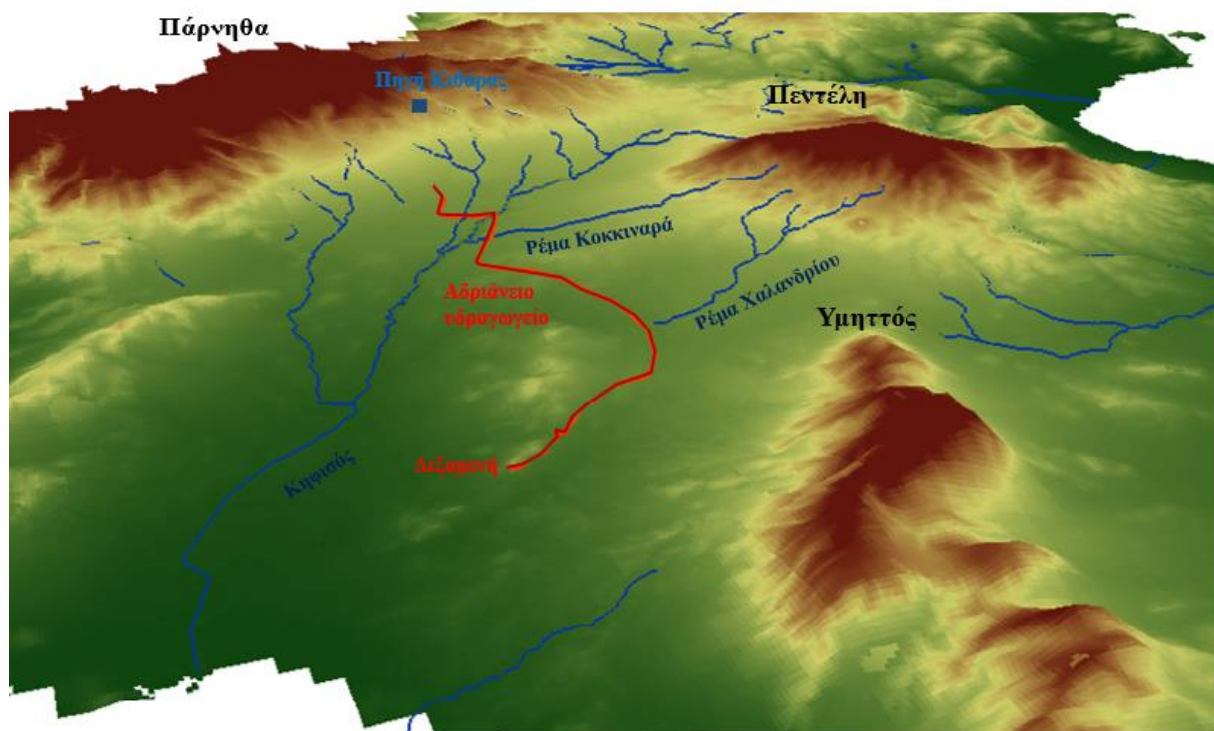




ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ & ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Υδρολογική διερεύνηση του Αδριάνειου Υδραγωγείου



Παναγιώτα-Νεκταρία Στεφάνου

Επιβλέπων: Νικόλαος Μαμάσης
Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ

