μετά την κατασκευή του φράγματος, για τα υδρολογικά έτη 1977-78 έως 1993-

94. Παρατηρείται ότι κατά την ξηρή περίοδο, δηλαδή όταν η παροχή της πηγής μειώνεται, οι συγκεντρώσεις χλωριόντων αυξάνονται.



Σχήμα 13 Διάγραμμα παροχής - συγκέντρωσης χλωριόντων μετά την κατασκευή του φράγματος, για τα υδρολογικά έτη 1977-78 έως 1993-94 (περίοδοι λειτουργίας του σταθερού υπερχειλιστή) (Μονόπωλης κ.α., 1995).

Οι ερευνητές (Μονόπωλης κ.α., 1995) διατύπωσαν την άποψη ότι οι τεχνητές αυξομειώσεις στη στάθμη της λίμνης συνεπάγονται στατιστικά αντίρροπη μεταβολή στην παροχή και τη συγκέντρωση ιόντων χλωρίου, γεγονός που μεταφράζεται σε αδυναμία εξασφάλισης της επιθυμητής ποιότητας και ταυτόχρονης ικανοποιητικής παροχής στην πηγή, κατά την ξηρή περίοδο, όπου η παροχή μειώνεται.

Επιπλέον, διατυπώθηκαν τα εξής συμπεράσματα: α) ανεξαρτήτως της στάθμης της λίμνης για μεγάλες παροχές η ποιότητα του νερού είναι καλή, β) οι παροχές της πηγής μειώνονται με την αύξηση της στάθμης της λίμνης και γ) με δεδομένη παροχή η ποιότητα του νερού τείνει να βελτιωθεί με την αύξηση της στάθμης της λίμνης. Η παραπάνω έρευνα καταλήγει στο συμπέρασμα ότι η επιθυμητή ποιότητα νερού δεν θα μπορεί να εξασφαλιστεί με ταυτόχρονη ικανοποιητική παροχή στην πηγή, καθώς οι τεχνητές αυξομειώσεις της στάθμης της λίμνης συνεπάγονται στατιστικά αντίρροπη μεταβολή στην παροχή και στην ποιότητα του νερού (Μονόπωλης κ.α., 1995).

Μεταγενέστερα, από έρευνα που πραγματοποιήθηκε από τους Maramathas et al. (2003), οι οποίοι προσομοίωσαν τη ροή στην πηγή Αλμυρού, διατυπώθηκε η άποψη ότι με την αύξηση της στάθμης του νερού στη λίμνη παρατηρείται βελτίωση της ποιότητας του νερού της πηγής. Υπολογίστηκε ότι όταν το νερό της πηγής βρίσκεται σε απόλυτο υψόμετρο

+26,0m η εισροή θαλασσινού νερού στην πηγή σχεδόν ανακόπτεται. Όμως, με την αύξηση της στάθμης στη λίμνη παρατηρήθηκαν απώλειες γλυκού νερού, περίπου 24% στη διάρκεια ενός υδρολογικού έτους και 37% τις περιόδους μειωμένης παροχής (Maramathas et al., 2003).

Με βάση την παραπάνω υδρογεωλογική διαπίστωση, ανεξάρτητα από τα γεωτεχνικά, φυσιογραφικά και λειτουργικά προβλήματα που πρέπει να αντιμετωπίσει το προτεινόμενο ρυθμιστικό φράγμα, κατά την κατασκευή του, αμφισβητείται βάσιμα η ικανοποιητική του απόδοση (Μονόπωλης και Κλειδοπούλου, 2001).

### **Άμεση χρήση παροχών "γλυκού νερού" από την πηγή Αλμυρού**

Σύμφωνα με έρευνες που έχουν πραγματοποιηθεί η πηγή Αλμυρού κάποιες ημέρες του έτους έχει "γλυκό νερό" (συγκέντρωση χλωριόντων <100 ppm), σε αξιόλογες ποσότητες (Μονόπωλης κ.ά., 1998). Οι περίοδοι εκφόρτισης "γλυκού νερού" είναι προβλέψιμες και μπορούν να εκμεταλλευθούν απευθείας με την εγκατάσταση αγωγού μεταφοράς και δημιουργία έργων αποταμίευσης (φράγμα, λιμνοδεξαμενή). Μια πρόταση αφορά κατασκευή υδατοταμιευτήρα στο ρέμα του Γαζανού ποταμού το οποίο θα αποδέχεται τόσο τα νερά της επιφανειακής απορροής, όσο και τις ποσότητες "γλυκού νερού" που αναβλύζουν από την πηγή Αλμυρού.

Με τη μέθοδο αυτή η αξιοποίηση του «γλυκού νερού» της πηγής δύναται να πραγματοποιείται μόνο ορισμένες μέρες του υδρολογικού έτους.

### **Κατασκευή μονάδας αφαλάτωσης**

Η κατασκευή μονάδας αφαλάτωσης αποτελεί μία εναλλακτική λύση για την αξιοποίηση των υδάτων της πηγής Αλμυρού. Τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της μεθόδου αυτής δεν αποτελούν αντικείμενο εξέτασης στην παρούσα εργασία.

## **2.4. Αξιολόγηση των προτάσεων**

Από τις προαναφερθείσες προτάσεις εκμετάλλευσης του υδροφορέα της πηγής Αλμυρού ως πιο σημαντικές κρίνονται η εκμετάλλευση του υδροφορέα με επιπλέον υδρογεωτρήσεις, η ανύψωση του φράγματος της πηγής και η κατασκευή υδρομαστευτικής στοάς.



### **Περαιτέρω εκμετάλλευση με υδρογεωτρήσεις**

Θεωρείται ότι το ενδεχόμενο ένταξης νέων πεδίων εκμετάλλευσης στο δίκτυο ύδρευσης μπορεί να προσφέρει προσωρινή ανακούφιση του δήμου, αλλά δεν μπορεί να αποτελέσει μια μακροχρόνια λύση. Έχει παρατηρηθεί σε προγενέστερες έρευνες (Μονόπωλης και Κλειδοπούλου, 2001), ότι λόγω υπεραντλήσεων στις βορειότερες γεωτρήσεις η ποιότητα των υδάτων μειώθηκε και το ενδεχόμενο ένταξης νέων πεδίων εκμετάλλευσης στο δίκτυο ύδρευσης έχει τεθεί επί τάπητος. Ιδιαίτερα των πεδίων Κρουσώνα – Λουτρακίου και Αγίου Μύρωνα.

❖ *Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου αυτής είναι:*

Οι γεωτρήσεις εκμετάλλευσης των υπόγειων νερών μπορούν να κατασκευάζονται και να λειτουργούν αυτόνομα και ανεξάρτητα, κάτι που ευνοεί τη σταδιακή ανάπτυξη του συστήματος εκμετάλλευσης (Μαμάσης, 2011).

Υπάρχει η δυνατότητα επέκτασης του έργου, με διάνοιξη περισσότερων γεωτρήσεων, κατόπιν μελέτης, για την κάλυψη μεγαλύτερων μελλοντικών υδρευτικών αναγκών.

❖ *Τα μειονεκτήματα της μεθόδου είναι:*

Στις περιοχές Κρουσώνα – Λουτράκι και Άγιος Μύρωνας απαιτείται η άντληση του νερού από μεγάλα βάθη που συνεπάγεται σημαντική ενεργειακή, άρα και οικονομική, επιβάρυνση.

Μακροπρόθεσμα θα απαιτηθούν εργασίες συντήρησης των υδρογεωτρήσεων και εφόσον είναι μεγάλος ο αριθμός τους αυξάνεται ανάλογα και το κόστος συντήρησης του έργου.

### **Ανύψωση της στάθμης της λίμνης στη θέση της πηγής**

Η ικανοποιητική απόδοση της τεχνικής ανύψωσης της στάθμης της λίμνης στη θέση της πηγής αμφισβητείται από τους Μονόπωλης κ.α. (1995). Όπως αναφέρουν, οι συμμεταβλητές ποιότητα, στάθμη και παροχή δεν επηρεάζονται ομοιόμορφα από τις τεχνητές αυξομειώσεις της στάθμης της λίμνης και η επιθυμητή ποιότητα νερού δεν μπορεί να εξασφαλιστεί με ταυτόχρονη ικανοποιητική παροχή στην πηγή, καθώς οι τεχνητές αυξομειώσεις της στάθμης της λίμνης συνεπάγονται στατιστικά αντίρροπη μεταβολή στην παροχή και στην ποιότητα του νερού.

❖ *Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου αυτής είναι:*

Σχετικά μικρό κόστος ανύψωσης του υφιστάμενου φράγματος.

Μικρό χρονικό διάστημα ολοκλήρωσης των εργασιών.



❖ *Τα μειονεκτήματα της μεθόδου είναι:*

Η ανύψωση του φράγματος δεν θα εξασφαλίσει σίγουρα το επιθυμητό αποτέλεσμα.

Θα πρέπει να μελετηθεί εάν υπάρχει η δυνατότητα το υφιστάμενο φράγμα να αναλάβει τα επιπλέον φορτία που θα δημιουργηθούν από την τροποποίηση του ύψους του.

### **Κατασκευή υδρομαστευτικής στοάς**

Η κατασκευή υδρομαστευτικής στοάς αποτελεί μία άλλη εναλλακτική μέθοδο εκμετάλλευσης του υδροφορέα.

❖ *Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου αυτής συνοψίζονται στα παρακάτω:*

Η υδρομαστευτική στοά θα μπορούσε να κατασκευαστεί με μικρή κλίση προς Βορρά και το νερό να κινείται δια βαρύτητας.

Επίσης λόγω του ότι το νερό θα εισέρχεται στη στοά με ελεύθερη ροή, δε θα προκαλούνται αλλαγές στην πιεζομετρία του υδροφορέα (Μονόπωλης και Κλειδοπούλου, 2001).

Δε θα επηρεάσει αρνητικά την απόδοση οποιασδήποτε άλλης, από τις κατά καιρούς προταθείσες λύσεις αξιοποίησης του υδροφορέα (ρυθμιστικό φράγμα στην πηγή Αλμυρού, γεωτρήσεις σε άλλες περιοχές κ.λπ.) (Μονόπωλης και Κλειδοπούλου, 2001).

Στην περίπτωση που κατασκευαστεί ενδοχώρια, σε απόσταση από τη ζώνη υφαλμύρισης, δίνεται η δυνατότητα αξιοποίησης μεγαλύτερων παροχών και υδρομάστευσης για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα μέσα στο υδρολογικό έτος.

Από τα διαθέσιμα ιστορικά δεδομένα και τη διεθνή πρακτική, προκύπτει ότι ο χρόνος ζωής ενός τέτοιου έργου είναι πρακτικά απερίοριστος και το κόστος συντήρησης και λειτουργίας αρκετά μικρό.

Επίσης, υπάρχει η δυνατότητα επέκτασης του έργου, για την κάλυψη μεγαλύτερων μελλοντικών υδρευτικών αναγκών. Το έργο μπορεί να επεκτείνεται σταδιακά χωρίς πρακτικά να διακόπτεται η λειτουργία του και να προκαλείται επιβάρυνση του υδροφόρου ορίζοντα (Μονόπωλης και Κλειδοπούλου, 2001).

Ένα ακόμη προνόμιο της υδρομαστευτικής στοάς είναι η αυξημένη απόδοση της. Λόγω της μεγάλης διαμέτρου της στοάς, αναμένεται να έχει πολλαπλάσια απόδοση, σε σύγκριση με γεωτρήσεις αθροιστικού πάχους κορεσμένου υδροφορέα ίσου με το μήκος της στοάς (Μονόπωλης και Κλειδοπούλου, 2001).

Στην υδρομαστευτική στοά τα προβλήματα καθαλάτωσης στα δίκτυα μεταφοράς και διανομής μειώνονται, με αποτέλεσμα να μειώνεται και το κόστος συντήρησης του έργου (Μονόπωλης και Κλειδοπούλου, 2001).

Κατά τους χειμερινούς μήνες μπορεί να αντλείται επιπλέον νερό και να διατίθεται για τεχνητό εμπλουτισμό γειτονικών υδροφορέων ή να αποθηκεύεται.

Ο έλεγχος λειτουργίας της είναι πιο αποτελεσματικός, επειδή τα έργα υποδομής είναι συγκεντρωμένα σε συγκεκριμένη περιοχή και ο έλεγχος πιθανής ανθρωπογενούς ρύπανσης θα είναι αποτελεσματικότερος (Μονόπωλης και Κλειδοπούλου, 2001).

❖ *Τα μειονεκτήματα της μεθόδου αυτής είναι τα εξής:*

Θα πρέπει να γίνει σωστή χωροθέτηση της υδρομαστευτικής στοάς, ώστε να αποφευχθούν τυχόν αστοχίες που οφείλονται σε ρήγματα ή ασυνέχειες της βραχώμαζας, με αρνητικές επιπτώσεις και στο κόστος κατασκευής της.

Η στοά θα πρέπει να κατασκευαστεί υψομετρικά κοντά στο υψόμετρο της στάθμης του υδροφόρου, το οποίο απαιτεί σωστό σχεδιασμό και για την σήραγγα προσπέλασης.

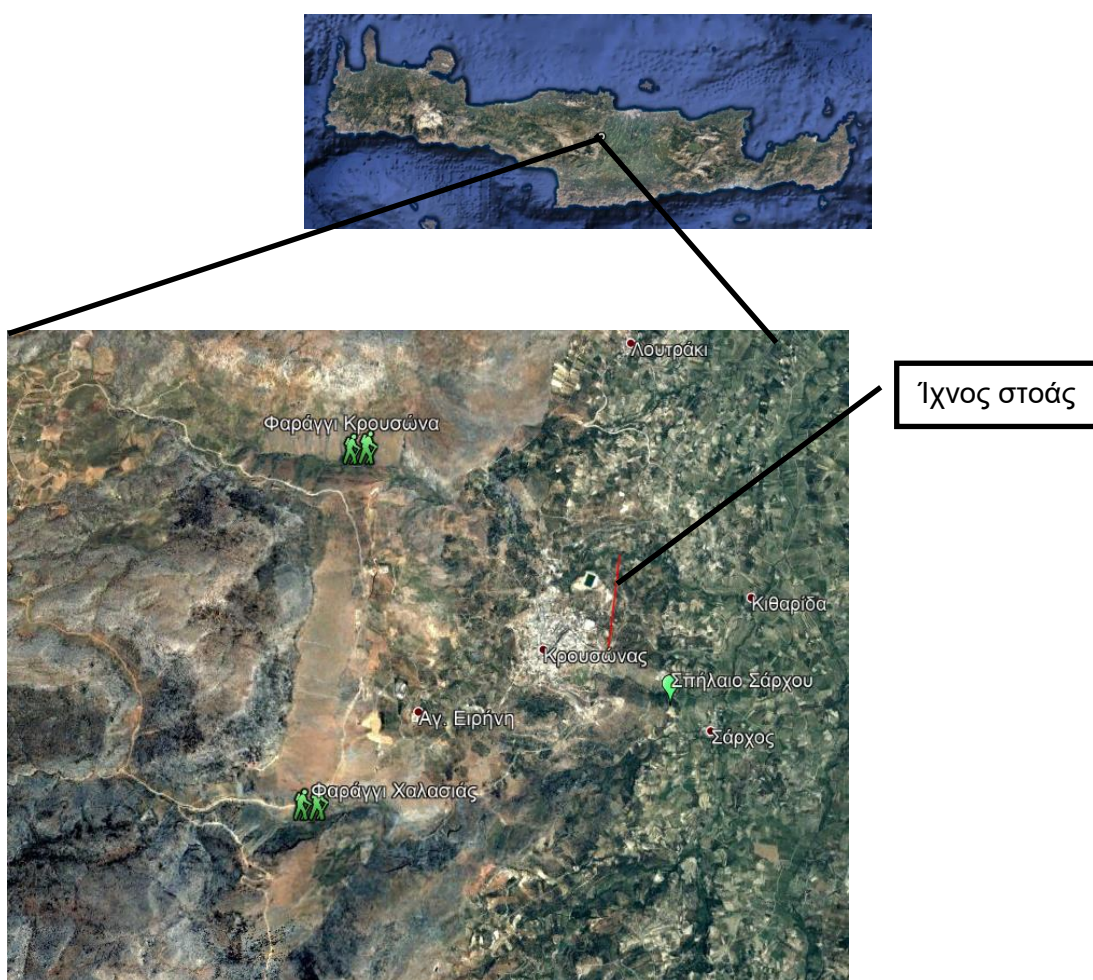
Αποτελεί ένα μεγάλο έργο και απαιτεί κατασκευαστική εμπειρία και σωστή υποστήριξη για την αποφυγή μελλοντικών προβλημάτων (Μονόπωλης και Κλειδοπούλου, 2001).

### ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 Περιοχή Μελέτης

Στην παρούσα εργασία, επιχειρείται η εκτίμηση της απόδοσης μιας υδρομαστευτικής στοάς που τοποθετείται στις ανατολικές παρειές του Ψηλορείτη, στην περιοχή του οικισμού Κρουσώνα, με σκοπό την αξιοποίηση του υπόγειου υδατικού δυναμικού της περιοχής.

Από γεωτρητικές έρευνες (ΙΓΜΕ, 1995, Δ.Ε.Υ.Α.Η., 1995-1997) έχει διαπιστωθεί σημαντική υδροφορία, η οποία κρίνεται αξιοποιήσιμη μέσω της κατασκευής μίας υδρομαστευτικής στοάς.

Η περιοχή ενδιαφέροντος αφορά στις ανατολικές παρειές του Ψηλορείτη, από την περιοχή του οικισμού του Κρουσώνα και εκτείνεται μέχρι την περιοχή δυτικά των οικισμών Σάρχος και Κριθαρίδα (Εικόνα 5).



Εικόνα 5 Ευρύτερη περιοχή ενδιαφέροντος, για την κατασκευή υδρομαστευτικής στοάς, στις ανατολικές παρειές του Ψηλορείτη (απόσπασμα από το GoogleEarth). Παρουσιάζεται το ίχνος της στοάς, διεύθυνσης Β-Ν.

Ερευνάται η κατασκευή μιας υπο-οριζόντιας υδρομαστευτικής στοάς, διεύθυνσης Β-N, παράλληλα στην διεύθυνση της υπόγειας ροής, με κλίση από Νότο προς Βορρά ώστε να μπορεί να διοχετεύει νερό προς την πόλη του Ηρακλείου με βαρύτητα.

Για τον ακριβή προσδιορισμό της θέσης και του προσανατολισμού της υδρομαστευτικής στοάς, βασικοί παράγοντες πέρα από τις γεωλογικές συνθήκες και την πιεζομετρία της περιοχής, είναι και η μορφολογία της περιοχής. Τα κριτήρια επιλογής της θέσης δίνονται αναλυτικά στη συνέχεια.

### **3.1. Γεωμορφολογία της περιοχής**

Το ανάγλυφο και η μορφολογία της περιοχής είναι ένα συνδυαστικό αποτέλεσμα της πετρολογικής σύστασης της και της τεκτονικής.

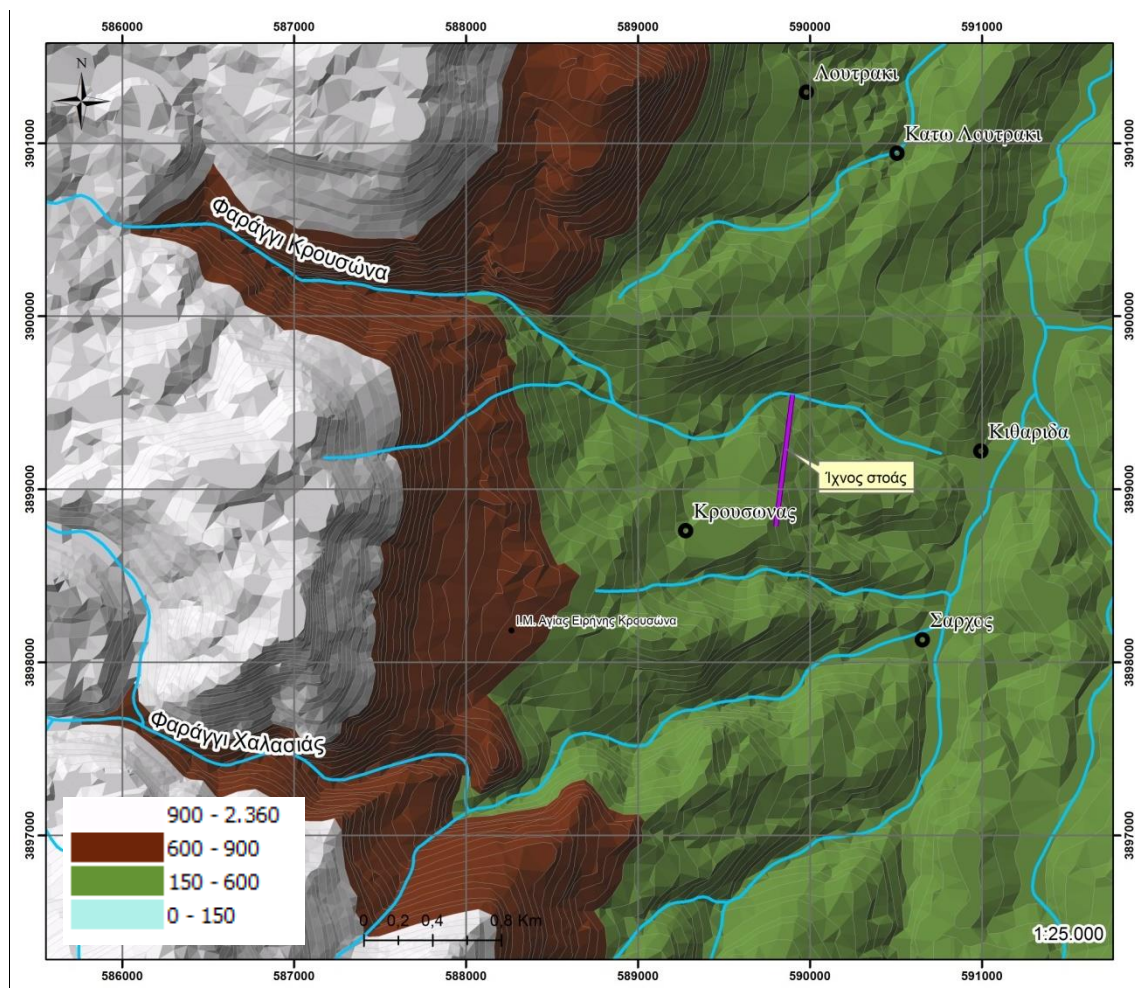
Μεταξύ των οικισμών Κορφές, Πυργού και Κρουσώνα έχει διαμορφώσει μία ανοιχτή κοιλάδα την οποία διατρέχει ο Γαζανός χείμαρρος. Στο κέντρο της κοιλάδας βρίσκονται οι οικισμοί Κιθαρίς και Σάρχος. Το δυτικό όριο της κοιλάδας αυτής παρουσιάζει έντονο ανάγλυφο. Υπάρχουν πολλοί χείμαρροι προερχόμενοι από τον Ψηλορείτη που έχουν διαβρώσει σε βάθος τα ασβεστολιθικά πετρώματα της περιοχής. Τα όρια της λεκάνης ταυτίζονται με τα μεγάλα ρήγματα της περιοχής (Τυλίσου – Κρουσώνα, Μονής) τα οποία διαμορφώνουν τα ανατολικά κράσπεδα του Ψηλορείτη.

Προς νότο απαντώνται το Φαράγγι Κρουσώνα και το Φαράγγι Σαρχου ή Φαράγγι Χαλασιάς Αγίας Ειρήνης. Το φαράγγι του Κρουσώνα, μήκους 5 km, σχηματίζεται 3 km δυτικά του οικισμού Κρουσώνα, στις ανατολικές παρειές του Ψηλορείτη, ανάμεσα στις κορυφές Βοσκερό (1.197μ) και Γούρνος (1.293μ). Το ρέμα που το διαρρέει συγκεντρώνει τα νερά του οροπεδίου Λιβάδι και τα μεταφέρει στο χωριό Κιθαρίδα όπου ενώνεται με το Γαζανό Ποταμό. Το φαράγγι είναι αρκετά άγριο και εντυπωσιακό, ενώ το χειμώνα έχει λίγο νερό και σε μερικά σημεία σχηματίζει μικρούς καταρράκτες (<https://www.cretanbeaches.com/>). Αμέσως μετά τη Μονή Αγίας Ειρήνης Κρουσώνα υπάρχει ένας σχετικά βατός χωματόδρομος που διέρχεται μέσα από το φαράγγι της Χαλασιάς και οδηγεί στο οροπέδιο του Βρομώνερου. Το Οροπέδιο του Βρομώνερου ή ο Λάκκος της Λίμας βρίσκεται σε υψόμετρο 1.300m, περίπου 10km δυτικά του Κρουσώνα, ανατολικά της κορυφής Σκοίνακα του Ψηλορείτη, όπου υπάρχει και το αστεροσκοπείο του Πανεπιστημίου Κρήτης (<https://www.cretanbeaches.com/>).

Το υψόμετρο στην περιοχή κυμαίνεται από +200m έως +1300m. Η υδρομαστευτική στοά για να είναι λειτουργική θα πρέπει να προσεγγίσει το επίπεδο της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα (+40m).

Στην περιοχή ενδιαφέροντος, ανατολικά του οικισμού Κρουσώνα κατασκευάστηκε χάρτης ψηφιακού αναγλύφου. Τα δεδομένα που αντλήθηκαν από τον παραπάνω χάρτη συναξιολογήθηκαν με τα διαθέσιμα δεδομένα της πιεζομετρίας στην περιοχή καθώς και τις γεωλογικές συνθήκες και βοήθησαν στη χωροθέτηση της στοάς.

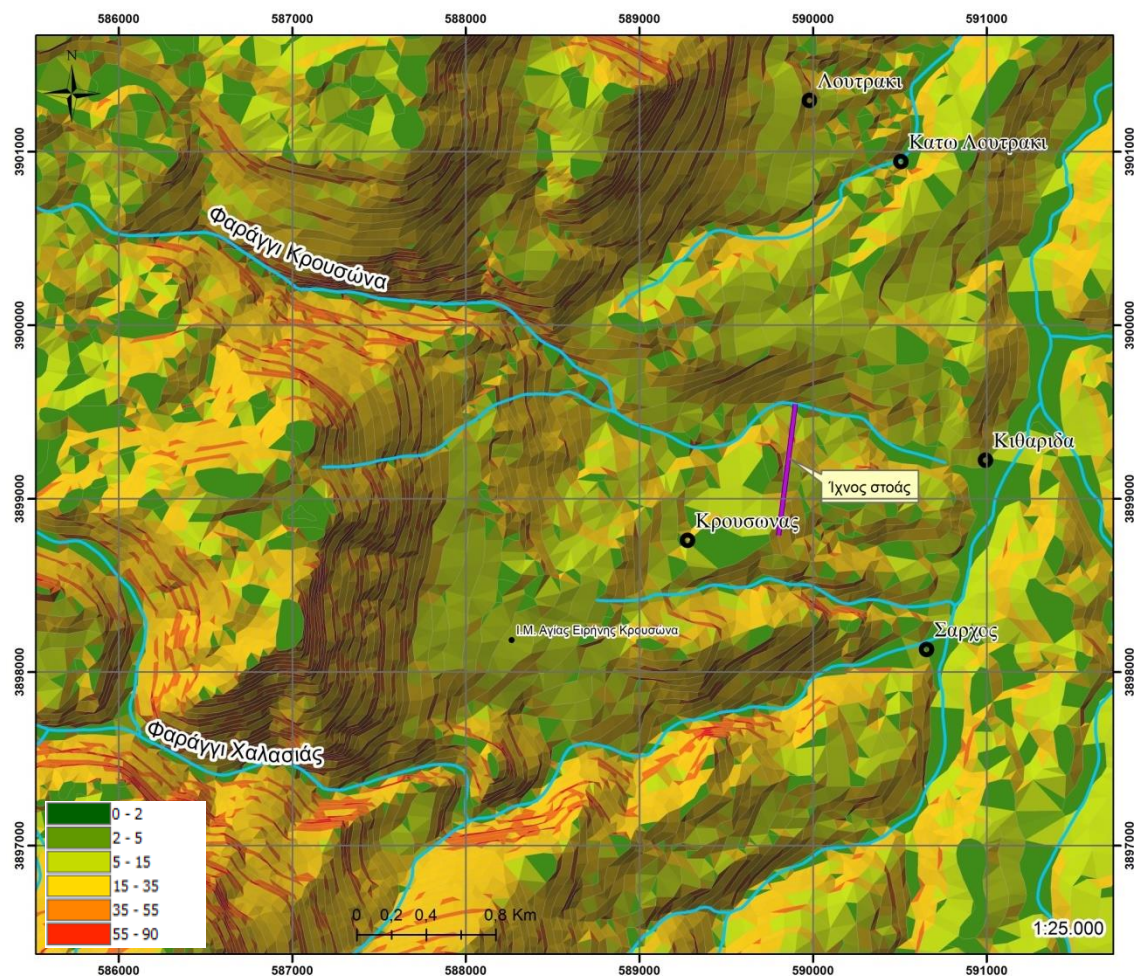
Σύμφωνα με την ταξινόμηση αναγλύφου κατά Dikau (1989), η περιοχή χαρακτηρίζεται ημιορεινή έως ορεινή (Σχήμα 14).



