



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΕΙΣΡΟΗΣ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ ΣΕ ΥΔΡΟΜΑΣΤΕΥΤΙΚΕΣ ΣΗΡΑΓΓΕΣ

Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΟΥ ΑΔΡΙΑΝΕΙΟΥ ΥΔΡΑΓΩΓΕΙΟΥ



ΦΑΡΜΑΚΗΣ ΧΡΥΣΑΝΘΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΜΑΜΑΣΗΣ, ΑΝ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2020



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΕΙΣΡΟΗΣ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ ΣΕ
ΥΔΡΟΜΑΣΤΕΥΤΙΚΕΣ ΣΗΡΑΓΓΕΣ**

Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΟΥ ΑΔΡΙΑΝΕΙΟΥ ΥΔΡΑΓΩΓΕΙΟΥ

ΦΑΡΜΑΚΗΣ ΧΡΥΣΑΝΘΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΜΑΜΑΣΗΣ, ΑΝ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΙΟΥΛΙΟΣ 2020

Copyright © Φαρμάκης Χρύσανθος, 2020.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS

SCHOOL OF CIVIL ENGINEERING

DEPARTMENT OF WATER RESOURCES AND ENVIRONMENTAL
ENGINEERING

DIPLOMA THESIS

INVESTIGATION OF GROUNDWATER INFLOW INTO DEWATERING TUNNELS

THE CASE OF HADRIAN'S AQUEDUCT



FARMAKIS CHRYSANTHOS

SUPERVISOR: NIKOLAOS MAMASIS, ASSOCIATE PROFESSOR NTUA

ATHENS, JULY 2020

Copyright © Farmakis Chrysanthos, 2020

All Rights Reserved

Neither the whole nor any part of this diploma thesis may be copied, stored in a retrieval system, distributed, reproduced, translated, or transmitted for commercial purposes, in any form or by any means now or hereafter known, electronic or mechanical, without the written permission from the author. Reproducing, storing and distributing this thesis for non-profitable, educational or research purposes is allowed, without prejudice to reference to its source and to inclusion of the present text. Any queries in relation to the use of the present thesis for commercial purposes must be addressed to its author.

Approval of this diploma thesis by the School of Civil Engineering of the National Technical University of Athens (NTUA) does not constitute in any way an acceptance of the views of the author contained herein by the said academic organization (L. 5343/1932, art. 202).

Μέσα στη θλίψη της απέραντης μετριότητας που μας πνίγει από παντού, παρηγοριέμαι ότι κάπου, σε κάποιο καμαράκι, κάποιοι πεισματάρηδες αγωνίζονται να εξουδετερώσουν τη φθορά. Με πλήρη επίγνωση ότι μια μέρα ο πλανήτης αυτός θα καταψυχθεί ή θ' αναφλεγεί μαζί με τα επιτεύγματά τους. Άλλης λογής ήρωες, που, αυτοί, θα βγάλουν ασπροπρόσωπη την ποτέ ανθρωπότητα.

Οδυσσέας Ελύτης

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση αυτής της εργασίας ολοκληρώνεται και η φοίτησή μου στην σχολή Πολιτικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π. Σαν φοιτητής αυτής της σχολής απέκτησα πολύτιμες εμπειρίες και γνώσεις που θα με ακολουθούν σε ολόκληρη την ζωή μου και οι οποίες με διαμόρφωσαν τόσο σαν μηχανικό όσο και σαν άνθρωπο. Παρακάτω νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω μερικούς από τους ανθρώπους που συνέβαλαν στην ολοκλήρωση των σπουδών μου και στην πραγματοποίηση αυτής της εργασίας.

Πρώτα και κύρια θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα της εργασίας Νικόλαο Μαμάση ο οποίος πέρα από τις πολύτιμες συμβουλές του πάνω σε θέματα που αφορούσαν την εργασία, με βοήθησε μέσα από τις συζητήσεις μας να καλλιεργήσω την σκέψη και την αντίληψη μου σαν μηχανικός.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους καθηγητές Παναγιώτη Παπανικολάου και Δημήτρη Κουτσογιάννη για τις πολύτιμες συμβουλές, τον διδάκτορα της σχολής Παναγιώτη Δημητριάδη για τον χρόνο που αφιέρωσε και τον πολιτικό μηχανικό της ΕΥΔΑΠ Γιώργο Σαχίνη για το πάθος που μου μετέδωσε και με οδήγησε να ασχοληθώ με το Αδριάνειο Υδραγωγείο.

Παράλληλα, θα ήθελα να αναφερθώ και τους φίλους μου που μου στάθηκαν σε αυτή την προσπάθεια. Αρχικά, θέλω να ευχαριστήσω την Ευριδίκη που ανέχτηκε τις ιδιοτροπίες μου σε ένα σωρό ομαδικές εργασίες αυτής της σχολής, την Τία, που ήταν δίπλα μου στο τέλος αυτής της προσπάθειας, τον Μάκη και την Αγγελική για την υποστήριξη και την παρέα τους όλα αυτά τα χρόνια και τους πολύ καλούς μου φίλους Γιάννη και Γιάννη που αν δεν ήταν η σχολή δεν θα τους είχα γνωρίσει.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και ιδιαίτερα τους γονείς μου Δημήτρη και Δήμητρα που με στήριξαν όλα αυτά τα χρόνια και συνεχίζουν να με στηρίζουν με κάθε τρόπο και σε κάθε μου βήμα.

Χρύσανθος Φαρμάκης

Αθήνα, Ιούλιος 2020

Περίληψη

Από την αρχαιότητα σε περιοχές με ημιάνυδρα κλίματα, οι οποίες υπέφεραν από έλλειψη επιφανειακού νερού, προέκυψε η ανάγκη για εκμετάλλευση των υπόγειων υδροφορέων. Για τον λόγο αυτό, εκτός από πηγάδια, ξεκίνησαν να κατασκευάζονται υδρομαστευτικές σήραγγες. Οι πρώτες που κατασκευάστηκαν είναι τα Qanat, που ξεκίνησαν από την Περσία και διαδόθηκαν σε πολλές περιοχές σε ολόκληρο τον κόσμο, και τα Ριϋκίους, που εντοπίζονται σε στην λεκάνη απορροής του ποταμού Rio Grande de Nazca στο Περού. Η κύρια λειτουργία τους είναι η συλλογή υπογείου νερού και η μεταφορά του με τη δύναμη της βαρύτητας σε υδρευόμενες και αρδευόμενες περιοχές στα κατάντη. Η τεχνική των υδρομαστευτικών σηράγγων ήταν ιδιαίτερα διαδεδομένη από αρχαιότητα σε διάφορες περιοχές του πλανήτη, όμως οι τεχνικές πληροφορίες σχετικά με την λειτουργία και την αποδοτικότητα των έργων αυτών είναι περιορισμένες. Στην παρούσα εργασία διερευνάται το ζήτημα της ροής υπογείων νερών προς υδρομαστευτικές σήραγγες, εξετάζοντας τις ποσότητες που εισρέουν σε σχέση με τα τεχνικά χαρακτηριστικά της σήραγγας και τα φυσιογραφικά χαρακτηριστικά του υδροφορέα. Για τον σκοπό αυτό γίνεται χρήση αναλυτικών σχέσεων καθώς και του λογισμικού SEEP/W, για διάφορα σχήματα και βαθμούς πλήρωσης της διατομής της σήραγγας με νερό. Ως μελέτη περίπτωσης εξετάζεται η περίπτωση του Αδριάνειου Υδραγωγείου της Αθήνας. Αφού παρουσιαστεί η υφιστάμενη κατάσταση του, πραγματοποιείται εκτεταμένη περιγραφή της γεωλογίας και της υδρογεωλογίας της περιοχής στην οποία εκτείνεται με σκοπό την εκτίμηση της παροχής που υδρομαστεύει. Τέλος, παρουσιάζονται οι μετρήσεις πεδίου που πραγματοποιήθηκαν στο Αδριάνειο Υδραγωγείο με σκοπό την διερεύνηση της λειτουργίας του και την εκτίμηση της παροχής του σε ορισμένα τμήματά του.

Abstract

Since antiquity, in areas with semi-arid climates which suffered from a lack of surface water, there has been a need to exploit groundwater aquifers. For this reason, in addition to wells, dewatering tunnels began to be built. The first to be constructed were the Qanat, which started in Persia and spread to many parts of the world, and the Puquios, located in the Rio Grande de Nazca River Basin in Peru. Their main function is to collect groundwater and transport it with the force of gravity to residential and irrigated areas downstream. The technique of dewatering tunnels has been widespread since antiquity in various parts of the world, but technical information on the operation and efficiency of these projects is limited. The present study investigates the issue of groundwater flow towards dewatering tunnels, examining the quantities that infiltrate in relation to the technical characteristics of the tunnel and the physiological characteristics of the aquifer. For this purpose, analytical solutions are used as well as the SEEP/W software, for various shapes and rates of filling of the cross section of the tunnel with water. The case of the Hadrian's Aqueduct of Athens is being considered as a case study. After presenting its current condition, an extensive description of the geology and hydrogeology of the area is conducted in order to assess the quantity of water that infiltrates. Finally, the field measurements carried out at the Hadrian's Aqueduct are presented in order to investigate its operation and to estimate the discharge in some sections of it.

Περιεχόμενα

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1	Αντικείμενο της εργασίας	1
1.1	Διάρθρωση της εργασίας	1
2	Αρχαίες υδρομαστευτικές σήραγγες	5
2.1	Η περίπτωση των Qanat	6
2.1.1	Οι κατηγορίες των Qanat με βάση τον τρόπο με τον οποίο τροφοδοτούνται με νερό	9
2.1.2	Τα πλεονεκτήματα των Qanat- υδρομαστευτικών στοών έναντι των κατακόρυφων πηγαδιών	10
2.2	Η περίπτωση των Ruquios στο Περού	12

ΜΕΡΟΣ Α: ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΤΗΣ ΕΙΣΡΟΗΣ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ ΣΕ ΥΔΡΟΜΑΣΤΕΥΤΙΚΕΣ ΣΗΡΑΓΓΕΣ

3	Αναλυτικές επιλύσεις για τον υπολογισμό της εισροής υπογείων νερών σε κυκλική σήραγγα	19
4	Αριθμητική επίλυση για τον υπολογισμό εισροής υπογείων νερών σε υπόγεια σήραγγα με τη χρήση του λογισμικού SEEP/W	25
4.1	Ο νόμος του Darcy	25
4.2	Οι εξισώσεις ροής των υπόγειων υδάτων	25
4.3	Εξίσωση πεπερασμένων στοιχείων	27
4.4	Βασικά βήματα για την εκτέλεση ανάλυσης μόνιμης ροής με το SEEP/W	29
4.5	Πεδίο ορισμού του αριθμητικού μοντέλου (Model domain)	30
4.5.1	Πεδίο ορισμού για κυκλική ή τετραγωνική διατομή	35
4.5.2	Πεδίο ορισμού για τετραγωνική διατομή με ή χωρίς οροφή	37
4.6	Διερεύνηση εισροής σε σχέση με το βάθος εντός του υδροφόρου	40
4.6.1	Σύγκριση εισροής σε σχέση με το βάθος σε κυκλική και τετραγωνική διατομή	40
4.6.2	Σύγκριση εισροής σε σχέση με το βάθος σε τετραγωνική διατομή με και χωρίς οροφή	42
4.6.3	Σύγκριση εισροής σε σχέση με το βάθος σε τετραγωνική διατομή με οροφή ανάλογα με το ύψος νερού εντός της διατομής	45
4.7	Σύγκριση αποτελεσμάτων αριθμητικού μοντέλου και αναλυτικών σχέσεων	49

ΜΕΡΟΣ Β: Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΟΥ ΑΔΡΙΑΝΕΙΟΥ ΥΔΡΑΓΩΓΕΙΟΥ

5	Αδριάνειο Υδραγωγείο.....	53
5.1	Γενικά Στοιχεία.....	53
5.2	Ιστορική αναδρομή.....	55
6	Η υφιστάμενη κατάσταση του Αδριάνειου Υδραγωγείου	59
6.1	Η μηκοτομή και του υδραγωγείου.....	59
6.2	Τα ενισχυτικά υδραγωγεία	60
6.3	Διαίρεση του Υδραγωγείου σε τμήματα για την εκτίμηση της παροχής που μεταφέρουν.....	62
7	Γεωλογία- Υδρογεωλογία περιοχής ενδιαφέροντος.....	67
7.1	Γεωλογική περιγραφή Λεκανοπεδίου Αττικής.....	67
7.1.1	Γεωμορφολογικά στοιχεία Λεκανοπεδίου Αττικής	67
7.1.2	Γεωλογικοί σχηματισμοί και Λιθολογία της περιοχής του Λεκανοπεδίου Αττικής 68	
7.2	Γεωλογική περιγραφή σχηματισμών κατά μήκος του Αδριάνειου Υδραγωγείου	72
7.2.1	Γεωλογικοί σχηματισμοί κατά μήκος των ενισχυτικών Υδραγωγείων	76
7.3	Υδρογεωλογική περιγραφή περιοχής ενδιαφέροντος.....	78
7.3.1	Σημαντικότερες Υδροφορίες περιοχής.....	79
7.3.2	Ανατροφοδότηση υδροφόρου ορίζοντα περιοχής.....	80
7.3.3	Πιέσεις.....	80
7.3.4	Εκτιμήσεις σχετικά με το ισοζύγιο της περιοχής.....	82
7.4	Προσδιορισμός παραμέτρων υδροφόρων σχηματισμών.....	82
7.4.1	Δοκιμαστική άντληση κτηρίου Ι.Γ.Μ.Ε.	82
7.5	Στάθμη υδροφόρου ορίζοντα κατά μήκος του Αδριάνειου Υδραγωγείου	83
7.5.1	Πιεζομετρία περιοχής Ολυμπιακού Χωριού	84
7.5.2	Μετρήσεις στάθμης υδροφόρου πλησίον του υδραγωγείου και εκτίμηση κατά μήκος του	85
8	Εφαρμογή της μεθοδολογίας εισροής υπογείων υδάτων σε σήραγγα για την εκτίμηση της παροχής εισροής σε τμήματα του Αδριάνειου Υδραγωγείου	89
8.1	Εκτίμηση παροχής υδρομάστευσης του Αδριάνειου Υδραγωγείου στο Ολυμπιακό Χωριό (φρεάτια 280-299)	91
8.2	Εκτίμηση παροχής υδρομάστευσης του Αδριάνειου Υδραγωγείου στο Ολυμπιακό Χωριό (φρεάτια 271-279)	92
8.3	Εκτίμηση παροχής υδρομάστευσης του Αδριάνειου Υδραγωγείου ανάμεσα στα φρεάτια 255-270.....	93

8.4	Εκτίμηση παροχής υδρομάστευσης του Αδριάνειου Υδραγωγείου ανάμεσα στα φρεάτια 246-253.....	94
8.5	Εκτίμηση παροχής υδρομάστευσης του Αδριάνειου Υδραγωγείου ανάμεσα στα φρεάτια 240-245.....	95
8.6	Εκτίμηση παροχής υδρομάστευσης του Αδριάνειου Υδραγωγείου ανάμεσα στα φρεάτια 239-239B (Υδρομαστευτική στοά Κηφισού).....	96
8.7	Εκτίμηση παροχής υδρομάστευσης του Αδριάνειου Υδραγωγείου ανάμεσα στα φρεάτια 150-239.....	97
8.8	Εκτίμηση παροχής υδρομάστευσης του Αδριάνειου Υδραγωγείου ανάμεσα στα φρεάτια 119-150.....	98
8.9	Εκτίμηση παροχής υδρομάστευσης του Αδριάνειου Υδραγωγείου ανάμεσα στο ΓΕΕΘΑ (έμφραξη ανάμεσα στα φρεάτια 32-44) και στο φρεάτιο 80	99
8.10	Εκτίμηση παροχής υδρομάστευσης του Αδριάνειου Υδραγωγείου ανάμεσα στο φρεάτιο 18Α και το ΓΕΕΘΑ (έμφραξη ανάμεσα στα φρεάτια 32-44).....	100
9	Μετρήσεις πεδίου για την διερεύνηση της λειτουργίας του Αδριάνειου Υδραγωγείου και υπολογισμός της παροχής του στην Πανόρμου	101
9.1	Η λειτουργία του φρεατίου 18Α στην Πανόρμου	101
9.1.1	Άντληση στο φρεάτιο 18Α στην Πανόρμου τον Σεπτέμβριο του 2018 και εκτίμηση της εισερχόμενης σε αυτό παροχής.....	105
9.1.2	Άντληση στο φρεάτιο 18Α στην Πανόρμου τον Ιούνιο του 2019 και εκτίμηση της εισερχόμενης σε αυτό παροχής	106
9.1.3	Άντληση στο φρεάτιο 18Α στην Πανόρμου τον Σεπτέμβριο του 2019 και εκτίμηση της εισερχόμενης σε αυτό παροχής.....	109
9.2	Η παροχή του Υδραγωγείου στο Κολωνάκι.....	112
9.2.1	Η παροχή του Υδραγωγείου στην εκροή του στο Κολωνάκι από τον Ιούλιο του 2019 έως τον Φεβρουάριο του 2020	112
9.2.2	Η παροχή του Υδραγωγείου στην εκροή του στο Κολωνάκι κατά την διάρκεια της άντλησης τον Σεπτέμβριο του 2019.....	113
9.3	Συμπεράσματα για την παροχή του Αδριάνειου Υδραγωγείου στο φρεάτιο 18Α και στο Κολωνάκι και για την συμπεριφορά της άντλησης στο φρεάτιο 18Α	114
10	Σύνοψη αποτελεσμάτων- Συμπεράσματα- Μελλοντική έρευνα.....	117
11	Βιβλιογραφία.....	121
12	Παράρτημα.....	125

Ευρετήριο Σχημάτων

Σχήμα 3. 1 Υπολογισμός της αδιαστατοποιημένης παροχής εισροής στην κυκλική σήραγγα (Q/Kh) συναρτήσει του λόγου ακτίνας σήραγγας προς βάθος αυτής εντός του υδροφόρου (r/h) για διάφορες αναλυτικές σχέσεις.....	21
Σχήμα 3. 2 Επί τοις εκατό μεταβολή στα δεδομένα εισόδου της αναλυτικής σχέσης κατά El Tani (2003) συναρτήσει της επι τοις εκατό μεταβολής στην υπολογιζόμενη παροχή εισροής με αρχικές τιμές $h=30\text{ m}$, $r=0.35\text{ m}$, $K=5E-6\text{ m/s}$	22
Σχήμα 3. 3 Νομογράφημα για τον υπολογισμό της παροχής εισροής σε κυκλική σήραγγα σύμφωνα με την αναλυτική σχέση κατά El Tani (2003).....	23
Σχήμα 4. 1 Ο λόγος της αριθμητικής από την αναλυτική υπολογιζόμενη εισροή σε κυκλική σήραγγα χωρίς επένδυση συναρτήσει του μεγέθους του πεδίου ορισμού του αριθμητικού μοντέλου, για τα διάφορα βάθη της σήραγγας εντός του υδροφόρου και για διαφορετικές οριακές συνθήκες	33
Σχήμα 4. 2 Ο λόγος της αριθμητικής από την αναλυτική υπολογιζόμενη εισροή σε κυκλική σήραγγα χωρίς επένδυση συναρτήσει του μεγέθους του πεδίου ορισμού του αριθμητικού μοντέλου για 3 διαφορετικές οριακές συνθήκες και για $r/h=0,03$	34
Σχήμα 4. 3 Ο λόγος της αριθμητικής από την αναλυτική υπολογιζόμενη εισροή σε κυκλική σήραγγα χωρίς επένδυση συναρτήσει του μεγέθους του πεδίου ορισμού του αριθμητικού μοντέλου για 3 διαφορετικές οριακές συνθήκες και για $r/h=0,06$	34
Σχήμα 4. 4 Ο λόγος της υπολογιζόμενης εισροής για συγκεκριμένο μέγεθος πεδίου ορισμού προς την υπολογιζόμενη εισροή για αρκετά μεγάλο πεδίο ορισμού, σε κυκλική και τετραγωνική σήραγγα χωρίς επένδυση, συναρτήσει του μεγέθους του πεδίου ορισμού του αριθμητικού μοντέλου, για τα διάφορα βάθη της σήραγγας εντός του υδροφόρου.....	36
Σχήμα 4. 5 Η υπολογιζόμενη εισροή σε κυκλική και τετραγωνική σήραγγα χωρίς επένδυση συναρτήσει του μεγέθους του πεδίου ορισμού του αριθμητικού μοντέλου για τα διάφορα βάθη της σήραγγας εντός του υδροφόρου για $K=5 \times 10^{-6}\text{ m/s}$, $r=0.30\text{m}$	37
Σχήμα 4. 6 Ο λόγος της υπολογιζόμενης εισροής για συγκεκριμένο μέγεθος πεδίου ορισμού προς την υπολογιζόμενη εισροή για αρκετά μεγάλο πεδίο ορισμού, σε τετραγωνική και σε τετραγωνική με οροφή σήραγγα χωρίς επένδυση, συναρτήσει του μεγέθους του πεδίου ορισμού του αριθμητικού μοντέλου, για τα διάφορα βάθη της σήραγγας εντός του υδροφόρου.....	39
Σχήμα 4. 7 Η υπολογιζόμενη εισροή σε τετραγωνική και τετραγωνική με οροφή σήραγγα χωρίς επένδυση συναρτήσει του μεγέθους του πεδίου ορισμού του αριθμητικού μοντέλου για τα διάφορα βάθη της σήραγγας εντός του υδροφόρου για $K=5 \times 10^{-6}\text{ m/s}$, $b=0.50\text{m}$	40
Σχήμα 4. 8 Παροχή εισροής σε κυκλική και τετραγωνική σήραγγα συναρτήσει του βάθους εντός του υδροφόρου για $r=0.30\text{ m}$ και $K=5 \times 10^{-6}\text{ m/s}$	41
Σχήμα 4. 9 Μεταβολή του λόγου της παροχής εισροής σε κυκλική προς τετραγωνική σήραγγα συναρτήσει του βάθους που βρίσκεται αυτή εντός του υδροφόρου για $K=5 \times 10^{-6}\text{ m/s}$, $r=0.30\text{ m}$	42
Σχήμα 4. 10 Παροχή εισροής σε τετραγωνική με οροφή και χωρίς οροφή σήραγγα συναρτήσει του βάθους εντός του υδροφόρου για $b=0.50\text{ m}$ και $K=5 \times 10^{-6}\text{ m/s}$	44

Σχήμα 4. 11 Μεταβολή του λόγου της παροχής εισροής σε τετραγωνική με οροφή προς τετραγωνική χωρίς οροφή σήραγγα συναρτήσει του βάθους εντός του υδροφόρου για $K=5 \times 10^{-6}$ m/s, $b=0.50$ m.....	45
Σχήμα 4. 12 Παροχή εισροής σε τετραγωνική με τριγωνική οροφή σήραγγα συναρτήσει του βάθους του οποίου η σήραγγα βρίσκεται εντός του υδροφόρου για $b=0.50$ m και $K=5 \times 10^{-6}$ m/s	48
Σχήμα 4. 13 Μεταβολή του λόγου της παροχής εισροής σε τετραγωνική με τριγωνική οροφή σήραγγα με νερό προς ίδια σήραγγα χωρίς νερό, συναρτήσει του βάθους εντός του υδροφόρου για $K=5 \times 10^{-6}$ m/s, $b=0.50$ m	49
Σχήμα 4. 14 Παροχή εισροής ανά μέτρο μήκους της σήραγγας συναρτήσει του λόγου r/h , με βάση τις διάφορες αναλυτικές σχέσεις και το αριθμητικό μοντέλο, για $r=0,30$ m και $K=5 \times 10^{-6}$ m/s 50	
Σχήμα 4. 15 Παροχή εισροής ανά μέτρο μήκους με βάση τις διάφορες αναλυτικές σχέσεις προς παροχή εισροής ανά μέτρο μήκους με βάση το αριθμητικό μοντέλο, συναρτήσει του λόγου r/h , για $r=0,30$ m και $K=5 \times 10^{-6}$ m/s	51
Σχήμα 7. 1 Μηκοτομή Αδριάνειου Υδραγωγείου με την εκτιμώμενη στάθμη του υδροφόρου κατά μήκος του Υδραγωγείου	88
Σχήμα 8. 1 Παροχή εισροής ανά μέτρο μήκους της σήραγγας, ανά μέτρο βάθους εντός του υδροφόρου προς υδροπερατότητα συναρτήσει του βάθους εντός του υδροφόρου για την χαρακτηριστική διατομή του Αδριάνειου Υδραγωγείου	90
Σχήμα 8. 2 Μηκοτομή του Αδριάνειου Υδραγωγείου ανάμεσα στα φρεάτια 280-299	91
Σχήμα 8. 3 Μηκοτομή του Αδριάνειου Υδραγωγείου ανάμεσα στα φρεάτια 271-279	92
Σχήμα 8. 4 Μηκοτομή του Αδριάνειου Υδραγωγείου ανάμεσα στα φρεάτια 255-270	93
Σχήμα 8. 5 Μηκοτομή του Αδριάνειου Υδραγωγείου ανάμεσα στα φρεάτια 246-253	94
Σχήμα 8. 6 Μηκοτομή του Αδριάνειου Υδραγωγείου ανάμεσα στα φρεάτια 240-245	95
Σχήμα 8. 7 Μηκοτομή του Αδριάνειου Υδραγωγείου ανάμεσα στα φρεάτια 239Α-239.....	96
Σχήμα 8. 8 Μηκοτομή του Αδριάνειου Υδραγωγείου ανάμεσα στα φρεάτια 150-239	97
Σχήμα 8. 9 Μηκοτομή του Αδριάνειου Υδραγωγείου ανάμεσα στα φρεάτια 119-150	98
Σχήμα 8. 10 Μηκοτομή του Αδριάνειου Υδραγωγείου ανάμεσα στο ΓΕΕΘΑ (φρεάτια 32-44) και φρεάτιο 80.....	99
Σχήμα 8. 11 Μηκοτομή του Αδριάνειου Υδραγωγείου ανάμεσα στο φρεάτιο 18Α και το ΓΕΕΘΑ (φρεάτια 32-44)	100
Σχήμα 9. 1 Κρίσιμο και ομοιόμορφο βάθος νερού στον κυκλικό αγωγό υπερχειλίσης του φρεατίου 18Α συναρτήσει της παροχής	104
Σχήμα 9. 2 Ομοιόμορφο βάθος νερού στον κυκλικό αγωγό υπερχειλίσης του φρεατίου 18Α συναρτήσει της παροχής.....	104

<i>Σχήμα 9. 3 Απόλυτη στάθμη νερού στα φρεάτια κατά την διάρκεια της άντλησης, Ιούνιος 2019</i>	107
<i>Σχήμα 9. 4 Απόσταση επιφάνειας νερού από το έδαφος σε κάθε φρεάτιο κατά την διάρκεια της άντλησης, Ιούνιος 2019.....</i>	108
<i>Σχήμα 9. 5 Βάθος νερού σε κάθε φρεάτιο κατά την διάρκεια της άντλησης, Ιούνιος 2019</i>	108
<i>Σχήμα 9. 6 Απόλυτη στάθμη νερού στα φρεάτια κατά την διάρκεια της άντλησης, Σεπτέμβριος 2019.....</i>	109
<i>Σχήμα 9. 7 Απόσταση επιφάνειας νερού από το έδαφος σε κάθε φρεάτιο κατά την διάρκεια της άντλησης, Σεπτέμβριος 2019.....</i>	110
<i>Σχήμα 9. 8 Βάθος νερού σε κάθε φρεάτιο κατά την διάρκεια της άντλησης, Σεπτέμβριος 2019</i>	110
<i>Σχήμα 9. 9 Μέτρηση παροχής στην έξοδο του Αδριάνειου Υδραγωγείου από 07/2019 έως 02/2020 σε L/s (Γ. Σαχίνης, 2020).....</i>	113
<i>Σχήμα 9. 10 Παροχή στο Κολωνάκι κατά την διάρκεια της άντλησης και της επαναφοράς της στάθμης τον Σεπτέμβριο του 2019 (Γ. Σαχίνης, 2019).....</i>	114
<i>Σχήμα 10. 1 Μηκοτομή του Αδριάνειου Υδραγωγείου με τα σημεία των εμφράξεων, τις γνωστές και τις εκτιμώμενες παροχές</i>	118

Ευρετήριο Πινάκων

<i>Πίνακας 3. 1 Αναλυτικές σχέσεις για τον υπολογισμό εισροής σε κυκλική σήραγγα (Farhadian, et al., 2012; Farhadian & Katibeh, 2017), μετά από τροποποίηση</i>	20
<i>Πίνακας 4. 1 Μεταβλητές των εξισώσεων ροής των υπογείων υδάτων</i>	26
<i>Πίνακας 4. 2 Μεταβλητές εξίσωσης πεπερασμένων στοιχείων</i>	28
<i>Πίνακας 4. 3 Μεταβλητές του αθροίσματος του χαρακτηριστικού μητρώου</i>	29
<i>Πίνακας 6. 1 Τμήματα του Αδριάνειου Υδραγωγείου</i>	66
<i>Πίνακας 7. 1 Γεωλογικοί σχηματισμοί κατά μήκος του Αδριάνειου Υδραγωγείου</i>	75
<i>Πίνακας 7. 2 Στοιχεία των γεωτρήσεων πλησίον του άξονα του Αδριάνειου Υδραγωγείου και εκτίμησης της στάθμης του υδροφόρου στα κοντινότερα στις γεωτρήσεις φρεάτια.....</i>	87
<i>Πίνακας 9. 1 Εξισώσεις υπολογισμού του κρίσιμου και του ομοιόμορφου βάθους.....</i>	102
<i>Πίνακας 9. 2 Παροχή υπερχείλισης φρεατίου 18Α συναρτήσει του βάθους νερού στον κυκλικό αγωγό.....</i>	103

Ευρετήριο Εικόνων

<i>Εικόνα 2. 1</i> Εσωτερικό υδρομαστευτικής σήραγγας, Αδριάνειο Υδραγωγείο (Δευτεραίος, 2014)	5
<i>Εικόνα 2. 2</i> Παράδειγμα υδρομαστευτικής σήραγγας (Taghavi-Jeloudar, et al., 2013)	6
<i>Εικόνα 2. 3</i> Αεροφωτογραφία Qanat στο Ιράν	7
<i>Εικόνα 2. 4</i> Σχηματική διασπορά της τεχνολογίας των Qanat στις διάφορες περιοχές του κόσμου (Miller FP, 2009)	8
<i>Εικόνα 2. 5</i> Παγκόσμιος χάρτης με τις περιοχές στις οποίες έχουν εντοπιστεί Qanat (Salih, 2006)	8
<i>Εικόνα 2. 6</i> Μηκοτομή και κάτοψη Qanat (Lightfoot, 1997)	9
<i>Εικόνα 2. 7</i> Δεξαμενή Ab Anbar στην πόλη Naeen του Ιράν	10
<i>Εικόνα 2. 8</i> Σχηματική απεικόνιση λειτουργίας Ab Anbar (Saeidian, 2013)	11
<i>Εικόνα 2. 9</i> Νερόμυλος τοποθετημένος σε Qanat για την παραγωγή ενέργειας (Taghavi-Jeloudar, et al., 2013)	11
<i>Εικόνα 2. 10</i> Σπειροειδή φρεάτια κατά μήκος των Riquios	12
<i>Εικόνα 2. 11</i> Σπειροειδές φρεάτιο των Riquios	13
<i>Εικόνα 2. 12</i> Κατάντη τμήμα των Riquios όπου το νερό ρέει σε ανοιχτό κανάλι (Proulx, 2008)	14
<i>Εικόνα 2. 13</i> Μηκοτομή των Riquios (Mamassis, 2017), μετά από επεξεργασία	14
<i>Εικόνα 3. 1</i> Σκαρίφημα κυκλικής σήραγγας σε ημιάπειρο υδροφόρο (Nikvar Hassani, et al., 2017), μετά από τροποποίηση	20
<i>Εικόνα 4. 1</i> Σχηματική απεικόνιση του πεδίου ορισμού, όπου h το βάθος της σήραγγας από την στάθμη του υδροφόρου και $ME1$ και $ME2$ το χαρακτηριστικό μέγεθος του πεδίου ορισμού του αριθμητικού μοντέλου για δύο διαφορετικής έκτασης μοντέλα (Butscher, 2012)	31
<i>Εικόνα 4. 2</i> Αριθμητικό μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων για την ροή υπογείων νερών προς κυκλική σήραγγα	32
<i>Εικόνα 4. 3</i> α) Κυκλική διατομή σήραγγας με ακτίνα r , β) τετραγωνική διατομή σήραγγας με πλευρά b και περίμετρο ίση με την περίμετρο κυκλικής διατομής με ακτίνα r	35
<i>Εικόνα 4. 4</i> α) Τετραγωνική διατομή σήραγγας με πλευρά b , β) τετραγωνική με οροφή διατομή σήραγγας με πλευρά b και ύψος οροφής b	38
<i>Εικόνα 4. 5</i> α) Κυκλική διατομή σήραγγας με ακτίνα r , β) τετραγωνική διατομή σήραγγας με πλευρά b και περίμετρο ίση με την περίμετρο κυκλικής διατομής με ακτίνα r	41
<i>Εικόνα 4. 6</i> α) Τετραγωνική διατομή σήραγγας με πλευρά b , β) τετραγωνική με οροφή διατομή σήραγγας με πλευρά b και ύψος οροφής b	43

<i>Εικόνα 4. 7 Τετραγωνική με οροφή διατομή σήραγγας με πλευρά b και ύψος οροφής b, εντός της οποίας το νερό βρίσκεται σε ύψος: α) $1/4 b$, β) $2/4 b$, γ) $3/4 b$, δ) $4/4 b$</i>	<i>46</i>
<i>Εικόνα 4. 8 Αριθμητικό μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων για την ροή υπογείων νερών προς ορθογωνική με τριγωνική οροφή σήραγγα</i>	<i>47</i>
<i>Εικόνα 5. 1 Χάραξη σήραγγας Αδριάνειου Υδραγωγείου</i>	<i>53</i>
<i>Εικόνα 5. 2 Διάφορες διατομές κατά μήκος του Αδριάνειου Υδραγωγείου</i>	<i>54</i>
<i>Εικόνα 5. 3 Σύγχρονη δεξαμενή του 1880 πλησίον ρωμαϊκής δεξαμενής (Δευτεραίος, 2019) .</i>	<i>56</i>
<i>Εικόνα 5. 4 Ανακατασκευασμένη δεξαμενή στην θέση της ρωμαϊκής δεξαμενής (Δευτεραίος, 2019).....</i>	<i>56</i>
<i>Εικόνα 5. 5 Χάραξη αγωγών της ULEN που αντικατέστησαν το «κτιστό» υδραγωγείο Κυριακού</i>	<i>57</i>
<i>Εικόνα 5. 6 Φρεάτιο στο οποίο εκβάλλει το νερό του Αδριάνειου Υδραγωγείου επί της οδού Γλύκωνος.....</i>	<i>58</i>
<i>Εικόνα 6. 1 Μηκοτομή Αδριάνειου Υδραγωγείου (Τσιούρη, 2018)</i>	<i>59</i>
<i>Εικόνα 6. 2 Τα ενισχυτικά υδραγωγεία κατά μήκος του Αδριάνειου Υδραγωγείου (Δευτεραίος, 2019).....</i>	<i>60</i>
<i>Εικόνα 6. 3 Λεκάνες απορροής ενισχυτικών υδραγωγείων-ρεμάτων Αδριάνειου Υδραγωγείου</i>	<i>62</i>
<i>Εικόνα 6. 4 Αγωγός by-pass που αντικατέστησε εγκαταλελειμμένο τμήμα του Αδριάνειου στο ύψος του Κηφισού.....</i>	<i>64</i>
<i>Εικόνα 7. 1 Ρηξιγενείς ζώνες λεκανοπεδίου Αττικής (Papanicolaou, 2004).....</i>	<i>68</i>
<i>Εικόνα 7. 2 Απεικόνιση γεωλογικής δομής λεκανοπεδίου Αθηνών (Papanicolaou, 2004).....</i>	<i>70</i>
<i>Εικόνα 7. 3 α) Γεωτεκτονικός χάρτης λεκανοπεδίου Αττικής β) Γεωτεκτονικός χάρτης δυτικού Λεκανοπεδίου Αττικής γ) Γεωτεκτονικός χάρτης στο κέντρο του λεκανοπεδίου Αττικής (Papanicolaou, 2004).....</i>	<i>71</i>
<i>Εικόνα 7. 4 Χάρτης με τους γεωλογικούς σχηματισμούς κατά μήκος του Αδριάνειου Υδραγωγείου (Chiotis, 2018).....</i>	<i>76</i>
<i>Εικόνα 7. 5 Χάραξη του Αδριάνειου Υδραγωγείου στον χάρτη των υπόγειων υδατικών συστημάτων της Αττικής.....</i>	<i>79</i>
<i>Εικόνα 7. 6 Χάρτης σημείων υδροληψίας Ειδικής Γραμματείας Υδάτων για το λεκανοπέδιο Αττικής, με πράσινο κύκλο συμβολίζονται οι ενεργές γεωτρήσεις και με κόκκινο κύκλο οι ανενεργές</i>	<i>81</i>
<i>Εικόνα 7. 7 Φύλλο Step Test τεχνική έκθεσης υπολογισμού υδροπερατότητας υδροφόρου Ολυμπιακού Χωριού (Vrellis, 2010).....</i>	<i>83</i>

<i>Εικόνα 7. 8 Πιεζομετρικές γραμμές υδροφόρου περιοχής Ολυμπιακού Χωριού, από υδρογεωλογική έρευνα περιοχής (Σιέμος Ν., 2006).....</i>	<i>84</i>
<i>Εικόνα 7. 9 Στάθμη υδροφόρου κατά μήκος των πρώτων 2000 m του Αδριάνειου Υδραγωγείου (Chiotis, 2018).....</i>	<i>85</i>
<i>Εικόνα 7. 10 Σημεία μετρήσεων στάθμης υδροφόρου ορίζοντα (Kallioras, 2019)</i>	<i>86</i>
<i>Εικόνα 8. 1 Τυπική διατομή αδριάνειου Υδραγωγείου, με $b=0,5\text{ m}$.....</i>	<i>89</i>
<i>Εικόνα 9. 1 Σχέδιο φρεατίου 18Α (Αντλιοστάσιο Πανόρμου)</i>	<i>101</i>
<i>Εικόνα 9. 2 Σκαρίφημα του Αδριάνειου Υδραγωγείου πριν την διάνοιξη της σήραγγας του Μετρό στο ύψος της Πανόρμου</i>	<i>102</i>
<i>Εικόνα 9. 3 Σκαρίφημα του Αδριάνειου Υδραγωγείου μετά την διάνοιξη της σήραγγας του Μετρό στο ύψος της Πανόρμου</i>	<i>102</i>

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1 Αντικείμενο της εργασίας

Οι υδρομαστευτικές σήραγγες αποτελούν ένα από τους αρχαιότερους τρόπους συλλογής νερού. Η βασική λειτουργία τους είναι η συλλογή υπογείου νερού και η μεταφορά του με τη δύναμη της βαρύτητας σε κατοικημένες και αρδευόμενες περιοχές. Η ανάγκη για τέτοιες σήραγγες προέκυψε σε περιοχές με ημιάνυδρα κλίματα οι οποίες υπέφεραν από έλλειψη επιφανειακού νερού και η εκμετάλλευση των υπογείων υδροφορέων ήταν επιτακτική. Σε σχέση με τα κατακόρυφα πηγάδια οι υδρομαστευτικές σήραγγες έχουν δύο κύρια πλεονεκτήματα: (α) δεν απαιτείται χρήση μηχανικής ενέργειας για την άντληση και μεταφορά του νερού και (β) έχουν ηπιότερη επίδραση στην κατάσταση του υδροφορέα. Η τεχνική των υδρομαστευτικών σηράγγων είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη από την αρχαιότητα σε πολλές περιοχές του πλανήτη, όμως οι τεχνικές πληροφορίες που είναι δημοσιευμένες σχετικά με τις ποσότητες νερού που μπορούν να συλλέξουν είναι περιορισμένες. Γίνεται λοιπόν φανερό η ανάγκη για περαιτέρω διερεύνηση της λειτουργίας και της αποδοτικότητας των έργων αυτών.

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται το ζήτημα της ροής των υπογείων νερών προς υδρομαστευτικές σήραγγες, εξετάζοντας τις ποσότητες που εισρέουν σε σχέση με τα τεχνικά χαρακτηριστικά της σήραγγας και τα φυσιογραφικά χαρακτηριστικά του υδροφορέα. Ως μελέτη περίπτωσης διερευνήθηκε η περίπτωση του Αδριάνειου υδραγωγείου της Αθήνας, το οποίο σε τμήματα του υδρομαστεύει υπόγεια νερά και τα μεταφέρει με βαρύτητα στα κατάντη.

1.1 Διάρθρωση της εργασίας

Η εργασία αναπτύσσεται σε τρία μέρη: (α) το εισαγωγικό (Κεφάλαια 1 και 2) όπου γίνεται μία ιστορική αναδρομή στις υδρομαστευτικές σήραγγες, (β) το Μέρος Α (Κεφάλαια 3 και 4) όπου εξετάζεται το πρόβλημα της εισροής υπογείων νερών στις σήραγγες αυτές και (γ) το Μέρος Β (Κεφάλαια 5 έως 9) όπου εξετάζεται διεξοδικά η περίπτωση του Αδριάνειου Υδραγωγείου το οποίο σε ορισμένα τμήματά του συλλέγει υπόγεια νερά και τα μεταφέρει με βαρύτητα στα κατάντη.

Ειδικότερα:

Στο Κεφάλαιο 1 αναφέρεται το αντικείμενο και η διάρθρωση της εργασίας.

Στο Κεφάλαιο 2 περιγράφονται οι αρχαιότερες υδρομαστευτικές σήραγγες που έχουν ανακαλυφθεί στον πλανήτη. Αυτές είναι τα Qanat που ξεκίνησαν από την Περσία και διαδόθηκαν σε πολλές περιοχές σε ολόκληρο τον κόσμο και τα Puquios που εντοπίζονται στην λεκάνη απορροής του ποταμού Rio Grande de Nazca στο Περού και η πιθανότερη εξήγηση είναι ότι κατασκευάστηκαν από τον αρχαίο πολιτισμό των Nazca που κατοικούσε στην περιοχή κατά την προ-Κολομβιανή εποχή

Στο Κεφάλαιο 3 περιγράφονται οι αναλυτικές επιλύσεις με τις παραδοχές τους για τον υπολογισμό της εισερχόμενης παροχής σε κυκλική σήραγγα που βρίσκεται εντός υδροφορέα. Οι αναλυτικές αυτές σχέσεις συγκρίνονται μεταξύ τους ως προς τα αποτελέσματα που δίνουν για τα διάφορα βάθη που μπορεί να βρίσκεται η σήραγγα. Ακόμη επιλέγεται μια από τις σχέσεις

αυτές και εξετάζεται η επίδραση της κάθε μεταβλητής στο αποτέλεσμα της αναλυτικής σχέσης και τέλος παρουσιάζεται ένα νομογράφημα για τον υπολογισμό της εισροής ανά μέτρο μήκους της κυκλικής σήραγγας.

Στο Κεφάλαιο 4, το οποίο αποτελείται από επτά επιμέρους υποκεφάλαια, διερευνάται με την χρήση του λογισμικού SEEP/W η εισροή σε υδρομαστευτικές σήραγγες για διάφορους βαθμούς πλήρωσης της διατομής της σήραγγας με νερό και για διάφορα σχήματα, τα οποία επιλέγονται με βάση τις τυπικές διατομές του Αδριάνειου Υδραγωγείου. Αρχικά, επεξηγείται το αριθμητικό μοντέλο και οι παραδοχές που γίνονται και έπειτα, αφού γίνει διερεύνηση για τις ελάχιστες διαστάσεις του πεδίου ορισμού, πραγματοποιείται ανάλυση για τις διάφορες περιπτώσεις διατομής και βαθμού πλήρωσης αυτής σε νερό. Τέλος, γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων του αριθμητικού μοντέλου και των αναλυτικών σχέσεων για την περίπτωση της κυκλικής σήραγγας.

Στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται ορισμένα γενικά στοιχεία για το Αδριάνειο Υδραγωγείο και στη συνέχεια πραγματοποιείται μια ιστορική αναδρομή της λειτουργίας του από την κατασκευή του (2ος αιώνας μ.Χ.) μέχρι σήμερα.

Στο Κεφάλαιο 6 συνοψίζεται η υφιστάμενη κατάσταση του Αδριάνειου Υδραγωγείου. Αρχικά παρουσιάζεται η μηκοτομή του, περιγράφονται τα ενισχυτικά υδραγωγεία που το τροφοδοτούσαν σε διάφορα σημεία του και τέλος παρουσιάζονται τα τμήματα στα οποία χωρίζεται το Αδριάνειο Υδραγωγείο λόγω των διαφόρων ολικών ή μερικών εμφράξεων σε διάφορα φρεάτια του.

Στο Κεφάλαιο 7 πραγματοποιείται μια εκτεταμένη καταγραφή της γεωλογίας και της υδρογεωλογίας της περιοχής στην οποία εκτείνεται το Αδριάνειο Υδραγωγείο. Αρχικά, περιγράφεται η γεωλογία του Λεκανοπεδίου της Αττικής και αναλύονται οι γεωλογικοί σχηματισμοί τους οποίους διασχίζει ο κύριος κλάδος καθώς και τα ενισχυτικά υδραγωγεία. Στη συνέχεια περιγράφεται η υδρογεωλογία της περιοχής και καταγράφονται τα υπάρχοντα στοιχεία των υδροφόρων που διασχίζει το Υδραγωγείο. Τα υφιστάμενα δεδομένα είναι περιορισμένα και δυσχεραίνουν την προσπάθεια για αξιόπιστη εκτίμηση της υδρομάστευσης. Τέλος, παρουσιάζεται μία εκτίμηση της στάθμης του υδροφόρου κατά μήκος του Αδριάνειου Υδραγωγείου με βάση τα στοιχεία από έναν περιορισμένο αριθμό γεωτρήσεων που βρίσκονται στην ευρύτερη περιοχή.

Στο Κεφάλαιο 8 πραγματοποιείται εκτίμηση της παροχής που υδρομαστεύει ένα τμήμα της σήραγγα του Αδριάνειου Υδραγωγείου με βάση την μεθοδολογία που αναπτύσσεται στο Μέρος Α της παρούσας εργασίας. Ακόμη γίνεται εκτίμηση της υδρομάστευσης και σε άλλα τμήματα της υπόγειας σήραγγας αν και δεν υπάρχουν τα απαραίτητα στοιχεία υδροπερατότητας των υδροφόρων που διασχίζει το Αδριάνειο Υδραγωγείου σε ολόκληρο το μήκος του.

Στο Κεφάλαιο 9 παρουσιάζονται οι μετρήσεις πεδίου που πραγματοποιήθηκαν στο Αδριάνειο Υδραγωγείο, κατά την διάρκεια δοκιμαστικών αντλήσεων σε συγκεκριμένο φρεάτιο του, με σκοπό την εκτίμηση της παροχής στο συγκεκριμένο σημείο και τον προσδιορισμό πιθανών ανεπιθύμητων εμφράξεων ή εκροών από αυτό. Επίσης, καταγράφονται οι μετρήσεις παροχής στην εκροή του υδραγωγείου στο Κολωνάκι και εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με την λειτουργία του.

Στο Κεφάλαιο 10 συνοψίζονται τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα της διπλωματικής και πραγματοποιούνται προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

Τέλος, στο Κεφάλαιο 11 παρουσιάζεται η βιβλιογραφία και στο Κεφάλαιο 12 το παράρτημα που περιλαμβάνει τα χαρακτηριστικά της μηκοτομής του Αδριάνειου Υδραγωγείου.

2 Αρχαίες υδρομαστευτικές σήραγγες

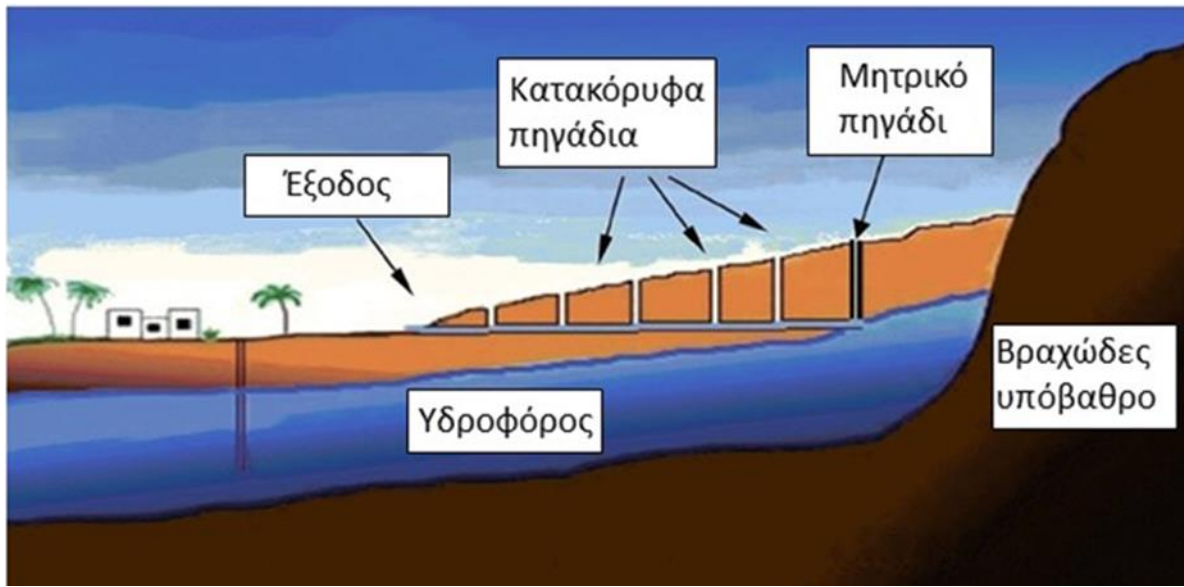
Η ανάγκη για την κάλυψη των υδρευτικών και αρδευτικών αναγκών σε περιοχές που λόγω του κλίματός τους αντιμετώπιζαν προβλήματα λειψυδρίας οδήγησε αρκετούς αρχαίους πολιτισμούς να στραφούν στα υπόγεια νερά και στην κατασκευή υπόγειων υδρομαστευτικών στοών-σήραγγων (Εικόνα 2. 1). Οι υδρομαστευτικές σήραγγες έχουν ως σκοπό την εκμετάλλευση των υπόγειων υδάτων τα οποία αφού εισέλθουν στην σήραγγα στις περιοχές που αυτή διαπερνά τον υδροφόρο, οδηγούνται με την δύναμη της βαρύτητας στις περιοχές στα κατάντη οι οποίες χρειάζονται το νερό για ύδρευση ή άρδευση (Εικόνα 2. 2).



Εικόνα 2. 1 Εσωτερικό υδρομαστευτικής σήραγγας, Αδριάνειο Υδραγωγείο (Δευτεραίος, 2014)

Η κατασκευή μίας υδρομαστευτικής σήραγγας είναι ένας αρκετά αποτελεσματικός τρόπος να εξαχθεί νερό από τον υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα παρά το γεγονός ότι δεν υπάρχει η δυνατότητα να ορισθούν οι επιθυμητές παροχές, όπως θα μπορούσαν να ορισθούν σε ένα κατακόρυφο πηγάδι. Παρά το παραπάνω μειονέκτημα υπάρχουν αρκετά πλεονεκτήματα που κάνουν τις υδρομαστευτικές σήραγγες έναν αρκετά συμφέροντα και βιώσιμο τρόπο για την αξιοποίηση των υπογείων υδάτων (Samani, et al., 2006). Δεκάδες αρχαίες υδρομαστευτικές σήραγγες διασώζονται και μεταφέρουν νερό μέχρι και σήμερα σε πολλές περιοχές του πλανήτη με ξηρό και ημίξηρο κλίμα όπως για παράδειγμα στη Βόρεια Αφρική, την Μέση Ανατολή, την

Νότια Ισπανία αλλά ακόμα και στην Ελλάδα (Voudouris, et al., 2013). Αποδεικνύεται ότι τέτοιες κατασκευές έχουν πολύ μεγάλη διάρκεια ζωής η οποία οφείλεται στην απλότητα τους και στο ότι δεν απαιτείται η χρησιμοποίηση μηχανικών μέσων για την εξαγωγή του νερού. Τέλος, μια υδρομαστευτική σήραγγα, η οποία ουσιαστικά λειτουργεί σαν ένα οριζόντιο πηγάδι, έχει λιγότερους κατασκευαστικούς περιορισμούς σε σύγκριση με ένα κατακόρυφο πηγάδι σε ρηχούς λεπτούς υδροφορείς και σε επιφανειακούς σχηματισμούς που έχουν περιορισμένη υδραυλική αγωγιμότητα (Rad, et al., 2018).



Εικόνα 2. 2 Παράδειγμα υδρομαστευτικής σήραγγας (Taghavi-Jeloudar, et al., 2013)

Στην διεθνή βιβλιογραφία υπάρχουν περιορισμένες πληροφορίες σχετικά με την λειτουργία υδρομαστευτικών σηράγγων καθώς και με τους παράγοντες που επηρεάζουν την αποδοτικότητα τέτοιων έργων. Αυτό είναι πιθανό να οφείλεται στο γεγονός πως οι παράγοντες που επηρεάζουν την παροχή μια υδρομαστευτικής σήραγγας είναι δύσκολο να προσδιοριστούν και απαιτούν εξειδικευμένες για κάθε ξεχωριστή σήραγγα γεωλογικές, υδρογεωλογικές και υδρολογικές μελέτες. Η φαινομενική απλότητα και η συνηθισμένη εμφάνιση ενός τέτοιου έργου έρχεται σε αντίθεση με την δυσκολία που υφίσταται στην πρόβλεψη της λειτουργίας και στην επαρκή παρακολούθηση και συντήρηση του υπόγειου καναλιού για τυχόν εμφράξεις.

2.1 Η περίπτωση των Qanat

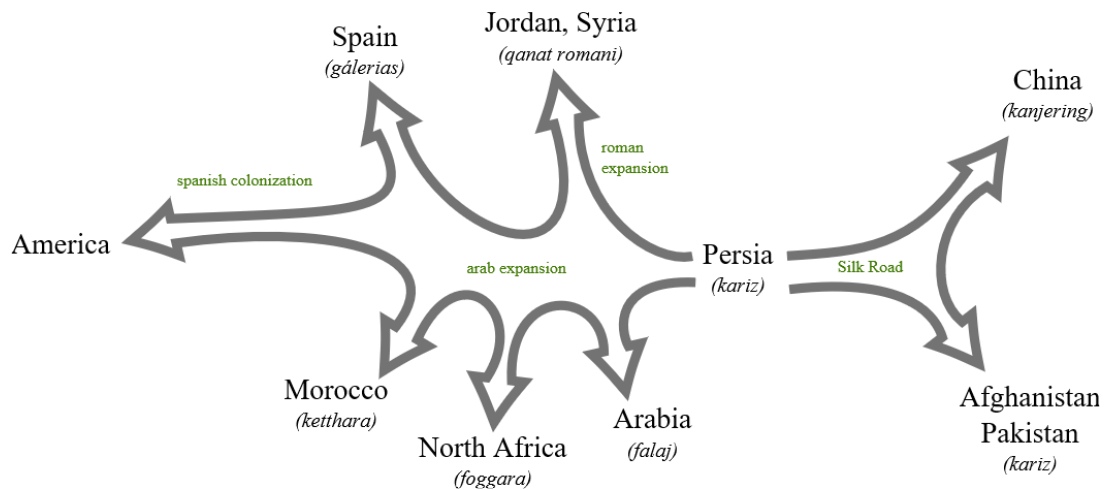
Η ιστορία των υδρομαστευτικών σηράγγων σύμφωνα με τους περισσότερους ερευνητές έχει σαν αφετηρία την Περσία (Wilson, 2008; Wulff, 1968) κατά τη διάρκεια της πρώτης χιλιετίας π.Χ. όταν κάποιες μικρές φυλές μετανάστευσαν στο Ιρανικό οροπέδιο. Αυτοί οι πληθυσμοί βασίζονταν στην γεωργία και την κτηνοτροφία για την επιβίωσή τους και ικανοποιούσαν τις ανάγκες τους σε νερό από ρέματα τα οποία έρεαν άφθονα στις περιοχές στις οποίες κατοικούσαν. Έτσι ήλπιζαν να καταφέρουν να καλύψουν τις ανάγκες τους μέσα από ποτάμια και πηγές των βουνών του οροπεδίου. Κάτι τέτοιο όμως ήταν αδύνατο αφού τα ποτάμια δεν

είχαν νερό κατά τις ζεστές και ξηρές περιόδους, ενώ οι πηγές προέρχονταν από ρηχούς υδροφορείς με αποτέλεσμα να μην παροχετεύουν ούτε αυτές νερό καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Παρόλα αυτά παρατήρησαν συνεχή ροή νερού σε υπόγεια κανάλια που είχαν κατασκευαστεί από Ακκάδιους που έκαναν εξόρυξη χαλκού στην περιοχή. Αυτά λοιπόν τα κανάλια μέσα από τα οποία οι Ακκάδιοι μεταλλωρύχοι έδωχναν το νερό από τα ορυχεία χαλκού αποτέλεσαν το βασικό σύστημα παροχής νερού για τους αγρότες της περιοχής, το οποίο ονομάστηκε Qanat (Taghavi-Jeloudar, et al., 2013). Την λέξη Qanat την δανείστηκαν οι Πέρσες από τα αραβικά όπου σήμαινε σωλήνας-κανάλι. (Merriam-Webster, χ.χ.)

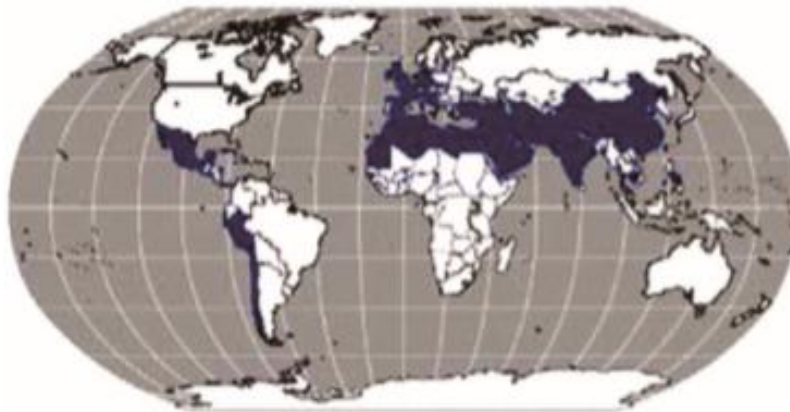


Εικόνα 2. 3 Αεροφωτογραφία Qanat στο Ιράν

Κατά την περίοδο 550-331 π.Χ. όταν η Περσική Αυτοκρατορία εκτεινόταν από τον Ινδό ποταμό μέχρι τον Νείλο, η τεχνολογία των Qanat διαχύθηκε σε όλη την αυτοκρατορία και από εκεί με την πάροδο των αιώνων σε αρκετές περιοχές σε ολόκληρο τον πλανήτη όπως απεικονίζεται στις *Εικόνα 2. 4* και *Εικόνα 2. 5*. Ανάλογα την περιοχή στην οποία εντοπίζονται ο κάθε λαός μπορεί να έχει δώσει διαφορετική ονομασία στα έργα όπως για παράδειγμα Kariz, που χρησιμοποιείται σε κάποιες περιοχές του Ιράν και σε Πακιστάν και Αφγανιστάν, ή Foggara, που χρησιμοποιείται κυρίως στην Βόρεια Αφρική. Τα Qanat σήμερα υπολογίζεται να φτάνουν τα 22 000 και υπάρχουν σε περισσότερες από 35 χώρες παγκοσμίως (περιλαμβάνεται και η Ελλάδα), με τα περισσότερα να εντοπίζονται στην περιοχή του Ιράν.



Εικόνα 2. 4 Σχηματική διασπορά της τεχνολογίας των Qanat στις διάφορες περιοχές του κόσμου (Miller FP, 2009)



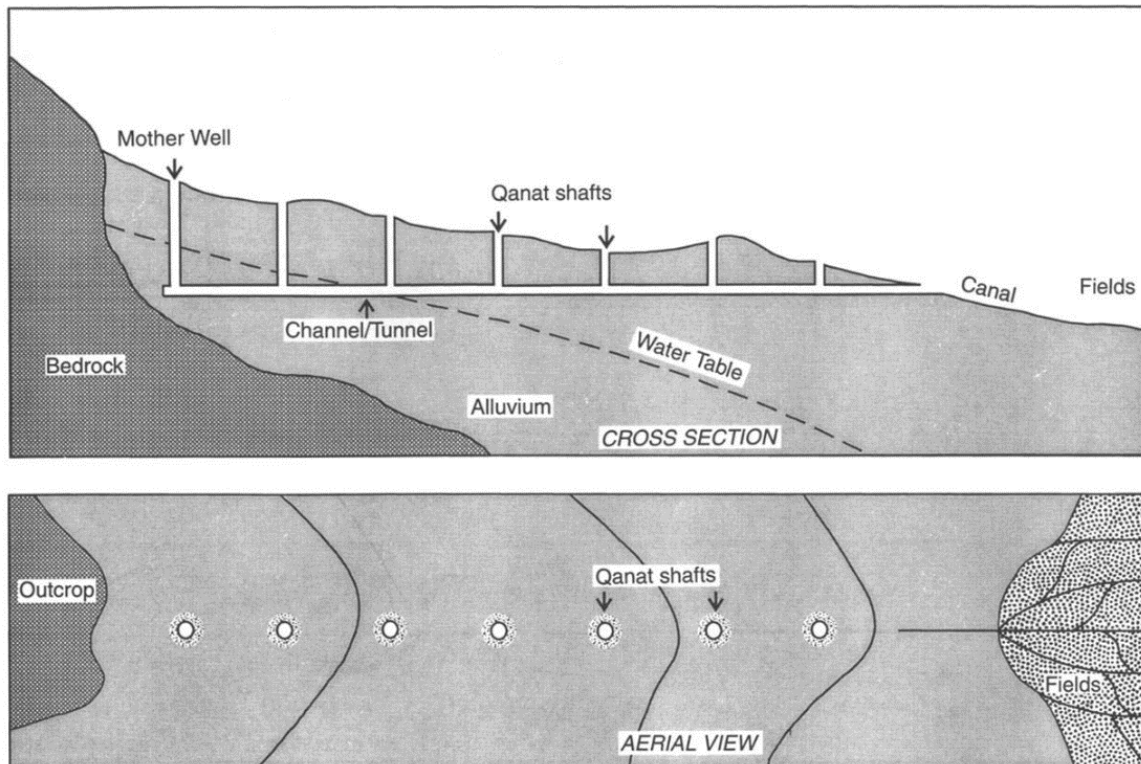
Εικόνα 2. 5 Παγκόσμιος χάρτης με τις περιοχές στις οποίες έχουν εντοπιστεί Qanat (Salih, 2006)

Η κατασκευή των Qanat γινόταν εξολοκλήρου χειρωνακτικά και για αυτό τον λόγο η διάνοιξη τους ήταν αδύνατο να πραγματοποιηθεί σε βράχο. Αυτό είχε σαν συνέπεια τα Qanat να διανοίγονται σε αλλούβια από εξειδικευμένους τεχνίτες οι οποίοι μετέφεραν την γνώση της διάνοιξης των σήραγγων από γενιά σε γενιά.