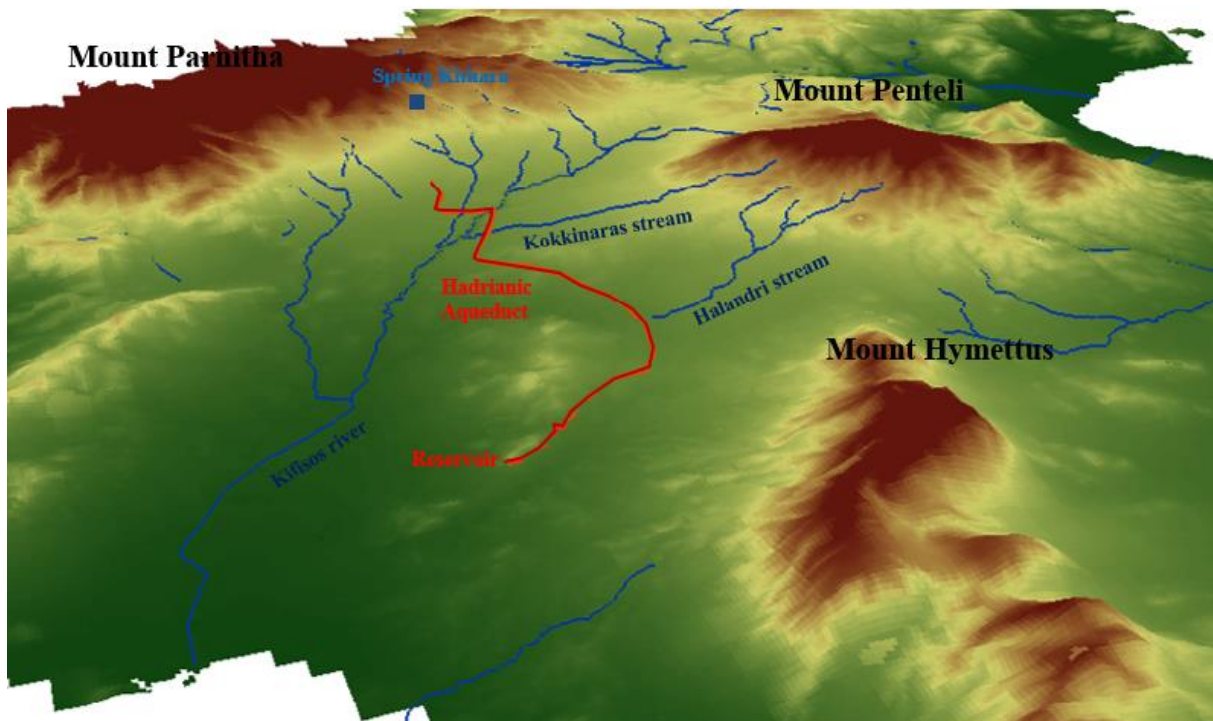
Αθήνα, Μάρτιος 2019



NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY OF ATHENS
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
DEPARTMENT OF WATER RESOURCES & ENVIRONMENTAL
ENGINEERING

DIPLOMA THESIS

Hydrological research of Hadrianic Aqueduct



Panagiota-Nectaria Stefanou

Supervisor : Nikolaos Mamasis

Associate Professor NTUA

Athens, March 2019

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής εργασίας μου, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες σε όλους όσους συνέβαλλαν στην εκπόνησή της.

Πρώτα απ' όλα, θέλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας μου, Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Νικόλαο Μαμάση, για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή του κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας.

Ακόμη θα ήθελα να εκφράσω την εκτίμησή και την ευγνωμοσύνη μου στον υποψήφιο διδάκτορα του Τομέα Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος της σχολής Πολιτικών Μηχανικών Παναγιώτη Δευτεραίο. Η συμβολή του ήταν πολύτιμη για την κατανόηση του τρόπου λειτουργίας του υδραγωγείου, όπως επίσης και η προσφορά του ιστορικού αρχείου και πλούσιου φωτογραφικού υλικού του.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ στους καθηγητές και τους συμφοιτητές μου για τη συνεργασία μας καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου, και μια όμορφη συνέχεια προς όλους.

Το μεγαλύτερο ευχαριστώ είναι προς τα αγαπημένα μου πρόσωπα, τους γονείς και τα αδέρφια μου, που με στήριζαν και ήταν οι συνοδοιπόροι μου όλα αυτά τα χρόνια.

Περίληψη

Το Αδριάνειο υδραγωγείο είναι ένα μνημειώδες υδρευτικό έργο που κατασκευάστηκε περίπου τα έτη 125 με 140 π.Χ. από τον Ρωμαίο Αυτοκράτορα Αδριανό και τον διάδοχό του Αντωνίνο Πίο. Ο Αδριανός έπειτα από την κατάκτηση της Αθήνας από τους Ρωμαίους, για να καλυφθούν οι ανάγκες των νέων Ρωμαίων κατοίκων αλλά και για την αφομοίωση του μη ρωμαϊκού πληθυσμού, αποφάσισε την κατασκευή του υδραγωγείου.