Σχήμα 14 Ψηφιακό μοντέλο αναγλύφου στην περιοχή ενδιαφέροντος, με ταξινόμηση του αναγλύφου κατά Dikau (1989).

Στο Σχήμα 15, δίνονται οι κλίσεις της επιφάνειας του εδάφους στην περιοχή όπου προτείνεται η κατασκευή της υδρομαστευτικής στοάς. Στην περιοχή παρατηρούνται κλίσεις 35-90° (Σχήμα 15) και σύμφωνα με την ταξινόμηση κατά Demek (1972), το ανάγλυφο χαρακτηρίζεται απόκρημνο.





Σχήμα 15 Κλίση μορφολογίας εδάφους στην περιοχή μελέτης (ταξινόμηση κατά Demek, 1972).

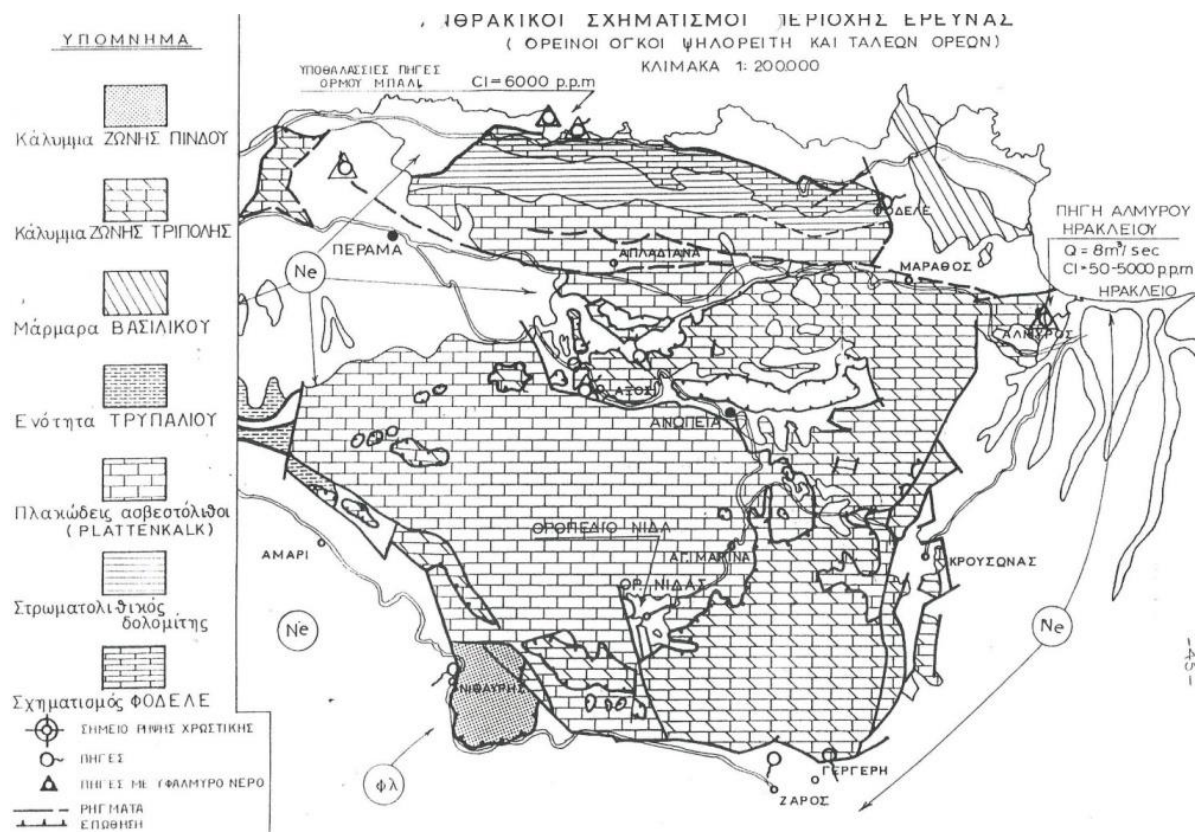
Τα δεδομένα (ισοϋψείς) που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των παραπάνω χαρτών (Σχήμα 14 και Σχήμα 15) λαμβάνονται από τη βάση δημόσιων ανοιχτών δεδομένων της ιστοσελίδας της Αποκεντρωμένης Διοίκησης Κρήτης (<https://www.apdkritis.gov.gr/el/open-data>). Τα ρέματα της περιοχής ψηφιοποιήθηκαν με το πρόγραμμα ψηφιοποίησης χαρτών ArcMap.

Για την επιλογή της βέλτιστης θέσης κατασκευής της στοάς, εκτός από την πιεζομετρία της περιοχής που έχει εξέχοντα ρόλο, σημαντικό ρόλο έχει επίσης και η πρόσβαση στην θέση κατασκευής του έργου. Η διερεύνηση της μορφολογίας της περιοχής βοηθά στην εύρεση κατάλληλης θέσης η οποία απαιτεί την ελάχιστη πρόσβαση. Η προτεινόμενη θέση κατασκευής της στοάς δίνει τη δυνατότητα προσέγγισης του υψομέτρου της πιεζομετρίας, απευθείας από το ρέμα που βρίσκεται βόρεια της στοάς.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 Γεωλογία και τεκτονική της περιοχής

Σύμφωνα με μελέτη του ΙΓΜΕ (1995), ο Ψηλορείτης καλύπτει συνολική έκταση περίπου 571 km<sup>2</sup> και δομείται κυρίως από ανθρακικά πετρώματα (Ιόνιας-Τρίπολης-Πίνδου). Μικρή εμφάνιση έχουν οι φυλλίτες-χαλαζίτες και τα οφιολιθικά πετρώματα και μικρότερη οι τεταρτογενείς αποθέσεις και τα Νεογενή. Αποτελεί ένα μεγάλο μορφολογικό αντίκλινο με πυρήνα τους πλακώδεις κρυσταλλικούς ασβεστόλιθους πάνω στους οποίους έχουν επωθηθεί, οι φυλλίτες-χαλαζίτες, τα ανθρακικά πετρώματα της ζώνης Τρίπολης και τα ανθρακικά πετρώματα της ζώνης Πίνδου. Οι σχηματισμοί των τεκτονικών αυτών καλυμμάτων εμφανίζονται περιφερειακά του ορεινού όγκου.

Από τους σχηματισμούς των ανθρακικών καλυμμάτων, μεγαλύτερη έκταση παρουσιάζουν οι ανθρακικοί σχηματισμοί της ζώνης Τρίπολης (Σχήμα 16) οι οποίοι εμφανίζονται σχεδόν σε όλη την περίμετρο του ορεινού όγκου. Στο σύνολο τους οι ανθρακικοί σχηματισμοί παρουσιάζονται κερματισμένοι με έντονες κατά περιοχές τεκτονικές διαταραχές και αυξημένη καρστικοποίηση.



Σχήμα 16 Ανθρακικοί σχηματισμοί στους ορεινούς όγκους των Ταλέων Όρεων και του Ψηλορείτη (ΙΓΜΕ, 1995).

Παρατηρείται μία γενική κλίση των ανθρακικών πετρωμάτων του ορεινού όγκου προς ΒΑ (ΙΓΜΕ, 1995), όπου στο χαμηλότερο υψομετρικά σημείο της επιφανειακής εμφάνισης αυτών αναβλύζει η υφάλμυρη πηγή Αλμυρού.

Σύμφωνα με το γεωλογικό χάρτη ΙΓΜΕ Φύλλο Ηράκλειο, κλίμακα 1:50.000, η πηγή Αλμυρού αναβλύζει στην τεκτονική επαφή των ανθρακικών σχηματισμών της ζώνης Τρίπολης με τους νεογενείς μαργαϊκούς σχηματισμούς Φοινικιάς. Ο προσανατολισμός της στρώσης των ανθρακικών σχηματισμών του τεκτονικού καλύμματος της Ζώνης Τρίπολης, ανάντη της πηγής, είναι Ν - ΝΔ διεύθυνσης, σύμφωνα με τον γεωλογικό χάρτη ΙΓΜΕ Φύλλο Ηράκλειο (κλίμακα 1:50.000).

Στην προτεινόμενη περιοχή για την χωροθέτηση της υδρομαστευτικής στοάς, στις ανατολικές παρειές του Ψηλορείτη, παρατηρούνται ασβεστόλιθοι, δολομίτες και φλύσχης της ζώνης Τρίπολης (Σχήμα 17). Οι νεογενείς σχηματισμοί που επικάθονται στους αλπικούς καταλαμβάνουν επίσης σημαντική έκταση.

Αναλυτικότερα, σύμφωνα με τον γεωλογικό χάρτη ΙΓΜΕ, Φύλλο Τυμπάκι (κλίμακα 1:50.000) αναφέρεται ότι στο δυτικό τμήμα της περιοχή μελέτης, αναπτύσσονται οι ασβεστόλιθοι και δολομίτες J12.k,d της Ζώνης Τρίπολης, οι οποίοι είναι επωθημένοι στην Φυλλιτική - Χαλαζιτική σειρά (P-T?.ph). Η Φυλλιτική – Χαλαζιτική σειρά (P-T?.ph) βρίσκεται επωθημένη στα μάρμαρα της Ιόνιας ζώνης (Mz-Te.k), ηλικίας Μεσοζωικού – Τριτογενούς.

Το ρήγμα Τυλίσσου – Κρουσώνα, το οποίο διέρχεται από την περιοχή μελέτης, με προσανατολισμό ΒΒΑ - ΝΝΔ, αποτελεί την τεκτονική επαφή των ανθρακικών σχηματισμών της Ιόνιας ζώνης (δυτικά του ρήγματος) και των ανθρακικών σχηματισμών της ζώνης Τρίπολης (ανατολικά του ρήγματος). Το ρήγμα αυτό βύθισε την περιοχή της λεκάνης του Ηρακλείου.

Ανατολικά του ρήγματος, στο ρηξιτέμαχος που καταβύθισε, οι νεογενείς σχηματισμοί επικάθονται ασύμφωνα πάνω στους αλπικούς σχηματισμούς της ζώνης Τρίπολης.

Τέλος, στην προτεινόμενη θέση κατασκευής της στοάς εμφανίζεται ο ψαμμιτοπηλιτικός φλύσχης της ζώνης Τρίπολης. Νοτιότερα της στοάς εμφανίζονται ασβεστόλιθοι και δολομίτες J12.k,d της ίδιας ζώνης. Η επαφή μεταξύ των σχηματισμών είναι τεκτονική (ρήγμα με προσανατολισμό Α-Δ).

Νότια από το Κάτω Λουτράκι εμφανίζεται ένα μεγάλο ρήγμα (το ρήγμα Σάρχου) το οποίο με διεύθυνση Β-Ν φτάνει μέχρι τις Κάτω Ασίτες και το οποίο είναι πιθανό να προεκτείνεται και βορειότερα κάτω από το Κάτω Λουτράκι.

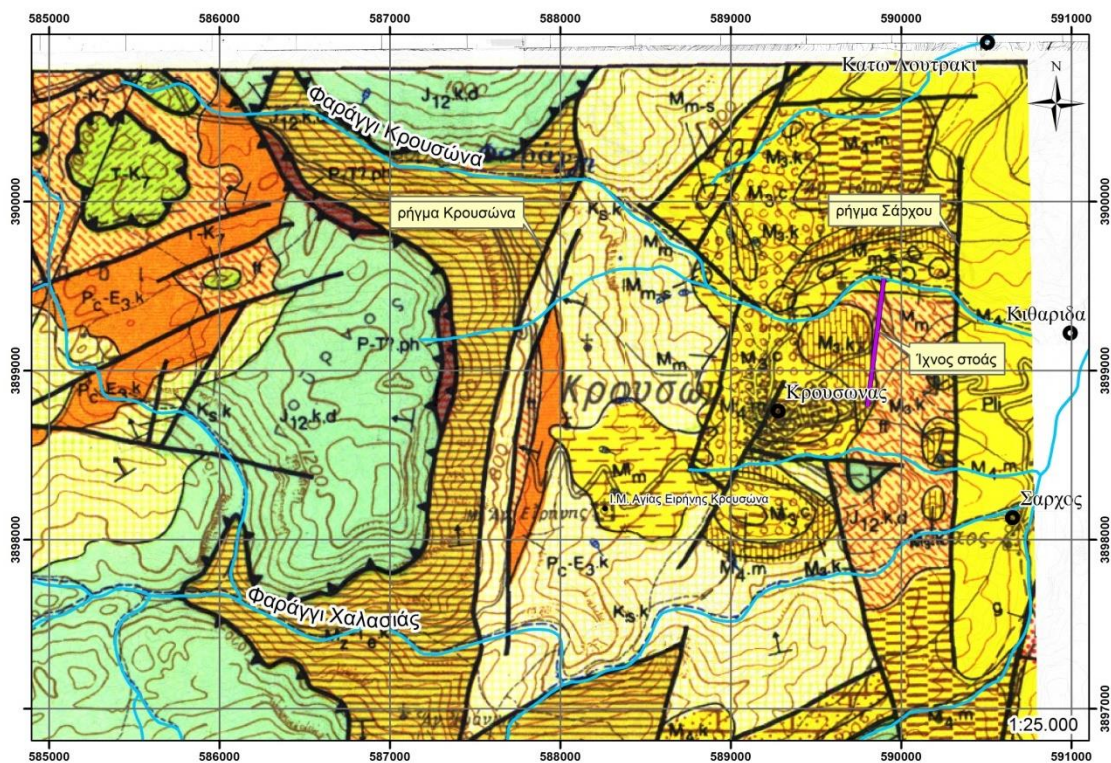
Ανατολικά του ρήγματος Σάρχου η περιοχή έχει βυθιστεί (περιοχή Κιθαρίδας - Σαρχου - Πυργούς) κατά 200 - 300 m και καλύπτεται από Νεογενείς αποθέσεις μεγάλου πάχους.



Δυτικά του ρήγματος Σάρχου και βορειότερα από το χωριό Κρουσώνα (ύψωμα του Αγίου Γεωργίου Κοκκινιάκου) η περιοχή έχει ανυψωθεί σχηματίζοντας ένα χαμηλό κράσπεδο του Ψηλορείτη με μέσο υψόμετρο 600 m περίπου. Το κράσπεδο χωρίζεται από την κύρια μάζα του Ψηλορείτη με το ρήγμα Τυλίσου - Κρουσώνα που διέρχεται ενάμιση χιλιόμετρο δυτικά του Κρουσώνα. Το πλάτος του κρασπέδου είναι 2,5 km και αποτελείται από ασβεστόλιθους της Τρίπολης, φλύσχη, μαργαϊκό ασβεστόλιθο του Μεσσήνιου και μάργες. Το σύνολο των σχηματισμών είναι έντονα τεκτονισμένο και τεμαχισμένο από εγκάρσια ρήγματα διεύθυνσης ανατολής-δύσης (Μπεζές, 1992).

Για να διερευνηθεί το υπόβαθρο της περιοχής στο πλαίσιο υδρογεωλογικής έρευνας (Μπεζές 1992) πραγματοποιήθηκαν δύο διασκοπήσεις H100 και H101 στη ζώνη που εκτείνεται μεταξύ του Κρουσώνα και Λουτρακίου (περιοχή του Αγίου Γεωργίου Κοκκινιάκου) και διαπιστώθηκε ότι κάτω από τις νεογενείς αποθέσεις πάχους 200 m υπάρχει ο ασβεστόλιθος της Τρίπολης γεγονός που επιβεβαιώνεται και από τις γεωτρήσεις που κατασκεύασε η Δ.Ε.Υ.Α.Η. την περίοδο 1992-93.

Σε απόσπασμα του γεωλογικού χάρτη ΙΓΜΕ, φύλλο Τυμπάκι (κλ. 1:50.000) (Σχήμα 17), σημειώνεται η προτεινόμενη θέση κατασκευής της υδρομαστευτικής στοάς.



<b>Νεογενές</b>	
Θαλάσσιες αποθέσεις: λευκές μάργες και λευκοί μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι, καστανωπές φυλλώδεις μάργες, άμμοι, κροκαλοπαγή και κυρίως στα ανώτερα μέρη του σχηματισμού κλαστικοί ασβεστόλιθοι.	
Μάργες: εναλλαγές ομογενών μαργών και φυλλωδών μαργών (M4.m). Γύψοι (g) και κροκαλοπαγή γύψου. Ασβεστόλιθοι υφαλογενείς, κλαστικοί, τοπικά κροκαλοπαγείς ή λατυποπαγείς (M4.k).	
Αποθέσεις θαλάσσιες, υφάλμυρες ή γλυκού νερού, αποτελούνται από ανώμαλες εναλλαγές κροκαλοπαγών, ψαμμιτών, άμμων και μαργών ή αργίλων.	
Λατυποπαγή και κροκαλοπαγή λατυποπαγούς προέλευσης, καλά συγκολλημένα.	
Κανονικές εναλλαγές γκριζων-πρασινωπών λιμναίων αργίλων και καστανών άμμων.	
<b>Ζώνη Τριπόλεως</b>	
Φλύσσης, πηλιτοψαμμιτικός με ενστρώσεις ασβεστολιθικών τουρβιδιτών.	
Ασβεστόλιθοι μαύροι με νηριτική πανίδα	
Ασβεστόλιθοι μαύροι με ρουδιστές και δολομίτες	
Ασβεστόλιθοι και δολομίτες ανοικτότεφροι έως πολύ σκοτεινοί.	
<b>Φυλλιτική – Χαλαζιτική σειρά</b>	
Χαλαζίτες και σχιστόλιθοι με λευκό μαρμαρυγία και χλωριτοειδή, σχεδόν τελείως εκθλιμένοι.	
<b>Ιόνιος ζώνη</b>	
Στρώματα Κρουσώνα, ασβεστιτικοί σχιστόλιθοι πράσινοι και ερυθροί, με λίγες ενστρώσεις μαρμάρων.	
Πλακώδεις ασβεστόλιθοι, μάρμαρα καλοστρωμένα ανοικτότεφρα έως μαύρα, χαρακτηρίζονται από πάγκους και κονδύλους πυριτόλιθων, συχνά λευκών (χαλαζίτες).	

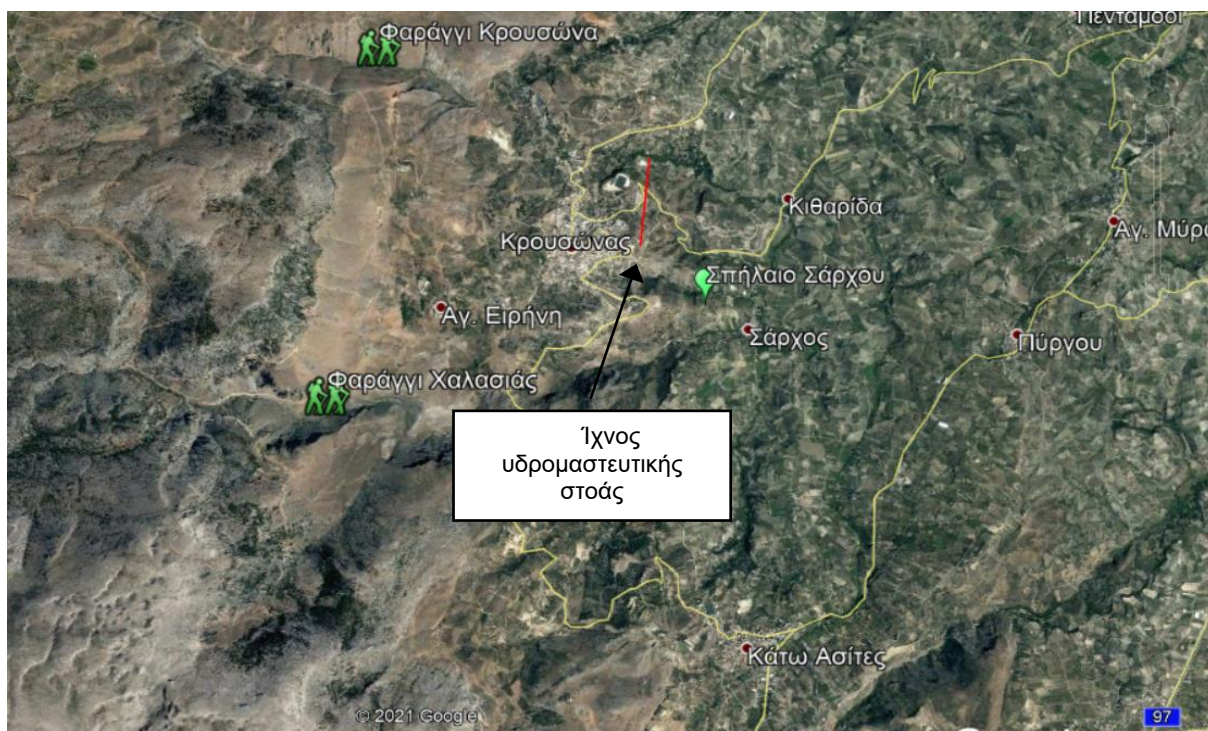
Σχήμα 17 Απόσπασμα Γεωλογικού Χάρτη ΙΓΜΕ, Φύλλο Τυμπάκι (κλίμακα 1:50.000) με τη θέση της ευρύτερης περιοχής ενδιαφέροντος (ΙΓΜΕ, 1984)

#### 4.1. Έρευνα πεδίου στην περιοχή

Για την αποσαφήνιση των γεωλογικών και τεκτονικών συνθηκών που επικρατούν στις ανατολικές παρειές του Ψηλορείτη, πραγματοποιήθηκε επισκόπηση της περιοχής. Βασικά ζητούμενα ήταν ο εντοπισμός των επαφών των γεωλογικών σχηματισμών και των ρηξιγενών δομών (ρήγματα, πιθανά ρήγματα, διαρρήξεις, επωθήσεις, επιπτεώσεις) με σκοπό την αποσαφήνιση της λιθοστρωματογραφίας στην περιοχή (Εικόνα 6).

Η έρευνα περιέλαβε, τη λήψη χαρακτηριστικών μετρήσεων προσανατολισμού της στρώσης των γεωλογικών σχηματισμών με χρήση γεωλογικής πυξίδας, αποτύπωση των επαφών των γεωλογικών σχηματισμών και του γενικού τεκτονικού καθεστώτος της περιοχής.

Ο προσανατολισμός της στρώσης των ασβεστόλιθων έχει σημαντικό ρόλο στην κίνηση των υπόγειων υδάτων (δευτερογενές πορώδες), καθώς το νερό κινείται αρχικά σε υφιστάμενες ασυνέχειες κατά μήκος των οποίων διαλυτοποιεί το πέτρωμα σχηματίζοντας μορφές καρστ.



Εικόνα 6 Ευρύτερη περιοχή έρευνας με την προτεινόμενη θέση της υδρομαστευτικής στοάς (απόσπασμα από το GoogleEarth).

Κατά τη διάρκεια της έρευνας υπαίθρου στην περιοχή, εντοπίστηκαν ασβεστόλιθοι της ζώνης Τρίπολης, φλύσχης της ζώνης Τρίπολης και μάρμαρα της Ιόνιας ζώνης. Ο καθρέπτης του ρήγματος Τυλίσου - Κρουσώνα είναι ορατός ανάντη της Ι. Μονής Αγίας Ειρήνης (Εικόνα

7). Οι μετρήσεις, η θέση λήψης και η λιθολογική περιγραφή στη θέση της μέτρησης δίνονται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1 Μετρήσεις προσανατολισμού της στρώσης των γεωλογικών σχηματισμών που ελήφθησαν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, στην περιοχή έρευνας, πλησίον του οικισμού Κρουσώνα.

Θέση μέτρησης	Συντεταγμένες ΕΓΣΑ87		Μέγιστη κλίση (°)	Φορά μέγιστης κλίσης (°)	Τύπος ασυνέχειας	Γεωλογικός Σχηματισμός / Περιγραφή
	X	Y				
1	587737	3898199	50	92	στρώση	Λεπτοπλακώδη μάρμαρα της Ιόνιας ζώνης
			55	80	στρώση	
			60	84	στρώση	
			59	90	στρώση	
2	587708	3897897	49	82	ρήγμα	Ρήγμα Τυλίσου - Κρουσώνα.
			45	86	ρήγμα	Ρήγμα Τυλίσου - Κρουσώνα
3	587678	3897786	8	74	στρώση	Λεπτοπλακώδη μάρμαρα της Ιόνιας ζώνης
			5	56	στρώση	
			15	52	στρώση	
4	587604	3897653	40	10	στρώση	Λεπτοπλακώδη μάρμαρα της Ιόνιας ζώνης
			40	356	στρώση	
			52	175	στρώση	
5	587498	3897543	36	354	στρώση	Λεπτοπλακώδη μάρμαρα της Ιόνιας ζώνης
6	587437	3897551	10	218	στρώση	Λεπτοπλακώδη μάρμαρα της Ιόνιας ζώνης ελαφρά πτυχωμένα
			35	356	στρώση	
			10	239	στρώση	
			30	10	στρώση	
7	587170	3897491	12	280	στρώση	Λεπτοπλακώδη μάρμαρα της Ιόνιας ζώνης ελαφρά πτυχωμένα
			16	262	στρώση	
8	583927	3896807	15	42	στρώση	Φλύσχης της ζώνης Τρίπολης
			46	10	στρώση	
9	585783	3898777	30	305	στρώση	Ασβεστόλιθοι ζώνης Τρίπολης
10	585400	3898886	6	41	στρώση	Ασβεστόλιθοι ζώνης Τρίπολης
			9	112	στρώση	
			9	122	στρώση	
			4	124	στρώση	
11	585913	3899123	35	41	στρώση	Ασβεστόλιθοι ζώνης



Θέση μέτρησης	Συντεταγμένες ΕΓΣΑ87		Μέγιστη κλίση (°)	Φορά μέγιστης κλίσης (°)	Τύπος ασυνέχειας	Γεωλογικός Σχηματισμός / Περιγραφή
	X	Y				
			44	342	στρώση	Τρίπολης
			24	200	στρώση	
			27	199	στρώση	
			25	221	στρώση	
12	585460	3900697	34	328	στρώση	Φλύσχος της ζώνης Τρίπολης
			40	322	στρώση	
13	587266	3899964	20	1	στρώση	Λεπτοπλακώδη, ελαφρά πτυχωμένα μαύρα μάρμαρα, της Ιόνιας ζώνης
			20	350	στρώση	
			15	300	στρώση	
14	587706	3899836	44	60	στρώση (σκέλος πτυχής Α)	Λεπτοπλακώδη, ελαφρά πτυχωμένα μαύρα μάρμαρα, της Ιόνιας ζώνης
			89	257	στρώση (σκέλος πτυχής Α)	

Από τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν, προκύπτει ότι η στρώση των μαρμάρων της Ιόνιας ζώνης, παρουσιάζει διαφοροποιήσεις στην κλίση και τον προσανατολισμό λόγω της πτύχωσης (βλ. μετρήσεις από τη θέση 14). Διαφοροποιήσεις παρατηρούνται επίσης και στις μετρήσεις της στρώσης των ανθρακικών σχηματισμών της ζώνης Τρίπολης. Το γεγονός αυτό οφείλεται στα ρήγματα που διέρχονται από την περιοχή και προκαλούν τεκτονική καταπόνηση. Χαρακτηριστική εικόνα των πτυχωμένων σχηματισμών στην περιοχή είναι η Εικόνα 16.

Στη συνέχεια δίνονται χαρακτηριστικές φωτογραφίες από την έρευνα που πραγματοποιήθηκε, στις ανατολικές παρειές του Ψηλορείτη (Εικόνα 7 έως 15).



Εικόνα 7 Καθρέπτης ρήγματος Τυλίσου - Κρουσώνα (θέση μέτρησης 2).



Εικόνα 8 Λεπτοπλακώδη μάρμαρα της Ιόνιας ζώνης, στη θέση 4. Λήψη φωτογραφίας από τη θέση μέτρησης 5.



Εικόνα 9 Λεπτοπλακώδη μάρμαρα της Ιόνιας ζώνης (θέση μέτρησης 7).



Εικόνα 10 Πηλίτες (θέση μέτρησης 8).



Εικόνα 11 Καρστική διάβρωση με διεύρυνση των διακλάσεων στα ανθρακικά της ζώνης Τρίπολης (θέση μέτρησης 10).