Η κατασκευή των Qanat ξεκινούσε με την διάνοιξη του μητρικού πηγαδιού σε περιοχή υψηλότερου υψομέτρου από αυτή που έπρεπε να τροφοδοτηθεί με νερό. Το πηγάδι αυτό αποτελεί την αφετηρία του Qanat και με την διάνοιξη του εντοπίζεται η πιεζομετρική επιφάνεια της περιοχής.

Στην συνέχεια η διάνοιξη της σήραγγας του Qanat ξεκινά από το σημείο της εφόδου του νερού στην επιφάνεια και έχει κατεύθυνση προς το μητρικό πηγάδι. Για κάθε 15 έως 30 m κύριας σήραγγας που διανοίγεται, διανοίγεται και μια κατακόρυφη σήραγγα ή πηγάδι (Εικόνα 2. 3) που φτάνει μέχρι την επιφάνεια του εδάφους και η οποία χρησιμεύει στον αερισμό και φωτισμό της στοάς, στην μεταφορά των χωμάτων στην επιφάνεια κατά την διάρκεια της κατασκευής

και στην εύκολη πρόσβαση για την συντήρηση της στοάς κατά τη λειτουργία του Qanat (Beaumont, 1971). Στην *Εικόνα 2. 6* παρουσιάζεται η μηκοτομή και η κάτοψη ενός Qanat όπου απεικονίζεται και ο υδροφόρος ορίζοντας ο οποίος τέμνει την υπόγεια στοά.



Εικόνα 2. 6 Μηκοτομή και κάτοψη Qanat (Lightfoot, 1997)

2.1.1 Οι κατηγορίες των Qanat με βάση τον τρόπο με τον οποίο τροφοδοτούνται με νερό

Τα Qanat (ή όπως αλλιώς έχουν ονομαστεί τα έργα αυτά στις διάφορες περιοχές του πλανήτη στις οποίες διαδόθηκαν) χωρίζονται σε τέσσερις κατηγορίες με βάση τον κύριο τρόπο τροφοδοσίας τους με νερό (Kahlown & Hamilton, 1994; Κλειδοπούλου, 2003):

- α) Αλλουβιακά, τα οποία διανοίγονται σε αλλουβιακές αποθέσεις στους πρόποδες βουνών. Αυτά αποτελούν την τυπική περίπτωση Qanat και είναι τα πιο αξιόπιστα καθώς παρέχουν νερό με σχετικά σταθερή παροχή, ενώ έχουν και την μεγαλύτερη διάρκεια ζωής.
- β) Διήθησης, τα οποία τροφοδοτούνται με νερό από ρήγματα και σπασίματα πετρωμάτων. Τα Qanat αυτά συνήθως δεν παρέχουν μεγάλες ποσότητες νερού.
- γ) Βροχόπτωσης, τα παρέχουν νερό μετά από βροχοπτώσεις και τον υπόλοιπο καιρό παρέχουν μηδενικές ποσότητες νερού.
- δ) Πηγής, τα οποία μεταφέρουν το νερό κάποιας πηγής η οποία βρίσκεται στα ανάντη και διοχετεύει το νερό της στην σήραγγα του Qanat.

2.1.2 Τα πλεονεκτήματα των Qanat- υδρομαστευτικών στοών έναντι των κατακόρυφων πηγαδιών

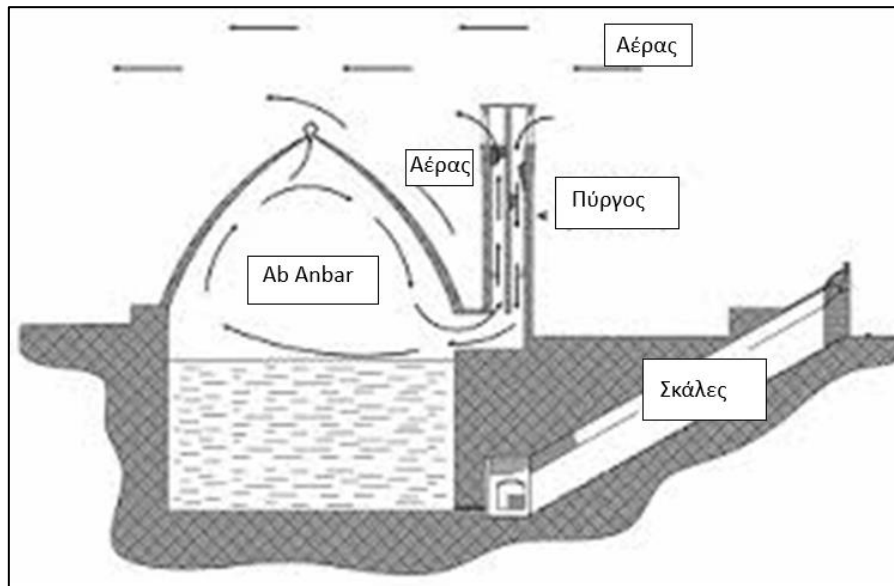
Τα Qanat αλλά και γενικότερα τα έργα οριζόντιας υδρομάστευσης είναι ένας αρκετά αποδοτικός και περιβαλλοντικά φιλικός τρόπος για να γίνεται αξιοποίηση των υπογείων νερών (Motiee, et al., 2006; Beaumont, 1971; Boustani, 2008; Nasiri & Mafakheri, 2015).

Αρχικά, σε αντίθεση με τα κατακόρυφα πηγάδια τα Qanat δεν μπορούν να προκαλέσουν σημαντική μείωση της στάθμης των υπογείων νερών καθώς η παροχή του ρυθμίζεται από το ύψος του υδροφόρου ορίζοντα. Όταν η στάθμη του υδροφόρου μειωθεί τότε μειώνεται η παροχή του Qanat, η οποία μπορεί μέχρι και να μηδενιστεί όταν ο υδροφόρος βρεθεί κάτω από το υπόγειο κανάλι.

Επιπρόσθετα, με την μεταφορά του νερού υπόγεια αλλά και με την αποθήκευση του νερού σε υπόγειες- κλειστές δεξαμενές αποφεύγεται η εξάτμιση μεγάλων ποσοτήτων στην ατμόσφαιρα. Οι δεξαμενές στις οποίες αποθηκεύονταν το νερό των Qanat στο αρχαίο Ιράν ονομάζονταν Ab Anbar (Εικόνα 2. 7) και αποθήκευαν το νερό που παροχετεύονταν κατά τη διάρκεια της νύχτας για χρησιμοποιηθεί τη μέρα (Miller FP, 2009). Τα Ab Anbar αποτελούνται και από κάποιους πύργους στο πλάι τους. Οι κινούμενες μάζες αέρα στην κορυφή των πύργων δημιουργούν μία κλίση πίεσης μεταξύ της κορυφής και της βάσης με αποτέλεσμα να εξέρχεται ο ζεστός αέρας από το εσωτερικό και να παραμένει ο πυκνότερος κρύος αέρας. Με αυτόν τον τρόπο εμποδίζεται τυχόν στάσιμος αέρας και σχηματισμός υγρασίας με αποτέλεσμα να ρέει καθαρό και κρύο νερό. (Εικόνα 2. 8).



Εικόνα 2. 7 Δεξαμενή Ab Anbar στην πόλη Naqen του Ιράν



Εικόνα 2. 8 Σχηματική απεικόνιση λειτουργίας Ab Anbar (Saeidian, 2013)

Με την χρήση των Qanat αλλά και γενικότερα οριζόντιων υδρομαστευτικών έργων έναντι κατακόρυφων πηγαδιών εξοικονομούνται μεγάλα ποσά ενέργειας σε όλη τη διάρκεια ζωής του έργου καθώς δεν απαιτείται ενέργεια για την άντληση του νερού ενώ μπορεί και να παραχθεί ενέργεια με την χρήση ειδικού εξοπλισμού. Για παράδειγμα σε κάποια Qanat τοποθετούνταν νερόμυλοι (Εικόνα 2. 9) έτσι ώστε να μην μείνει ανεκμετάλλευτη η ορμή του νερού εντός της στοάς.



Εικόνα 2. 9 Νερόμυλος τοποθετημένος σε Qanat για την παραγωγή ενέργειας (Taghavi-Jeloudar, et al., 2013)

Ένα ακόμα πλεονέκτημα των υπόγειων στοών είναι ότι μπορούν να αξιοποιηθούν σε περίπτωση πλημμύρας καθώς θα υπάρχει η δυνατότητα ένα μέρος της απορροής να εξυπηρετηθεί από την υπόγεια στοά.

Τέλος, έχει παρατηρηθεί ότι τα Qanat λειτουργούν σαν οικοσυστήματα για κάποια ψάρια, τα οποία πιθανότατα μετά από πλημμύρες μικρών ρεμάτων τα οποία ήταν κοντά σε κάποια πηγάδια των Qanat φαίνεται να εισήλθαν σε αυτά (Smith, 1953).

2.2 Η περίπτωση των ΡιQUIIOS στο Περού

Τα ΡιQUIIOS αποτελούν ένα αρχαίο σύστημα υδρομαστευτικών σηράγγων τα οποία εντοπίζονται στην λεκάνη απορροής του ποταμού Rio Grande de Nazca στο Περού. Η τεχνολογία τους είναι παρόμοια με αυτή των Qanat τα οποία περιγράφηκαν παραπάνω. Τα ΡιQUIIOS αποτελούνται από οριζόντιες σήραγγες μερικών εκατοντάδων μέτρων οι οποίες είναι προσβάσιμες από φρεάτια σπειροειδούς μορφής (ojos), όπως παρουσιάζονται στις *Εικόνα 2.10* και *Εικόνα 2.11*.



Εικόνα 2.10 Σπειροειδή φρεάτια κατά μήκος των ΡιQUIIOS



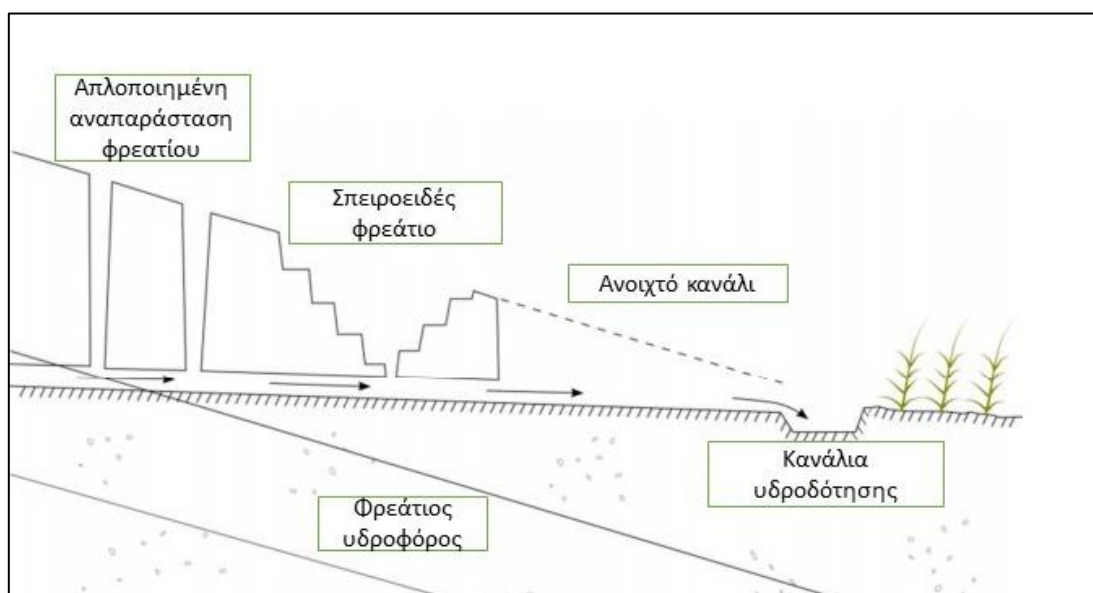
Εικόνα 2. 11 Σπειροειδές φρεάτιο (ojo) των Ρυκιός

Στο κατάντη τμήμα των Ρυκιός το νερό παύει να ρέει μέσα στην σήραγγα και συνεχίζει να ρέει σε ανοιχτό κανάλι το οποίο είναι ευκολότερα προσβάσιμο. Το μήκος του ανοιχτού καναλιού μπορεί να ξεπερνάει και το 1 km, όπως στο Achako Ρυκιό, με τα περισσότερα ανοιχτά κανάλια των Ρυκιός να έχουν μήκος τουλάχιστον 500 m (Proulx, 2008). Στην *Εικόνα 2. 12* απεικονίζεται το ανοιχτό αυτό κανάλι.



Εικόνα 2. 12 Κατάντη τμήμα των Ruqiyos όπου το νερό ρέει σε ανοιχτό κανάλι (Proulx, 2008)

Στην Εικόνα 2. 13 παρουσιάζεται σχηματικά η μηκοτομή των Ruqiyos. Τα Ruqiyos υδρομαστεύουν στο ανάντη τμήμα τους από τον υπόγειο υδροφορέα και στη συνέχεια μεταφέρουν το νερό αρχικά μέσα από τη σήραγγα και στην συνέχεια μέσα από ανοιχτό κανάλι σε άλλα κανάλια με σκοπό την ύδρευση και την αρδευση των κατάντη περιοχών.



Εικόνα 2. 13 Μηκοτομή των Ruqiyos (Mamassis, 2017), μετά από επεξεργασία

Η περιοχή Nazca, του Περού, όπου κατασκευάστηκαν τα Puquios, μαστιζόταν από τρομερή έλλειψη βροχοπτώσεων. Πολλοί παραπόταμοι του Rio Grande de Nasca μετέφεραν νερό μόλις δύο στα επτά χρόνια (Schreiber & Rojas, 2003). Η έλλειψη επιφανειακού νερού στην περιοχή δεν οφειλόταν όμως μόνο στην έλλειψη βροχοπτώσεων αλλά και σε μία σειρά από ρήγματα που εντοπίζονταν σε παραπόταμους του Rio Grande de Nasca και οδηγούν το νερό που ρέει σε υπόγειους υδροφορείς (Johnson, 1997).

Σε ότι αφορά την περίοδο κατά την οποία κατασκευάστηκαν τα Puquios οι ερευνητές διαχάζονται στο εάν κατασκευάστηκαν πριν ή μετά την περίοδο της Ισπανικής Αυτοκρατορίας. Η επικρατούσα άποψη είναι ότι κατασκευάστηκαν αρκετά πριν την περίοδο αυτή από τον πολιτισμό των Nazca, ο οποίος ήκμασε την περίοδο 2ος αιώνας π.Χ. έως 6ος αιώνας μ.Χ. Την άποψη αυτή επιβεβαιώνουν μελέτες χρονολόγησης οργανικών υλικών (Clarkson & Dorn, 1995) καθώς και μελέτες που χρησιμοποιούν δορυφορικές εικόνες και οι οποίες ανακάλυψαν και άλλα άγνωστα Puquios στην περιοχή (Lasaponara & Masini, 2012). Η πιθανότερη αιτία η οποία οδήγησε στην κατασκευή των Puquios ήταν δύο μεγάλης διάρκειας ξηρασίες κατά τον 5ο με 6ο αιώνα μ.Χ.

ΜΕΡΟΣ Α: ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΤΗΣ ΕΙΣΡΟΗΣ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ ΣΕ ΥΔΡΟΜΑΣΤΕΥΤΙΚΕΣ ΣΗΡΑΓΓΕΣ

Στην διεθνή βιβλιογραφία υπάρχουν ελάχιστες περιπτώσεις όπου έχει μελετηθεί οι σήραγγες οι οποίες έχουν σαν σκοπό την συλλογή υπογείων υδάτων και την μεταφορά τους για να αξιοποιηθούν για ύδρευση ή άρδευση.

Κατά την κατασκευή μίας τυπικής σήραγγας πολλές φορές είναι αναγκαίο να εκτιμηθεί η εισροή νερού τόσο κατά την στιγμή της κατασκευής όσο και κατά την λειτουργία της. Η εκτίμηση αυτή γίνεται για τον σχεδιασμό του κατάλληλου συστήματος αποστράγγισης έτσι ώστε να μη δημιουργηθεί ζήτημα με την ευστάθεια της κατασκευής αλλά και για τον περιορισμό του περιβαλλοντικού κόστους.

Η διερεύνηση που πραγματοποιείται παρακάτω αντλεί έμπνευση και έχει τις βάσεις της σε δημοσιευμένη έρευνα που εξετάζει την εισροή υπογείων υδάτων σε κυκλική σήραγγα (Butscher, 2012). Στην έρευνα αυτή εξετάστηκε σε κυκλική και χωρίς νερό σήραγγα η επίδραση της επένδυσης, το πώς αυτή μπορεί να ληφθεί υπόψη στην κατάρτιση του αριθμητικού μοντέλου και το πόσο επηρεάζει την εισροή που υπολογίζεται.

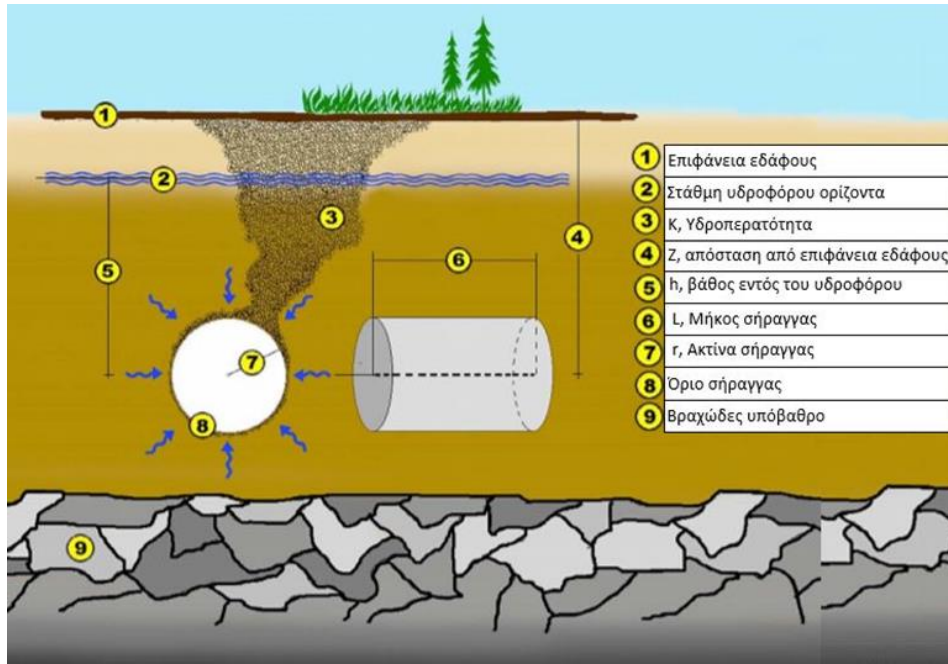
Σε αντίθεση με την παραπάνω έρευνα στην παρούσα διπλωματική εξετάζεται η υδρομάστευση για διάφορα σχήματα διατομών τα οποία επιλέχθηκαν ώστε να είναι αντιπροσωπευτικά της σήραγγας του Αδριάνειου Υδραγωγείου. Επίσης εξετάζεται η επίδραση του ύψους του νερού εντός της σήραγγας στην συνολική παροχή εισροής σε αυτή. Είναι σημαντικό σε αυτό το σημείο να τονιστεί ότι η σήραγγα που μελετάται στην παρούσα διπλωματική είναι υδρομαστευτική, αποσκοπεί δηλαδή στην συλλογή του υπογείου νερού. Για τον λόγω αυτό δεν δίνεται μεγάλη σημασία στην επίδραση που έχει η επένδυση στην παροχή εισροής. Τα τμήματα του Αδριάνειου Υδραγωγείου που κατασκευάζονται με σκοπό να υδρομαστεύουν στην πλειονότητά τους ήταν χωρίς επένδυση. Παρακάτω παρουσιάζονται συνοπτικά διάφορες αναλυτικές σχέσεις που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της παροχής που εισέρχεται σε κυκλικές σήραγγες. Ακόμη, γίνεται χρήση του λογισμικού SEEP/W έτσι ώστε να μπορέσει να ελεγχθεί ο βαθμός στον οποίο ορισμένοι παράγοντες όπως ο βαθμός πλήρωσης, το σχήμα και η θέση της σήραγγας επηρεάζουν την παροχή εισροής.

3 Αναλυτικές επιλύσεις για τον υπολογισμό της εισροής υπογείων νερών σε κυκλική σήραγγα

Για τον υπολογισμό της εισροής υπογείων νερών σε μία υπόγεια σήραγγα χρησιμοποιούνται εμπειρικές μέθοδοι, αριθμητικές μέθοδοι, όπως για παράδειγμα η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιείται στην παρούσα διπλωματική, καθώς επίσης και αναλυτικές μέθοδοι. Οι αναλυτικές μέθοδοι είναι αρκετά διαδεδομένες λόγω της ευκολίας στην χρήση που τις καθιστά ένα αρκετά χρήσιμο εργαλείο ιδιαίτερα για την φάση της προμελέτης. Για τον λόγο αυτό αρκετοί ερευνητές έχουν ασχοληθεί με την δημιουργία αναλυτικών σχέσεων επιλύοντας της εξισώσεις ροής του υπογείου νερού οι οποίες καταλήγουν μετά από παραδοχές και απλοποιήσεις σε απλές εξισώσεις.

Βασική θεώρηση των αναλυτικών σχέσεων είναι ότι η ροή γίνεται μέσα σε ομογενές και ισότροπο μέσο. Επίσης, πραγματοποιείται θεώρηση μόνιμης ροής και επιλέγεται κυκλική διατομή για την σήραγγα. Οι παραπάνω παραδοχές είναι μη ρεαλιστικές με αποτέλεσμα είτε να υπερεκτιμάται είτε να υποεκτιμάται η εισροή με βάσει τις μετρήσεις στο πεδίο. Οι πιο σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν το αποτέλεσμα των αναλυτικών σχέσεων είναι οι πιθανές ασυνέχειες στο πέτρωμα καθώς επίσης και η μη ακριβής εκτίμηση της υδροπερατότητας (Zhang & Franklin, 1993; Farhadian & Katibeh, 2017).

Στον Πίνακα 3. 1 παρουσιάζονται οι πιο σημαντικές αναλυτικές σχέσεις για τον υπολογισμό της εισροής σε κυκλική σήραγγα. Στην τρίτη στήλη παρουσιάζονται διάφορα σχόλια και παρατηρήσεις σχετικά με κάθε μία από τις αναλυτές σχέσεις που περιέχονται στον πίνακα. Οι μεταβλητές που χρησιμοποιούνται στις αναλυτικές αυτές σχέσεις επεξηγούνται στην Εικόνα 3. 1.



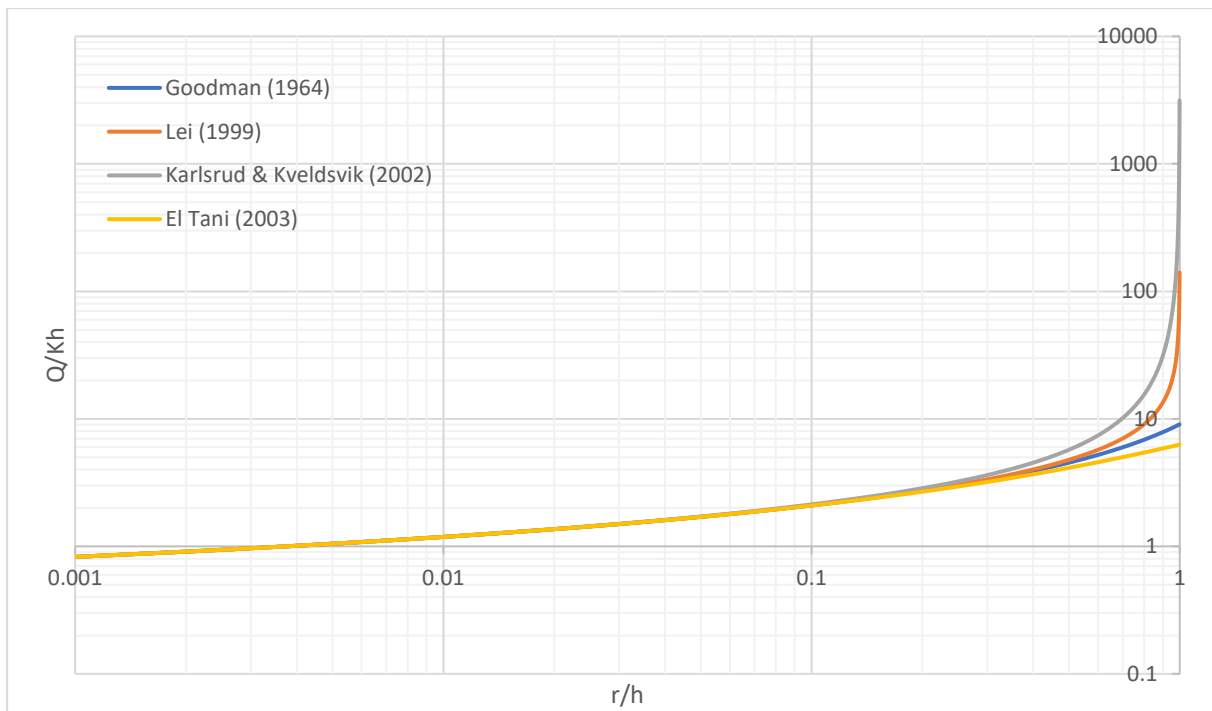
Εικόνα 3. 1 Σκαρίφημα κυκλικής σήραγγας σε ημιάπειρο υδροφόρο (Nikvar Hassani, et al., 2017), μετά από τροποποίηση

Πίνακας 3. 1 Αναλυτικές σχέσεις για τον υπολογισμό εισροής σε κυκλική σήραγγα (Farhadian, et al., 2012; Farhadian & Katibeh, 2017), μετά από τροποποίηση

Πηγή	Εξίσωση	Περιγραφή
(Goodman, et al., 1964)	$Q = 2\pi K \frac{h}{\ln\left(\frac{2h}{r}\right)}$	Βασικές παραδοχές είναι η ακτινική ροή, η ακριβής ισοδύναμη υδροπερατότητα, όχι αλλαγές στη στρωματογραφία κατά μήκος
(Lei, 1999)	$Q = 2\pi K \frac{h}{\ln\left(\frac{h}{r} + \sqrt{\left(\frac{h}{r}\right)^2 - 1}\right)}$	Η εξίσωση του Goodman (1964) έχει διορθωθεί με την εφαρμογή ακριβών πραγματικών συνθηκών
(El Tani, 1999)	$Q = 2\pi K \frac{1 - 3\left(\frac{r}{2h}\right)^2}{\left[1 - \left(\frac{r}{2h}\right)^2\right] \ln\left(\frac{2h}{r}\right) - \left(\frac{r}{2h}\right)^2}$	Η εξίσωση αυτή κατασκευάστηκε σαν βέλτιστη λύση λαμβάνοντας υπόψιν τις παραπάνω εξισώσεις
(Karlsrud & Kveldsvik, 2002)	$Q = 2\pi K \frac{h}{\ln\left(\frac{2h}{r} - 1\right)}$	Λήφθηκαν υπόψιν οι προηγούμενες εξισώσεις οι οποίες διορθώθηκαν με βάση μετρήσεις πεδίου για μείωση του σφάλματος σε ρηχές και βαθιές σήραγγες
(El Tani, 2003)	$Q = 2\pi K \frac{\lambda^2 - 1}{\lambda^2 + 1} \frac{h}{\ln \lambda}$	$\lambda = \frac{h}{r} - \sqrt{\frac{h^2}{r^2} - 1}$, έχουν χρησιμοποιηθεί σειρές Fourier και μετασχηματισμοί Mobius

Στο Σχήμα 3. 1 που παρουσιάζεται παρακάτω γίνεται μία διερεύνηση σχετικά με την «συμπεριφορά» των αναλυτικών σχέσεων σε ότι αφορά τα αποτελέσματα τους συναρτήσει του βάθους εντός του υδροφόρου. Από το σχήμα αυτό παρατηρείται μια διαφοροποίηση στα αποτελέσματα των διάφορων αναλυτικών σχέσεων όταν η σήραγγα βρίσκεται ψηλά μέσα στον υδροφόρο και συγκεκριμένα για r/h μεγαλύτερο από 0,2. Η αναλυτική σχέση των Karlsrud & Kveldsvik (2002) για μικρά βάθη h ($r/h > 0,2$) δίνει τα μεγαλύτερα αποτελέσματα παροχής με τις σχέσεις των Lei (1999), Goodman, et al., (1964) και El Tani (2003) να ακολουθούν.

Στο Κεφάλαιο 4.7 γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων των αριθμητικών αυτών σχέσεων με τα αποτελέσματα από αριθμητικό μοντέλο, για συγκεκριμένη τιμή της υδροπερατότητας και της ακτίνας της σήραγγας.

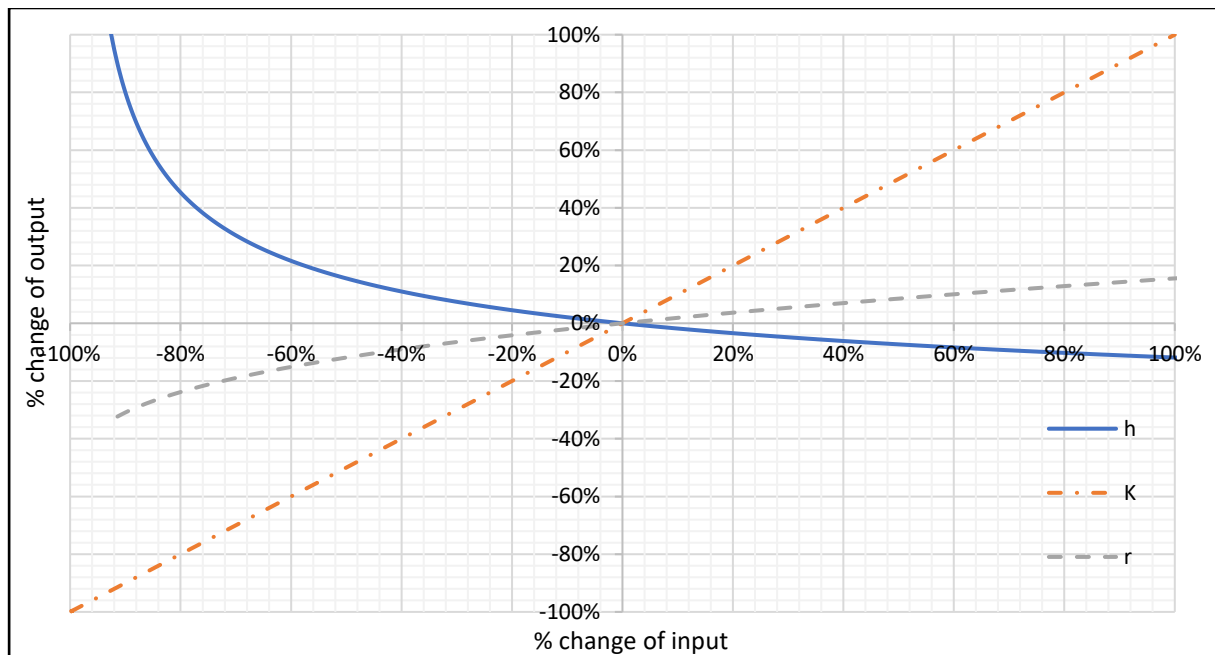


Σχήμα 3. 1 Υπολογισμός της αδιαστατοποιημένης παροχής εισροής στην κυκλική σήραγγα (Q/Kh) συναρτήσει του λόγου ακτίνας σήραγγας προς βάθος αυτής εντός του υδροφόρου (r/h) για διάφορες αναλυτικές σχέσεις

Από τις παραπάνω αναλυτικές σχέσεις για τον υπολογισμό της εισροής υπογείων νερών σε κυκλική σήραγγα επιλέγεται η αναλυτική σχέση από τον El Tani (2003) και γίνεται μια διερεύνηση σε ότι αφορά την επιρροή που έχει η κάθε μεταβλητή στο τελικό αποτέλεσμα της παροχής ανά μονάδα μήκους της σήραγγας.

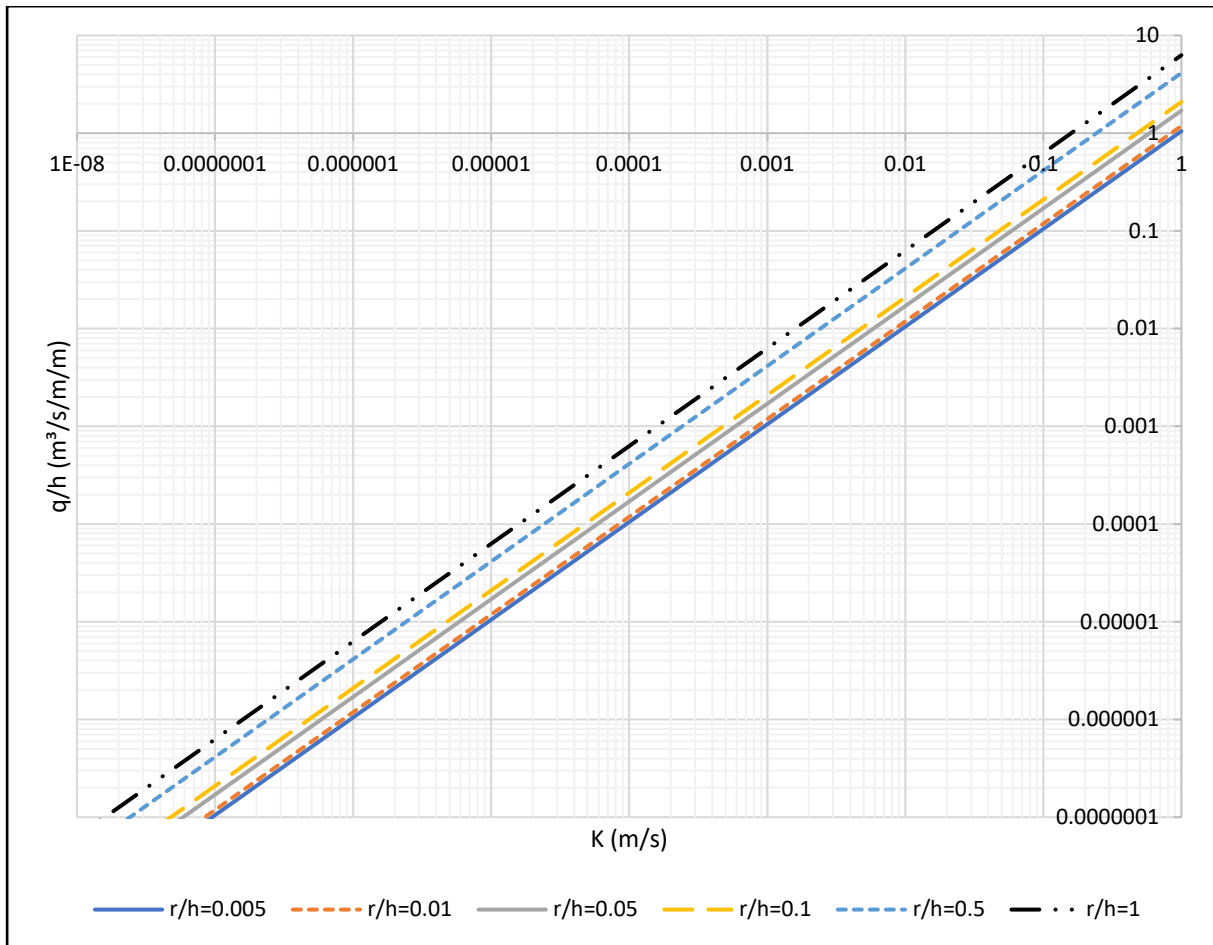
Στο Σχήμα 3. 2 είναι φανερό ότι από τους τρεις παράγοντες που επηρεάζουν την παροχή εισροής σε σήραγγα ο πιο καθαριστικός παράγοντας είναι η υδροπερατότητα. Το αποτέλεσμα της αναλυτικής σχέσης είναι ανάλογο της υδροπερατότητας (K). Αυτό σημαίνει ότι μεταβολή 20%, για παράδειγμα, στην υδροπερατότητα έχει σαν αποτέλεσμα μεταβολή 20% στην υπολογιζόμενη παροχή κ.ο.κ. Στη συνέχεια, ο δεύτερος πιο σημαντικός παράγοντας είναι το βάθος (h) εντός του υδροφόρου στο οποίο βρίσκεται η σήραγγα. Πιο συγκεκριμένα το βάθος

εντός του υδροφόρου είναι καθοριστικός παράγοντας ειδικά όταν παίρνει μικρές τιμές, δηλαδή η σήραγγα βρίσκεται ψηλά στον υδροφόρο. Μία μεταβολή του h για παράδειγμα κατά 1 m έχει μεγαλύτερη επίδραση στην υπολογιζόμενη παροχή όταν γίνεται για παράδειγμα από τα 2 m στα 3 m παρά όταν γίνεται από τα 20 m στα 21 m. Τέλος, η ακτίνα της σήραγγας είναι ο λιγότερο σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει την παροχή εισροής καθώς ακόμη και μία μεταβολή κατά 80% στην ακτίνα οδηγεί σε μεταβολή της παροχής εισροής της τάξης του 10-20%.



Σχήμα 3. 2 Επί τοις εκατό μεταβολή στα δεδομένα εισόδου της αναλυτικής σχέσης κατά El Tani (2003) συναρτήσει της επί τοις εκατό μεταβολής στην υπολογιζόμενη παροχή εισροής με αρχικές τιμές $h=30\text{ m}$, $r=0.35\text{ m}$, $K=5E-6\text{ m/s}$

Στο Σχήμα 3. 3 παρουσιάζεται ένα νομογράφημα για τον υπολογισμό της παροχής εισροής σε κυκλική σήραγγα χωρίς επένδυση σύμφωνα με την αναλυτική σχέση του El Tani (2003). Στον λογαριθμικό άξονα x βρίσκεται η υδροπερατότητα (K) και στον λογαριθμικό άξονα y βρίσκεται η παροχή εισροής στην σήραγγα ανά μέτρο μήκους αυτής, ανά μέτρο βάθος εντός του υδροφόρου (q/h). Κάθε γραμμή του νομογραφήματος έχει δημιουργηθεί για έναν συγκεκριμένο λόγο ακτίνας της σήραγγας προς βάθος εντός του υδροφόρου (r/h).



Σχήμα 3. 3 Νομογράφημα για τον υπολογισμό της παροχής εισροής σε κυκλική σήραγγα σύμφωνα με την αναλυτική σχέση κατά El Tani (2003)

4 Αριθμητική επίλυση για τον υπολογισμό εισροής υπογείων νερών σε υπόγεια σήραγγα με τη χρήση του λογισμικού SEEP/W

Για την ανάλυση που πραγματοποιείται και για να μπορέσουν να εξαχθούν κάποια χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με την ποσότητα του νερού που εισέρχεται σε μία υπόγεια στοά, όπως η στοά του Αδριάνειου Υδραγωγείου, γίνεται χρήση του λογισμικού SEEP/W (GeoStudio, 2007). Παρακάτω παρουσιάζεται η βασική θεωρία πάνω στην οποία βασίζεται το λογισμικό αυτό ενώ ταυτόχρονα επισημαίνονται και οι βασικές παραδοχές που γίνονται για να μπορέσει να γίνει η προσομοίωση του Αδριάνειου Υδραγωγείου.

4.1 Ο νόμος του Darcy

Το SEEP/W χρησιμοποιεί την εξίσωση του Darcy σε ολόκληρο τον υπολογιστικό χώρο (domain) είτε η ροή του υπογείου νερού είναι κορεσμένη (saturated flow) είτε ακόρεστη (unsaturated flow). Η εξίσωση του Darcy περιγράφεται από την παρακάτω εξίσωση (4. 1):

$$q = -Ki, \quad (4. 1)$$

όπου q [LT^{-1}] είναι η συγκεκριμένη παροχή (discharge) ανά μονάδα επιφάνειας, K [LT^{-1}] είναι η υδροπερατότητα (hydraulic conductivity) και i είναι η κλίση του υδραυλική φορτίου (hydraulic head gradient). Η εξίσωση του Darcy προέκυψε αρχικά για ροή σε κορεσμένο έδαφος αλλά αποδείχτηκε ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε ακόρεστο (Richards, 1931; Childs & Collis-George, 1950).

Για να μπορέσει να χρησιμοποιηθεί η εξίσωση Darcy σε ακόρεστο έδαφος θα πρέπει να έχουμε σαν δεδομένο το πως μεταβάλλεται η υδροπερατότητα με την κατ' όγκο περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό και άρα ουσιαστικά με την πίεση πόρων. Σε αντίθεση δηλαδή με την κορεσμένη ροή στην οποία η αρκεί μία τιμή της υδροπερατότητας σαν δεδομένο για να επιλυθεί η ροή με το SEEP/W, στην ακόρεστη ροή απαιτείται να δοθεί στο πρόγραμμα μία συνάρτηση.

4.2 Οι εξισώσεις ροής των υπόγειων υδάτων

Η μερική διαφορική εξίσωση (PDE) που περιγράφει την διδιάστατη ροή του υπογείου νερού είναι η παρακάτω (4. 2):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (4.2)$$

Το υδραυλικό φορτίο (h) συνδέεται με την περιεκτικότητα κατ' όγκο σε νερό (θ) με την παρακάτω εξίσωση (4. 3):

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = m_w \gamma_w \frac{\partial H}{\partial t} \quad (4.3)$$

Οι μεταβλητές που περιέχονται στις παραπάνω εξισώσεις παρουσιάζονται στον Πίνακα 4. 1:

Πίνακας 4. 1 Μεταβλητές των εξισώσεων ροής των υπογείων υδάτων

Μεταβλητή	Επεξήγηση
H	Υδραυλικό φορτίο (hydraulic head) [L]
K_x	Υδροπερατότητα κατά τον άξονα x (hydraulic conductivity in the x axis) [LT ⁻¹]
K_y	Υδροπερατότητα κατά τον άξονα y (hydraulic conductivity in the y axis) [LT ⁻¹]
Q	Εισροή ή εκροή παροχής ανά μονάδα όγκου (sink or source term) [T ⁻¹]
m_w	Κλίση της καμπύλης αποθηκευτικότητας νερού [M L ⁻³]
γ_w	Ειδικό βάρος νερού [L ² M ⁻¹]
θ	Περιεκτικότητα κατ' όγκο σε νερό (volumetric water content)
t	Χρόνος [T]

Ουσιαστικά από την εξίσωση (4. 2) συμπεραίνουμε ότι το άθροισμα του ρυθμού μεταβολής της κλίσης του υδραυλικού φορτίου κατά τον άξονα x και του ρυθμού μεταβολής της κλίσης του υδραυλικού φορτίου κατά τον άξονα y ισούται με τον ρυθμό μεταβολής της κατ' όγκο περιεκτικότητας του εδαφικού στοιχείου σε νερό με τον χρόνο.

Για την ανάλυση που πραγματοποιείται στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής η μεταβολή της κατ' όγκο περιεκτικότητας του εδαφικού στοιχείου σε νερό ισούται με μηδέν καθώς γίνεται θεώρηση συνθηκών μόνιμης ροής. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η εξίσωση (4. 2) να μετατρέπεται στην παρακάτω εξίσωση (4. 4):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + Q = 0 \quad (4.4)$$

Οι αλλαγές στην περιεκτικότητα κατ' όγκο σε νερό του κάθε εδαφικού στοιχείου εξαρτώνται από τις αλλαγές στην κατάσταση της πίεσης αλλά και από τις ιδιότητες του εδαφικού υλικού. Η κατάσταση της πίεσης ενός εδαφικού στοιχείου είναι συνάρτηση δύο μεταβλητών. Αρχικά της διαφοράς της πίεσης του αέρα στους πόρους του εδάφους (pore-air pressure) από την ολική πίεση (total stress), καθώς επίσης και της πίεσης του νερού στους πόρους του εδάφους (pore-water pressure) από την πίεση του αέρα στους πόρους του εδάφους (pore-air pressure). Το SEEP/W θεωρεί σταθερή ολική πίεση καθώς δεν λαμβάνει υπόψιν τη φόρτιση ή την αποφόρτιση του εδάφους. Επίσης θεωρεί ότι η πίεση του αέρα στους πόρους είναι σταθερή και ίση με την ατμοσφαιρική πίεση.

Συνεπώς η μεταβολή της περιεκτικότητας κατ' όγκο σε νερό ενός εδαφικού στοιχείου είναι συνάρτηση μόνο της πίεσης πόρων.

Επιπρόσθετα πραγματοποιείται θεώρηση ισότροπου υδροφόρου. Αυτό σημαίνει πως η υδροπερατότητα κατά τον άξονα x θεωρείται ίση με την υδροπερατότητα κατά τον άξονα y (4.5):

$$K_x = K_y = K \quad (4.5)$$

Με βάση τις θεωρήσεις της διδιάστατης μόνιμης ροής και του ισότροπου υδροφόρου προκύπτει τελικά η παρακάτω εξίσωση (4.6):

$$K \left(\frac{\partial^2 H}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H}{\partial y^2} \right) + Q = 0 \quad (4.6)$$

4.3 Εξίσωση πεπερασμένων στοιχείων

Η εφαρμογή της μεθόδου Galerkin, η οποία επεξηγείται αναλυτικά στο manual χρήσης του SEEP/W (GeoStudio, 2007), οδηγεί στην παρακάτω συντεταγμένη εξίσωση πεπερασμένων στοιχείων (4.7):

$$[K]\{H\} + [M]\{H\}, t = \{Q\} \quad (4.7)$$

Όπου οι μεταβλητές παρουσιάζονται παρακάτω (Πίνακας 4. 2):

Πίνακας 4. 2 Μεταβλητές εξίσωσης πεπερασμένων στοιχείων

Μεταβλητή	Επεξήγηση
$[K]$	Χαρακτηριστικό μητρώο του στοιχείου (element characteristic matrix)
$[M]$	Μητρώο μάζας του στοιχείου (the element mass matrix)
$\{Q\}$	Διάνυσμα ροής του στοιχείου (the element applied flux vector)
$\{H\}$	Διάνυσμα του υδραυλικού φορτίου στους κόμβους του στοιχείου (the vector of nodal heads)
t	Χρόνος

Η εξίσωση (4. 7) είναι η γενική εξίσωση πεπερασμένων στοιχείων για μη μόνιμη ροή σε πορώδες μέσο. Στην περίπτωση που εξετάζεται στην παρούσα διπλωματική αναφερόμαστε σε μόνιμη ροή και συνεπώς το υδραυλικό φορτίο (H) δεν είναι συνάρτηση του χρόνου. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα ο όρος $\{H\}, t$ να είναι μηδενικός και τελικά να προκύπτει η εξίσωση (4. 8):

$$[K]\{H\} = \{Q\} \quad (4. 8)$$

Το SEEP/W εφαρμόζει αριθμητική ολοκλήρωση Gauss για την εκτίμηση του χαρακτηριστικού μητρώου $[K]$ αλλά και του μητρώου μάζας $[M]$ το οποίο δεν χρειάζεται όταν η ροή θεωρείται μόνιμη. Τα ολοκληρώματα εκτιμώνται με δειγματοληψία των ιδιοτήτων του στοιχείου σε συγκεκριμένα καθορισμένα σημεία και στη συνέχεια αθροίζονται μαζί για ολόκληρο το στοιχείο.

Για παράδειγμα, το χαρακτηριστικό μητρώο $[K]$ το οποίο ισούται με το παρακάτω ολοκλήρωμα (4. 9):

$$[K] = \tau \int_A ([B]^T [C] [B]) dA \quad (4. 9)$$

αντικαθίσταται με το παρακάτω άθροισμα (4. 10):

$$[K] = \tau \sum_{j=1}^n [B_j]^T [C_j] [B_j] \det |J_j| W_{1j} W_{2j} \quad (4. 10)$$

Όπου οι μεταβλητές του παραπάνω ολοκληρώματος (4. 10) παρουσιάζονται παρακάτω στον Πίνακα 4. 3:

Πίνακας 4. 3 Μεταβλητές του αθροίσματος του χαρακτηριστικού μητρώου

Μεταβλητή	Επεξήγηση
j	Σημείο ολοκλήρωσης (integration point)
n	Αριθμός των σημείων ολοκλήρωσης (number of integration points)
$[C_j]$	Μητρώο υδροπερατότητας του στοιχείου σε σημείο ολοκλήρωσης (element characteristic matrix)
$[B_j]$	Μητρώο μάζας του στοιχείου (the element hydraulic conductivity matrix at the integration point)
$W_{1j}W_{2j}$	Συντελεστές στάθμισης
$\det J_j $	Η ορίζουσα Ιακωβιανού μητρώου

Ο αριθμός των σημείων που απαιτείται σε ένα στοιχείο εξαρτάται από τον αριθμό των κόμβων και το σχήμα των στοιχείων. Πιο αναλυτικά στοιχεία παρουσιάζονται στο manual του προγράμματος (GeoStudio, 2007).

4.4 Βασικά βήματα για την εκτέλεση ανάλυσης μόνιμης ροής με το SEEP/W

Για την χρησιμοποίηση του λογισμικού SEEP/W για επίλυση μόνιμης ροής απαιτούνται να ακολουθηθούν τα παρακάτω βήματα (Soni & Manwatkar, 2015; Nikvar Hassani, et al., 2015):

1. Δημιουργία του πεδίου ορισμού του αριθμητικού μοντέλου (model domain) με την επιλογή της κατάλληλης γεωμετρίας και την δημιουργία του απαραίτητου πλέγματος.
2. Εισαγωγή των δεδομένων που αφορούν το έδαφος στις διάφορες περιοχές της γεωμετρίας. Τα δεδομένα που είναι απαραίτητα διαφέρουν ανάλογα με την ανάλυση που θα πραγματοποιηθεί. Για παράδειγμα αν επιλεγεί λόγω των πραγματικών συνθηκών να

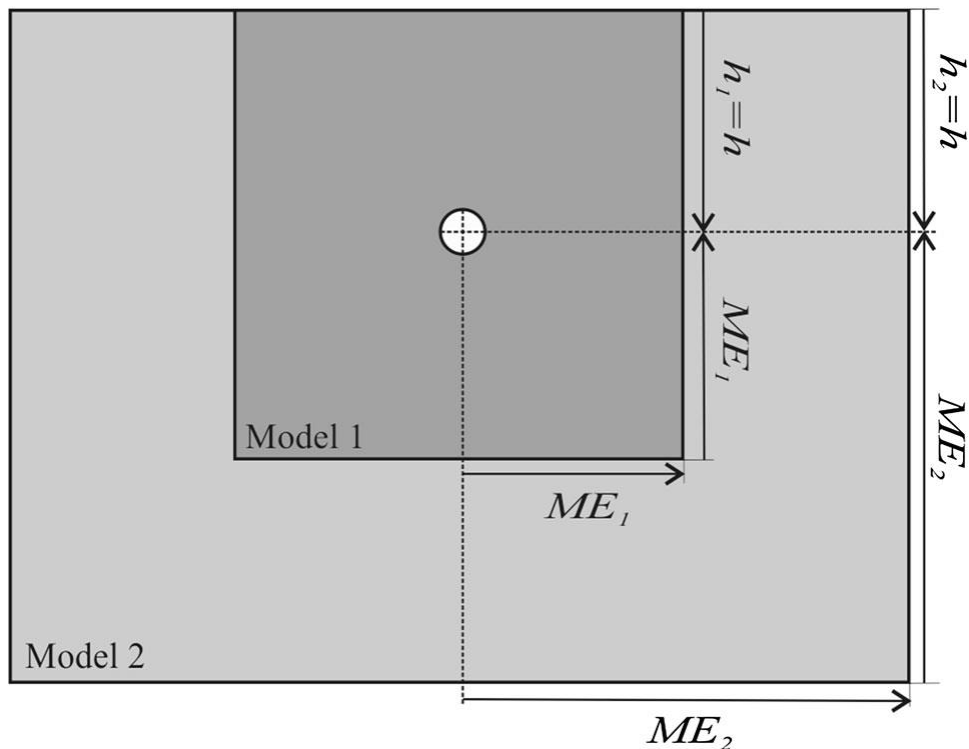
χρησιμοποιηθεί επιλύτης κορεσμένης μόνο ροής τότε αρκεί μία τιμή για την υδροπερατότητα. Σε περίπτωση που χρησιμοποιηθεί ο επιλυτής (solver) κορεσμένης/ακόρεστης ροής τότε για την επίλυση απαιτείται να δοθεί σαν είσοδος στο πρόγραμμα η συνάρτηση μεταβολής της υδροπερατότητας με την περιεκτικότητα κατ' όγκο του εδάφους σε νερό.

3. Ορισμός των κατάλληλων οριακών συνθηκών (boundary conditions).
4. Επιλογή του τύπου της ανάλυσης. Το πρόγραμμα δίνει την δυνατότητα πραγματοποίησης μόνιμης καθώς επίσης και μη μόνιμης ροής.
5. Έλεγχος του μοντέλου με βάση την βιβλιογραφία ή κάποια γνωστή περίπτωση. Στην ανάλυση που πραγματοποιείται στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής ελέγχεται η ορθότητα των αποτελεσμάτων του μοντέλου μέσα από ορισμένες αναλυτικές επιλύσεις που υπάρχουν στην βιβλιογραφία για κάποιες ειδικές περιπτώσεις.
6. Εκτέλεση της ανάλυσης και παρουσίαση των αποτελεσμάτων.

4.5 Πεδίο ορισμού του αριθμητικού μοντέλου (Model domain)

Στο υποκεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται το πεδίο ορισμού το οποίο χρησιμοποιείται καθώς και η έκταση του έτσι ώστε να μπορέσουν να εξαχθούν αποτελέσματα από την χρήση του αριθμητικού μοντέλου, τα οποία δεν θα εξαρτώνται ούτε από το μέγεθος του πεδίου ορισμού αλλά ούτε και από τις οριακές συνθήκες που θα χρησιμοποιηθούν στα άκρα του.

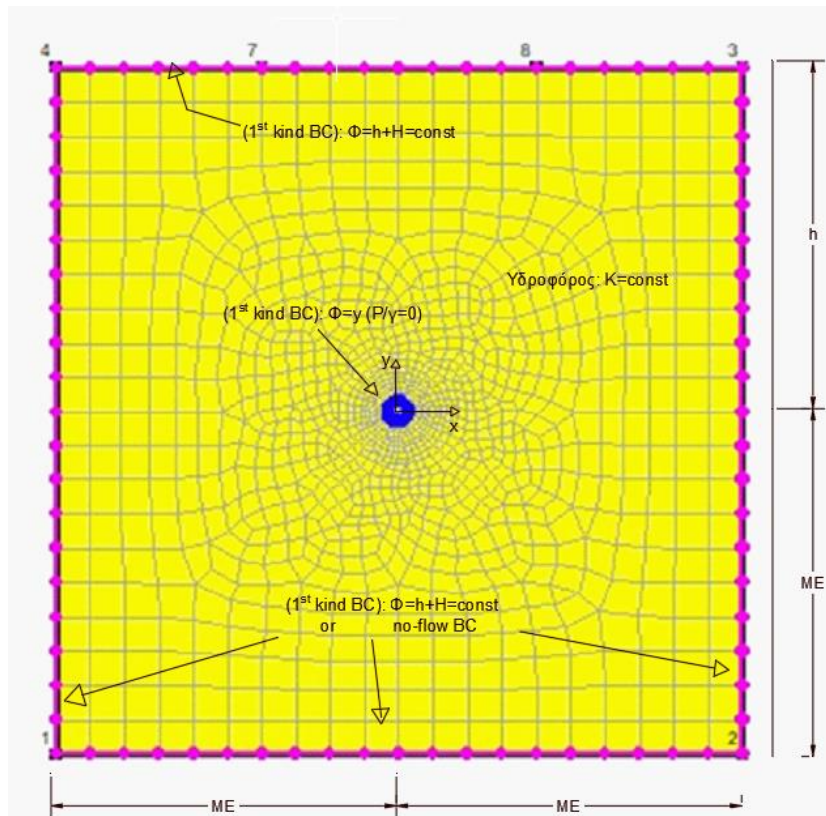
Στην *Εικόνα 4.1* παρουσιάζεται σχηματικά το πεδίο ορισμού το οποίο υιοθετήθηκε για τις αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν και παρουσιάζονται στα επόμενα κεφάλαια. Ως *h* ορίζεται η απόσταση του κέντρου της σήραγγας, η οποία στην συγκεκριμένη εικόνα παρουσιάζεται ως κυκλική αλλά παρακάτω θα πάρει και άλλα σχήματα, από την στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα. Ως ME (Model Extent) ορίζεται το μέγεθος το οποίο υποδηλώνει την έκταση του πεδίου ορισμού και για το οποίο εκτιμάται ένα κατώτατο όριο έτσι ώστε τα αποτελέσματα της ανάλυσης να είναι ανεξάρτητα αυτού.



Εικόνα 4. 1 Σχηματική απεικόνιση του πεδίου ορισμού, όπου h το βάθος της σήραγγας από την στάθμη του υδροφόρου και ME_1 και ME_2 το χαρακτηριστικό μέγεθος του πεδίου ορισμού του αριθμητικού μοντέλου για δύο διαφορετικής έκτασης μοντέλα (Butscher, 2012).

Στην Εικόνα 4. 2 παρουσιάζεται το μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων που χρησιμοποιείται. Στο πάνω όριο του πεδίου ορισμού ορίζεται σταθερό ύψος υδραυλικό ύψος Φ καθώς εκεί βρίσκεται η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα.

Για τις αναλύσεις που πραγματοποιούνται έχει γίνει η θεώρηση ότι το υδραυλικό ύψος στο πάνω όριο του πεδίου ορισμού είναι ομοιόμορφο. Αυτό συνεπάγεται ότι η στάθμη του υδροφόρου δεν επηρεάζεται από την αποστράγγιση λόγω της σήραγγας καθώς γίνεται η θεώρηση όσο νερό εισέρχεται στην σήραγγα, και συνεπώς εξέρχεται από τον υδροφόρο λόγω αυτής αλλά και λόγω άλλων παραγόντων, αναπληρώνεται από άλλες πηγές τροφοδοσίας. Αυτή η θεώρηση για την περίπτωση του υδροφόρου μέσα από τον οποίο διέρχεται η σήραγγα του Αδριάνειου Υδραγωγείου δεν αντικατοπτρίζει την πραγματικότητα καθώς είναι γνωστό από μελέτες που παρουσιάζονται σε επόμενο κεφάλαιο ότι το ισοζύγιο είναι ελλειμματικό. Παρόλα αυτά για να γίνει μία εκτίμηση της εισροής υπογείων νερών για μία δεδομένη χρονική περίοδο κατά την οποία ξέρουμε την στάθμη του υδροφόρου σε σημεία πλησίον της σήραγγας η μεθοδολογία αυτή μπορεί να μας δώσει μία αρκετά καλή ακρίβεια για τα δεδομένα του προβλήματος.

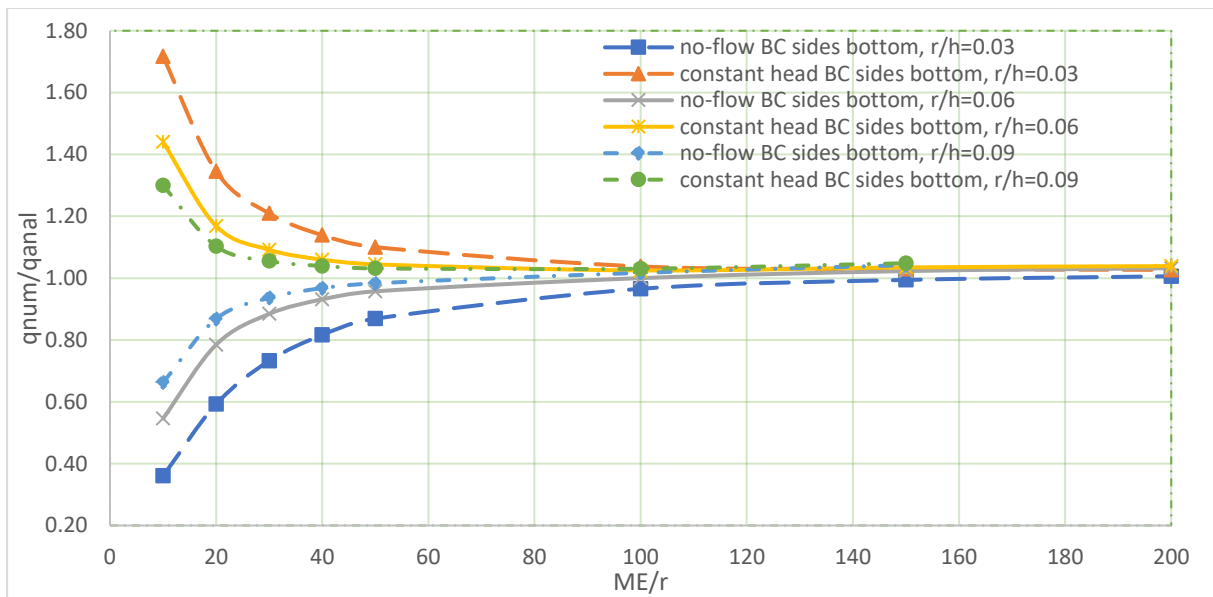


Εικόνα 4. 2 Αριθμητικό μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων για την ροή υπογείων νερών προς κυκλική σήραγγα

Σε αντίθεση με τις αναλυτικές επιλύσεις που παρουσιάζονται σε προηγούμενο κεφάλαιο και θεωρούν ημίπειρο υδροφόρο, οποίος δηλαδή εκτείνεται άπειρα οριζόντια ενώ έχει πεπερασμένο πάχος, η έκταση του πεδίου ορισμού των αριθμητικών μοντέλων είναι πεπερασμένη. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τα αριθμητικά μοντέλα όταν δεν έχουν την απαιτούμενη έκταση να υπερεκτιμούν ή να υποεκτιμούν την εισροή στην σήραγγα ανάλογα με τις οριακές συνθήκες που έχουν καθοριστεί στα πλευρικά και κάτω όρια του αριθμητικού μοντέλου. Πιο συγκεκριμένα εάν στα όρια αυτά χρησιμοποιείται οριακή συνθήκη σταθερού υδραυλικού ύψους και το μέγεθος του μοντέλου είναι μικρό, δηλαδή τα όρια βρίσκονται κοντά στην σήραγγα γύρω από την οποία η υδρομάστευση είναι μεγάλη, τότε η ποσότητα της εισροής προς την σήραγγα υπερεκτιμάται λόγω της μεγάλης διαφοράς δυναμικού. Εάν αντίθετα χρησιμοποιηθεί οριακή συνθήκη μη ροής (no-flow BC) στο κάτω και στα πλευρικά όρια του αριθμητικού μοντέλου τα οποία βρίσκονται κοντά στην σήραγγα τότε υποεκτιμάτε η εισροή στην υπόγεια σήραγγα.