Ο κορμός του έργου είναι μια σήραγγα μήκους 17,8 km, το βορειότερο τμήμα της οποίας σήμερα βρίσκεται στους πρόποδες του όρους Πάρνηθας, και καταλήγει κοντά στην εκκλησία του Αγίου Δημητρίου, στην περιοχή των Αμπελοκήπων. Από το σημείο αυτό και πέρα για τα επόμενα 2,2 km συνεχίζει ως κλειστός αγωγός κατασκευασμένος λίγα μέτρα κάτω από το έδαφος έως το λόφο του Λυκαβηττού κοντά στην πόλη της Αθήνας όπου και καταλήγει σε δεξαμενή. Η σήραγγα κατασκευάστηκε με τη μέθοδο όρυξης εκ διαδοχικών φρεάτων. Ανά 35 - 40 m ανοίχθηκαν φρεάτια κατά μήκος της χάραξης του υδραγωγείου, και όταν η εκσκαφή έφτανε στο επιδιωκόμενο βάθος ο εργάτης άρχιζε να σκάβει προς τα ανάντη να βρει το επόμενο φρεάτιο. Το νερό κυλούσε με βαρύτητα ως τη δεξαμενή, μπροστά στην οποία είχε κατασκευαστεί μια μεγάλη πρόσοψη.

Στην αρχαιότητα αλλά και μεταγενέστερα, για να αυξηθεί η παροχευτικότητα του, το υδραγωγείο ενισχύθηκε πλευρικά από άλλα υδραγωγεία ή ρέματα. Εκτός αυτού η παροχευτικότητά του αυξάνεται λόγω του ότι το υδραγωγείο εμπλουτίζεται από υπόγεια ύδατα. Χάρη στις ιδιότητες των πετρωμάτων που διαπερνά και το γεγονός ότι σε μεγάλο τμήμα βρίσκεται υπό του υδροφόρου ορίζοντα, κατά μήκος της διαδρομής του το υδραγωγείο συλλέγει υπόγειο νερό.

Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η υδρολογική και υδρογεωλογική διερεύνηση του Αδριάνειου υδραγωγείου. Πιο συγκεκριμένα, η εργασία διερευνά το επίγειο και υπόγειο υδατικό σύστημα της λεκάνης απορροής του Κηφισού, η οποία είναι η ευρύτερη περιοχή μελέτης του έργου, και των λεκανών απορροής των ενισχυτικών υδραγωγείων και ρεμάτων στο Αδριάνειο. Στόχος είναι η κατανόηση και αναπαράσταση των λειτουργιών του υπόγειου υδατικού συστήματος του υδραγωγείου, με ποσοτική αξιολόγηση των εισροών και των εκροών από το σύστημα.

Η διερεύνηση επιτυγχάνεται με την ανάλυση και επεξεργασία των γεωλογικών και των υδρολογικών παραμέτρων της κάθε εξεταζόμενης λεκάνης απορροής. Αρχικά εντοπίστηκαν και περιγράφηκαν εκτενώς οι εδαφικοί σχηματισμοί των επιμέρους λεκανών, και ιδιαίτερα οι

ιδιότητες και τα χαρακτηριστικά τους. Στόχος ήταν η κατανόηση της υδρογεωλογικής συμπεριφοράς τους και τελικά η εκτίμηση των παραμέτρων του υποπρογράμματος Ζυγός με το οποίο έγινε η προσομοίωση των λεκανών απορροής. Έπειτα από το δίκτυο βροχογράφων της περιοχής, συλλέχθηκαν δεδομένα βροχόπτωσης και δυνητικής εξατμισοδιαπνοής με τα οποία έγινε ο υπολογισμός των υδρολογικών μεγεθών.