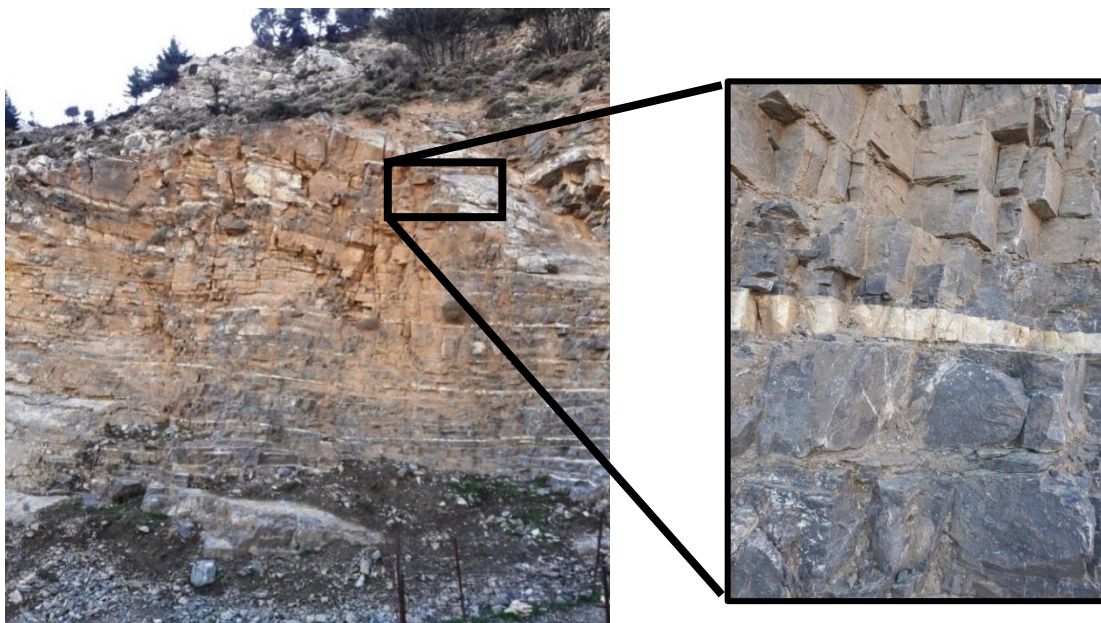


Εικόνα 12 Ανθρακικά πετρώματα της ζώνης Τρίπολης (θέση μέτρησης 11).





Εικόνα 13 Αποσαθρωμένοι σχηματισμοί του φλύσχη της ζώνης Τρίπολης (θέση μέτρησης 12).



Εικόνα 14 Λεπτοπλακώδη, ελαφρά πτυχωμένα μαύρα μάρμαρα, της Ιόνιας ζώνης. Χαρακτηρίζονται από λεπτές ενδιαστρώσεις πυριτόλιθων συχνά λευκών (θέση μέτρησης 13).



Εικόνα 15 Πτυχωμένα μάρμαρα, ανοιχτότεφρα έως μαύρα, Ιόνιας ζώνης (θέση μέτρησης 14).



### Γεωλογικός χάρτης στην προτεινόμενη θέση κατασκευής της υδρομαστευτικής στοάς.

Τα γεωλογικά στοιχεία που συγκεντρώθηκαν από την έρευνα πεδίου, συνδυαστικά με τα διαθέσιμα στοιχεία από τους Γεωλογικούς Χάρτες του ΙΓΜΕ (Φύλλο Τυμπάκι και Επάνω Αρχάναι, κλίμακας 1:50.000) και τα τοπογραφικά διαγράμματα της ΓΥΣ της περιοχής (κλίμακας 1:5.000) συναξιολογήθηκαν ώστε να κατασκευαστεί ο γεωλογικός χάρτης της ευρύτερης περιοχής όπου προτείνεται η κατασκευή της υδρομαστευτικής στοάς, ο οποίος δίνεται στο Σχήμα 18.



Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας σχεδιάστηκαν γεωλογικές τομές παράλληλα (B-B') και κάθετα (A'-A) στον προτεινόμενο άξονα της υδρομαστευτικής στοάς. Η γεωλογική τομή A-A' έχει μήκος 4 km και η Γεωλογική τομή B'-B έχει συνολικό μήκος 3,5 km.

Για την κατασκευή των γεωλογικών τομών A-A' και B-B', πέρα από τα στοιχεία που αντλούνται από τους γεωλογικούς χάρτες του ΙΓΜΕ (κλ. 1:50.000), φύλλο Τυμπάκι και φύλλο Επάνω Αρχάναι, λαμβάνονται υπόψη οι γεωλογικές τομές των υδρογεωτρήσεων KP3, KP6 και KP8 που μας παραχωρήθηκαν από τη Δ.Ε.Υ.Α.Η. καθώς επίσης και τα αποτελέσματα της έρευνας από Κρητικάκη κ.α. (2002).

Στις γεωλογικές τομές των παραπάνω υδρογεωτρήσεων αναγράφεται ότι διατρήθηκαν "Εναλλαγές Μάργας χρώματος γκρι με Μαργαϊκό ασβεστόλιθο" στην KP3 μέχρι το βάθος των 80,0m, στην KP6 έως το βάθος των 150,0m και στην KP8 έως το βάθος των 180,0m, στη συνέχεια και έως το πέρας των γεωτρήσεων όλες διέτρησαν "Ασβεστόλιθους Ενότητας Τρίπολης". Οι τομές των Γεωτρήσεων δίνονται στο Παράρτημα.

Προς απλοποίηση των γεωλογικών τομών A-A' και B-B', με σκοπό την αποφυγή εσφαλμένων εκτιμήσεων που έχουν να κάνουν με το πάχος των επί μέρους ανθρακικών σχηματισμών της Ζώνης Τρίπολης, γίνεται ομαδοποίηση αυτών ως "Ασβεστόλιθοι και Δολομίτες" της Ζώνης Τρίπολης. Αντίστοιχα, γίνεται ομαδοποίηση των επιμέρους γεωλογικών σχηματισμών του Νεογενούς ως: "Μάργες, μαργαϊκοί ασβεστόλιθοι, κροκαλοπαγή, ψαμμίτες και άμμοι".

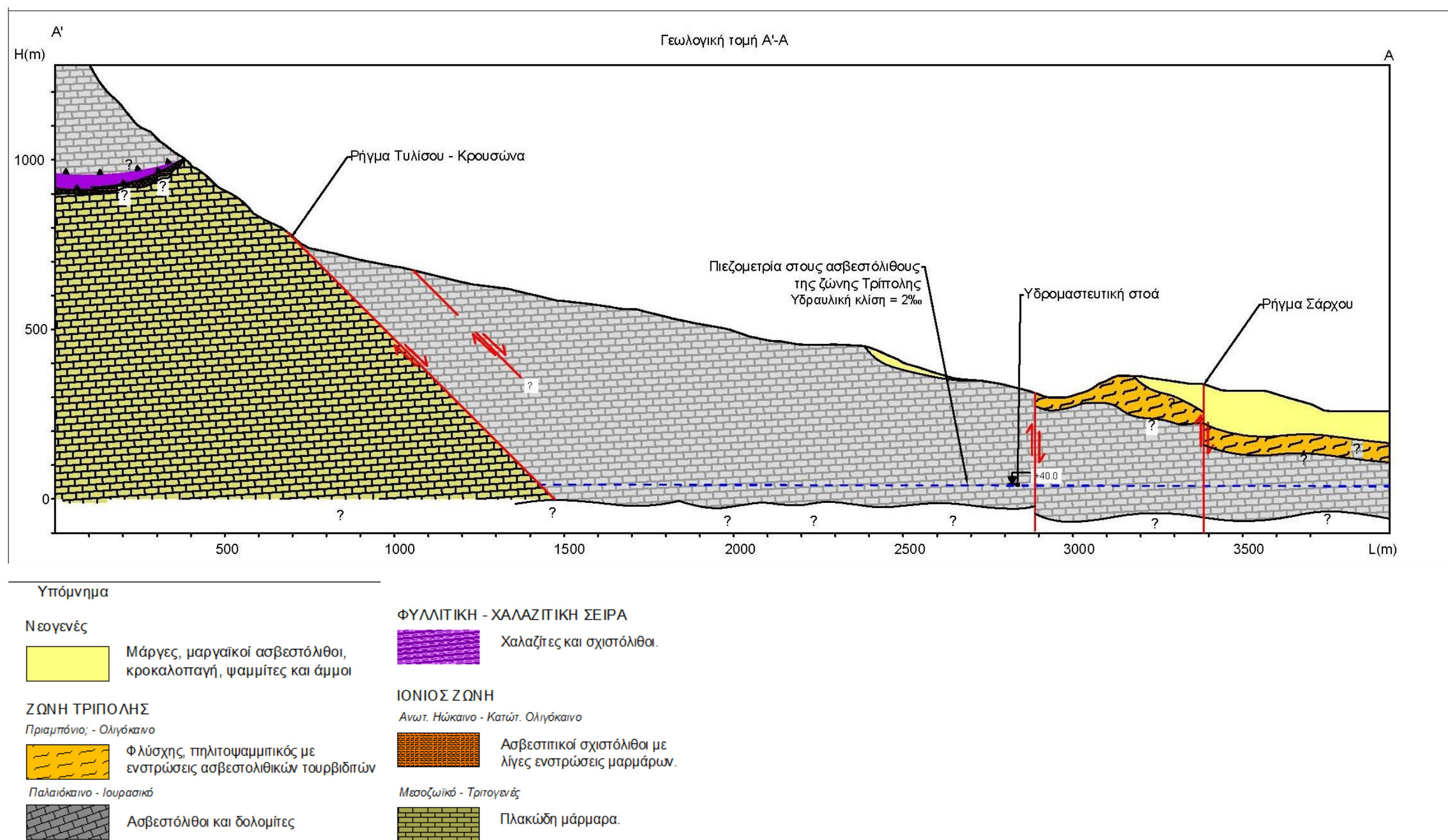
Τα ρήγματα για τα οποία δεν έχουμε μετρήσει τη μέγιστη κλίση τους με γεωλογική πυξίδα παρουσιάζονται κατακόρυφα στις γεωλογικές τομές.

Η κλίση της στρώσης των γεωλογικών σχηματισμών που απεικονίζονται στις γεωλογικές τομές A-A' και B-B', αποτελεί τη φαινόμενη κλίση που προκύπτει έπειτα από την στατιστική επεξεργασία των μετρήσεων της επί τόπου έρευνας πεδίου. Συγκεκριμένα στην γεωλογική τομή A-A' η φαινόμενη κλίση της στρώσης για τα μάρμαρα της Ιόνιας είναι 4° προς τα Δυτικά και για τους ανθρακικούς σχηματισμούς της Ζώνης Τρίπολης είναι 3° προς τα Δυτικά. Αντίστοιχα στην γεωλογική τομή B-B' η φαινόμενη κλίση της στρώσης για τους ανθρακικούς σχηματισμούς της Ζώνης Τρίπολης είναι 1° προς τα Βόρεια.

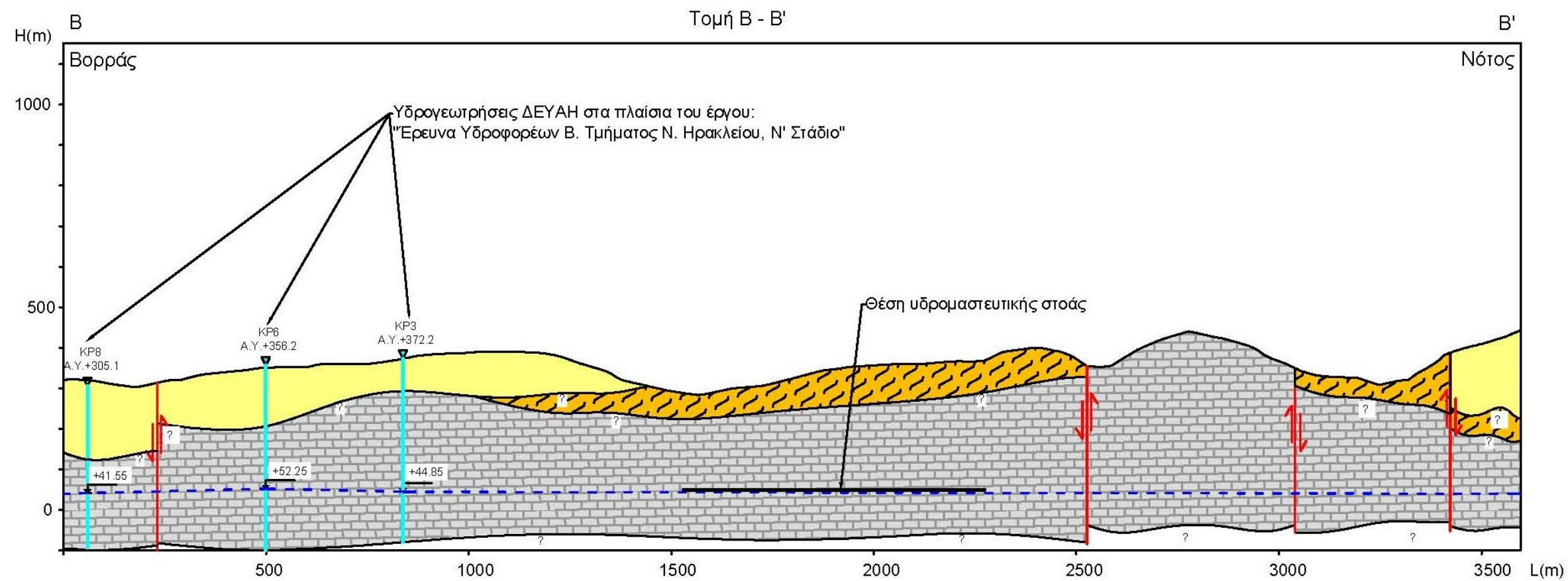
Η υδραυλική κλίση 2‰ που σημειώνεται στις γεωλογικές τομές προκύπτει από στοιχεία που συλλέχθηκαν από την Δ.Ε.Υ.Α.Η.

Οι γεωλογικές τομές δίνονται σχηματικά στο Σχήμα 19 και Σχήμα 20.



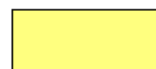


Σχήμα 19 Γεωλογική τομή Α'-Α, η οποία διέρχεται από την περιοχή μελέτης και είναι εγκάρσια της προτεινόμενης υδρομαστευτικής στοάς.



#### Υπόμνημα

##### Νεογενές



Μάργες, μαργαίκοι ασβεστόλιθοι,  
κροκαλοπαγή, ψαμμίτες και άμμοι

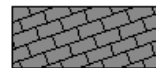
##### ΖΩΝΗ ΤΡΙΠΟΛΗΣ

Πριαμπίνο; - Ολιγόκαινο



Φλύσχος, πηλιτοψαμμικός με  
ενστρώσεις ασβεστολιθικών τουρβιδιών

Παλαιόκαινο - Ιουραϊκό

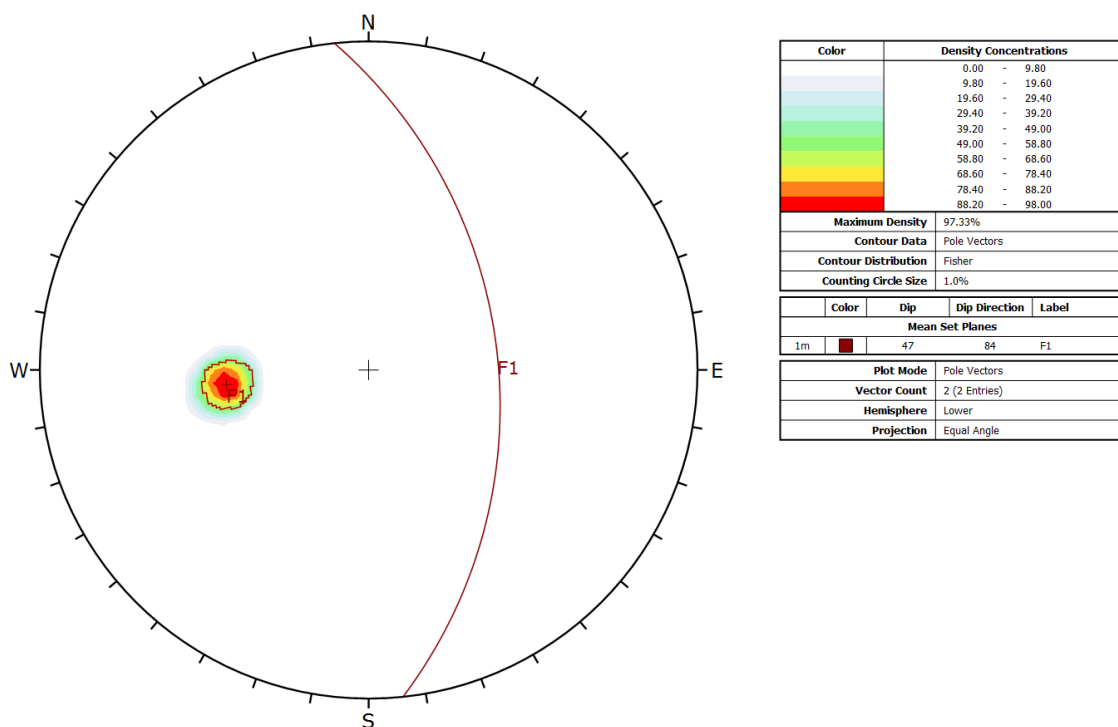


Ασβεστόλιθοι και δολομίτες

Σχήμα 20 Γεωλογική τομή Β-Β', η οποία διέρχεται από την περιοχή μελέτης και είναι παράλληλη της προτεινόμενης υδρομαστευτικής στοάς.

## 4.2. Τεκτονική εξέλιξη στην περιοχή έρευνας

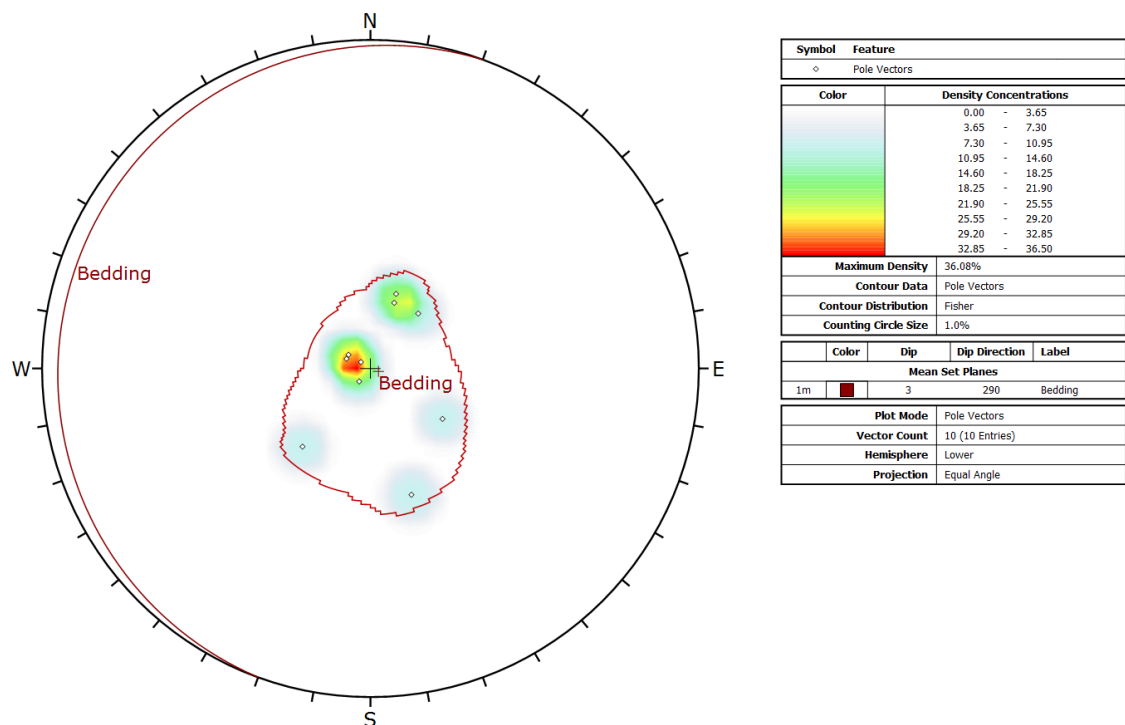
Το ρήγμα Τυλίσου – Κρουσώνα, που διέρχεται από την περιοχή, μετρήθηκε κατά την έρευνα πεδίου σε δύο θέσεις, ανάντη της Μονής Αγίας Ειρήνης. Στην συγκεκριμένη θέση τα στοιχεία προσανατολισμού του ρήγματος είναι  $47^{\circ}/084^{\circ}$  (Μέγιστη κλίση / Φορά μέγιστης κλίσης). Ο μέγιστος κύκλος του ρήγματος δίνεται στο στερεοδιάγραμμα του Σχήματος 21 με τον συμβολισμό F1.



Σχήμα 21 Στερεοδιάγραμμα στατιστικής επεξεργασίας των πόλων των μετρήσεων του ρήγματος Κρουσώνα, στην περιοχή ανάντη της Ι.Μ. Αγίας Ειρήνης. Ο μέγιστος κύκλος του ρήγματος F1 =  $47/084$  (Μέγιστη κλίση / Φορά μέγιστης κλίσης).

Στην περιοχή έρευνας, ελήφθησαν μετρήσεις προσανατολισμού της στρώσης στους ανθρακικούς σχηματισμούς ζώνης Τριπόλεως και Ιονίου ζώνης καθώς και στον φλύσχη της ζώνης Τρίπολης (Πίνακας 1). Οι σχηματισμοί της Φυλλιτικής - Χαλαζιτικής σειράς παρ' ότι εντοπίστηκαν δεν ήταν δυνατόν να ληφθούν μετρήσεις προσανατολισμού ασυνεχειών, λόγω αδυναμίας προσέγγισης της περιοχής.

Τα αποτελέσματα από τη στατιστική επεξεργασία των μετρήσεων στους ανθρακικούς σχηματισμούς της ζώνης Τρίπολης, δίνονται στο στερεοδιάγραμμα του Σχήματος 22.



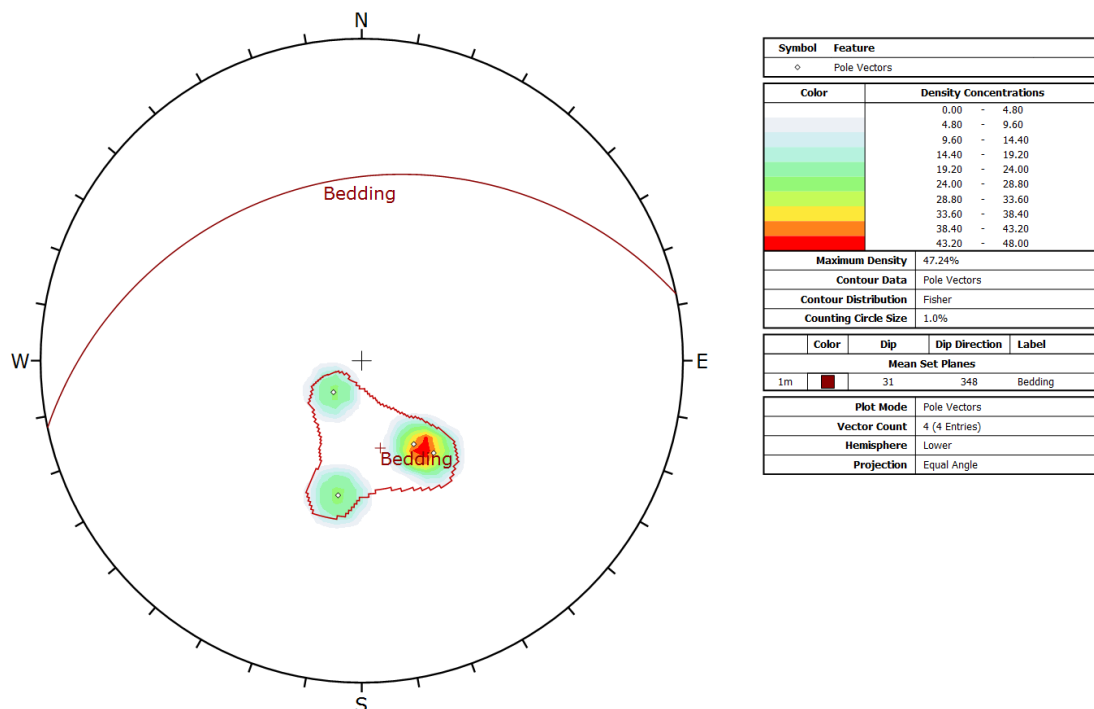
Σχήμα 22 Στερεοδιάγραμμα στατιστικής επεξεργασίας των πόλων των μετρήσεων της στρώσης στους ανθρακικούς σχηματισμούς της ζώνης Τρίπολης

Οι διάφορες μικρές συγκεντρώσεις των πόλων των μετρήσεων της στρώσης στους ανθρακικούς σχηματισμούς της Ζώνης Τρίπολης υποδεικνύουν τεκτονική καταπόνηση του σχηματισμού. Η τεκτονική καταπόνηση των ανθρακικών σχηματισμών οφείλεται στη δράση των ρηγμάτων που απαντώνται στην περιοχή. Με σημαντικότερο το ρήγμα Τυλίσσου - Κρουσώνα.

Από τη στατιστική επεξεργασία των μετρήσεων, η στρώση των ανθρακικών σχηματισμών της ζώνης Τρίπολης παρουσιάζει προσανατολισμό προς Βορειοδυτικά, με κλίση 3°.

Στην περιοχή μελέτης για την κατασκευή της στοάς εντοπίζεται φλύσχη της ζώνης Τρίπολης. Ο σχηματισμός του φλύσχη είναι έντονα αποσαθρωμένος και ελαφρώς πτυχωμένος. Τα αποτελέσματα από τη στατιστική επεξεργασία των μετρήσεων στο φλύσχη της ζώνης Τρίπολης, δίνονται στο στερεοδιάγραμμα του Σχήματος 29.





Σχήμα 23 Στερεοδιάγραμμα στατιστικής επεξεργασίας των πόλων των μετρήσεων της στρώσης στο φλύσχη της ζώνης Τρίπολης.

Από τη στατιστική επεξεργασία των μετρήσεων, η στρώση στο φλύσχη της Τρίπολης παρουσιάζει προσανατολισμό προς Βόρεια - Βορειοδυτικά, με κλίση  $31^{\circ}$ .

Συνοψίζοντας, συμπεραίνονται τα ακόλουθα:

- το ρήγμα Τυλίσσου – Κρουσώνα έχει προσανατολισμό B-N.
- τα ανθρακικά πετρώματα της ζώνης Τρίπολης λόγω της δράσης των ρηγμάτων στην περιοχή, παρουσιάζουν τεκτονική καταπόνηση.
- η στρώση των ανθρακικών σχηματισμών της ζώνης Τρίπολης παρουσιάζει προσανατολισμό προς Βορειοδυτικά

τα μάρμαρα της Ιόνιας ζώνης εμφανίζονται πτυχωμένα. Οι πτυχές είναι σχετικά περιορισμένες και εμφανίζονται με τη μορφή κλειστών έως υπό-ισοκλινών πτυχώσεων (<http://frontoffice-147.dev.edu.uoc.gr/>). Αυτό οφείλεται στις δυνάμεις συμπίεσης που αναπτύχθηκαν στην περιοχή. Η στρώση των ανθρακικών σχηματισμών της Ιόνιας Ζώνης παρουσιάζει κύριο προσανατολισμό προς Βόρεια - Βορειοδυτικά, σύμφωνα με τα στοιχεία από τον Γεωλογικό Χάρτη ΙΓΜΕ Φύλλο Τυμπάκι (κλίμακας 1:50.000) αλλά και τις επί τόπου μετρήσεις. Λόγω πτύχωσης του σχηματισμού παρατηρείται τοπικά ο προσανατολισμός της στρώσης να είναι προς Ανατολικά.



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 Υδρογεωλογία

### 5.1. Υδρογεωλογικές συνθήκες στην περιοχή έρευνας

Στην περιοχή κατασκευής της υδρομαστευτικής στοάς στις ανατολικές παρειές του Ψηλορείτη οι τεκτονικές συνθήκες και η έντονη καρστικοποίηση των ανθρακικών σχηματισμών έχουν πρωτεύοντα ρόλο στην διαμόρφωση του καρστικού υδροφορέα. Συγκεκριμένα, ο τεκτονικά υπερκείμενος υδροφορέας της ζώνης Τρίπολης καταλαμβάνει την περίμετρο του Ψηλορείτη, περιβάλλοντας τα πλακώδη μάρμαρα της Ιόνιας ζώνης που αναδύονται στον πυρήνα του (ΙΓΜΕ, 2009).

Οι ασβεστόλιθοι της ζώνης Τρίπολης, σαν κάλυμμα, παρουσιάζονται καταπονημένοι τεκτονικά, λόγω της μετακίνησης τους. Παρουσιάζουν πλήθος ασυνεχειών που επιταχύνουν τη διαλυτική δράση του νερού. Λόγω του ότι είναι παχυστρωματώδεις, χωρίς αργιλικές προσμίξεις ή άλλες υδατοστεγανές ή δυσδιάλυτες ενστρώσεις, επιτρέπουν την ανεμπόδιστη και σε μεγάλο βάθος πρόοδο της καρστικοποίησης (ΙΓΜΕ, 2009).