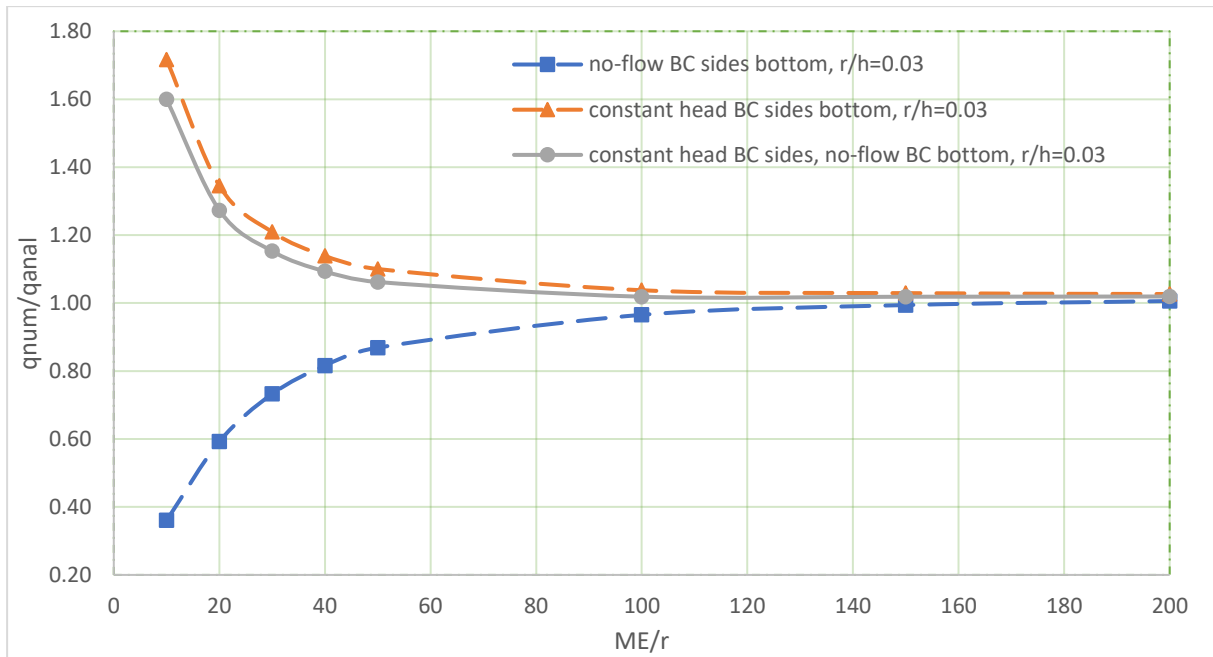
Στο Σχήμα 4. 1 παρουσιάζεται ο λόγος της εισροής σε σήραγγα χωρίς επένδυση που προκύπτει από το αριθμητικό μοντέλο προς την εισροή που προκύπτει από την αναλυτική σχέση. Η τιμή της αναλυτικής σχέσης τείνει να γίνει ίση με αυτή του αριθμητικού μοντέλου όσο πιο μεγάλο πεδίο ορισμού έχουμε επιλέξει ανεξάρτητα από τις οριακές συνθήκες που εφαρμόζονται στο κάτω και στα πλευρικά όρια. Πιο συγκεκριμένα, όσο πιο κοντά στην στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα είναι ο αγωγός τόσο πιο μικρό πεδίο ορισμού είναι αναγκαίο να υπάρχει έτσι ώστε να συγκλίνουν τα αποτελέσματα και να είναι ανεξάρτητα του των διαστάσεων και των οριακών

συνθηκών. Για παράδειγμα, όταν ο λόγος της ακτίνας της σήραγγας προς το βάθος αυτής εντός του υδροφόρου (r/h) είναι ίσος με 0,03 τότε το ο λόγος ME/r πρέπει να είναι μεγαλύτερος από 100 για να προσεγγίζει η αριθμητική λύση την αναλυτική με ακρίβεια μικρότερη από 5%. Επίσης όταν, ο λόγος ME/r είναι ίσος για παράδειγμα με 10 και ο λόγος r/h είναι ίσος με 0,06, τότε με σταθερού υδραυλικού ύψους οριακές συνθήκες κάτω και πλευρικά της σήραγγας η εισροή σε αυτή υπερεκτιμάται κατά 45%, ενώ με οριακές συνθήκες μη ροής (no flux) υποεκτιμάται κατά αντίστοιχο ποσοστό.

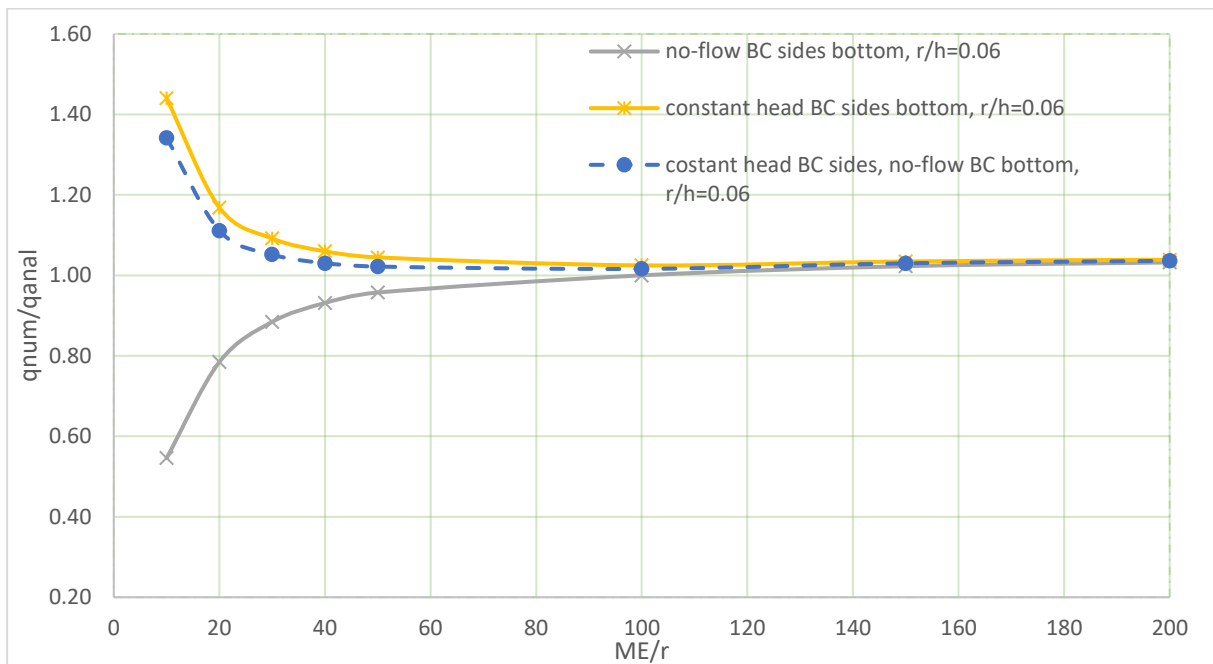


Σχήμα 4. 1 Ο λόγος της αριθμητικής από την αναλυτική υπολογιζόμενη εισροή σε κυκλική σήραγγα χωρίς επένδυση συναρτῆσει του μεγέθους του πεδίου ορισμού του αριθμητικού μοντέλου, για τα διάφορα βάθη της σήραγγας εντός του υδροφόρου και για διαφορετικές οριακές συνθήκες

Στα δύο παρακάτω Σχήματα (Σχήμα 4. 2, Σχήμα 4. 3) εξετάζεται κατά πόσο η χρησιμοποίηση οριακής συνθήκης σταθερού υδραυλικού ύψους στα δύο πλευρικά όρια και μη ροής (no flow) στο κάτω όριο του πεδίου ορισμού μπορεί να οδηγήσει στην ανάγκη για χρησιμοποίηση μικρότερου πεδίου ορισμού έτσι ώστε να συγκλίνουν οι τιμές που προκύπτουν από το αριθμητικό μοντέλο.



Σχήμα 4. 2 Ο λόγος της αριθμητικής από την αναλυτική υπολογιζόμενη εισροή σε κυκλική σήραγγα χωρίς επένδυση συναρτῆσει του μεγέθους του πεδίου ορισμού του αριθμητικού μοντέλου για 3 διαφορετικές οριακές συνθήκες και για $r/h=0,03$



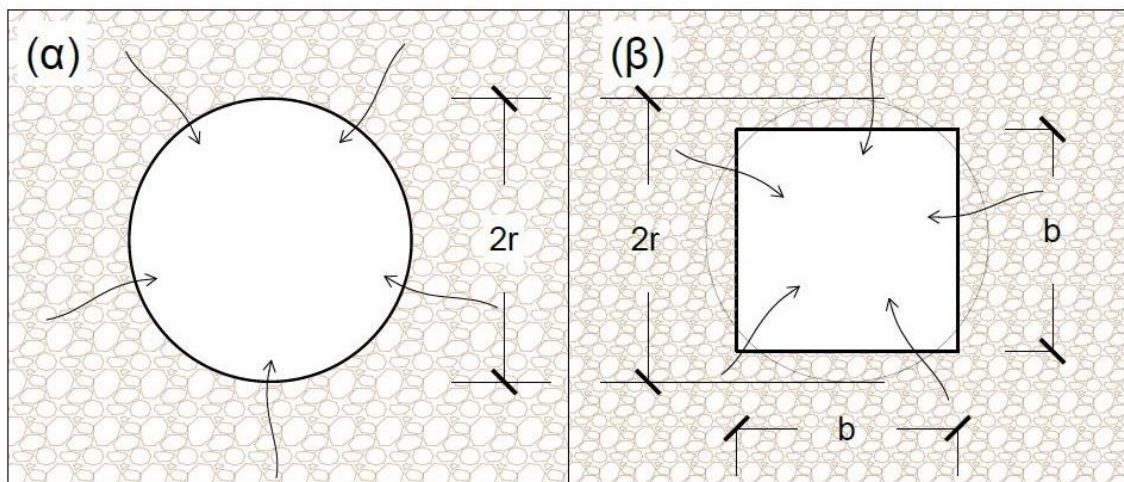
Σχήμα 4. 3 Ο λόγος της αριθμητικής από την αναλυτική υπολογιζόμενη εισροή σε κυκλική σήραγγα χωρίς επένδυση συναρτῆσει του μεγέθους του πεδίου ορισμού του αριθμητικού μοντέλου για 3 διαφορετικές οριακές συνθήκες και για $r/h=0,06$

Από τα παραπάνω σχήματα δεν προκύπτει κάποιο αξιόλογο «κέρδος» μετά από την χρησιμοποίηση αυτού του συνδυασμού οριακών συνθηκών στο κάτω και στα πλευρικά όρια του πεδίου ορισμού. Παρόλα αυτά με την χρησιμοποίηση οριακής συνθήκης σταθερού υδραυλικού ύψους πλευρικά και μη ροής στο κάτω όριο του πεδίου ορισμού παρατηρείται ότι απαιτείται λίγο μικρότερο μέγεθος πεδίου ορισμού σε σχέση με την καθολική χρήση σταθερού υδραυλικού ύψους ή συνθήκης μη ροής.

4.5.1 Πεδίο ορισμού για κυκλική ή τετραγωνική διατομή

Σε συνέχεια του προηγούμενου υποκεφαλαίου όπου έγινε διερεύνηση σχετικά με το πεδίο ορισμού του αριθμητικού μοντέλου στην περίπτωση που η σήραγγα ήταν κυκλικής διατομής χωρίς επένδυση, εξετάζεται το πεδίο ορισμού που πρέπει να χρησιμοποιηθεί στην περίπτωση που έχουμε σήραγγα τετραγωνικής διατομής. Ο λόγος για τον οποίο εξετάζεται τετραγωνική διατομή είναι το γεγονός πως αυτή συναντάται σε αρκετά τμήματα του Αδριάνειου Υδραγωγείου.

Πιο συγκεκριμένα εξετάζεται το κατά πόσο μια σήραγγα με τετραγωνική διατομή καθώς αυξάνεται το πεδίο ορισμού έχει την ίδια συμπεριφορά σε ότι αφορά την εισροή νερού σε αυτή με μία σήραγγα κυκλικής διατομής με την ίδια περίμετρο (Εικόνα 4. 3).

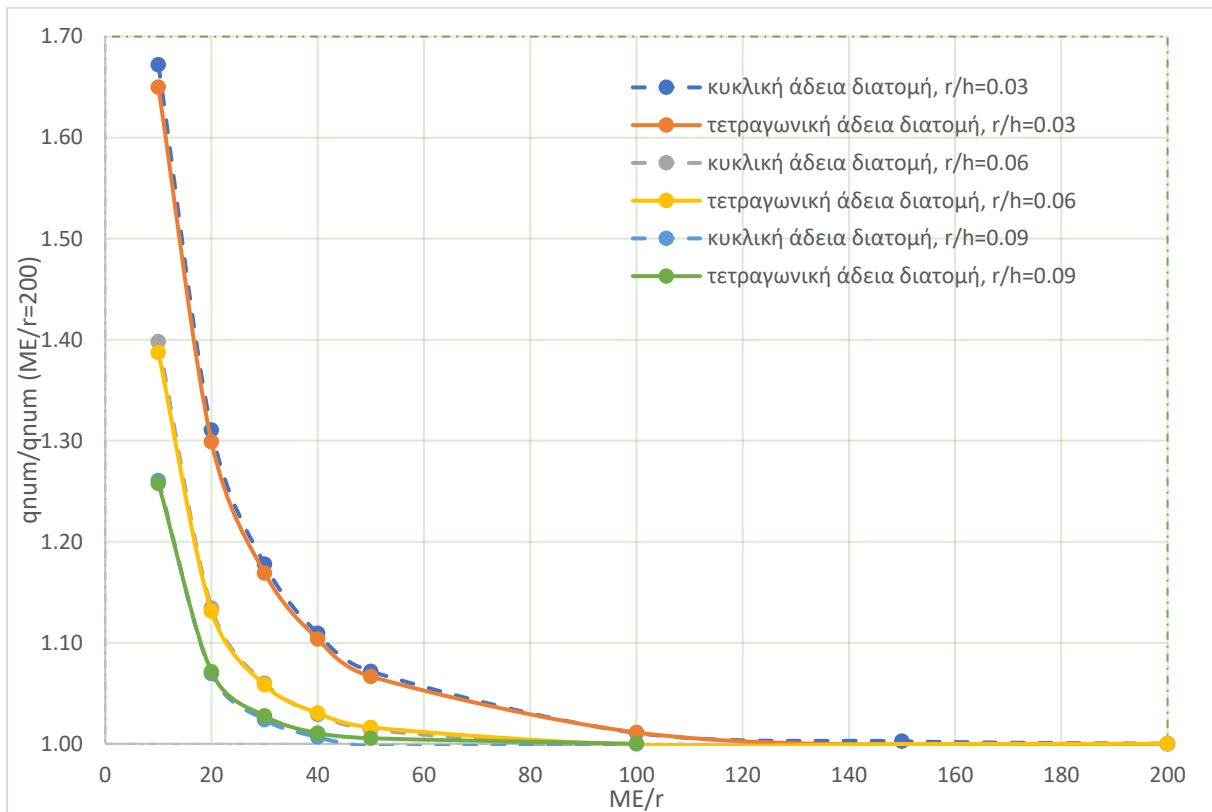


Εικόνα 4. 3 α) Κυκλική διατομή σήραγγας με ακτίνα r , β) τετραγωνική διατομή σήραγγας με πλευρά b και περίμετρο ίση με την περίμετρο κυκλικής διατομής με ακτίνα r

Η διερεύνηση αυτή είναι χρήσιμη καθώς όπως με την κυκλική έτσι και με οποιαδήποτε άλλη διατομή θα πρέπει να είναι γνωστό το ελάχιστο μέγεθος του πεδίου ορισμού πάνω από το οποίο παρατηρείται να συγκλίνουν οι τιμές της παροχής εισροής που υπολογίζονται από το αριθμητικό μοντέλο. Το μέγεθος του πεδίου ορισμού πάνω από το οποίο υπολογίζεται η ίδια παροχή εισροής θα πρέπει να είναι γνωστό καθώς σε επόμενο στάδιο θα εξεταστεί το πως μεταβάλλεται η υπολογιζόμενη παροχή με το βάθος για κάθε είδος διατομής και για τους

υπολογισμούς αυτούς θα πρέπει να χρησιμοποιείται το κατάλληλο πεδίο ορισμού έτσι ώστε να προκύπτουν τα κατάλληλα αποτελέσματα.

Στο Σχήμα 4. 4 παρουσιάζεται συναρτήσεσι του μεγέθους του πεδίου ορισμού, για διάφορους λόγους ακτίνας προς βάθος σήραγγας εντός του υδροφόρου (r/h), ο λόγος της εισερχόμενης παροχής σε κυκλική ή τετραγωνική σήραγγα προς την εισερχόμενη παροχή στη σήραγγα αυτή για αρκετά μεγάλο μέγεθος του πεδίου ορισμού ($ME/r= 200$). Από το σχήμα αυτό παρατηρούμε ότι όσο πιο μεγάλος είναι ο λόγος r/h , δηλαδή όσο πιο ψηλά μέσα στον υδροφόρο βρίσκεται η σήραγγα, τόσο πιο μικρό πεδίο ορισμού απαιτείται ανεξάρτητα από το σχήμα της διατομής.

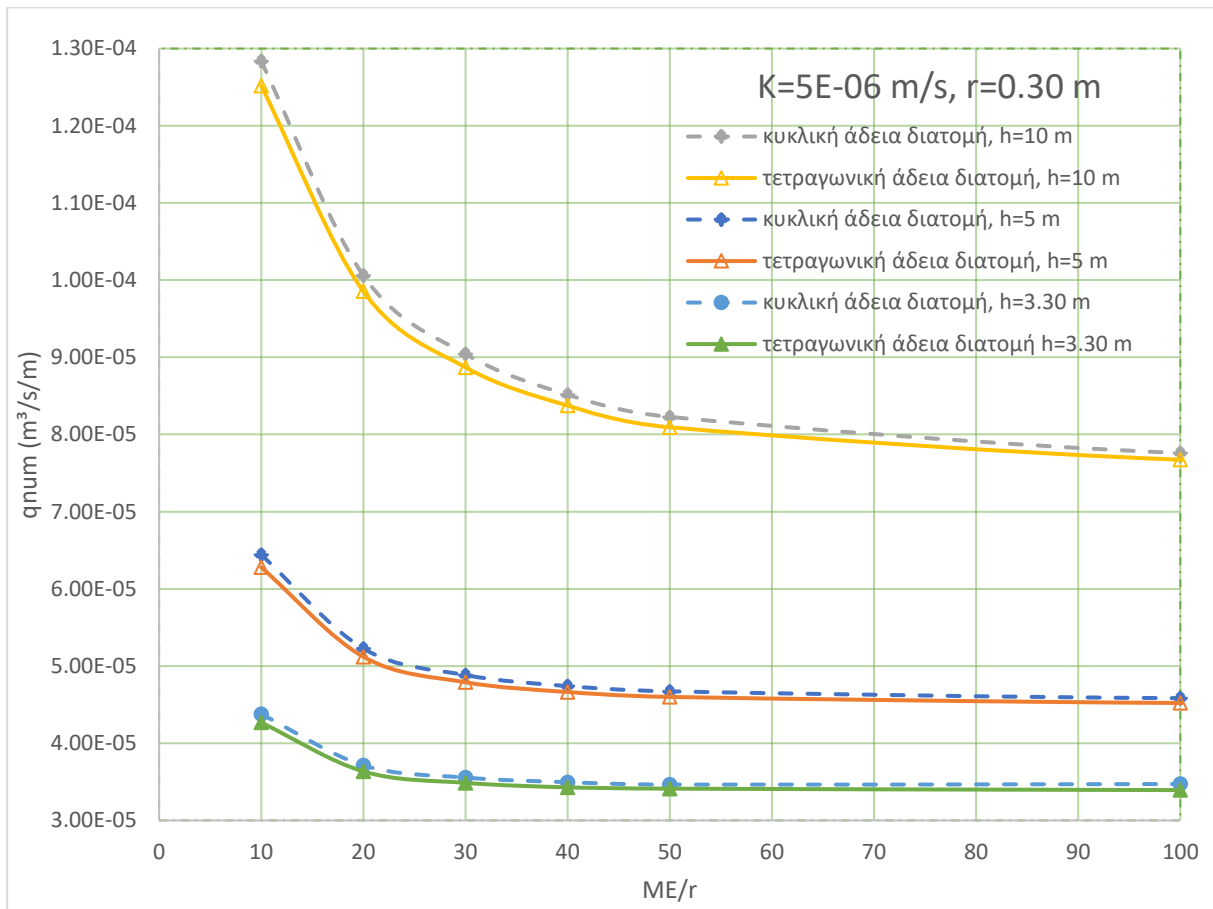


Σχήμα 4. 4 Ο λόγος της υπολογιζόμενης εισροής για συγκεκριμένο μέγεθος πεδίου ορισμού προς την υπολογιζόμενη εισροή για αρκετά μεγάλο πεδίο ορισμού, σε κυκλική και τετραγωνική σήραγγα χωρίς επένδυση, συναρτήσεσι του μεγέθους του πεδίου ορισμού του αριθμητικού μοντέλου, για τα διάφορα βάθη της σήραγγας εντός του υδροφόρου

Από το Σχήμα 4. 4 συμπεραίνουμε ότι για r/h μικρότερο από 0,03, είτε η διατομή είναι κυκλική είτε είναι τετραγωνική απαιτείται ο λόγος ME/r να είναι μεγαλύτερος από περίπου 100 με την θεώρηση ότι θέλουμε ακρίβεια 1-2%. Για r/h ίσο με 0,06 αρκεί ο λόγος ME/r να είναι ίσος με 50 και για r/h ίσο με 0,09 αρκεί 30 για να έχουμε σύγκλιση με σφάλμα 1-2%.

Στο Σχήμα 4. 5 παρουσιάζεται για μία συγκεκριμένη ακτίνα και υδροπερατότητα και για τρία διαφορετικά βάθη (h) η τιμή της παροχής εισροής που υπολογίζεται για κυκλική και τετραγωνική διατομή συναρτήσεσι του μεγέθους του πεδίου ορισμού. Από το σχήμα αυτό όπως

και από το παραπάνω είναι φανερό ότι σε κυκλική διατομή εισέρχεται μεγαλύτερη παροχή από ότι σε τετραγωνική διατομή με την ίδια περίμετρο.



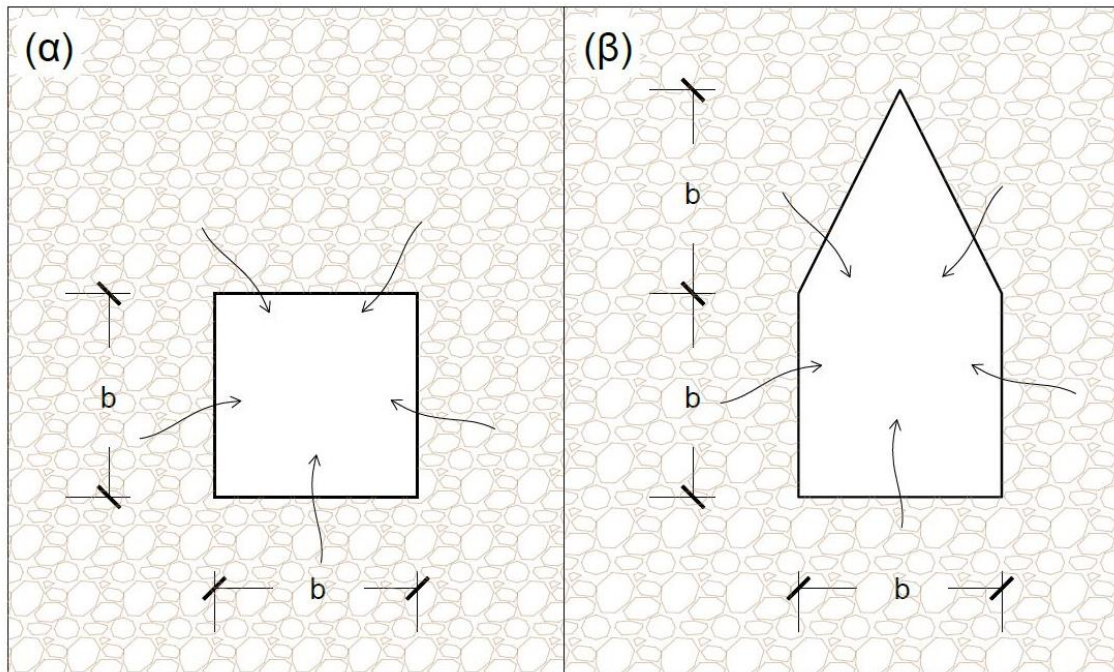
Σχήμα 4. 5 Η υπολογιζόμενη εισροή σε κυκλική και τετραγωνική σήραγγα χωρίς επένδυση συναρτήσει του μεγέθους του πεδίου ορισμού του αριθμητικού μοντέλου για τα διάφορα βάθη της σήραγγας εντός του υδροφόρου για $K=5 \times 10^{-6} \text{ m/s}$, $r=0.30 \text{ m}$

4.5.2 Πεδίο ορισμού για τετραγωνική διατομή με ή χωρίς οροφή

Παρακάτω διερευνάται ομοίως με το παραπάνω υποκεφάλαιο το πεδίο ορισμού του αριθμητικού μοντέλου αλλά τώρα για τετραγωνική και για τετραγωνική με οροφή διατομή (Εικόνα 4. 4).

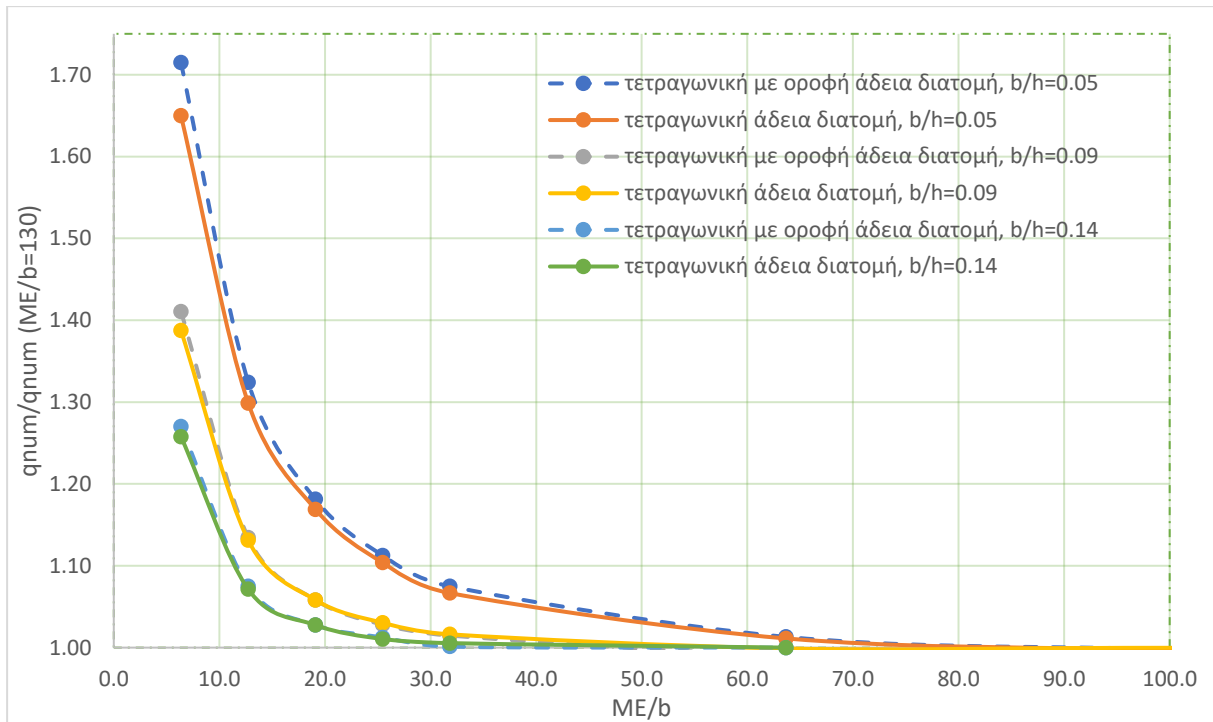
Η διερεύνηση αυτή είναι χρήσιμη καθώς όπως με την κυκλική έτσι και με οποιαδήποτε άλλη διατομή θα πρέπει να είναι γνωστό το ελάχιστο μέγεθος του πεδίου ορισμού πάνω από το οποίο παρατηρείται να συγκλίνουν οι τιμές της παροχής εισροής που υπολογίζονται από το αριθμητικό μοντέλο. Το μέγεθος του πεδίου ορισμού πάνω από το οποίο υπολογίζεται η ίδια παροχή εισροής θα πρέπει να είναι γνωστό καθώς σε επόμενο στάδιο θα συγκριθεί το πως μεταβάλλεται η υπολογιζόμενη παροχή με το βάθος για κάθε είδος διατομής και για τους

υπολογισμούς αυτούς θα πρέπει να χρησιμοποιείται το κατάλληλο πεδίο ορισμού έτσι ώστε να προκύπτουν σωστά αποτελέσματα.



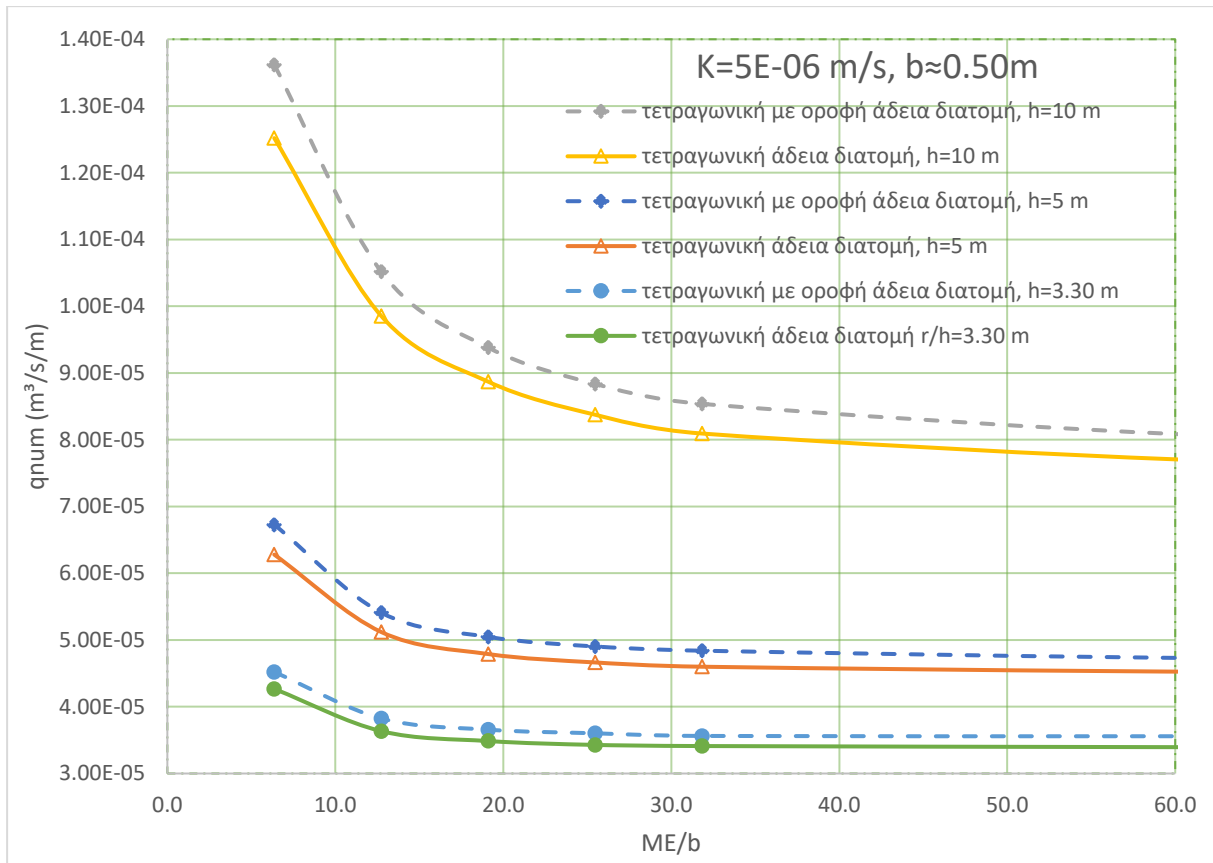
Εικόνα 4. 4 α) Τετραγωνική διατομή σήραγγας με πλευρά b , β) τετραγωνική με οροφή διατομή σήραγγας με πλευρά b και ύψος οροφής b

Στο Σχήμα 4. 6 παρουσιάζεται συναρτήσεσι του μεγέθους του πεδίου ορισμού, για διάφορους λόγους πλευράς τετραγώνου προς βάθος σήραγγας εντός του υδροφόρου (b/h), ο λόγος της εισερχόμενης παροχής σε τετραγωνική ή τετραγωνική με οροφή σήραγγα προς την εισερχόμενη παροχή στη σήραγγα αυτή για αρκετά μεγάλο μέγεθος του πεδίου ορισμού ($ME/b=130$). Από το σχήμα αυτό παρατηρούμε ότι όσο πιο μεγάλος είναι ο λόγος b/h , δηλαδή όσο πιο ψηλά μέσα στον υδροφόρο βρίσκεται η σήραγγα, τόσο πιο μικρό πεδίο ορισμού απαιτείται ανεξάρτητα από το εάν η τετραγωνική διατομή έχει οροφή ή όχι. Επίσης συμπεραίνουμε ότι για b/h μικρότερο από 0,05, είτε η διατομή έχει είτε δεν έχει οροφή απαιτείται ο λόγος ME/b να είναι μεγαλύτερος από περίπου 60 με την θεώρηση ότι θέλουμε ακρίβεια 1-2%. Για b/h ίσο με 0,09 αρκεί ο λόγος ME/b να είναι ίσος με 30 και για r/h ίσο με 0,14 αρκεί περίπου 25 για να έχουμε σύγκλιση με σφάλμα 1-2%.



Σχήμα 4. 6 Ο λόγος της υπολογιζόμενης εισροής για συγκεκριμένο μέγεθος πεδίου ορισμού προς την υπολογιζόμενη εισροή για αρκετά μεγάλο πεδίο ορισμού, σε τετραγωνική και σε τετραγωνική με οροφή σήραγγα χωρίς επένδυση, συναρτήσει του μεγέθους του πεδίου ορισμού του αριθμητικού μοντέλου, για τα διάφορα βάθη της σήραγγας εντός του υδροφόρου

Στο Σχήμα 4. 7 παρουσιάζεται για μία συγκεκριμένη ακτίνα και υδροπερατότητα και για τρία διαφορετικά βάθη (h) η τιμή της παροχής εισροής που υπολογίζεται για κυκλική και τετραγωνική διατομή συναρτήσει του μεγέθους του πεδίου ορισμού. Από το σχήμα αυτό όπως και από το παραπάνω είναι φανερό και λογικό ότι σε τετραγωνική με οροφή διατομή εισέρχεται μεγαλύτερη παροχή από ότι σε τετραγωνική διατομή χωρίς οροφή.



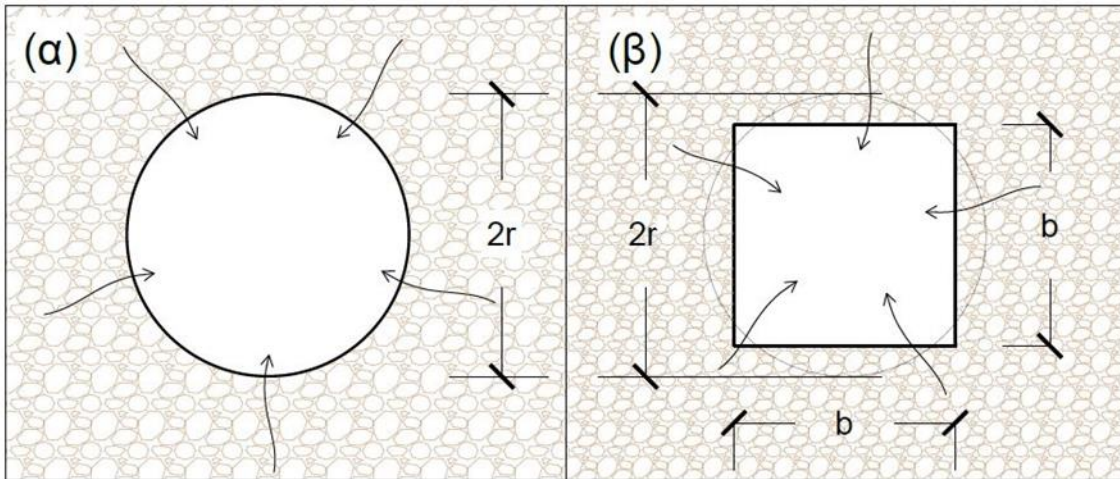
Σχήμα 4. 7 Η υπολογιζόμενη εισροή σε τετραγωνική και τετραγωνική με οροφή σήραγγα χωρίς επένδυση συναρτήσει του μεγέθους του πεδίου ορισμού του αριθμητικού μοντέλου για τα διάφορα βάθη της σήραγγας εντός του υδροφόρου για $K=5 \times 10^{-6} \text{ m/s}$, $b=0.50 \text{ m}$

4.6 Διερεύνηση εισροής σε σχέση με το βάθος εντός του υδροφόρου

Σε αυτό το υποκεφάλαιο γίνεται διερεύνηση σχετικά με το κατά πόσο επηρεάζεται η εισροή υπογείων υδάτων στην σήραγγα ανάλογα με το σχήμα της διατομής της, ανάλογα με το ύψος του νερού εντός αυτής και ανάλογα με το βάθος εντός του υδροφόρου στο οποίο βρίσκεται. Η σήραγγα για την οποία πραγματοποιούνται οι παρακάτω αναλύσεις είναι υδρομαστευτική και συνεπώς θεωρείται ότι είναι χωρίς επένδυση. Επίσης, οι διατομές που επιλέγονται και οι διαστάσεις αυτών βασίζονται σε τυπικές διαστάσεις διατομών του Αδριάνειου Υδραγωγείου σε τμήματα που αυτό υδρομαστεύει.

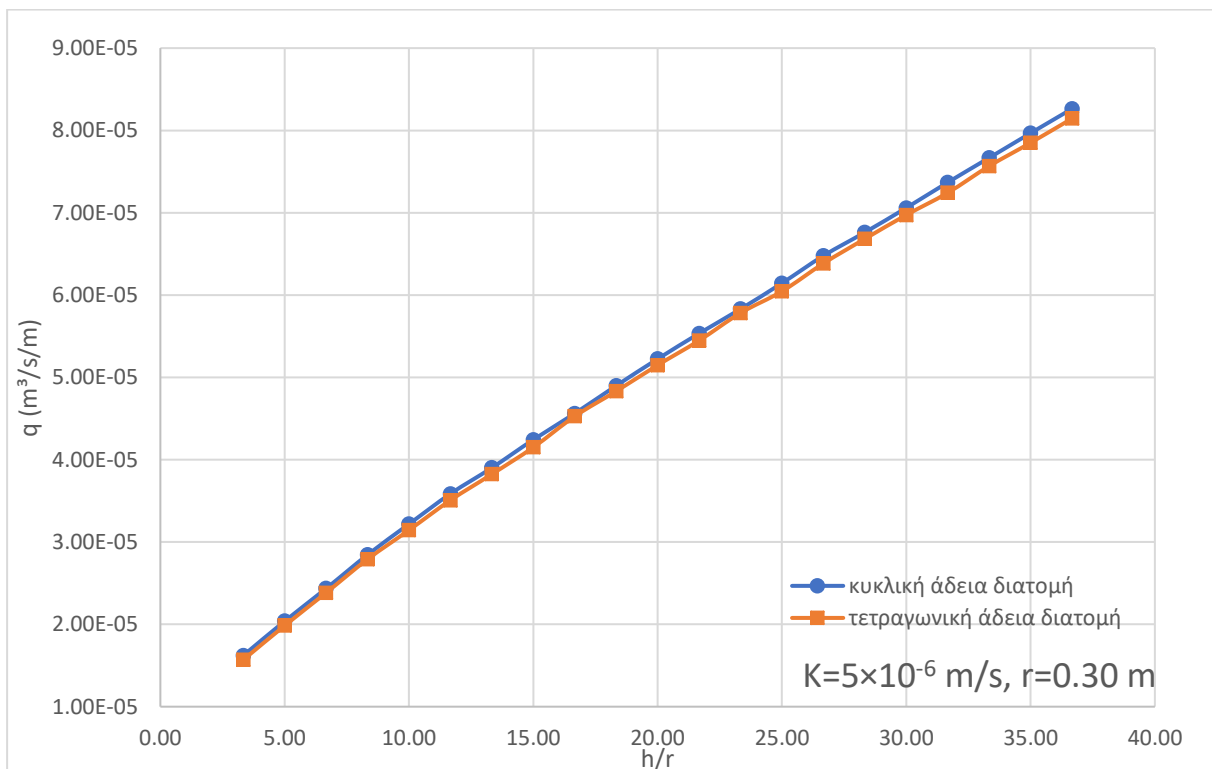
4.6.1 Σύγκριση εισροής σε σχέση με το βάθος σε κυκλική και τετραγωνική διατομή

Παρακάτω γίνεται σύγκριση ανάμεσα στην παροχή που εισέρχεται σε μία κυκλικής και σε μία τετραγωνικής διατομής σήραγγα, με ίση περίμετρο με την κυκλική (Εικόνα 4. 5), συναρτήσει του βάθους που αυτή βρίσκεται εντός του υδροφόρου.



Εικόνα 4. 5 α) Κυκλική διατομή σήραγγας με ακτίνα r , β) τετραγωνική διατομή σήραγγας με πλευρά b και περίμετρο ίση με την περίμετρο κυκλικής διατομής με ακτίνα r

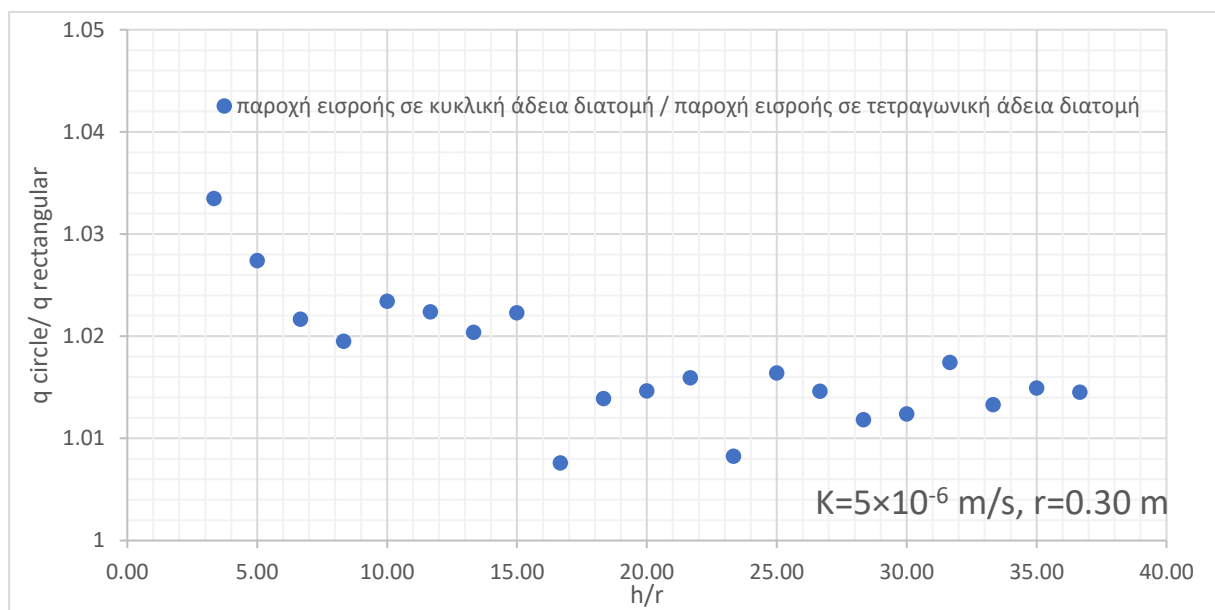
Στο Σχήμα 4. 8 παρουσιάζονται οι τιμές της εισροής για κυκλική και τετραγωνική σήραγγα με την ίδια περίμετρο, με συγκεκριμένη υδροπερατότητα (K) ίση με 5×10^{-6} m/s και με ακτίνα κύκλου (r) ίση με 0,30 m.



Σχήμα 4. 8 Παροχή εισροής σε κυκλική και τετραγωνική σήραγγα συναρτήσει του βάθους εντός του υδροφόρου για $r=0.30$ m και $K= 5 \times 10^{-6}$ m/s

Τα πιο χρήσιμα συμπεράσματα όμως προκύπτουν από το Σχήμα 4. 9. Στο σχήμα αυτό φαίνεται ότι η διαφορά της εισροής ανάμεσα σε μία κυκλική και σε μία τετραγωνική διατομή με την ίδια περίμετρο είναι από 1-3%. Πιο συγκεκριμένα, σε σήραγγα που είναι ψηλά μέσα στον υδροφόρο και έχει κυκλική διατομή εισέρχεται περίπου 3% περισσότερο νερό από ότι εισέρχεται σε μία τετραγωνική διατομή. Όταν όμως η σήραγγα βρίσκεται σε μεγαλύτερα βάθη η διαφορά αυτή μικραίνει και πλησιάζει το 1-1,5%.

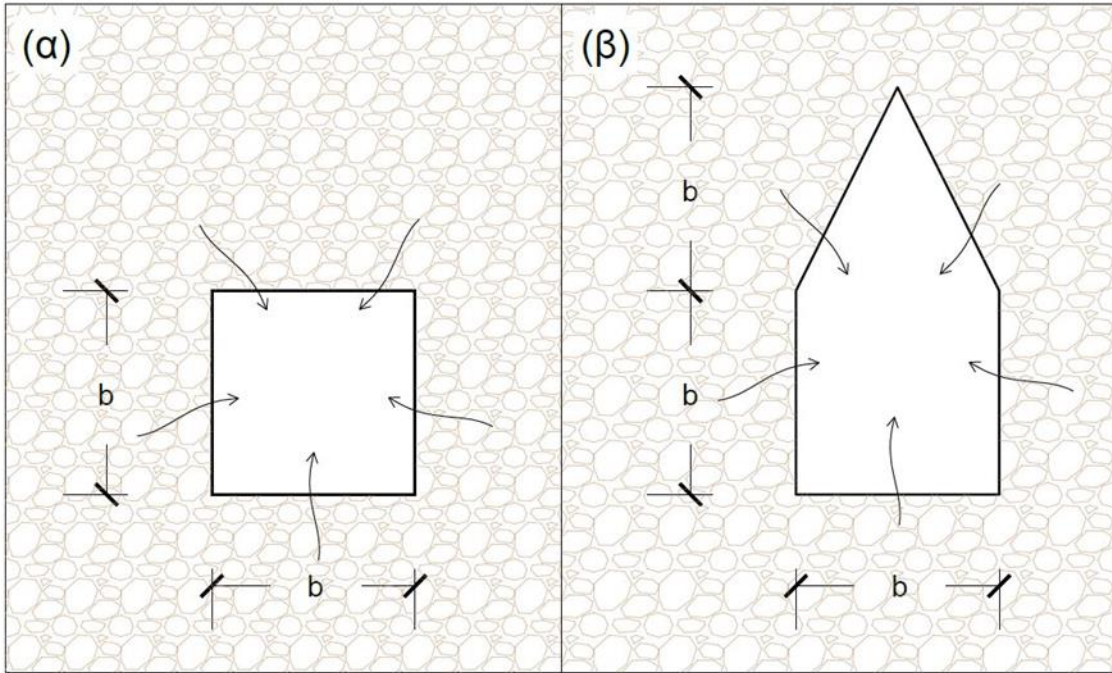
Τα ποσοστά αυτά είναι αρκετά μικρά και ίσως να μην έχουν ιδιαίτερη αξία όμως ανεξάρτητα από τις παραδοχές και τις αβεβαιότητες παρατηρείται ότι η κυκλική διατομή σε μία σήραγγα έχει σαν αποτέλεσμα μεγαλύτερη υδρομάστευση. Παρόλο που το ποσοστό του 1-3% φαίνεται μικρό σε μία μεγάλη μήκους σήραγγα σε κλίμακα ημερών ή μηνών μπορεί να μεταφράζεται σε χιλιάδες κυβικά νερού.



Σχήμα 4. 9 Μεταβολή του λόγου της παροχής εισροής σε κυκλική προς τετραγωνική σήραγγα συναρτήσει του βάθους που βρίσκεται αυτή εντός του υδροφόρου για $K=5 \times 10^{-6} \text{ m/s}$, $r=0.30 \text{ m}$

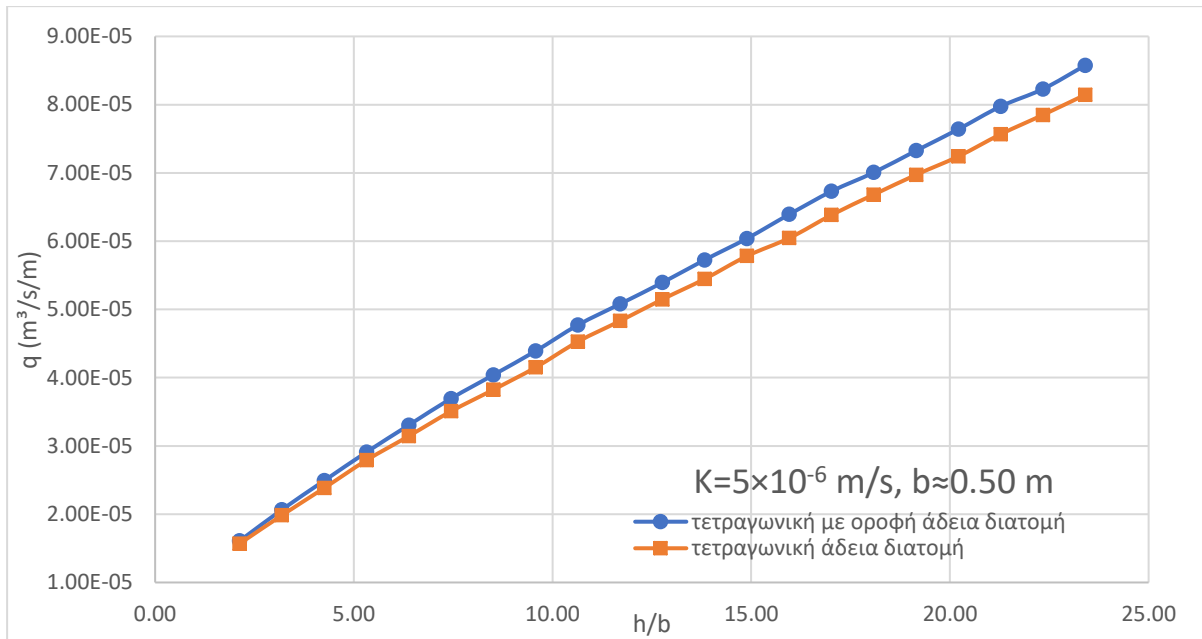
4.6.2 Σύγκριση εισροής σε σχέση με το βάθος σε τετραγωνική διατομή με και χωρίς οροφή

Παρακάτω υπολογίζεται η διαφορά ανάμεσα στην παροχή που εισέρχεται σε μία τετραγωνική με τριγωνική οροφή και σε μία τετραγωνική χωρίς οροφή σήραγγα (Εικόνα 4. 6), συναρτήσει του βάθους που αυτή βρίσκεται εντός του υδροφόρου.



Εικόνα 4. 6 α) Τετραγωνική διατομή σήραγγας με πλευρά b , β) τετραγωνική με οροφή διατομή σήραγγας με πλευρά b και ύψος οροφής b

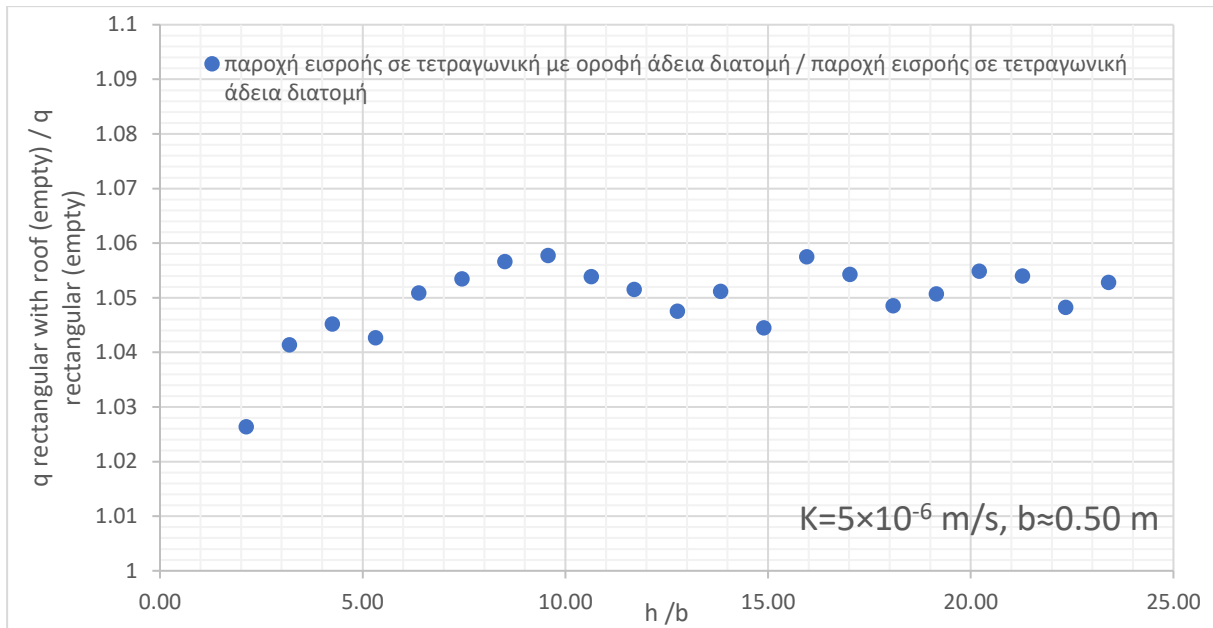
Στο Σχήμα 4. 10 παρουσιάζονται οι τιμές της εισροής για τετραγωνική με και χωρίς οροφή σήραγγα, με συγκεκριμένη υδροπερατότητα (K) ίση με 5×10^{-6} m/s και με πλευρά τετραγώνου (b) ίση με 0,50 m.



Σχήμα 4. 10 Παροχή εισροής σε τετραγωνική με οροφή και χωρίς οροφή σήραγγα συναρτήσει του βάθους εντός του υδροφόρου για $b=0.50\text{ m}$ και $K=5 \times 10^{-6}\text{ m/s}$

Στο Σχήμα 4. 11 παρουσιάζεται ο λόγος της παροχής που εισέρχεται σε μία τετραγωνική διατομή με τριγωνική οροφή προς μια τετραγωνική διατομή χωρίς οροφή. Η σήραγγα με οροφή όμως παρουσιάζεται στην Εικόνα 4. 6 δέχεται για h/b μεγαλύτερο από 6 παροχή 5% μεγαλύτερη από σήραγγα χωρίς οροφή. Όταν η σήραγγα είναι ψηλά μέσα στον υδροφόρο, για h/b μικρότερο από 6, η διαφορά του 5% μειώνεται μέχρι να φτάσει περίπου στο 2-2,5%.

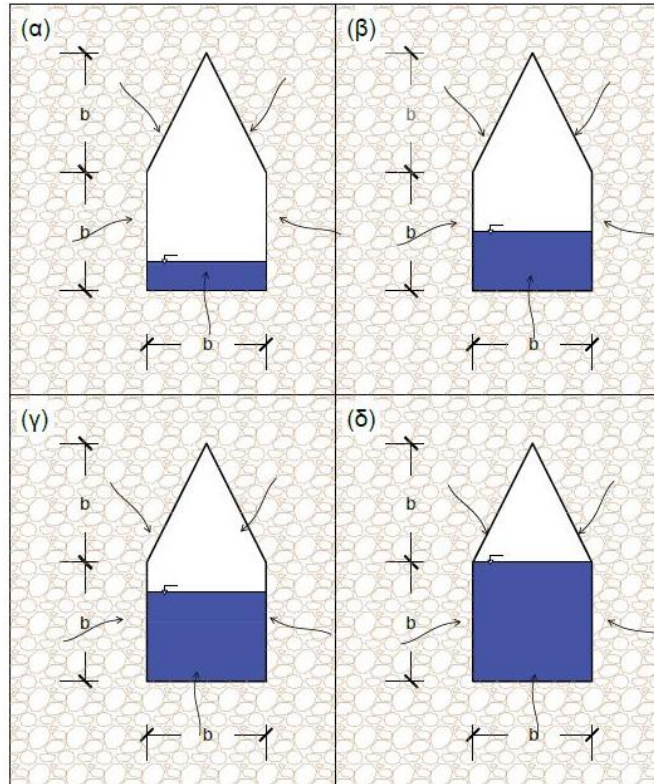
Το γεγονός ότι στην διατομή με οροφή εισέρχεται περισσότερο νερό μοιάζει λογικό δεδομένου ότι η διατομή αυτή έχει μεγαλύτερη περίμετρο και άρα το νερό μπορεί να εισέρθει από μεγαλύτερο μήκος σε σχέση με την διατομή χωρίς οροφή.



Σχήμα 4. 11 Μεταβολή του λόγου της παροχής εισροής σε τετραγωνική με οροφή προς τετραγωνική χωρίς οροφή σήραγγα συναρτήσει του βάθους εντός του υδροφόρου για $K=5 \times 10^{-6} \text{ m/s}$, $b=0.50 \text{ m}$

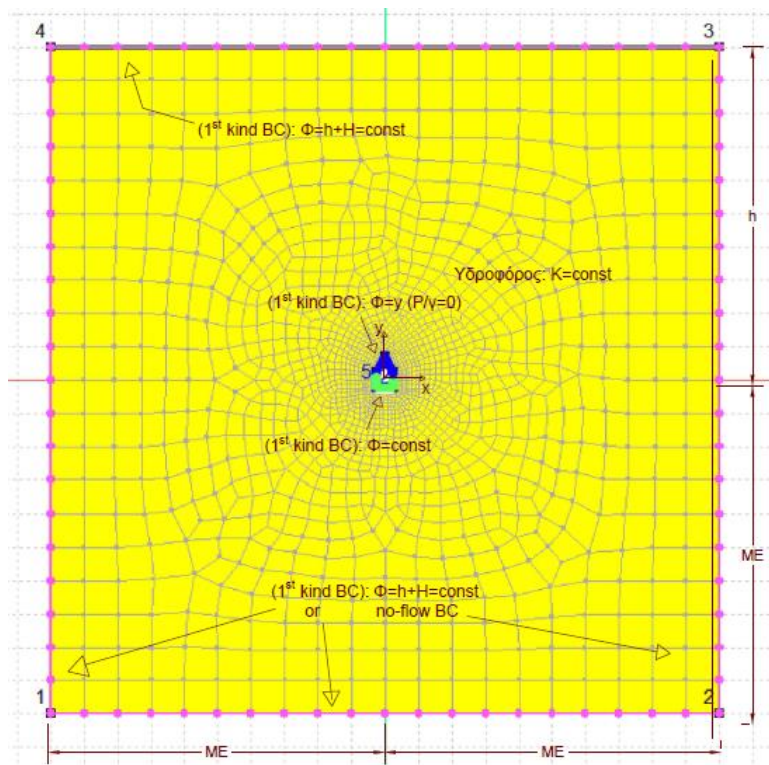
4.6.3 Σύγκριση εισροής σε σχέση με το βάθος σε τετραγωνική διατομή με οροφή ανάλογα με το ύψος νερού εντός της διατομής

Παρακάτω υπολογίζεται η επίδραση που έχει στην εισερχόμενη παροχή σε μια σήραγγα το νερό που μπορεί ήδη να βρίσκεται και να ρέει εντός αυτής. Η επίδραση του νερού εντός της σήραγγας υπολογίζεται σε τετραγωνική χωρίς επένδυση διατομή με τριγωνική οροφή και εξετάζονται τέσσερα διαφορετικά ύψη νερού, όπως παρουσιάζονται στην *Εικόνα 4. 7*.



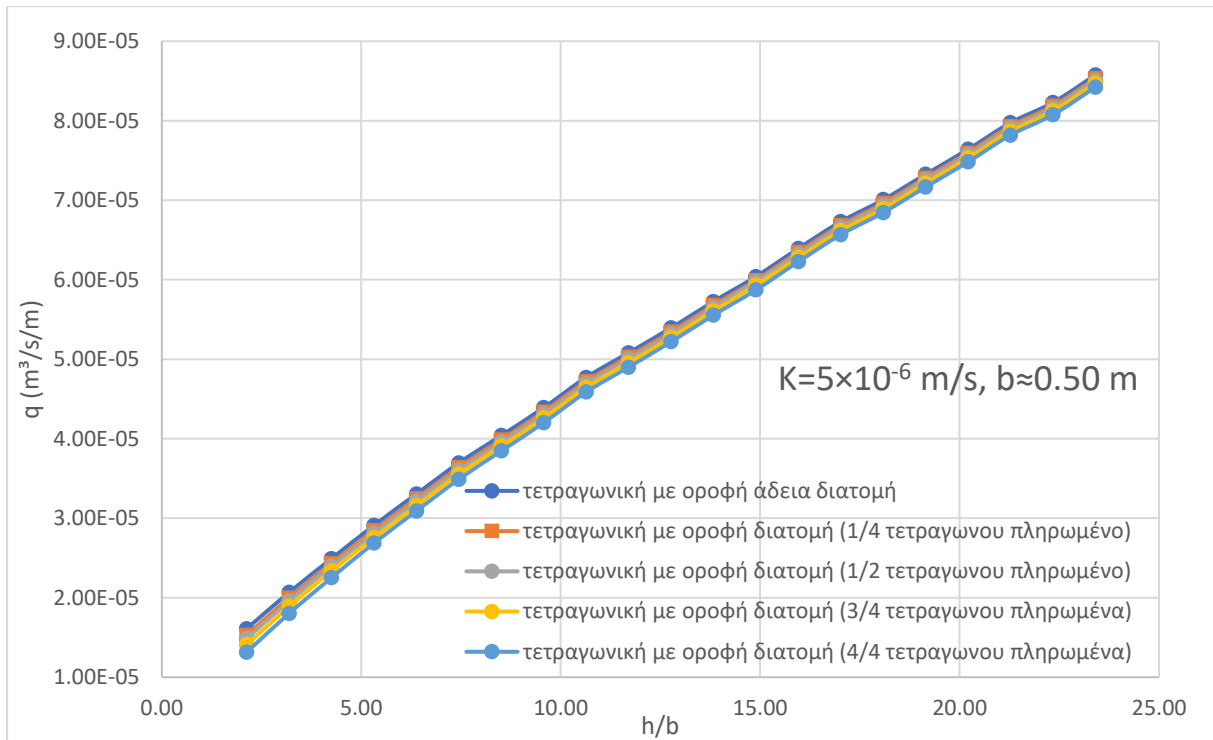
Εικόνα 4. 7 Τετραγωνική με οροφή διατομή σήραγγας με πλευρά b και ύψος οροφής b , εντός της οποίας το νερό βρίσκεται σε ύψος: α) $1/4 b$, β) $2/4 b$, γ) $3/4 b$, δ) $4/4 b$

Το αριθμητικό μοντέλο που χρησιμοποιείται παρουσιάζεται στην Εικόνα 4. 8 και είναι σχεδόν όμοιο με το αριθμητικό μοντέλο που περιγράφεται σε προηγούμενο κεφάλαιο για την κυκλική σήραγγα, με την διαφορά να εντοπίζεται, εκτός από την γεωμετρία της διατομής, στην οριακή συνθήκη που χρησιμοποιείται στο τμήμα της περιμέτρου της διατομής το οποίο έρχεται σε επαφή με το νερό που ήδη βρίσκεται εντός της σήραγγας. Πιο συγκεκριμένα στο πάνω τμήμα της διατομής χρησιμοποιείται συνθήκη μηδενικής πίεσης και άρα το ολικό υδραυλικό φορτίο ορίζεται ίσο με την κατακόρυφη απόσταση από την αρχή των αξόνων (δηλαδή ίσο με y). Αντίθετα, στο κάτω τμήμα της διατομής το ολικό υδραυλικό φορτίο ισούται με το άθροισμα της κατακόρυφης απόστασης από την ελεύθερη επιφάνεια του νερού έως την αρχή των αξόνων (ύψος δυναμικής ενέργειας λόγω υψομέτρου y) και του ύψους κινητικής ενέργειας ($\frac{V^2}{2g}$). Άρα, για κάθε μία από τις τέσσερις περιπτώσεις της παραπάνω εικόνας (Εικόνα 4. 7) η τιμή του ολικού υδραυλικού ύψους που τίθεται στην βρεχόμενη περίμετρο θα είναι διαφορετική. Να σημειωθεί ότι σε ότι αφορά το ύψος της κινητικής ενέργειας, το οποίο δεν αποτελεί καθοριστικό παράγοντα και θα μπορούσε ακόμη και να αμεληθεί, γίνεται θεώρηση ότι και για τις τέσσερις περιπτώσεις η παροχή που μεταφέρεται είναι ίση με $200 \text{ m}^3/\text{h}$, μια λογική θεώρηση για την περίπτωση του Αδριάνειου Υδραγωγείου, και άρα υπολογίζονται τέσσερις διαφορετικές ταχύτητες και τέσσερα διαφορετικά ύψη κινητικής ενέργειας.