Προκειμένου να εξασφαλιστεί μια κατά το δυνατόν πιο ρεαλιστική προσομοίωση, πραγματοποιήθηκαν πολλαπλές επιλύσεις με το μοντέλο Ζυγός, δοκιμάζοντας διαφορετικές τιμές των παραμέτρων. Λόγω του ότι οι μεταβλητές εισόδου στο μοντέλο είναι μη ελεγχόμενες από μετρήσεις για την τελική επιλογή της “καλύτερης εκτίμησης” των τιμών των παραμέτρων λήφθηκαν υπόψη τα ποιοτικά χαρακτηριστικά της προσομοίωσης που αφορούν στην ευλογοφάνεια των παραμέτρων. Από τα αποτελέσματα επιλέχθηκαν έξι σεντ παραμέτρων, και για κάθε σεντ υπολογίστηκαν οι μηνιαίες τιμές επιφανειακής απορροής, πραγματικής εξατμισοδιαπνοής και υπόγειας ροής αναφερόμενες στην έκταση της κάθε εξεταζόμενης λεκάνης.

Στο τέλος, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της υδρολογικής διερεύνησης και προτείνονται θέματα για μελλοντική έρευνα, τα οποία πιστεύεται ότι θα βελτιώσουν την αναπαράσταση και την κατανόηση του υδρολογικού συστήματος του υδραγωγείου.

Abstract

The Hadrianic aqueduct is a monumental waterwork constructed during the period AD 125-140 by the Roman Emperor Hadrian and his successor Antoninus Pius. Hadrian, after conquering Athens, in order to meet the needs of the new Roman residents and to assimilate the Athenian population decided to build the aqueduct.

The backbone of the aqueduct is 17,8 km long tunnel, the northern part of which is located in the foothills of Mount Parnitha, and ends near Saint Demetrius church at Ampelokipoi district. From this point on and beyond the next 2,2 km, the aqueduct continues as a underground closed conduit up to Lykavitos hill near the city of Athens, where the water ends up at a reservoir. The tunnel was constructed using the shafts and gallery technique. Every 35-40 m wells were dug along the aqueduct's route, and when the digging reached the desired depth the worker started digging upstream to find the next well uphill and eventually connect the two wells. The water flowed down the tunnel and conduit by gravity up to the reservoir, in front of which a monumental façade was added.

In antiquity and early 1900s lateral underground branches or streams supplied the aqueduct with additional water. In addition, the aqueduct is enriched by groundwater. Due to the physical attributes and characteristics of the rocks the tunnel penetrates, and the fact that the biggest part of the tunnel is under the water table, along its course the aqueduct collects underground water.

The purpose of this diploma thesis is the hydrologic and hydrogeological research of Hadrianic aqueduct. More specifically it investigates the ground and underground water system of Kifisos basin, which is the aqueduct's broader area of study, and the water basins of the lateral branches and streams. The aim is the understanding and representation of the functions of the aqueduct's underground aquatic system by quantifying the inputs and outputs of the system.

The research is accomplished by analyzing and processing the geological and hydrological parameters of each water basin. Initially, the soil formations of each water basin were identified and then their physical attributes and characteristics were described extensively. The aim was to understand their hydrological behavior and ultimately to estimate the parameters of the program Zygos, which we would use to simulate the water basins. Following, from the rainfall network of the area, precipitation and potential evapotranspiration data were collected.

In order to achieve the most realistic simulation possible, multiple runs were carried out using the Zygos model, testing different parameter values. Because the input variables are non-controlled by in situ measurements, for the final selection of the 'best estimate' of the parameter

values, the qualitative characteristics of the simulation concerning the plausibility of the parameters were taken into account. Six sets of parameters were selected from the results, and for each set, the values of surface runoff , real evapotranspiration, and underground flow were estimated for each water basin.

Finally, conclusions are being made about the hydrological research, following recommendations for further research on the Hadrian Aqueduct.

Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη.....	iii
Abstract	v
Κατάλογος Πινάκων.....	ix
Κατάλογος Σχημάτων	xi
Κατάλογος Εικόνων	xiii
1 Εισαγωγή.....	1
1.1 Σκοπός – Αντικείμενο διπλωματικής εργασίας.....	1
1.2 Γενική Διάρθρωση.....	1
1.3 Η περιοχή μελέτης	2
1.4 Το Αδριάνειο Υδραγωγείο	3
1.4.1 Η ιστορία του Αδριάνειου Υδραγωγείου	3
1.4.2 Η κατασκευή του Αδριάνειου Υδραγωγείου	5
1.4.3 Νεότερη Ιστορία του Αδριάνειου υδραγωγείου.....	8
1.5 Ενισχυτικά υδραγωγεία	12
2 Εκτίμηση πληθυσμού και υδατικών αναγκών της ρωμαϊκής Αθήνας	15
2.1 Εκτίμηση του πληθυσμού της Ρωμαϊκής Αθήνας	15
2.1.1 Η Έκταση της πόλης	15
2.1.2 Εκτίμηση του αριθμού των νοικοκυριών	18
2.2 Εκτίμηση της ελάχιστης κατανάλωσης νερού ανά νοικοκυριό.....	20
2.3 Υδατικές ανάγκες στην αρχαία Ρώμη	22
3 Υδρογεωλογική Διερεύνηση του Αδριάνειου Υδραγωγείου	25
3.1 Γεωλογικοί σχηματισμοί της περιοχής έρευνας.....	25
3.2 Υπόγεια υδατικά συστήματα περιοχής έρευνας.....	31
4 Συλλογή και Επεξεργασία Στοιχείων	37
4.1 Το Υδρολογικό Παρατηρητήριο της Αθήνας.....	37
4.2 Το λογισμικό Υδρογνώμων	39

4.2.1	Γενικά για το λογισμικό Υδρογνώμων.....	39
4.2.2	Το υδρολογικό μοντέλο Ζυγός.....	41
4.2.3	Παράμετροι του μοντέλου Ζυγός.....	42
4.3	Επιλογή των τιμών των παραμέτρων και η υπολογιστική διαδικασία	46
5	Αποτελέσματα αριθμητικών αναλύσεων	53
5.1	Λεκάνη απορροής Κηφισού	54
5.2	Λεκάνη απορροής Χαλανδρίου	56
5.3	Λεκάνη απορροής ρέματος Κοκκιναρά.....	58
5.4	Λεκάνη απορροής Βόρειας λεκάνης του Κηφισού	60
5.5	Λεκάνη απορροής υδραγωγείων Καρυδιάς και Βαρυμπόμπης.....	62
6	Συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	65
6.1	Σύνοψη και Συμπεράσματα Διπλωματικής Εργασίας.....	65
6.2	Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	68
	Βιβλιογραφία.....	69
	Παράρτημα Α	71
	Παράρτημα Β	77
	Παράρτημα Γ.....	81

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 4.1 Χαρακτηριστικά των μετεωρολογικών σταθμών της περιοχής μελέτης.....	38
Πίνακας 4.2 Ποιοτικά χαρακτηριστικά και έκταση των λεκανών απορροής	51
Πίνακας 5.1 Επιλεγμένα σενάρια του μοντέλου Ζυγός	53
Πίνακας 5.2 Συγκεντρωτικός πίνακας επιφανειακής απορροής και υπόγειας ροής για τη λεκάνη του Κηφισού (σε 10^3 m^3)	54
Πίνακας 5.3 Συγκεντρωτικός πίνακας επιφανειακής απορροής και υπόγειας ροής για τη λεκάνη απορροής Χαλανδρίου (σε 10^3 m^3)	56
Πίνακας 5.4 Συγκεντρωτικός πίνακας μηνιαίας επιφανειακής απορροής και υπόγειας ροής του ρέματος Κοκκιναρά (σε 10^3 m^3)	58
Πίνακας 5.5 Συγκεντρωτικός πίνακας μηνιαίας επιφανειακής απορροής και υπόγειας ροής της Βόρειας λεκάνης του Κηφισού (σε 10^3 m^3)	60
Πίνακας 5.6 Συγκεντρωτικός πίνακας μηνιαίας επιφανειακής απορροής και υπόγειας ροής της λεκάνης απορροής των υδραγωγείων Καρυδιάς και Βαρυμπόμπης (σε 10^3 m^3).....	62