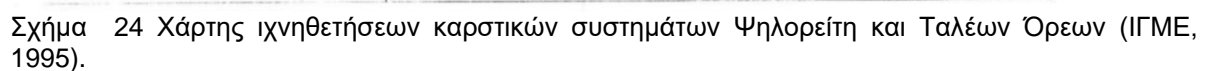
Συνεπώς συμπεριφέρονται ως έντονα υδροπερατοί σχηματισμοί που σε συνδυασμό με τα υψηλά ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα και το μεγάλο ποσοστό κατείσδυσης αποτελούν ένα ενιαίο υδροφορέα μεγάλης έκτασης και μεγάλου συνολικού όγκου. Δίνουν τη δυνατότητα συγκέντρωσης μεγάλων ποσοτήτων νερού που τροφοδοτούν τις υπόγειες υδροφορίες που αναπτύσσονται, είτε περιφερειακά και χαμηλά στη βάση των παρυφών του ορεινού όγκου, είτε στην υψηλή ζώνη αυτού, όπου υπάρχουν υποκείμενοι φυλλίτες - χαλαζίτες (ΙΓΜΕ, 1995).

Στην διαμόρφωση των υδρογεωλογικών συνθηκών, της υπό μελέτη περιοχής, ιδιαίτερα σημαντική είναι η συμβολή του δικτύου των ρηγμάτων. Μέσω των κατακόρυφων μετατοπίσεων αυτών μπορούν να έρθουν σε πλευρική επαφή και επικοινωνία οι υδροφορείς της ζώνης Τρίπολης με αυτούς των πλακωδών μαρμάρων της Ιόνιας (ΙΓΜΕ, 2009).

Το φυλλιτικό υπόβαθρο της ζώνης Τρίπολης, του οποίου το πάχος είναι μεταβλητό και συχνά μηδαμινό (Μπεζές, 1993), θεωρείται πρακτικά αδιαπέρατο και η δυνατότητα επικοινωνίας του υδροφορέα των πλακωδών ασβεστολίθων με τον υδροφορέα της ζώνης Τρίπολης οφείλεται στις τεκτονικές συνθήκες. Στη υδραυλική επικοινωνία των υδροφορέων συντελούν τα ρήγματα που διέρχονται από την περιοχή, με κυριότερο το ρήγμα Τυλίσου – Κρουσώνα.

Ο υδροφορέας που αναπτύσσεται στην ευρύτερη περιοχή και τροφοδοτεί και την πηγή του Αλμυρού, ονομάζεται σύμφωνα με τον Μπεζέ (1992), υδροφορέας της Ίδης και

Στο πλαίσιο έρευνας του συστήματος του ορεινού όγκου του Ψηλορείτη, το ΙΓΜΕ (1995) πραγματοποίησε ένα πρόγραμμα ιχνηθετήσεων. Από την έρευνα προέκυψε ότι τα υπόγεια νερά της υψηλής ζώνης (περιοχές Νίδας και Αγίας Μαρίνας) οδηγούνται στις περιφερειακές πηγές Αλμυρού, Ζαρού, Γέργερης, Νίθaurης τις πηγές Αξού και το Μπαλί Παρατηρήθηκε δηλαδή μία ακτινωτή διασπορά, που δεν επιτρέπει τον διαχωρισμό του ορεινού όγκου σε επιμέρους υδρογεωλογικές λεκάνες (Σχήμα 24).



Στις ΒΑ απολήξεις του Ψηλορείτη, έχει διανοιχθεί στο παρελθόν πλήθος γεωτρήσεων, από διάφορους φορείς και από τη Δ.Ε.Υ.Α.Η., οι οποίες εντόπισαν καρστική υδροφορία στο επίπεδο της στάθμης της θάλασσας που συνεχίζει σε άγνωστο βάθος.

[61]

κ.ά.). Η απογραφή των υδρογεωτρήσεων έγινε στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος συνεργασίας μεταξύ Δ.Ε.Υ.Α.Η. και Πολυτεχνείου Κρήτης (έργο: "Αξιοποίηση πηγών Αλμυρού Ποταμού").

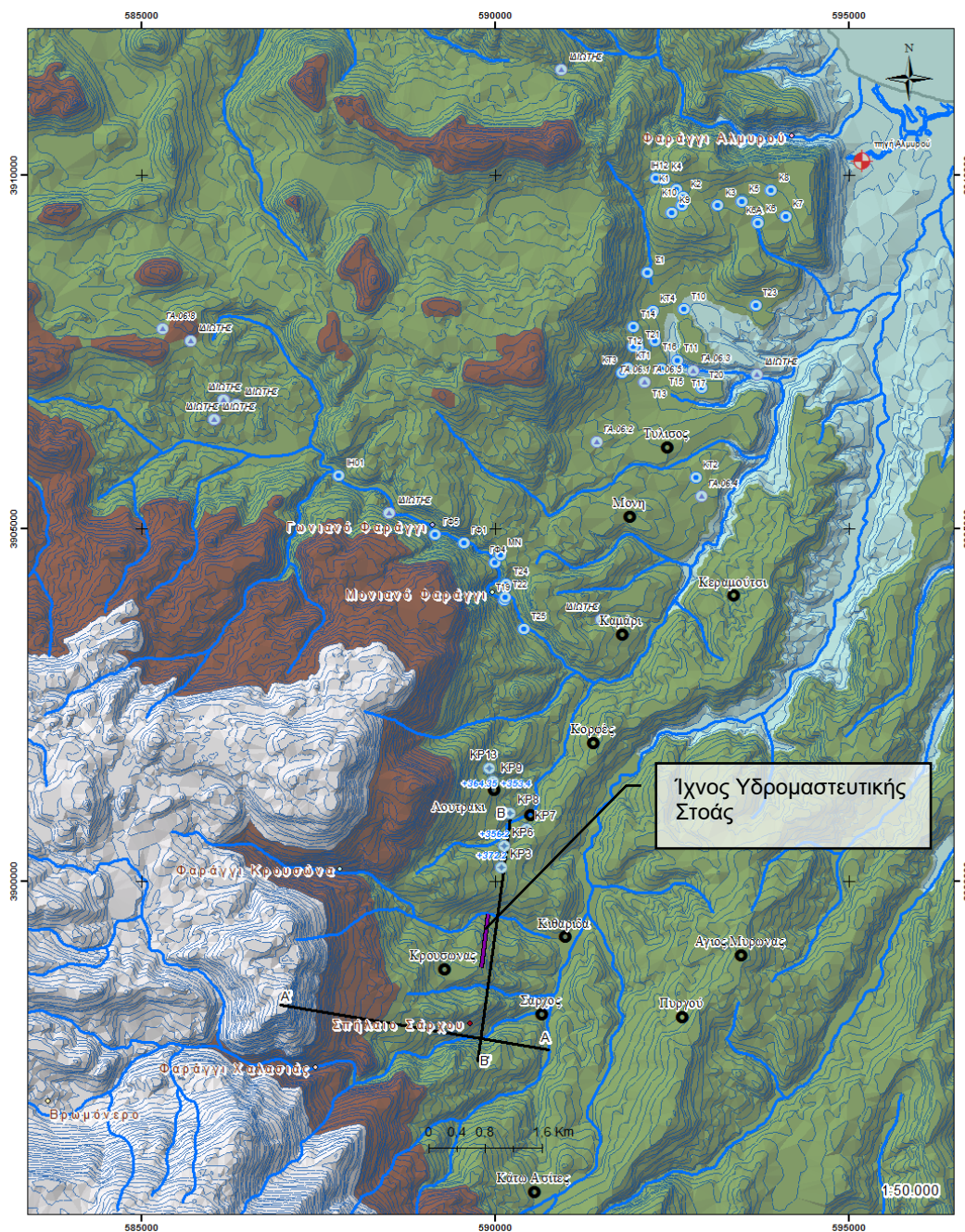
Οι (παραγωγικές) γεωτρήσεις, που μελετήθηκαν από την ερευνητική ομάδα του Πολυτεχνείου Κρήτης στο πλαίσιο της εργασίας «Προσδιορισμός Υδρογεωλογικών Παραμέτρων στα Ανθρακικά Πετρώματα της Κρήτης (Μεθοδολογία - Στατιστική Ανάλυση)» (Μονόπωλης κ.α., 1999), κατανέμονται γεωγραφικά αμέσως ανάντη της πηγής Αλμυρού, στην περιοχή της Κέρης, μέχρι μερικά χιλιόμετρα ενδοχώρια, στις περιοχές Κρουσώνα και Αγίου Μύρωνα, σε υψόμετρα από 150 μέχρι και > 450 m.

Διαπιστώθηκε ότι καρστική υδροφορία αναπτύσσεται εντός των ανθρακικών σχηματισμών της ζώνης Τρίπολης και της υποκείμενης σειράς των Πλακωδών ασβεστόλιθων (Πεδίο Γωνιανού Φαραγγιού).

Από τον οικισμό Κρουσώνα και νοτιότερα, μεταξύ Κάτω και Πάνω Ασιτών, τα προ-νεογενή ανθρακικά πετρώματα απαντώνται στην επιφάνεια σε μεγάλο υψόμετρο. Επομένως στην περιοχή αυτή, αποκτά ιδιαίτερη σημασία ο εντοπισμός της σειράς Φυλλιτών-Χαλαζιτών σαν αδιαπέρατο υπόβαθρο των ασβεστόλιθων της Τρίπολης. Σύμφωνα με έρευνα του ΙΓΜΕ το 1993 (ερευνητική γεώτρηση ΙΗ29), βορειοδυτικά της κοινότητας Κάτω Ασιτών, σε υψόμετρο +520m διαπιστώθηκε, η άμεση επικοινωνία των ασβεστόλιθων Τρίπολης και πλακωδών ασβεστόλιθων χωρίς την παρεμβολή αδιαπέρατης σειράς (ΙΓΜΕ, 2009).

Οι γεωτρήσεις στις οποίες επικεντρώθηκε το ενδιαφέρον ήταν αυτές που ήδη εκμεταλλεύεται ή παρακολουθεί η Δ.Ε.Υ.Α.Η. ή άλλοι φορείς. Οι συντεταγμένες και τα διαθέσιμα στοιχεία υδροφορίας των παραπάνω γεωτρήσεων, δίνονται στο Παράρτημα (Πίνακας Α.1, Α2 και Α.3). Κατασκευάστηκε χάρτης με τις θέσεις των γεωτρήσεων αυτών (Σχήμα 25) και την προτεινόμενη θέση κατασκευής της υδρομαστευτικής στοάς.

Σύμφωνα με δεδομένα που συλλέχθηκαν από τη Δ.Ε.Υ.Α.Η. οι πλησιέστερες υδρογεωτρήσεις που είναι λειτουργικές και βρίσκονται βορειότερα της περιοχής κατασκευής της υδρομαστευτικής στοάς, είναι οι ΚΡ3, ΚΡ6, ΚΡ7, ΚΡ8, ΚΡ9, ΚΡ13 οι οποίες βρίσκονται στην περιοχή Λουτράκι – Κρουσώνα. Η πλησιέστερη στο έργο υδρογεώτρηση είναι η ΚΡ3 σε απόσταση περίπου 600m, Βόρεια της στοάς. Η γεωμορφολογία οδήγησε στην επιλογή της θέσης της στοάς νοτιότερα, ώστε να υπάρχει δυνατότητα προσπέλασης από το ρέμα βόρεια της στοάς.



Σχήμα 25 Χάρτης της ευρύτερης περιοχής με τις θέσεις των υφιστάμενων υδρογεωτρήσεων που είναι λειτουργικές, σε κλίμακα 1:50.000. (Α-Α' και Β-Β' είναι οι γεωλογικές τομές παράλληλα και εγκάρσια στη σχεδιαζόμενη υδρομαστευτική στοά).

### 5.1.2. Πιεζομετρία

Αξιοποιώντας τα διαθέσιμα στοιχεία από προγενέστερες έρευνες και μελέτες που πραγματοποιήθηκαν στην περιοχή ή πλησίον της περιοχής κατασκευής της υδρομαστευτικής στοάς, προκύπτουν τεκμηριωμένα τα απαραίτητα στοιχεία για την πιεζομετρία της περιοχής που απαιτούνται για την κατασκευή του υπόγειου έργου στη

προτεινόμενη θέση. Αναλυτικότερα αναφέρονται στη συνέχεια τα στοιχεία που αξιοποιήθηκαν από τη διαθέσιμη βιβλιογραφία παλαιότερων ερευνών.

Στα πλαίσια της ερευνητικής εργασίας "Εκμετάλλευση Παράκτιων Καρστικών Υδροφόρων Μέσω Δικτύων Γεωτρήσεων (Παραδείγματα από Κρήτη)", (Μονόπωλης κ.ά., 1998) προκειμένου να μελετηθεί η συμπεριφορά του υδροφορέα της πηγής Αλμυρού και να γίνει εκτίμηση της απόδοσης της εκμετάλλευσής του, συντάχθηκαν χάρτες ισοπιεζομετρικών και ισοχλώριων καμπυλών για διαφορετικές χρονικές περιόδους.

Σύμφωνα με την παραπάνω εργασία, στο πεδίο της Τυλίσου και στην κατάντη περιοχή η υδροφορία απαντάται στους ανθρακικούς σχηματισμούς της ζώνης Τρίπολης. Στους χάρτες ισοπιεζομετρικών καμπυλών για τα υδρολογικά έτη 1987-88 και 1990-91 που περιλαμβάνονται στην παραπάνω ερευνητική εργασία εμφανίζεται ένα βύθισμα στις ισοπιεζομετρικές καμπύλες στο πεδίο της Τυλίσου. Το βύθισμα αποδόθηκε στις υπό εκμετάλλευση γεωτρήσεις, ενώ αντίστοιχα το βύθισμα που παρουσιάζεται στην περιοχή της πηγής Αλμυρού είναι το αποτέλεσμα της εκφόρτισης του υδροφορέα μέσω της πηγής.

Το υδρολογικό έτος 1990-91 εκτός από τη συνεχή εκμετάλλευση του πεδίου της Τυλίσου, αρχίζει και η εκμετάλλευση του πεδίου της Κέρης, παρατηρείται μια μετατόπιση του βυθίσματος Τυλίσου προς ΝΑ, που δείχνει ότι η ΝΑ περιοχή του πεδίου Τυλίσου τροφοδοτείται από το Γωνιανό Φαράγγι, δηλαδή από Δ ή ΒΔ (Μονόπωλης κ.ά., 1998).

Τα υδρολογικά έτη 1993-94 και 1996-97, παρατηρείται ίδια εικόνα με μικρές διαφοροποιήσεις στις υψηλές στάθμες.

Από τα επιπλέον δεδομένα που προκύπτουν από την περιοχή Λουτρακίου - Κρουσώνα προκύπτει ότι η γενική τροφοδοσία προέρχεται από Ν και Δ, για να καταλήξει στην πηγή Αλμυρού. Παρατηρείται επίσης ένα ύψωμα μεταξύ των βυθισμάτων της Κέρης και της Τυλίσου που υποδεικνύει μια τροφοδοσία από δυτικά.

Το υδρολογικό έτος 1996-1997, όπου είχε περάσει αρκετός χρόνος από την ενεργοποίηση των πεδίων Κέρης, Τυλίσου και Γωνιανού Φαραγγιού, διαφαίνονται τάσεις εξομάλυνσης και σταθεροποίησης.

Σύμφωνα με επικαιροποιημένα δεδομένα από τη Δ.Ε.Υ.Α.Η. η μέση ετήσια στάθμη υπόγειου νερού βρίσκεται στα +40. Η υδραυλική κλίση σύμφωνα με τα διαθέσιμα δεδομένα είναι περίπου 2‰ προς Βορρά.

Στην παρούσα εργασία συναξιολογήθηκαν τα δεδομένα από τους χάρτες ισοπιεζομετρικών καμπυλών (Μονόπωλης κ.ά., 1998) και τα στοιχεία της στάθμης του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα από τις πλησιέστερες γεωτρήσεις στην περιοχή μελέτης.



Στην περιοχή του Κρουσώνα προτείνεται να γίνει η κατασκευή της υδρομαστευτικής στοάς, ο άξονας της οποίας θα έχει προσανατολισμό B-N, παράλληλο δηλαδή στη διεύθυνση της υπόγειας ροής (εγκάρσια στην πιεζομετρία) με στόχο να επιτυγχάνεται βέλτιστη απόδοση.

### **5.1.3. Υδραυλικές παράμετροι υδροφορέα**

Οι υδραυλικές παράμετροι του υδροφορέα της ευρύτερης περιοχής ενδιαφέροντος διερευνήθηκαν στο παρελθόν από τους Μονόπωλης κ.ά. (1999) αξιοποιώντας πλήθος μετρήσεων από δοκιμαστικές αντλήσεις για ένα σημαντικό αριθμό γεωτρήσεων στην περιοχή.

Από την έρευνα αυτή (Μονόπωλης κ.ά.,1999), έγινε εκτίμηση των υδραυλικών παραμέτρων των σχηματισμών (k, T) κάθε γεώτρησης και εξετάστηκε η κατανομή της περατότητας του πετρώματος σε συνάρτηση με το βάθος.

Για τον υπολογισμό των υδραυλικών παραμέτρων των σχηματισμών χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος "Επαναφοράς" της στάθμης άντλησης. Στον Πίνακα 2 δίνονται τα αποτελέσματα της έρευνας.

Συγκεκριμένα στο πεδίο Κρουσώνα - Λουτρακίου οι τιμές μεταβιβαστικότητας T ( $\text{m}^2/\text{sec}$ ) κυμάνθηκαν από  $10^{-1} \text{ m}^2/\text{sec}$  έως  $10^{-5} \text{ m}^2/\text{sec}$  και οι τιμές περατότητας k ( $\text{m}/\text{sec}$ ) κυμάνθηκαν από  $10^{-3} \text{ m}/\text{sec}$  έως  $10^{-7} \text{ m}/\text{sec}$ .

Για τον ασβεστολιθικό σχηματισμό της ζώνης Τρίπολης στην περιοχή της στοάς λαμβάνεται μέση τιμή περατότητας  $2,5 \times 10^{-5} \text{ m}/\text{sec}$  των πλησιέστερων υδρογεωτρήσεων στη στοά από το πεδίο του Κρουσώνα (KP3, KP6 και KP7). Η εν λόγω τιμή θεωρείται αντιπροσωπευτική για το σχηματισμό αυτό δεδομένου ότι αποτελεί το μέσο όρο των τιμών k που προέκυψαν από επί τόπου δοκιμές υδροπερατότητας σε γεωτρήσεις πλησίον της περιοχής της στοάς (βλ. Πίνακα 2).

Πίνακας 2 Τιμές μεταβιβαστικότητας T και περατότητας k που προέκυψαν από την επεξεργασία των δεδομένων των δοκιμαστικών αντλήσεων στις γεωτρήσεις (Μονόπωλης κ.ά., 1999).

Γεωτρήσεις		Μεταβιβαστικότητα, T (m <sup>2</sup> /sec) <sup>(1)</sup>			Περατότητα, k (m/sec) <sup>(1)</sup>		
A/A	Κωδικός	Μέθοδος Επαναφοράς	Μέθοδος Cooper-Jacob	Μέθοδος Ισορροπίας	Μέθοδος Επαναφοράς	Μέθοδος Cooper-Jacob	Μέθοδος Ισορροπίας
Πεδίο Κρουσώνα - Λουτρακίου							
24	KP1	5.3 * 10 <sup>-5</sup>	-	-	3.1 * 10 <sup>-7</sup>	-	-
25	KP2	5.0 * 10 <sup>-3</sup>	-	-	4.2 * 10 <sup>-5</sup>	-	-
26	KP2A	1.6 * 10 <sup>-2</sup>	-	-	1.3 * 10 <sup>-4</sup>	-	-
27	KP3	8.2 * 10 <sup>-3</sup>	-	-	7.4 * 10 <sup>-5</sup>	-	-
28	KP4 <sup>(2)</sup>	1.2 * 10 <sup>-4</sup>	-	-	1.7 * 10 <sup>-6</sup>	-	-
29	KP5 <sup>(2)</sup>	3.4 * 10 <sup>-4</sup>	-	-	3.2 * 10 <sup>-6</sup>	-	-
30	KP6	7.0 * 10 <sup>-4</sup>	-	-	4.8 * 10 <sup>-6</sup>	-	-
31	KP7	1.4 * 10 <sup>-3</sup>	-	-	7.0 * 10 <sup>-6</sup>	-	-
32	KP8	2.0 * 10 <sup>-2</sup>	-	-	3.8 * 10 <sup>-4</sup>	-	-
33	KP9	2.5 * 10 <sup>-1</sup>	-	-	2.0 * 10 <sup>-3</sup>	-	-
34	KP12	3.9 * 10 <sup>-4</sup>	-	-	3.0 * 10 <sup>-6</sup>	-	-
35	KP13	1.8 * 10 <sup>-2</sup>	-	-	1.3 * 10 <sup>-4</sup>	-	-
36	KP16 <sup>(3)</sup>	4.0 * 10 <sup>-4</sup>	-	-	3.7 * 10 <sup>-6</sup>	-	-

(1) = Μέσες αριθμητικές τιμές των εναλλακτικών λύσεων ανά μέθοδο.

(2) = Νεογενές (Μαργαϊκός ασβεστόλιθος - Κροκαλοπαγή).

(3) = Φλύσχης "Τρίπολης".

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 Προσομοίωση της Υδρομαστευτικής Στοάς. Εκτίμηση της απόδοσης

Τα τελευταία χρόνια η προσομοίωση της υπόγειας ροής με υπολογιστικά μοντέλα έχει ευρεία χρήση στην αξιολόγηση εναλλακτικών προσεγγίσεων για την ανάπτυξη και τη διαχείριση των υπόγειων υδάτων. Η προσομοίωση της υπόγειας ροής μπορεί να πραγματοποιηθεί σε δισδιάστατο ή τρισδιάστατο μοντέλο. Η επιλογή του τύπου του μοντέλου υπαγορεύεται από το πρόβλημα που επιλύεται και τα διαθέσιμα πρωτογενή δεδομένα.

Το εμπόδιο για την κατασκευή τρισδιάστατων μοντέλων ροής υπόγειων υδάτων είναι συνήθως η έλλειψη επαρκών δεδομένων. Για τη συλλογή των απαραίτητων δεδομένων και την κατασκευή τρισδιάστατων υδρογεωλογικών μοντέλων, απαιτούνται γεωλογικές, υδρογεωλογικές και γεωφυσικές έρευνες (Zhou et al, 2011).

Σύμφωνα με τους Viaroli et al (2019), τα σύνθετα υδρογεωλογικά συστήματα απαιτούν πολύ καλή γνώση των υδρογεωλογικών συνθηκών και του υδροφόρου ορίζοντα για να διασφαλιστεί η βιώσιμη διαχείριση των υδάτινων πόρων. Για την προσομοίωση της υπόγειας ροής σε τρισδιάστατο μοντέλο, σε περιπτώσεις όπου οι παράμετροι του υδροφορέα δεν είναι πλήρως γνωστές, οι ερευνητές διατυπώνουν την άποψη ότι μπορεί να προηγηθεί μια δισδιάστατη προσομοίωση.

Η μελέτη περίπτωσης των Viaroli et al (2019), αφορά την προσομοίωση του υδροφορέα Riardo Plain, στη Νότια Ιταλία. Συγκεκριμένα στην άνω περιοχή υπάρχει ένας ανώτερος υδροφορέας εντός πυροκλαστικών αποθέσεων και ένας βαθύτερος εντός ανθρακικών σχηματισμών, οι οποίοι διαχωρίζονται από μη συνεχή αργιλικά στρώματα.

Ένα τρισδιάστατο αριθμητικό μοντέλο, ανάλογα με την κλίμακα του μοντέλου, τη γεωμετρία του υδροφορέα και την αξιοπιστία των εφαρμοζόμενων οριακών συνθηκών μπορεί να παρουσιάζει αβεβαιότητα (Bredehoeft 2005; Hill and Tiedeman 2007; Renz et al. 2009; Sepúlveda and Doherty 2015; Giacometti et al. 2016; Andrés et al. 2017; Lancia et al. 2018). Ορισμένοι ερευνητές (Sena and Molinero 2009; Pola et al. 2015; Lancia et al. 2018) χρησιμοποιούν δισδιάστατα μοντέλα για τις προσομοιώσεις, επειδή μειώνουν την ποσότητα των πληροφοριών που απαιτούνται για την προσομοίωση, καθώς η απουσία της τρίτης διάστασης περιορίζει τον αριθμό των ρυθμιζόμενων παραμέτρων (Viaroli et al, 2019).

Στην έρευνα των Viaroli et al, (2019), εφαρμόστηκε μια απλοποιημένη προσέγγιση σε ένα δισδιάστατο μοντέλο. Τα αποτελέσματα από την προκαταρκτική αυτή αξιολόγηση σε



δύο διαστάσεις, δίνουν χρήσιμες πληροφορίες για την κατασκευή του τρισδιάστατου μοντέλου σε επόμενο στάδιο.

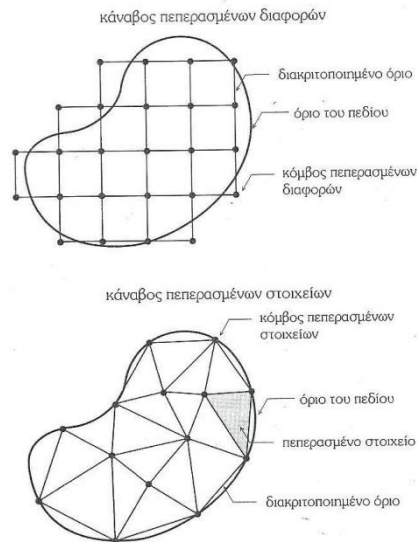
Τη διερεύνηση της ροής των υπόγειων υδάτων σε πηγάδια άντλησης, καταναμεμένα σε ίσες αποστάσεις, επιχείρησαν με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων σε δισδιάστατα και τρισδιάστατα μοντέλα οι Urbanski et al (2018). Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα από τα μοντέλα, οι ερευνητές αναφέρουν ότι ο υπολογιστικός χρόνος που απαιτείται για την ανάλυση σε δύο διαστάσεις είναι σημαντικά μικρότερος και διατυπώνουν την άποψη ότι οδηγεί σε μικρές διακυμάνσεις των τιμών, της τάξεως του 5%, στην εκτίμηση της εισροής νερού στα φρεάτια.

Το πρόβλημα της απόκλισης των τιμών μεταξύ των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τις δισδιάστατες και τρισδιάστατες προσομοιώσεις (υπόγειας ροής κ.α.) απασχολεί την επιστημονική κοινότητα τα τελευταία χρόνια. Οι τρισδιάστατες προσομοιώσεις θεωρούνται πιο ρεαλιστικές από τις δισδιάστατες επειδή δίνουν τη δυνατότητα να εισαχθούν οριακές συνθήκες και στην τρίτη διάσταση. Ωστόσο οι διαφορές που παρατηρούνται μεταξύ της προσομοίωσης σε δισδιάστατο και τρισδιάστατο μοντέλο μπορεί να οφείλονται επίσης και σε διαφορές στη διακριτοποίηση, σε διαφορετικές οριακές συνθήκες στα όρια του μοντέλου (η τρισδιάστατη μοντελοποίηση επιτρέπει πιο ρεαλιστικές οριακές συνθήκες) ή στο γεγονός ότι στη δισδιάστατη μοντελοποίηση οι ασυμμετρίες δεν αποτυπώνονται επιτυχώς. Όταν συγκρίνονται τα αποτελέσματα 2D και 3D μοντέλων θα πρέπει η διακριτοποίηση (meshing) να έχει βελτιωθεί σε τέτοιο βαθμό που τα αποτελέσματά να μην εξαρτώνται από την ποιότητά της.

Τα αποτελέσματα από τις επιλύσεις των δισδιάστατων και τρισδιάστατων μοντέλων του ίδιου προβλήματος παρουσιάζουν διαφοροποιήσεις μεταξύ τους. Όμως η βιβλιογραφία δείχνει ότι τα μοντέλα (2D – 3D) μπορούν να λειτουργήσουν συνδυαστικά στην επίλυση ενός κοινού προβλήματος υπόγειας ροής. Καθώς τα στοιχεία που προκύπτουν από την προκαταρκτική έρευνα σε δύο διαστάσεις, είναι χρήσιμα στην κατασκευή των ρεαλιστικών τρισδιάστατων μοντέλων.

Η υπόγεια ροή μπορεί να αναλυθεί αριθμητικά από τη Μέθοδο Πεπερασμένων διαφορών (FDM) και με τη Μέθοδο Πεπερασμένων στοιχείων (FEM) (Τσακίρης, 1995 ), (Εικόνα 16).

Οι μέθοδοι πεπερασμένων διαφορών και πεπερασμένων στοιχείων είναι οι πιο διαδεδομένες και ευρέως χρησιμοποιούμενες μέθοδοι για την επίλυση προβλημάτων ροής υπόγειων υδάτων, όμως η επιλογή της μεθόδου καθορίζεται από τη φύση του προβλήματος.



Εικόνα 16 Μορφές διακριτοποίησης πεδίων ροής για τη μέθοδο πεπερασμένων διαφορών (α), πεπερασμένων στοιχείων (β) (Τσακίρης, 1995).