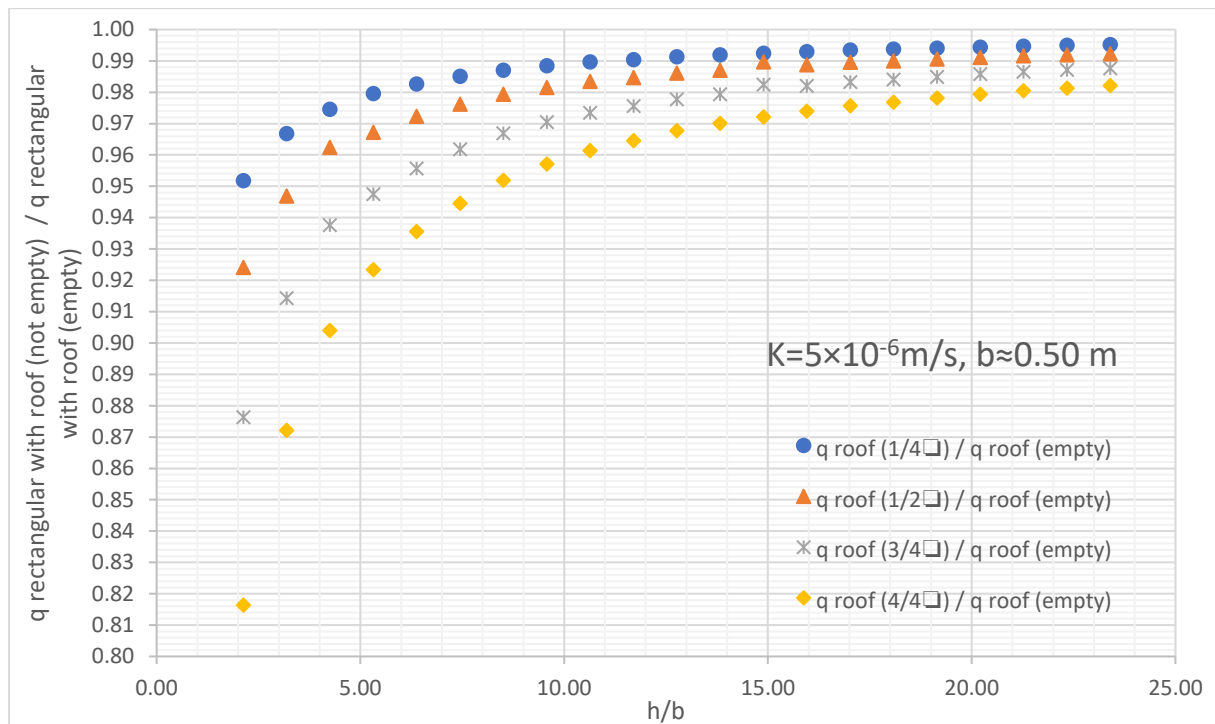
Εικόνα 4. 8 Αριθμητικό μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων για την ροή υπογείων νερών προς ορθογωνική με τριγωνική οροφή σήραγγα

Στο Σχήμα 4. 12 παρουσιάζονται οι τιμές της εισροής για τετραγωνική σήραγγα με τριγωνική οροφή, για διάφορα ύψη νερού εντός της διατομής, με συγκεκριμένη υδροπερατότητα (K) ίση με 5×10^{-6} m/s και με πλευρά τετραγώνου (b) ίση με 0,50 m.



Σχήμα 4. 12 Παροχή εισροής σε τετραγωνική με τριγωνική οροφή σήραγγα συναρτήσει του βάθους του οποίου η σήραγγα βρίσκεται εντός του υδροφόρου για $b=0.50\text{ m}$ και $K=5 \times 10^{-6}\text{ m/s}$

Στο παραπάνω σχήμα (Σχήμα 4. 12) δεν είναι ευδιάκριτη η διαφορά που παρατηρείται στην εισροή υπογείων νερών ανάλογα με το ύψος του νερού εντός της υπόγειας σήραγγας. Στο Σχήμα 4. 13 γίνεται ευκολότερα κατανοητό το πόσο επηρεάζει το νερό που ήδη ρέει σε μία υδρομαστευτική σήραγγα την παροχή που εισέρχεται σε αυτήν. Ειδικότερα όταν η σήραγγα βρίσκεται ψηλά στον υδροφόρο και έχει νερό που φτάνει σε ύψος b (Εικόνα 4. 7, περίπτωση δ) υδρομαστεύει μέχρι και 20% λιγότερο σε σχέση με το πόσο θα υδρομάστευε αν ήταν άδεια. Όσο λιγότερο νερό βρίσκεται στην διατομή τόσο περισσότερο υπόγειο νερό εισέρχεται εντός αυτής. Όταν όμως η σήραγγα βρίσκεται βαθιά μέσα στον υδροφόρο τότε η διαφορά στην υδρομάστευση δεν επηρεάζεται τόσο από το ύψος νερού στην διατομή, με την πιο πληρωμένη διατομή να υδρομαστεύει και πάλι λιγότερο αλλά με την διαφορά στην παροχή εισροής από μία άδεια διατομή να είναι της τάξης του 0,5-2%.

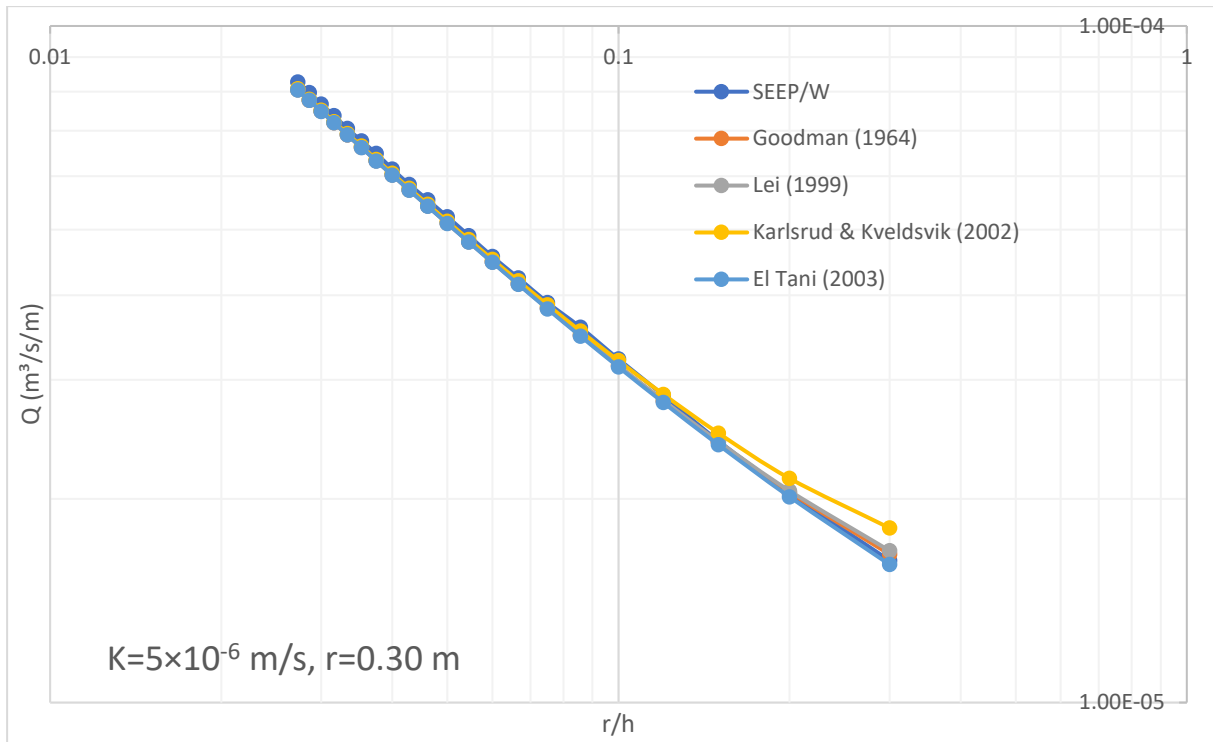


Σχήμα 4. 13 Μεταβολή του λόγου της παροχής εισροής σε τετραγωνική με τριγωνική οροφή σήραγγα με νερό προς ίδια σήραγγα χωρίς νερό, συναρτήσει του βάθους εντός του υδροφόρου για $K=5 \times 10^{-6} \text{ m/s}, b=0.50 \text{ m}$

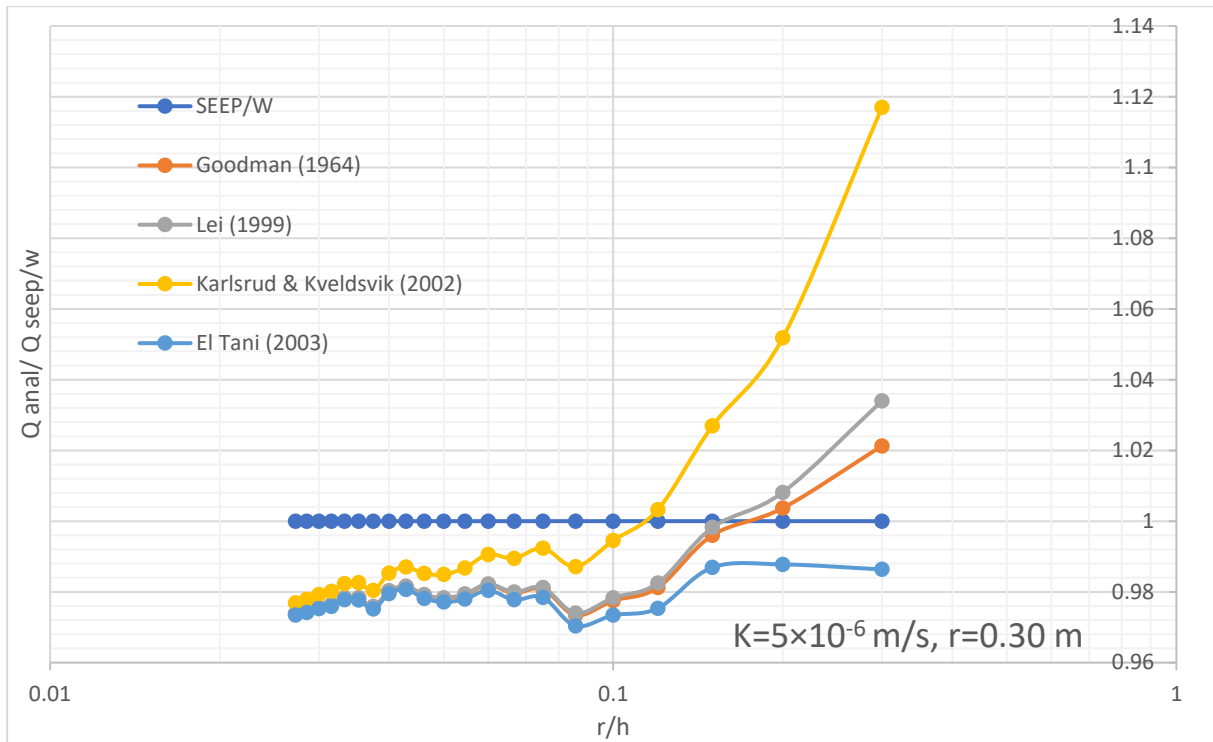
4.7 Σύγκριση αποτελεσμάτων αριθμητικού μοντέλου και αναλυτικών σχέσεων

Στο υπόκεφάλαιο αυτό πραγματοποιείται σύγκριση ανάμεσα στα αποτελέσματα του αριθμητικού μοντέλου και τα αποτελέσματα αναλυτικών σχέσεων, οι οποίες έχουν περιγράψει σε προηγούμενο κεφάλαιο, για κυκλική σήραγγα με συγκεκριμένη ακτίνα και υδροπερατότητα εδαφικού σχηματισμού.

Στο Σχήμα 4. 14 παρουσιάζεται η παροχή εισροής ανά μέτρο μήκους της σήραγγας όπως υπολογίστηκε με την χρήση του αριθμητικού μοντέλου και με την χρήση των αναλυτικών σχέσεων κατά Goodman, et al., (1964), Lei (1999), Karlsrud & Kveldsvik (2002) και El Tani (2003). Από το σχήμα αυτό καθώς και από το Σχήμα 4. 15 είναι φανερό ότι για μεγαλύτερα βάθη της σήραγγας μέσα στον υδροφόρο όλες οι αναλυτικές σχέσεις δίνουν αποτελέσματα πολύ κοντά σε αυτά του αριθμητικού μοντέλου, με μία απόκλιση της τάξης του 2%. Όταν όμως η σήραγγα είναι ψηλά μέσα στον υδροφόρο, για r/h μεγαλύτερο από 0,2, αναλυτική σχέση των Karlsrud & Kveldsvik φαίνεται να αποκλίνει περισσότερο, σε σχέση με τις υπόλοιπες τρεις σχέσεις, από τα αποτελέσματα του μοντέλου.



Σχήμα 4. 14 Παροχή εισροής ανά μέτρο μήκους της σήραγγας συναρτήσει του λόγου r/h , με βάση τις διάφορες αναλυτικές σχέσεις και το αριθμητικό μοντέλο, για $r=0,30 \text{ m}$ και $K=5 \times 10^{-6} \text{ m/s}$



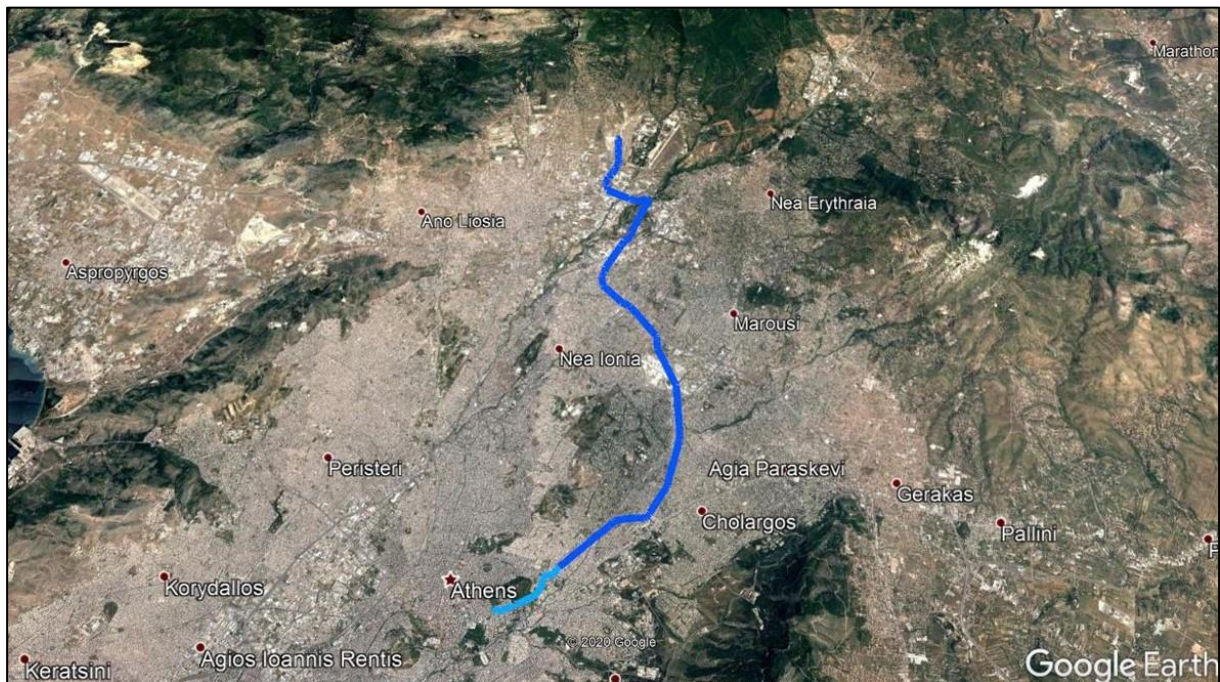
Σχήμα 4. 15 Παροχή εισροής ανά μέτρο μήκους με βάση τις διάφορες αναλυτικές σχέσεις προς παροχή εισροής ανά μέτρο μήκους με βάση το αριθμητικό μοντέλο, συναρτήσει του λόγου r/h , για $r=0,30\text{ m}$ και $K=5\times 10^{-6}\text{ m/s}$

ΜΕΡΟΣ Β: Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΟΥ ΑΔΡΙΑΝΕΙΟΥ ΥΔΡΑΓΩΓΕΙΟΥ

5 Αδριάνειο Υδραγωγείο

5.1 Γενικά Στοιχεία

Ο Ρωμαίος αυτοκράτορας Αδριανός θέλοντας να ικανοποιήσει τις αυξημένες ανάγκες σε νερό της Ρωμαϊκής Αθήνας ξεκίνησε περίπου το 125μ.Χ. να κατασκευάζει το Αδριάνειο Υδραγωγείο (Koutsoyiannis & Mamassis, 2018). Το έργο ξεκίνησε να υδροδοτεί την πόλη των Αθηνών το 140 μ.Χ. όταν ο Αντωνίνος είχε διαδεχθεί τον Αδριανό στο θρόνο της Ρωμαϊκής αυτοκρατορίας. Η κύρια υπόγεια σήραγγα του έργου ξεκινούσε από μία κεκλιμένη στοά στο σημερινό Ολυμπιακό Χωριό στο Μενίδι και κατέληγε μετά από 20 km υπόγειας διαδρομής στους πρόποδες του Λυκαβηττού σε μία δεξαμενή η οποία βρίσκεται στη σημερινή πλατεία Δεξαμενής στο Κολωνάκι (Εικόνα 5. 1). Η σήραγγα με αφετηρία το Ολυμπιακό Χωριό διασχίζει υπόγεια το Μενίδι, την Κάτω Κηφισιά, την Μεταμόρφωση, το Ηράκλειο, το Μαρούσι, το Χαλάνδρι, το Νέο Ψυχικό και τους Αμπελόκηπους, φτάνοντας σε βάθη που σε ορισμένα σημεία ξεπερνούν και τα 40 m.



Εικόνα 5. 1 Χάραξη σήραγγας Αδριάνειου Υδραγωγείου

Η σήραγγα κατασκευάστηκε με την μέθοδο της όρυξης εκ διαδοχικών φρεάτων με τυπικό πλάτος ίσο με 0,50 m και ύψος που σε ορισμένες θέσεις φτάνει μέχρι και τα 2 m (Ανγκερίνου,

2016). Επιπρόσθετα, οι διατομές που συναντώνται κατά μήκος της σήραγγας ποικίλουν σε πλάτος, ύψος και σχήμα οροφής. Εντοπίζονται διατομές με τριγωνική ή τοξωτή οροφή καθώς επίσης και ορθογωνικές διατομές με επένδυση ή και χωρίς (Εικόνα 5. 2). Η ποικιλία αυτή που παρατηρείται οφείλεται πιθανότατα σε δύο παράγοντες. Αρχικά οφείλεται στο είδος και την ποιότητα των γεωλογικών σχηματισμών σε ότι αφορά με τις ανάγκες στήριξης της σήραγγας για να μην καταρρεύσει. Η ανάγκη όμως η σήραγγα να μην καταρρεύσει δεν ήταν όμως ο μοναδικός παράγοντας που επηρέαζε την κατασκευή της. Με δεδομένο ότι η σήραγγα σε κάποιες θέσεις θα υδρομάστευε από τους υπόγειους υδροφορείς ήταν αναγκαίο να έχει διαφορετική περατότητα σε διαφορετικές θέσεις κάτι που οδηγούσε για παράδειγμα σε περίπτωση ανάγκης για υδρομάστευση σε μικρές χωρίς επένδυση διατομές.



Εικόνα 5. 2 Διάφορες διατομές κατά μήκος του Αδριάνειου Υδραγωγείου

Η χάραξη του υδραγωγείου ήταν τέτοια έτσι ώστε να μεταφέρεται το νερό με βαρύτητα από τους πρόποδες της Πάρνηθας στην πόλη της Αθήνας. Το νερό το οποίο υδρομάστευε η υπόγεια στοιά καθώς επίσης και το νερό που προερχόταν από ενισχύσεις εγκάρσια στο μήκος της μεταφερόταν μόνο με βαρύτητα για 20 km εκμεταλλευόμενο την υψομετρική διαφορά από τους πρόποδες της Πάρνηθας μέχρι την δεξαμενή στο Κολωνάκι.

Στο τελευταίο τμήμα του το υδραγωγείο ήταν ένα κανάλι μικρής κλίσης που ήταν κατασκευασμένο πιθανότατα με τη μέθοδο του ανοιχτού ορύγματος. Το τμήμα αυτό ήταν και

το πιο ευάλωτο να υποστεί φθορές ενώ το γεγονός ότι βρισκόταν πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα σήμαινε ότι θα έχαι απώλειες και για αυτό τον λόγο έπρεπε να επενδυθεί.

5.2 Ιστορική αναδρομή

Το Αδριάνειο Υδραγωγείο λειτούργησε μόλις για λίγους αιώνες μετά την κατασκευή του το 140 μ.Χ. Πιθανότητα λόγω εμφράξεων σε διάφορα σημεία της σήραγγας η λειτουργία του σταμάτησε μέχρι να τεθεί και πάλι σε λειτουργία το 1847 μετά από επισκευές που πραγματοποιήθηκαν στο εσωτερικό του.

Πιο αναλυτικά, η πληθυσμιακή αύξηση που παρατηρήθηκε μετά την Ελληνική Επανάσταση και την απελευθέρωση από τους Τούρκους οδήγησε σε όξυνση του υδρευτικού προβλήματος της Αθήνας. Ήδη από την περίοδο της Τουρκοκρατίας το Αδριάνειο Υδραγωγείο είχε έρθει ξανά στην επικαιρότητα λόγω της ύπαρξης «πηγής» που εμφανίστηκε στην περιοχή του Αγίου Δημητρίου των Αμπελοκήπων. Η υποτιθέμενη αυτή πηγή προέκυψε λόγω κάποια αστοχίας στη σήραγγα του υδραγωγείου η οποία είχε φραχθεί με αποτέλεσμα το νερό να αναβλύζει και να δίνει την εντύπωση πηγής.

Μερικά χρόνια αργότερα και συγκεκριμένα το 1871, όταν δήμαρχος των Αθηνών ήταν ο Π. Κυριακός, δημοτικά συνεργεία καθάρισαν και επισκεύασαν το τμήμα του υδραγωγείου στους Αμπελόκηπους. Επίσης λόγω της εμφάνισης μίας ακόμα αντίστοιχης «πηγής» με αυτήν στους Αμπελόκηπους στην πλατεία Δεξαμενής στο Κολωνάκι (δεν είχε πάρει ακόμα αυτό το όνομα) ανακαλύφθηκε από τα συνεργεία η ρωμαϊκή δεξαμενή η οποία βρισκόταν στο σημείο αυτό. Η δεξαμενή αυτή ανακατασκευάστηκε και τέθηκε σε λειτουργία ενώ μερικά χρόνια αργότερα, το 1880, κατασκευάστηκε και μια νέα λιθόκτιστη δεξαμενή με δύο θαλάμους δίπλα στη ρωμαϊκή με σκοπό την αύξηση της αποθηκευτικής ικανότητας αλλά και τον καθαρισμό του νερού.

Παρακάτω παρουσιάζεται η δεξαμενή του 1880 (*Εικόνα 5. 3*) καθώς επίσης και η ανακατασκευασμένη δεξαμενή που βρίσκεται στην θέση της ρωμαϊκής δεξαμενής (*Εικόνα 5. 4*) στην κατάσταση που βρίσκονται σήμερα.



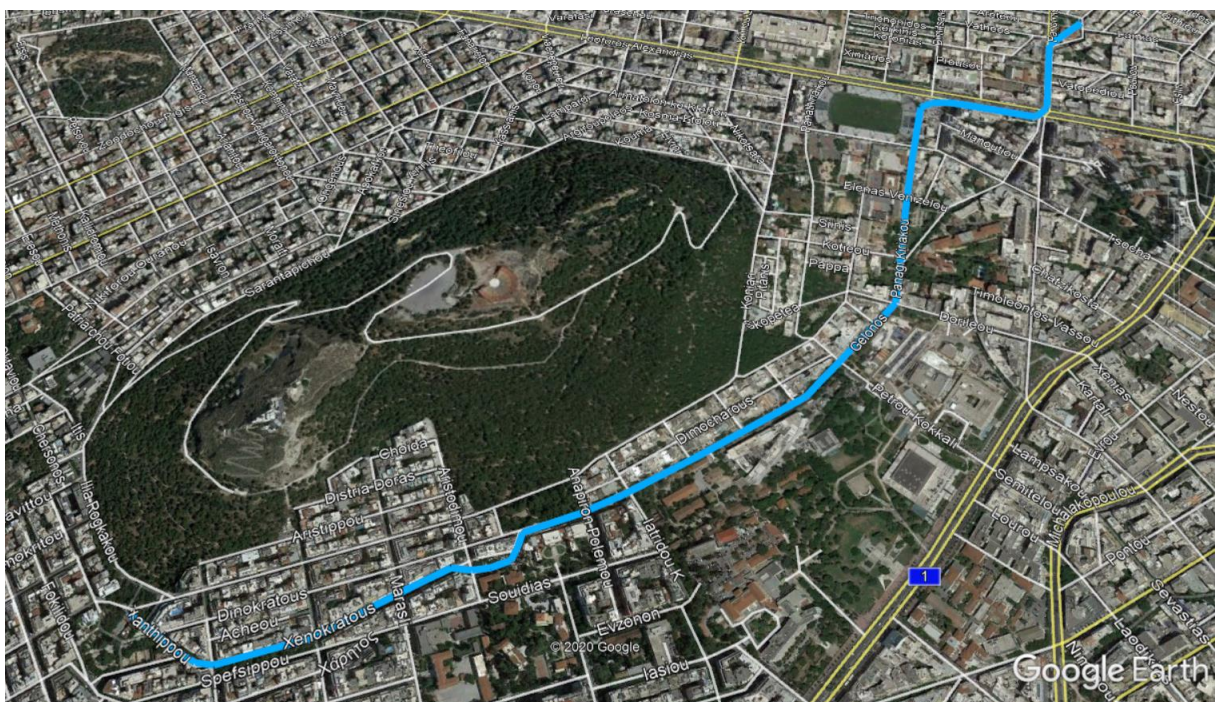
Εικόνα 5. 3 Σύγχρονη δεξαμενή του 1880 πλησίον ρωμαϊκής δεξαμενής (Δευτεραίος, 2019)



Εικόνα 5. 4 Ανακατασκευασμένη δεξαμενή στην θέση της ρωμαϊκής δεξαμενής (Δευτεραίος, 2019)

Στα μέσα της δεκαετίας 1870 για να μπορέσει να συνδεθεί το υδραγωγείο που μετέφερε νερό μέχρι τον Άγιο Δημήτριο Αμπελοκήπων με την δεξαμενή στο Κολωνάκι ήταν αναγκαίο να πραγματοποιηθούν ορισμένα έργα επιδιόρθωσης καθώς επίσης και να ανακατασκευαστεί σε ορισμένα σημεία του το ρηχό καταληκτικό τμήμα του υδραγωγείου το οποίο είχε υποστεί αρκετές ζημιές. Σε ορισμένα σημεία του κατασκευάστηκαν παρακάμψεις και διανοίχθηκαν ακόμη και νέες στοές αλλά παρόλες τις επιδιορθώσεις το προβληματικό αυτό τμήμα που ονομάστηκε «κτιστό» υδραγωγείο Κυριακού αντικαταστάθηκε από την εταιρία ULEN, που ήταν υπεύθυνη για την κατασκευή του φράγματος του Μαραθώνα, 50 χρόνια αργότερα.

Η ULEN από το 1924 έως το 1925 πραγματοποίησε τοπογραφική αποτύπωση ολόκληρου του Αδριάνειου Υδραγωγείου έτσι ώστε να μπορέσει να πραγματοποιήσει εργασίες καθαρισμού και επιδιορθώσεις όπου αυτές ήταν απαραίτητες. Στόχος της ULEN ήταν μπορέσει το Αδριάνειο να τροφοδοτήσει την Αθήνα μέχρι να ολοκληρωθεί η κατασκευή του φράγματος του Μαραθώνα. Συγκεκριμένα, το προβληματικό τμήμα από τον Άγιο Δημήτριο μέχρι την δεξαμενή στο Κολωνάκι αντικαταστάθηκε από μεταλλικούς αγωγούς που ακολουθούσαν διαφορετική χάραξη από αυτή του υδραγωγείου Κυριακού. Στην *Εικόνα 5. 5* παρουσιάζεται η χάραξη των μεταλλικών αγωγών της ULEN.



Εικόνα 5. 5 Χάραξη αγωγών της ULEN που αντικατέστησαν το «κτιστό» υδραγωγείο Κυριακού

Κάποια χρόνια μετά από την πρώτη αποτύπωση του Αδριάνειου Υδραγωγείου πραγματοποιήθηκε μία ακόμη αποτύπωση από την Ελληνική Εταιρία Υδάτων, η οποία αργότερα εξελίχθηκε στην σημερινή Ε.ΥΔ.Α.Π. Το Αδριάνειο Υδραγωγείο συνέβαλε στην υδροδότηση της πρωτεύουσας μέχρι τα μέσα της δεκαετίας του 1970 και ενώ η λίμνη Υλίκη τροφοδοτούσε ήδη της Αθήνα από το 1959. Ο κύριος λόγος για τον οποίο σταμάτησε να χρησιμοποιείται το νερό του Αδριάνειου Υδραγωγείου ήταν η κακή του ποιότητα νερού λόγω

της μόλυνσης των υπόγειων υδροφόρων από τους οποίους υδρομάστευε αλλά και η παράνομη διάθεση αστικών λυμάτων.

Σήμερα το Αδριάνειο συνεχίζει να λειτουργεί αποκλειστικά υδρομαστεύοντας και χωρίς να συλλέγει πηγαία ύδατα. Ωστόσο πολυάριθμα φρεάτια του δεν μπορούν να εντοπιστούν ενώ πολλά από αυτά έχουν σφραγιστεί εμποδίζοντας την ομαλή ροή του νερού λόγω εμφράξεων που εντοπίζονται σε διάφορα σημεία της υπόγειας σήραγγας. Τέλος, αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι το νερό το οποίο φτάνει σήμερα στη δεξαμενή στο Κολωνάκι καταλήγει ανεκμετάλλευτο στο δίκτυο ομβρίων μέσα από υπόγειο αγωγό που εκβάλλει σε φρεάτιο επί της οδού Γλύκωνος (Εικόνα 5. 6) .



Εικόνα 5. 6 Φρεάτιο στο οποίο εκβάλλει το νερό του Αδριάνειου Υδραγωγείου επί της οδού Γλύκωνος

6 Η υφιστάμενη κατάσταση του Αδριάνειου Υδραγωγείου

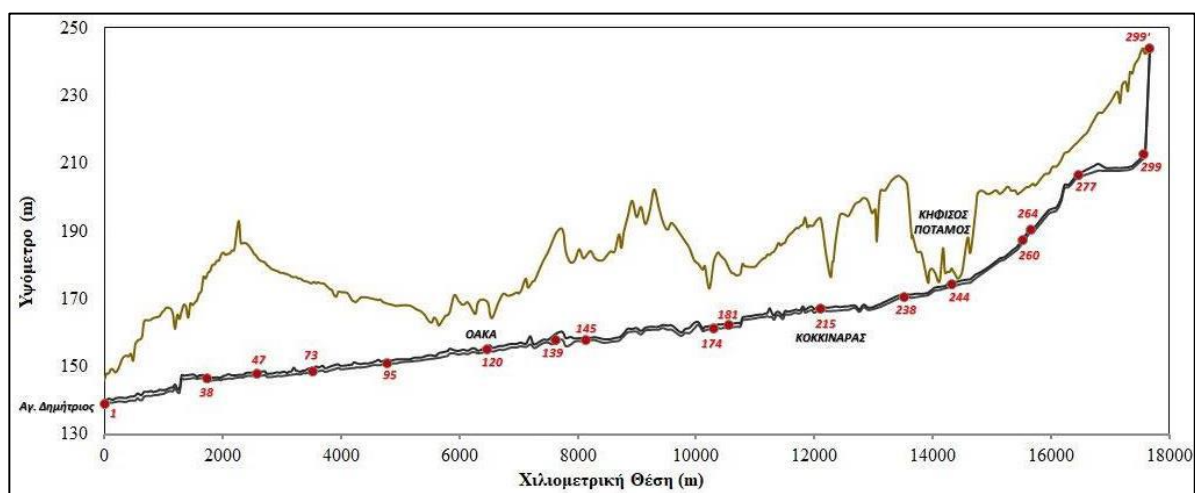
6.1 Η μηκοτομή και του υδραγωγείου

Για τις ανάγκες της παρούσας διπλωματικής ήταν αναγκαία η ύπαρξη μιας αξιόπιστης μηκοτομής του Αδριάνειου Υδραγωγείου. Η μηκοτομή και η αρίθμηση των φρεατίων, πάνω στην οποία βασίστηκε η διπλωματική αυτή, δημιουργήθηκε από την Τσιούρη (2018) με βάση δύο παλαιότερες σειρές μηκοτομών και μετά από διερεύνηση της υφιστάμενης κατάστασης του Αδριάνειου Υδραγωγείου από τον Δευτεραίο (2019).

Στην παλαιότερη από τις δύο σειρές μηκοτομών περιγράφεται η κατάσταση του Υδραγωγείου πριν την επισκευή του από την ULEN. Στην σειρά αυτή, η οποία αποτελείται από δέκα σχέδια, περιγράφονται οι επισκευές που πραγματοποιούσε ο δήμος σε συγκεκριμένα τμήματα του υδραγωγείου και η αρίθμηση των φρεατίων ξεκινά από το 1 στην πλατεία Δεξαμενής και ολοκληρώνεται στο φρέατο 367 στην κεκλιμένη στοά του υδραγωγείου στο Ολυμπιακό Χωρίο.

Η δεύτερη σειρά μηκοτομών στην οποία βασίστηκε η ψηφιοποίηση που πραγματοποιήθηκε δημιουργήθηκε από την Ελληνική Εταιρία Υδάτων (ΕΕΥ) τον Ιούνιο του 1936. Σε αυτή καταγράφεται το τμήμα του Αδριανείου από την περιοχή του Αγίου Δημητρίου στους Αμπελόκηπους μέχρι την περιοχή του Κοκκινάρα. Η αρίθμηση ξεκινά από το φρέατο 1 στον Άγιο Δημήτριο και φτάνει μέχρι το φρέατο 215.

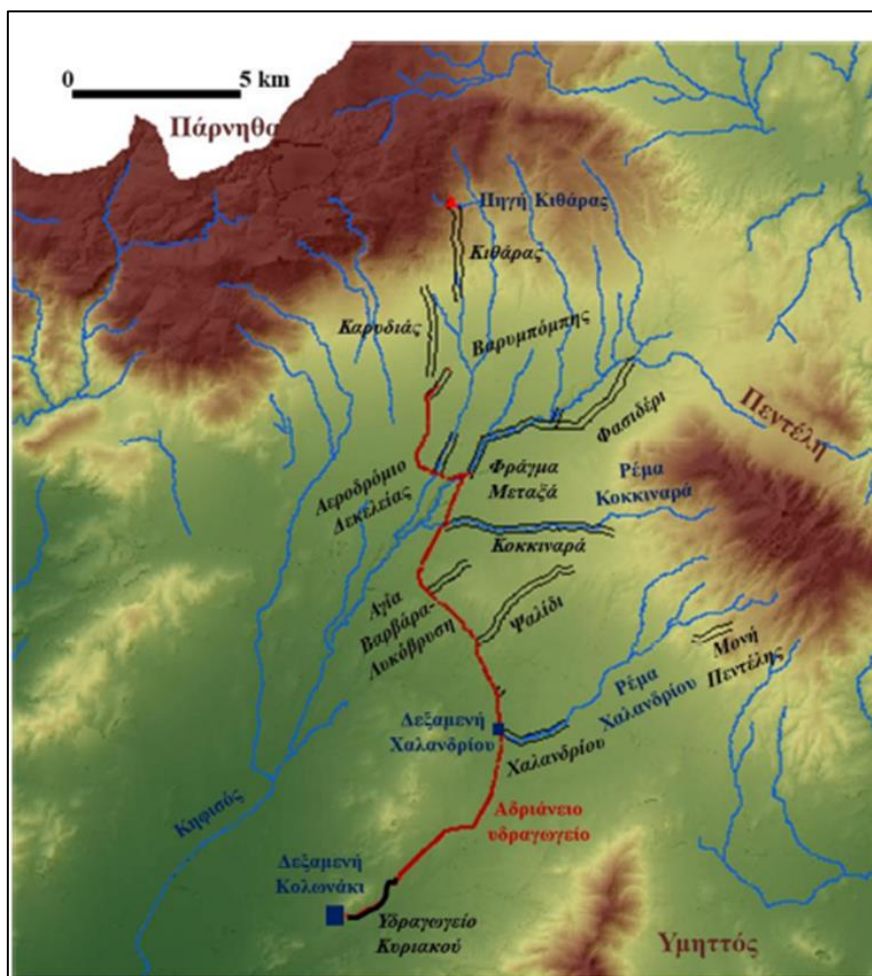
Παρακάτω (Εικόνα 6. 1) παρουσιάζεται η μηκοτομή που προέκυψε και η οποία αξιοποιείται για την διερεύνηση της υδρομάστευσης στην παρούσα διπλωματική.



Εικόνα 6. 1 Μηκοτομή Αδριάνειου Υδραγωγείου (Τσιούρη, 2018)

6.2 Τα ενισχυτικά υδραγωγεία

Το Αδριάνειο Υδραγωγείο εκτός από την συλλογή υπογείων υδάτων κατά την διαδρομή του και την μεταφορά νερού από πηγές του όρους της Πάρνηθας, ενισχυόταν από την αρχαιότητα σε διάφορα σημεία του με άλλα ενισχυτικά υδραγωγεία ή ρέματα τα οποία το τροφοδοτούσαν εγκάρσια με σκοπό την αύξηση της παροχής του και την επαρκέστερη τροφοδοσία της πόλης της Αθήνας με νερό. Ενισχυτικά υδραγωγεία έχουν ανακαλυφθεί να τροφοδοτούν το Αδριάνειο από την αρχαιότητα, ενώ έχουν επίσης εντοπιστεί και νεότερα ενισχυτικά υδραγωγεία καθώς και ανακατασκευές αρχαίων, κυρίως των αρχών του 20ου αιώνα. Στην παρακάτω εικόνα (Εικόνα 6. 2) παρουσιάζεται το σύνολο των ενισχυτικών υδραγωγείων τα οποία τροφοδοτούν εγκάρσια το Αδριάνειο Υδραγωγείο.



Εικόνα 6. 2 Τα ενισχυτικά υδραγωγεία κατά μήκος του Αδριάνειου Υδραγωγείου (Δευτεραίος, 2019)

Τα υδραγωγεία της Καρυδιάς και της Βαρυμπόμπης

Αρχικά, στους πρόποδες της Πάρνηθας έχουν εντοπιστεί δύο υδραγωγεία που συνδέονται με το Αδριάνειο Υδραγωγείο, τα υδραγωγεία της Καρυδιάς και της Βαρυμπόμπης. Τα δύο αυτά

υδραγωγεία κατασκευάστηκαν στα τέλη του 19ου αιώνα αλλά είναι πιθανό να αντικατέστησαν αρχαία υδραγωγεία που επίσης είχαν κατασκευαστεί για να τροφοδοτούν το Αδριάνειο Υδραγωγείο (Chiotis, 2018). Τα υδραγωγεία αυτά έχοντας διαφορετικές αφετηρίες ενώνονται και συνεχίζουν σαν ενιαίος αγωγός για περίπου 400 m μέχρι να καταλήξουν στην κεκλιμένη στοά στο Ολυμπιακό Χωριό, η οποία αποτελεί την αφετηρία του Αδριάνειου Υδραγωγείου.

Το υδραγωγείο της Κιθάρας

Για την ενίσχυση των υδάτων του Αδριάνειου Υδραγωγείου κατασκευάστηκε στις αρχές του 20ου αιώνα το υδραγωγείο της Κιθάρας. Λόγω της θέσης του εικάζεται ότι το υδραγωγείο αυτό τροφοδοτούσε το Αδριάνειο Υδραγωγείο από την αρχαιότητα (Δευτεραίος, 2019), παρόλο που δεν έχουν βρεθεί ενδείξεις μέχρι σήμερα. Το υδραγωγείο αυτό βρίσκεται βόρεια του υδραγωγείου της Βαρυμπόμπης και κατασκευάστηκε με σκοπό την συλλογή και την μεταφορά του νερού της Κιθάρας, η οποία αποτελεί μία από τις υπόγειες πηγές της Πάρνηθας. Από την πηγή αυτή μέσω σύγχρονων υπόγειων σωληνώσεων της ULEN το νερό κατέληγε στην περιοχή της Αγίας Κυριακής. Από το σημείο αυτό το ρηχό υδραγωγείο της Βαρυμπόμπης οδηγούσε τα νερά της Κιθάρας και του τοπικού κλάδου της Άμπολης, ο οποίος συνέβαλλε στην Αγία Κυριακή, στο Ολυμπιακό Χωριό όπου με την συμβολή του επιφανειακού υδραγωγείου της Καρυδιάς τα νερά έπεφταν στην κεκλιμένη στοά.

Το υδραγωγείο Φασίδερι

Το υδραγωγείο αυτό υδρομαστεύει την βορειοδυτική λεκάνη του Κηφισού. Ανακαλύφθηκε κατά την διάρκεια εργασιών για τον καθαρισμό του Αδριάνειου τον Ιανουάριο του 1901 επί δημαρχίας Σπύρου Μερκούρη. Η σήραγγα του υδραγωγείου αυτού είναι λαξευμένη και σύμφωνα με του μηχανικούς που πραγματοποίησαν τον καθαρισμό είναι άρτια κατασκευασμένη με μεθοδικό τρόπο. Βρίσκεται σε βάθος 20-30 m και έχει πλάτος 0,80-0,90 m και ύψος 1,30-1,35 m.

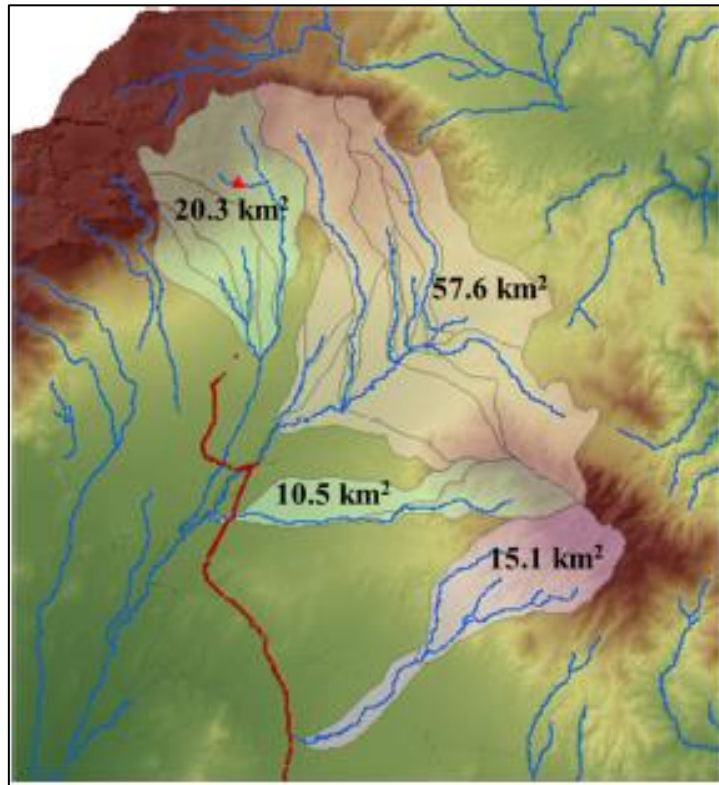
Το υδραγωγείο Χαλανδρίου

Το υδραγωγείο αυτό θεωρείται αρχαιότερο του Αδριάνειου Υδραγωγείου και συμβάλει με το Αδριάνειο στο φρεάτιο 102 ενισχύοντας την παροχή του. Τροφοδοτεί το Αδριάνειο με τα νερά του Πεντελικού όρους μέσω της ρεματιάς του Χαλανδρίου, ενώ στο σημείο συμβολής του με το Αδριάνειο υπάρχει μία κυκλική δεξαμενή που έχει σαν σκοπό τον καθαρισμό του νερού μέσα από την καθίζηση των μεγάλων στερεών.

Το ρέμα Κοκκιναρά

Το ρέμα Κοκκιναρά τροφοδοτεί επίσης το Αδριάνειο Υδραγωγείο. Έχει την αφετηρία του στους πρόποδες της δυτικής πλευράς της Πεντέλης και έχοντας μια πορεία προς τα δυτικά εισέρχεται στην συνοικία Κάτω Κηφισιά όπου σε κάποιο σημείο σκεπάζεται για να βγει στην επιφάνεια και πάλι στην Λυκόβρυση. Λίγο πιο μετά σκεπάζεται και πάλι για να καταλήξει να συμβάλει στον Κηφισό ποταμό.

Παρακάτω παρουσιάζονται οι λεκάνες απορροής των ενισχυτικών υδραγωγείων-ρεμάτων (Εικόνα 6. 3).



Εικόνα 6. 3 Λεκάνες απορροής ενισχυτικών υδραγωγείων-ρεμάτων Αδριάνειου Υδραγωγείου

6.3 Διαίρεση του Υδραγωγείου σε τμήματα για την εκτίμηση της παροχής που μεταφέρουν

Το Αδριάνειο Υδραγωγείο σήμερα παρουσιάζει στο μήκος του στενώσεις και εμφράξεις, μερικές ή ολικές, οι οποίες έχουν σαν αποτέλεσμα να μην μεταφέρει την ίδια παροχή σε ολόκληρο το μήκος του. Με βάση την έρευνα που έχει εκπονηθεί από την ΕΥΔΑΠ Α.Ε. (Γ. Σαχίνης, 2020) και από το Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο (Δευτεραίος, 2019) έχουν προσδιοριστεί οι πιθανές αυτές θέσεις εμφράξεων και στενώσεων. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα το Υδραγωγείο να αποτελείται από ορισμένα αυτόνομα ή ημιαυτόνομα τμήματα τα οποία θα πρέπει να μελετηθούν ξεχωριστά έτσι ώστε να μπορέσει να πραγματοποιηθεί μία ορθή εκτίμηση της παροχής που μεταφέρει το Υδραγωγείο στα διάφορα τμήματά του.

Τα τμήματα στα οποία διαχωρίζεται το Αδριάνειο Υδραγωγείο με βάση τις παραπάνω μελέτες καθώς και μετά από παρεμβάσεις συντήρησης στο εσωτερικό του είναι τα εξής (Δευτεραίος, 2019):

Τμήμα Α (Πλ. Αγίου Δημητρίου- Μετρό Πανόρμου)

Σαν τμήμα Α θεωρείται το ανακατασκευασμένο τμήμα από την Πλατεία του Αγίου Δημητρίου στην Πανόρμου έως το Μετρό στην Πανόρμου. Το τμήμα αυτό, το οποίο είναι επισκέψιμο σε όλο το μήκος του, λειτουργεί με ελεύθερη ροή νερού, ενώ παρατηρούνται να εισέρχονται λύματα στα φρεάτια 4 και 9 καθώς και μία πλευρική αποχία ανάμεσα στα φρεάτια 1 και 2.

Τμήμα Β (Μετρό Πανόρμου- πιθανή έμφραξη ΓΕΕΘΑ)

Το Τμήμα Β εκτείνεται από το φρεάτιο 18Α μέχρι μεταξύ των φρεατίων 32 με 44, ανάμεσα στα οποία έχει παρατηρηθεί μετά από τις δοκιμαστικές αντλήσεις που περιγράφονται σε επόμενο κεφάλαιο ότι υπάρχει μερική έμφραξη. Λόγω της by-pass κατασκευής στο μετρό της Πανόρμου η οποία λειτουργεί με υπερχειλίση, το τμήμα αυτό είναι πλημμυρισμένο με απόλυτη στάθμη νερού στα 152-154 m.

Τμήμα Γ (πιθανή έμφραξη ΓΕΕΘΑ- ΟΑΚΑ)

Για τον ίδιο λόγο με το τμήμα Β, το τμήμα Γ είναι και αυτό πλημμυρισμένο με απόλυτη στάθμη νερού στα 152-154 m. Το τμήμα αυτό ξεκινάει από την έμφραξη ανάμεσα στα φρεάτια 32 με 44 και εκτείνεται μέχρι το ΟΑΚΑ όπου υπάρχει ολική έμφραξη λόγω φρεατίου που έχει μπασζωθεί. Στο φρεάτιο 102 γίνεται σύνδεση με το ανενεργό υδραγωγείο Χαλανδρίου και στο φρεάτιο 103 εντοπίζεται η κόφτρα εκκένωσης.

Τμήμα Δ (ΟΑΚΑ- Αττική Οδός)

Το τμήμα αυτό φτάνει μέχρι την Αττική οδό όπου το Υδραγωγείο διακόπτεται με άγνωστο τρόπο και είναι πλημμυρισμένο λόγω έμφραξης με διάχυση τσιμέντου στο φρεάτιο 119 που βρίσκεται εντός του Ολυμπιακού Αθλητικού Κέντρου Αθηνών (Ο.Α.Κ.Α.). Η απόλυτη στάθμη του νερού υπολογίζεται στα 163-164 m ενώ δεν είναι γνωστό αν εισέρχεται παροχή από εγκάρσια υδραγωγεία καθώς και από το ανάντη τμήμα του υδραγωγείου.

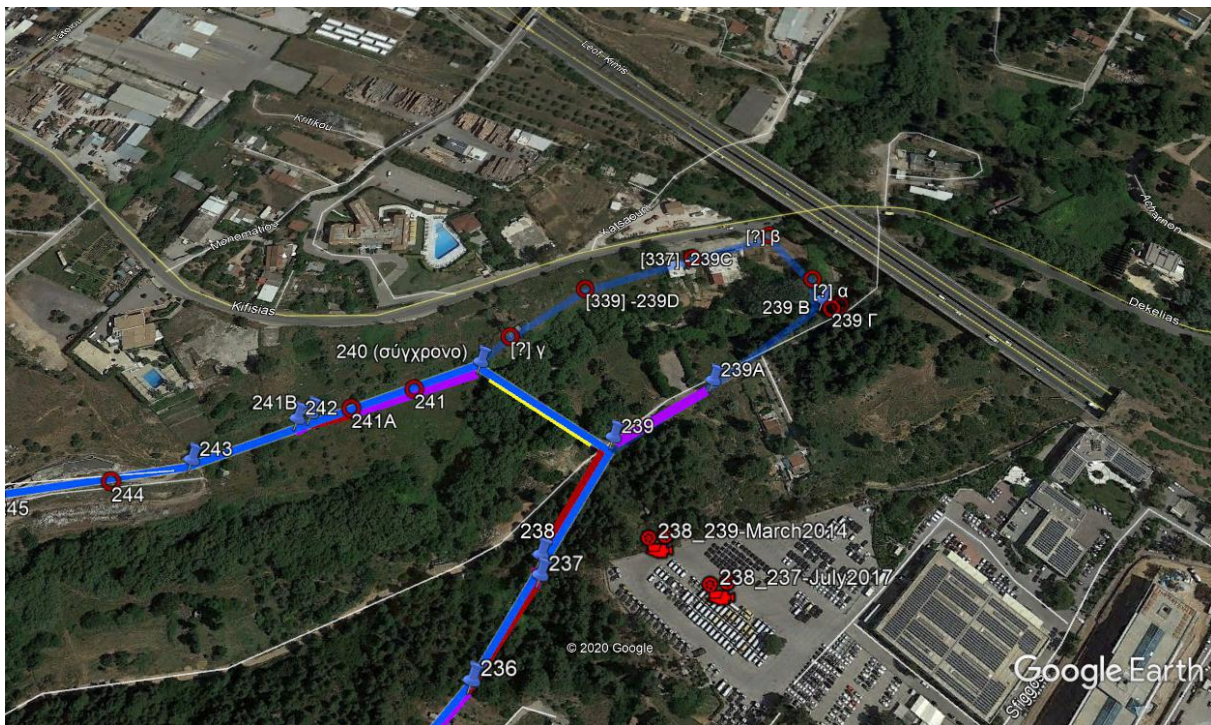
Τμήμα Ε (Αττική Οδός- Κηφισός)

Το τμήμα αυτό εκτείνεται από την Αττική οδό όπου εντοπίζεται μία άγνωστου τύπου έμφραξη έως περίπου το ύψος του Εγκατάστασης Επεξεργασίας Λυμάτων Μεταμόρφωσης. Το νερό εισέρχεται ελεύθερα σε αυτό από τα ανάντη, ανάμεσα στα φρεάτια 236 και 237 (μεταγενέστερο φρεάτιο το οποίο αποκλίνει πλευρικά της σήραγγας) παρατηρείται έντονη υδρομάστευση ενώ από το φρεάτιο 235 και μετά το νερό είναι στάσιμο με την απόλυτη στάθμη του νερού να είναι από 167 m έως 169 m. Στο φρεάτιο 216 συνδέεται ο αγωγός του υδραγωγείου Κοκκιναρά, στο 215 αντλείται νερό το οποίο πωλείται, στο 175 υπάρχει επίσης αντλιοστάσιο του Δήμου Μεταμόρφωσης και στο 169 αναφέρεται ότι συνδέεται το υδραγωγείο Λυκόβρυσης.

Τμήμα ΣΤ (Κηφισός)

Το τμήμα αυτό το οποίο διασχίζει τον Κηφισό ποταμό αποτελούταν από επτά φρεάτια από τα οποία σήμερα σώζονται μόνο τα δύο. Για τον λόγο αυτό έχει αντικατασταθεί από μεταλλικό αγωγό bypass (Εικόνα 6. 4). Το παλαιό τμήμα του υδραγωγείου από το φρεάτιο 239 έως το

239B διατηρείται και υδρομαστεύει έντονα λόγω της θέσης του κάτω από τον Κηφισό ποταμό. Στο φρεάτιο 239B συνδέεται επίσης ανενεργό υδραγωγείο πιθανότατα από το φράγμα Μεταξά.



Εικόνα 6. 4 Αγωγός by-pass που αντικατέστησε εγκαταλελειμμένο τμήμα του Αδριάνειου στο ύψος του Κηφισού

Τμήμα Ζ (Κηφισός-Μονομάτι)

Το τμήμα αυτό έχει μήκος 300 m και εκτείνεται από το φρεάτιο 240 έως το φρεάτιο 245. Ανάμεσα στα φρεάτιο 240-241 παρατηρείτε μικρή τοπική υδρομάστευση, ανάντη του 245 εντοπίζεται επιφανειακά αγωγός εξόδου ύδατος προς το ρέμα Χελιδονούς, ενώ κατόντη του 245 και ανάντη του 246 προκύπτει έμμεσα ότι υπάρχει διάταξη υπερχειλίσης που προκαλεί ανάσχεση της ροής στο ανάντη τμήμα. Τέλος, το τμήμα αυτό είναι δύσκολα προσπελάσιμο καθώς οι διατομές του υδραγωγείου είναι μικρές και εντοπίζονται επίσης τοπικές καταπτώσεις και εμφράξεις.

Τμήμα Η (Μονομάτι- Λ. Δεκελείας)

Το τμήμα αυτό έχει μήκος 600 m και εκτείνεται το φρεάτιο 246 έως το φρεάτιο 253. Η ροή από τα ανάντη είναι σημαντική αλλά περιορίζεται από τοπική εμφράξη στο φρεάτιο 253. Στο κατόντη άκρο γίνεται ανάσχεση της ροής και η στάθμη του νερού είναι υψηλή. Μεταξύ των φρεατίων 250-251 είναι πιθανό να ενισχύεται το Αδριάνειο μέσω του ρέματος της Βαρυμπόμπης μέσω τοπικού υδραγωγείου του αεροδρομίου. Το υδραγωγείο σε αυτό το τμήμα υδρομαστεύει έντονα ενώ τροφοδοτείται επίσης από υδρομαστευτικές στοές οι οποίες ρίχνουν το νερό που εισρέει σε αυτές, μέσα από οπή στον πυθμένα τους, στην κύρια σήραγγα του υδραγωγείου, η οποία βρίσκεται 2 m χαμηλότερα.

Τμήμα Θ (Λ. Δεκελείας- Ολυμπιακό Χωριό)

Το συγκεκριμένο τμήμα εκτείνεται από το φρεάτιο 255 έως την κεκλιμένη στοά του υδραγωγείου στο Ολυμπιακό Χωριό. Σε ορισμένες θέσεις στο τμήμα 281-297 έχουν εντοπιστεί διάφορες εμφράξεις οι οποίες μετά από εργασίες καθαρισμού και συντήρησης προγραμματίζεται να αποκατασταθούν. Επίσης στο τμήμα 269-280 υπάρχουν ορισμένες θέσεις στις οποίες έχει υπάρξει στήριξη της οροφής και των τοιχωμάτων. Στο φρεάτιο 270 παρατηρείται πτώση ίση με 1 m και ανάμεσα στα φρεάτια 272-273 εντοπίζεται ρωμαϊκός υδρομαστευτικός αγωγός. Στο φρεάτιο 275 έγινε στις 26/11/2013 μέτρηση της παροχής με μιλίσκο από την ΕΥΔΑΠ και εκτιμήθηκε σε 310 m³/h. Στο φρεάτιο 281 εντοπίζεται παράπλευρη εισροή ανενεργού καναλιού σε βάθος 13 m. Τέλος, η στάθμη του νερού για 650 m από το φρεάτιο 267 έως το 255 είναι υψηλή λόγω ανάσχεσης στο κατάντη τμήμα και υπολογίζεται σε απόλυτο υψόμετρο να είναι στο 194 m.

Στον Πίνακα 6. 1 παρουσιάζονται συνοπτικά τα τμήματα στα οποία χωρίζεται το Αδριάνειο Υδραγωγείο, το μήκος τους και τα φρεάτια στα οποία εκτείνονται.

Πίνακας 6. 1 Τμήματα του Αδριάνειου Υδραγωγείου

Τμήμα	Φρεάτια	Μήκος
A	<u>1</u> (Πλ. Αγίου Δημητρίου) έως <u>18A</u> (Μετρό Πανόρμου)	630 m
B	<u>18A</u> (Μετρό Πανόρμου) έως <u>32-44</u> (Πιθανόν ΓΕΕΘΑ)	1 km
Γ	<u>32-44</u> (Πιθανόν ΓΕΕΘΑ) έως <u>119</u> (Ο.Α.Κ.Α.)	4 km
Δ	<u>119</u> (Ο.Α.Κ.Α.) έως <u>150</u> (Αττική Οδός)	2 km
E	<u>150</u> (Αττική Οδός) έως <u>239</u> (Κηφισός)	5 km
ΣΤ	<u>239</u> έως <u>240</u> (Κοίτη Κηφισού)	450 m
Z	<u>240</u> (Κηφισός)έως <u>245</u> (Μονομάτι)	300 m
H	<u>246</u> (Μοναμάτι) έως <u>253</u> (Λ. Δεκελείας)	600 m
Θ	<u>255</u> (Λ. Δεκελείας) έως <u>299</u> (Ολυμπιακό Χωριό)	2,5 km

7 Γεωλογία- Υδρογεωλογία περιοχής ενδιαφέροντος

7.1 Γεωλογική περιγραφή Λεκανοπεδίου Αττικής

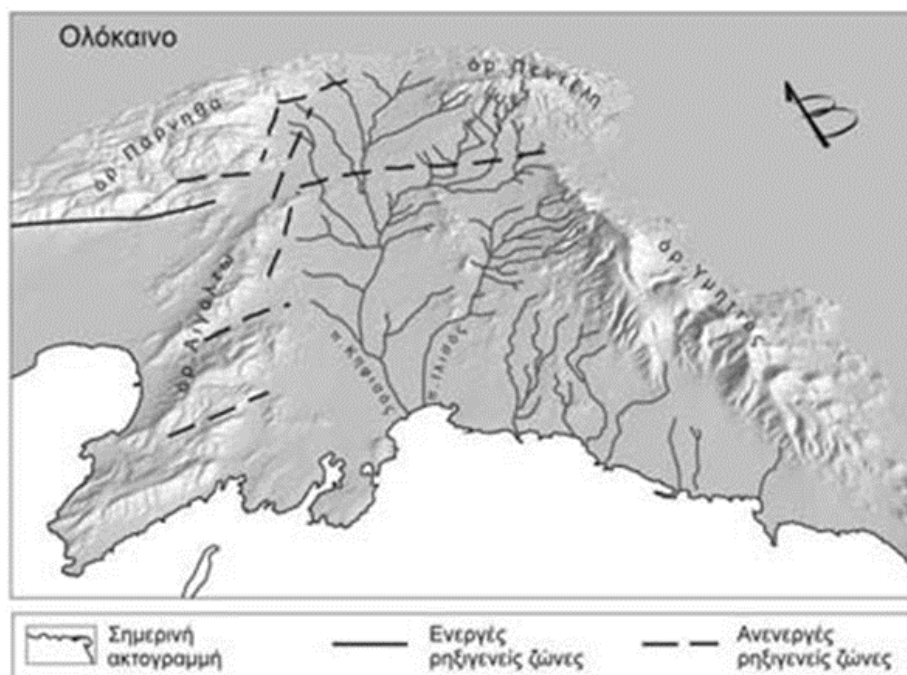
7.1.1 Γεωμορφολογικά στοιχεία Λεκανοπεδίου Αττικής

Το Αδριάνειο Υδραγωγείο βρίσκεται εντός του Λεκανοπεδίου της Αττικής εντός του οποίου αναπτύσσεται η ευρύτερη αστική περιοχή της πόλης της Αθήνας.