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2.1 Ραβδόγραμματα συνολικής ημερήσιας κατανάλωσης για διάφορα σενάρια πληθυσμού και ημερήσιας κατανάλωσης ανά άτομο σε μια ρωμαϊκή πόλη	24
Σχήμα 4.1 Σχηματική απεικόνιση του μοντέλου Ζυγός.....	41
Σχήμα 4.2 Σχηματική απεικόνιση της επιρροής χαρακτηριστικών σχημάτων δομών εδάφους στον ρυθμό διήθησης (Πηγή: Irrigation Water Management (Brouwer, 1985))	45
Σχήμα 4.3 Διάγραμμα μέσης ετήσιας βροχόπτωσης της λεκάνης απορροής για την χρονική περίοδο 2005-2016.....	48
Σχήμα 4.4 Διάγραμμα μέσης μηνιαίας βροχόπτωσης της περιοχής μελέτης για την χρονική περίοδο 2005-2016.....	48
Σχήμα 4.5 Διάγραμμα μέσης ετήσιας δυνητικής εξατμισοδιαπνοής της περιοχής μελέτης για την χρονική περίοδο 2005-2016.....	49
Σχήμα 5.1 Διάγραμμα μέσης μηνιαίας επιφανειακής απορροής της λεκάνης Κηφισού για τα εξεταζόμενα έξι σενάρια	55
Σχήμα 5.2 Διάγραμμα υπόγειας ροής ανά μήνα για τη λεκάνη Κηφισού για τα εξεταζόμενα έξι σενάρια	56
Σχήμα 5.3 Διάγραμμα μηνιαίας επιφανειακής απορροής της λεκάνης Χαλανδρίου για τα εξεταζόμενα έξι σενάρια	57
Σχήμα 5.4 Διάγραμμα μηνιαίας υπόγειας ροής της λεκάνης απορροής Χαλανδρίου για τα έξι εξεταζόμενα σενάρια.....	58
Σχήμα 5.5 Διάγραμμα επιφανειακής απορροής της λεκάνης απορροής του ρέματος Κοκκιναρά για τα εξεταζόμενα έξι σενάρια.....	59
Σχήμα 5.6 Διάγραμμα υπόγειας ροής ανά μήνα της λεκάνης απορροής του ρέματος Κοκκιναρά για τα έξι εξεταζόμενα σενάρια.....	60
Σχήμα 5.7 Διάγραμμα μηνιαίας επιφανειακής απορροής της Βόρειας λεκάνης απορροής Κηφισού για τα έξι εξεταζόμενα σενάρια	61
Σχήμα 5.8 Διάγραμμα υπόγειας ροής ανά μήνα της λεκάνης απορροής της Βόρειας λεκάνης Κηφισού για τα έξι εξεταζόμενα σενάρια	62
Σχήμα 5.9 Διάγραμμα επιφανειακής απορροής της λεκάνης των υδραγωγείων Καρυδιάς και Βαρυμπόμπης	63
Σχήμα 5.10 Διάγραμμα υπόγειας ροής ανά μήνα της λεκάνης απορροής των υδραγωγείων Καρυδιάς και Βαρυμπόμπης για τα έξι εξεταζόμενα σενάρια	64