Με τη χρήση των μοντέλων μπορούν να προβλεφθούν οι επιδόσεις των υδροφόρων συστημάτων κάτω από μεταβαλλόμενες συνθήκες (Καλλέργης, 2001).

#### A. Μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών (finite difference method - FDM)

Η μέθοδος έχει εφαρμογή σε συνθήκες μόνιμης και μη μόνιμης ροής (Καλλέργης, 2001).

Η διακριτοποίηση του χώρου μελέτης γίνεται σε πλέγμα ορθογωνικής μορφής (Σχήμα 16.α). Η επίλυση των εξισώσεων γίνεται είτε επάνω στους κόμβους του πλέγματος που μπορεί να είναι στο κέντρο κάθε κελιού «κεντροβαρική» (block centered grid) είτε στις κορυφές «διάταξη κορυφής» (mesh centered grid). Η επιλογή ανάμεσα στις δύο διατάξεις γίνεται ανάλογα με τις συνοριακές συνθήκες (Καλλέργης, 2001).

Όταν είναι γνωστή η παροχή εγκάρσια προς το σύνορο είναι πιο πρακτική η χρήση της «κεντροβαρικής» διάταξης των κόμβων, ενώ όταν είναι γνωστό το φορτίο στο σύνορο επιλέγεται η διάταξη «κορυφής». Υπάρχουν και περιπτώσεις στις οποίες οι συνοριακές συνθήκες είναι μικτές (Καλλέργης, 2001).

Κατά τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών λαμβάνεται σαν προσέγγιση μιας παραγώγου το πηλίκο της διαφοράς της τιμής της συνάρτησης ανάμεσα σε δύο γειτονικά μεταξύ τους σημεία, προς την απόσταση των σημείων αυτών (Καλλέργης, 2001).

Είναι μια ακριβής και εύχρηστη, από υπολογιστική άποψη, αριθμητική μέθοδο. Με τη χρήση της μεθόδου πεπερασμένων διαφορών για την επίλυση των προβλημάτων υπόγειας ροής, μπορούν να προσδιοριστούν διάφορες παράμετροι όπως η ταχύτητα της υπόγειας

ροής (Singh, 2008). Σε 3D αναλύσεις υπόγειας ροής, η χρήση εξισώσεων πεπερασμένων διαφορών απαιτεί λιγότερο υπολογιστικό χρόνο από τη μέθοδο 3D πεπερασμένων στοιχείων (Acosta, 2016). Από την άλλη πλευρά, αντίβαρο αποτελεί η ανεπαρκής αναπαράσταση της γεωμετρίας λόγω της αυστηρής χρήσης των ορθογωνικών πλεγμάτων (Rozos et.al., 2005)

Λογισμικά όπως το MODFLOW που βασίζονται στη μέθοδο πεπερασμένων διαφορών είναι ευρέως διαδεδομένα σε επίλυση προβλημάτων υπόγειας ροής.

## **B. Μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (finite elements method - FEM)**

Στην συγκεκριμένη μέθοδο, το πεδίο εφαρμογής (χωρίο) αντιμετωπίζεται σαν σύνολο υπο - περιοχών (πεπερασμένα στοιχεία). Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων απαιτεί την κατάτμηση του χωρίου σε μικρότερα κομμάτια, (πεπερασμένα στοιχεία) και τη χρήση μεθόδων μεταβολών μέσω του λογισμού των μεταβολών με στόχο την επίλυση του προβλήματος. Θα πρέπει να υπολογίζουμε με την ύπαρξη σφάλματος στη μέθοδο και υπάρχουν διάφορες μέθοδοι με τις οποίες μπορεί να περιορισθεί (Σταυρουλάκης κ.α., 2015).

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων στηρίζεται στην ίδια βασική ιδέα με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών, διαφέρει όμως από αυτήν καθώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί δίκτυο βρόγχων οποιασδήποτε μορφής και το φορτίο σε κάθε βρόγχο θεωρείται συνάρτηση των συντεταγμένων (Σούλιος, 1986).

Η κατάτμηση σε απλούστερα τμήματα έχει πολλά πλεονεκτήματα. Με τον τρόπο αυτό μπορούν να περιγραφούν σύνθετες γεωμετρικές μορφές, να ληφθούν υπόψη διαφορετικές ιδιότητες υλικού ή με τη χρήση μικρότερων στοιχείων σε ορισμένες περιοχές, να δοθεί βάρος στη λεπτομερέστερη περιγραφή τους και τον υπολογισμό τοπικών φαινομένων (Σταυρουλάκης κ.α., 2015).

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων που την καθιστούν αποτελεσματική, συνοπτικά, είναι ότι α) τα ακανόνιστα γεωμετρικά όρια των πεδίων και οι οριακές συνθήκες αναπαριστώνται με φυσικό τρόπο, επομένως μπορεί να εφαρμοστεί σε περίπλοκες γεωμετρίες, β) μπορεί να προσομοιωθεί με ακρίβεια η ετερογένεια και η ανισοτροπία των πεδίων ροής και γ) είναι εύκολη η τοπική πύκνωση των σημείων του κανάβου σε συγκεκριμένες περιοχές όπου υπάρχουν ή αναμένονται έντονες μεταβολές του φορτίου (Τσακίρης, 1995).

Η ευελιξία που παρουσιάζει η μέθοδος αυτή, αναφορικά με την επιλογή της μορφής των βρόγχων, αντισταθμίζεται από τη μεγαλύτερη δυσκολία με την οποία γίνεται η εισαγωγή

των δεδομένων και τον μεγαλύτερο χρόνο που απαιτούν οι υπολογισμοί (Καλλέργης, 2001).

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι το μεγαλύτερο μειονέκτημα των πεπερασμένων διαφορών είναι η δυσκολία με την οποία εφαρμόζονται οι οριακές συνθήκες, ιδίως όταν τα όρια του προβλήματος έχουν περίπλοκη γεωμετρία (Σούλης, 2015).

Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών απαιτεί έναν σχετικά ορθοκανονικό κάρναβο. Αυτός ο περιορισμός δεν υπάρχει στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων (Χατζηγώγος, Καραουλάνης, 2015).

Τα πεπερασμένα στοιχεία ήρθαν για να καλύψουν το κενό των πεπερασμένων διαφορών στις περιπτώσεις περίπλοκης γεωμετρίας. Επειδή τα περισσότερα προβλήματα Μηχανικής απαιτούν τρισδιάστατη ανάλυση με πολύπλοκη γεωμετρία, η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων είχε μεγάλη ανάπτυξη (Σούλης, 2015).

Στη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών υπολογίζεται μία τιμή του υδραυλικού φορτίου επάνω στους κόμβους του πλέγματος και αντιπροσωπεύει τη μέση τιμή για το αντίστοιχο κελί. Αντίθετα στα πεπερασμένα στοιχεία το υδραυλικό φορτίο σε κάθε βρόχο θεωρείται συνάρτηση των συντεταγμένων (Σούλιος, 1986, Καλλέργης, 2001).

Σε περιπτώσεις προσομοίωσης υπόγειας ροής οι πεπερασμένες διάφορες θεωρείται ότι προσομοιώνουν καλύτερα το πρόβλημα, είναι όμως αρκετά πιο πολύπλοκες.

### **Προσομοίωση υπόγειας ροής στην περιοχή έρευνας**

Στο παρόν κεφάλαιο έγινε διερεύνηση της απόδοσης υδρομαστευτικής στοάς που προτείνεται να κατασκευαστεί στις ανατολικές παρειές του Ψηλορείτη, στην περιοχή του Κρουσώνα, με υπολογιστικές μεθόδους.

Λαμβάνοντας υπόψη τα πιο πρόσφατα στοιχεία, από την Δ.Ε.Υ.Α.Η., για την πιεζομετρία της περιοχής, αλλά και δεδομένα της πιεζομετρίας της ευρύτερης περιοχής από προηγούμενες έρευνες (Μονόπωλης κ.ά., 1998, Μονόπωλης κ.ά., 1999), η εκμετάλλευση του υδροφορέα θα μπορούσε να γίνει με μια υπό-οριζόντια υδρομαστευτική στοά, η οποία θα έχει κλίση (6-8°), καταδύομενη προς το Βορρά, ώστε να προσφέρει νερό μέσω βαρύτητας. Ο άξονας της στοάς τοποθετείται παράλληλα στη ροή ώστε να επιτυγχάνεται η βέλτιστη απόδοση.

Η προσομοίωση της υπόγειας ροής στην προτεινόμενη περιοχή πραγματοποιείται με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων. Η επίλυση του συγκεκριμένου δισδιάστατου μοντέλου

πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του λογισμικού Phase2 της εταιρίας Rocscience, σε συνθήκες σταθερής ροής.

Οι αναλύσεις διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, αναλύσεις σε συνθήκες σταθερής ροής όπου η κατακόρυφη περατότητα ( $k_x$ ,  $k_y$ ) είναι ίση με την οριζόντια ( $k_z$ ), όπου δηλαδή  $k_x = k_y = k_z$  και αναλύσεις όπου παρουσιάζεται ανισοτροπία όσον αφορά την περατότητα στον κατακόρυφο άξονα, όπου δηλαδή  $k_x = k_y > k_z$ . Οι υπολογισμοί όπου θεωρείται  $k_x=k_y=k_z$  πραγματοποιούνται για συγκριτικούς λόγους. Με τον συμβολισμό  $k_x$ ,  $k_y$ ,  $k_z$  αποδίδονται οι τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας στους άξονες  $x$ ,  $y$ ,  $z$ . Αναλυτικότερα οι παραδοχές των υπολογισμών δίνονται στην παράγραφο §6.1.

Το Phase2 έχει εφαρμογή σε ένα ευρύ φάσμα έργων (σχεδιασμός εκσκαφών, ευστάθεια πρανών, κίνηση υπογείων υδάτων, στερεοποίηση και δυνατότητα δυναμικών αναλύσεων) επιτρέποντας στο χρήστη να τρέξει σύνθετα μοντέλα πολλαπλών σταδίων και να υπολογίσει παραμέτρους όπως ο ρυθμός ροής και η υδραυλική κλίση. Δίνει επίσης τη δυνατότητα αναλύσεων σταθερής και μη σταθερής ροής υπογείων υδάτων και σε κορεσμένα ή ακόρεστα μέσα.

Η ανάλυση της διήθησης υπογείων υδάτων στο Phase2 μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως αυτόνομο πρόγραμμα, αποκλειστικά για την μοντελοποίηση της ροής των υπογείων υδάτων, χωρίς παράλληλες αναλύσεις τάσεων - παραμορφώσεων ([www.rocscience.com](http://www.rocscience.com)).

Εφόσον γίνει η εισαγωγή της γεωμετρίας της εξεταζόμενης διατομής στο πρόγραμμα, υπάρχει η δυνατότητα επιλογής οριακών συνθηκών.

### **Θεωρητικό υπόβαθρο**

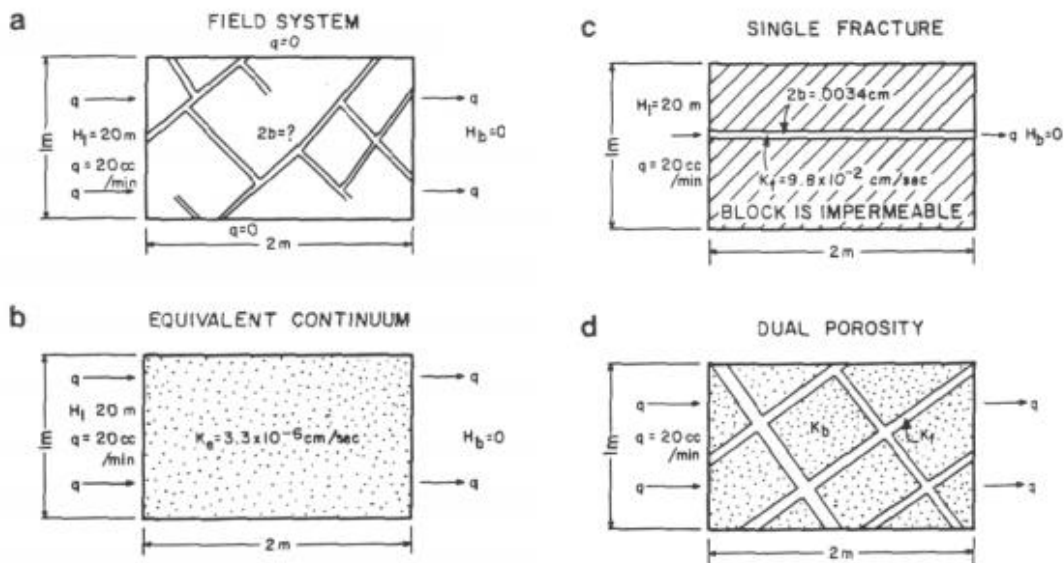
Τα πορώδη μέσα, παρουσιάζουν συνεχή ροή και τα κενά των πόρων είναι συνδεδεμένα μεταξύ τους (ιδανική κατάσταση).

Υπάρχει όμως και η κατηγορία των κατακερματισμένων ανθρακικών πετρωμάτων (ασβεστόλιθοι, δολομίτες), που πολύ συχνά φιλοξενούν αξιόλογες υδροφορίες. Λόγω της φύσης του συστήματος αυτού απαιτείται είτε απλοποίηση, είτε λεπτομερή περιγραφή των ιδιοτήτων του υδροφορέα που ελέγχουν τη ροή (Κλειδοπούλου, 2003).

Οι σχηματισμοί αυτοί έχουν πρωτογενές πορώδες, το οποίο θεωρείται επουσιώδες συγκριτικά με το δευτερογενές πορώδες τους, που αναπτύσσεται επί των ρωγμών και των ζωνών διάτμησης και διευρύνεται με τις διαδικασίες της διαλυτοποίησης εξαιτίας της κυκλοφορίας του νερού (καρστικοποίηση). Στην περίπτωση όμως ανάπτυξης του καρστ, είναι δυνατόν να δημιουργηθούν μέσα στους σχηματισμούς κανάλια ροής (Κλειδοπούλου, 2003). Ο υπό μελέτη υδροφορέας ανήκει στην κατηγορία των καρστικών υδροφορέων.

Στα μοντέλα ροής κατακερματισμένων πετρωμάτων (Σχήμα 26a) θεωρείται ότι ο Νόμος του Darcy εφαρμόζεται γιατί τόσο η διάνοιξη των ρωγματώσεων, όσο και οι ταχύτητες ροής είναι μικρές. Τα κατακερματισμένα συστήματα προσομοιώνονται χρησιμοποιώντας ένα ή περισσότερα από τα ακόλουθα θεωρητικά μοντέλα (Σχήμα 26 b,c,d) (Κλειδοπούλου, 2003):

- ισοδύναμο πορώδες μέσο (Equivalent Porous Medium, EPM),
- διακριτοποιημένες ρωγματώσεις (Discrete Fractures, DF)
- διπλό πορώδες (Dual Porosity, DP)



Σχήμα 26 Θεωρητικά μοντέλα κατακερματισμένων πετρωμάτων (a. Πραγματικός υδροφορέας, b. Ισοδύναμο πορώδες μέσο (EPM), c. διακριτοποιημένες ρωγματώσεις (DF), d. διπλό πορώδες (DP)) (Κλειδοπούλου, 2003 με πηγή: Gale, 1982).

Η προσομοίωση της υπόγειας ροής σε καρστικούς σχηματισμούς είναι ένα δύσκολο εγχείρημα, εξαιτίας της δυσκολίας καθορισμού των υδρογεωλογικών ιδιοτήτων του καρστικού σχηματισμού και της γεωμετρίας των αγωγών του.

Για την προσομοίωση της υπόγειας ροής σε καρστικό σχηματισμό, υπάρχουν τρεις περιπτώσεις προσέγγισης.

Συγκεκριμένα ο Thrailkill (1974, 1989) και οι Yusun and Ji (1988) περιέγραψαν την εφαρμογή της μεθόδου με διακριτοποιημένες ρωγματώσεις (Discrete Fractures) για την προσομοίωση ροής σε καρστικούς σχηματισμούς που έχουν κανάλια διαφόρων μεγεθών (pipes και conduits).

Στη δεύτερη περίπτωση η ροή σε ώριμο καρστ προσεγγίζεται με τη μέθοδο "black box" κατά την οποία δημιουργούνται συναρτήσεις με σκοπό να αναπαράγουν τις εισαγωγές / επανατροφοδότηση (recharge) - και εξαγωγές / ροή πηγής (spring flow) - στο μοντέλο.



Στην τελευταία περίπτωση χρησιμοποιούνται τα χαρακτηριστικά του υδροφορέα προκειμένου να αναπτυχθούν οι παράμετροι του ισοδύναμου πορώδους μέσου (EPM).

Στην πραγματικότητα, στους καρστικούς σχηματισμούς η κίνηση του νερού πραγματοποιείται κυρίως μέσω καρστικών αγωγών. Για να προσομοιωθεί η τυρβώδης κίνηση του νερού σε καρστικούς σχηματισμούς απαιτείται η δημιουργία ενός σύνθετου μοντέλου, που απαιτεί τη γνώση της μορφολογίας των καρστικών αυτών αγωγών.

Ο Νόμος του Darcy ισχύει, σε καρστικούς υδροφόρους σχηματισμούς όπως ο εξεταζόμενος, μόνο υπό προϋποθέσεις. Αυτό μπορεί να γίνει θεωρώντας τους καρστικούς σχηματισμούς σαν ιδεατό πορώδες μέσο. Η θεώρηση αυτή εξαρτάται από την κλίμακα στην οποία γίνεται η προσομοίωση του μοντέλου. Στην προσομοίωση πεδίων ροής σε αρκετά μεγάλη κλίμακα, ο υδροφορέας μπορεί να θεωρηθεί ως πορώδες μέσο.

Στην παρούσα εργασία η προσέγγιση EPM (ισοδύναμου πορώδους μέσου) προβλήματος κρίνεται αξιόπιστη. δεδομένης της μεγάλης αποκάρσωσης του σχηματισμού στην συγκεκριμένη περιοχή.

### 6.1. Παραδοχές και θεωρήσεις υπολογισμών για την προσομοίωση της υπόγεια ροής προς την υδρομαστευτική στοά.

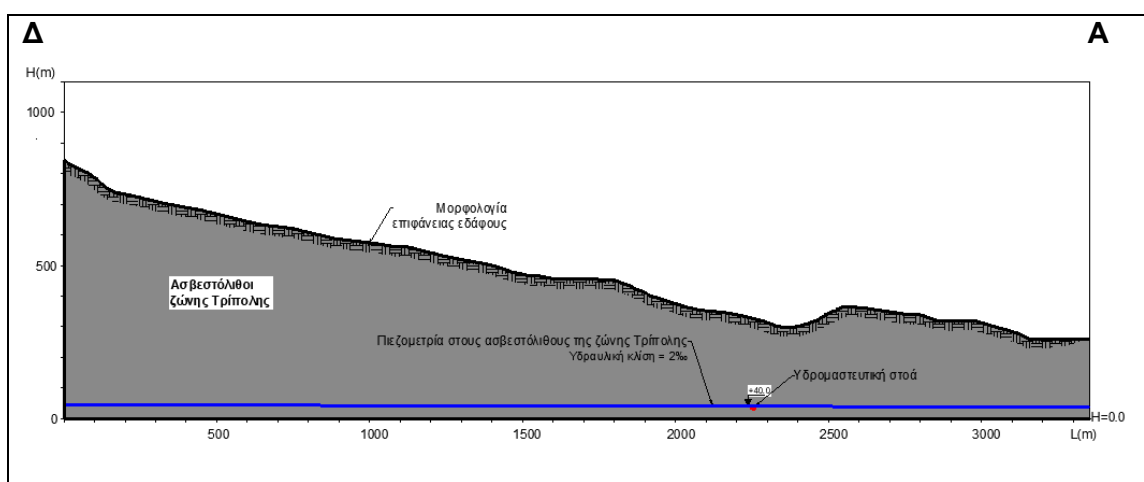
Ο άξονας της στοάς, με προσανατολισμό από Νότο προς Βορρά, τοποθετείται παράλληλα στη ροή ώστε να επιτυγχάνεται η μέγιστη απόδοση. Η στοά είναι υπό-οριζόντια με κλίση ( $6-8^\circ$ ), καταδυόμενη προς το Βορρά.

Η θέση κατασκευής της υδρομαστευτικής στοάς, συναξιολογώντας υδρογεωλογικά στοιχεία και γεωλογικά δεδομένα, ορίζεται παράλληλα με τη ρηξιγενή ζώνη του ρήγματος Τυλίσου - Κρουσώνα, προκειμένου να αποφευχθεί διασταύρωση με το ρήγμα.

Σύμφωνα με τη Δ.Ε.Υ.Α.Η. η υπόγεια στάθμη στην ευρύτερη περιοχή μελέτης παρουσιάζει εποχικές διαφοροποιήσεις. Για την προσομοίωση της υπόγεια ροής, λαμβάνεται υπόψη η υπερετήσια μέση στάθμη και υδραυλική κλίση του υδροφορέα.

Από τα δεδομένα των μετρήσεων της στάθμης ηρεμίας στην ευρύτερη περιοχή, που μας παραχωρήθηκαν από την Δ.Ε.Υ.Α.Η. θεωρείται μέση ετήσια στάθμη στα +40 m και η στοά για να είναι λειτουργική θα πρέπει να προσεγγίσει το συγκεκριμένο επίπεδο.

Για την εκτίμηση της απόδοσης της υδρομαστευτικής στοάς θεωρείται σύμφωνα με τα διαθέσιμα στοιχεία (Μονόπωλης κ.α., 1999, Δ.Ε.Υ.Α.Η.) υπο-οριζόντια πιεζομετρία με κλίση 2‰ προς Βορρά. Οι ανθρακικοί σχηματισμοί της ζώνης Τρίπολης θεωρούνται ισότροπο μέσο σε συνθήκες σταθερής ροής (steady flow). Η ροή παραμένει γραμμική σε όλο το μήκος του υδροφόρου ορίζοντα. Στο Σχήμα 27 παρουσιάζεται η στάθμη εντός των ανθρακικών σχηματισμών της ζώνης Τρίπολης.



Σχήμα 27 Διατομή εγκάρσια στην υδρομαστευτική στοά (AA') με προσανατολισμό A-Δ, η οποία εισάγεται στο πρόγραμμα Phase2.

Για την προσομοίωση υπόγειας ροής, στην προτεινόμενη περιοχή κατασκευής της στοάς και την εκτίμηση της απόδοσης της επιλέγεται να χρησιμοποιηθεί μαθηματικό μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων, που προσομοιώνει το πρόβλημα σε δύο διαστάσεις.

Η μέθοδος πεπερασμένων διαφορών (προσομοίωση π.χ. με το λογισμικό MODFLOW) θεωρείται πιο αξιόπιστη για προσομοίωση υπόγειας ροής, όμως παρουσιάζει ένα βαθμό πολυπλοκότητας και απαιτεί επιπλέον δεδομένα τα οποία δεν είναι διαθέσιμα για την περιοχή μελέτης. Για τον παραπάνω λόγο καθώς επίσης και για το γεγονός ότι επιχειρείται μία πρώτη προσέγγιση της απόδοσης της στοάς, σε δύο διαστάσεις, επιλέγεται η προσομοίωση να πραγματοποιηθεί με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων.

Στους υπολογισμούς θεωρείται μια μέση τιμή υδροπερατότητας  $k=2,5 \times 10^{-5} \text{ m/sec}$  των ανθρακικών σχηματισμών της ζώνης Τρίπολης (Μονόπωλης κ.ά., 1999) με βάση τα δεδομένα των δοκιμαστικών αντλήσεων στις γεωτρήσεις της περιοχής.

Στο δισδιάστατο μοντέλο θεωρήθηκαν τριγωνικά πεπερασμένα στοιχεία με τρεις κόμβους (3 Noded Triangles). Στην περιοχή της στοάς για να αυξηθεί η ακρίβεια των υπολογισμών, έγινε πύκνωση του δικτυώματος.

Επιλύθηκαν δύο σχεδιασμοί (σενάρια), όπως αυτοί αναλύονται παρακάτω:

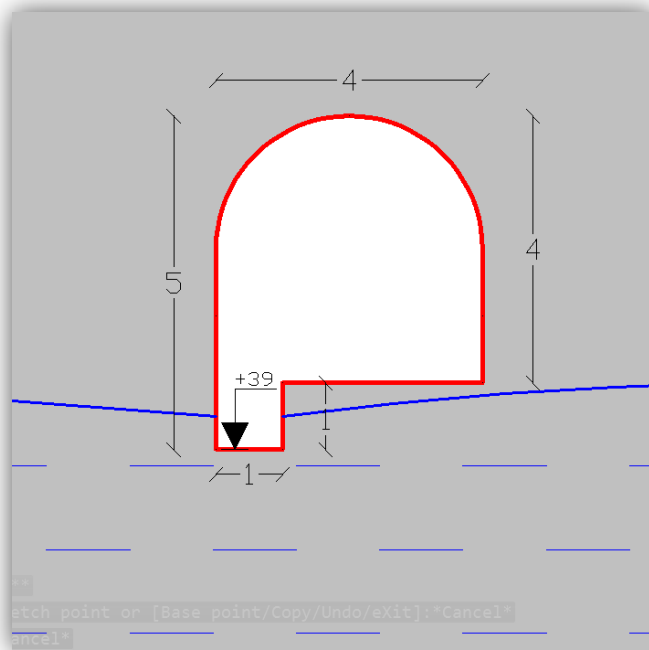
### **Σχεδιασμός Α**

Σε αυτόν τον σχεδιασμό θεωρείται υπο-οριζόντια στοά με κλίση προς το βορρά ( $6-8^\circ$ ). Η στοά έχει πλάτος 4 m και ύψος 5 m. Για τη συλλογή και την μεταφορά του νερού απαιτείται η κατασκευή μίας τάφρου κατά μήκος της στοάς, ώστε το υπόγειο νερό να οδηγείται μέσω βαρύτητας, προς την έξοδο (προς το Βορρά). Η τάφρος κατασκευάζεται με διαστάσεις 1m βάθος και 1m πλάτος και ο πυθμένας της βρίσκεται 1m κάτω από την θεωρούμενη πιεζομετρία.

Για λειτουργικούς λόγους που αφορούν τη διάνοιξη της στοάς, το πλάτος και το ύψος της στοάς επιλέχθηκαν 4 m και 5 m αντίστοιχα. Η γεωμετρία της στοάς δίνεται στο Σχήμα 28.

Με βάση τα παραπάνω, η παροχή της υδρομαστευτικής στοάς στον σχεδιασμό Α εκτιμήθηκε θεωρώντας ισότροπο και ανισότροπο υδροφορέα:

- Στην πρώτη περίπτωση θεωρείται  $k_x = k_y = k_z = 2,5 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ .
- Στην δεύτερη περίπτωση θεωρείται  $k_x = k_y = 2,5 \times 10^{-5} \text{ m/s}$  και  $k_z = 2,5 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ .



Σχήμα 28 Εγκάρσια τομή της προτεινόμενης υδρομαστευτικής στοάς.

### **Σχεδιασμός Β**

Στον Σχεδιασμό Β, διερευνάται ένα εναλλακτικό σενάριο. Σχεδιάζονται μικρότερου μεγέθους στοές, εγκάρσια στην κύρια στοά, μέσα στις οποίες θα ανοίγονται πηγάδια μικρού βάθους με σκοπό την προσέγγιση της πιεζομετρίας και την εκμετάλλευση του καρστικού υδροφορέα. Τα πηγάδια θα κατασκευάζονται σε ζώνες προνομιακής διείσδυσης υπόγειου νερού και η υδροπερατότητα λαμβάνεται  $k_x = k_y = 2,5 \times 10^{-4}$  m/s,  $k_z = 2,5 \times 10^{-5}$  m/s σύμφωνα με τις μέγιστες παρατηρούμενες περατότητες στην περιοχή. Όμως, για συγκριτικούς λόγους πραγματοποιούνται αναλύσεις με την υδροπερατότητα να θεωρείται ίδια σε όλες τις διευθύνσεις ( $k_x = k_y = k_z = 2,5 \times 10^{-4}$  m/s).