Το Λεκανοπέδιο Αττικής βρίσκεται στο κεντρικό σημείο του νομού της Αττικής και οριοθετείται από πέντε όρη που το περικλείουν καθώς και από τον Σαρωνικό κόλπο ο οποίος βρίσκεται στα νοτιοδυτικά του. Στα δυτικά του Λεκανοπεδίου εντοπίζονται τα όρη Αιγάλεω και Ποικίλο, στα βορειοδυτικά του οριοθετείται από το όρος της Πάρνηθας, στο βορειοανατολικά του από την Πεντέλη και στα δυτικά του από τον Ύμηττό. Στο εσωτερικό του Λεκανοπεδίου, το οποίο ουσιαστικά αποτελεί ένα βύθισμα με διεύθυνση από τα βορειοανατολικά προς τα νοτιοδυτικά, εντοπίζονται μια σειρά από λόφους ανάμεσα στους οποίους τα Τουρκοβούνια, η Ακρόπολη και ο Λυκαβηττός.

Σε ότι αφορά το υδρογραφικό δίκτυο του λεκανοπεδίου οι κυριότεροι άξονες αποστράγγισης είναι οι ποταμοί Κηφισός και Ιλισός. Οι δύο αυτοί ποταμοί είναι στο μεγαλύτερο μήκος της διαδρομής τους εγκλιβωτισμένοι κάτω από τον αστικό ιστό της πόλης της Αθήνας ενώ φυσική ροή ποταμών, εποχικής ροής στο μεγαλύτερο μέρος τους, παρατηρείται κυρίως στο βόρειο τμήμα του λεκανοπεδίου.

Εντός του λεκανοπεδίου δεν παρατηρείται μεγάλη τεκτονική δραστηριότητα σε αντίθεση με τις εκτός εκτός του λεκανοπεδίου περιοχές του Θριάσιου πεδίου και της Πάρνηθας. Η μοναδική τεκτονική δραστηριότητα του λεκανοπεδίου παρατηρείται κυρίως στο βορειοδυτικό τμήμα του λόγω ορισμένων απολήξεων των ρηγμάτων της Πάρνηθας και του Θριάσιου πεδίου. Επίσης, παρατηρούνται ορισμένες ανενεργές ρηξιγενείς ζώνες στα όρη Αιγάλεω και Ποικίλο και κατά μήκος τους Κηφισού ποταμού η οποία ήταν πιο σημαντική σε άλλες γεωλογικές περιόδους (Papanicolaou, 2004). Στην *Εικόνα 7.1* παρουσιάζονται οι ρηξιγενείς ζώνες του λεκανοπεδίου, ενεργές και ανενεργές.



Εικόνα 7. 1 Ρηξιγενείς ζώνες λεκανοπεδίου Αττικής (Papanicolaou, 2004)

7.1.2 Γεωλογικοί σχηματισμοί και Λιθολογία της περιοχής του Λεκανοπεδίου Αττικής

Στη δομή του λεκανοπεδίου της Αττικής σε ό,τι αφορά την γεωλογία του εντοπίζονται σε διάφορες περιοχές αλπικοί καθώς και μεταλπικοί σχηματισμοί. Οι αλπικοί σχηματισμοί παρατηρούνται στα βουνά που περιβάλλουν το λεκανοπέδιο καθώς επίσης και στους λόφους που εντοπίζονται εντός αυτού. Αντίθετα, οι μεταλπικοί σχηματισμοί εντοπίζονται εντός της λεκάνης της Αθήνας όπου καλύπτουν σε ορισμένες περιοχές του αλπικού σχηματισμούς.

Αλπικοί Σχηματισμοί

Στο λεκανοπέδιο είναι κυρίαρχη μία μεγάλη τεκτονική ζώνη η οποία αποτελεί το όριο για δύο διαφορετικές ενότητες πετρωμάτων, την Αυτόχθονη Ενότητα Αττικής και την Υποπελαγωνική Ενότητα. Την Αυτόχθονη Ενότητα Αττικής συγκροτούν μεταμορφωμένα πετρώματα όπως σχιστόλιθοι, μάρμαρα, γνεύσιοι κ.α., τα οποία εντοπίζονται στην ανατολική και βόρεια Αττική και τα οποία δομούν τα βουνά της Πεντέλης και του Υμηττού και τους άλλους ορεινούς όγκους οι οποίοι βρίσκονται ανατολικότερα. Την δεύτερη ενότητα, την Υποπελαγωνική, συγκροτούν μεταμορφωμένα ιζηματογενή πετρώματα, όπως για παράδειγμα ασβεστόλιθοι και δολομίτες, τα οποία δομούν τους ορεινούς όγκους στην δυτική και βόρεια Αττική, δηλαδή το Ποικίλο όρος, το όρος Αιγάλεω και την Πάρνηθα (Petrascheck, et al., 1956).

Η συμπαγής κρυσταλλική μάζα που σχηματίζεται από τα μεταμορφωμένα πετρώματα της ανατολικής Αττικής βυθίζεται προς τα βορειοδυτικά κάτω από τη μάζα που συγκροτούν τα μεταμορφωμένα ιζηματογενή πετρώματα της βορειοδυτικής Αττικής. Η τεκτονική ζώνη που

χωρίζει τις δύο αυτές κατηγορίες πετρωμάτων έχει κλίση προς τα βορειοδυτικά. Οι σχηματισμοί στα δυτικά της τεκτονικής ζώνης ανήκουν στην ενότητα της Υποπελαγωνικής, ενώ οι σχηματισμοί που βρίσκονται ανατολικά της ζώνης αυτής ανήκουν στην Αυτόχθονη Ενότητα της Αττικής (Παπανικολάου Δ., 2002).

Εκτός της Υποπελαγωνικής και της Αυτόχθονης Ενότητας στο κεντρικό και δυτικό τμήμα του λεκανοπεδίου εντοπίζονται άλλες δύο ενότητες οι οποίες εντάσσονται στο Αλλόχθονο Σύστημα του Λεκανοπεδίου Αττικής οι «Σχιστόλιθοι των Αθηνών» (Μαρίνος, et al., 1971). Υπερκείμενο τεκτονικά στα δυτικά της Υποπελαγωνικής ενότητας και στα ανατολικά της Αυτόχθονου Ενότητας, το Αλλόχθονο Σύστημα του Λεκανοπεδίου διακρίνεται με βάση την λιθολογική σύσταση και την παραμόρφωση σε δύο ενότητες (Μαρίνος, et al., 1971):

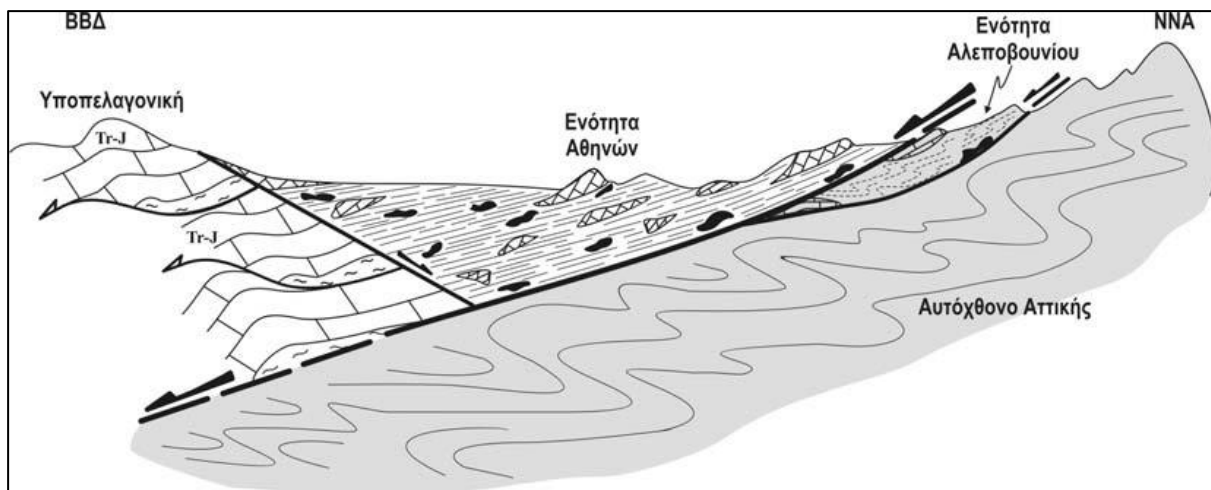
- α) Την υπερκείμενη αμεταμόρφωτη Ενότητα Αθηνών
- β) Την υποκείμενη ελαφρά μεταμορφωμένη Ενότητα Αλεποβουνίου

Στην Ενότητα Αθηνών, η οποία τεκτονικά είναι υπερκείμενη της Υποπελαγωνικής Ενότητας στα δυτικά και υπερκείμενη και της μεταμορφωμένης Ενότητας Αλεποβουνίου στα ανατολικά, περιλαμβάνονται δύο επιμέρους λιθολογικά σύνολα (Ραπανικόλαου, 2004):

- α) *Λευκοί, συμπαγείς, άστρωτοι – παχυστρωματώδεις νηρητικοί ασβεστόλιθοι του Άνω Κρητιδικού αφ' ενός και*
- β) *πελαγικά ιζήματα επίσης Ανωκρητιδικής ηλικίας, με μεγάλα σώματα βασικών και υπερβασικών πετρωμάτων και τοφριτών.*

Η Ενότητα του Αλεποβουνίου είναι τεκτονικά είναι σαν σφήνα μεταξύ της υποκείμενης Αυτόχθονης Ενότητας και της υπερκείμενης Ενότητας των Αθηνών. Η ενότητα αυτή περιλαμβάνει *φυλλίτες, μεταψαμμίτες, υπερβασικά πετρώματα καθώς και κρυσταλλικούς ασβεστόλιθους, εν μέρει Τριαδικής ηλικίας* (Ραπανικόλαου, 2004).

Η γεωλογική δομή του λεκανοπεδίου η οποία περιγράφεται παραπάνω απεικονίζεται και σχηματικά στην *Εικόνα 7. 2*.



Εικόνα 7. 2 Απεικόνιση γεωλογικής δομής λεκανοπεδίου Αθηνών (Papanicolaou, 2004)

Μεταλλικοί Σχηματισμοί

Οι μεταλλικοί σχηματισμοί διακρίνονται σε σχηματισμούς του Νεογενούς και σε σχηματισμούς του Τεταρτογενούς. Με την σειρά τους οι σχηματισμοί του Νεογενούς διακρίνονται επίσης σε δύο κατηγορίες, τους Θαλάσσιους Νεογενείς Σχηματισμούς και τους Ηπειρωτικούς Νεογενείς Σχηματισμούς. Τα κριτήρια με βάση τα οποία οι Νεογενείς σχηματισμοί κατατάσσονται στις δύο παραπάνω κατηγορίες είναι η φάση καθώς επίσης και η γεωγραφική τους κατανομή. Οι Θαλάσσιοι Νεογενείς Σχηματισμοί εντοπίζονται στην νότια περιοχή του Λεκανοπεδίου της Αττικής και περιλαμβάνουν θαλάσσιες, παράκτιες και παράλιες φάσεις, ενώ οι Ηπειρωτικοί Νεογενείς εντοπίζονται στην βόρεια περιοχή του λεκανοπεδίου και περιλαμβάνουν λιμναίες και λιμνοχερσαίες αποθέσεις οι οποίες σε ορισμένες θέσεις περιέχουν και απολιθώματα της Πικερμικής Πανίδας (Πύργος Βασιλίσσης).

Οι Θαλάσσιοι Νεογενείς σχηματισμοί κατηγοριοποιούνται και αυτοί με τη σειρά τους σε (Papanicolaou, 2004):

- α) Πλειοκαινικούς Θαλάσσιους Σχηματισμούς όπως μάργες, λατυποπαγή, ασβεστόλιθοι, ψαμμίτες και μαργαϊκούς ψαμμίτες.
- β) Ανωμειοκαινικούς Σχηματισμούς

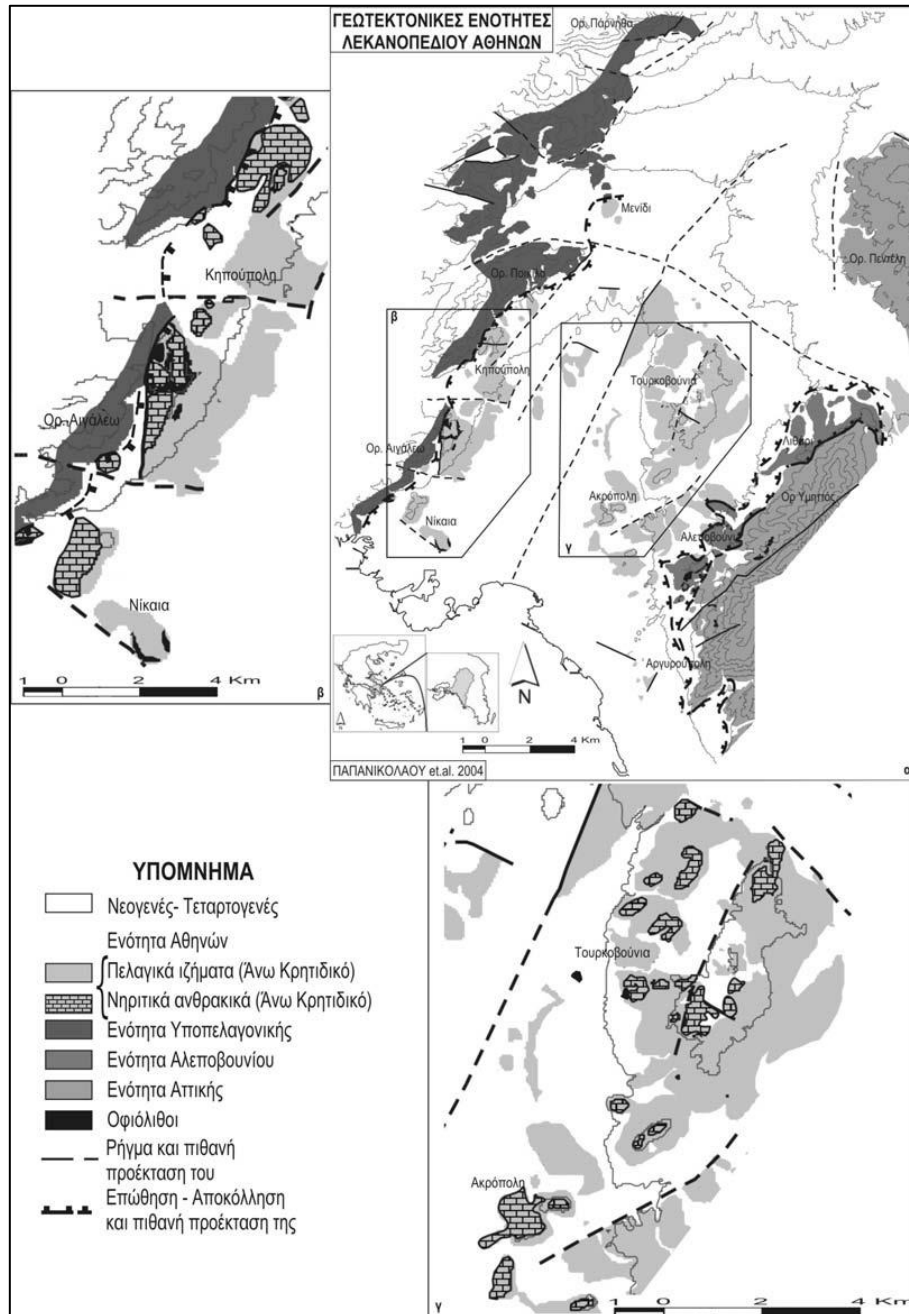
Οι Ηπειρωτικοί Νεογενείς Σχηματισμοί διακρίνονται και αυτοί παρόμοια με τους Θαλάσσιους Νεογενείς σε (Papanicolaou, 2004):

- α) Πλειοκαινικούς ηπειρωτικούς σχηματισμούς όπως άμμοι και άργιλοι.
- β) Ανωμειοκαινικούς ηπειρωτικούς-λιμναίους σχηματισμούς όπως ερυθρές αργίλους και λατυποπαγή (χερσαίες φάσεις) και μαργαϊκούς ασβεστόλιθους, μάργες και αμμούχες μάργες (λιμναίες φάσεις). Οι Ανωμειοκαινοί ηπειρωτικοί-λιμναίοι σχηματισμοί υπόκεινται των Πλειοκαινικών ηπειρωτικών σχηματισμών.

Στους σχηματισμούς του Νεογενούς που περιγράφονται προηγουμένως επικάθονται φερτά υλικά των ποταμών της λεκάνης, ποτάμιες αναβαθμίδες, παράκτιες αποθέσεις, ριπίδια,

πλευρικές αποθέσεις κορημάτων και κώνοι κορημάτων των ορεινών όγκων που περιβάλλουν το λεκανοπέδιο.

Οι γεωτεκτονικές που περιγράφονται παραπάνω παρουσιάζονται και με λεπτομέρειες στην *Εικόνα 7. 3*.



Εικόνα 7. 3 α) Γεωτεκτονικός χάρτης λεκανοπεδίου Αττικής β) Γεωτεκτονικός χάρτης δυτικού Λεκανοπεδίου Αττικής γ) Γεωτεκτονικός χάρτης στο κέντρο του λεκανοπεδίου Αττικής (Papanicolaou, 2004)

7.2 Γεωλογική περιγραφή σχηματισμών κατά μήκος του Αδριάνειου Υδραγωγείου

Η κύρια σήραγγα του Αδριάνειου υδραγωγείου έχει μήκος 17,8 km και εκτείνεται από το κέντρο του Ολυμπιακού Χωριού στους Θρακομακεδόνες έως την εκκλησία του Αγίου Δημητρίου στους Αμπελόκηπους. Από το σημείο αυτό συνεχίζει σύγχρονος μεταλλικός αγωγός μήκους 2,2 km μέχρι την πλατεία Δεξαμενής στο Κολωνάκι ο οποίος κατασκευάστηκε για να μεταφέρει το νερό το οποίο χλωριωνόταν σε υπόγεια δεξαμενή στον Άγιο Δημήτριο.

Κύριος σκοπός του υδραγωγείου όταν κατασκευάστηκε ήταν η συλλογή των νερών της δυτικής Πεντέλης και της ανατολικής Πάρνηθας και η μεταφορά τους στην πόλη της Αθήνας. Η σήραγγα κατασκευάστηκε με τη μέθοδο της όρυξης εκ διαδοχικών φρεάτων. Ανά 30-70 m κατασκευαζόταν ένα κατακόρυφο φρεάτιο τα οποία ενώνονταν μεταξύ τους με σήραγγα η οποία είχε την κατάλληλη κλίση έτσι ώστε το νερό να κυλάει με βαρύτητα.

Η κατασκευή της σήραγγας επηρεάστηκε από τα χαρακτηριστικά των διαφόρων εδαφών καθώς και από την στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα. Λόγω του μεγάλου μήκους της διέρχεται από διαφορετικούς εδαφικούς σχηματισμούς οι οποίοι είναι γνωστοί και έχουν αποτυπωθεί από το Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (Ι.Γ.Μ.Ε.) σε χάρτες. Είναι πιθανό όταν το πέτρωμα ήταν «σκληρό» η υπόγεια σήραγγα να κατασκευαζόταν με τις ελάχιστες δυνατές διαστάσεις, ενώ σε αντίθεση περίπτωση, όταν δηλαδή το πέτρωμα ήταν «μαλακό» η σήραγγα να στηριζόταν εσωτερικά με κατάλληλη επένδυση.

Με βάσει του γεωλογικούς χάρτες κλίμακας 1:50 000 του Ι.Γ.Μ.Ε., φύλλο Κηφισιάς, και τοποθετώντας τον άξονα του Αδριάνειο Υδραγωγείου πάνω σε αυτούς εντοπίζονται οι γεωλογικοί σχηματισμοί τους διασχίζει τόσο το Αδριάνειο Υδραγωγείο όσο και τα κυριότερα ενισχυτικά υδραγωγεία του. Σαν αφετηρία της αρίθμησης των φρεατίων του υδραγωγείου θεωρείται η δεξαμενή χλωρίωσης στον Άγιο Δημήτριο, ενώ η περιγραφή των γεωλογικών σχηματισμών έχει σαν αφετηρία την είσοδο της κεκλιμένης στοάς που βρίσκεται στο Ολυμπιακό χωριό.

Παρακάτω περιγράφονται αναλυτικά οι σχηματισμοί μέσα από τους οποίους διέρχεται το Αδριάνειο Υδραγωγείο (Στεφάνου, 2019) :

α) Παλαιά πλευρικά κορήματα και κώνοι κορημάτων

- Είναι παλαιές χερσαίες αναβαθμίδες, παλαιοί κώνοι κορημάτων ή και παλαιά κορήματα, που αποτελούνται από ψηφίδες, χάλικες κροκάλες ή και άμμους, σε κυμαινόμενα ποσοστά, μέτρια έως ισχυρά συγκολλημένα συνήθως με ασβεστομαργαϊκό ή ασβεστοψαμμιτικό συνδετικό υλικό.
- Έχουν πάχος που κυμαίνεται από μερικά μέτρα μέχρι πολλές δεκάδες μέτρων και παρουσιάζουν αυξημένη υδροπερατότητα δημιουργώντας έτσι υδροφόρους ορίζοντες που συχνά εκφορτίζονται γρήγορα πλευρικά.
- Χαρακτηρίζονται από καλή γενικά γεωμηχανική συμπεριφορά, εξαρτώμενη κυρίως από το βαθμό συγκόλλησης, ενώ σε μερικές περιπτώσεις είναι επιδεικτικές διάβρωσης και υποσκαφών, κυρίως κατά μήκος επαφών με υποκείμενους στεγανούς σχηματισμούς (Ρόζος, 2017).

- Ο κωδικός του Ι.Γ.Μ.Ε. για τον εδαφικό σχηματισμό είναι Pt.sc, cs (Κώννοι κορημάτων, κορήματα & ριπίδια Πλειστοκαίνου). Η σήραγγα του υδραγωγείου διέρχεται τον παραπάνω σχηματισμό για περίπου 830 m, από το φρεάτιο με νούμερο 280 έως το 299.

β) Αδρομερείς ποταμολιμναίοι σχηματισμοί παρυφών Πάρνηθας και Πεντελικού

- Η σήραγγα του υδραγωγείου στη συνέχεια διέρχεται λατυποπαγών και κροκαλολατυποπαγών σχηματισμών στις περιοχές που γειτνιάζουν με τους ορεινούς όγκους της Πάρνηθας και του Πεντελικού. Πρόκειται κυρίως για πλειστοκαινικά πλευρικά κορήματα και τα ριπίδια και εμφανίζονται στους πρόποδες όλων των ορεινών όγκων περιφερειακά του λεκανοπεδίου.
- Οι λιμναίες φάσεις αποτελούνται από μαργαϊκούς ασβεστόλιθους, αμμούχες μάργες και μάργες, μέσα στις οποίες συναντώνται λιγνιτικά κοιτάσματα.
- Οι χερσαίες φάσεις αποτελούνται από ερυθρές αργίλους και κροκαλοπαγή. Η γεωμετρία των σχηματισμών ποικίλει. Γενικά είναι έντονα διαταραγμένα στρώματα με διάφορες κλίσεις προς σχεδόν όλες τις κατευθύνσεις (Papanicolaou, 2004).
- Ο κωδικός του Ι.Γ.Μ.Ε. για τον εδαφικό σχηματισμό είναι Ms.c,l,m (Ιζηματογενείς σχηματισμοί Νεογενούς και Πλειστοκαίνου). Η σήραγγα του υδραγωγείου διέρχεται τον παραπάνω σχηματισμό για περίπου 620 m, από το φρεάτιο με νούμερο 271 έως το 279.

γ) Λιμναίοι σχηματισμοί Καλογρέζας-Πικερμίου

- Πρόκειται για ηπειρωτικούς σχηματισμούς, οι οποίοι αποτέθηκαν σε περιβάλλον λιμναίο ή εφήμερα λιμναίο. Η περιοχή ανάπτυξης του Κηφισού ποταμού μεταξύ της Πάρνηθας και του Πεντελικού όρους, γεωλογικά αποτελεί λεκάνη ιζηματογένεσης η οποία πληρώθηκε από ποταμοχερσαίους, ποταμολιμναίους, λιμνοχερσαίους και λιμναίους σχηματισμούς με πλευρικές σχέσεις μεταξύ τους.
- Οι αποθέσεις συνίστανται από λευκές έως υποκίτρινες μάργες, αμιγείς έως αμμούχες και από ερυθρούς πηλούς, με συχνές παρεμβολές κροκαλοπαγών, ψαμμιτών και αργιλοαμμωδών υλικών. Επίσης απαντώνται ενστρώσεις μαργαϊκών ασβεστολίθων μικρού πάχους. Στους σχηματισμούς αυτούς υπήρχαν σημαντικά κοιτάσματα λιγνιτών, τα οποία στο παρελθόν έτυχαν έντονης εξόρυξης.
- Στην περιοχή του ΟΑΚΑ η άργιλος είναι υπερστερεοποιημένη, αναμειγμένη με άμμο και ιλύ, οπότε δεν ευνοούνται ο ερπυσμός και οι καταπτώσεις (Τόλης, Καβουνίδης, Μπαρδάνης, 2006). Το έδαφος χαρακτηρίζεται στιφρό έως σκληρό και κατά τύπους πολύ σκληρό (ημιβραχώδες). Σε ορισμένες θέσεις εντοπίστηκε εντός της αργίλου αυξημένη παρουσία οργανικών και ενστρώσεις λιγνίτη. Από τις ενδείξεις των πιεζομέτρων βρέθηκε ότι η στάθμη του υπόγειου ορίζοντα κυμαίνεται από 4.0 m μέχρι 19.0 m περίπου από την επιφάνεια του εδάφους.
- Ο κωδικός του Ι.Γ.Μ.Ε. για τον εδαφικό σχηματισμό είναι Ms.m, c (Ιζηματογενείς σχηματισμοί Νεογενούς και Πλειστοκαίνου). Η σήραγγα του υδραγωγείου διέρχεται τον παραπάνω σχηματισμό για περίπου 11.9 km, από το φρεάτιο με νούμερο 81 έως το 270.

δ) Αθηνάϊκός σχιστόλιθος / Μαργαϊκός ορίζοντας

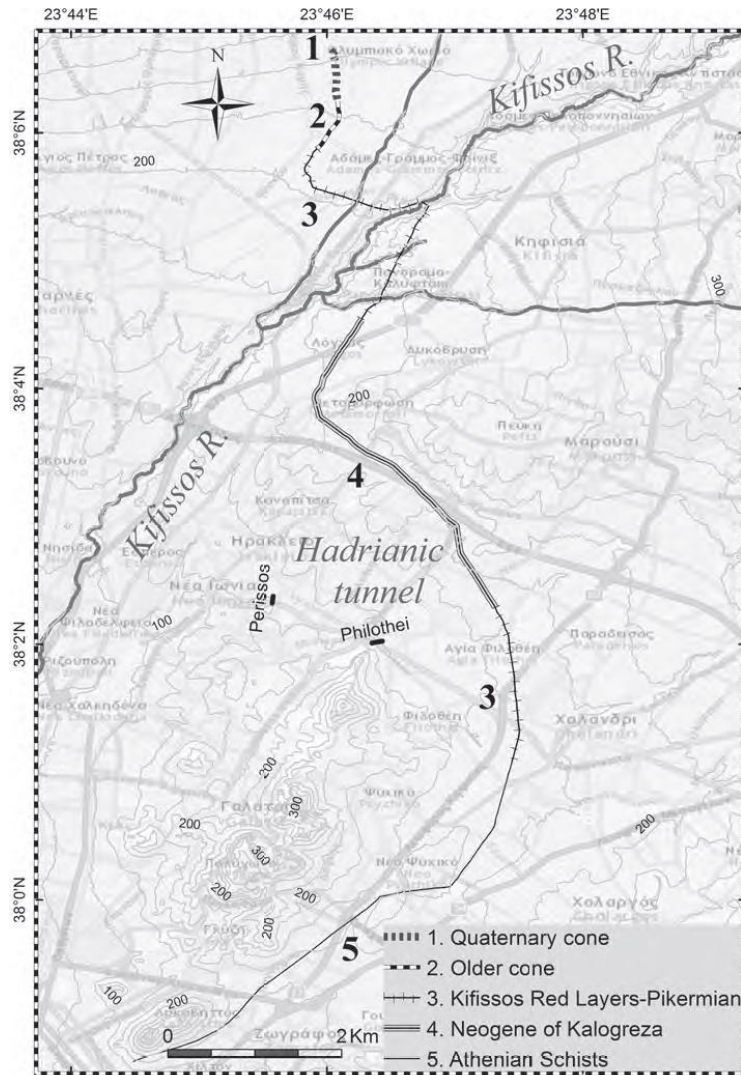
- Ο Αθηνάϊκός σχιστόλιθος αποτελείται κυρίως από στρώματα ψαμμιτών, αργιλικών σχιστόλιθων και φυλλιτών με κατά θέσεις ενστρώσεις ασβεστόλιθων. Η έκταση του σχηματισμού είναι πολύ μικρή γύρω από την περιοχή των Τουρκοβουνίων, ενώ στις διπλάνες περιοχές μεταβαίνει βαθύτερα του μαργαϊκού ορίζοντα
- Ο μαργαϊκός σχηματισμός αποτελείται κυρίως από σκληρές ψαμμιτικές μάργες στις οποίες παρεμβάλλονται στρωματίδια μαργαϊκών ασβεστόλιθων τα οποία συχνά φέρουν κονδύλους πυριτόλιθων. Η παρουσία ψαμμιτών και κροκαλολατυποπαγών με κροκάλες-λατύπες είναι συχνή, συνήθως από πετρώματα του ίδιου ορίζοντα. Στον ορίζοντα αυτόν απαντώνται ενστρώσεις πλακωδών μικριτικών ασβεστολιθων (K9. k, Ασβεστόλιθοι Τουρκοβουνίων) σημαντικών διαστάσεων, οι οποίοι διαχωρίστηκαν.
- Το σύστημα του Αθηνάϊκού Σχιστόλιθου παρουσιάζει μεγάλη ετερογένεια και τεκτονική καταπόνηση από ρήγματα και διατμήσεις. Πρόσθετοι παράγοντες που ελέγχουν την ποιότητα και τη συμπεριφορά των υλικών του είναι η εκτεταμένη αποσάθρωση και η εξαλλοίωση που στα υλικά αυτά είναι επιλεκτική, αναλόγως με τις αδυναμίες που έχει δημιουργήσει η προηγηθείσα τεκτονική καταπόνηση. Επιτείνεται συνεπώς η χαοτική κατανομή στη ποιότητα των γεωυλικών και το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό είναι η αιφνίδια αλλαγή τόσο κατά την οριζόντια όσο και κατά την κατακόρυφη έννοια, της ποιότητας του υλικού καθιστώντας τις ακριβείς προβλέψεις δύσκολες. Η περατότητα του σχιστόλιθου είναι εν γένει μικρή, αλλά η δράση της αποσάθρωσης και του τεκτονισμού έχουν διαμορφώσει τοπικές συνθήκες για τα υπόγεια ύδατα με μορφές είτε επικρεμάμενων υδροφόρων οριζόντων, είτε ζωνών υψηλότερης περατότητας.
- Η παρουσία ασβεστολιθικών ή αμμωδών συστατικών βελτιώνει την γεωτεχνική συμπεριφορά των εδαφών. Όμως τοπικά μια ρωγμή μπορεί να προκαλέσει πρόβλημα. Η εκσκαφή είναι σχετικά εύκολη αλλά απαιτείται υποστήριξη. Οι μάργες αν και έχουν καλύτερες μηχανικές ιδιότητες από τους σχιστόλιθους, υπόκεινται σε πλαστικές παραμορφώσεις και ερπυσμό.
- Ο κωδικός του Ι.Γ.Μ.Ε. για τον Μαργαϊκό ορίζοντα είναι K9-mk,sch. και για τον Αθηνάϊκό σχιστόλιθο είναι K9.sch. Στο μήκος 3.9 km τμήμα του υδραγωγείου που βρίσκεται εντός του σχηματισμού αυτού αναπτύσσονται τα φρεάτια από το νούμερο 1 έως το 80.

Στον Πίνακα 7. 1 παρουσιάζονται επιγραμματικά οι σχηματισμοί από τους οποίους διέρχεται το Αδριάνειο Υδραγωγείο (Στεφάνου, 2019).

Πίνακας 7. 1 Γεωλογικοί σχηματισμοί κατά μήκος του Αδριάνειου Υδραγωγείου

Γεωλογικός σχηματισμός	Μήκος στο σχηματισμό	Κωδικός πετρώματος κατά ΙΓΜΕ	Φρεάτια
Αθηναϊκός σχιστόλιθος/ Μαργαϊκός ορίζοντας	3900 m	K9.sch. (Αθηναϊκός σχιστόλιθος) K9-mk,sch. (Μαργαϊκός ορίζοντας)	1-80
Λιμναίοι σχηματισμοί Καλογρέζας-Πικερμίου	11900 m	Ms.m, c	81-270
Αδρομερείς ποταμολιμναίοι σχηματισμοί παρυφών Πάρνηθας και Πεντελικού	620 m	Ms.c,l,m	271-279
Παλαιά πλευρικά κορήματα και κώνοι κορημάτων	872 m	Pt.sc, cs	280-299

Στον παρακάτω χάρτη (Εικόνα 7. 4) παρουσιάζεται μια διαφορετική προσέγγιση σέ κάποιες περιοχές από αυτή του Ι.Γ.Μ.Ε. σχετικά με τους σχηματισμούς μέσα από τους οποίους διέρχεται το Αδριάνειο Υδραγωγείο.



Εικόνα 7. 4 Χάρτης με τους γεωλογικούς σχηματισμούς κατά μήκος του Αδριάνειου Υδραγωγείου (Chiotis, 2018)

7.2.1 Γεωλογικοί σχηματισμοί κατά μήκος των ενισχυτικών Υδραγωγείων

Όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενο κεφάλαιο το Αδριάνειο Υδραγωγείο ενισχύεται από μία σειρά από εγκάρσια υδραγωγεία και ρέματα τα οποία διοχετεύουν νερό σε διάφορα σημεία κατά μήκος του.

Παρακάτω περιγράφονται οι εδαφικοί σχηματισμοί από τους οποίους διέρχονται τα ενισχυτικά υδραγωγεία ξεκινώντας από το βορειότερο με κατεύθυνση νότια (Στεφάνου, 2019):

- α) Τα υδραγωγεία Καρυδιάς, Βαρυμπόμπης, Κιθάρας
 - Τα υδραγωγεία αυτά έχουν λεκάνη απορροής στις παρυφές της Πάρνηθας, σε μία περιοχή η οποία δομείται ως κυρίως από αλπικούς σχηματισμούς. Επίσης συναντώνται

σε πολύ περιορισμένο βαθμό και λιμναία νεογενή ιζήματα καθώς και χερσαία τεταρτογενή ιζήματα.

- Οι αλπικοί σχηματισμοί είναι αργιλοψαμμιτικά πετρώματα με ενστρώσεις ασβεστόλιθων.
- Τα λιμναία ιζήματα ανήκουν στους λιμνοχερσαίους σχηματισμούς του Κηφισού. Οι σχηματισμοί αυτοί είναι λεπτομερείς αποθέσεις πηλών, αργίλων και αργιλοαμμούχων υλικών με κατά θέσεις διάσπαρτες κροκάλες και παρεμβολές ψηφιδοπαγών και κροκαλοπαγών.
- Η λεκάνη χαρακτηρίζεται ημιπερατή χαμηλής υδροπερατότητας.

β) Το υδραγωγείο Φασίδερι

- Το υδραγωγείο αυτό υδρομαστεύει την βορειοδυτική λεκάνη του Κηφισού ποταμού.
- Η βορειοδυτική λεκάνη του Κηφισού διέρχεται από αδρομερείς ποταμολιμναίους σχηματισμούς Πάρνηθας και Πεντέλης και από λιμνοχερσαίους σχηματισμούς του Κηφισού.
- Οι αδρομερείς ποταμολιμναίοι σχηματισμοί Πάρνηθας και Πεντέλης είναι αλουβιακοί κώνοι, ριπίδια και δελταϊκοί σχηματισμοί. Στους πρόποδες των βουνών είναι λατυποπαγή και λατυποκροκαλοπαγή, ενώ σε κάποια απόσταση εναλλάσσονται με πιο λεπτομερή υλικά.
- Οι λιμνοχερσαίοι σχηματισμοί που είναι και οι πιο διαδεδομένοι στην λεκάνη του ποταμού είναι λεπτομερείς αποθέσεις πηλών, αργίλων και αργιλοαμμούχων υλικών με κατά θέσεις διάσπαρτες κροκάλες και παρεμβολές ψηφιδοπαγών και κροκαλοπαγών.
- Η περιοχή θεωρείται από άποψη υδροπερατότητας αδιαπέρατη.

γ) Το ρέμα Κοκκιναρά

- Το ρέμα αρχικά διέρχεται από αδρομερείς σχηματισμούς της Πάρνηθας και της Πεντέλης, συνεχίζει σε λιμναίους σχηματισμούς του Κηφισού και καταλήγει σε λιμναίους σχηματισμούς Καλογρέζας Πικερμίου.
- Οι λιμναίοι σχηματισμοί Καλογρέζας Πικερμίου είναι αποθέσεις από μάργες και πηλούς με παρεμβολές κροκαλοπαγών, ψαμμιτών και αργιλοαμμωδών υλικών. Εμφανίζουν ενστρώσεις μαργαϊκών ασβεστολίθων μικρού πάχους και χαρακτηρίζονται από μικρές αντοχές και ευκολία αποσαθρώσεως.
- Οι άλλοι δύο σχηματισμοί από τους οποίους διέρχεται το ρέμα Κοκκιναρά περιγράφονται παραπάνω.
- Η περιοχή χαρακτηρίζεται ως αδιαπέρατη.

δ) Το υδραγωγείο Χαλανδρίου

- Το υδραγωγείο αυτό διέρχεται από λιμναίους σχηματισμούς Καλογρέζας-Πικερμίου σε όλο το μήκος του.
- Οι λιμναίοι σχηματισμοί Καλογρέζας-Πικερμίου περιγράφονται αναλυτικά παραπάνω καθώς από αυτούς διέρχεται επίσης για κάποιο μήκος του και το ρέμα Κοκκιναρά.
- Ο σχηματισμός αυτός θεωρείται αδιαπέρατος.

7.3 Υδρογεωλογική περιγραφή περιοχής ενδιαφέροντος

Το Αδριάνειο Υδραγωγείο αξιοποιεί σε μεγάλο βαθμό τα υπόγεια νερά, καθώς εκτός από σήραγγα μεταφοράς πηγαίων υδάτων λειτουργεί και σαν υδρομαστευτική στοά. Για την ακρίβεια αρκετά τμήματα του Υδραγωγείου τα οποία λειτουργούν αυτόνομα ή ημιαυτόνομα λόγω μερικών ή ολικών εμφράξεων στην υπόγεια σήραγγα λειτουργούν αποκλειστικά συλλέγοντας νερό από τους υπόγειους υδροφορείς.

Τα υπόγεια νερά τροφοδοτούνται μέσω διήθησης των επιφανειακών υδάτων από την επιφάνεια του εδάφους στην ακόρεστη ζώνη και στην συνέχεια στην κορεσμένη ζώνη. Εκεί ανάλογα με τον γεωλογικό σχηματισμό και τις ιδιότητες του το νερό κινείται στο μέσα στο υπέδαφος, το οποίο λειτουργεί σαν ένας μεγάλος ταμιευτήρας. Η ικανότητα ενός γεωλογικού σχηματισμού να επιτρέπει την μεταφορά νερού μέσα από του πόρους του καθορίζει από το πορώδες και την διαπερατότητα του.

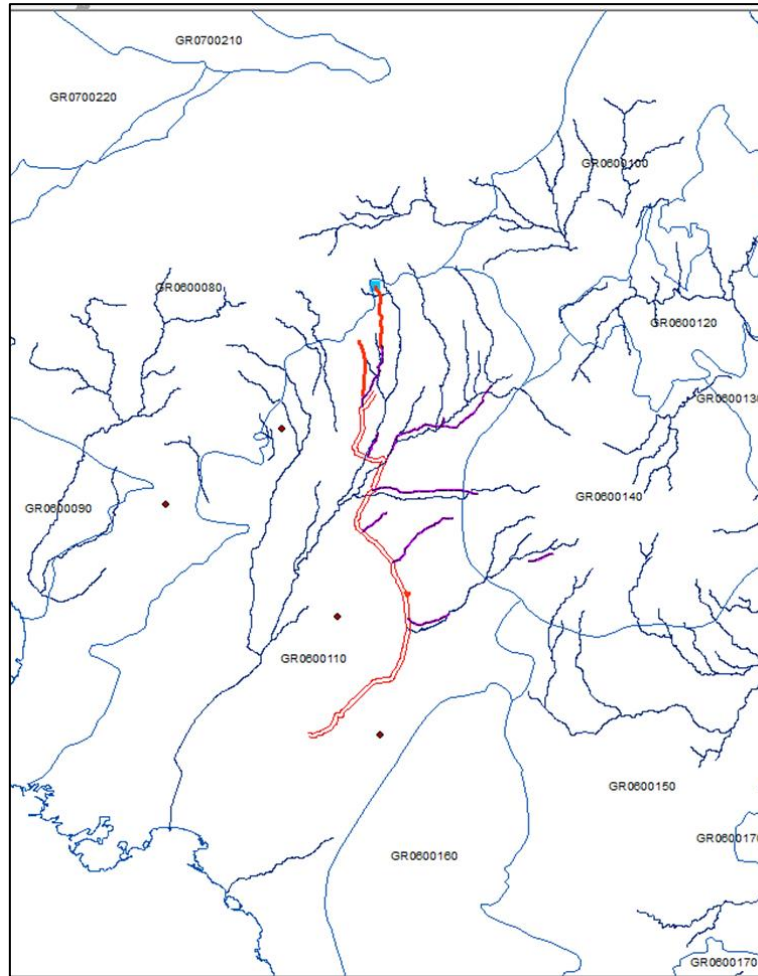
Το πορώδες ορίζεται ως ο λόγος του όγκου των κενών ενός πετρώματος προς την συνολική διαπερατότητα του. Το πορώδες ενός σχηματισμού επηρεάζεται εκτός από το μέγεθος, την διαβάθμιση και την διάταξη των κόκκων και από το υλικό πλήρωσης των κενών. Επίσης αξίζει να σημειωθεί ότι ορισμένα αδιαπέρατα πετρώματα είναι δυνατό να αποκτήσουν πορώδες μετά από ρηγμάτωση είτε μετά από χημική διάλυση λόγω για παράδειγμα καρστικοποίησης.

Η διαπερατότητα εκφράζει την ικανότητα του νερού να κινείται μέσα από του γεωλογικούς σχηματισμούς. Για να μπορεί το νερό να κινείται διαμέσου των σχηματισμών και να δημιουργεί υδροφόρες ζώνες είναι απαραίτητο τα εσωτερικά κενά, οι ρωγμές και οι διαρρήξεις να διασυνδέονται μεταξύ τους.

Τα υπόγεια νερά αποτελούν μέρος του υδρολογικού κύκλου και συνεπώς επηρεάζονται από την ποιότητα και από την ποσότητα των επιφανειακών υδάτων. Η ανάγκη της ελληνικής νομοθεσίας να εναρμονιστεί με την ευρωπαϊκή πρακτική για την προστασία των υδάτων οδήγησε στην συγκρότηση ενός νέου φορέα, της Ειδικής Γραμματείας Υδάτων. Η διοικητική αυτή δομή έπρεπε να προχωρήσει στην εφαρμογή της Οδηγίας Πλαισίου της Ευρωπαϊκής Ένωσης που αφορούσε την βιώσιμη πολιτική των υδάτων. Στα πλαίσια των καθηκόντων της διοικητικής αυτής δομής ήταν ο συντονισμός των κρατικών φορέων για κάθε ζήτημα που αφορά την προστασία και διαχείριση των υδατικών πόρων καθώς και η δημιουργία των κατάλληλων σχεδίων διαχείρισης.

Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα η Ειδική Γραμματεία Υδάτων να προχωρήσει στην κατάρτιση Σχεδίων Διαχείρισης Λεκανών Απορροής Ποταμών καθώς και στην διάκριση των υπόγειων υδατικών συστημάτων η οποία αποτελούσε και προϋπόθεση για να καταρτιστεί ένα αξιόπιστο σχέδιο. Συγκεκριμένα, σε κάθε ένα από τα δεκατέσσερα υδατικά διαμερίσματα της χώρας πραγματοποιήθηκε αξιολόγηση της υδρογεωλογίας της περιοχής και οριοθετήθηκαν Υπόγεια Υδατικά Διαμερίσματα.

Για το Υδατικό Διαμέρισμα της Αττικής, το οποίο αποτελεί ένα από τα δεκατέσσερα Υδατικά Διαμερίσματα της χώρας, ορίστηκαν εικοσιένα Υπόγεια Υδατικά Συστήματα. Το Αδριάνειο Υδραγωγείο διασχίζει σε όλο το μήκος του το Υπόγειο Υδατικό Σύστημα Λεκάνης Κηφισού (Εικόνα 7. 5).



Εικόνα 7. 5 Χάραξη του Αδριάνειου Υδραγωγείου στον χάρτη των υπόγειων υδατικών συστημάτων της Αττικής

7.3.1 Σημαντικότερες Υδροφορίες περιοχής

Στο Υπόγειο Υδατικό Σύστημα Λεκάνης Κηφισού, στο οποίο βρίσκεται εξ' ολοκλήρου το Αδριάνειο Υδραγωγείο, εντοπίζονται τριών ειδών υπόγειες υδροφορίες (NAMA ΣΥΜΒΟΥΛΟΙ ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ & ΜΕΛΕΤΗΤΕΣ ΑΕ - ΓΑΜΜΑ4 ΕΠΕ κ.α., 2013):

- α) Στα χαμηλότερα σημεία της του Υδατικού συστήματος αναπτύσσονται κοκκώδεις υδροφορίες στα προσχωματικά υλικά, οι οποίες μπορεί να είναι είτε αβαθείς είτε πιο βαθιές υπό πίεση.
- β) Στα τριτογενή ιζήματα, τα οποία σε ορισμένες θέσεις βρίσκονται σε κατακόρυφη και πλευρική μεταξύ τους υδραυλική επικοινωνία, αναπτύσσονται επάλληλες κοκκώδεις υδροφορίες.
- γ) Στους ανθρακικούς σύστασης λόφους που βρίσκονται στο εσωτερικό του Υδατικού Συστήματος αναπτύσσονται καρστικές υδροφορίες περιορισμένης δυναμικότητας. Τέτοιοι για παράδειγμα καρστικής υδροφορίας λόφοι είναι τα Τουρκοβούνια και ο Λυκαβηττός.

Οι υδροφορίες που επικρατούν και χαρακτηρίζουν την περιοχή είναι οι κοκκώδεις υδροφορίες των τριτογενών και τεταρτογενών ιζημάτων και όχι οι κατά τόπος ελάσσοнос σημασίας καρστικές υδροφορίες.

7.3.2 Ανατροφοδότηση υδροφόρου ορίζοντα περιοχής

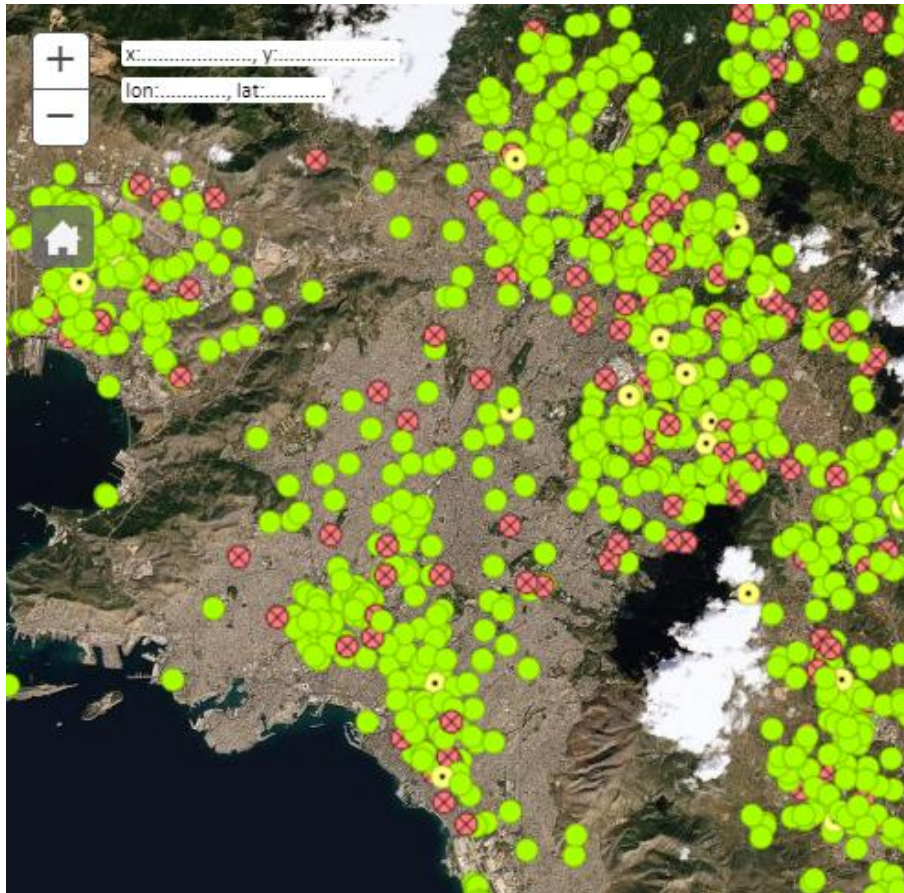
Τα υπόγεια νερά της λεκάνης τροφοδοτούνται με τους εξής τρόπους (NAMA ΣΥΜΒΟΥΛΟΙ ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ & ΜΕΛΕΤΗΤΕΣ ΑΕ - ΓΑΜΜΑ4 ΕΠΕ κ.α., 2013):

- α) Κυρίως από τους καρστικούς σχηματισμούς της ζώνης των βουνών που περιβάλλουν το την λεκάνη.
- β) Από τις διαρροές των δικτύων ύδρευσης και αποχέτευσης της περιοχής, η οποία στο μεγαλύτερο μέρος της είναι αρκετά πυκνοδομημένη.
- γ) Από των κατείσδυση μετεωρικού νερού. Λόγω της εκτεταμένης κάλυψης της λεκάνης από δόμηση αυτή η τροφοδοσία του υπόγειου συστήματος με αυτή τη μορφή είναι μειωμένη και συνεισφέρει το λιγότερο.

7.3.3 Πιέσεις

Στην περιοχή του λεκανοπεδίου συγκεντρώνεται το μεγαλύτερο μέρος του αστικού πληθυσμού της χώρας. Επίσης στο λεκανοπέδιο συγκεντρώνεται μεγάλο μέρος της μεταποίησης, ενώ υπάρχουν και περιορισμένες αγροτικές χρήσεις αλλά και εκτάσεις με φυσική βλάστηση. Στην περιοχή υπάρχει και λειτουργεί και Εγκατάσταση Επεξεργασίας Λυμάτων Μεταμόρφωσης που παροχετεύει τα επεξεργασμένα λύματα στο Ρέμα της Πύρνας. Η Εγκατάσταση Επεξεργασίας Λυμάτων αυτή εξυπηρετεί πληθυσμό της τάξης του μισού εκατομμυρίου.

Στο Υπόγειο Υδατικό Διαμέρισμα της Λεκάνης του Κηφισού εντοπίζεται ένας μεγάλος αριθμός γεωτρήσεων που εξυπηρετούν όλων των ειδών τις χρήσεις. Ενδεικτικά στον παρακάτω χάρτη (Εικόνα 7. 6) παρουσιάζεται η κατανομή των γεωτρήσεων εντός του λεκανοπεδίου με τις περισσότερες να βρίσκονται στο βόρεια τμήμα του καθώς επίσης και στην περιοχή του Πειραιά.



Εικόνα 7. 6 Χάρτης σημείων υδροληψίας Ειδικής Γραμματείας Υδάτων για το λεκανοπέδιο Αττικής, με πράσινο κύκλο συμβολίζονται οι ενεργές γεωτρήσεις και με κόκκινο κύκλο οι ανενεργές

Οι συνολικές γεωτρήσεις υπολογίζεται να ξεπερνούν τις 5000, με τις υδρευτικές εξ' αυτών να είναι ελάχιστες, υπολογίζονται σε ένα ποσοστό 2%, καθώς η ύδρευση καλύπτεται σε όλη αυτή την περιοχή κεντρικά από την ΕΥΔΑΠ Α.Ε. Οι υπόλοιπες γεωτρήσεις αντλούνται ανεξέλεγκτα και με διάφορες παροχές κάτι που έχει σαν αποτέλεσμα τον υποβιβασμό της στάθμης των διάφορων υδροφόρων και ιδιαίτερα αυτών που αναπτύσσονται σε τεταρτογενή ιζήματα που χαρακτηρίζονται συγκριτικά με τους υπόλοιπους σχηματισμούς του λεκανοπεδίου από ικανοποιητική υδροπερατότητα. Με βάση τη δυνατότητα άντληση των διάφορων υδροφόρων γίνεται μία αναφορά (ΝΑΜΑ ΣΥΜΒΟΥΛΟΙ ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ & ΜΕΛΕΤΗΤΕΣ ΑΕ - ΓΑΜΜΑ4 ΕΠΕ κ.α., 2013) στα πιθανές τιμές παροχής άντλησης. Οι γεωτρήσεις σε τριτογενή ιζήματα αντλούν συνήθως με παροχές της τάξης των 20 m³/h, ενώ σε συγκεκριμένες θέσεις η παροχή άντλησης μπορεί να ξεπεράσει τα 30 m³/h και να φθάσει μέχρι και τα 50 m³/h. Στα τεταρτογενή από την άλλη ιζήματα, όπου εντοπίζονται από παλιά και πολλά πηγάδια, αναφέρονται παροχές μέχρι και 30 m³/h.

7.3.4 Εκτιμήσεις σχετικά με το ισοζύγιο της περιοχής

Το υπερετήσιο ισοζύγιο της περιοχής της λεκάνης του Κηφισού, σύμφωνα με τις ενδείξεις που υπάρχουν προκύπτει ελλειμματικό. Αρχικά παρατηρείται πτώση της στάθμης στους υδροφόρους που αναπτύσσονται στις τεταρτογενείς αποθέσεις του λεκανοπεδίου. Επιπρόσθετα στους υδροφόρους τόσο των τεταρτογενών όσο και των τριτογενών ιζημάτων παρατηρείται μια μείωση της απόδοσης τους. Οι παραπάνω παρατηρήσεις σε συνδυασμό με την μείωση της ελεύθερης επιφάνειας του εδάφους λόγω της όλο και αυξανόμενης αστικοποίησης στο λεκανοπέδιο μας οδηγούν στο συμπέρασμα ότι το Υπόγειο Υδατικό Σύστημα αυτό έχει σε υπερετήσια κλίμακα απώλειες που ξεπερνούν τις εισροές σε αυτό.

Παρόλο που είναι γνωστό ότι το ισοζύγιο είναι ελλειμματικό, η ετήσια τροφοδοσία του συστήματος δεν μπορεί να υπολογιστεί, κυρίως λόγω των πλευρικών μεταγίσεων της περιβάλλουσας ορεινής ζώνης (NAMA ΣΥΜΒΟΥΛΟΙ ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ & ΜΕΛΕΤΗΤΕΣ ΑΕ - ΓΑΜΜΑ4 ΕΠΕ κ.α., 2013). Κάποιες προσεγγίσεις του 1997 εκτιμούν διαρροές από δίκτυα ύδρευσης και αποχέτευσης της τάξης των $30 \times 10^6 \text{ m}^3$ και $5 \times 10^6 \text{ m}^3$ αντίστοιχα. Σύμφωνα με συντηρητικές προσεγγίσεις εκτιμώνται όγκοι υπόγειας απορροής της τάξης των $40 \times 10^6 \text{ m}^3$, ενώ οι απολήψεις στην λεκάνη εκτιμήθηκαν σε ετήσια βάση σε $12.8 \times 10^6 \text{ m}^3$.

7.4 Προσδιορισμός παραμέτρων υδροφόρων σχηματισμών

7.4.1 Δοκιμαστική άντληση κτηρίου Ι.Γ.Μ.Ε.

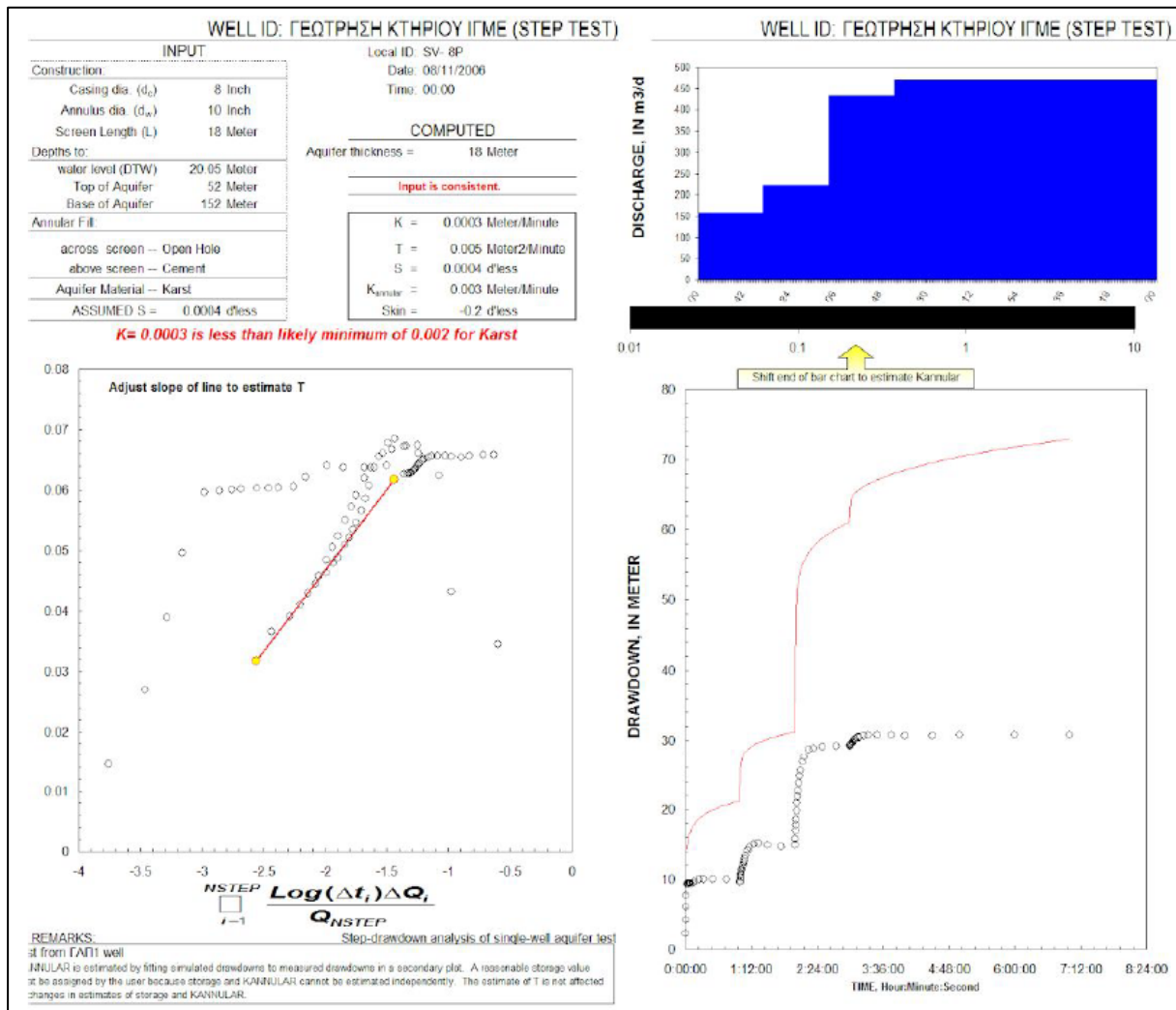
Τον Σεπτέμβριο του 2010 στην περιοχή του Ολυμπιακού Χωριού και συγκεκριμένα στο προαύλιο του κτηρίου του Ινστιτούτου Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (Ι.Γ.Μ.Ε.) στην οδό Σπύρου Λούη πραγματοποιήθηκε δοκιμαστική άντληση με σκοπό την εκτίμηση της υδροφορίας των γεωλογικών σχηματισμών της περιοχής (Vrellis, 2010). Η δοκιμαστική αυτή άντληση ήταν απαραίτητη στα πλαίσια έρευνας για την χρήση αντλιών θερμότητας για την ψύξη και θέρμανση του κτηρίου του Ι.Γ.Μ.Ε. και πραγματοποιήθηκε σε μία ήδη υπάρχουσα υδρογεώτρηση που βρισκόταν εντός του προαυλίου. Η δοκιμή πραγματοποιήθηκε με την μέθοδο άντλησης σε βαθμίδες (step test) και χρησιμοποιήθηκε υποβρύχιο αντλητικό σύστημα.

Η άντληση πραγματοποιήθηκε σε τέσσερις βαθμίδες με παροχές $6,5 \text{ m}^3/\text{h}$, $9,2 \text{ m}^3/\text{h}$, $18,0 \text{ m}^3/\text{h}$ και $19,5 \text{ m}^3/\text{h}$ που διήρκεσαν μία ώρα η καθεμιά. Η κρίσιμη παροχή ξεπερνούσε την παροχή των $19,5 \text{ m}^3/\text{h}$ η οποία ήταν η ανώτατη παροχή με την οποία μπορούσε να λειτουργήσει ο αντλητικός εξοπλισμός. Συνεπώς η άντληση μεγαλύτερης διάρκειας πραγματοποιήθηκε με την παροχή των $19,5 \text{ m}^3/\text{h}$ για τρεις ώρες και στη συνέχεια ακολούθησε επαναφορά της στάθμης με μετρήσεις για ακόμα 14 ώρες. Με βάση τις μετρήσεις αυτές εξάχθηκαν συμπεράσματα σχετικά με τις τιμές των παραμέτρων του υδροφορέα της περιοχής.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η περίοδος κατά την οποία πραγματοποιήθηκε η αντλητική δοκιμή ήταν η λιγότερο ευνοϊκή περίοδος από άποψη υδροφορίας. Επίσης από logging που πραγματοποιήθηκε μαζί με την δοκιμαστική άντληση διαπιστώθηκε η ύπαρξη σε βάθος 52 m αργιλικού σχηματισμού πάχους 10 m που απομονώνει βαθύτερα υδροφόρα στρώματα. Τέλος, στη συγκεκριμένη μελέτη χρησιμοποιήθηκε η επίλυση Theis και Cooper-Jacob και από το step

test προέκυψε τιμή της υδροπερατότητας (K) ίση με 5×10^{-6} m/s και υδροχωρητικότητα ή αποθηκευτικότητα (S) ίση με 0,0004.