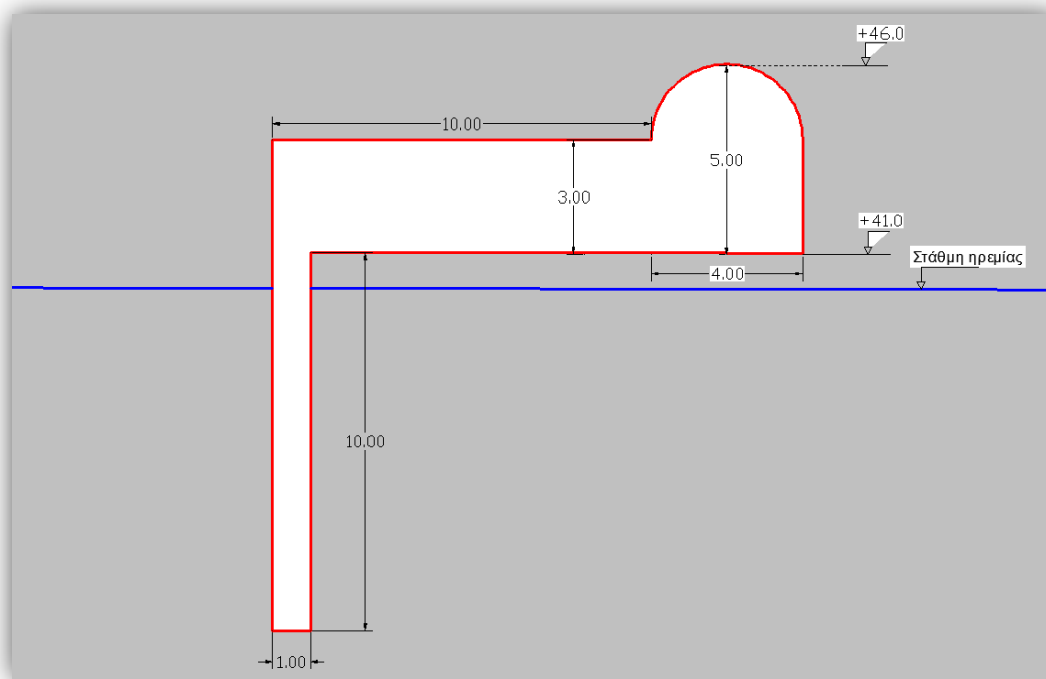
Αναλυτικότερα αναφέρεται ότι στον σχεδιασμό Β η κύρια στοά (με πλάτος 4m και ύψος 5m) θεωρείται 1m πάνω από την πιεζομετρία (σε απόλυτο υψόμετρο +41m), με μικρή κλίση προς το βορρά. Εγκάρσια σε αυτή αναπτύσσεται μικρότερη στοά με πηγάδι/α μικρού βάθους (Σχήμα 29).

Με βάση τις παραπάνω θεωρήσεις, η παροχή της υδρομαστευτικής στοάς στον σχεδιασμό Β εκτιμήθηκε θεωρώντας τις εξής περιπτώσεις:

1.  $k_x = k_y = k_z = 2,5 \times 10^{-4}$  m/s και πτώση στάθμης στο πηγάδι λόγω άντλησης 0,5m.

2.  $k_x = k_y = 2,5 \times 10^{-4}$  m/s,  $k_z = 2,5 \times 10^{-5}$  m/s και πτώση στάθμης στο πηγάδι λόγω άντλησης 0,5m.
3.  $k_x = k_y = k_z = 2,5 \times 10^{-4}$  m/s και πτώση στάθμης στο πηγάδι λόγω άντλησης 1m.
4.  $k_x = k_y = 2,5 \times 10^{-4}$  m/s,  $k_z = 2,5 \times 10^{-5}$  m/s και πτώση στάθμης στο πηγάδι λόγω άντλησης 1m.
5.  $k_x = k_y = k_z = 2,5 \times 10^{-4}$  m/s και πτώση στάθμης στο πηγάδι λόγω άντλησης 2m.
6.  $k_x = k_y = 2,5 \times 10^{-4}$  m/s,  $k_z = 2,5 \times 10^{-5}$  m/s και πτώση στάθμης στο πηγάδι λόγω άντλησης 2m.

Στον σχεδιασμό Β και στην περίπτωση διάνοιξης περισσότερων πηγαδιών, σημαντικό κριτήριο για την σωστή χωροθέτηση τους (μεταξύ τους απόσταση) είναι η εκτίμηση της ακτίνας επίδρασης τους.

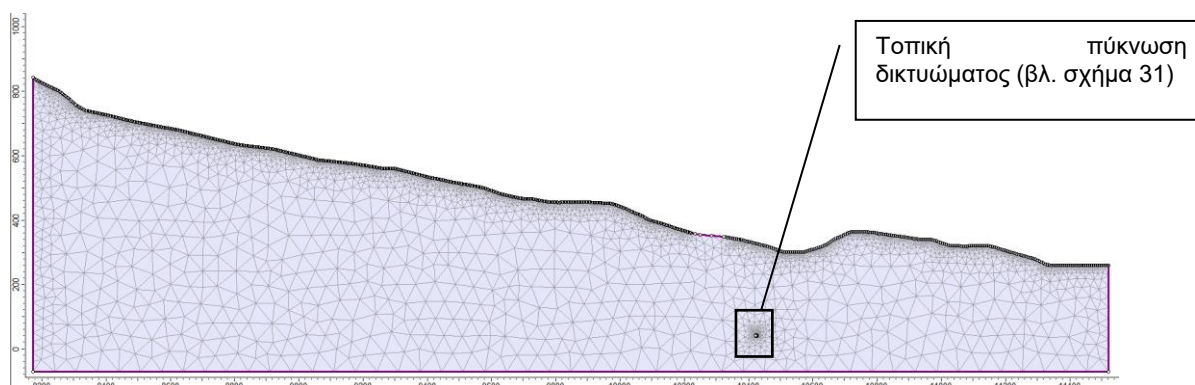


Σχήμα 29 Εγκάρσια τομή της προτεινόμενης υδρομαστευτικής στοάς και της δευτερεύουσας στοάς με ένα πηγάδι.

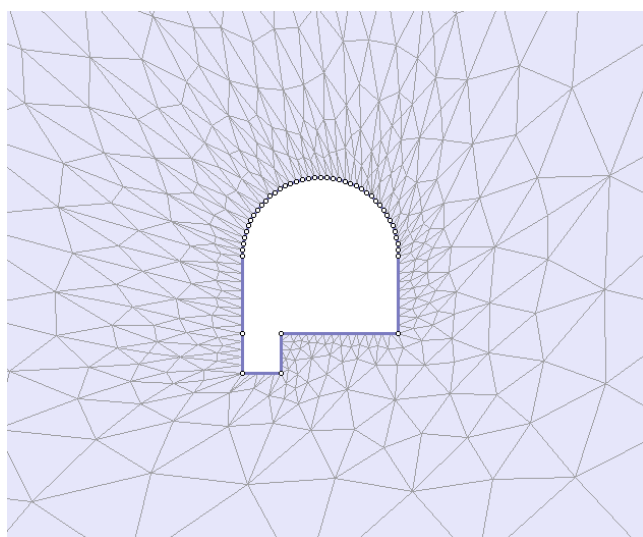
### 6.1.1. Επίλυση Σχεδιασμού Α

Η κατασκευή του μοντέλου στο πρόγραμμα Phase2 πραγματοποιείται με ορισμό της γεωμετρίας του και εισαγωγή των παραμέτρων (Σχήμα 30).

Στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε η δημιουργία του πλέγματος (meshing). Για μεγαλύτερη ακρίβεια στους υπολογισμούς, δημιουργείται τοπική πύκνωση του δικτυώματος περιμετρικά της στοάς, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 31.



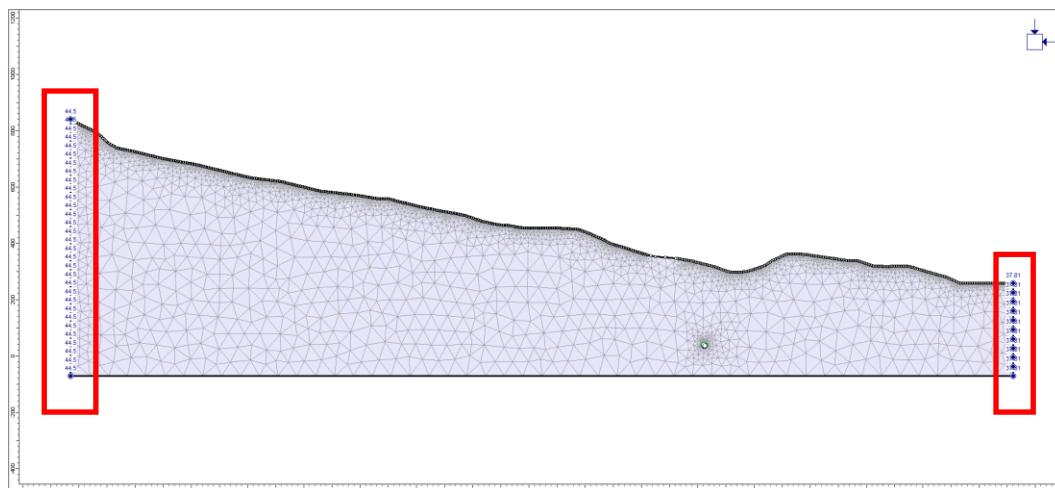
Σχήμα 30 Δημιουργία του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων (meshing). Η διεύθυνση της τομής εγκάρσια στη στοά, με διεύθυνση ΔΒΔ-ΑΝΑ (απόσπασμα από το Phase2).



Σχήμα 31 Δημιουργία του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων (meshing) με πύκνωση στην περιοχή της στοάς (απόσπασμα από το Phase2).

Ακολουθώντας εισάγονται οι οριακές συνθήκες (υδραυλικό ύψος νερού) στα όρια του μοντέλου. Συγκεκριμένα για θεωρούμενη πιεζομετρία στη θέση της στοάς στα +40m και υδραυλική κλίση 2‰ (Μονόπωλης κ.α., 1999, Δ.Ε.Υ.Α.Η.), ορίζεται στο αριστερό όριο του μοντέλου τιμή πιεζομετρικής στάθμης +44m και στο δεξιό όριο του μοντέλου τιμή πιεζομετρικής στάθμης +38m (Σχήμα 32).





Σχήμα 32 Ορισμός πιεζομετρικής στάθμης στα όρια του μοντέλου.

Τα αποτελέσματα των αναλύσεων για την πρώτη περίπτωση επίλυσης (Σχεδιασμός Α) δίνονται παρακάτω.

- **$k_x = k_y = k_z = 2,5 \times 10^{-5} \text{ m/s.}$**

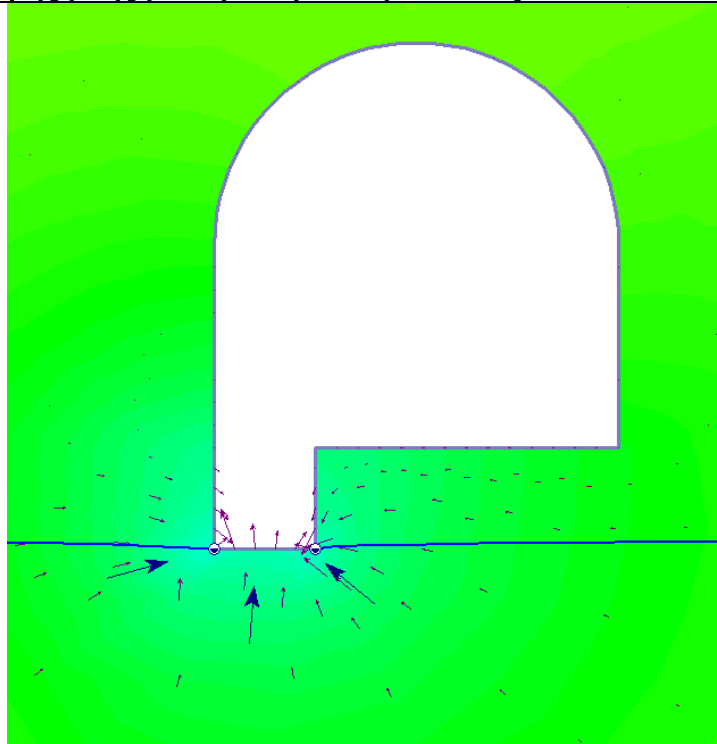
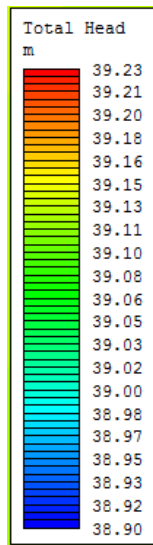
Η παροχή της στοάς σε συνθήκες σταθερής ροής με  $k_x = k_y = k_z$ , υπολογίστηκε  $Q = 0,02 \text{ m}^3/\text{s}$  ή  **$Q = 72 \text{ m}^3/\text{h}$**  ανά τρέχον μέτρο στοάς.

- **$k_x = k_y = 2,5 \times 10^{-5} \text{ m/s}$  και  $k_z = 2,5 \times 10^{-6} \text{ m/s.}$**

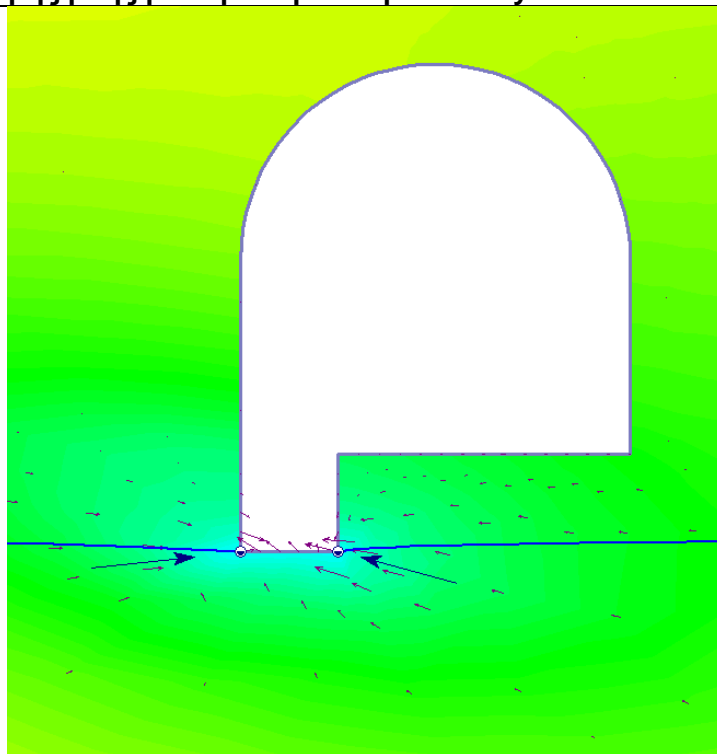
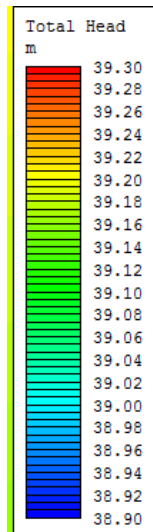
Η παροχή της στοάς σε συνθήκες σταθερής ροής με υδροπερατότητα  $k_x = k_y > k_z$  υπολογίστηκε  $Q = 0,01 \text{ m}^3/\text{s}$  ή  **$Q = 36 \text{ m}^3/\text{h}$**  ανά τρέχον μέτρο στοάς.

Οι ισοκαμπύλες ολικού υδραυλικού φορτίου που προκύπτουν από τις παραπάνω αναλύσεις δίνονται στο Σχήμα 33 και υποδηλώνουν την κίνηση του νερού προς την τάφρο της στοάς. Με τα μεγαλύτερα βέλη δίνεται έμφαση στην διεύθυνση της επικρατούσας ροής.

♦ Συνθήκες σταθερής ροής με υδροπερατότητα  $k_x = k_y = k_z$



♦ Συνθήκες σταθερής ροής με υδροπερατότητα  $k_x = k_y > k_z$

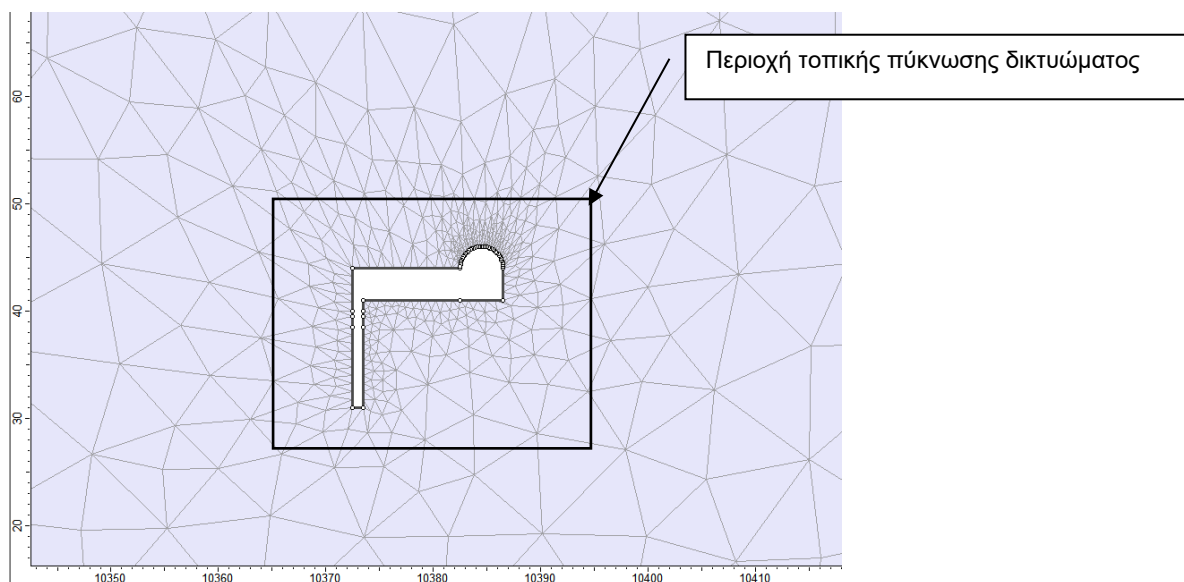


Σχήμα 33 Ισοκαμπύλες ολικού υδραυλικού φορτίου στην περιοχή της στοάς.

### 6.1.2. Επίλυση Σχεδιασμού Β

Στον σχεδιασμό Β γίνεται εκτίμηση της παροχής σε πηγάδι μικρού βάθους με άντληση που προκαλεί πτώση στάθμης 0.5m, 1m και 2m αντίστοιχα, κάτω από συνθήκες σταθερής ροής. Η υδροπερατότητα λαμβάνεται  $k_x = k_y = 2,5 \times 10^{-4}$  m/s,  $k_z = 2,5 \times 10^{-5}$  m/s σύμφωνα με τις μέγιστες παρατηρούμενες τιμές περατότητας στην περιοχή και για συγκριτικούς λόγους πραγματοποιούνται αναλύσεις με την υδροπερατότητα να θεωρείται ίδια σε όλες τις διευθύνσεις ( $k_x = k_y = k_z = 2,5 \times 10^{-4}$  m/s ).

Όπως και στον σχεδιασμό Α, για μεγαλύτερη ακρίβεια των αποτελεσμάτων δημιουργείται, τοπική πύκνωση του δικτυώματος στην περιοχή κατασκευής του πηγαδιού, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 34.



Σχήμα 34 Δημιουργία του πλέγματος των πεπερασμένων στοιχείων (meshing) με πύκνωση δικτυώματος πλησίον του πηγαδιού και των στοών (απόσπασμα από το Phase2).

Μετά τη δημιουργία του πλέγματος εισάγονται οι οριακές συνθήκες (υδραυλικό φορτίο) στα σύνορα του μοντέλου. Τα υδραυλικά όρια, προκύπτουν από τις υδρολογικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή. Συγκεκριμένα για θεωρούμενη πιεζομετρία στη θέση της στοάς στα +40m και υδραυλική κλίση 2‰ προς το βορρά (Μονόπωλης κ.α. 1999, Δ.Ε.Υ.Α.Η.), ορίζεται στο αριστερό άκρο του μοντέλου πιεζομετρική στάθμη +44m και στο δεξιό άκρο του μοντέλου πιεζομετρική στάθμη +38m.

Στις αναλύσεις γίνεται εκτίμηση της παροχής στο πηγάδι σε συνθήκες σταθερής ροής για άντληση που προκαλεί πτώση στάθμης 0,5m, 1m και 2m αντίστοιχα.

- **$k_x = k_y = k_z = 2,5 \times 10^{-4} \text{ m/s}$  και πτώση στάθμης στο πηγάδι 0,5m**

Από τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν για συνθήκες ροής με υδροπερατότητα  $k_x = k_y = k_z = 2,5 \times 10^{-4} \text{ m/s}$  και πτώση στάθμης στο πηγάδι λόγω άντλησης ίση με 0,5m, η παροχή προκύπτει  $Q = 0,1 \text{ m}^3/\text{s}$  ή  **$Q = 364 \text{ m}^3/\text{h}$**  ανά πηγάδι.

Η ακτίνα επίδρασης του πηγαδιού υπολογίζεται περίπου 1,9m.

- **$k_x = k_y = 2,5 \times 10^{-4} \text{ m/s}$  ,  $k_z = 2,5 \times 10^{-5} \text{ m/s}$  και πτώση στάθμης στο πηγάδι 0,5m**

Όταν η υδροπερατότητα στον κατακόρυφο άξονα είναι μία τάξη μικρότερη ( $k_x = k_y = 2,5 \times 10^{-4} \text{ m/s}$  και  $k_z = 2,5 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ ), η παροχή είναι  $Q = 0,03 \text{ m}^3/\text{s}$  ή  **$Q = 110 \text{ m}^3/\text{h}$**  ανά πηγάδι.

Η ακτίνα επίδρασης του πηγαδιού υπολογίζεται περίπου 1,9m.

- **$k_x = k_y = k_z = 2,5 \times 10^{-4} \text{ m/s}$  και πτώση στάθμης στο πηγάδι 1m**

Η παροχή του πηγαδιού σε συνθήκες ροής με υδροπερατότητα  $k_x = k_y = k_z = 2,5 \times 10^{-4} \text{ m/s}$  και πτώση της στάθμης στο πηγάδι, έπειτα από άντληση, ίση με 1,0m, είναι  $Q = 0,13 \text{ m}^3/\text{s}$  ή  **$Q = 470 \text{ m}^3/\text{h}$**  ανά πηγάδι.

Η ακτίνα επίδρασης του πηγαδιού υπολογίζεται περίπου 2m.

- **$k_x = k_y = 2,5 \times 10^{-4} \text{ m/s}$  ,  $k_z = 2,5 \times 10^{-5} \text{ m/s}$  και πτώση στάθμης στο πηγάδι 1m**

Αντίστοιχα σε συνθήκες ροής με υδροπερατότητα  $k_x = k_y = 2,5 \times 10^{-4} \text{ m/s}$  και  $k_z = 2,5 \times 10^{-5} \text{ m/s}$  και πτώση της στάθμης στο πηγάδι 1,0m μετά από άντληση, η παροχή είναι  $Q = 0,046 \text{ m}^3/\text{s}$  ή  **$Q = 166 \text{ m}^3/\text{h}$**  ανά πηγάδι.

Η ακτίνα επίδρασης του πηγαδιού υπολογίζεται περίπου 2m.

- **$k_x = k_y = k_z = 2,5 \times 10^{-4} \text{ m/s}$  και πτώση στάθμης στο πηγάδι 2m**

Από τις αναλύσεις προκύπτει ότι η παροχή του πηγαδιού σε συνθήκες ροής με υδροπερατότητα  $k_x = k_y = k_z = 2,5 \times 10^{-4} \text{ m/s}$  για πτώση της στάθμης στο πηγάδι 2,0m έπειτα από άντληση, είναι  $Q = 0,22 \text{ m}^3/\text{s}$  ή  **$Q = 803 \text{ m}^3/\text{h}$**  ανά πηγάδι.

Η ακτίνα επίδρασης του πηγαδιού υπολογίζεται περίπου 4m.

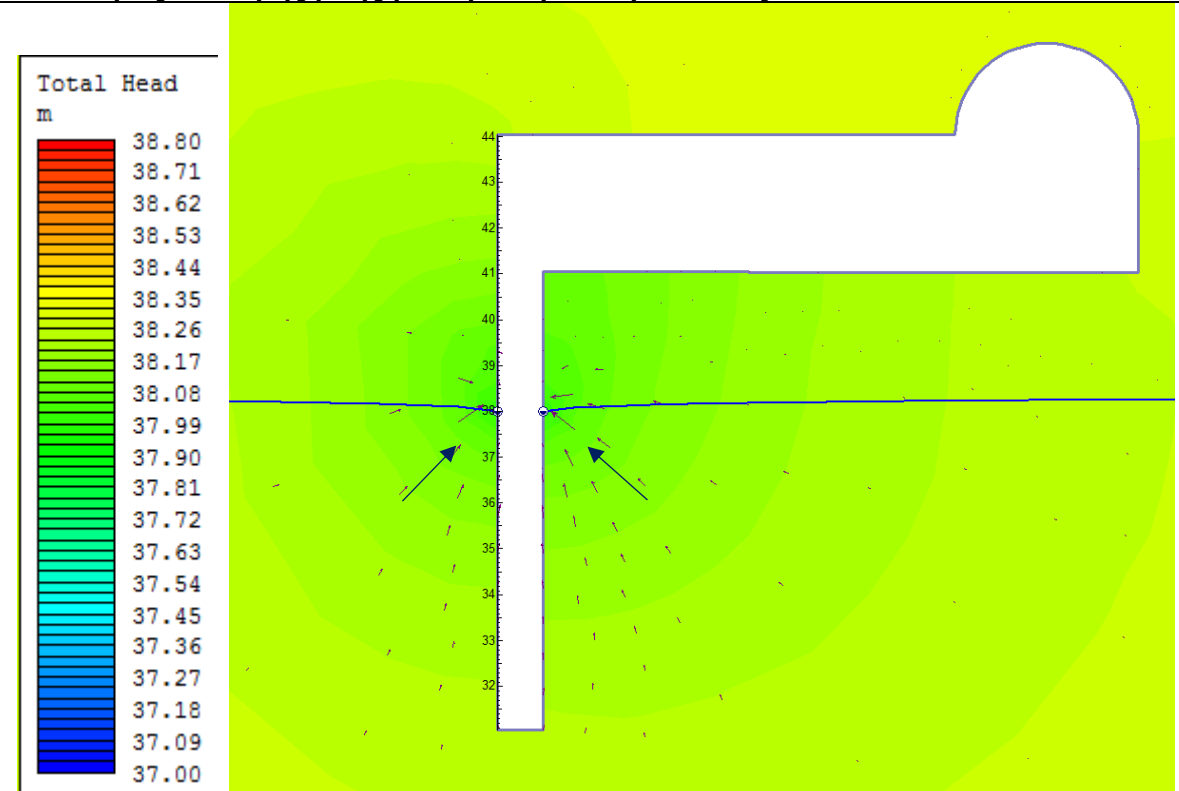
- $k_x = k_y = 2,5 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ ,  $k_z = 2,5 \times 10^{-5} \text{ m/s}$  και πτώση στάθμης στο πηγάδι, ίση με 2m

Από τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν για συνθήκες ροής με υδροπερατότητα  $k_x = k_y = 2,5 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ ,  $k_z = 2,5 \times 10^{-5} \text{ m/s}$  και πτώση στάθμης στο πηγάδι, έπειτα από άντληση, ίση με 2,0m, προκύπτει ότι η παροχή του πηγαδιού είναι  $Q = 0,10 \text{ m}^3/\text{s}$  ή  **$Q = 365 \text{ m}^3/\text{h}$**  ανά πηγάδι.

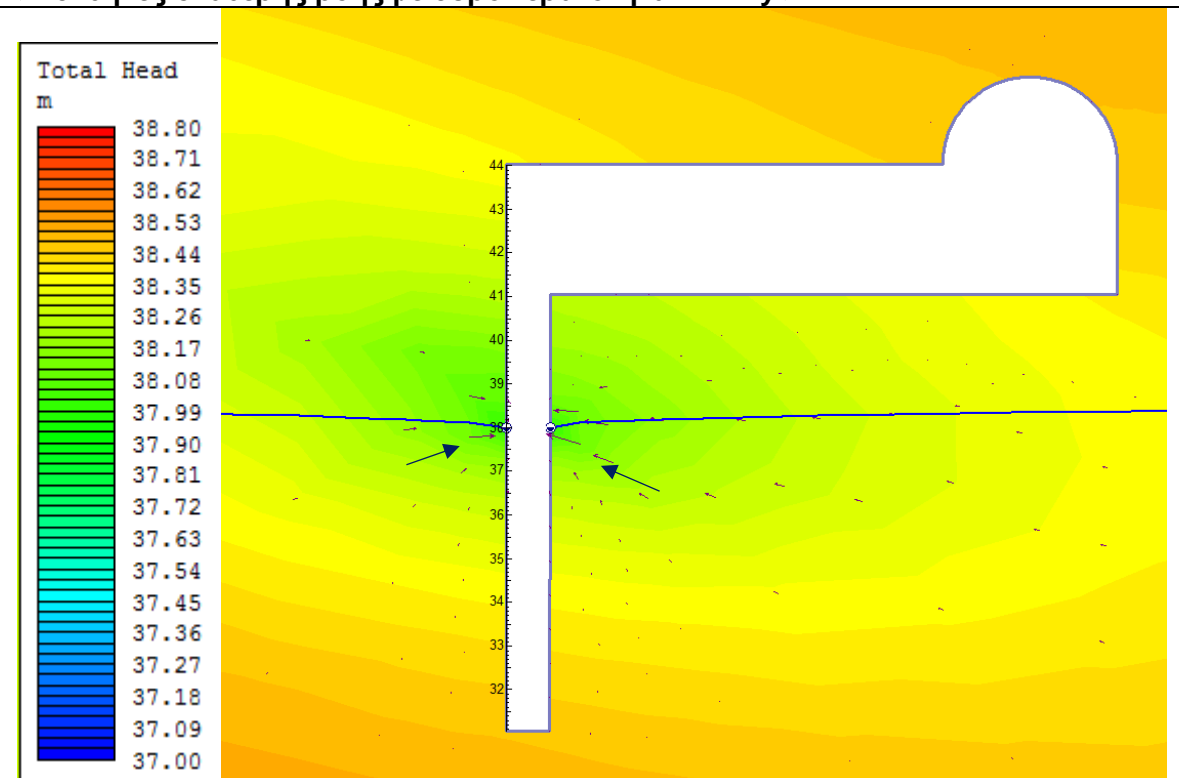
Η ακτίνα επίδρασης του πηγαδιού υπολογίζεται περίπου 4m.