Παρακάτω (Εικόνα 7. 7) παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από το step test όπως ακριβώς προέκυψαν και παρουσιάζονται και στην μελέτη (Vrellis, 2010).



Εικόνα 7. 7 Φύλλο Step Test τεχνική έκθεσης υπολογισμού υδροπερατότητας υδροφόρου Ολυμπιακού Χωριού (Vrellis, 2010)

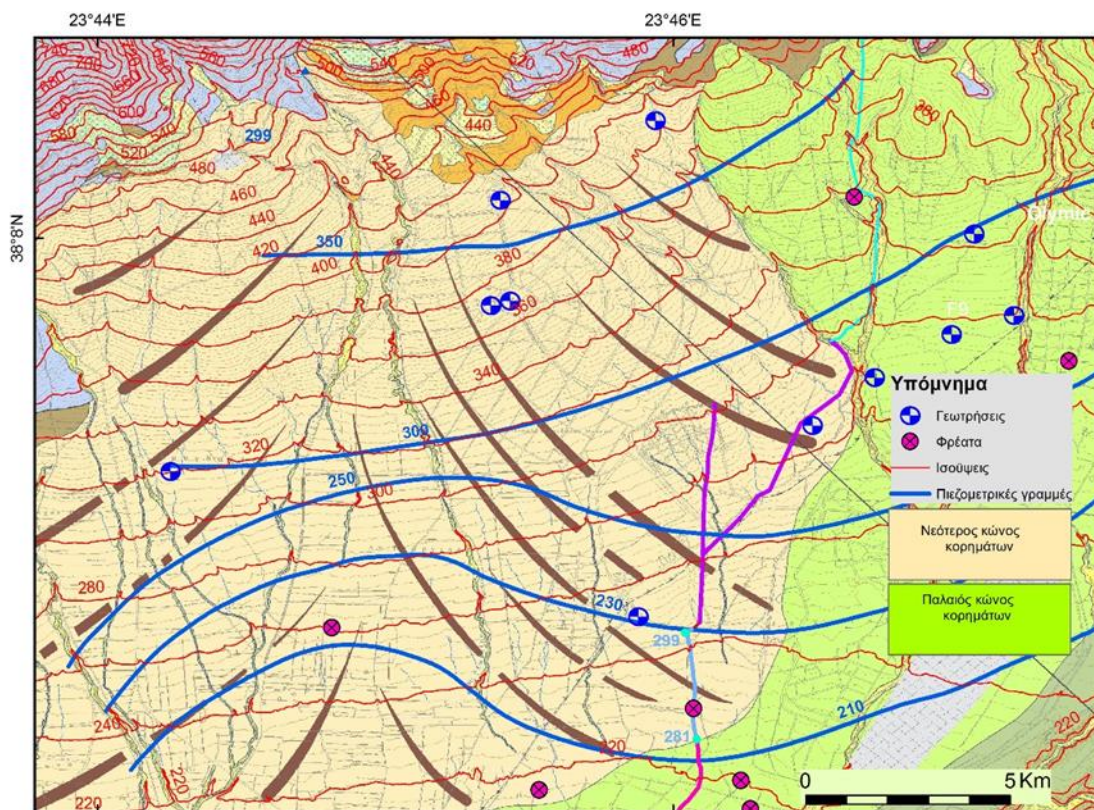
7.5 Στάθμη υδροφόρου ορίζοντα κατά μήκος του Αδριάνειου Υδραγωγείου

Για να μπορέσει να γίνει εκτίμηση της παροχής που υδρομαστεύει το Αδριάνειο Υδραγωγείο είναι απαραίτητη η γνώση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα κατά μήκος του και ειδικότερα στα τμήματα του τα οποία υδρομαστεύουν. Για τον λόγο αυτό παρακάτω παρουσιάζονται αρχικά τα δεδομένα για τον υδροφόρο της περιοχής με βάση την βιβλιογραφία

και στην συνέχεια γίνεται μία εκτίμηση της στάθμης του υδροφόρου κατά μήκος του υδραγωγείου με βάση κάποιες μετρήσεις σε γεωτρήσεις που βρίσκονται πλησίον του υδραγωγείου.

7.5.1 Πιεζομετρία περιοχής Ολυμπιακού Χωριού

Στα πλαίσια ερευνητικού προγράμματος του ΙΓΜΕ την περίοδο 2000 έως 2006 εκπονήθηκε γεωλογική χαρτογράφηση της περιοχής του Ολυμπιακού Χωριού καθώς επίσης και υδρογεωλογική έρευνα (Σιέμος Ν., 2006). Από την υδρογεωλογική αυτή έρευνα προέκυψε μία μέση στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα η οποία παρουσιάζεται στον παρακάτω χάρτη (Εικόνα 7. 8).

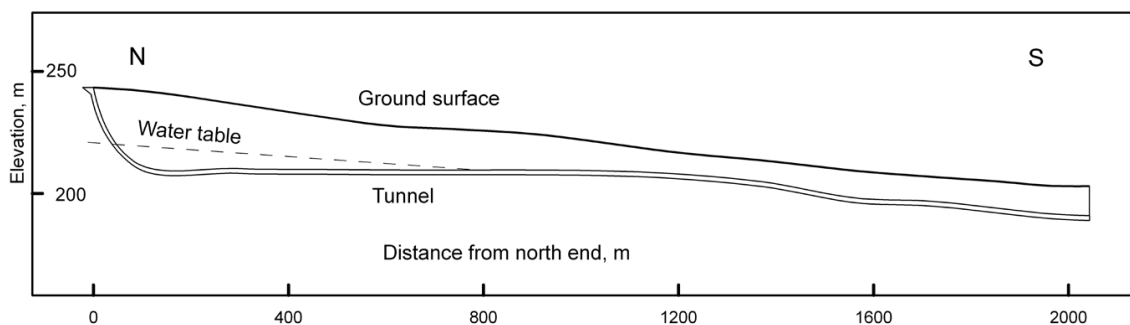


Εικόνα 7. 8 Πιεζομετρικές γραμμές υδροφόρου περιοχής Ολυμπιακού Χωριού, από υδρογεωλογική έρευνα περιοχής (Σιέμος Ν., 2006)

Στην Εικόνα 7. 8 εκτός από τις πιεζομετρικές γραμμές απεικονίζονται και οι ισοϋψείς του αναγλύφου, καθώς επίσης και τα φρεάτια από τα οποία προήλθαν μετά από μετρήσεις οι πιεζομετρικές γραμμές. Στο πρώτο τμήμα του το υδραγωγείο βρίσκεται εντός του νεότερου κώνου κορημάτων όπου σύμφωνα με τον χάρτη η πιεζομετρική επιφάνεια του φρεάτιου υδροφόρου πέφτει κατά 20 m. Επίσης με την βοήθεια των ισοψών του ανάγλυφου βγαίνει το συμπέρασμα ότι στο φρεάτιο 299 του υδραγωγείου η στάθμη του υδροφόρου βρίσκεται γύρω στα 10-13 m κάτω από την επιφάνεια του εδάφους.

Εκτός από την υδρογεωλογική αυτή μελέτη υπάρχει και η δοκιμαστική άντληση του ΙΓΜΕ (Vrellis, 2010), η οποία παρουσιάζεται στο προηγούμενο κεφάλαιο, σύμφωνα με την οποία σε γεώτρηση η οποία βρίσκεται 200 m από το φρεάτιο 299 ο υδροφόρος παρατηρείται σε βάθος 20 m από την επιφάνεια του εδάφους.

Με βάση την παραπάνω υδρογεωλογική μελέτη της περιοχής και την δοκιμαστική άντληση ο Ε. Χιώτης (2018) κατέληξε στην παρακάτω εκτίμηση σχετικά με το υδροφόρο κατά μήκος των πρώτων 2000 m του Αδριάνειου Υδραγωγείου (Εικόνα 7. 9). Σύμφωνα με αυτή η σήραγγα του υδραγωγείου βρίσκεται μέσα στον υδροφόρο της περιοχής για τα πρώτα 800 m.



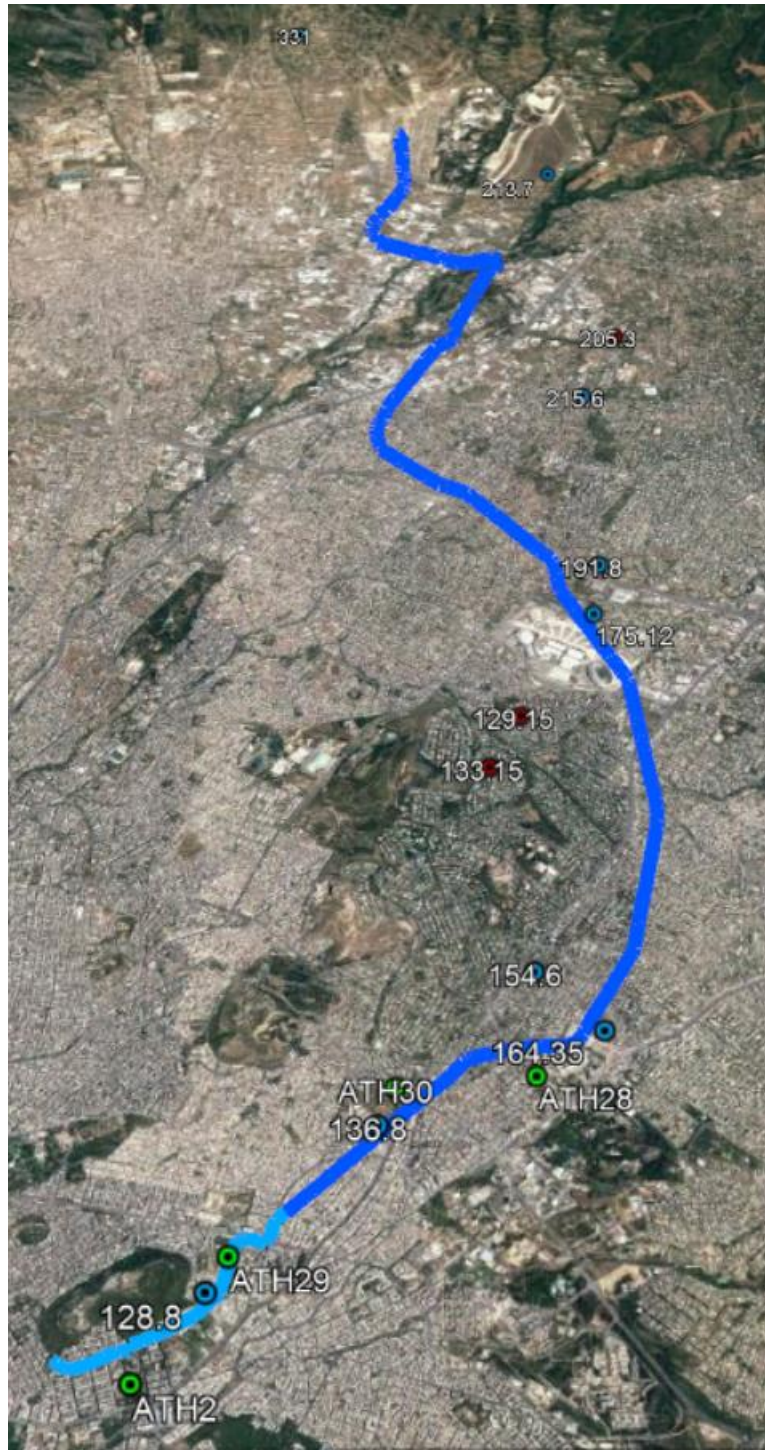
Εικόνα 7. 9 Στάθμη υδροφόρου κατά μήκος των πρώτων 2000 m του Αδριάνειου Υδραγωγείου (Chiotis, 2018)

7.5.2 Μετρήσεις στάθμης υδροφόρου πλησίον του υδραγωγείου και εκτίμηση κατά μήκος του

Εκτός από τις παραπάνω πληροφορίες σχετικά με τον υδροφόρο της περιοχής του Ολυμπιακού Χωριού υπάρχουν και ορισμένες μετρήσεις της στάθμης του υδροφόρου σε σημεία πλησίον του Αδριάνειου Υδραγωγείου (Kallioras, 2019).

Πιο συγκεκριμένα πρόκειται για μετρήσεις της μέσης στάθμης του υδροφόρου σε 13 γεωτρήσεις πλησίον του Αδριάνειου Υδραγωγείου που απέχουν από αυτό μέχρι και 2 km. Οι θέσεις των γεωτρήσεων αυτών παρουσιάζονται στην Εικόνα 7. 10.

Με βάσει αυτές τις γεωτρήσεις παρακάτω παρουσιάζεται μία εκτίμηση της στάθμης του υδροφόρου κατά μήκος του Υδραγωγείου. Η εκτίμηση αυτή θα ήταν αρκετά πιο ακριβής αν οι γεωτρήσεις ήταν περισσότερες και πιο κοντά στο υδραγωγείο. Το μήκος του κυρίως τμήματος του υδραγωγείου, το οποίο είναι περίπου ίσο με 18 km, είναι αρκετά μεγάλο αναλογικά με τις 13 γεωτρήσεις που είναι διαθέσιμες.



Εικόνα 7. 10 Σημεία μετρήσεων στάθμης υδροφόρου ορίζοντα (Kallioras, 2019)

Στον Πίνακα 7. 2 γίνεται μια παρουσίαση των στοιχείων των γεωτρήσεων που παρουσιάζονται στο παραπάνω χάρτη (Εικόνα 7. 10). Στην πρώτη στήλη του Πίνακα αναγράφεται το πλησιέστερο στην γεώτρηση φρεάτιο του Αδριάνειου Υδραγωγείου και στην επόμενη στήλη αναγράφεται η απόσταση ανάμεσα στην γεώτρηση και το κοντινότερο φρεάτιο του υδραγωγείου. Έπειτα αναγράφεται η διαφορά του υψόμετρου του εδάφους στην θέση του φρεατίου του υδραγωγείου από το υψόμετρο του εδάφους στην θέση της γεώτρησης. Στις δύο

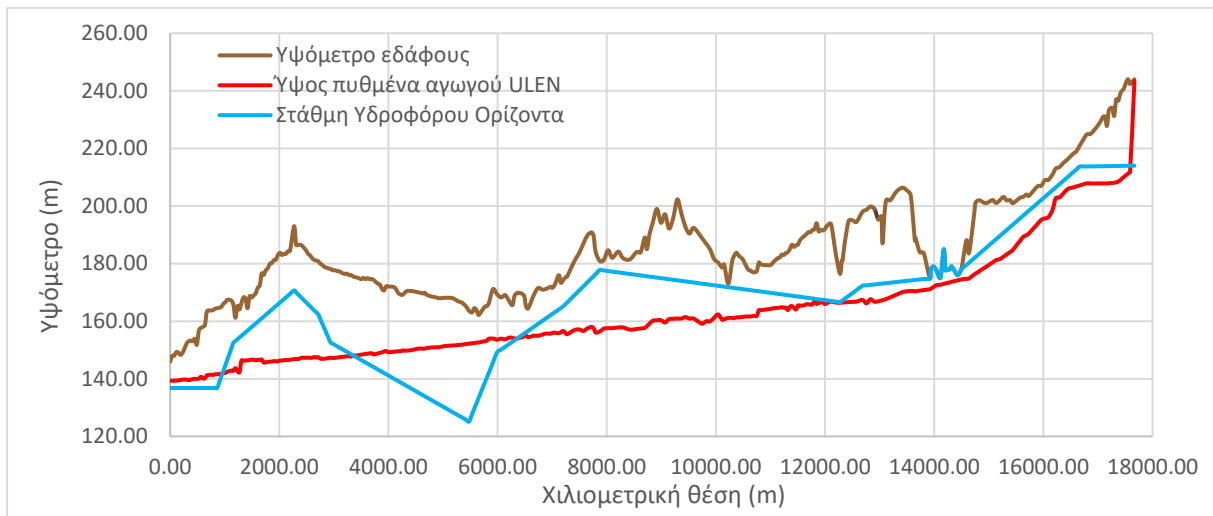
τελευταίες στήλες του πίνακα αναγράφονται οι απόλυτες στάθμες του υδροφόρου στο σημείο της γεώτρησης και στο σημείο του φρεατίου του υδραγωγείου. Η στάθμη του υδροφόρου στην γεώτρηση είναι γνωστή καθώς η τιμή αυτή προέρχεται από μέτρηση. Με βάση αυτήν την τιμή και κάνοντας την θεώρηση ότι η στάθμη του υδροφόρου βρίσκεται στο ίδιο βάθος από την επιφάνεια του εδάφους και στα δύο σημεία, γεώτρηση και φρεάτιο, υπολογίζεται η απόλυτη στάθμη του υδροφόρου στο σημείο του φρεατίου.

Πίνακας 7. 2 Στοιχεία των γεωτρήσεων πλησίον του άξονα του Αδριάνειου Υδραγωγείου και εκτίμησης της στάθμης του υδροφόρου στα κοντινότερα στις γεωτρήσεις φρεάτια

Αριθμός φρεατίου	Απόσταση φρεατίο-γεώτρηση (m)	Υψομετρική διαφορά φρεατίο-γεώτρηση (m)	Απόλυτη στάθμη υδροφόρου στην γεώτρηση (m)	Απόλυτη στάθμη υδροφόρου στο φρεάτιο (m)
299'	2120	-117	331.0	214.0
278	1570	-10	213.7	203.7
223	1625	-33	205.3	172.3
216	1670	-49	215.6	166.6
142	384	-14	191.8	177.8
131	72	-10	175.1	165.1
112	974	20	129.2	149.2
102A	1300	-8	133.2	125.2
56	508	-2	154.6	152.6
50	188	-2	164.4	162.4
α	368	17	153.7	170.7
22E	114	0	152.5	152.5
20A	0	0	136.8	136.8

Με βάση τις 13 τιμές της στάθμης του υδροφόρου κατά μήκος του υδραγωγείου που παρουσιάζονται στον Πίνακα 7. 2 εκτιμάται η στάθμη του υδροφόρου κατά μήκος ολόκληρου του υδραγωγείου θεωρώντας ότι η στάθμη ανάμεσα στα 13 αυτά σημεία μεταβάλλεται γραμμικά και συνεκτιμώντας τις ιδιαιτερότητες του ανάγλυφου, όπως για παράδειγμα μία κοίτη ποταμού.

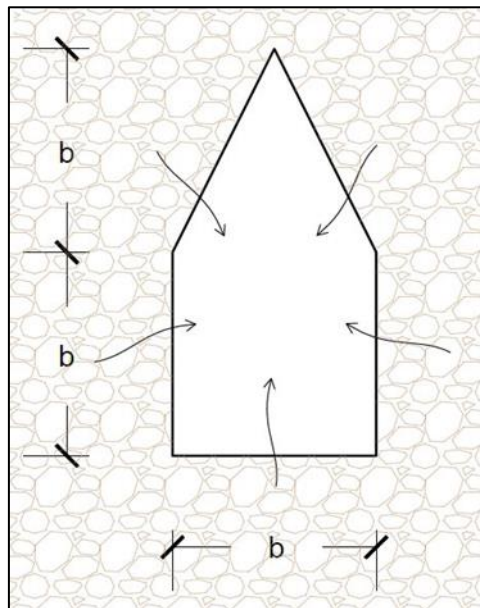
Η στάθμη που υπολογίστηκε κατά μήκος του κυρίως τμήματος του υδραγωγείου, από τον Άγιο Δημήτριο μέχρι το Ολυμπιακό Χωριό, παρουσιάζεται στην παρακάτω μηκοτομή (Σχήμα 7. 1).



Σχήμα 7. 1 Μηκοτομή Αδριάνειου Υδραγωγείου με την εκτιμώμενη στάθμη του υδροφόρου κατά μήκος του Υδραγωγείου

8 Εφαρμογή της μεθοδολογίας εισροής υπογείων υδάτων σε σήραγγα για την εκτίμηση της παροχής εισροής σε τμήματα του Αδριάνειου Υδραγωγείου

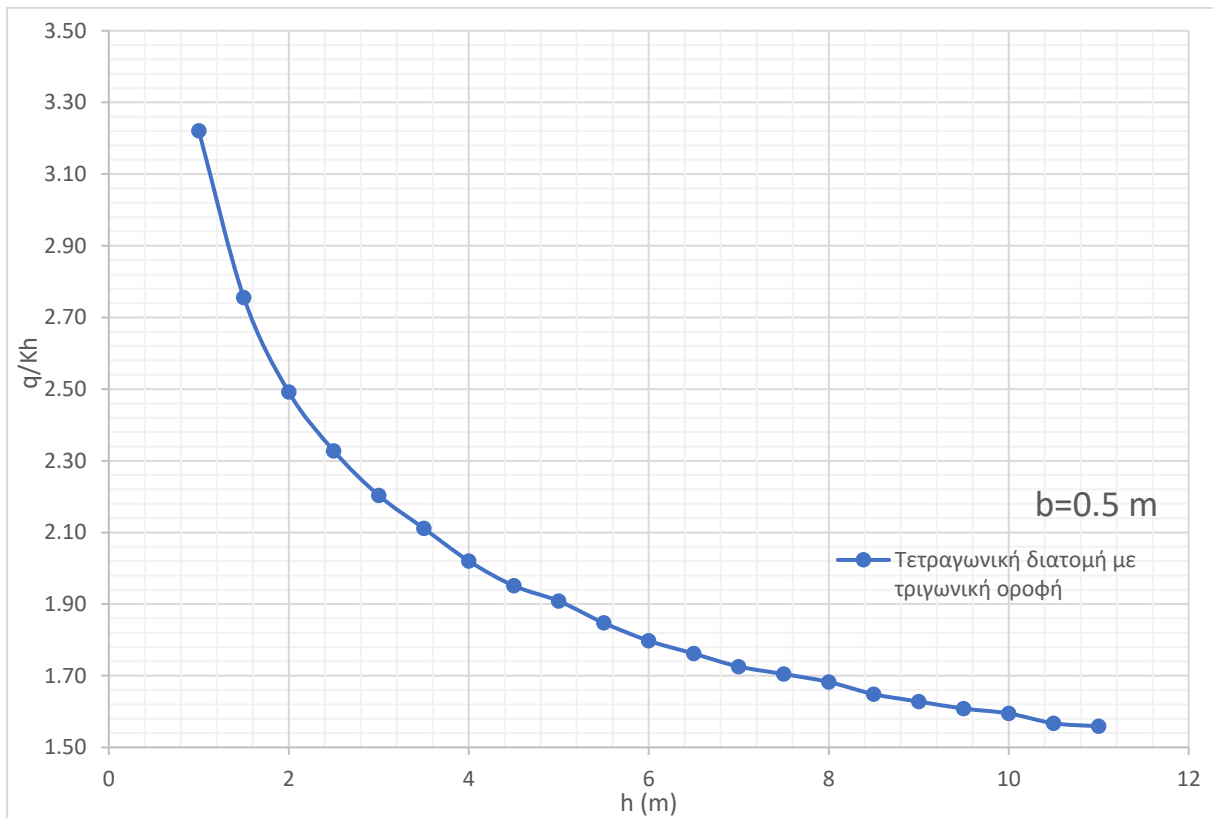
Στο παρακάτω κεφάλαιο πραγματοποιείται εκτίμηση της παροχής που υδρομαστεύει το Αδριάνειο Υδραγωγείο στα διάφορα τμήματά του με βάση τη μεθοδολογία που παρουσιάζεται στο πρώτο μέρος της διπλωματικής. Με την χρήση του λογισμικού SEEP/W για μία συγκεκριμένη τυπική διατομή του Αδριάνειου Υδραγωγείου (Εικόνα 8. 1) υπολογίζεται η παροχή που εισέρχεται στην σήραγγα για διάφορα βάθη (h).



Εικόνα 8. 1 Τυπική διατομή αδριάνειου Υδραγωγείου, με $b=0,5\text{ m}$

Στο Σχήμα 8. 1 παρουσιάζεται η παροχή εισροής ανά μέτρο μήκους της σήραγγας (q) προς το βάθος εντός του υδροφόρου (h) και προς την υδροπερατότητα (K), συναρτήσεως του βάθους εντός του υδροφόρου (h) για την χαρακτηριστική διατομή του Αδριάνειου Υδραγωγείου. Το σχήμα αυτό είναι χρήσιμο για μία γρήγορη εκτίμηση της εισροής υπογείων νερών στο Αδριάνειο Υδραγωγείο με βάση τα διαθέσιμα στοιχεία υδροπερατότητας (K) και βάθους στο οποίο βρίσκεται η σήραγγα εντός του υδροφόρου (h). Αρχικά, γνωρίζοντας το μέσο βάθος εντός του υδροφόρου (h) στο οποίο βρίσκεται η σήραγγα σε κάποιο τμήμα του υδραγωγείου προκύπτει ο λόγος q/Kh , όπου q η παροχή ανά μέτρο μήκους της σήραγγας, K η υδροπερατότητα και h το βάθος στο οποίο βρίσκεται η σήραγγα εντός του υδροφόρου. Ο λόγος q/Kh είναι αδιάστατο μέγεθος και αν πολλαπλασιαστεί με την υδροπερατότητα K της περιοχής, το βάθος h και το μήκος της σήραγγας L δίνει την συνολική παροχή που εισρέει στην σήραγγα στο επιθυμητό τμήμα.

Με βάση το Σχήμα 8. 1 αυτό πραγματοποιείται στα παρακάτω υποκεφάλαια η εκτίμηση της υδρομάστευσης στα διάφορα τμήματα του Αδριάνειου Υδραγωγείου.



Σχήμα 8. 1 Παροχή εισροής ανά μέτρο μήκους της σήραγγας, ανά μέτρο βάθους εντός του υδροφόρου προς υδροπερατότητα συναρτήσεως του βάθους εντός του υδροφόρου για την χαρακτηριστική διατομή του Αδριάνειου Υδραγωγείου

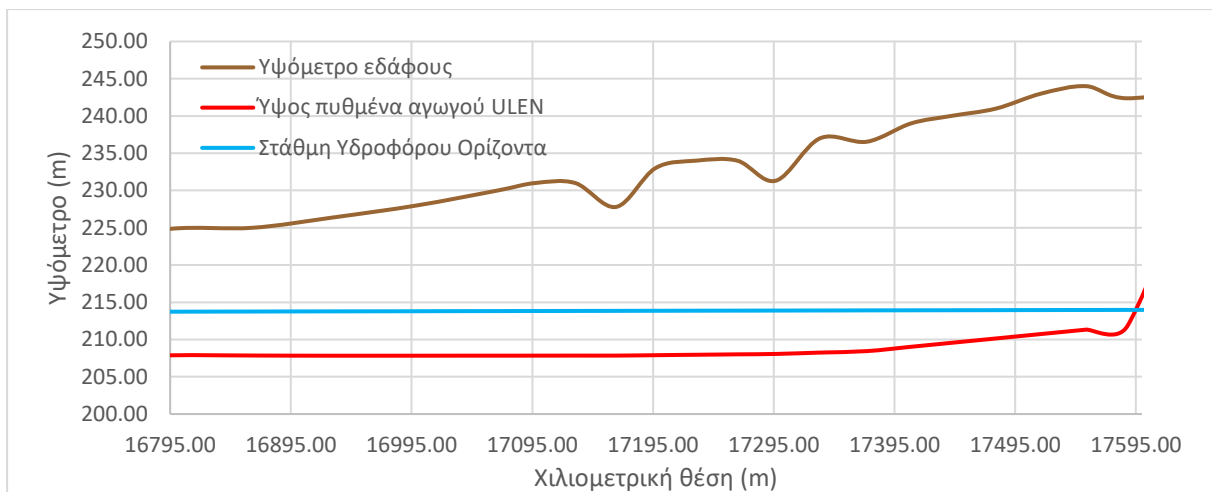
8.1 Εκτίμηση παροχής υδρομάστευσης του Αδριάνειου Υδραγωγείου στο Ολυμπιακό Χωριό (φρεάτια 280-299)

Στο παρακάτω υποκεφάλαιο πραγματοποιείται εκτίμηση της παροχής που υδρομαστεύει το Αδριάνειο Υδραγωγείο στο τμήμα του από το φρεάτιο 280 έως το φρεάτιο 299 στο Ολυμπιακό Χωριό.

Στο τμήμα αυτό το Αδριάνειο Υδραγωγείο διασχίζει, σύμφωνα με τους γεωλογικούς χάρτες του ΙΓΜΕ, παλαιά πλευρικά κορήματα και κώνους κορημάτων για 872 m.

Η υδροπερατότητα του σχηματισμού αυτού είναι γνωστή από την δοκιμαστική άντληση που περιγράφεται σε προηγούμενο κεφάλαιο (Vrellis, 2010) και ισούται με 5×10^{-6} m/s.

Στο Σχήμα 8. 2 παρουσιάζεται η μηκοτομή του Αδριάνειου Υδραγωγείου ανάμεσα στα φρεάτια 280 έως 299. Από την μηκοτομή υπολογίζεται ότι το μέσο βάθος από την στάθμη του υδροφόρου (h) στο οποίο βρίσκεται η σήραγγα του υδραγωγείου είναι ίσο με 5 m.



Σχήμα 8. 2 Μηκοτομή του Αδριάνειου Υδραγωγείου ανάμεσα στα φρεάτια 280-299

Με βάση το Σχήμα 8. 1 στην σελίδα 92, για βάθος (h) ίσο με 5 m και υδροπερατότητα (K) ίση με 5×10^{-6} m/s, προκύπτει παροχή εισροής $4,8 \times 10^{-5}$ m³/s/m. Η τιμή αυτή αντιστοιχεί σε ένα μέτρο μήκους σήραγγας και άρα για τα 872 m της σήραγγας που μελετάμε προκύπτει συνολική παροχή υδρομάστευσης ίση με 150 m³/h.

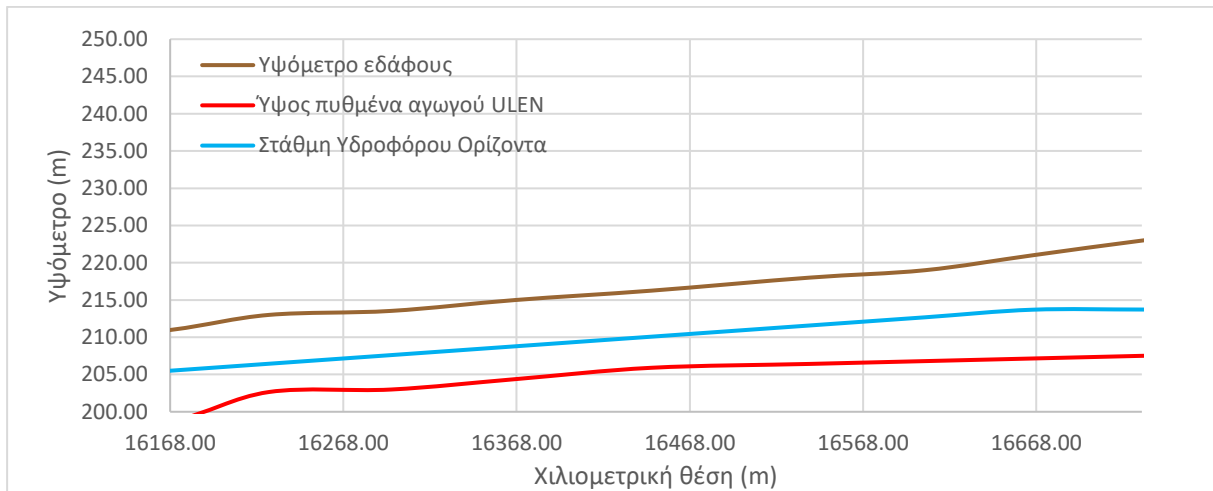
8.2 Εκτίμηση παροχής υδρομάστευσης του Αδριάνειου Υδραγωγείου στο Ολυμπιακό Χωριό (φρεάτια 271-279)

Στο παρακάτω υποκεφάλαιο πραγματοποιείται εκτίμηση της παροχής που υδρομαστεύει το Αδριάνειο Υδραγωγείο στο τμήμα του από το φρεάτιο 271 έως το φρεάτιο 279 στο Ολυμπιακό Χωριό.

Στο τμήμα αυτό το Αδριάνειο Υδραγωγείο διασχίζει, σύμφωνα με τους γεωλογικούς χάρτες του ΙΓΜΕ, αδρομερείς ποταμολιμναίους σχηματισμούς παρυφών Πάρνηθας και Πεντελικού για 630 m.

Η υδροπερατότητα του σχηματισμού αυτού δεν είναι γνωστή από μετρήσεις αλλά από την βιβλιογραφία (Mamassis, 2020) εκτιμάται ίση με 1×10^{-6} m/s.

Στο Σχήμα 8. 3 παρουσιάζεται η μηκοτομή του Αδριάνειου Υδραγωγείου ανάμεσα στα φρεάτια 271 έως 279. Από την μηκοτομή υπολογίζεται ότι το μέσο βάθος από την στάθμη του υδροφόρου (h) στο οποίο βρίσκεται η σήραγγα του υδραγωγείου είναι ίσο με 5 m.



Σχήμα 8. 3 Μηκοτομή του Αδριάνειου Υδραγωγείου ανάμεσα στα φρεάτια 271-279

Με βάση το Σχήμα 8. 1 στην σελίδα 92, για βάθος (h) ίσο με 5 m και υδροπερατότητα (K) ίση με 1×10^{-6} m/s, προκύπτει παροχή εισροής $9,5 \times 10^{-6}$ m³/s/m. Η τιμή αυτή αντιστοιχεί σε ένα μέτρο μήκους σήραγγας και άρα για τα 630 m της σήραγγας που μελετάμε προκύπτει συνολική παροχή υδρομάστευσης ίση με 22 m³/h.

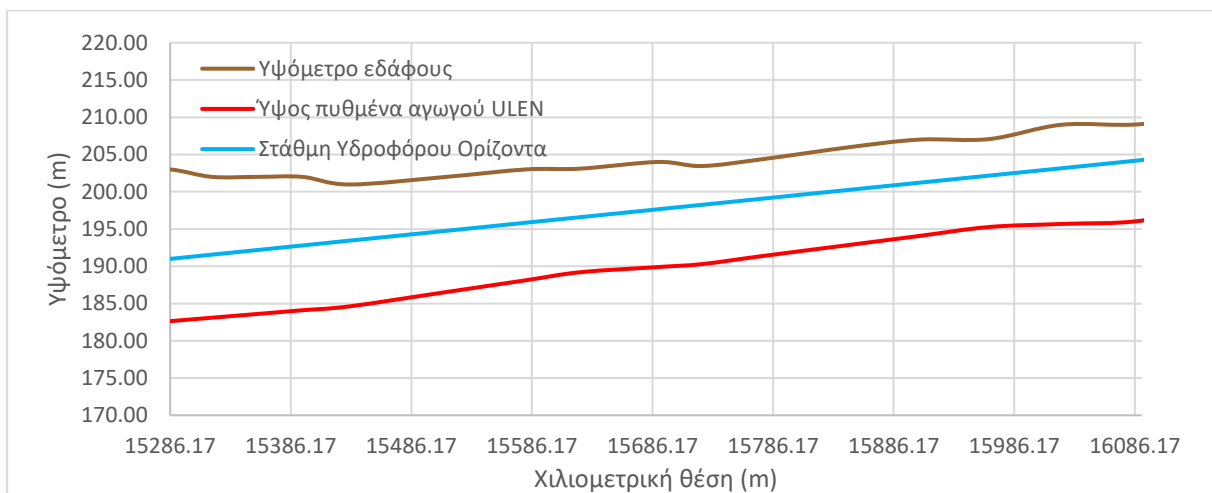
8.3 Εκτίμηση παροχής υδρομάστευσης του Αδριάνειου Υδραγωγείου ανάμεσα στα φρεάτια 255-270

Στο παρακάτω υποκεφάλαιο πραγματοποιείται εκτίμηση της παροχής που υδρομαστεύει το Αδριάνειο Υδραγωγείο στο τμήμα του από το φρεάτιο 255 έως το φρεάτιο 270.

Στο τμήμα αυτό το Αδριάνειο Υδραγωγείο διασχίζει, σύμφωνα με τους γεωλογικούς χάρτες του ΙΓΜΕ, λιμναίους σχηματισμούς Καλογρέζας-Πικερμίου για 840 m.

Η υδροπερατότητα του σχηματισμού αυτού δεν είναι γνωστή από μετρήσεις αλλά από την βιβλιογραφία (Mamassis, 2020) εκτιμάται ίση με 5×10^{-7} m/s.

Στο Σχήμα 8. 4 παρουσιάζεται η μηκοτομή του Αδριάνειου Υδραγωγείου ανάμεσα στα φρεάτια 255 έως 270. Από την μηκοτομή υπολογίζεται ότι το μέσο βάθος από την στάθμη του υδροφόρου (h) στο οποίο βρίσκεται η σήραγγα του υδραγωγείου είναι ίσο με 7,5 m.



Σχήμα 8. 4 Μηκοτομή του Αδριάνειου Υδραγωγείου ανάμεσα στα φρεάτια 255-270

Με βάση το Σχήμα 8. 1 στην σελίδα 92, για βάθος (h) ίσο με 7,5 m και υδροπερατότητα (K) ίση με 5×10^{-7} m/s, προκύπτει παροχή εισροής $6,5 \times 10^{-6}$ m³/s/m. Η τιμή αυτή αντιστοιχεί σε ένα μέτρο μήκους σήραγγας και άρα για τα 840 m της σήραγγας που μελετάμε προκύπτει συνολική παροχή υδρομάστευσης ίση με 20 m³/h.

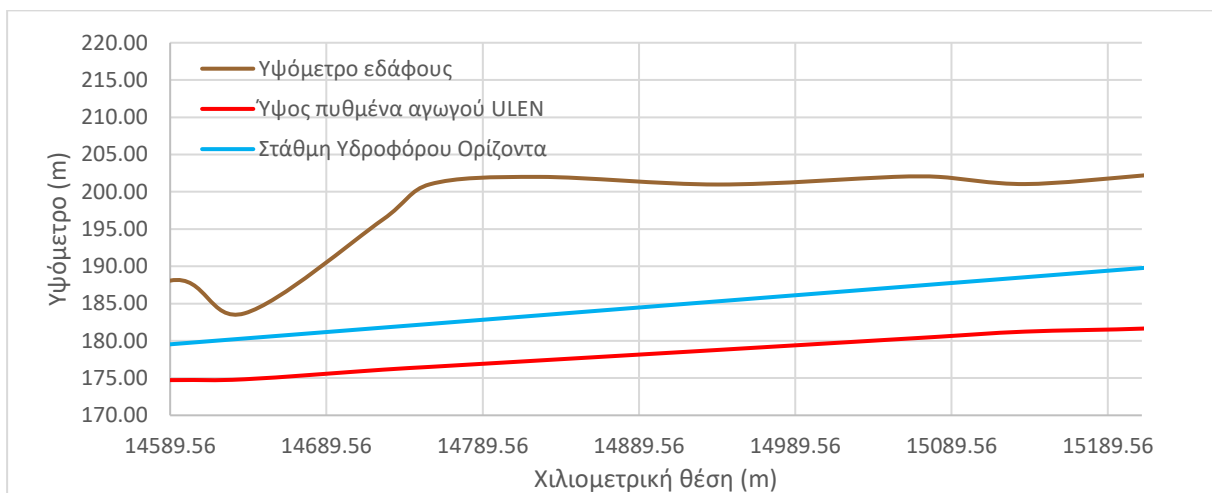
8.4 Εκτίμηση παροχής υδρομάστευσης του Αδριάνειου Υδραγωγείου ανάμεσα στα φρεάτια 246-253

Στο παρακάτω υποκεφάλαιο πραγματοποιείται εκτίμηση της παροχής που υδρομαστεύει το Αδριάνειο Υδραγωγείο στο τμήμα του από το φρεάτιο 246 έως το φρεάτιο 253.

Στο τμήμα αυτό το Αδριάνειο Υδραγωγείο διασχίζει, σύμφωνα με τους γεωλογικούς χάρτες του ΙΓΜΕ, λιμναίους σχηματισμούς Καλογρέζας-Πικερμίου για 710 m.

Η υδροπερατότητα του σχηματισμού αυτού δεν είναι γνωστή από μετρήσεις αλλά από την βιβλιογραφία (Mamassis, 2020) εκτιμάται ίση με 5×10^{-7} m/s.

Στο Σχήμα 8. 5 παρουσιάζεται η μηκοτομή του Αδριάνειου Υδραγωγείου ανάμεσα στα φρεάτια 246 έως 253. Από την μηκοτομή υπολογίζεται ότι το μέσο βάθος από την στάθμη του υδροφόρου (h) στο οποίο βρίσκεται η σήραγγα του υδραγωγείου είναι ίσο με 6 m.



Σχήμα 8. 5 Μηκοτομή του Αδριάνειου Υδραγωγείου ανάμεσα στα φρεάτια 246-253

Με βάση το Σχήμα 8. 1 στην σελίδα 92, για βάθος (h) ίσο με 6 m και υδροπερατότητα (K) ίση με 5×10^{-7} m/s, προκύπτει παροχή εισροής $5,4 \times 10^{-6}$ m³/s/m. Η τιμή αυτή αντιστοιχεί σε ένα μέτρο μήκους σήραγγας και άρα για τα 710 m της σήραγγας που μελετάμε προκύπτει συνολική παροχή υδρομάστευσης ίση με 14 m³/h.

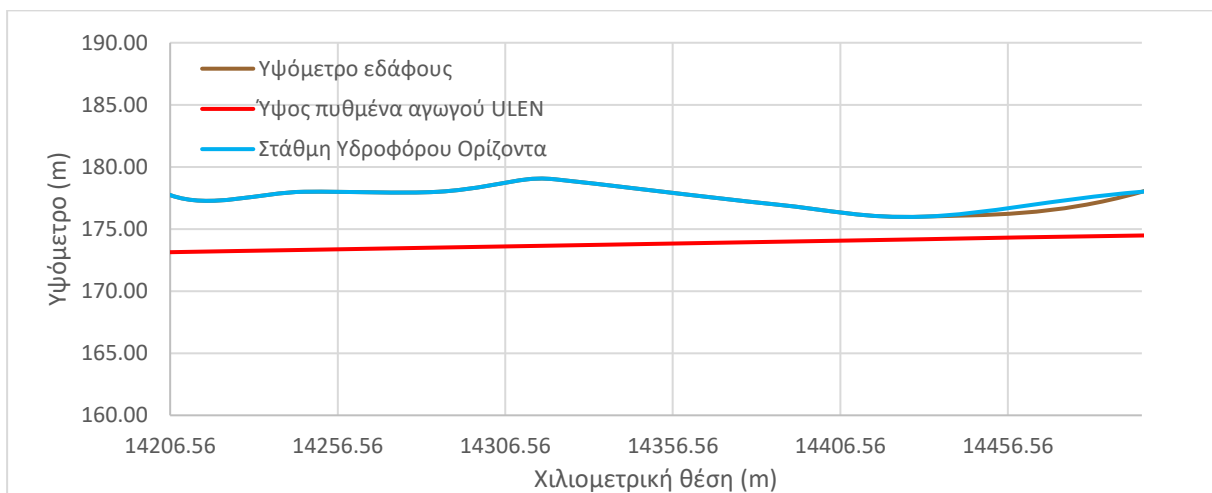
8.5 Εκτίμηση παροχής υδρομάστευσης του Αδριάνειου Υδραγωγείου ανάμεσα στα φρεάτια 240-245

Στο παρακάτω υποκεφάλαιο πραγματοποιείται εκτίμηση της παροχής που υδρομαστεύει το Αδριάνειο Υδραγωγείο στο τμήμα του από το φρεάτιο 240 έως το φρεάτιο 245.

Στο τμήμα αυτό το Αδριάνειο Υδραγωγείο διασχίζει, σύμφωνα με τους γεωλογικούς χάρτες του ΙΓΜΕ, λιμναίους σχηματισμούς Καλογρέζας-Πικερμίου για 290 m.

Η υδροπερατότητα του σχηματισμού αυτού δεν είναι γνωστή από μετρήσεις αλλά από την βιβλιογραφία (Mamassis, 2020) εκτιμάται ίση με 5×10^{-7} m/s.

Στο Σχήμα 8. 6 παρουσιάζεται η μηκοτομή του Αδριάνειου Υδραγωγείου ανάμεσα στα φρεάτια 240 έως 245. Από την μηκοτομή υπολογίζεται ότι το μέσο βάθος από την στάθμη του υδροφόρου (h) στο οποίο βρίσκεται η σήραγγα του υδραγωγείου είναι ίσο με 3.5 m.



Σχήμα 8. 6 Μηκοτομή του Αδριάνειου Υδραγωγείου ανάμεσα στα φρεάτια 240-245

Με βάση το Σχήμα 8. 1 στην σελίδα 92, για βάθος (h) ίσο με 3.5 m και υδροπερατότητα (K) ίση με 5×10^{-7} m/s, προκύπτει παροχή εισροής $3,7 \times 10^{-6}$ m³/s/m. Η τιμή αυτή αντιστοιχεί σε ένα μέτρο μήκους σήραγγας και άρα για τα 290 m της σήραγγας που μελετάμε προκύπτει συνολική παροχή υδρομάστευσης ίση με 4 m³/h.

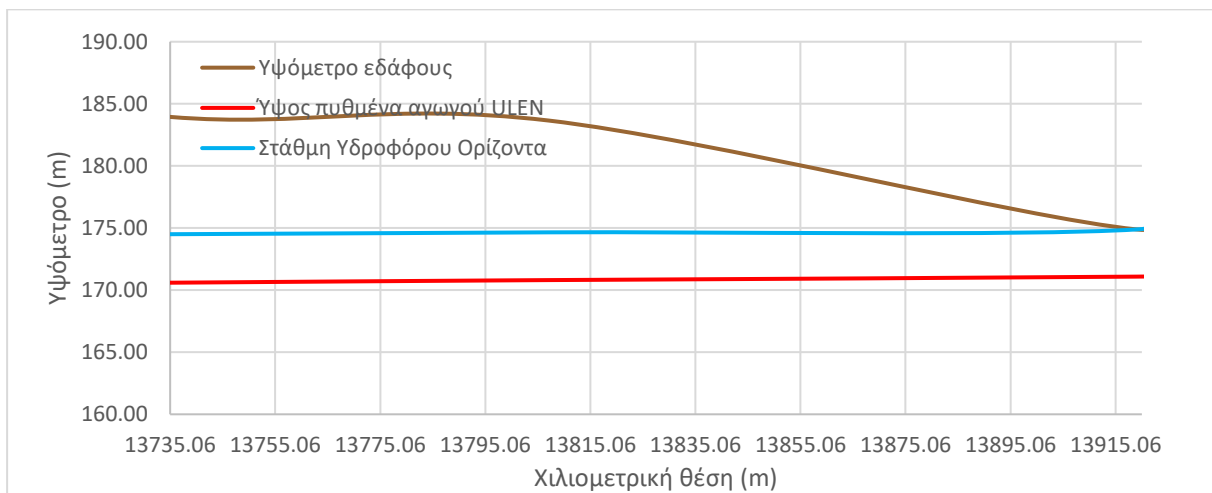
8.6 Εκτίμηση παροχής υδρομάστευσης του Αδριάνειου Υδραγωγείου ανάμεσα στα φρεάτια 239-239B (Υδρομαστευτική στοά Κηφισού)

Στο παρακάτω υποκεφάλαιο πραγματοποιείται εκτίμηση της παροχής που υδρομαστεύει το Αδριάνειο Υδραγωγείο στο τμήμα του από το φρεάτιο 239 έως το φρεάτιο 239B.

Στο τμήμα αυτό το Αδριάνειο Υδραγωγείο διασχίζει, σύμφωνα με τους γεωλογικούς χάρτες του ΙΓΜΕ, λιμναίους σχηματισμούς Καλογρέζας-Πικερμίου για 185 m.

Η υδροπερατότητα του σχηματισμού αυτού δεν είναι γνωστή από μετρήσεις αλλά από την βιβλιογραφία (Mamassis, 2020) εκτιμάται ίση με 5×10^{-7} m/s.

Στο Σχήμα 8. 7 παρουσιάζεται η μηκοτομή του Αδριάνειου Υδραγωγείου ανάμεσα στα φρεάτια 239 έως 239B. Από την μηκοτομή υπολογίζεται ότι το μέσο βάθος από την στάθμη του υδροφόρου (h) στο οποίο βρίσκεται η σήραγγα του υδραγωγείου είναι ίσο με 4 m.



Σχήμα 8. 7 Μηκοτομή του Αδριάνειου Υδραγωγείου ανάμεσα στα φρεάτια 239Α-239

Με βάση το Σχήμα 8. 1 στην σελίδα 92, για βάθος (h) ίσο με 4 m και υδροπερατότητα (K) ίση με 5×10^{-7} m/s, προκύπτει παροχή εισροής 4×10^{-6} m³/s/m. Η τιμή αυτή αντιστοιχεί σε ένα μέτρο μήκους σήραγγας και άρα για τα 185 m της σήραγγας που μελετάμε προκύπτει συνολική παροχή υδρομάστευσης ίση με 3 m³/h.

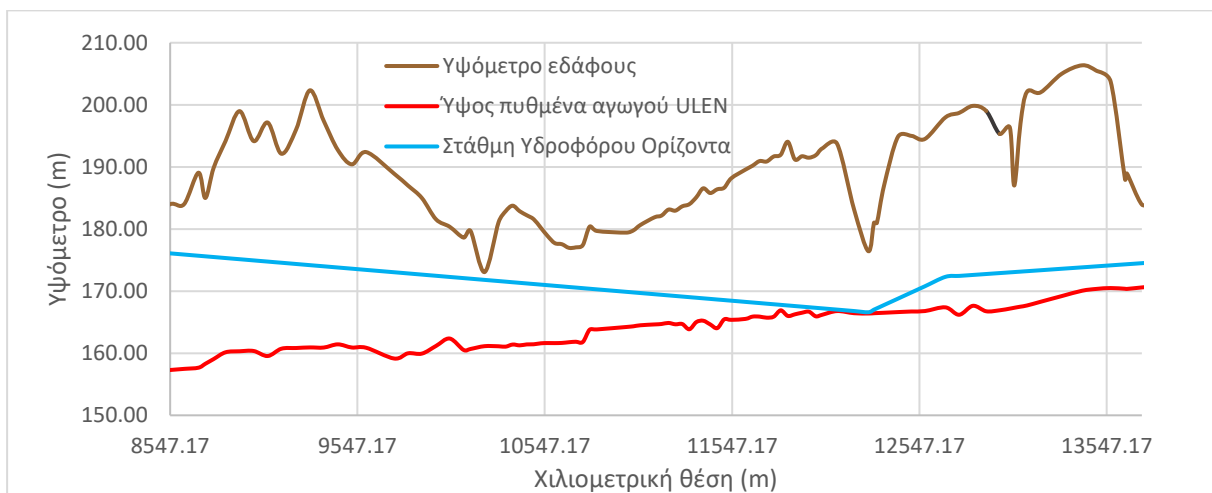
8.7 Εκτίμηση παροχής υδρομάστευσης του Αδριάνειου Υδραγωγείου ανάμεσα στα φρεάτια 150-239

Στο παρακάτω υποκεφάλαιο πραγματοποιείται εκτίμηση της παροχής που υδρομαστεύει το Αδριάνειο Υδραγωγείο στο τμήμα του από το φρεάτιο 150 έως το φρεάτιο 239.

Στο τμήμα αυτό το Αδριάνειο Υδραγωγείο διασχίζει, σύμφωνα με τους γεωλογικούς χάρτες του ΙΓΜΕ, λιμναίους σχηματισμούς Καλογρέζας-Πικερμίου για 5200 m.

Η υδροπερατότητα του σχηματισμού αυτού δεν είναι γνωστή από μετρήσεις αλλά από την βιβλιογραφία (Mamassis, 2020) εκτιμάται ίση με 5×10^{-7} m/s.

Στο Σχήμα 8. 8 παρουσιάζεται η μηκοτομή του Αδριάνειου Υδραγωγείου ανάμεσα στα φρεάτια 150 έως 239. Από την μηκοτομή υπολογίζεται ότι το μέσο βάθος από την στάθμη του υδροφόρου (h) στο οποίο βρίσκεται η σήραγγα του υδραγωγείου είναι ίσο με 7,5 m.



Σχήμα 8. 8 Μηκοτομή του Αδριάνειου Υδραγωγείου ανάμεσα στα φρεάτια 150-239

Με βάση το Σχήμα 8. 1 στην σελίδα 92, για βάθος (h) ίσο με 7,5 m και υδροπερατότητα (K) ίση με 5×10^{-7} m/s, προκύπτει παροχή εισροής $6,5 \times 10^{-6}$ m³/s/m. Η τιμή αυτή αντιστοιχεί σε ένα μέτρο μήκους σήραγγας και άρα για τα 5200 m της σήραγγας που μελετάμε προκύπτει συνολική παροχή υδρομάστευσης ίση με 121 m³/h.

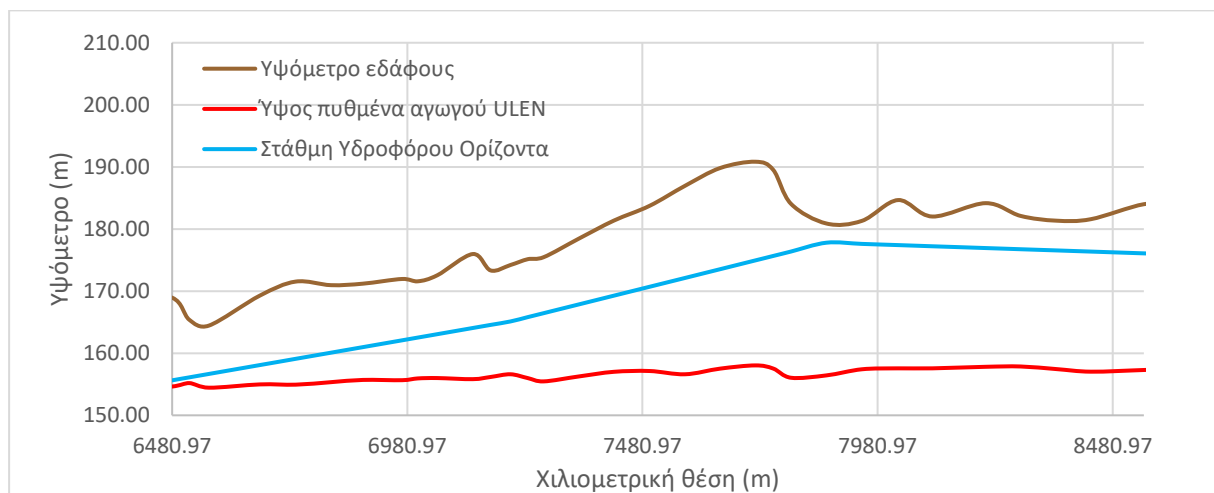
8.8 Εκτίμηση παροχής υδρομάστευσης του Αδριάνειου Υδραγωγείου ανάμεσα στα φρεάτια 119-150

Στο παρακάτω υποκεφάλαιο πραγματοποιείται εκτίμηση της παροχής που υδρομαστεύει το Αδριάνειο Υδραγωγείο στο τμήμα του από το φρεάτιο 119 έως το φρεάτιο 150.

Στο τμήμα αυτό το Αδριάνειο Υδραγωγείο διασχίζει, σύμφωνα με τους γεωλογικούς χάρτες του ΙΓΜΕ, λιμναίους σχηματισμούς Καλογρέζας-Πικερμίου για 2070 m.

Η υδροπερατότητα του σχηματισμού αυτού δεν είναι γνωστή από μετρήσεις αλλά από την βιβλιογραφία (Mamassis, 2020) εκτιμάται ίση με 5×10^{-7} m/s.

Στο Σχήμα 8. 9 παρουσιάζεται η μηκοτομή του Αδριάνειου Υδραγωγείου ανάμεσα στα φρεάτια 119 έως 150. Από την μηκοτομή υπολογίζεται ότι το μέσο βάθος από την στάθμη του υδροφόρου (h) στο οποίο βρίσκεται η σήραγγα του υδραγωγείου είναι ίσο με 12 m.



Σχήμα 8. 9 Μηκοτομή του Αδριάνειου Υδραγωγείου ανάμεσα στα φρεάτια 119-150

Με βάση το Σχήμα 8. 1 στην σελίδα 92, για βάθος (h) ίσο με 12 m και υδροπερατότητα (K) ίση με 5×10^{-7} m/s, προκύπτει παροχή εισροής $9,2 \times 10^{-6}$ m³/s/m. Η τιμή αυτή αντιστοιχεί σε ένα μέτρο μήκους σήραγγας και άρα για τα 2070 m της σήραγγας που μελετάμε προκύπτει συνολική παροχή υδρομάστευσης ίση με 68 m³/h.

Στο τμήμα από το φρεάτιο 81 έως το φρεάτιο 119 εκτιμάτε ότι η σήραγγα του Αδριάνειου Υδραγωγείου βρίσκεται πάνω από την στάθμη του υδροφόρου και συνεπώς δεν συλλέγει υπόγεια νερά.

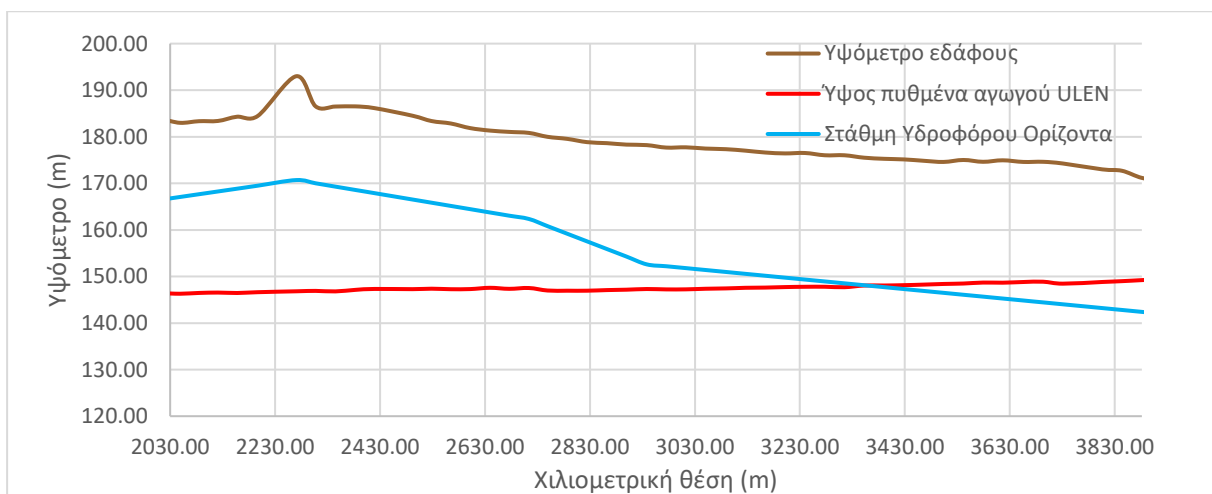
8.9 Εκτίμηση παροχής υδρομάστευσης του Αδριάνειου Υδραγωγείου ανάμεσα στο ΓΕΕΘΑ (έμφραξη ανάμεσα στα φρεάτια 32-44) και στο φρεάτιο 80

Στο παρακάτω υποκεφάλαιο πραγματοποιείται εκτίμηση της παροχής που υδρομαστεύει το Αδριάνειο Υδραγωγείο στο τμήμα του από το ΓΕΕΘΑ (έμφραξη ανάμεσα στα φρεάτια 32-44) έως το φρεάτιο 80. Από την εκτίμηση της στάθμης του υδροφόρου προκύπτει ότι η σήραγγα του υδραγωγείου βρίσκεται εντός του υδροφόρου από το ΓΕΕΘΑ μέχρι περίπου το φρεάτιο 66.

Στο τμήμα αυτό το Αδριάνειο Υδραγωγείο διασχίζει, σύμφωνα με τους γεωλογικούς χάρτες του ΙΓΜΕ, Αθηναϊκό σχιστόλιθο/Μαργαϊκό ορίζοντα για 1850 m από τα οποία για 1280 m υδρομαστεύει.

Η υδροπερατότητα του σχηματισμού αυτού δεν είναι γνωστή από μετρήσεις αλλά από την βιβλιογραφία (Mamassis, 2020) εκτιμάται ίση με 1×10^{-6} m/s.

Στο Σχήμα 8. 10 παρουσιάζεται η μηκοτομή του Αδριάνειου Υδραγωγείου ανάμεσα στο ΓΕΕΘΑ και το φρεάτιο 80. Από την μηκοτομή υπολογίζεται ότι για το τμήμα που το υδραγωγείο βρίσκεται εντός του υδροφόρου το μέσο βάθος από την στάθμη του υδροφόρου (h) στο οποίο βρίσκεται η σήραγγα του υδραγωγείου είναι ίσο με 11 m.



Σχήμα 8. 10 Μηκοτομή του Αδριάνειου Υδραγωγείου ανάμεσα στο ΓΕΕΘΑ (φρεάτια 32-44) και φρεάτιο 80

Με βάση το Σχήμα 8. 1 στην σελίδα 92, για βάθος (h) ίσο με 11 m και υδροπερατότητα (K) ίση με 1×10^{-6} m/s, προκύπτει παροχή εισροής $1,7 \times 10^{-5}$ m³/s/m. Η τιμή αυτή αντιστοιχεί σε ένα μέτρο μήκους σήραγγας και άρα για τα 1280 m που η σήραγγα βρίσκεται εντός του υδροφόρου προκύπτει συνολική παροχή υδρομάστευσης ίση με 79 m³/h.

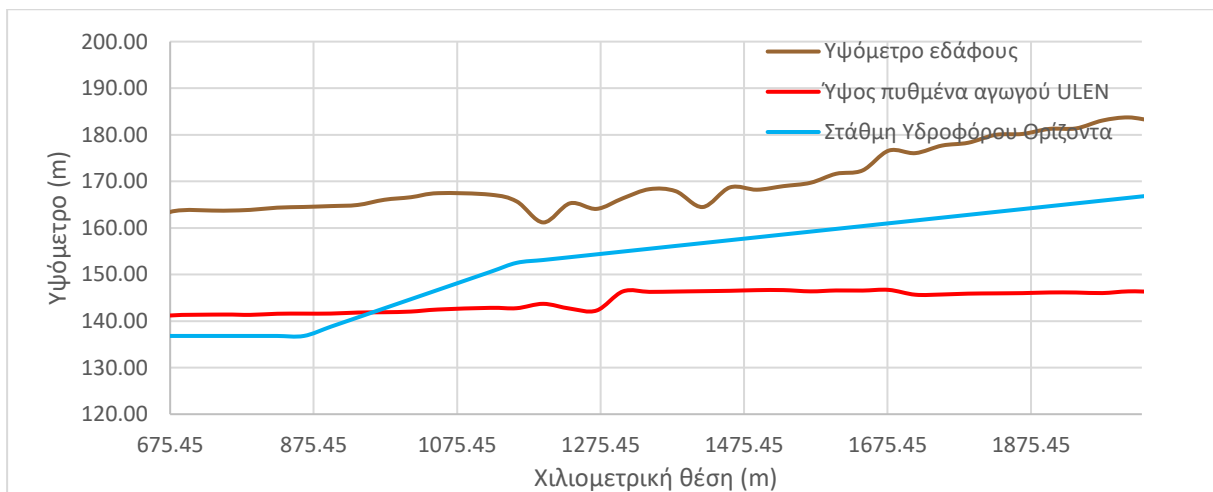
8.10 Εκτίμηση παροχής υδρομάστευσης του Αδριάνειου Υδραγωγείου ανάμεσα στο φρεάτιο 18Α και το ΓΕΕΘΑ (έμφραξη ανάμεσα στα φρεάτια 32-44)

Στο παρακάτω υποκεφάλαιο πραγματοποιείται εκτίμηση της παροχής που υδρομαστεύει το Αδριάνειο Υδραγωγείο στο τμήμα του από το φρεάτιο 18Α έως το ΓΕΕΘΑ (έμφραξη ανάμεσα στα φρεάτια 32-44). Από την εκτίμηση της στάθμης του υδροφόρου προκύπτει ότι η σήραγγα του υδραγωγείου βρίσκεται εντός του υδροφόρου από το φρεάτιο 22Α μέχρι το ΓΕΕΘΑ.

Στο τμήμα αυτό το Αδριάνειο Υδραγωγείο διασχίζει, σύμφωνα με τους γεωλογικούς χάρτες του ΙΓΜΕ, Αθηναϊκό σχιστόλιθο/Μαργαϊκό ορίζοντα για 1350 m από τα οποία για 1060 m υδρομαστεύει.

Η υδροπερατότητα του σχηματισμού αυτού δεν είναι γνωστή από μετρήσεις αλλά από την βιβλιογραφία (Μαμασσίς, 2020) εκτιμάται ίση με 1×10^{-6} m/s.

Στο Σχήμα 8. 11 παρουσιάζεται η μηκοτομή του Αδριάνειου Υδραγωγείου ανάμεσα στο φρεάτιο 18Α και το ΓΕΕΘΑ. Από την μηκοτομή υπολογίζεται ότι για το τμήμα που το υδραγωγείο βρίσκεται εντός του υδροφόρου το μέσο βάθος από την στάθμη του υδροφόρου (h) στο οποίο βρίσκεται η σήραγγα του υδραγωγείου είναι ίσο με 11.5 m.



Σχήμα 8. 11 Μηκοτομή του Αδριάνειου Υδραγωγείου ανάμεσα στο φρεάτιο 18Α και το ΓΕΕΘΑ (φρεάτια 32-44)

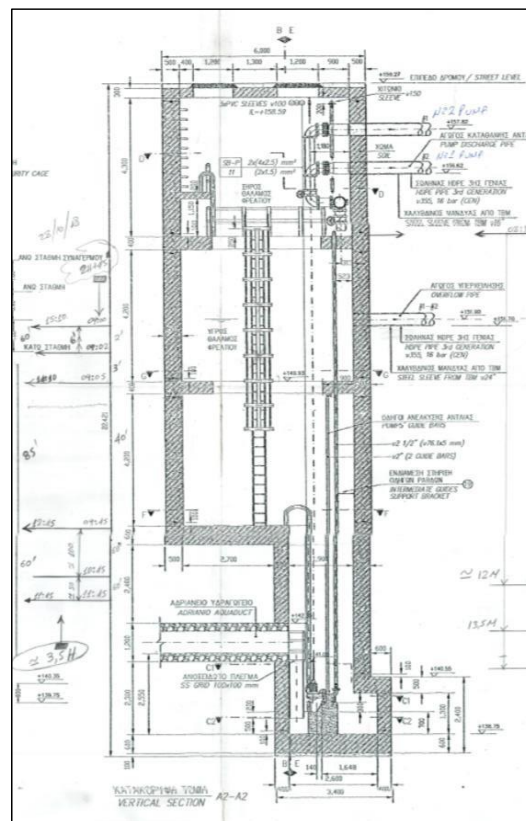
Με βάση το Σχήμα 8. 1 στην σελίδα 92, για βάθος (h) ίσο με 11.5 m και υδροπερατότητα (K) ίση με 1×10^{-6} m/s, προκύπτει παροχή εισροής $1,8 \times 10^{-5}$ m³/s/m. Η τιμή αυτή αντιστοιχεί σε ένα μέτρο μήκους σήραγγας και άρα για τα 1060 m που η σήραγγα βρίσκεται εντός του υδροφόρου προκύπτει συνολική παροχή υδρομάστευσης ίση με 68 m³/h.

Στο τμήμα από το φρεάτιο 1 έως το φρεάτιο 18 εκτιμάτε ότι η σήραγγα του Αδριάνειου Υδραγωγείου βρίσκεται πάνω από την στάθμη του υδροφόρου και συνεπώς δεν συλλέγει υπόγεια νερά.

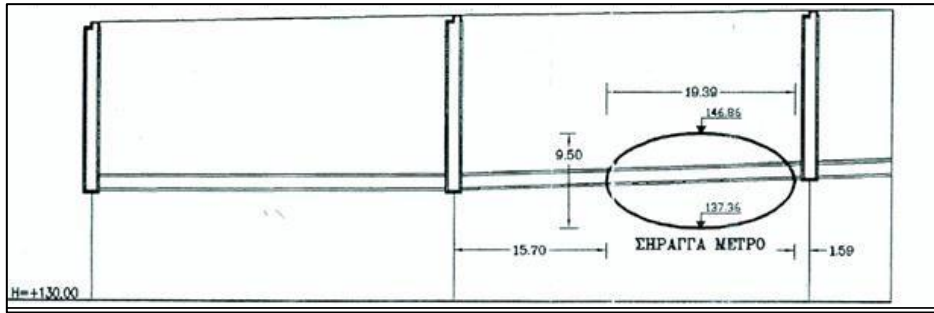
9 Μετρήσεις πεδίου για την διερεύνηση της λειτουργίας του Αδριάνειου Υδραγωγείου και υπολογισμός της παροχής του στην Πανόρμου

9.1 Η λειτουργία του φρεατίου 18Α στην Πανόρμου

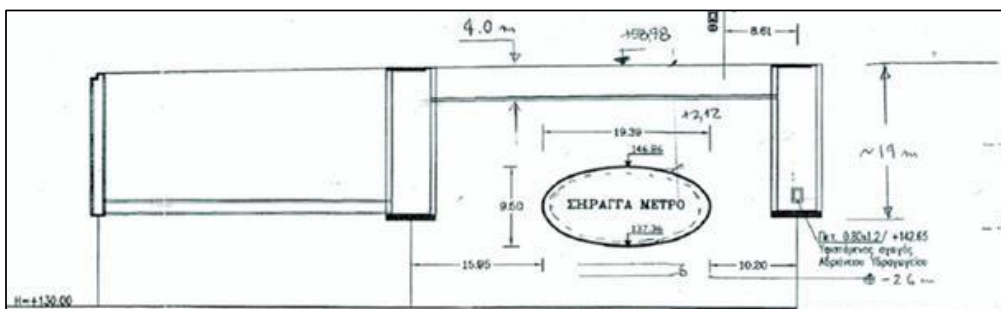
Στο τέλος της δεκαετίας του '90, κατά την κατασκευή της σήραγγας του μετρό στην Αθήνα, στην διασταύρωση των οδών Πανόρμου και Λ. Ριανκούρ κρίθηκε πως το Αδριάνειο Υδραγωγείο στο σημείο αυτό έπρεπε να διακοπεί και με ένα by-pass έργο να μεταφερθεί το νερό του ανάντη της σήραγγας του μετρό για να συνεχίσει την διαδρομή του. Για τον λόγο αυτό κατασκευάστηκαν δύο φρεάτια ένα ανάντη της σήραγγας (18Α) και ένα κατόντη αυτής (18). Στο φρεάτιο 18Α (Εικόνα 9. 1), το Αδριάνειο Υδραγωγείο διακόπτεται ανάντη της σήραγγας του μετρό (Εικόνα 9. 2, Εικόνα 9. 3). Το νερό το οποίο μεταφέρεται γεμίζει το φρεάτιο αυτό και στην συνέχεια με υπερχειλίση μέσα από δύο αγωγούς διαμέτρου 400mm ο κάθε ένας μεταφέρεται στο φρεάτιο 18 στα κατόντη της σήραγγας του μετρό και συνεχίζει από εκεί μέχρι την Πλατεία Δεξαμενής στο Κολωνάκι.



Εικόνα 9. 1 Σχέδιο φρεατίου 18Α (Αντλιοστάσιο Πανόρμου)



Εικόνα 9. 2 Σκαρίφημα του Αδριάνειου Υδραγωγείου πριν την διάνοιξη της σήραγγας του Μετρώ στο ύψος της Πανόρμου



Εικόνα 9. 3 Σκαρίφημα του Αδριάνειου Υδραγωγείου μετά την διάνοιξη της σήραγγας του Μετρώ στο ύψος της Πανόρμου

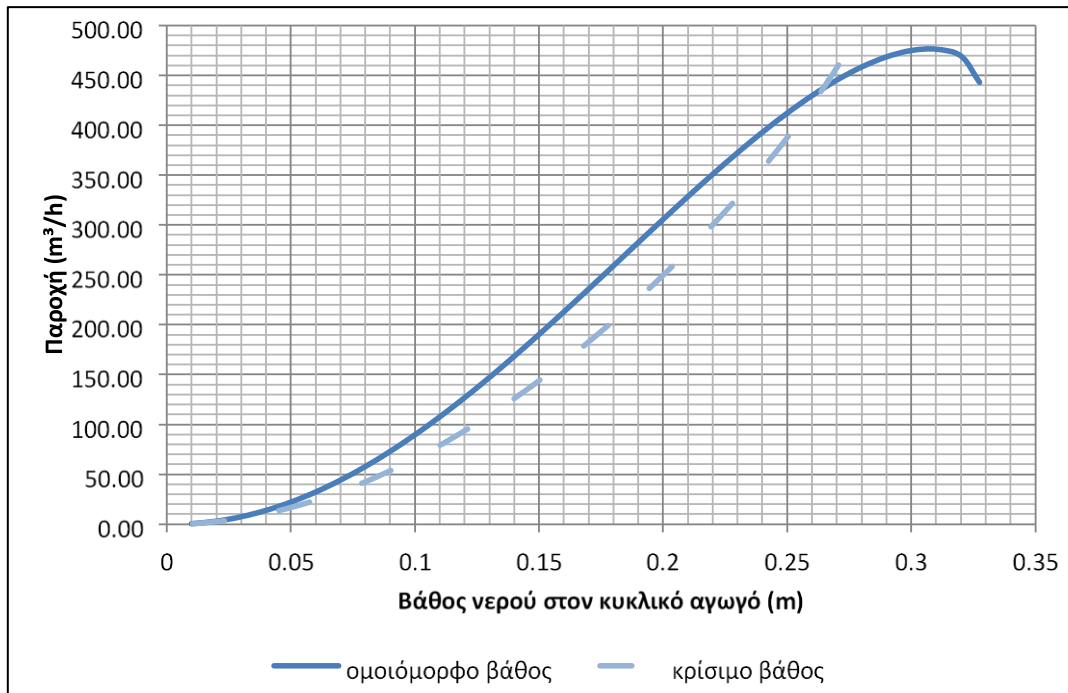
Εάν στο φρεάτιο 18Α θεωρήσουμε ότι λειτουργεί η υπερχειλίση και δεν έχουμε μεταβολή του ύψους του νερού και άρα και του όγκου του νερού εντός του φρεατίου συμπεραίνουμε ότι η παροχή του νερού που εισέρχεται στο φρεάτιο είναι ίση με την παροχή του νερού που εξέρχεται από αυτό με την υπερχειλίση από τους δύο αγωγούς. Οι αγωγοί αυτοί είναι Φ400 με εσωτερική διάμετρο 327,4 mm, η κλίση των αγωγών είναι 11,8% και ο συντελεστής τραχύτητας του Manning ίσος με 0,014. Με την χρήση των εξισώσεων του παρακάτω πίνακα (Πίνακας 9. 1) υπολογίζεται η παροχή του κάθε ενός αγωγού συναρτήσει του βάθους του νερού στον αγωγό (ομοιόμορφο βάθος) καθώς επίσης και το κρίσιμο βάθος για την κάθε παροχή. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται παρακάτω (Πίνακας 9. 2, Σχήμα 9. 1, Σχήμα 9. 2)

Πίνακας 9. 1 Εξισώσεις υπολογισμού του κρίσιμου και του ομοιόμορφου βάθους

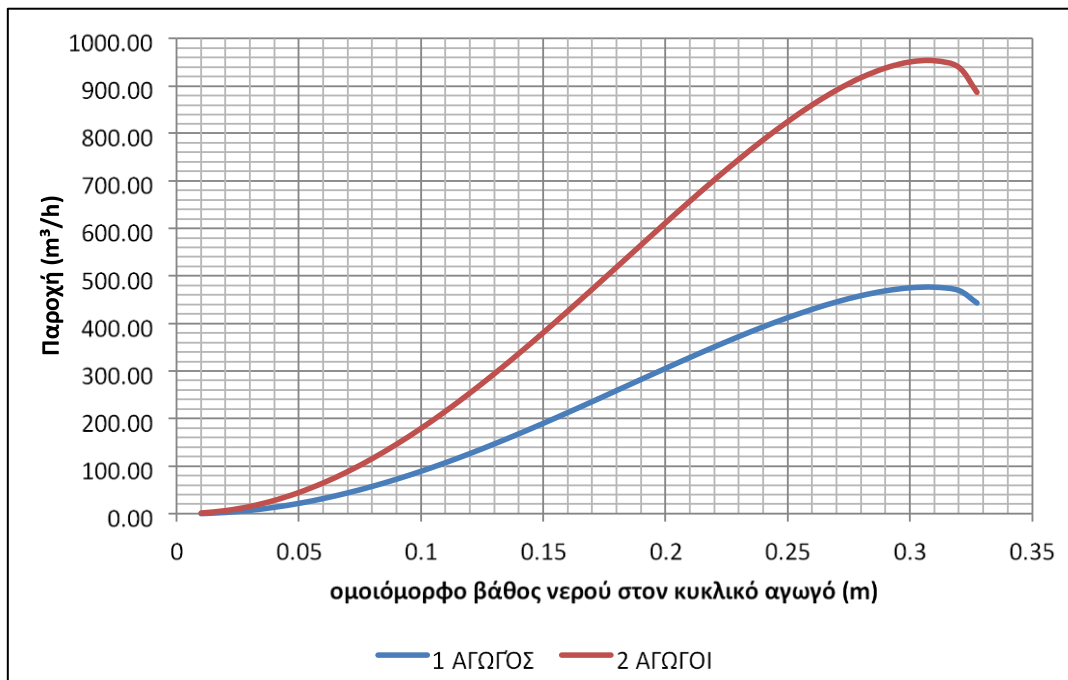
Διατομή	Κρίσιμο βάθος	Ομοιόμορφο βάθος
	$\theta = \sin \theta + \frac{8}{d^{5/3}} \left[\frac{Q^2 \sin(\theta/2)}{g} \right]^{1/3}$ $y_c = \frac{d}{2} [1 - \cos(\theta/2)]$	$\theta = \left[\frac{Qn}{J^{1/2}} \frac{\theta^{2/3}}{(d/2)^{8/3}} \right]^{3/5} + \frac{\sin \theta}{2} + \frac{\theta}{2}$ $y = \frac{d}{2} [1 - \cos(\theta/2)]$

Πίνακας 9. 2 Παροχή υπερχείλισης φρεατίου 18Α συναρτήσει του βάθους νερού στον κυκλικό αγωγό

ομοιόμορφο βάθος (m)	Q (m ³ /h)	κρίσιμο βάθος (m)	Qολ(m ³ /h)
0,01	0,74	0,01	1,48
0,02	3,26	0,02	6,52
0,03	7,70	0,03	15,40
0,04	14,08	0,05	28,15
0,05	22,36	0,06	44,73
0,06	32,50	0,07	65,01
0,07	44,42	0,08	88,85
0,08	58,03	0,09	116,06
0,09	73,22	0,11	146,44
0,1	89,88	0,12	179,76
0,11	107,89	0,13	215,77
0,12	127,10	0,14	254,21
0,13	147,39	0,15	294,78
0,14	168,61	0,16	337,21
0,15	190,59	0,17	381,18
0,16	213,18	0,18	426,35
0,17	236,20	0,19	472,41
0,18	259,49	0,20	518,98
0,19	282,85	0,21	565,69
0,2	306,08	0,22	612,16
0,21	328,98	0,23	657,96
0,22	351,33	0,24	702,65
0,23	372,89	0,25	745,78
0,24	393,41	0,25	786,82
0,25	412,61	0,26	825,21
0,26	430,17	0,26	860,33
0,27	445,73	0,27	891,46
0,28	458,86	0,27	917,71
0,29	468,99	0,27	937,98
0,3	475,34	0,27	950,68
0,31	476,59	0,27	953,19
0,32	469,67	0,27	939,34
0,3274	443,31	0,27	886,62



Σχήμα 9. 1 Κρίσιμο και ομοιόμορφο βάθος νερού στον κυκλικό αγωγό υπερχειλίσης του φρεατίου 18Α συναρτήσει της παροχής



Σχήμα 9. 2 Ομοιόμορφο βάθος νερού στον κυκλικό αγωγό υπερχειλίσης του φρεατίου 18Α συναρτήσει της παροχής

9.1.1 Άντληση στο φρεάτιο 18Α στην Πανόρμου τον Σεπτέμβριο του 2018 και εκτίμηση της εισερχόμενης σε αυτό παροχής

Τον Σεπτέμβριο του 2018 στο φρεάτιο 18Α στην διασταύρωση των οδών Πανόρμου και Ριανκούρ πραγματοποιήθηκε «δοκιμαστική» άντληση. Κατά την άντληση αυτή μετρήθηκαν διάφορες στάθμες ανά τακτά χρονικά διαστήματα κατά την διάρκεια της άντλησης και κατά την διάρκεια της επαναφοράς της στάθμης, μετά το τέλος της άντλησης, και μέχρι η στάθμη να φτάσει στο σημείου που ήταν πριν ξεκινήσει η άντληση.

Στα πρώτα 5 min της άντλησης η στάθμη έπεσε 2 m. Στα επόμενα 40 min η στάθμη κατέβηκε 4,5 m και έπειτα για 60 min είχαμε πτώση στάθμης 1 m. Την τελευταία 1 h παρατηρήθηκε αρκετά μικρή πτώση στάθμης περίπου 0,5 m .

Μετά το τέλος της άντλησης μετρήθηκε άνοδος της στάθμης 1,5 m στην μικρή διατομή του φρέατος (Εικόνα 9. 1) τα πρώτα 60 min επαναφοράς της στάθμης, 4,5 m άνοδος στην μεγάλη διατομή στα επόμενα 85 min και 2 m άνοδος την τελευταία 1 h επαναφοράς μέχρι η στάθμη του νερού να φτάσει περίπου στην στάθμη υπερχειλίσσης.

Χρησιμοποιώντας τις παραπάνω μετρήσεις στη συνέχεια γίνεται μία προσπάθεια να υπολογιστεί η παροχή που εισέρχεται στο φρεάτιο 18Α και κατά συνέπεια και η παροχή που το υδραγωγείο υδρομαστεύει από το σημείο της μερικής έμφραξης, που πιθανότατα είναι ανάμεσα στα φρεάτια 33 με 34 και θεωρούμε ότι επιτρέπει σε ελάχιστη ποσότητα νερού την οποία και αμελούμε να διέρχεται, μέχρι το φρεάτιο 18Α. Για το ισοζύγιο η βασική θεώρηση είναι ότι εάν αφαιρέσουμε από τον όγκο του νερού που θα εξέλθει από το σύστημα υδραγωγείο-φρεάτιο 18Α μέσω του καταθλιπτικού αγωγού τον όγκο του νερού που θα εισέλθει λόγω υδρομάστευσης κατά την φάση της άντλησης, ο όγκος που θα υπολογιστεί θα ισούται με τον όγκο του νερού που θα εισέλθει στο υδραγωγείο λόγω υδρομάστευσης κατά την φάση της επαναφοράς της στάθμης.

Πιο αναλυτικά:

$$\Delta V_{\text{ΑΝΤΛΗΣΗΣ}} = \Delta V_{\text{ΕΠΑΝΑΦΟΡΑΣ}} \quad (9.1)$$

Η φάση της άντλησης διήρκησε 2,75 h. Κατά την διάρκεια αυτής ο όγκος του νερού που θα εξέλθει από το σύστημα, εάν θεωρήσουμε ότι η αντλία αποδίδει πράγματι 375 m³/h, ισούται με την παροχή της αντλίας (375 m³/h) επί τον χρόνο που διήρκησε η άντληση (2,75 h) δηλαδή 1031,25 m³. Ο όγκος του νερού που αναπληρώνεται στο σύστημα υδραγωγείο-αντλιοστάσιο, κατά την διάρκεια της άντλησης, λόγω υδρομάστευσης ισούται με την παροχή της υδρομάστευσης ($Q_{\text{υδρ,αντλ}}$) επί τον χρόνο που διήρκησε η άντληση (2,75 h).

Άρα:

$$\Delta V_{\text{ΑΝΤΛΗΣΗΣ}} = Q_{\text{αντλ}} * 2,75h - Q_{\text{υδρ,αντλ}} * 2,75h, \quad \text{τα } Q \text{ σε } \left(\frac{m^3}{h}\right) \quad (9.2)$$

Η φάση της επαναφοράς της στάθμης, η οποία ξεκίνησε με το τέλος της άντλησης και τελείωσε όταν η στάθμη του νερού στο αντλιοστάσιο έφτασε στην υπερχειλίση, διήρκησε 3,42 h. Κατά την διάρκεια επαναφοράς της στάθμης στο σύστημα υδραγωγείο-αντλιοστάσιο δεν εξέρχεται νερό, ενώ εισέρχεται όγκος νερού ο οποίος ισούται με την παροχή υδρομάστευσης του υδραγωγείου κατά την διάρκεια της επαναφοράς ($Q_{\text{υδρ,επαν}}$) επί τον χρόνο που διήρκησε η επαναφορά (3,42 h).

Άρα:

$$\Delta V_{\text{ΕΠΑΝΑΦΟΡΑΣ}} = Q_{\text{υδρ,επαν}} * 3,42h \quad , \text{όπου } Q_{\text{υδρ,επαν}} \text{ σε } \left(\frac{m^3}{h}\right) \quad (9.3)$$

Κάνοντας την θεώρηση ότι το υδραγωγείο υδρομαστεύει το ίδιο κατά την διάρκεια της άντλησης και κατά την επαναφορά της στάθμης από την σχέση (9. 1) προκύπτει ότι:

$$Q_{\text{υδρ}} = 167 \frac{m^3}{h} \quad (9.4)$$

Αυτή είναι η παροχή που εισέρχεται στο φρεάτιο του αντλιοστασίου στην Πανόρμου και η οποία προέρχεται από υδρομάστευση.

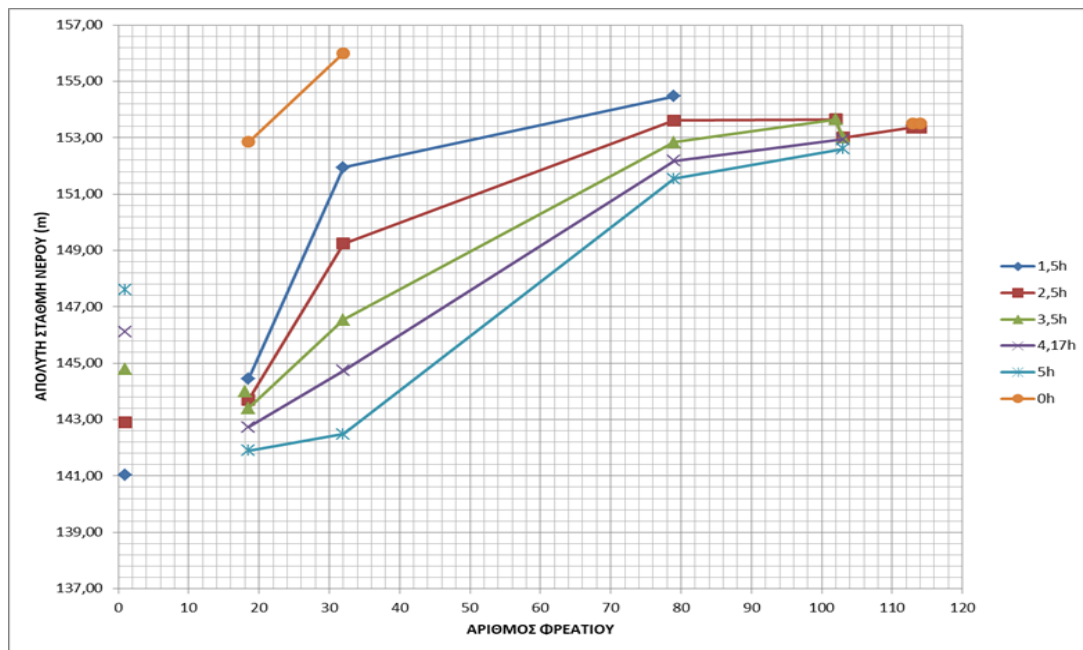
9.1.2 Άντληση στο φρεάτιο 18Α στην Πανόρμου τον Ιούνιο του 2019 και εκτίμηση της εισερχόμενης σε αυτό παροχής

Στις 10 και 11 Ιουνίου του 2019 στις στο φρεάτιο 18Α στην Πανόρμου πραγματοποιήθηκαν δύο αντλήσεις κατά τις οποίες το βάθος του νερού εντός του φρεατίου έφτασε στο κατώτατο όριο που ήταν δυνατό έτσι ώστε να μην δημιουργηθεί πρόβλημα στην αντλία (περίπου στον πυθμένα του αγωγού του Αδριάνειου) . Ταυτόχρονα με την μέτρηση της στάθμης του νερού εντός του φρεατίου 18Α, μετρήθηκαν και κάποιες στάθμες σε διάφορα άλλα φρεάτια του Αδριάνειου. Τα φρεάτια αυτά είναι το φρεάτιο 1 (δεξαμενή χλωρίωσης), το φρεάτιο 18 (υπερχειλίση αντλιοστασίου), το φρεάτιο 32 (αντλιοστάσιο Σωτηρία) και τα φρεάτια 78, 79, 84, 102, 103, 113, 114. Στα φρεάτια αυτά δεν μετρήθηκαν στάθμες σε όλη την διάρκεια της άντλησης απλά πάρθηκαν ενδεικτικά κάποιες μετρήσεις.

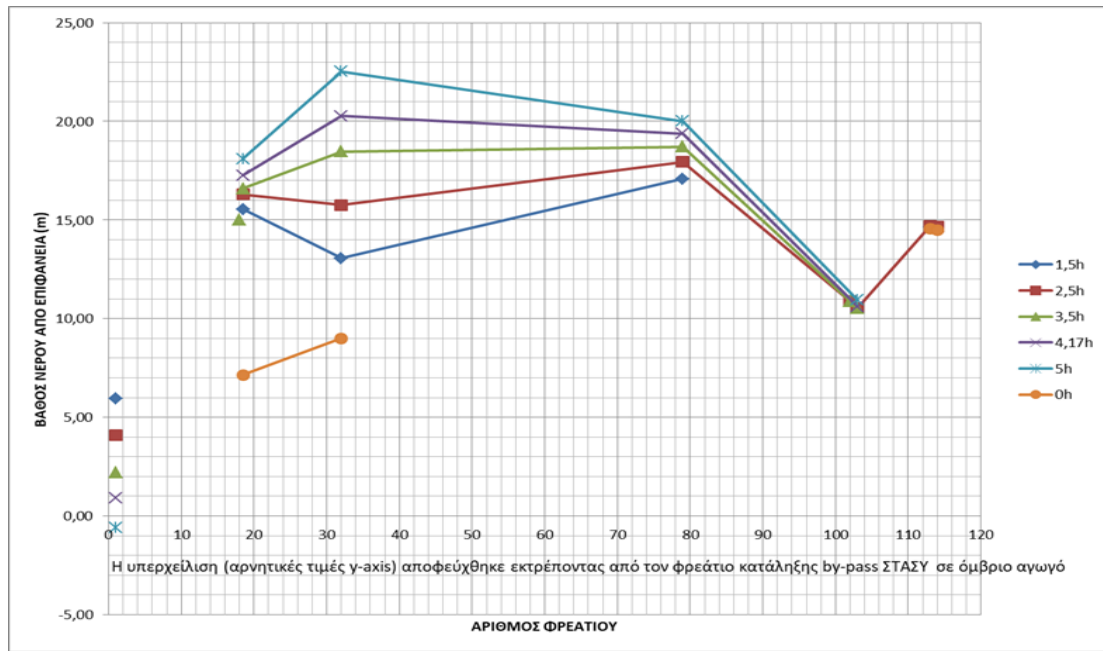
Παρατηρήθηκε ότι για να μπορέσει να ταπεινωθεί η στάθμη του νερού εντός του αντλιοστασίου χρειάστηκαν περίπου 5-5.5 h. Το νερό το οποίο αντλούταν από το φρεάτιο 18Α διοχετευόταν

μέσω του αγωγού κατάθλιψη στο φρεάτιο 18 και συνέχισε να ρέει προς την δεξαμενή χλωρίωσης. Όταν η στάθμη του νερού στην δεξαμενή χλωρίωσης ανέβηκε πολύ, πραγματοποιήθηκε άντληση από την δεξαμενή χλωρίωσης και διοχετεύτηκαν τα νερά στην αποχέτευση προκειμένου να αποφευχθεί η υπερχειλίση. Η δεξαμενή χλωρίωσης φαίνεται να είναι κοντά στην υπερχειλίση περίπου 4.5 h μετά την έναρξη της άντλησης.

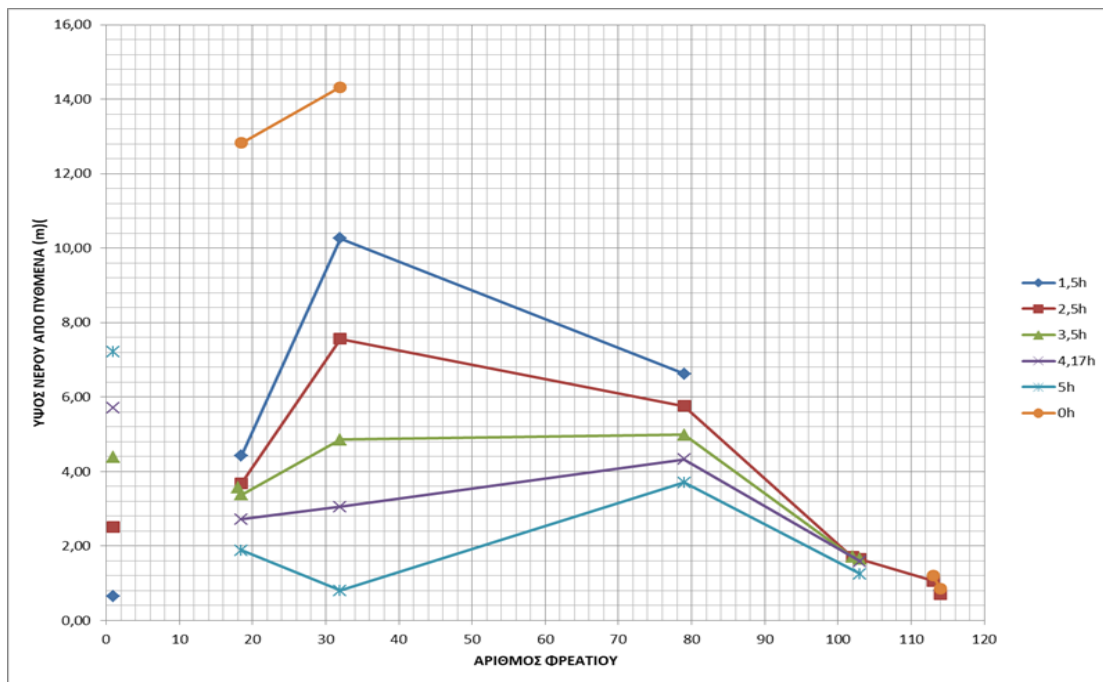
Για τις δύο αυτές μέρες ενώ πραγματοποιήθηκε καταγραφή αρκετών μετρήσεων κατά την διάρκεια της άντλησης στα φρεάτια, δεν πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις κατά την επαναφορά της στάθμης σε κανένα φρεάτιο με εξαίρεση δυο τιμές στο φρεάτιο 18Α, οι οποίες δεν μπορούν να οδηγήσουν σε κάποιο συμπέρασμα. Οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν παρουσιάζονται στα παρακάτω σχήματα (Σχήμα 9. 3, Σχήμα 9. 4, Σχήμα 9. 5).



Σχήμα 9. 3 Απόλυτη στάθμη νερού στα φρεάτια κατά την διάρκεια της άντλησης, Ιούνιος 2019



Σχήμα 9. 4 Απόσταση επιφάνειας νερού από το έδαφος σε κάθε φρεάτιο κατά την διάρκεια της άντλησης, Ιούνιος 2019



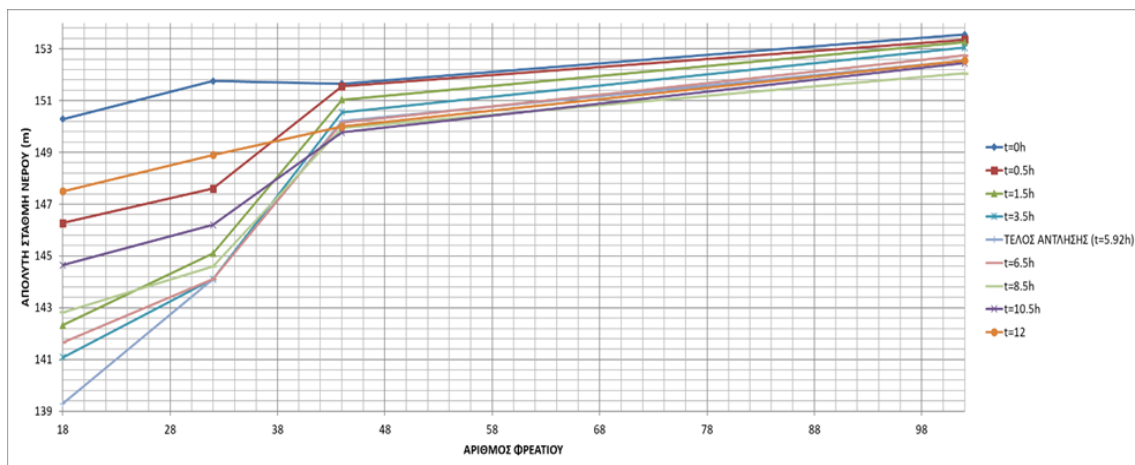
Σχήμα 9. 5 Βάθος νερού σε κάθε φρεάτιο κατά την διάρκεια της άντλησης, Ιούνιος 2019

9.1.3 Άντληση στο φρεάτιο 18Α στην Πανόρμου τον Σεπτέμβριο του 2019 και εκτίμηση της εισερχόμενης σε αυτό παροχής

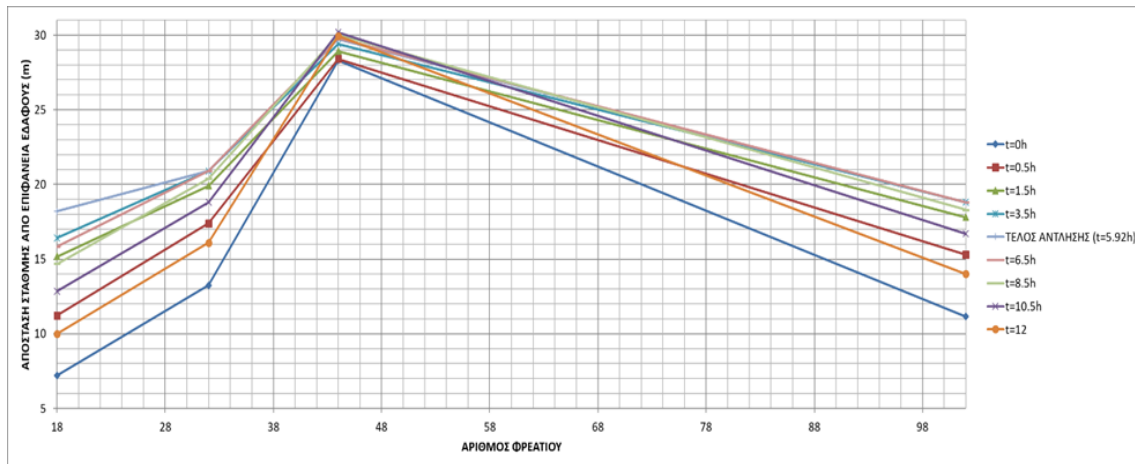
Στις 2 Σεπτεμβρίου του 2019 στις στο φρεάτιο 18Α στην Πανόρμου πραγματοποιήθηκε ακόμα μία άντληση κατά την οποία το βάθος του νερού εντός του φρεατίου έφτασε όπως και στην προηγούμενη άντληση στο κατώτατο όριο που ήταν δυνατό έτσι ώστε να μην δημιουργηθεί πρόβλημα στην αντλία (περίπου στον πυθμένα του αγωγού του Αδριάνειου) . Ταυτόχρονα με την μέτρηση της στάθμης του νερού εντός του φρεατίου 18Α μετρήθηκαν και στάθμες στα φρεάτια 32 (αντλιοστάσιο Σωτηρία), 44 (ΓΕΕΘΑ) και 102 (Ελ Αλαμίν).

Παρατηρήθηκε ότι για να μπορέσει να ταπεινωθεί η στάθμη του νερού εντός του αντλιοστασίου χρειάστηκαν περίπου 5,5-6 h. Περίπου στις 5-5,5 h μετά την έναρξη της άντλησης παρατηρήθηκε ότι το νερό έφτασε στον πυθμένα του Αδριάνειου Υδραγωγείου (όπως στην μέτρηση του Ιουνίου του 2019). Το νερό το οποίο αντλούταν από το φρεάτιο 18ΑΝ διοχετευόταν μέσω του αγωγού κατάθλιψης στο φρεάτιο 18 και συνέχιζε να ρέει προς την δεξαμενή χλωρίωσης. Όταν η στάθμη του νερού στην δεξαμενή χλωρίωσης ανέβηκε πολύ, πραγματοποιήθηκε άντληση από την δεξαμενή χλωρίωσης και διοχετεύτηκαν τα νερά στην αποχέτευση προκειμένου να αποφευχθεί η υπερχειλίση (περίπου 4,5 h από την έναρξη της άντλησης όπως μετρήθηκε κατά την προηγούμενη άντληση).

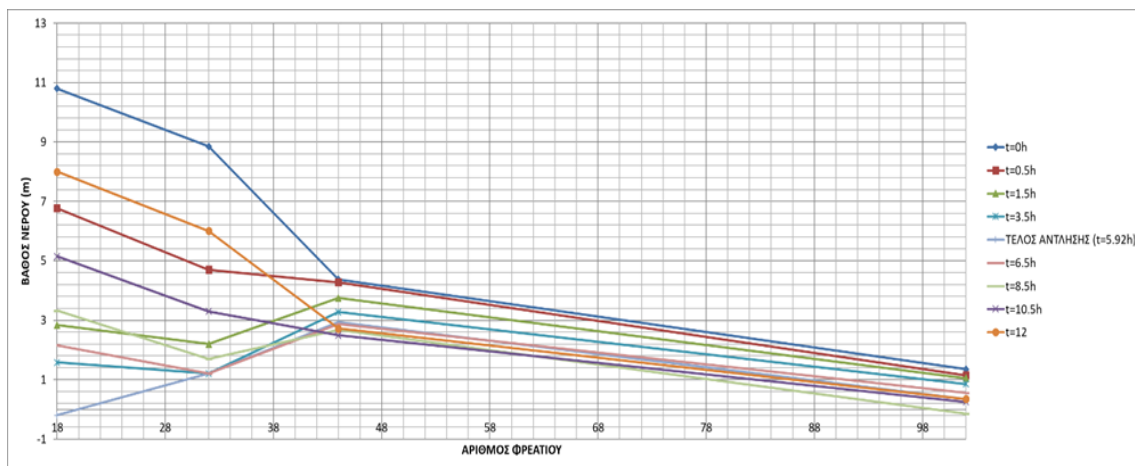
Μετά το τέλος της άντλησης πραγματοποιήθηκαν ανά 30 min μετρήσεις στα ίδια φρεάτια που πραγματοποιούνταν μετρήσεις και κατά την διάρκεια της άντλησης. Όλες οι μετρήσεις παρουσιάζονται παρακάτω (Σχήμα 9. 6, Σχήμα 9. 7, Σχήμα 9. 8).



Σχήμα 9. 6 Απόλυτη στάθμη νερού στα φρεάτια κατά την διάρκεια της άντλησης, Σεπτέμβριος 2019



Σχήμα 9. 7 Απόσταση επιφάνειας νερού από το έδαφος σε κάθε φρεάτιο κατά την διάρκεια της άντλησης, Σεπτέμβριος 2019



Σχήμα 9. 8 Βάθος νερού σε κάθε φρεάτιο κατά την διάρκεια της άντλησης, Σεπτέμβριος 2019

Στη συνέχεια πραγματοποιείται ένα συνολικό ισοζύγιο (ομοίως και γίνεται μία προσπάθεια να υπολογιστεί μία προσέγγιση της τιμής της παροχής που το Αδριάνειο Υδραγωγείο θα υδρομαστεύσει. Με δεδομένο ότι υπάρχει έμφραξη σε κάποιο σημείο ανάμεσα στα φρεάτια 33 με 43 και ότι η παροχή που διέρχεται από την έμφραξη είναι πολύ μικρή και αμελείται, η παροχή υδρομάστευσης που θα υπολογιστεί θα προκύπτει από το κατάντη της έμφραξης τμήμα του υδραγωγείου. Για το ισοζύγιο η βασική θεώρηση είναι ότι εάν αφαιρέσουμε από τον όγκο του νερού που θα εξέλθει από το σύστημα υδραγωγείο-φρεάτιο 18^A μέσω του καταθλιπτικού αγωγού τον όγκο του νερού που θα εισέλθει λόγω υδρομάστευσης κατά την φάση της άντλησης, ο όγκος που θα υπολογιστεί θα ισούται με τον όγκο του νερού που θα εισέλθει στο υδραγωγείο λόγω υδρομάστευσης κατά την φάση της επαναφοράς της στάθμης.

Πιο αναλυτικά:

$$\Delta V_{\text{ΑΝΤΛΗΣΗΣ}} = \Delta V_{\text{ΕΠΑΝΑΦΟΡΑΣ}} \quad (9.5)$$

Η φάση της άντλησης διήρκησε 5,92 h. Κατά την διάρκεια αυτής ο όγκος του νερού που θα εξέλθει από το σύστημα, εάν θεωρήσουμε ότι η αντλία αποδίδει πράγματι 375 m³/h, ισούται με την παροχή της αντλίας (375 m³/h) επί τον χρόνο που διήρκησε η άντληση (5,92 h) δηλαδή 2220 m³. Ο όγκος του νερού που αναπληρώνεται στο σύστημα υδραγωγείο-αντλιοστάσιο, κατά την διάρκεια της άντλησης, λόγω υδρομάστευσης ισούται με την παροχή της υδρομάστευσης ($Q_{\text{υδρ,αντλ}}$) επί τον χρόνο που διήρκησε η άντληση (5,92 h).

Άρα:

$$\Delta V_{\text{ΑΝΤΛΗΣΗΣ}} = Q_{\text{αντλ}} * 5,92h - Q_{\text{υδρ,αντλ}} * 5,92h, \quad \text{τα } Q \text{ σε } \left(\frac{m^3}{h}\right) \quad (9.6)$$

Η φάση της επαναφοράς της στάθμης, η οποία ξεκίνησε με το τέλος της άντλησης και τελείωσε όταν η στάθμη του νερού στο αντλιοστάσιο έφτασε στην υπερχειλίση, υπολογίζεται με βάση τον ρυθμό που γινόταν η αναπλήρωση στο φρεάτιο του αντλιοστασίου. Κατά την διάρκεια επαναφοράς της στάθμης στο σύστημα υδραγωγείο-αντλιοστάσιο δεν εξέρχεται νερό, ενώ εισέρχεται όγκος νερού ο οποίος ισούται με την παροχή υδρομάστευσης του υδραγωγείου κατά την διάρκεια της επαναφοράς ($Q_{\text{υδρ,επαν}}$) επί τον χρόνο που διήρκησε η επαναφορά.

Επειδή δεν είναι γνωστή η ακριβής ώρα κατά την οποία η στάθμη του νερού στο αντλιοστάσιο έφτασε στην υπερχειλίση γίνεται μία εκτίμηση της ώρας αυτής με βάση τον ρυθμό με τον οποίο αναπληρώνονταν το νερό στο αντλιοστάσιο. Με αυτόν τον τρόπο εκτιμάτε ότι η στάθμη έφτασε στην υπερχειλίση 8,08 h μετά το κλείσιμο της αντλίας.

Άρα:

$$\Delta V_{\text{ΕΠΑΝΑΦΟΡΑΣ}} = Q_{\text{υδρ,επαν}} * 8,08h \quad , \text{ όπου } \quad Q_{\text{υδρ,επαν}} \text{ σε } \left(\frac{m^3}{h}\right) \quad (9.7)$$

Κάνοντας την θεώρηση ότι το υδραγωγείο υδρομαστεύει το ίδιο κατά την διάρκεια της άντλησης και κατά την επαναφορά της στάθμης από την σχέση (9. 1) προκύπτει ότι:

$$Q_{\text{υδρ}} = 159 \frac{m^3}{h} \quad (9.8)$$

Από το διάγραμμα του παροχόμετρου στο Κολωνάκι (Σχήμα 9. 9) προκύπτει ένα μηδενισμός στην παροχή 11,5 h μετά το κλείσιμο της αντλίας. Αν υποτεθεί ότι η ένδειξη στο παροχόμετρο σε αυτές τις μικρές τιμές παροχής είναι σωστή, η στάθμη του νερού στο αντλιοστάσιο φτάνει στην υπερχειλίση 11,5 h μετά το κλείσιμο της αντλίας και υπολογίζεται μία ελάχιστη τιμή της παροχής στο φρεάτιο 18Α.

Άρα:

$$\Delta V_{\text{ΕΠΑΝΑΦΟΡΑΣ}} = Q_{\text{υδρ,επαν}} * 11,5h \quad , \text{όπου} \quad Q_{\text{υδρ,επαν}} \text{ σε } \left(\frac{m^3}{h} \right) \quad (9. 9)$$

Κάνοντας την θεώρηση ότι το υδραγωγείο υδρομαστεύει το ίδιο κατά την διάρκεια της άντλησης και κατά την επαναφορά της στάθμης από την σχέση (9. 5) προκύπτει ότι:

$$Q_{\text{υδρ}} = 128 \frac{m^3}{h} \quad (9. 10)$$

Η παραπάνω αποτελεί μία ακραία εκτίμηση για την παροχή στο φρεάτιο 18Α. Αυτό καθώς βάσει του διαγράμματος της παροχής που παρουσιάζεται παρακάτω παρατηρείται να μεσολαβεί ένα χρονικό διάστημα αρκετών ωρών από την στιγμή που μεταβάλουμε την παροχή που στέλνουμε από το φρεάτιο 18Α προς το Κολωνάκι μέχρι την στιγμή που αποτυπώνεται αυτή η μεταβολή στο παροχή που μετράται στο Κολωνάκι.

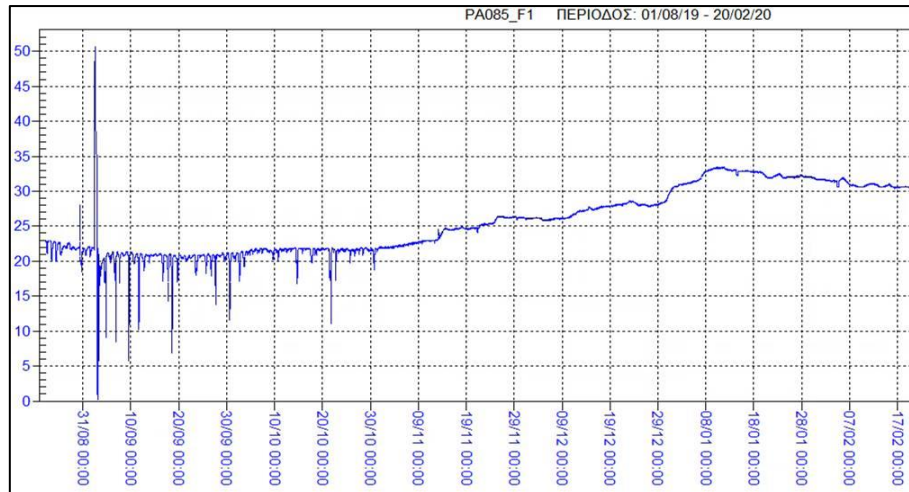
9.2 Η παροχή του Υδραγωγείου στο Κολωνάκι

Για τις ανάγκες εκτίμησης της παροχής κατά μήκος του Υδραγωγείου στα διάφορα σημεία ενδιαφέροντος τοποθετήθηκε το καλοκαίρι του 2019 από την ΕΥΔΑΠ Α.Ε. ένα παροχόμετρο στον αγωγό ονομαστικής διαμέτρου 160 mm ο οποίος διοχετεύει το νερό του Αδριάνειου Υδραγωγείου στο δίκτυο των όμβριων στο Κολωνάκι.

9.2.1 Η παροχή του Υδραγωγείου στην εκροή του στο Κολωνάκι από τον Ιούλιο του 2019 έως τον Φεβρουάριο του 2020

Στο Σχήμα 9. 9 παρουσιάζεται η παροχή του Υδραγωγείου στην έξοδο του στο φρεάτιο της οδού Γλύκωνος στο Κολωνάκι. Στο συγκεκριμένο σχήμα παρατηρείται μια αύξηση της παροχής από το καλοκαίρι μέχρι και τον Ιανουάριο ενώ στη συνέχεια η παροχή μειώνεται και πάλι. Αυτή η εποχικότητα στην μέτρηση της παροχής είναι λογική καθώς η παροχή του

τιμήματος αυτού του Αδριάνειου Υδραγωγείου εξαρτάται από το ύψος του υδροφόρου ορίζοντα. Η μέση τιμή της παροχής εκτιμάται στα 25 L/s.

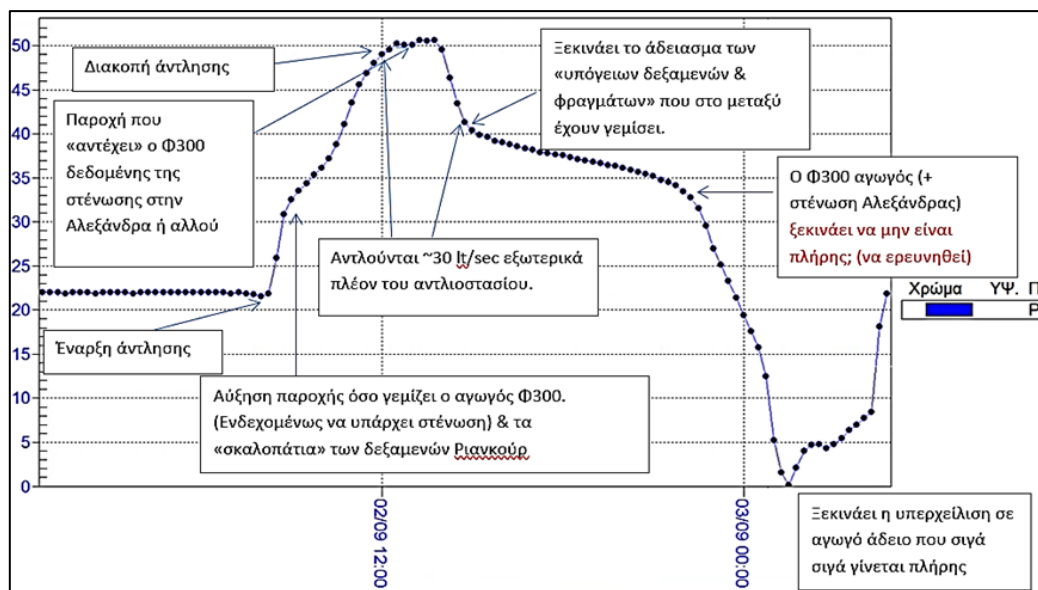


Σχήμα 9. 9 Μέτρηση παροχής στην έξοδο του Αδριάνειου Υδραγωγείου από 07/2019 έως 02/2020 σε L/s (Γ. Σαχίνης, 2020)

9.2.2 Η παροχή του Υδραγωγείου στην εκροή του στο Κολωνάκι κατά την διάρκεια της άντλησης τον Σεπτέμβριο του 2019

Στο Σχήμα 9. 10 παρουσιάζεται η διακύμανση της παροχής στο Κολωνάκι κατά την διάρκεια της άντλησης του Σεπτεμβρίου του 2019. Πριν την άντληση η παροχή που μετράται είναι ίση με 22 L/s, δηλαδή 79,2 m³/h. Μετά την άντληση η παροχή φαίνεται να σταθεροποιήθηκε λίγο χαμηλότερα περίπου στα 75 m³/h.

Κατά την διάρκεια της άντλησης, όταν δηλαδή έχει σταματήσει να λειτουργεί η υπερχειλίση στο φρεάτιο 18Α, διοχετεύεται στο φρεάτιο 18 και συνεχίζει προς το Κολωνάκι μία παροχή της τάξης των 375 m³/h μέσω του καταθλιπτικού αγωγού της αντλίας. Την ίδια ώρα στο Κολωνάκι παρατηρείται μια αύξηση της παροχής που μετράτε από το παροχόμετρο. Μετά από ένα διάστημα κάποιων ωρών και ενώ συνεχίζουν να στέλνονται προς το Κολωνάκι τα 375 m³/h παρατηρείται μία σταθεροποίηση της παροχής που μετράται από το παροχόμετρο στα 50 L/s, δηλαδή 180 m³/h.



Σχήμα 9. 10 Παροχή στο Κολωνάκι κατά την διάρκεια της άντλησης και της επαναφοράς της στάθμης τον Σεπτέμβριο του 2019 (Γ. Σαχίνης, 2019)

9.3 Συμπεράσματα για την παροχή του Αδριάνειου Υδραγωγείου στο φρεάτιο 18Α και στο Κολωνάκι και για την συμπεριφορά της άντλησης στο φρεάτιο 18Α

Η παροχή στο φρεάτιο 18Α στην Πανόρμου εκτιμάται από περίπου 130 m³/h έως 170 m³/h.

Η παροχή στο Κολωνάκι μετριέται με το παροχόμετρο περίπου στα 75 m³/h.

Είναι φανερό ότι από το φρεάτιο 18Α μέχρι την έξοδο του Αδριάνειου στο Κολωνάκι χάνεται σχεδόν η μισή παροχή του Υδραγωγείου. Μία πιθανή ερμηνεία είναι να χάνεται μέσω αγωγού Φ300 που αποσπάται του Φ600 της ULEN στην διασταύρωση Αλεξάνδρας και Κυριακού και με τον οποίο αρδευόταν το Πεδίο του Άρεως την δεκαετία του '70. Για τον εντοπισμό αυτού απαιτούνται περαιτέρω εργασίες διερεύνησης από την ΕΥΔΑΠ.

Με επιφυλάξεις για την αξιοπιστία των μετρήσεων στα φρεάτια της Ελ Αλαμίν στο Χαλάνδρι (φρεάτια 102 και 103) είναι φανερό ότι υπάρχει τουλάχιστον μια έμφραξη στο τμήμα από το φρεάτιο 32 (αντλιοστάσιο Σωτηρία) μέχρι το φρεάτιο 102 (Ελ Αλαμίν). Η μέτρηση της στάθμης του νερού στο φρεάτιο 44 (ΓΕΕΘΑ) έδειξε την στάθμη σε αυτό το φρεάτιο να πέφτει με μικρό ρυθμό χωρίς να μπορούμε να πούμε με σιγουριά αν υπάρχει έμφραξη στο τμήμα του Υδραγωγείου από το φρεάτιο 32 μέχρι το 44 αλλά με μία τέτοια έμφραξη να είναι αρκετά πιθανή.

Για να φτάσει η στάθμη του νερού στον πυθμένα του Αδριάνειου Υδραγωγείου στο φρεάτιο 18Α θα πρέπει να αντλείται νερό από το φρεάτιο αυτό για 5,5 h .

Η δεξαμενή χλωρίωσης φαίνεται να φτάνει να υπερχειλίσει περίπου στις 4,5 h (συντηρητικά 4 h) από την έναρξη της άντλησης στο φρεάτιο 18Α .

10 Σύνοψη αποτελεσμάτων- Συμπεράσματα- Μελλοντική έρευνα

Στην παρούσα εργασία διερευνάται το ζήτημα της ροής υπογείων νερών προς υδρομαστευτικές σήραγγες, εξετάζοντας τις ποσότητες που εισρέουν σε σχέση με τα τεχνικά χαρακτηριστικά της σήραγγας και τα φυσιογραφικά χαρακτηριστικά του υδροφορέα.

Για τον σκοπό αυτό γίνεται χρήση αναλυτικών σχέσεων καθώς και του λογισμικού SEEP/W, για διάφορα σχήματα και βαθμούς πλήρωσης της διατομής της σήραγγας με νερό.

Η διερεύνηση που πραγματοποιείται έχει τις βάσεις της σε δημοσιευμένη έρευνα που εξετάζει την εισροή υπογείων υδάτων σε κυκλική σήραγγα (Butscher, 2012). Στην έρευνα αυτή εξετάστηκε η επίδραση της επένδυσης σε κυκλική και χωρίς νερό σήραγγα, το πώς αυτή μπορεί να ληφθεί υπόψη στην κατάρτιση του αριθμητικού μοντέλου και το πόσο επηρεάζει την εισροή που υπολογίζεται. Σε αντίθεση με την παραπάνω έρευνα στην παρούσα διπλωματική εξετάστηκε η υδρομάστευση για διάφορα σχήματα διατομών τα οποία επιλέχθηκαν ώστε να είναι αντιπροσωπευτικά της σήραγγας του Αδριάνειου Υδραγωγείου. Επίσης εξετάζεται η επίδραση του ύψους του νερού εντός της σήραγγας στην συνολική παροχή εισροής σε αυτή.

Αρχικά, από τις αναλύσεις για διάφορα σχήματα και για μεγέθη σήραγγας της τάξης της σήραγγας του Αδριάνειου Υδραγωγείου βγήκαν τα παρακάτω συμπεράσματα. Σε κυκλική σήραγγα εισέρχεται μεγαλύτερη παροχή κατά 1-3% σε σχέση με τετραγωνική σήραγγα ίσου εμβαδού διατομής. Επίσης, σε σήραγγα τετραγωνικής διατομής με τριγωνική οροφή εισέρχεται μεγαλύτερη παροχή κατά 4-6% σε σχέση με τετραγωνική σήραγγα χωρίς οροφή.

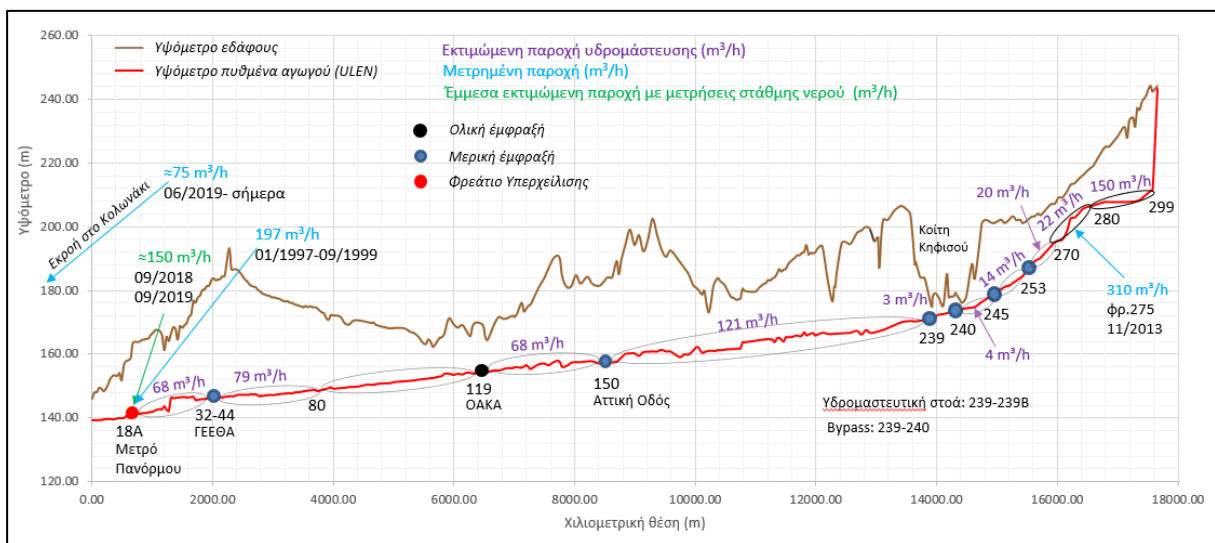
Σχετικά με την επίδραση του ποσοστού πλήρωσης της διατομής με νερό στην εισερχόμενη παροχή προκύπτει ότι για μικρά βάθη της σήραγγας η επίδραση αυτή είναι αρκετά μεγάλη σε αντίθεση με μεγάλα βάθη σήραγγας όπου δεν παίζει κάποιο ρόλο στην υπολογιζόμενη παροχή εάν η διατομή θα είναι πληρωμένη μέχρι κάποιο ποσοστό με νερό.

Σε ότι αφορά τις αναλυτικές σχέσεις οι οποίες χρησιμοποιούνται στην παρούσα διπλωματική, συμπεραίνουμε ότι τα αποτελέσματά τους διαφέρουν μεταξύ τους μόνο όταν η σήραγγα είναι ψηλά μέσα στον υδροφόρο. Επίσης τα αποτελέσματα των αναλυτικών σχέσεων εάν συγκριθούν με τα αποτελέσματα του αριθμητικού μοντέλου για κυκλική σήραγγα χωρίς επένδυση διαφέρουν περίπου μέχρι 3%, με εξαίρεση την αναλυτική σχέση κατά Karlsrud & Kveldsvik (2002) η οποία για μικρά βάθη σήραγγας δίνει πολύ μεγαλύτερες παροχές από το αριθμητικό μοντέλο.