Οι ισοκαμπύλες ολικού υδραυλικού φορτίου που προκύπτουν από τις παραπάνω αναλύσεις στην περίπτωση πτώσης στάθμης στο πηγάδι, λόγω άντλησης, ίση με 2m, δίνονται στο Σχήμα 35 και υποδηλώνουν την κίνηση του νερού προς το πηγάδι. Με τα μεγαλύτερα βέλη δίνεται έμφαση στην διεύθυνση της επικρατούσας ροής.

♦ Συνθήκες σταθερής ροής με υδροπερατότητα  $k_x = k_y = k_z$



♦ Συνθήκες σταθερής ροής με υδροπερατότητα  $k_x = k_y > k_z$



Σχήμα 35 Ισοκαμπύλες ολικού υδραυλικού φορτίου στην περιοχή του πηγαδιού, με πτώση στάθμης στο πηγάδι, λόγω άντλησης, ίση με 2m



### 6.1.3. Επίλυση Σχεδιασμού Β για συστοιχία δύο πηγαδιών

Στον σχεδιασμό Β, γίνεται επίσης εκτίμηση της παροχής σε δύο πηγάδια μικρού βάθους κατασκευασμένα σε μία δευτερεύουσα στοά. Τα πηγάδια θεωρούνται σε απόσταση τέτοια ώστε να μην υπάρχει αλληλεπικάλυψη στις ακτίνες επίδρασης τους. Σύμφωνα με τις αναλύσεις για τον σχεδιασμό Β που παρατίθενται στην παράγραφο 6.1.2 η ακτίνα επίδρασης του πηγαδιού κυμαίνεται από 2m για πτώση στάθμης 0,5m έως 4m για πτώση στάθμης 2m. Συνεπώς για τις αναλύσεις θεωρούμε δύο πηγάδια με αξονικές μεταξύ τους αποστάσεις 20m (πολλαπλάσια της ακτίνας επίδρασης τους), με άντληση που προκαλεί πτώση στάθμης 0.5m, κάτω από συνθήκες σταθερής ροής. Τα αποτελέσματα των αναλύσεων δίνονται στη συνέχεια.

- **$k_x = k_y = k_z = 2,5 \times 10^{-4} \text{ m/s}$  και πτώση στάθμης στο πηγάδι 0,5m**

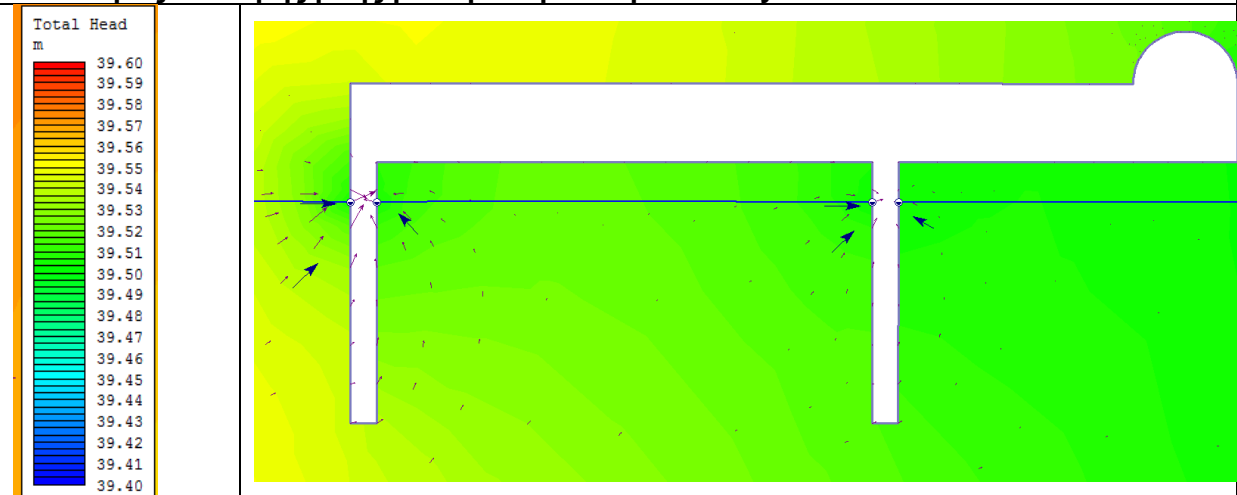
Από τις αναλύσεις προκύπτει ότι η παροχή του πηγαδιού σε συνθήκες ροής  $k_x = k_y = k_z = 2,5 \times 10^{-4} \text{ m/s}$  και πτώση της στάθμης στα πηγάδια, έπειτα από άντληση, ίση με 0,5m, είναι  $Q = 0,13 \text{ m}^3/\text{s}$  ή  **$Q = 458 \text{ m}^3/\text{h}$**  για συστοιχία δύο πηγαδιών με μεταξύ τους απόσταση 20m.

- **$k_x = k_y = 2,5 \times 10^{-4} \text{ m/s}$  ,  $k_z = 2,5 \times 10^{-5} \text{ m/s}$  και πτώση στάθμης στο πηγάδι 0,5m**

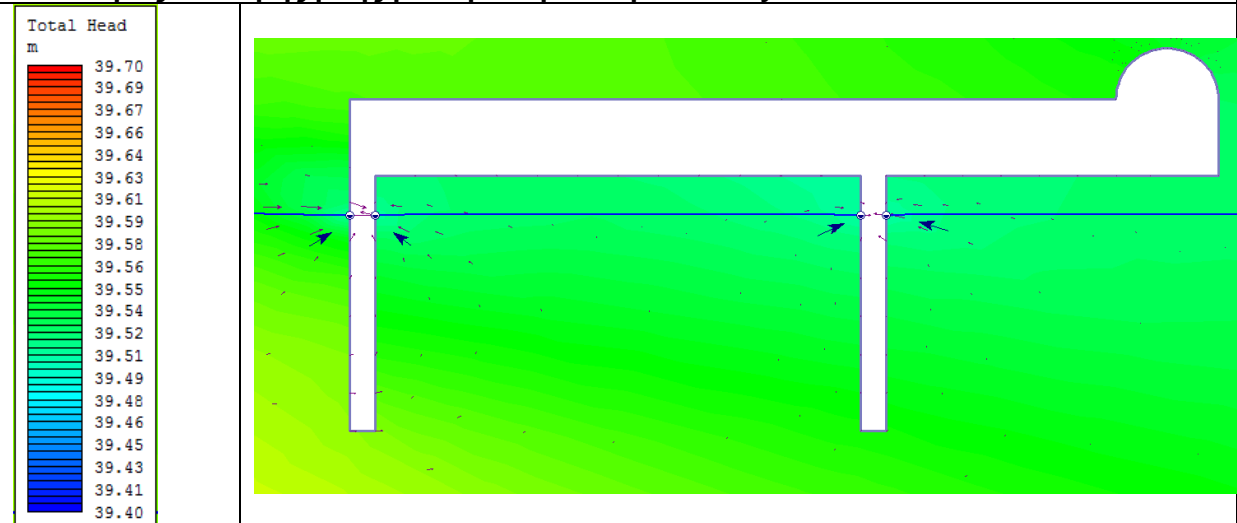
Από τις αναλύσεις προκύπτει ότι η παροχή σε συνθήκες σταθερής ροής με  $k_x = k_y = 2,5 \times 10^{-4} \text{ m/s}$  και  $k_z = 2,5 \times 10^{-5} \text{ m/s}$  με πτώση στάθμης στα πηγάδια 0,5m έπειτα από άντληση είναι  $Q = 0,052 \text{ m}^3/\text{s}$  ή  **$Q = 186 \text{ m}^3/\text{h}$**  για συστοιχία δύο πηγαδιών με μεταξύ τους απόσταση 20m.

Οι ισοκαμπύλες ολικού υδραυλικού φορτίου που προκύπτουν από τις παραπάνω αναλύσεις στην περίπτωση πτώσης στάθμης στα πηγάδια, λόγω άντλησης, ίση με 0,5m, δίνονται στο Σχήμα 36 και υποδηλώνουν την κίνηση του νερού προς τα πηγάδια. Με τα μεγαλύτερα βέλη δίνεται έμφαση στην διεύθυνση της επικρατούσας ροής.

♦ Συνθήκες σταθερής ροής με υδροπερατότητα  $k_x = k_y = k_z$



♦ Συνθήκες σταθερής ροής με υδροπερατότητα  $k_x = k_y > k_z$



Σχήμα 36 Ισοκαμπύλες ολικού υδραυλικού φορτίου στην περιοχή του έργου με πτώση στάθμης στα πηγάδια, λόγω άντλησης, ίση με 0,5m.

### 6.1.1. Αποτελέσματα επιλύσεων σχεδιασμών

Ο σχεδιασμός Α πραγματοποιήθηκε για συγκριτικούς λόγους. Οι λόγοι για τους οποίους δε θα μπορούσε να έχει εφαρμογή αυτό το σενάριο είναι ότι: α) αρχικά η στοά δεν έχει την ίδια κλίση με την κλίση της πιεζομετρίας και τεχνικά είναι αδύνατο να κατασκευαστεί προσεγγίζοντας την πιεζομετρία σε όλο το μήκος της, β) επιπλέον θεωρείται ότι υπάρχει ταπείνωση της στάθμης 1m, σε όλο το μήκος της στοάς, το οποίο όμως είναι πρακτικά αδύνατο.

Αναφέρεται επίσης ότι για συγκριτικούς λόγους πραγματοποιήθηκαν και οι υπολογισμοί όπου θεωρείται  $k_x = k_y = k_z$ , καθώς ο σχηματισμός δεν είναι ομογενής και ισότροπος για να γίνει αυτή η θεώρηση.

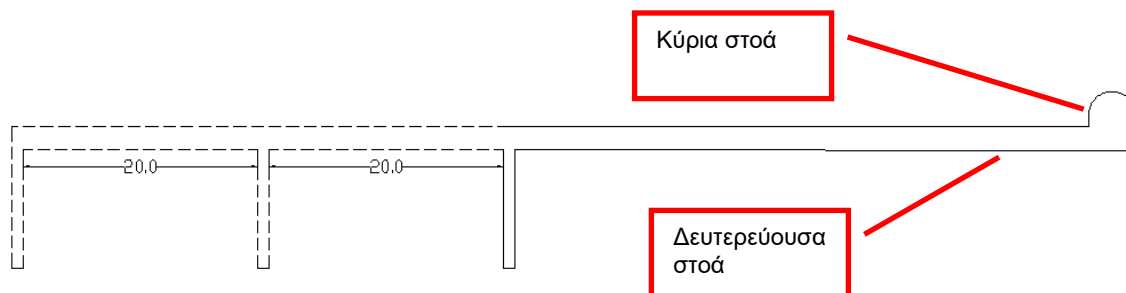
Τα αποτελέσματα από τις επιλύσεις που πραγματοποιήθηκαν, στα πλαίσια μιας πρώτης προσέγγισης, για τον Σχεδιασμό Α και τον Σχεδιασμό Β θεωρώντας  $k_x = k_y > k_z$  δίνονται στη συνέχεια.

Από την επίλυση του σχεδιασμού Α, προκύπτει ότι η απόδοση της υπό – οριζόντιας υδρομαστευτικής στοάς είναι  $36 \text{ m}^3/\text{h}$ . Αντίστοιχα από την επίλυση του σχεδιασμού Β, η παροχή ανά πηγάδι κυμαίνεται από  $110 \text{ m}^3/\text{h}$ , για πτώση στάθμης λόγω άντλησης 0,5m, έως  $365 \text{ m}^3/\text{h}$ , για πτώση στάθμης στο πηγάδι λόγω άντλησης 2m. Τα αποτελέσματα από τις επιλύσεις που πραγματοποιήθηκαν για τον σχεδιασμό Β, σε συνθήκες σταθερής ροής και πτώση στάθμης στο πηγάδι λόγω άντλησης 0,5m, 1m και 2m δίνονται συγκεντρωτικά στον πίνακα 3.

Πίνακας 3 Αποτελέσματα παροχής σε πηγάδι βάθους 10m (Σχεδιασμός Β).

Πτώση στάθμης λόγω άντλησης	Q ( $\text{m}^3/\text{h}$ ) ανά πηγάδι
0,5m	110
1 m	166
2m	365

Από τις αναλύσεις για τον σχεδιασμό Β, μπορεί να θεωρηθεί με σχετική ασφάλεια ότι η ακτίνα επίδρασης του πηγαδιού είναι μικρότερη από 10m, καθώς κυμαίνεται από 2m για πτώση στάθμης 0,5m έως 4m για πτώση στάθμης 2m. Στο σχήμα 37 δίνεται μια ενδεικτική διάταξη.



Σχήμα 37 Ενδεικτική διάταξη πηγαδιών

Στον σχεδιασμό Β, τα πηγάδια προτείνεται να κατασκευαστούν σε ζώνες όπου εντοπίζεται αυξημένη περατότητα, επομένως δεν θεωρούνται σε ίσες αποστάσεις μεταξύ τους.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 Συμπεράσματα - Προτάσεις

Η εργασία αφορά μια πρόταση σχεδιασμού εκμετάλλευσης καρστικού υδροφορέα. Πραγματοποιείται μια πρώτη προσέγγιση της απόδοσης μιας υδρομαστευτικής στοάς στις ανατολικές παρειές του Ψηλορείτη (περιοχή Κρουσώνα), με προσομοίωση της υπόγειας ροής με τη μέθοδο πεπερασμένων στοιχείων σε συνθήκες σταθερής ροής (λογισμικό Phase2).

Στον αρχικό σχεδιασμό (Σενάριο Α) θεωρείται υπο-οριζόντια υδρομαστευτική στοά. Για τη συλλογή και την μεταφορά του νερού σχεδιάζεται τάφρος κατά μήκος της στοάς, ώστε το υπόγειο νερό να οδηγείται μέσω βαρύτητας προς της έξοδο (προς Βορρά).

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των υπολογισμών το σενάριο Α, για πτώση στάθμης 1m, δίνει παροχή περίπου 320.000 m<sup>3</sup>/yr, ανά μέτρο στοάς. Αυτό σημαίνει ότι αν θεωρηθεί στοά μήκους 200m η παροχή εκτιμάται σε περίπου 64 εκ. m<sup>3</sup>/yr.

Το σενάριο Α είναι μια λύση που ενέχει μεγάλο ρίσκο, διότι δεν είναι εφικτό να επιτυγχάνεται πτώση στάθμης 1m σε όλο το μήκος της στοάς. Επίσης υπάρχει μεγάλη αβεβαιότητα για την ακριβή θέση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα.

Για τον λόγο αυτό εξετάζεται εναλλακτικό σενάριο, σύμφωνα με το οποίο σχεδιάζονται μικρότερου μεγέθους στοές, εγκάρσια στην κύρια στοά, μέσα στις οποίες θα ανοίγονται πηγάδια μικρού βάθους με σκοπό την προσέγγιση της πιεζομετρίας και την εκμετάλλευση του καρστικού υδροφορέα σε ζώνες προνομιακής διείσδυσης του υπόγειου νερού (σενάριο Β).

Το σενάριο Β, για πτώση στάθμης σε κάθε πηγάδι (λόγω άντλησης) 1m, δίνει παροχή 1.500.000 m<sup>3</sup>/yr ανά πηγάδι. Επομένως, για παράδειγμα, μια συστοιχία 20 πηγαδιών δίνει θεωρητικά παροχή περίπου 30 εκ. m<sup>3</sup>/yr.

Το σενάριο Β προσφέρει σχεδιαστική ευελιξία, ενώ αποτελεί ασφαλέστερη επιλογή για την εκμετάλλευση του υδροφορέα, καθώς παρέχει τη δυνατότητα σταδιακής διάνοιξης γεωτρήσεων σε ζώνες αυξημένης περατότητας.

Πέρα από την αξιολόγηση των παραπάνω σχεδιασμών, σε κάθε περίπτωση κρίνεται απαραίτητη η περαιτέρω έρευνα και αξιοποίηση μετρήσεων πεδίου για πιο τεκμηριωμένη προσέγγιση του προβλήματος.

Το δισδιάστατο μοντέλο δεν λαμβάνει υπόψη την ανομοιογένεια του καρστ κατά μήκος της στοάς, επομένως η όποια ποσοτική εκτίμηση κατά μήκος της στοάς είναι δυνητική (υπεραισιόδοξη). Συνεπώς, προτείνεται περαιτέρω διερεύνηση της απόδοσης του εν λόγω

έργου και με μοντέλο προσομοίωσης τριών διαστάσεων, όπως και με άλλες μεθόδους (π.χ. με μέθοδο πεπερασμένων διαφορών).

Τέλος κρίνεται σκόπιμο να γίνει λεπτομερής διερεύνηση για την καλύτερη χωροθέτηση της στοάς, με βάση την προσβασιμότητα.



# Βιβλιογραφία

## **Ελληνική Βιβλιογραφία**

1. Αρχοντέλης, Α. (2016). Διαχείριση καρστικών υπόγειων υδροφορέων με μοντέλα προσομοίωσης της υπόγειας ροής. Το παράδειγμα του Αλμυρού Ηρακλείου, Κρήτη. Διδακτορική Διατριβή. Α.Π.Θ.
2. Βέργης, Γ. (2006). Διερεύνηση Δυνατοτήτων Δημιουργίας Ταμιευτήρα στην Περιοχή Τυλίσου Ηρακλείου Κρήτης για Αποθήκευση Νερών Πηγής Αλμυρού. Διπλωματική Εργασία. Ε.Μ.Π. Αθήνα.
3. Βουβαλίδης, Κ. (2011). Φυσική Γεωγραφία. Εκδόσεις ΔΙΣΙΓΜΑ. Θεσσαλονίκη.
4. Γεωγραφική Υπηρεσία Στρατού. Τοπογραφικό διάγραμμα «Επάνω Αρχάνες (φύλλο 9527.6)» κλίμακας. 1:5.000
5. Γεωγραφική Υπηρεσία Στρατού. Τοπογραφικό διάγραμμα «Επάνω Αρχάνες (φύλλο 9527.8)» κλίμακας. 1:5.000
6. Γεωγραφική Υπηρεσία Στρατού. Τοπογραφικό διάγραμμα «Τυμπάκι (φύλλο 9527.5)» κλίμακας. 1:5.000
7. Γεωγραφική Υπηρεσία Στρατού. Τοπογραφικό διάγραμμα «Τυμπάκι (φύλλο 9527.7)» κλίμακας. 1:5.000
8. ΙΓΜΕ, Παράρτημα Κρήτης (1995). Υδρογεωλογική Έρευνα Περιοχής Νομού Ρεθύμνου.
9. ΙΓΜΕ, (2009). Υδρογεωλογική μελέτη (τεύχ. 1/2). Υδατικό διαμέρισμα Κρήτης (13). Ρέθυμνο.
10. ΙΓΜΕ (1994). Γεωλογικός χάρτης, Φύλλο Επάνω Αρχάναι. Κλίμακα 1:50.000
11. ΙΓΜΕ (1984). Γεωλογικός χάρτης, Φύλλο Τυμπάκι. Κλίμακα 1:50.000
12. Καλλέργης, Γ. (2001). Εφαρμοσμένη Περιβαλλοντική Υδρογεωλογία, Έκδοση Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας, Δεύτερη Έκδοση, Τόμος Γ, Αθήνα.
13. Κλειδοπούλου, Μ. (2003). Ροή υπόγειων νερών προς υδρομαστευτικά έργα (παράδειγμα: υδρομαστευτική στοά περιοχής Αλμυρού Ηρακλείου Κρήτης). Διδακτορική Διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης, Σχολή Μηχανικών Ορυκτών Πόρων.
14. Κρητικάκης, Γ., Γουγογιάννης, Ι., Βαφειδής, Α., Μονόπωλης, Δ., Οικονόμου, Ν., Μανούτσογλου, Εμ. (2002). Απεικόνιση γεωλογικών σχηματισμών υπεδάφους στην ευρύτερη περιοχή των πηγών του Αλμυρού ποταμού Νομού Ηρακλείου, Κρήτη. Πρακτικά 7ου Εθνικού Συνεδρίου Χαρτογραφίας.
15. Κριτσωτάκης, Μ., Παυλίδου, Σ. (2013). Κατάσταση υπογείων υδροφορέων Κρήτης. Περιφέρεια Κρήτης, Γενική Διεύθυνση Περιφέρειας, Διεύθυνση Υδάτων, Τμήμα Παρακολούθησης και ελέγχου της ποιότητας και ποσότητας των υδάτων. Ηράκλειο.
16. Μαμάσης, Ν. (2011). Τεχνική Υδρολογία – Υπόγεια Νερά. Ε.Μ.Π.(Σημειώσεις Μαθήματος) Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων.

17. Μονόπωλης, Δ., Μάστορης, Κ. (1969). Υδρογεωλογική Μελέτη της Καρστικής Υφάλμυρου Πηγής Αλμυρού (Ηράκλειο Κρήτης). Υδρολογικά και υδρογεωλογικά Έρευναι, Νο. 1, Ινστιτούτο Γεωλογίας και Ερευνών Υπεδάφους, Αθήναι.
18. Μονόπωλης, Δ., Σοφίου, Π., Στειακάκης, Ε., Κλειδοπούλου, Μ., Βαβαδάκης, Δ. (1995). Μελέτη των Υδρολογικών Παραμέτρων της Πηγής Αλμυρού Ηρακλείου (Κρήτη) σε Συνθήκες Τεχνητών Παρεμβάσεων. Πρακτικά 3ου Υδρογεωλογικού Συνεδρίου, Ηράκλειο.
19. Μονόπωλης, Δ., Σοφίου, Π., Κλειδοπούλου, Μ. (1996). Υδρομαστευτική Στοά Κέρης – Τυλίσου (Υδρογεωλογική Μελέτη: Θεωρητικός και Εμπειρικός Υπολογισμός Υδρογεωλογικών Παραμέτρων). Προκαταρκτική Έκθεση, Ερευνητικό έργο: Αξιοποίηση πηγών Αλμυρού ποταμού, Δημοτική Επιχείρηση Ύδρευσης – Αποχέτευσης Ηρακλείου – Πολυτεχνείο Κρήτης, Ηράκλειο.
20. Μονόπωλης, Δ. Σοφίου, Π., Στειακάκης, Ε., Καδιανάκης, Μ., Βαβαδάκης, Δ., Κλειδοπούλου, Μ. (1996). Πηγή Αλμυρού Ηρακλείου Κρήτης. Ημέρες Γλυκού Νερού. Πρακτικά Διεθνούς Συνεδρίου "Διαχείριση Υδατικών Πόρων", Τ.Ε.Ε., Λάρισα 13-16/1/1996.
21. Μονόπωλης, Δ., Σοφίου, Π., Στειακάκης, Ε., Καδιανάκης, Μ., Βαβαδάκης, Δ., Κλειδοπούλου, Μ. (1998α). Εκμετάλλευση Παράκτιων Καρστικών Υδροφόρων Μέσω Δικτύων Γεωτρήσεων Παραδείγματα από Κρήτη). 4<sup>ο</sup> Υδρογεωλογικό Συνέδριο, Θεσσαλονίκη, σελ. 309-323.
22. Μονόπωλης, Δ., Σοφίου, Π., Στειακάκης, Ε., Καδιανάκης, Μ., Βαβαδάκης, Δ., Κλειδοπούλου, Μ. (1998β). Πρόβλεψη Περιόδων Εμφάνισης Γλυκού Νερού στην Πηγή Αλμυρού Ηρακλείου Κρήτης, Γεωτεχνικά Επιστημονικά Θέματα, Τόμος 9, Τεύχος 2/1998, Γεωτεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας, Θεσσαλονίκη.
23. Μονόπωλης, Δ., Σοφίου, Π., Στειακάκης, Ε., Καδιανάκης, Μ., Βαβαδάκης, Δ., Κλειδοπούλου, Μ. (1999). Προσδιορισμός Υδρογεωλογικών Παραμέτρων στα Ανθρακικά Πετρώματα της Κρήτης (Μεθοδολογία - Στατιστική Ανάλυση) - 5<sup>ο</sup> Υδρογεωλογικό Συνέδριο με έμφαση στη διαχείριση των υδάτινων πόρων (Λευκωσία - Κύπρος).
24. Μονόπωλης, Δ., Κλειδοπούλου, Μ. (2001). Αξιοποίηση Αλμυρού Ποταμού (Ηράκλειο Κρήτης). Πρόταση Ερευνητικού Έργου, Ημερίδα Δήμου Γαζίου: Περιβαλλοντική Προστασία και Αξιοποίηση του Υγροτόπου του Αλμυρού, Γάζι Ηρακλείου.
25. Μπεζές, Κ. (1992). Υδρογεωλογική Μελέτη Ευρύτερης Περιοχής Τυλίσου Νομού Ηρακλείου Κρήτης, Δ.Ε.Υ.Α.Η.
26. Μπεζές, Κ. (1993). Νέα στοιχεία για τον μηχανισμό υφαλμύρυνσης της καρστικής πηγής του Αλμυρού Ηρακλείου Κρήτης. Πρακτικά 2<sup>ου</sup> Υδρολογικού Συνεδρίου, Τόμος Α', σελ. 155-171, Πάτρα.

- 27.Περλέρως, Β., Παπαμαστοράκης, Δ., Κριτσωτάκης, Μ., Δρακοπούλου, Ε. και Παναγόπουλος, Α. (2004). Υπόγειο υδατικό δυναμικό Κρήτης. Προβλήματα και προοπτικές. Δελτίο της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας τομ. XXXVI, 2048-2056, Πρακτικά 10<sup>ου</sup> Διεθνούς Συνεδρίου, Θεσσαλονίκη.
- 28.Σούλης, Ι., (2015). Υπολογιστικές τεχνικές υδραυλικής μηχανικής. [ηλεκτρ. βιβλ.] Αθήνα: Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών. Διαθέσιμο στο: <http://hdl.handle.net/11419/3997>.
- 29.Σούλιος, Γ.(1986). Γενική Υδρογεωλογία. Πρώτος Τόμος. UniversityStudioPress.
- 30.Σούλιος, Γ. κ.α. (1989). Έρευνα πάνω στο υδρολογικό ισοζύγιο λεκανών απορροής του ελληνικού χώρου - Παράδειγμα από τη λεκάνη Σκλήθρου Φλώρινας. - Δελτίο της Ε.Γ.Ε., τ. XXVI, p. 129-153.
- 31.Σταυρουλάκης, Γ., Μουράντοβα Κονταδάκη, Α., Σταυρουλάκη, Μ. (2015). Υπολογιστική μηχανική. [ηλεκτρ. βιβλ.] Αθήνα: Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών. κεφ 2. (Διαθέσιμο στο <http://hdl.handle.net/11419/4559>).
- 32.Τσακίρης, Γ. (1995). Υδατικοί Πόροι: Ι. Τεχνική Υδρολογία. Εκδόσεις Συμμετρία. Αθήνα.
- 33.ΦΕΚ Β'570/2015. Εγκεκριμένο: Σχέδιο Διαχείρισης των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Κρήτης.
- 34.Χατζηγώγος, Θ., Καραουλάνης, Φ. (2015). Ανάλυση προβλημάτων γεωτεχνικής μηχανικής με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. [ηλεκτρ. βιβλ.] Αθήνα: Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών. κεφ 2. Διαθέσιμο στο: <http://hdl.handle.net/11419/1106>

## **Ξένη Βιβλιογραφία**

1. Arfib, B. (2001). Étude des circulations d'eaux souterraines en aquifère karstique côtier : observations et modélisation de la source saumâtre almyros d'Héraklion, crète (Grèce). Sciences de l'environnement. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, Français.
2. Arfib B., Marsily G., Ganoulis J. (2002). Les sources karstiques côtières en Méditerranée : Etude des mécanismes de pollution saline de l'Almyros d'Héraklion (Crète), observations et modélisation. Bull. Soc. géol. France, 2002, t. 173, no 3, pp. 245-253.
3. Arfib B., Marsily G., Ganoulis J. (2007). Locating the Zone of Saline Intrusion in a Coastal Karst Aquifer Using Springflow Data. Groundwater NGWA Journal vol. 45, Issue1, p 28-35 (January–February).
4. Breznik, M. (1973). The origin of brackish Karst springs and their development. Col. Razpr. In Por. 16 Knjig, pp.83-186.
5. Breznik, M. (1998). Storage reservoirs and deep wells in karst regions. A. A. Balkema, p. 268, Rotterdam/ Brookfield.
6. Breznik, M., Steinman, F. (2008). Hydromechanism and desalination of coastal karst aquifers: theory and cases. Acta Carsologica / Karsoslovni Zbornik37(2):197-212.
7. Burdon, D. J. and Papakis, N. (1964). Preliminary Note on the Hydrogeology of the Almiros Spring, Iraklion, Crete, Inst. Geol. and Subsurface Res., vol. IX, NO. 3, pp. 125-144.
8. Demek, J. (1972). Manual of detailed geomorphological mapping. Czechoslovak Academy of Sciences, International Geographical Union, Commission Geomorphological Survey and Mapping, Academia, Prague.
9. Dikau, R. (1989). The application of a digital relief model to landform analysis in geomorphology. In: Raper JF (ed.) Three dimensional applications in geographical information systems, London: Taylor & Francis.
10. Gale, J. E. (1982). Assessing the Permeability Characteristics of Fractured Rock, Geol. Soc. Amer. Spec. Paper 189, pp. 163–181.
11. López-Acosta N.P. (2016). Numerical and Analytical Methods for the Analysis of Flow of Water Through Soils and Earth Structures. Groundwater. Published: July 27th 2016. DOI: 10.5772/63706
12. Maire, R. (1990) Les hauts karsts de Crète (Ida et Levka Ori). Presses Universitaires de Bordeaux Chapitre III. p. 109-180.
13. Maramathas, A., Maroulis, Z., Marinos-Kouris, D. (2003). A Brackish Karstic Springs Model. Application on Almiros Crete Greece, Ground Water Volume 41 No 5 pp 608-620.

14. Maramathas, A, (2006). Contribution to the identification of the sea intrusion mechanism of brackish karst springs. *Hydrogeology Journal* (2006) 14: 657–662.
15. Ré, R. and Breznik, M. (1968). The problems of the Almyros spring of Heraklion. Unpublished note No.2 of UNDP - FAO, presented to Greek Government, pp. 1-114, Iraklion.
16. Rozos, E., Koutsoyiannis, D. (2005) Application Of The Integrated Finite Difference Method In Groundwater Flow. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 7, 00579, , Vienna, Austria.
17. Singh, K. A. (2008). Finite Difference Method and its Implementation.
18. Thrailkill, J. (1974). Pipe flow models of a Kentucky limestone aquifer. *Groundwater*, 12(4), 202-205.
19. Thrailkill JV. (1989). Shallow conduit-flow carbonate aquifers: Conceptual models and parameter evaluation. In: Moore JE, Zaporozec AA, Csallany SC, Varney TC, editors. Recent advances in ground-water hydrology. American Institute of Hydrology; Minneapolis, pp. 153–159.
20. Urbański A., Podleś K., (2018). A 2D/3D method of the groundwater flow and stability analysis of a slope with dewatering wells, *Technical Transactions*, Vol. 12/2018, pp. 95–106.
21. Viaroli, S., Lotti, F., Mastroiello, L., Paolucci, V., Mazza R. (2019). Simplified two-dimensional modelling to constrain the deep groundwater contribution in a complex mineral water mixing area, Riardo Plain, southern Italy. *Hydrogeology Journal* volume 27, pages 1459–1478
22. Yusun, C., and B. Ji (1988). The media and movement of karst water, paper presented at Karst Hydrogeology and Karst Environment Protection: 21st Congress of the International Association of Hydrogeologists, Int. Assoc. of Hydrogeol., Guilin, China.
23. Zhou, Y., Li, W. (2011). A review of regional groundwater flow modeling. *Geoscience Frontiers*. Volume 2, Issue 2, Pages 205-214

### **Πηγές από Διαδίκτυο**

<http://www.plongeesout.com/sites/monde/crete/almyros/almyros.htm>

<http://www.cretanbeaches.com>

<http://frontoffice-147.dev.edu.uoc.gr/>

<https://www.apdkritis.gov.gr/el/open-data>

[www.rocscience.com](http://www.rocscience.com)

[blog.samaritakis.gr](http://blog.samaritakis.gr)



## **ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ**

Πίνακας Α. 1 Στοιχεία υδρογεωτρήσεων ΔΕΥΑΗ στην ευρύτερη περιοχή έρευνας (Αρχοντέλης, 2016)

Σημεία νερού	ΕΓΣΑ 1987			Απόλυτο Βάθος	Υδροφορία
	X	Y	Z (m)	(m)	
T10	592675,25	3908099,77	150	-184	Ασβεστόλιθοι Τρίπολης
T11	592580,29	3907378,03	124	-69	Ασβεστόλιθοι Τρίπολης
T12	592107,57	3907465,40	193	-44	Ασβεστόλιθοι Τρίπολης
T13	592117,39	3907072,61	164	-93	Ασβεστόλιθοι Τρίπολης
T14	591956,83	3907854,83	204	-164	Ασβεστόλιθοι Τρίπολης
T15	592349,55	3907254,81	164	-54	Ασβεστόλιθοι Τρίπολης
T16	592258,77	3907647,83	174	-95	Ασβεστόλιθοι Τρίπολης
T17	592807,63	3907233,28	128	-102	Ασβεστόλιθοι Τρίπολης
T20	592920,89	3906997,43	165		Ασβεστόλιθοι Τρίπολης
T21	592027,65	3907562,60	207	-66	Ασβεστόλιθοι Τρίπολης
T23	593684,44	3908154,58	164	-166	Ασβεστόλιθοι Τρίπολης
KT1	591880,55	3907266,28	207		Ασβεστόλιθοι Τρίπολης
KT2	592839,32	3905717,02	175		Ασβεστόλιθοι Τρίπολης
KT3	591796,16	3907204,42	210		Ασβεστόλιθοι Τρίπολης
KT4	592232,57	3908079,48	160	-142	Ασβεστόλιθοι Τρίπολης
Σ1	592155,31	3908622,56	201		Ασβεστόλιθοι Τρίπολης
IΗ02	591954,54	3907579,94	226		Ασβεστόλιθοι Τρίπολης
ΓΦ1	589557,27	3904797,15	310	-175	Πλακώδεις ασβεστόλιθοι
ΓΦ4	589996,94	3904513,43	280	-172	Πλακώδεις ασβεστόλιθοι
ΓΦ5	589151,24	3904919,13	333	-147	Πλακώδεις ασβεστόλιθοι
IΗ01	587793,63	3905742,80	388		Ασβεστόλιθοι Τρίπολης
MN	590081,86	3904625,24	329		Πλακώδεις ασβεστόλιθοι
T19	590126,95	3903990,35	226	-154	Πλακώδεις ασβεστόλιθοι
T22	590150,58	3904030,03	221	-139	Πλακώδεις ασβεστόλιθοι
T24	590162,79	3904217,09	272	-179	Πλακώδεις ασβεστόλιθοι
T25	590406,87	3903577,65	222	-215	Πλακώδεις ασβεστόλιθοι
K1	592567,78	3909797,27	342	-44	Ασβεστόλιθοι Τρίπολης
K2	592664,72	3909697,24	338	-52	Ασβεστόλιθοι Τρίπολης
K3	593149,80	3909573,00	299	-63	Ασβεστόλιθοι Τρίπολης
K4	592390,43	3909940,51	335	-67	Ασβεστόλιθοι Τρίπολης
K5	593488,22	3909622,28	290	-35	Ασβεστόλιθοι Τρίπολης
K6	593717,88	3909342,59	279	-43	Ασβεστόλιθοι Τρίπολης
K6A	593723,15	3909314,65	279	-45	Ασβεστόλιθοι Τρίπολης
K7	594111,09	3909413,40	289	-36	Ασβεστόλιθοι Τρίπολης
K8	593904,55	3909783,30	303	-60	Ασβεστόλιθοι Τρίπολης
K9	592501,98	3909469,71	340	-88	Ασβεστόλιθοι Τρίπολης
K10	592651,90	3909576,14	334	-72	Ασβεστόλιθοι Τρίπολης
IΗ12	592276,30	3909960,34	324		Ασβεστόλιθοι Τρίπολης

Πίνακας Α. 2 Συντεταγμένες αρδευτικών γεωτρήσεων στην ευρύτερη περιοχή έρευνας (Αρχοντέλης, 2016).

Σημείο νερού	ΕΓΣΑ 1987	
	Χ	Υ
ΓΑ.06.1	592120	3907076
ΓΑ.06.2	591438	3906224
ΓΑ.06.3	592807	3907236
ΓΑ.06.4	592918	3905460
ΓΑ.06.5	592121	3907076
ΓΑ.06.8	585296	3907820
ΙΔΙΩΤΗ	586172	3906818
ΙΔΙΩΤΗ	588509	3905213
ΙΔΙΩΤΗ	586160	3906819
ΙΔΙΩΤΗ	585692	3907653
ΙΔΙΩΤΗ	591508	3903711
ΙΔΙΩΤΗ	593704	3907178
ΙΔΙΩΤΗ	590943	3911496
ΙΔΙΩΤΗ	586048	3906542
ΙΔΙΩΤΗ	586033	3906543
ΙΔΙΩΤΗ	586351	3906749

Τα στοιχεία των πλησιέστερων υδρογεωτρήσεων, που μας παραχωρήθηκαν από τη ΔΕΥΑΗ, και αποσαφηνίζουν την πιεζομετρία εγγύς της περιοχής έρευνας, δίνονται στον πίνακα Α.3.

Πίνακας Α. 3 Στοιχεία υδρογεωτρήσεων και στάθμες ηρεμίας στην περιοχή Λουτράκι - Κρουσώνα, από την ΔΕΥΑΗ.

Πεδίο εκμετάλλευσης	Κωδικός	Χ	Υ	Ζ (m)	Στάθμη Ηρεμίας (m)	Α.Υ. Στάθμης
Λουτράκι - Κρουσώνα	KP3	590097	3900202	372,20	327,35	<b>+44,85</b>
	KP13	589920	3901601	364,35	320,25	<b>+44,10</b>
	KP9	589967	3901417	353,40	316,0	<b>+37,40</b>
	KP8	590209	3900976	305,15	263,60	<b>+41,55</b>
	KP7	590445	3900741	285,60	239,10	<b>+46,50</b>
	KP6	590129	3900507	356,21	303,95	<b>+52,26</b>

Πίνακας Α. 4 Μηνιαίος όγκος νερού στην πηγή Αλμυρού, με στοιχεία από την Υ.Ε.Β. (Βέργης, 2016).

ΥΔΡ.ΕΤΟΣ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΗ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΕΤΗΣΙΟΣ
	<i>hm<sup>3</sup></i>												
<b>1971-72</b>	10.28	10.26	10.39	13.13	19.43	22.45	30.21	17.14	21.76	14.60	15.68	11.93	<b>197.26</b>
<b>1972-73</b>	10.50	15.44	17.38	30.96	51.00	30.61	29.76	17.45	15.36	13.52	11.55	9.91	<b>253.44</b>
<b>1973-74</b>	9.26	9.09	9.12	10.84	23.72	27.41	33.39	15.82	13.59	12.18	11.93	11.25	<b>187.60</b>
<b>1974-75</b>	9.81	9.38	8.76	11.75	30.57	40.87	29.17	16.29	13.59	12.33	11.39	10.20	<b>204.11</b>
<b>1975-76</b>	9.36	10.02	9.95	23.17	41.70	38.44	43.55	29.78	21.37	18.09	15.95	14.25	<b>275.63</b>
<b>1976-77</b>	12.57	17.89	27.37	28.55	20.89	21.13	27.37	24.55	20.25	13.24	11.09	9.54	<b>234.44</b>
<b>1977-78</b>	10.57	15.71	11.10	37.70	56.93	31.42	27.23	21.92	16.50	14.31	13.60	13.05	<b>270.03</b>
<b>1978-79</b>	11.50	13.99	18.48	30.80	27.53	21.75	33.19	16.50	14.55	13.53	12.89	11.79	<b>226.50</b>
<b>1979-80</b>	13.32	12.27	17.04	29.28	30.85	38.62	36.10	25.52	19.15	15.82	15.08	13.83	<b>266.87</b>
<b>1980-81</b>	12.80	13.31	11.79	19.85	38.68	36.64	30.11	18.80	15.63	14.00	14.28	13.65	<b>239.55</b>
<b>1981-82</b>	12.03	12.05	13.01	22.24	17.94	46.67	42.73	25.34	17.14	14.46	13.26	12.83	<b>249.72</b>
<b>1982-83</b>	13.67	13.53	13.87	15.39	29.67	35.45	46.47	27.42	18.74	15.68	14.45	13.72	<b>258.05</b>
<b>1983-84</b>	13.32	13.06	18.77	35.15	31.47	37.08	30.57	19.89	18.13	15.00	15.01	13.60	<b>261.04</b>
<b>1984-85</b>	11.50	11.35	25.31	28.46	42.80	32.06	27.57	22.16	17.64	15.49	14.31	13.53	<b>262.16</b>
<b>1985-86</b>	12.74	13.15	14.39	21.95	18.12	25.96	18.65	14.73	14.20	13.22	13.12	12.51	<b>192.73</b>
<b>1986-87</b>	11.38	11.46	14.02	26.62	33.03	24.48	38.72	30.02	34.46	15.29	12.86	11.33	<b>263.68</b>
<b>1987-88</b>	11.63	12.18	11.53	19.45	24.83	30.15	33.46	19.54	15.24	13.74	13.77	12.99	<b>218.50</b>
<b>1988-89</b>	12.67	18.59	21.74	24.23	22.51	20.58	28.60	19.00	15.58	13.02	12.84	11.74	<b>221.10</b>
<b>1989-90</b>	10.65	11.97	15.58	15.33	16.08	24.31	16.46	12.80	12.03	10.55	10.26	9.94	<b>165.96</b>
<b>1990-91</b>	9.02	9.48	9.85	12.76	26.65	37.86	25.34	17.41	14.73	11.16	10.83	9.83	<b>194.92</b>
<b>1991-92</b>	9.11	9.42	10.56	43.07	28.78	30.34	41.05	38.09	23.41	17.13	13.40	12.20	<b>276.56</b>
<b>1992-93</b>	9.61	9.48	9.18	15.67	23.73	30.22	30.90	22.31	20.46	13.59	11.70	9.64	<b>206.50</b>
<b>1993-94</b>	9.33	9.64	16.48	16.43	29.54	34.95	21.64	19.07	14.33	12.56	12.09	10.36	<b>206.42</b>
<b>1994-95</b>	41.23	13.55	45.19	32.96	34.59	23.26	24.15	20.41	16.64	14.35	13.74	12.48	<b>292.54</b>
<b>1995-96</b>	10.37	9.91	9.07	14.21	43.98	42.71	41.70	19.83	17.61	14.41	13.39	12.05	<b>249.25</b>
<b>1996-97</b>	10.37	11.43	10.63	30.90	32.69	31.67	62.38	27.80	17.51	15.81	15.67	14.20	<b>281.06</b>
<b>1997-98</b>	12.53	16.82	17.96	28.59	21.34	25.86	39.63	30.28	15.92	14.26	13.39	12.05	<b>248.63</b>
<b>1998-99</b>	11.66	10.71	10.37	32.53	40.96	19.86	15.59	21.53	13.39	12.96	12.05	10.71	<b>212.33</b>
<b>1999-00</b>	9.07	9.37	13.15	35.00	35.33	42.24	27.49	20.64	17.41	15.55	13.39	10.71	<b>249.36</b>
<b>2000-01</b>	10.37	12.05	12.96	16.24	28.51	24.09	23.27	19.17	17.41	14.26	10.71	9.37	<b>198.42</b>
Μέση τιμή	<b>12.07</b>	<b>12.22</b>	<b>15.17</b>	<b>24.11</b>	<b>30.79</b>	<b>30.97</b>	<b>31.88</b>	<b>21.71</b>	<b>17.46</b>	<b>14.14</b>	<b>13.12</b>	<b>11.84</b>	<b>235.48</b>
Ελάχιστη	<b>9.02</b>	<b>9.09</b>	<b>8.76</b>	<b>10.84</b>	<b>16.08</b>	<b>19.86</b>	<b>15.59</b>	<b>12.80</b>	<b>12.03</b>	<b>10.55</b>	<b>10.26</b>	<b>9.37</b>	<b>165.96</b>
Μέγιστη	<b>41.23</b>	<b>18.59</b>	<b>45.19</b>	<b>43.07</b>	<b>56.93</b>	<b>46.67</b>	<b>62.38</b>	<b>38.09</b>	<b>34.46</b>	<b>18.09</b>	<b>15.95</b>	<b>14.25</b>	<b>292.54</b>

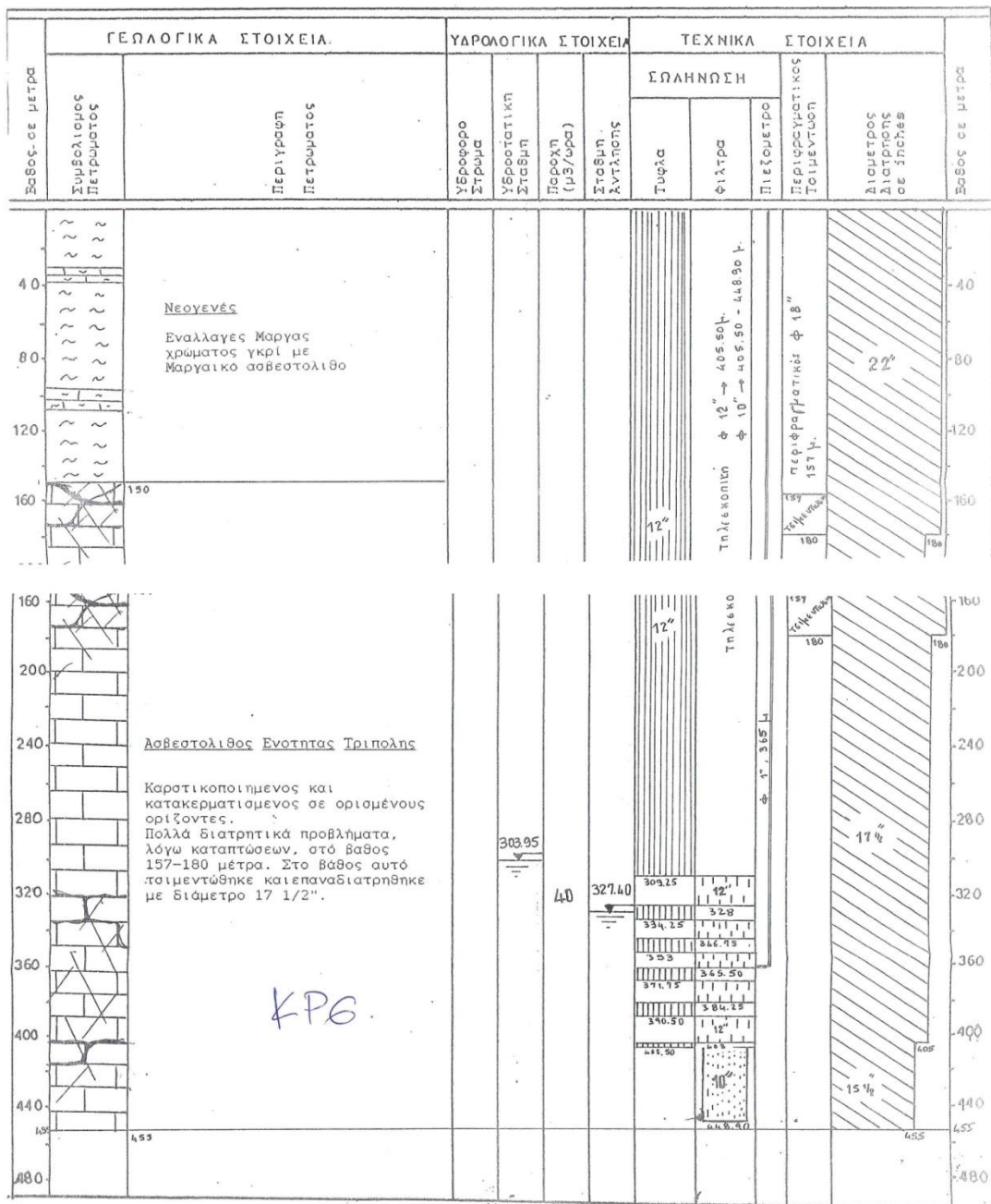
# ΤΟΜΕΣ ΥΔΡΟΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ ΚΡ3, ΚΡ6, ΚΡ8 (Δεδομένα από ΔΕΥΑΗ)

ΥΔΡΕΥΣΗΣ ΑΠΟΧΕΤΕΥΣΗΣ  
ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ

Ν. ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ Ν° ΣΤΑΔΙΟ

ΓΕΩΤΡΗΣΗ : **ΚΡ6**  
ΧΡΟΝΟΛΟΓΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ: Οκτ 1992  
ΓΕΩΤΡΥΠΑΝΟ : Ingersoll Rand

ΑΝΑΔΟΧΟΣ : ΕΜΜ ΚΟΥΤΕΝΤΑΚΗΣ, ΓΕΩΛΟΓΟΣ ΕΛΕ  
ΥΨΟΜΕΤΡΟ : 356.21  
ΚΑΙΜΑΚΑ : 1:2000



ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ : Τη τομή συνοδεύει τεχνική έκθεση

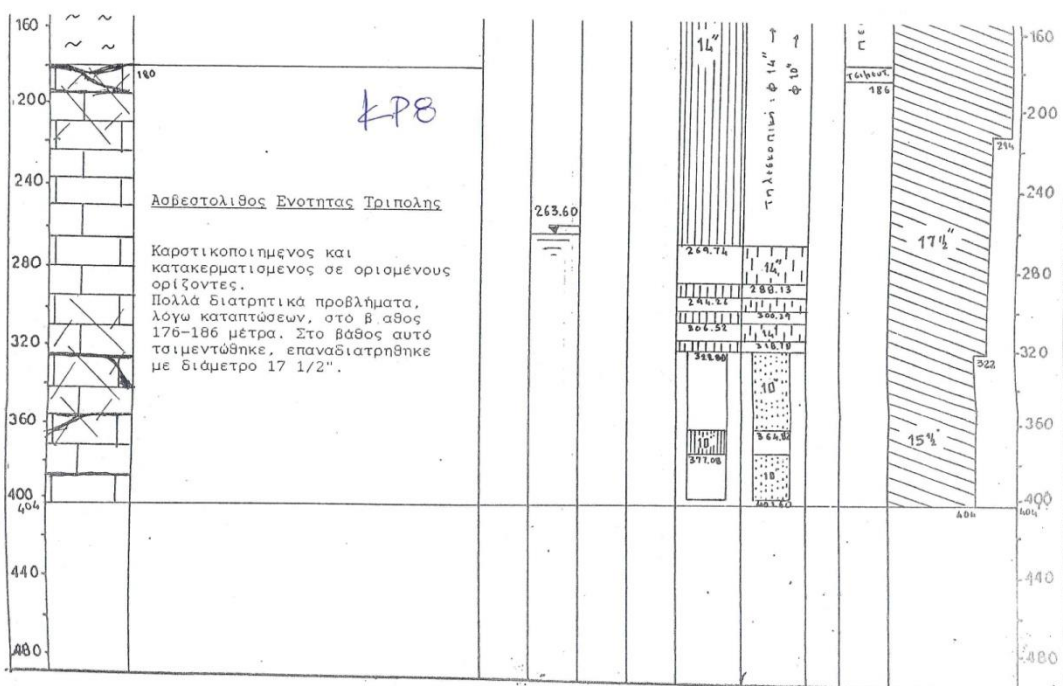
Ηρακλείο / 10ην / 1993  
Ο συντάξας

Μ. Κριτωτακίς  
Γεωλόγος ΜSc

ΓΕΩΤΡΗΣΗ : ΚΡΘ  
ΧΡΟΝΟΛΟΓΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ: ΦΕΒ-ΜΑΡ 1993  
ΓΕΩΤΡΥΠΑΝΟ : Ingersoll Rand

Ν. ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ Ν' ΣΤΑΔΙΟ

ΥΨΟΜΕΤΡΟ :  
ΚΛΙΜΑΚΑ : 1:2000



Ηρακλείο / ΙΟΥΝ / 1993  
Ο συνταξας

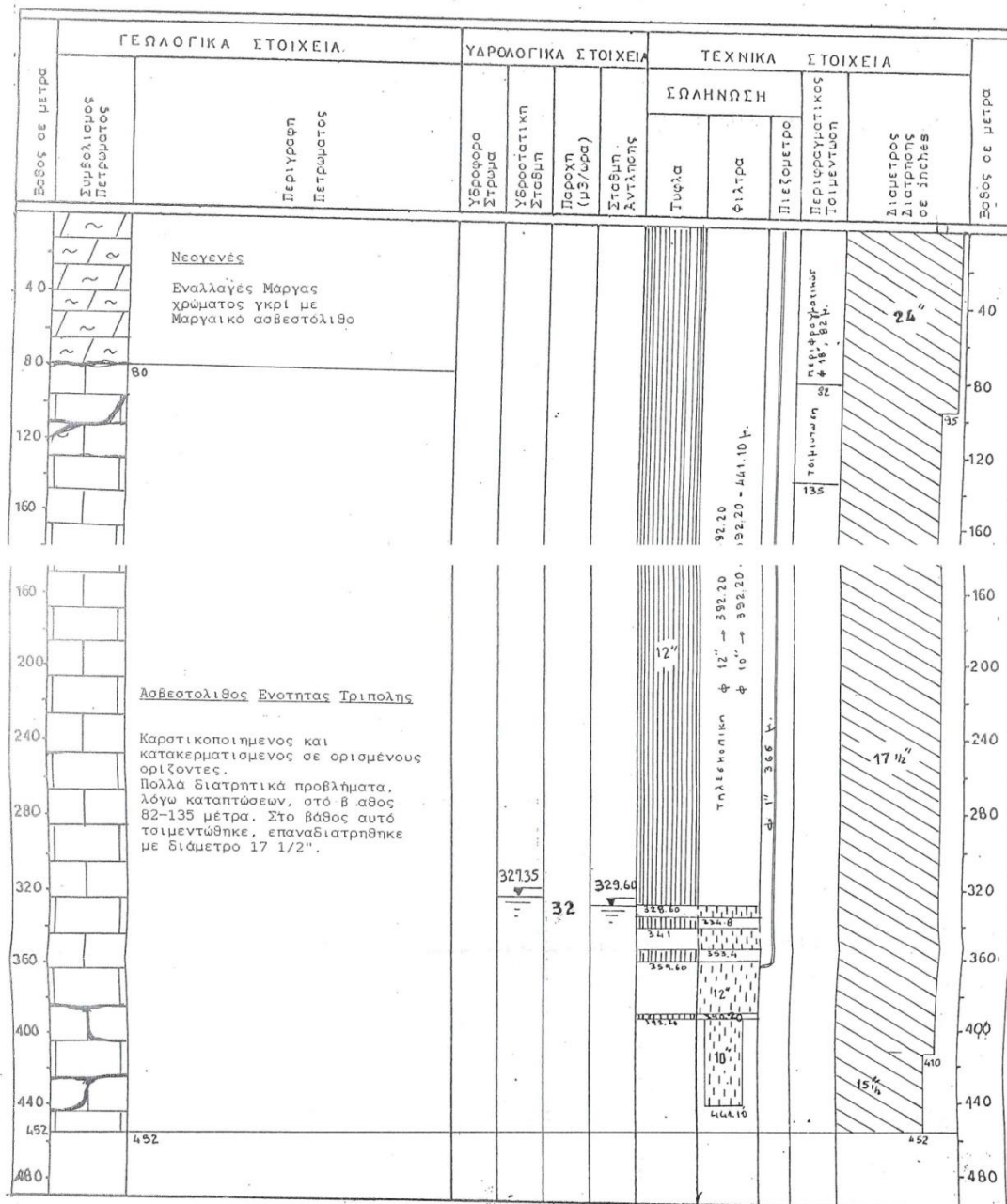
[103]

ΔΗΜΟΤΙΚΗ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΗ  
ΥΑΡΕΥΣΗΣ ΑΠΟΧΕΤΕΥΣΗΣ  
ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ

ΕΡΓΟ : ΕΡΕΥΝΑ ΥΑΡΟΦΟΡΩΝ Β. ΤΜΗΜΑΤΟΣ  
Ν. ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ Ν' ΣΤΑΔΙΟ

ΓΕΣΤΡΗΣΗ : ΚΡ3  
ΧΡΟΝΟΛΟΓΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ : ΑΥΓ 1992  
ΓΕΣΤΡΥΠΑΝΟ : Ingersoll Rand

ΑΝΔΑΧΟΣ : ΕΜΜ ΚΟΥΤΕΝΤΑΚΗΣ, ΓΕΩΛΟΓΟΣ ΕΔΕ  
ΥΨΟΜΕΤΡΟ : 372.49  
ΚΛΙΜΑΚΑ : 1:2000



ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΗ : Τη τομή συνοδεύει τεχνική έκθεση

Ηρακλείο / 10/11 / 1993  
Ο συντάξας  
Μ. Κριτωτάκης