Ως μελέτη περίπτωσης εξετάζεται η περίπτωση του Αδριάνειου Υδραγωγείου της Αθήνας. Αφού παρουσιάστηκε η υφιστάμενη κατάσταση του, στη συνέχεια πραγματοποιήθηκε περιγραφή της γεωλογίας και της υδρογεωλογίας της περιοχής στην οποία εκτείνεται. Έπειτα παρουσιάστηκε η μεθοδολογία για την εκτίμηση της παροχής που εισρέει σε ένα οποιοδήποτε τμήμα του. Για την εκτίμηση αυτή είναι απαραίτητη η γνώση της υδροπερατότητας των σχηματισμών τους οποίους διασχίζει καθώς και της στάθμης του υδροφόρου κατά μήκος της σήραγγας. Για την στάθμη του υδροφόρου πραγματοποιείται μία εκτίμηση αυτής με βάση μετρήσεις στάθμης σε ορισμένες γεωτρήσεις πλησίον της σήραγγας, ενώ οι τιμές της υδροπερατότητας προέκυψαν ως επί το πλείστον από βιβλιογραφία. Με την χρήση των παραπάνω δεδομένων εκτιμήθηκε η υδρομάστευση στα διάφορα τμήματα του Αδριάνειου Υδραγωγείου με τα αποτελέσματα να παρουσιάζονται στο Σχήμα 10. 1, μαζί με άλλες

μετρήσεις και εκτιμήσεις για την παροχή του υδραγωγείου στα διάφορα σημεία του. Παρόλα αυτά με καλύτερη γνώση της υδροπερατότητας και της στάθμης του υδροφόρου κατά μήκος της σήραγγας τα αποτελέσματα, τα οποία είναι μεν εύλογα, θα ήταν πιο ακριβή.

Τέλος, στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται μετρήσεις πεδίου που πραγματοποιήθηκαν στο Αδριάνειο Υδραγωγείο με σκοπό την διερεύνηση της λειτουργίας του και την εκτίμηση της παροχής σε ορισμένα τμήματά του. Από τις μετρήσεις αυτές εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με την παροχή του Αδριάνειου Υδραγωγείου στο φρεάτιο 18Α η οποία εκτιμάται κατά μέσο όρο ότι είναι ίση με 150 m³/h. Επίσης μέσα από τις μετρήσεις αυτές γίνεται εμφανές ότι εντοπίζεται μία έμφραξη στην υπόγεια σήραγγα στο ύψος του ΓΕΕΘΑ, ενώ επιβεβαιώνεται ότι χάνεται η μισή παροχή του Αδριάνειου Υδραγωγείου μετά το φρεάτιο 18Α και μέχρι να φτάσει στο Κολωνάκι.



Σχήμα 10. 1 Μηκτομή του Αδριάνειου Υδραγωγείου με τα σημεία των εμφράξεων, τις γνωστές και τις εκτιμώμενες παροχές

Για να μπορέσει να πραγματοποιηθεί καλύτερη εκτίμηση της παροχής η οποία εισρέει σε μία σήραγγα είναι αναγκαία μία εκτεταμένη γεωλογική- υδρογεωλογική μελέτη της περιοχής στην οποία βρίσκεται η σήραγγα. Στην περίπτωση του Αδριάνειου Υδραγωγείου τα στοιχεία για τους υδροφορείς τους οποίους διασχίζει η σήραγγα ήταν περιορισμένα με αποτέλεσμα να μην μπορεί να πραγματοποιηθεί μία πιο αναλυτική εκτίμηση της εισροής στα διάφορα τμήματά του. Βέβαια στην παρούσα φάση δεν ήταν αναγκαία μία ακριβέστερη εκτίμηση της παροχής εισροής καθώς το Αδριάνειο Υδραγωγείο δεν θα αποτελέσει έναν υδάτινο πόρο στον οποίο η πόλη της Αθήνας θα βασίζεται για την κάλυψη των αναγκών της. Η χρήση του νερού του υδραγωγείου θα γίνεται σε περιορισμένα σημεία και για συγκεκριμένες χρήσεις που ως επί το πλείστον θα αναδεικνύουν την ιστορική και αρχαιολογική του αξία.

Σε μελλοντικό στάδιο θα ήταν χρήσιμη μία εκτεταμένη τοπογραφική αποτύπωση της υπόγειας σήραγγας με σκοπό την δημιουργία ένας ολοκληρωμένου ψηφιακού μοντέλου του Αδριάνειου Υδραγωγείου. Η κατάρτιση ενός τέτοιου μοντέλου θα χρησίμευε στην αποδοτικότερη

διαχείριση του Αδριάνειου Υδραγωγείου τόσο ως υδατικού πόρου όσο και ως αρχαιολογικού μνημείου.

11 Βιβλιογραφία

- Avgerinou, E. C. , S. C. P. D. T. E. , M. G. G. K. Y. K. , P. K. N. M. M. P. G. P. a. A. S., 2016. Updated Appraisal of Ancient Underground Aqueducts in Greece. Στο: E. C. , S. E. , a. H. W. A. N. Angelakis, επιμ. *Underground Aqueducts Handbook*. s.l.:s.n.
- Beaumont, P., 1971. Qanat Systems in Iran. *Bull Int Assoc Sci Hydrol*, Τόμος 16.
- Boustani, F., 2008. Sustainable Water Utilization in Arid Region of Iran by Qanats. *Proc World Acad Sci Eng Technol*, Τόμος 33.
- Butscher, C., 2012. Steady-state groundwater inflow into a circular tunnel. *Tunnelling and Underground Space Technology*, Τόμος 32, pp. 158-167.
- Childs, E. C. & Collis-George, N., 1950. The permeability of porous materials. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, Τόμος 201, pp. 392-405.
- Chiotis, E. D., 2018. The Hadrianic aqueduct of Athens and the underlying tradition of hydraulic engineering. Στο: *Great Waterworks in Roman Greece*. Oxford: Archaeopress Publishing Ltd.
- Clarkson, P. B. & Dorn, R. I., 1995. New chronometric dates for the puquios of Nasca, Peru. *Latin American Antiquity*, p. 56–69.
- El Tani, M., 1999. *Water Inflow into Tunnels*. s.l., s.n.
- El Tani, M., 2003. Circular tunnel in a semi-infinite aquifer. *Tunnelling and underground space technology*, Τόμος 18, pp. 49-55.
- Farhadian, H., Aalianvari, A. & Katibeh, H., 2012. Optimization of analytical equations of groundwater seepage into tunnels: A case study of Amirkabir tunnel. *Journal of the Geological Society of India*, 01 7, Τόμος 80, pp. 96-100.
- Farhadian, H. & Katibeh, H., 2017. New empirical model to evaluate groundwater flow into circular tunnel using multiple regression analysis. *International Journal of Mining Science and Technology*, Τόμος 27, pp. 415-421.
- GeoStudio, M., 2007. *Seepage modeling with SEEP/W*. s.l.:Geo-Slope International Ltd., Alberta.
- Goodman, R. E., Moye, D. G., Van Schalkwyk, A. & Javandel, I., 1964. *Ground water inflows during tunnel driving*. s.l.:College of Engineering, University of California.
- Johnson, D. W., 1997. *The relationship between the lines of Nasca and water resources*. s.l., s.n.
- Kahlow, M. A. & Hamilton, J. R., 1994. STATUS AND PROSPECTS OF KAREZ IRRIGATION 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, Τόμος 30, pp. 125-134.
- Kallioras, A., 2019. [Συνέντευξη] (13 12 2019).
- Karlsrud, K. & Kveldsvik, V., 2002. *Control of water leakage when tunnelling under urban areas in the Oslo region*. s.l., s.n.

- Koutsoyiannis, D. & Mamassis, N., 2018. The water supply of Athens through the centuries. *Schriften der Deutschen Wasserhistorischen Gesellschaft; Wellbrock, K., Ed.; DWHG: Siegburg, Germany.*
- Lasaponara, R. & Masini, N., 2012. Following the ancient Nasca puquios from space. Στο: *Satellite Remote Sensing*. s.l.:Springer, p. 269–289.
- Lei, S., 1999. An analytical solution for steady flow into a Ttonnel. *Groundwater*, Τόμος 37, pp. 23-26.
- Lightfoot, D., 1997. Qanats in the Levant: Hydraulic Technology at the Periphery of Early Empires. *Technology and Culture*, 4, Τόμος 38, p. 432.
- Mamassis, K., 2017. *ook presentation: Evolution of Water Supply Through the Millennia, Temporal evolution of water management technologies for antiquity to present*. Patras, s.n.
- Mamassis, N., 2020. [Συνέντευξη] (20 June 2020).
- Merriam-Webster, χ.χ. *Merriam-Webster.com dictionary*. [Ηλεκτρονικό] Available at: <https://www.merriam-webster.com/dictionary/qana> [Πρόσβαση 26 Ιούνιος 2020].
- Miller FP, V. A. M. J., 2009. *Aqueduct: Qanat, Roman aqueduct, drought, earthquake engineering, goldfields water supply scheme, irrigation, leat, list of Roman bridges, pipeline transport of ancient Rome Roman engineering*. , s.l.: Beau-Bassin Rose-Hill: Alphascript Publishing.
- Motiee, H. και συν., 2006. Assessment of the Contributions of Traditional Qanats in Sustainable Water Resources Management. *International Journal of Water Resources Development*, Τόμος 22, pp. 575-588.
- NAMA ΣΥΜΒΟΥΛΟΙ ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ & ΜΕΛΕΤΗΤΕΣ ΑΕ - ΓΑΜΜΑ4 ΕΠΕ κ.α., 2013. *ΣΧΕΔΙΟ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΤΩΝ ΛΕΚΑΝΩΝ ΑΠΟΡΡΟΗΣ ΠΟΤΑΜΩΝ ΤΟΥ ΥΔΑΤΙΚΟΥ ΔΙΑΜΕΡΙΣΜΑΤΟΣ ΑΤΤΙΚΗΣ (GR06)*, ΑΘΗΝΑ: s.n.
- Nasiri, F. & Mafakheri, M. S., 2015. Qanat water supply systems: a revisit of sustainability perspectives. *Environmental Systems Research*, 8, Τόμος 4, p. 13.
- Nikvar Hassani, A., Farhadian, H. & Katibeh, H., 2017. A comparative study on evaluation of steady-state groundwater inflow into a circular shallow tunnel. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 12.Τόμος 73.
- Nikvar Hassani, A., Katibeh, H. & Farhadian, H., 2015. Numerical analysis of steady-state groundwater inflow into Tabriz line 2 metro tunnel, northwestern Iran, with special consideration of model dimensions. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 10.Τόμος 75.
- Papanicolaou, M. K. D., 2004. *Παλαιογεωγραφική Εξέλιξη του Λεκανοπεδίου Αθηνών από το Άνω Μειόκαινο έως Σήμερα*. Θεσσαλονίκη, s.n.
- Petrascheck, W. E., Petracheck, W. E. & Marinos, G., 1956. *Geologic Map of Laurium Metalliferous Area*. s.l.:Institute of Geology and Subsurface Research.
- Polubarinova, P. Y. A., 1962. Theory of ground water movement. *Princeton Ed*, Τόμος 613.
- Proulx, D. A., 2008. Nasca Puquios and Aqueducts.

- Rad, M. A., Ziaei, A. N. & Naghedifar, M. R., 2018. Three-dimensional numerical modeling of submerged zone of Qanat hydraulics in unsteady conditions. *Journal of Hydrologic Engineering*, Τόμος 23.
- Richards, L. A., 1931. Soil-water conduction of liquids in porous mediums. *Physics*, Τόμος 1, pp. 318-333.
- Saeidian, A., 2013. Ab-Anbar, sustainable traditional water supply system in hot arid regions, remarkable example of Iranian vernacular architecture. *Elixir Int JA*, Τόμος 56, pp. 3584-13590.
- Salih, A., 2006. Qanats a unique groundwater management tool in arid regions: the case of Bam region in Iran. *International Symposium on Groundwater Sustainability*.
- Samani, N., Kompani-Zare, M., Seyyedean, H. & Barry, D. A., 2006. Flow to horizontal drains in isotropic unconfined aquifers. *Journal of Hydrology*, Τόμος 324, pp. 178-194.
- Schreiber, K. J. & Rojas, J. L., 2003. *Irrigation and society in the Peruvian Desert: the Puquios of Nasca*. s.l.:Lexington Books.
- Smith, A., 1953. *Blind white fish in Persia*. s.l.:Dutton.
- Soni, A. & Manwatkar, B., 2015. Seepage Modeling for a Large Open Pit Coal Mine in India. *Geotechnical and Geological Engineering*, 8.Τόμος 33.
- Taghavi-Jeloudar, M., Han, M., Davoudi, M. & Kim, M., 2013. Review of ancient wisdom of Qanat, and suggestions for future water management. *Environmental Engineering Research*, Τόμος 18, pp. 57-63.
- Voudouris, K., Christodoulakos, Y., Steiakakis, E. & Angelakis, A., 2013. Hydrogeological Characteristics of Hellenic Aqueducts-Like Qanats. *Water*, 9, Τόμος 5, pp. 1326-1345.
- Vrellis, G., 2010. *Evaluation of a pumping*, s.l.: s.n.
- Wilson, A. I., 2008. Hydraulic engineering and water supply. Στο: *The Oxford handbook of engineering and technology in the classical world*. s.l.:s.n.
- Wulff, H. E., 1968. The qanats of Iran. *Scientific American*, Τόμος 218, pp. 94-107.
- Zhang, L. & Franklin, J. A., 1993. Prediction of water flow into rock tunnels: an analytical solution assuming an hydraulic conductivity gradient. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, Τόμος 30, pp. 37-46.
- Γ. Σαχίνης, Λ. Τ., 2020. *MASTER PLAN ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΟΥ ΥΔΑΤΟΣ ΤΟΥ ΑΔΡΙΑΝΕΙΟΥ ΥΔΡΑΓΩΓΕΙΟΥ*, Αθήνα: s.n.
- Δευτεραίος, Ν. Μ., 2019. *Τελική έκθεση: μελέτη και εργασίες διερεύνησης και καταγραφής του Αδριάνειου Υδραγωγείου της Αθήνας, Εργασίες διερεύνησης του Αδριάνειου υδραγωγείου της Αθήνας και καταγραφή της υφιστάμενης κατάστασης σε συγκεκριμένα υπόγεια τμήματά του*, Αθήνα: ΕΜΠ.
- Κλειδοπούλου, Μ., 2003. *Ροή υπόγειων νερών προς υδρομαστευτικά έργα: παράδειγμα: υδρομαστευτική στοά περιοχής Αλμυρού Ηρακλείου Κρήτης*, Χανιά Κρήτης: s.n.

Μαρίνος, Γ., Κατσικάτσος, Γ., Γεωργιάδου-Δικαιούλια, Ε. & Μίρκου, Ρ., 1971. Το σύστημα των Σχιστολίθων Αθηνών. Ι. Στρωματογραφία και τεκτονική. *Ann. Geol. Pays Hell*, Τόμος 23, pp. 183-26.

Παπανικολάου Δ., 2002. *Γεωλογική –Γεωτεχνική Μελέτη Λεκανοπεδίου Αθηνών*, Αθήνα: s.n.

Ρόζος, Δ., 2017. *Τεχνικογεωλογικά στοιχεία και γεωτεχνική συμπεριφορά των σχηματισμών, Εγχειρίδιο Τεχνικής Γεωλογίας Ι*, Αθήνα: ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ.

Σιέμος Ν., Μ. Ι., 2006. *Ολοκληρωμένη Τεχνικογεωλογική, Υδρογεωλογική, Γεωχημική και Γεωφυσική Έρευνα και Μελέτη Αστικής και Περιαστικής Πιλοτικής Περιοχής Θρακομακεδόνων Ν. Αττικής, Γ' Κοινοτικό Πλαίσιο Στήριξης, 2000-2006*, s.l.: s.n.

Στεφάνου, Π. Ν., 2019. *Υδρολογική διερεύνηση του Αδριάνειου Υδραγωγείου*, Αθήνα: s.n.

Τόλης, Καβουνίδης, Μπαρδάνης, 2006. *Γεωτεχνικές Ιδιότητες της Αργίλου του Αμαρουσίου*. Ξάνθη, ΤΕΕ.

Τσιούρη, Χ., 2018. *Υδραυλική Διερεύνηση Αδριάνειου Υδραγωγείου*, Αθήνα: s.n.

12 Παράρτημα

Χαρακτηριστικά μηκοτομής Αδριάνειου Υδραγωγείου (Τσιούρη, 2018):

Αρ. Φρέατος	Αποστάσεις μεταξύ (m)	Χιλιομετρική Θέση (m)	Υψόμετρο εδάφους (m)	Ύψος πυθμένα αγωγού (m)	Κλίση αγωγού (m)	Διατομή			Συντεταγμένες	
						πλάτος	ύψος	σχήμα	x	y
0									478686,20	4204358.27
1	37,00	0,00	145.95	139.35		0.48	1.20	ημικυκλική	478688.98	4204354.27
2	38,00	37,00	147.97	139.32	-0.0008	0.50	0.80		478718.01	4204378.52
3	37,80	75,00	147.98	139.33	0.0003	1.10	1.25		478745.87	4204404.29
4	38,00	112,80	149,28	139,39	0,0015	0,80	1,00		478772,35	4204429,63
5	37,00	150,80	149,09	139,44		0,50	0,83		478799,08	4204454,66
6	38,20	187,80	148,30	139,57	0,0035	0,55	1,10		478826,78	4204480,92
7	37,35	226,00	149,02	139,71	0,0037	0,55	1,10		478854,48	4204506,40
8	37,80	263,35	150,48	139,72	0,0003	0,60	1,15		478882,26	4204531,79
9	37,40	301,15	152,24	139,70	-0,0005	0,50	1,15		478909,25	4204557,74
10	37,70	338,55	153,03	139,58	-0,0033	0,45			478936,23	4204583,83

Αρ. Φρέατος	Αποστάσεις μεταξύ (m)	Χιλιομετρική Θέση (m)	Υψόμετρο εδάφους (m)	Ύψος πυθμένα αγωγού (m)	Κλίση αγωγού (m)	Διατομή			Συντεταγμένες	
						πλάτος	ύψος	σχήμα	x	y
11	37,50	376,25	153,28	139,64	0,0016	0,45			478963,19	4204609,73
12	37,80	413,75	153,04	139,94	0,0080	0,45	1,10		478990,06	4204636,29
13	36,00	451,55	153,88	139,96	0,0006	0,50	1,25		479017,21	4204662,49
14	39,30	487,55	151,78	139,98					479041,82	4204686,94
15	37,10	526,85	156,81	140,01					0,62	1,45
16	37,40	563,95	157,70	140,70	0,0186	0,50	1,40		479096,54	4204740,11
17	37,00	601,35	158,03	140,13	-0,0152	0,50	1,60		479123,73	4204766,72
18	37,10	638,35	158,73	140,17	0,0011	0,52	1,55		479150,19	4204792,86
18 ^A	74,25	675,45	163,43	141,20	0,0278	0,50	1,40		479178,03	4204818,90
18AN										
(18A')										
18 ^B	37,25	749,70	163,70	141,40	0,0027	0,50	1,20	ημικυκλική	479230,91	4204871,01
19	37,65	786,95	163,87	141,33	-0,0019	0,50	1,55		479257,22	4204897,31
20	37,20	824,60	164,35	141,57	0,0064	0,50	0,95		479284,59	4204922,07

Αρ. Φρέατος	Αποστάσεις μεταξύ (m)	Χιλιομετρική Θέση (m)	Υψόμετρο εδάφους (m)	Ύψος πυθμένα αγωγού (m)	Κλίση αγωγού (m)	Διατομή			Συντεταγμένες	
						πλάτος	ύψος	σχήμα	x	y
20 ^A	37,70	861,80	164,50	141,60	0,0008	0,65	1,10		479313,55	4204948,30
21	37,35	899,50	164,69	141,61	0,0003	0,80	1,20		479341,16	4204973,92
22	37,30	936,85	164,93	141,83	0,0058	0,55	1,40		479367,06	4205000,12
22 ^A (18 ^F)	36,85	974,15	166,05	141,90	0,0019	0,50	1,20		479394,32	4205026,78
22 ^B	37,95	1011,00	166,59	142,04	0,0038	0,40	1,00		479421,11	4205052,01
22 ^C	72,56	1048,95	167,46	142,48	0,0116	0,50	0,80	ορθογωνική	479447,65	4205077,47
22 ^D	36,95	1121,51	167,14	142,84	0,0050	0,50	1,00	ημικυκλική οροφή	479500,39	4205129,07
22 ^E	37,08	1158,46	165,69	142,76	-0,0022	0,50	1,12		479526,92	4205154,47
22 ^F	37,40	1195,54	161,18	143,70	0,0254	0,35	1,05		479554,36	4205181,01
23	37,00	1232,94	165,29	142,67	-0,0275	0,40	0,95		479580,85	4205206,44
24	36,65	1269,94	164,09	142,27	-0,0108	0,40	1,15		479608,37	4205231,97
25	36,90	1306,59	166,37	146,37	0,1119	0,50	1,10		479635,88	4205257,76
26	36,60	1343,49	168,32	146,27	-0,0027	0,55	1,10		479663,68	4205281,63

Αρ. Φρέατος	Αποστάσεις μεταξύ (m)	Χιλιομετρική Θέση (m)	Υψόμετρο εδάφους (m)	Ύψος πυθμένα αγωγού (m)	Κλίση αγωγού (m)	Διατομή			Συντεταγμένες	
						πλάτος	ύψος	σχήμα	x	y
27	37,60	1380,09	167,89	146,34	0,0019	0,57	1,10		479691,55	4205305,56
28	38,00	1417,69	164,48	146,42	0,0021	0,60			479719,17	4205331,45
29	37,60	1455,69	168,70	146,50					479746,28	4205355,62
30	36,90	1493,29	168,21	146,64	0,0037	0,65	1,10		479774,44	4205381,27
31	38,00	1530,19	168,97	146,65	0,0003	0,50	0,90		479801,45	4205406,24
32	35,40	1568,19	169,70	146,38	-0,0071	0,37	0,68		479829,03	4205431,09
33	37,10	1603,59	171,62	146,57	0,0055	0,50	0,85		479856,12	4205455,81
34	36,40	1640,69	172,35	146,55	-0,0006	0,56	0,95		479880,17	4205485,57
35	37,00	1677,09	176,60	146,70	0,0041	0,50	0,80		479902,87	4205513,20
36	37,40	1714,09	176,06	145,66	-0,0281		0,73		479926,81	4205542,51
37	36,35	1751,49	177,69	145,71	0,0013		0,80		479951,14	4205571,18
38	38,15	1787,84	178,29	145,89	0,0050		0,80		479981,82	4205591,04
39	37,60	1825,99	179,98	145,95	0,0016		0,80		480015,74	4205607,15
40	37,55	1863,59	180,18	146,00	0,0013		0,80		480052,58	4205618,93

Αρ. Φρέατος	Αποστάσεις μεταξύ (m)	Χιλιομετρική Θέση (m)	Υψόμετρο εδάφους (m)	Ύψος πυθμένα αγωγού (m)	Κλίση αγωγού (m)	Διατομή			Συντεταγμένες	
						πλάτος	ύψος	σχήμα	x	y
41	37,15	1901,14	181,27	146,14	0,0037		0,75		480088,41	4205630,28
42	36,70	1938,29	181,37	146,13	-0,0003		0,65		480123,62	4205641,50
43	36,15	1974,99	183,06	146,01	-0,0032		0,80		480158,81	4205653,31
43 ^A	37,80	2011,14	183,73	146,38	0,0102		0,90		480197,39	4205658,85
43 ^B	36,00	2048,94	183,00	146,30	-0,0021		1,10		480234,17	4205665,72
43 ^C	36,10	2084,94	183,35	146,47	0,0047	0,50	1,30		480270,89	4205671,55
43 ^D	36,50	2121,04	183,40	146,55	0,0022	0,40	1,15		480306,18	4205676,22
43 ^E	39,10	2157,54	184,31	146,46	-0,0025	0,35	1,00		480340,49	4205680,99
43 ^F	73,75	2196,64	184,45	146,63	0,0043	0,70	0,80		480379,13	4205686,11
α	36,85	2270,39	193,00	146,82	0,0025		0,75		480453,26	4205696,62
β	37,75	2307,24	186,53	146,91			0,70		480491,85	4205702,08
γ	37,70	2344,99	186,50	146,80	-0,0029		0,80		480527,04	4205706,98
δ	37,00	2382,69	186,53	147,13	0,0088	0,90	0,90		480563,75	4205708,70
ε	72,15	2419,69	186,15	147,33	0,0054	0,50	0,90		480600,74	4205709,47

Αρ. Φρέατος	Αποστάσεις μεταξύ (m)	Χιλιομετρική Θέση (m)	Υψόμετρο εδάφους (m)	Ύψος πυθμένα αγωγού (m)	Κλίση αγωγού (m)	Διατομή			Συντεταγμένες	
						πλάτος	ύψος	σχήμα	x	y
44	36,20	2491,84	184,52	147,28	-0,0007	0,55	0,95		480674,55	4205713,23
45	36,80	2528,04	183,38	147,38	0,0028	0,60	1,00		480711,26	4205715,13
46	36,90	2564,84	182,85	147,27	-0,0029	0,50	1,00		480747,64	4205725,44
47	37,60	2601,74	181,86	147,30	0,0008	0,40	1,00		480782,07	4205738,36
48	36,85	2639,34	181,33	147,57	0,0072	0,60	1,00		480804,97	4205766,73
49	37,40	2676,19	181,05	147,35	-0,0060	0,50	1,20		480828,84	4205795,63
50	35,70	2713,59	180,83	147,53	0,0048	0,50	1,10		480848,93	4205827,77
51	37,45	2749,29	179,99	146,99	-0,0151	0,50	0,90		480860,48	4205862,69
52	37,75	2786,74	179,55	146,95	-0,0011	0,50	1,00		480877,86	4205896,82
53	37,55	2824,49	178,85	146,95	0,0000	0,60	1,00		480896,76	4205929,82
54	37,50	2862,04	178,63	147,08	0,0035	0,50	1,00		480914,83	4205961,54
55	38,70	2899,54	178,32	147,17	0,0024	0,60	1,10		480933,12	4205995,01
56	37,10	2938,24	178,21	147,31	0,0036	0,40	1,00		480952,30	4206028,81
57	37,35	2975,34	177,68	147,23	-0,0022	0,50	1,00		480970,69	4206061,88

Αρ. Φρέατος	Αποστάσεις μεταξύ (m)	Χιλιομετρική Θέση (m)	Υψόμετρο εδάφους (m)	Ύψος πυθμένα αγωγού (m)	Κλίση αγωγού (m)	Διατομή			Συντεταγμένες	
						πλάτος	ύψος	σχήμα	x	y
58	37,60	3012,69	177,74	147,24	0,0003	0,50	1,20		480989,61	4206094,64
59	38,50	3050,29	177,47	147,37	0,0035	0,60	1,10		481008,67	4206127,19
60	37,40	3088,79	177,34	147,44	0,0018	0,50	0,70		481027,68	4206160,01
61	37,85	3126,19	177,02	147,57	0,0035	0,50	1,00		481047,06	4206193,12
62	37,90	3164,04	176,62	147,62	0,0013	0,60	1,00		481065,92	4206224,49
63	37,80	3201,94	176,43	147,73	0,0029	0,70	2,00		481083,92	4206258,15
	37,85	3239,74	176,52	147,79	0,0016	0,85	1,00		481101,73	4206291,24
64						0,50	1,00			
65	37,30	3277,59	176,03	147,80	0,0003	0,50	0,90		481119,67	4206324,09
66	37,50	3314,89	176,03	147,70	-0,0027	0,50	0,80		481137,38	4206357,04
67	38,30	3352,39	175,51	148,06	0,0096	0,50	0,80		481155,64	4206389,02
68	38,20	3390,69	175,27	148,07	0,0003	0,50	0,80		481175,19	4206422,82
69	37,80	3428,89	175,14	148,14	0,0018	0,50	1,10		481194,04	4206455,37
70	37,15	3466,69	174,84	148,26	0,0032	0,50	1,30		481212,99	4206487,78

Αρ. Φρέατος	Αποστάσεις μεταξύ (m)	Χιλιομετρική Θέση (m)	Υψόμετρο εδάφους (m)	Ύψος πυθμένα αγωγού (m)	Κλίση αγωγού (m)	Διατομή			Συντεταγμένες	
						πλάτος	ύψος	σχήμα	x	y
71	37,80	3503,84	174,60	148,40	0,0038	0,50	1,20		481232,97	4206519,82
72	37,45	3541,64	175,02	148,49	0,0024	0,50	1,00		481251,52	4206552,73
73	37,40	3579,09	174,63	148,70	0,0056	0,70	1,40		481268,42	4206586,18
74	39,40	3616,49	174,95	148,67	-0,0008	0,60	1,10		481281,78	4206620,63
75	37,65	3655,89	174,60	148,82	0,0038	0,60	1,20		481288,54	4206660,42
76	37,80	3693,54	174,63	148,88	0,0016	0,50	1,40		481296,45	4206697,14
77	75,00	3731,34	174,26	148,46	-0,0111	0,60	1,10		481304,09	4206735,54
78	37,60	3806,34	173,00	148,82	0,0048	0,50	1,15		481318,53	4206808,38
79	37,85	3843,94	172,70	149,00		0,50	1,25		481324,96	4206844,79
80	38,70	3881,79	171,17	149,22	0,0059	0,60	1,20	σχεδόν ορθογωνικό	481334,73	4206882,13
						0,60	1,20	τριγωνική		

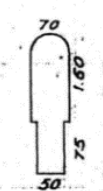
Αρ. Φρέατος	Αποστάσεις μεταξύ (m)	Χιλιομετρική Θέση (m)	Υψόμετρο εδάφους (m)	Ύψος πυθμένα αγωγού (m)	Κλίση αγωγού (m)	Διατομή			Συντεταγμένες	
						πλάτος	ύψος	σχήμα	x	y
						0,60	1,20	σχεδόν ορθογωνικό		
81	37,40	3920,49	170,70	149,45		0,60	1,20	ορθογωνική	481342,11	4206919,75
82	39,20	3957,89	172,15	149,67		0,60	1,00	τριγωνική	481349,56	4206956,91
83	111,30	3997,09	172,04	149,24	-0,0110	0,60	1,00		481358,35	4206993,81
84	74,20	4108,39	171,75	149,43	0,0017	0,50	1,00		481384,40	4207102,78
84^A	37,80	4182,59	169,71	149,55	0,0016	0,50	1,05		481400,94	4207175,08
85	36,95	4220,39	169,26	149,56	0,0003	0,50	1,50	ημικυκλική	481408,49	4207213,00
						0,50	2,00			
86	75,00	4257,34	169,16	149,81	0,0068	0,50	1,15		481416,54	4207248,28
						0,60	1,40			
87	73,78	4332,34	170,42	149,77	-0,0005	0,50	1,00	481434,06	4207322,28	
88	37,70	4406,12	170,49	149,92	0,0020	0,60	1,10	481450,40	4207394,18	

Αρ. Φρέατος	Αποστάσεις μεταξύ (m)	Χιλιομετρική Θέση (m)	Υψόμετρο εδάφους (m)	Ύψος πυθμένα αγωγού (m)	Κλίση αγωγού (m)	Διατομή			Συντεταγμένες	
						πλάτος	ύψος	σχήμα	x	y
89	110,30	4443,82	170,43	150,03	0,0029	0,50	0,90		481458,01	4207429,62
90	79,45	4554,12	170,00	150,50	0,0043	0,50	0,90		481483,37	4207538,15
91	33,30	4633,57	169,64	150,44	-0,0008	0,40	1,60		481499,67	4207616,39
92	33,90	4666,87	169,86	150,46	0,0006	0,50	1,10		481506,68	4207648,70
93	78,20	4700,77	169,17	150,67	0,0062	0,40	1,00		481514,29	4207682,15
94	74,60	4778,97	168,64	150,84	0,0022	0,50	0,90		481531,15	4207756,86
95	78,80	4853,57	168,34	150,94	0,0013	0,50	0,90		481548,18	4207832,01
96	75,05	4932,37	167,96	150,96	0,0003	0,50	1,20		481558,68	4207905,09
97	148,65	5007,42	168,10	151,30	0,0045	0,40	0,90	τριγωνική	481560,73	4207978,83
98	76,05	5156,07	168,09	151,54	0,0016	0,40	0,65	ημικυκλική	481562,21	4208130,64
98 ^A	37,80	5232,12	167,44	151,64	0,0013	0,43	1,00		481553,76	4208204,82
99	75,15	5269,92	166,93	151,73	0,0024	0,55	0,85	τριγωνική	481550,25	4208243,11
						0,50	1,00			

Αρ. Φρέατος	Αποστάσεις μεταξύ (m)	Χιλιομετρική Θέση (m)	Υψόμετρο εδάφους (m)	Ύψος πυθμένα αγωγού (m)	Κλίση αγωγού (m)	Διατομή			Συντεταγμένες		
						πλάτος	ύψος	σχήμα	x	y	
100	75,35	5345,07	166,44	151,84	0,0015	0,85	0,80		481544,06	4208318,45	
101	57,00	5420,42	165,15	152,10	0,0035	0,50	1,00		481536,19	4208392,98	
102	57,30	5477,42	163,58	152,20	0,0018	0,65	1,17		481528,99	4208447,99	
103	34,60	5534,72	163,06	152,35	0,0026	ακανόνιστο			481523,62	4208504,90	
κόφτρα											
κυκλ, Δεξαμεν ή											
104	41,80	5569,32	164,50	152,40	0,0013	0,50	0,80	τριγωνικ ή	481521,14	4208539,32	
105	37,90	5611,12	163,89	152,54	0,0033	0,50	0,75		481516,82	4208581,42	
106	39,20	5649,02	162,20	152,60	0,0017	0,50	1,40	ημικυκλική	481515,07	4208619,21	
107	74,50	5688,22	162,95	152,75	0,0038				481512,14	4208656,75	
108	38,60	5762,72	165,01	153,05	0,0040				481504,42	4208733,54	
109	36,30	5801,32	165,22	153,20					481501,06	4208771,99	
110	77,00	5837,62	166,18	153,90	0,0193				481497,51	4208809,90	

Αρ. Φρέατος	Αποστάσεις μεταξύ (m)	Χιλιομετρική Θέση (m)	Υψόμετρο εδάφους (m)	Ύψος πυθμένα αγωγού (m)	Κλίση αγωγού (m)	Διατομή			Συντεταγμένες	
						πλάτος	ύψος	σχήμα	x	y
111	74,40	5914,62	171,11	153,96	0,0007	0,50	0,90		481490,96	4208884,88
112	74,90	5989,02	169,37	153,57	-0,0052	0,50	1,10		481483,06	4208960,59
113	75,35	6063,92	168,24	153,94	0,0049				481478,85	4209031,47
114	75,10	6139,27	169,06	153,71	-0,0031	0,50	1,00	τριγωνική	481470,49	4209107,67
115	57,40	6214,37	166,90	154,30	0,0079	0,50	1,10	ημικυκλική	481462,56	4209181,85
116	39,90	6271,77	165,59	154,20	-0,0017				481456,33	4209240,11
117	64,80	6311,67	168,85	154,00	-0,0051	0,50	0,70		481453,01	4209279,16
118	104,50	6376,47	169,85	154,10	0,0015		1,00		481446,99	4209345,01
119	36,40	6480,97	168,94	154,64	0,0052	0,50	1,10		481437,86	4209447,63
						0,50	1,10	τριγωνική		
120	41,60	6517,37	165,39	155,19	0,0151	0,50	1,10	ημικυκλική	481433,86	4209485,36
121	108,45	6558,97	164,45	154,45	-0,0178				481414,75	4209521,78
122	76,15	6667,42	169,28	154,98	0,0049				481367,73	4209617,71

Αρ. Φρέατος	Αποστάσεις μεταξύ (m)	Χιλιομετρική Θέση (m)	Υψόμετρο εδάφους (m)	Ύψος πυθμένα αγωγού (m)	Κλίση αγωγού (m)	Διατομή			Συντεταγμένες	
						πλάτος	ύψος	σχήμα	x	y
123	75,10	6743,57	171,54	154,94	-0,0006	0,50	1,20		481333,73	4209686,30
124	67,80	6818,67	170,96	155,34	0,0054	0,50	1,20		481299,96	4209754,02
								τριγωνική μορφή		
						0,60	1,20	κυλινδρική μορφή		
						0,50	1,20	τριγωνική μορφή		
125	83,50	6886,47	171,20	155,70	0,0053	0,50	1,05	τριγωνική	481268,23	4209813,78
126	33,10	6969,97	171,96	155,66	-0,0005			481229,99	4209889,18	
127	41,80	7003,07	171,58	155,94	0,0085	Αχρηστευθέν τμήμα			481216,61	4209918,95
128	75,50	7044,87	172,56	156,00	0,0014	0,60	1,05	κυλινδρική μορφή	481198,95	4209957,76
						0,60	1,05	τριγωνική μορφή		

Αρ. Φρέατος	Αποστάσεις μεταξύ (m)	Χιλιομετρική Θέση (m)	Υψόμετρο εδάφους (m)	Ύψος πυθμένα αγωγού (m)	Κλίση αγωγού (m)	Διατομή			Συντεταγμένες	
						πλάτος	ύψος	σχήμα	x	y
						0,60	1,05	κυλινδρική μορφή		
129	37,90	7120,37	175,98	155,83	-0,0023	0,50	0,90	ημικυκλική	481169,20	4210024,01
130	42,10	7158,27	173,33	156,18	0,0093	0,50	1,70	ορθογωνική	481152,87	4210058,46
131	36,70	7200,37	174,21	156,61	0,0102	(σαν 137-142)			481134,06	4210096,39
132	33,80	7237,07	175,15	156,00	-0,0167	0,50	1,10	ορθογωνική	481118,00	4210129,27
133	75,10	7270,87	175,47	155,47	-0,0157	0,40	1,10		481103,49	4210159,42
134	74,15	7345,97	178,47	156,27	0,0107	0,50	1,00	τριγωνική οροφή	481070,44	4210227,28
135	76,00	7420,12	181,36	157,01	0,0100				481036,70	4210296,14
136	75,30	7496,12	183,74	157,14	0,0017	0,60	0,80		481004,14	4210362,93
137	74,60	7571,42	186,96	156,61	-0,0070				480970,11	4210429,13
137A										
138	75,00	7646,02	189,82	157,52	0,0122				480935,71	4210495,58

Αρ. Φρέατος	Αποστάσεις μεταξύ (m)	Χιλιομετρική Θέση (m)	Υψόμετρο εδάφους (m)	Ύψος πυθμένα αγωγού (m)	Κλίση αγωγού (m)	Διατομή			Συντεταγμένες	
						πλάτος	ύψος	σχήμα	x	y
139	38,00	7721,02	190,84	158,04	0,0069				480901,28	4210562,45
140	37,90	7759,02	189,53	157,53	-0,0134				480898,17	4210599,83
141	75,30	7796,92	184,05	156,05	-0,0391				480894,42	4210637,05
142	75,35	7872,22	180,89	156,43	0,0050				480888,54	4210712,07
143	76,95	7947,57	181,32	157,42	0,0131	0,50	0,90	τριγωνική ή οροφή	480883,52	4210785,43
144	72,85	8024,52	184,67	157,57	0,0019	0,50	0,85		480870,84	4210863,56
145	113,50	8097,37	182,02	157,57	0,0000	0,40	0,90	ημικυκλική οροφή	480864,76	4210938,28
146	74,10	8210,87	184,17	157,82	0,0022	0,40	0,70		480800,43	4211033,13
147	75,60	8284,97	182,12	157,87	0,0007	0,40	0,85		480747,41	4211084,60
148	74,10	8360,57	181,35	157,45	-0,0056	επισκευασμένο με βραχέα υποστυλώματα και με πλάκες από σκυροκονίαμα			480702,85	4211142,59
149	112,50	8434,67	181,59	157,03		0,50	1,30	ορθογωνικό	480655,79	4211200,39
						0,40	1,05	τριγωνική ή οροφή		

Αρ. Φρέατος	Αποστάσεις μεταξύ (m)	Χιλιομετρική Θέση (m)	Υψόμετρο εδάφους (m)	Ύψος πυθμένα αγωγού (m)	Κλίση αγωγού (m)	Διατομή			Συντεταγμένες	
						πλάτος	ύψος	σχήμα	x	y
						0,50	1,30	ορθογωνικό		
						0,40	1,05	τριγωνική οροφή		
						0,50	1,30	ορθογωνικό		
						0,40	1,05	τριγωνική οροφή		
150	74,25	8547,17	184,00	157,30	<i>0,0024</i>	0,40	0,80	ημικυκλική	480584,88	4211289,15
151	76,60	8621,42	184,00	157,48		0,50	1,00	τριγωνική	480535,72	4211347,36
152	37,00	8698,02	189,07	157,67		0,50	1,00	ακανόνιστο	480486,56	4211406,88
								τριγωνική οροφή		
								σχεδόν ορθογωνικό		

Αρ. Φρέατος	Αποστάσεις μεταξύ (m)	Χιλιομετρική Θέση (m)	Υψόμετρο εδάφους (m)	Ύψος πυθμένα αγωγού (m)	Κλίση αγωγού (m)	Διατομή			Συντεταγμένες	
						πλάτος	ύψος	σχήμα	x	y
152 ^A	44,20	8735,02	185,00	158,30	0,0171	0,55	0,80	ημικυκλική οροφή		
153	63,40	8779,22	189,85	159,06		0,40	0,80		480433,27	4211473,41
154	75,20	8842,62	194,16	160,15	0,0172	0,50	1,05	ημικυκλική οροφή	480393,32	4211522,72
						0,50	1,05	ορθογωνικό		
						0,50	1,05	ημικυκλική οροφή		
155	75,30	8917,82	198,99	160,32	0,0022	0,50	0,80	ημικυκλική	480346,96	4211580,57
156	74,80	8993,12	194,16	160,36	0,0006	0,50	1,05	τριγωνική	480296,56	4211636,33
						0,50	1,05	ημικυκλική		

Αρ. Φρέατος	Αποστάσεις μεταξύ (m)	Χιλιομετρική Θέση (m)	Υψόμετρο εδάφους (m)	Ύψος πυθμένα αγωγού (m)	Κλίση αγωγού (m)	Διατομή			Συντεταγμένες	
						πλάτος	ύψος	σχήμα	x	y
157	73,00	9067,92	197,15	159,55	-0,0108			ακανόνιστο	480249,40	4211691,98
								τριγωνική		
						0,55	1,00	ημικυκλική οροφή		
158	78,30	9140,92	192,13	160,73	0,0161	0,50	0,80	τριγωνική	480199,69	4211750,59
159	73,75	9219,22	196,00	160,84	0,0014	0,50	0,90		480151,79	4211806,79
160	74,15	9292,97	202,34	160,94		0,50	0,80	ημικυκλική (0,55)	480104,98	4211862,94
161	75,20	9367,12	197,42	160,92	-0,0003	0,50	0,90		480041,28	4211900,33
162	74,60	9442,32	192,73	161,43	0,0068	0,20	0,95		479976,02	4211938,92
						0,35	0,90	ακανόνιστο		
								ορθογωνικό		

Αρ. Φρέατος	Αποστάσεις μεταξύ (m)	Χιλιομετρική Θέση (m)	Υψόμετρο εδάφους (m)	Ύψος πυθμένα αγωγού (m)	Κλίση αγωγού (m)	Διατομή			Συντεταγμένες	
						πλάτος	ύψος	σχήμα	x	y
163	77,00	9516,92	190,42	160,92	-0,0068	0,40	0,80	ημικυκλική (0,50)	479910,9013	4211977,013
						0,30	1,20	ορθογωνική		
						0,60	1,20	σχεδόν ορθογωνικό		
						0,20	1,55	ημικυκλική (0,50)		
164	149,30	9593,92	192,39	160,88	-0,0005	0,60	1,50	σχεδόν ορθογωνικό	479846,1058	4212017,218
						0,50	1,30	ορθογωνικό		
						0,50	1,15	ημικυκλική		
						0,60	1,00			
165	74,10	9743,22	188,91	159,15	-0,0116	0,60	1,00		479731,8604	4212111,894
166	73,90	9817,32	186,99	159,99	0,0114	0,60	1,05		479678,731	

Αρ. Φρέατος	Αποστάσεις μεταξύ (m)	Χιλιομετρική Θέση (m)	Υψόμετρο εδάφους (m)	Ύψος πυθμένα αγωγού (m)	Κλίση αγωγού (m)	Διατομή			Συντεταγμένες	
						πλάτος	ύψος	σχήμα	x	y
167	75,20	9891,22	184,99	159,94	-0,0007	0,85	1,65	σχεδόν ορθογωνικό	479624,1283	4212213,275
						0,75	1,60			
						0,70	1,60			
						0,50	1,10	ορθογωνικό		
						168	73,00	9966,42	181,57	161,17
169	74,70	10039,42	180,37	162,37		0,60	0,80	τριγωνική	479517,0085	4212316,213
170	37,10	10114,12	178,62	160,52	-0,0247	0,60	0,70	ημικυκλική οροφή	479463,0719	4212367,337
171	74,40	10151,22	179,68	160,69	0,0046	0,60	1,10	ημικυκλική οροφή	479437,0643	4212392,916
						0,10	1,00	ημικυκλική		

Αρ. Φρέατος	Αποστάσεις μεταξύ (m)	Χιλιομετρική Θέση (m)	Υψόμετρο εδάφους (m)	Ύψος πυθμένα αγωγού (m)	Κλίση αγωγού (m)	Διατομή			Συντεταγμένες	
						πλάτος	ύψος	σχήμα	x	y
								οροφή (050)		
						0,60	1,10	ημικυκλική οροφή		
172	75,20	10225,62	173,07	161,14	0,0060	0,40	0,80	ημικυκλική	479381,306 1	4212444,83 5
173	37,30	10300,82	181,12	161,12	-0,0002	0,60	1,10		479328,121 9	4212497,39 9
174	37,40	10338,12	182,86	161,06	-0,0016				479301,17	4212523,18
175	37,60	10375,52	183,76	161,40	0,0091				479289,42	4212556,41
176	37,80	10413,12	182,87	161,27	-0,0035	0,60	1,20	ορθογωνικό (αρχή) - ημικυκλική (τέλος)	479281,46	4212595,41
177	37,00	10450,92	182,22	161,42	0,0040	0,45	1,10	τριγωνική οροφή	479275,03	4212632,03

Αρ. Φρέατος	Αποστάσεις μεταξύ (m)	Χιλιομετρική Θέση (m)	Υψόμετρο εδάφους (m)	Ύψος πυθμένα αγωγού (m)	Κλίση αγωγού (m)	Διατομή			Συντεταγμένες	
						πλάτος	ύψος	σχήμα	x	y
178	38,30	10487,92	181,58	161,44	0,0005	0,50	1,10	ημικυκλική οροφή	479269,20	4212668,56
								τριγωνική οροφή		
								σχεδόν ημικυκλική οροφή		
179	37,00	10526,22	180,20	161,60	0,0042	0,50	1,10	σχεδόν ημικυκλική οροφή	479262,38	4212707,16
180	37,30	10563,22	178,84	161,64	0,0011			479256,87	4212742,14	
180 ^A	37,90	10600,52	177,73	161,63	-0,0003			479251,01	4212778,98	
181	37,60	10638,42	177,56	161,66	0,0008			479246,36	4212816,80	
182	36,90	10676,02	176,97	161,77	0,0029			479250,79	4212855,43	
183	37,30	10712,92	177,05	161,85	0,0022			479263,99	4212890,54	
								0,60	1,10	ημικυκλική οροφή
184	36,70	10750,22	177,41	161,81	-0,0011	0,50	1,00	σχεδόν ημικυκλική οροφή	479279,84	4212923,05

Αρ. Φρέατος	Αποστάσεις μεταξύ (m)	Χιλιομετρική Θέση (m)	Υψόμετρο εδάφους (m)	Ύψος πυθμένα αγωγού (m)	Κλίση αγωγού (m)	Διατομή			Συντεταγμένες	
						πλάτος	ύψος	σχήμα	x	y
								κή οροφή		
185	38,55	10786,92	180,40	163,80	0,0541	0,45	0,80	ημικυκλική	479303,57	4212952,61
186	157,00	10825,47	179,69	163,84	0,0010	0,40	0,90		479326,41	4212986,74
187	38,00	10982,47	179,43	164,23	0,0025	0,55	0,90		479351,75	4213137,31
188	37,50	11020,47	179,79	164,34	0,0029	0,45	0,95		479366,36	4213171,17
189	74,80	11057,97	180,66	164,51	0,0045	0,55	0,85		479383,29	4213203,82
190	37,30	11132,77	181,89	164,64	0,0017	0,50	0,80		479418,18	4213270,52
191	37,20	11170,07	182,16	164,71	0,0019	0,50	1,00		479435,18	4213304,67
192	37,00	11207,27	183,13	164,88	0,0046	0,55	1,00		479452,57	4213337,06
193	37,00	11244,27	182,96	164,66	-0,0058	0,80	2,60	σχεδόν ημικυκλική οροφή	479470,10	4213369,76
194	37,55	11281,27	183,66	164,70	0,0011	0,70	1,20	ημικυκλική	479487,64	4213401,76
195	37,55	11318,82	184,00	163,86	0,0042				479505,71	4213435,65

Αρ. Φρέατος	Αποστάσεις μεταξύ (m)	Χιλιομετρική Θέση (m)	Υψόμετρο εδάφους (m)	Ύψος πυθμένα αγωγού (m)	Κλίση αγωγού (m)	Διατομή			Συντεταγμένες	
						πλάτος	ύψος	σχήμα	x	y
196	36,50	11356,37	185,12	165,02		0,60	1,00	κή οροφή	479522,59	4213467,79
197	37,50	11392,87	186,56	165,24	0,0060	0,40	1,00		479538,73	4213501,31
198	37,60	11430,37	185,80	164,64	0,0019	0,50	1,00		479557,18	4213534,69
199	37,00	11467,97	186,40	164,04					479574,32	4213566,57
200	38,00	11504,97	186,65	165,45					479589,74	4213600,34
201	75,50	11542,97	188,18	165,38					-0,0019	0,50
202	37,85	11618,47	189,57	165,53	0,0020	0,50	0,95		479644,32	4213698,48
203	37,70	11656,32	190,20	165,90	0,0098	0,40	0,80		479662,87	4213732,83
204	37,75	11694,02	190,95	165,90	0,0000	0,45	1,00		479676,77	4213767,51
205	37,65	11731,77	190,88	165,73	-0,0045	0,40	0,90		479695,09	4213799,25
206	37,35	11769,42	191,69	165,89	0,0042	0,40	1,00		479711,40	4213832,14
207	37,80	11806,77	191,96	166,91	0,0273	0,40	0,90		479728,33	4213866,10
208	37,40	11844,57	194,06	166,01	-0,0238	0,50	0,80		479745,44	4213899,64
209	38,10	11881,97	191,22	166,26	0,0068	0,50	1,00	479765,18	4213932,14	

Αρ. Φρέατος	Αποστάσεις μεταξύ (m)	Χιλιομετρική Θέση (m)	Υψόμετρο εδάφους (m)	Ύψος πυθμένα αγωγού (m)	Κλίση αγωγού (m)	Διατομή			Συντεταγμένες	
						πλάτος	ύψος	σχήμα	x	y
210	37,40	11920,07	191,72	166,52		0,40	1,10	ημικυκλική οροφή (050)	479783,02	4213966,34
211	37,00	11957,47	191,49	166,69	0,0045				479800,04	4213999,10
212	35,19	11994,47	191,90	165,94	-0,0203				479817,04	4214032,44
213	77,95	12029,66	193,00	166,20	0,0075				479832,87	4214063,81
214	90,95	12107,61	193,75	166,79					479890,86	4214116,11
215	76,00	12198,56	183,15	166,45	-0,0038	0,50	1,00	ημικυκλική οροφή	479960,05	4214176,83
216	30,00	12274,56	176,43	166,40	-0,0006	φρεάτιο συνδέσεως του αγωγού (Κοκκιναρά)			480023,79	4214208,65
217	15,90	12304,56	181,00	166,44	0,0014				480039,24	4214235,80
218	38,10	12320,46	181,00	166,47					480040,92	4214250,08
219	74,00	12358,56	187,00	166,52		0,50	1,30	τριγωνική οροφή	480032,56	4214292,00
220	72,55	12432,56	194,85	166,63		0,50	1,00	ημικυκλική οροφή	480015,77	4214367,68

Αρ. Φρέατος	Αποστάσεις μεταξύ (m)	Χιλιομετρική Θέση (m)	Υψόμετρο εδάφους (m)	Ύψος πυθμένα αγωγού (m)	Κλίση αγωγού (m)	Διατομή			Συντεταγμένες	
						πλάτος	ύψος	σχήμα	x	y
221	72,05	12505,11	195,00	166,72	0,0012	0,50	1,05	τριγωνική οροφή	480050,83	4214431,91
222	109,05	12577,16	194,52	166,80					480072,31	4214501,13
223	73,30	12686,21	197,99	167,39	0,0054	0,50	0,70		480112,17	4214601,68
224	73,25	12759,51	198,71	166,20	-0,0162				480136,83	4214670,45
225	71,40	12832,76	199,84	167,64	0,0197	0,40	0,70		480161,11	4214739,15
226	71,50	12904,16	199,01	166,76	-0,0123				480186,30	4214806,74
227	54,60	12975,66	195,32	166,92	0,0022	0,50	0,60	ημικυκλική οροφή	480209,20	4214873,55
228	23,30	13030,26	196,34	167,19	0,0055	0,50	0,75		480238,81	4214918,40
229	33,40	13053,56	187,00	167,32					480236,25	4214941,96
230	34,55	13086,96	197,00	167,50		0,40	0,85	τριγωνική οροφή	480246,93	4214975,38
231	72,20	13121,51	202,09	167,69		0,50	0,85		480259,31	4215005,73
232	113,14	13193,71	202,00	168,28	0,0081	Συναρμογή			480287,19	4215072,83
233	109,36	13306,85	205,00	169,20					480325,38	4215179,36

Αρ. Φρέατος	Αποστάσεις μεταξύ (m)	Χιλιομετρική Θέση (m)	Υψόμετρο εδάφους (m)	Ύψος πυθμένα αγωγού (m)	Κλίση αγωγού (m)	Διατομή			Συντεταγμένες	
						πλάτος	ύψος	σχήμα	x	y
234	75,20	13416,21	206,37	170,07		0,50	0,90	ημικυκλική οροφή	480364,65	4215283,10
235	77,00	13491,41	205,51	170,36	0,0039	0,40	0,65	τριγωνική οροφή	480392,79	4215350,61
236	76,65	13568,41	203,75	170,50	0,0018	0,40	0,80		480438,97	4215407,26
237	10,00	13645,06	188,00	170,38	-0,0016	Συναρμογή			480473,63	4215464,53
238	80,00	13655,06	188,96	170,36		0,50	1,00	ημικυκλική οροφή	480473,64	4215476,11
239	72,00	13735,06	183,95	170,60	0,0030	0,70	1,00	τριγωνική οροφή	480514,72	4215548,94
239 ^A	112,00	13807,06	183,66	170,81	0,0029	0,50	0,70	ημικυκλική οροφή	480576,14	4215587,19
239 ^B	20,20	13919,06	174,89	171,09	0,0025	0,50	0,70		480649,56	4215645,57
(?) α	44,80	13939,26	178,00	171,32	0,0117	Συναρμογή			480647,59	4215665,99
(?) β	56,00	13984,06	179,00	171,84					480621,94	4215701,01
239 ^C	75,00	14040,06	177,70	172,50		0,50	0,90		480570,06	4215682,50

Αρ. Φρέατος	Αποστάσεις μεταξύ (m)	Χιλιομετρική Θέση (m)	Υψόμετρο εδάφους (m)	Ύψος πυθμένα αγωγού (m)	Κλίση αγωγού (m)	Διατομή			Συντεταγμένες	
						πλάτος	ύψος	σχήμα	x	y
239 ^D	59,50	14115,06	175,21	172,66	0,0021	0,40	0,90	ορθογωνική	480499,55	4215658,56
239 Γ	παράπλευρο υδραγωγείο									
239 Δ										
φρεάτιο κοίτης										
(?) γ	32,00	14174,56	185,00	172,97	0,0052	Συναρμογή		ορθογωνική	480452,44	4215622,92
240	40,00	14206,56	177,74	173,14		0,45	0,60		480432,62	4215600,49
241	40,00	14246,56	178,00	173,32	0,0046	0,45	Συναρμογή	ορθογωνική	480395,28	4215585,77
241 ^A	26,50	14286,56	178,00	173,51					480358,17	4215572,63
241 ^B	8,50	14313,06	179,00	173,63					480332,08	4215565,30
242	65,00	14321,56	179,00	173,67					480324,36	4215561,66
243	45,00	14386,56	177,00	173,97					480265,82	4215534,79
244	65,00	14431,56	176,00	174,18					480223,23	4215525,29
									480157,90	4215516,89

Αρ. Φρέατος	Αποστάσεις μεταξύ (m)	Χιλιομετρική Θέση (m)	Υψόμετρο εδάφους (m)	Ύψος πυθμένα αγωγού (m)	Κλίση αγωγού (m)	Διατομή			Συντεταγμένες		
						πλάτος	ύψος	σχήμα	x	y	
245	93,00	14496,56	178,00	174,48					480157,90	4215516,89	
246	47,60	14589,56	188,08	174,73			1,00	τριγωνική ή οροφή	480068,09	4215516,56	
246 ^A	88,50	14637,16	183,69	174,84	0,0023	0,50	1,00				
247	30,00	14725,66	196,28	176,13	0,0146	0,50	1,10	ορθογωνική	479944,04	4215549,73	
248	70,00	14755,66	201,00	176,50	0,0124	Συναρμογή			479916,54	4215561,43	
249	114,50	14825,66	202,00	177,36					479863,78	4215598,22	
250	112,50	14940,16	200,98	178,78		0,30	0,60	τριγωνική ή οροφή	479761,46	4215642,67	
251 ^A	28,90	15052,66	202,00	180,19	0,0125	Συναρμογή			479626,76	4215682,89	
251	55,00	15081,56	202,00	180,55						479654,87	4215678,34
252	74,80	15136,56	201,04	181,24	0,50	0,80			479587,47	4215708,08	
253	39,30	15211,36	202,18	181,64	0,0053	0,60	0,70		479517,08	4215741,31	
254	35,51	15250,66	203,00	182,16	0,0134	Συναρμογή			479480,97	4215756,66	
255	34,60	15286,17	203,00	182,64					479446,65	4215768,74	

Αρ. Φρέατος	Αποστάσεις μεταξύ (m)	Χιλιομετρική Θέση (m)	Υψόμετρο εδάφους (m)	Ύψος πυθμένα αγωγού (m)	Κλίση αγωγού (m)	Διατομή			Συντεταγμένες	
						πλάτος	ύψος	σχήμα	x	y
256	37,70	15320,77	202,00	183,10					479415,65	4215784,00
257	37,40	15358,47	202,00	183,60					479381,24	4215798,95
258	39,19	15395,87	202,00	184,10					479346,62	4215813,35
259	80,00	15435,06	200,98	184,63					0,40	1,00
260	66,00	15515,06	202,00	186,54	0,0239	Συναρμογή		479240,15	4215858,82	
261	45,25	15581,06	203,00	188,12				479239,12	4215925,84	
262	64,30	15626,31	203,11	189,21		0,45	1,15	479231,96	4215994,37	
263	36,70	15690,61	204,00	189,90	0,0108	0,50	1,00	479186,75	4216037,92	
264	51,00	15727,31	203,46	190,30				479168,90	4216072,47	
265	71,80	15778,31	204,40	191,40	0,0216	0,45	1,10	479163,92	4216121,83	
266	57,20	15850,11	206,00	192,88	0,0207			479186,94	4216187,49	
267	58,20	15907,31	207,00	194,07				479203,39	4216217,18	
268	60,10	15965,51	207,08	195,28	0,50	1,00	479244,22	4216291,63		
269	66,40	16025,61	209,00	195,68			0,0068	479251,24	4216348,01	

Αρ. Φρέατος	Αποστάσεις μεταξύ (m)	Χιλιομετρική Θέση (m)	Υψόμετρο εδάφους (m)	Ύψος πυθμένα αγωγού (m)	Κλίση αγωγού (m)	Διατομή			Συντεταγμένες	
						πλάτος	ύψος	σχήμα	x	y
270	76,80	16092,01	209,09	196,14	0,0337			ημικυκλική οροφή	479290,69	4216401,26
271	56,20	16168,81	211,00	198,72					479338,18	4216461,54
272	70,55	16225,01	213,00	202,65					479363,28	4216518,97
273	71,74	16295,56	213,54	202,99	0,50	0,70	τριγωνική οροφή	479393,68	4216581,63	
274	78,56	16367,30	215,00	204,38	Συναρμογή			479424,96	4216645,97	
275	91,00	16445,86	216,26	205,91	0,50	1,00		479458,20	4216717,12	
276	67,00	16536,86	218,00	206,42	0,0057		Συναρμογή	479503,21	4216796,39	
277	62,00	16603,86	219,00	206,80				479515,13	4216858,72	
278	64,00	16665,86	221,00	207,15				479522,26	4216922,59	
279	66,00	16729,86	223,00	207,51				479517,88	4216987,81	
280	67,50	16795,86	224,87	207,89				2,00	ημικυκλική οροφή	479520,46
281	66,30	16863,36	225,00	207,86	Συναρμογή		479514,53	4217121,56		
282	69,90	16929,66	226,38	207,83	0,40	0,80	479501,17	4217186,56		
283	66,70	16999,56	228,00	207,83	0,0001	0,40	0,80	479493,79	4217254,91	

Αρ. Φρέατος	Αποστάσεις μεταξύ (m)	Χιλιομετρική Θέση (m)	Υψόμετρο εδάφους (m)	Ύψος πυθμένα αγωγού (m)	Κλίση αγωγού (m)	Διατομή			Συντεταγμένες	
						πλάτος	ύψος	σχήμα	x	y
284	31,00	17066,26	230,00	207,84					479497,61	4217321,36
285	33,35	17097,26	231,00	207,84					479499,25	4217351,89
286	33,85	17130,61	231,00	207,84					479501,29	4217385,16
287	32,53	17164,46	227,80	207,85		0,40	0,80		479503,39	4217419,18
288	33,55	17196,99	233,00	207,90	0,0017	0,40	0,80		479503,44	4217453,11
289	34,34	17230,54	234,00	207,96					479501,63	4217487,46
290	31,88	17264,88	234,00	208,01					479496,66	4217521,69
291	36,55	17296,76	231,32	208,07		0,40	0,80		479492,61	4217557,29
292	38,85	17333,31	237,00	208,25	0,0050				479488,75	4217593,82
293	36,53	17372,16	236,55	208,45					479485,19	4217629,59
294	33,09	17408,69	239,00	209,03	0,0159	0,40	0,80		479480,72	4217665,26
295	37,51	17441,78	240,00	209,55					479475,47	4217698,56
296	37,18	17479,29	241,00	210,15					479472,29	4217739,07
297	37,36	17516,47	243,00	210,74					479468,11	4217775,46

Αρ. Φρέατος	Αποστάσεις μεταξύ (m)	Χιλιομετρική Θέση (m)	Υψόμετρο εδάφους (m)	Ύψος πυθμένα αγωγού (m)	Κλίση αγωγού (m)	Διατομή			Συντεταγμένες	
						πλάτος	ύψος	σχήμα	x	y
298	34,43	17553,83	244,00	211,33				479462,57	4217808,94	
299	79,50	17588,26	242,38	211,88				479483,60	4217836,02	
299'		17667,76	244,00	243,37	0,3961			479540,55	4217892,23	
299 1A	παράπλευρο υδραγωγείο									
299 2A										
299 4A										
299 8A										
299 16A										