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1.1 Ο τρόπος κατασκευής του Αδριάνειου Υδραγωγείου (Πηγή: ένθετο '7 ημέρες' της εφημερίδας Καθημερινή, άρθρο του καθ. Ε. Κορρέ, 24/3/2002)	7
Εικόνα 1.2 Διατομές του Αδριάνειου υδραγωγείου με διαφορετικά σχήματα οροφής, πλάτη και ύψη (Πηγή: Π. Δευτεραίος)	7
Εικόνα 1.3 Τομή ανακατασκευασμένης δεξαμενής (Πηγή: ULEN,1934).....	10
Εικόνα 1.4 Κάτοψη ανακατασκευασμένης δεξαμενής (Πηγή: ULEN, 1934)	10
Εικόνα 1.5 Χάρτης με τα ενισχυτικά υδραγωγεία και ρέματα του Αδριάνειου υδραγωγείου	12
Εικόνα 1.6 Κυκλική δεξαμενή Χαλανδρίου (Πηγή: Π. Δευτεραίος)	14
Εικόνα 2.1 Τοπογραφικό διάγραμμα της αρχαίας πόλης των Αθηνών και των τειχών της στη ρωμαϊκή εποχή (Πηγή: Τραυλός,1982)	17
Εικόνα 2.2 Τρισδιάστατη απεικόνιση της ρωμαϊκής Αθήνας κατά τον 2ο αιώνα μ.Χ.	17
Εικόνα 2.3 Σχηματική απεικόνιση της πολεοδομικής ανάπτυξης της Αθήνας (Πηγή: Μαυρίκη Μαγδαληνή, 2013)	18
Εικόνα 2.4 Σχηματική απεικόνιση πόλης αναπτυγμένης με ιπποδάμειο σύστημα (Πηγή: Μαυρίκη Μαγδαληνή, 2013)	20
Εικόνα 3.1 Οριζοντιογραφία του άξονα του Αδριάνειου υδραγωγείου και οι γεωλογικοί σχηματισμοί κατά μήκος του (Chiotis, 2018)	29
Εικόνα 3.2 Τα υπόγεια υδατικά συστήματα της Αττικής και η διαδρομή του Αδριάνειου υδραγωγείου	33
Εικόνα 4.1 Θέσεις μετεωρολογικών σταθμών	38
Εικόνα 4.2 Εισαγωγική Οθόνη του λογισμικού Υδρογνώμων.....	40
Εικόνα 4.3 Λεκάνες απορροής των κυριότερων ενισχυτικών υδραγωγείων στο Αδριάνειο ..	47
Εικόνα 4.4 Φόρμα αντιστοίχισης χρονοσειρών.....	52
Εικόνα 4.5 Κεντρική φόρμα του μοντέλου Ζυγός	52
Εικόνα 6.1 Χάρτης των λεκανών απορροής ενισχυτικών υδραγωγείων στο Αδριάνειο με τις εκτιμώμενες ετήσιες επιφανειακές απορροές και υπόγειες ροές	66
Εικόνα 6.2 Εσωτερικό δεξαμενής	67

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

1 Εισαγωγή

1.1 Σκοπός – Αντικείμενο διπλωματικής εργασίας

Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η υδρολογική και υδρογεωλογική διερεύνηση του Αδριάνειου υδραγωγείου. Η εργασία διερευνά το επιφανειακό και υπόγειο υδατικό σύστημα της λεκάνης απορροής του Κηφισού, η οποία είναι η ευρύτερη περιοχή μελέτης του έργου, και των λεκανών απορροής των ενισχυτικών υδραγωγείων και ρεμάτων στο Αδριάνειο. Στην συγκεκριμένη εργασία, η διερεύνηση επιτυγχάνεται με την ανάλυση και επεξεργασία των γεωλογικών και των υδρολογικών παραμέτρων της κάθε λεκάνης απορροής. Θεωρώντας την κατείσδυση ως τη σημαντικότερη διεργασία για τον καθορισμό των αποθεμάτων των υπόγειων υδροφορέων, για διάφορες τιμές των υδρογεωλογικών παραμέτρων εκτιμάται η απόκριση του συστήματος και τελικά η ποσότητα νερού που διοχετεύει το υδραγωγείο.

Στόχος είναι η κατανόηση και αναπαράσταση των λειτουργιών του επιφανειακού και υπόγειου υδατικού συστήματος του υδραγωγείου, με ποσοτική αξιολόγηση των εισροών και των εκροών από το σύστημα. Έτσι θα διαμορφωθεί μια βάση για τη διαχείριση του έργου και του νερού που μεταφέρεται.

1.2 Γενική Διάρθρωση

Συνοπτικά τα περιεχόμενα της διπλωματικής εργασίας έχουν ως εξής,

Στο κεφάλαιο 1 παρατίθενται γενικά στοιχεία που αφορούν το αντικείμενο και τη δομή της παρούσης διπλωματικής εργασίας, περιγράφεται η περιοχή μελέτης, και γίνεται ιστορική αναδρομή του Αδριάνειου Υδραγωγείου από την αρχαιότητα έως και σήμερα. Ακόμη περιγράφεται ο τρόπος κατασκευής και λειτουργίας, όπως επίσης οι πηγές και τα πλευρικά υδραγωγεία που διοχέτευαν νερό στο Αδριάνειο.

Στο κεφάλαιο 2 γίνεται εκτίμηση του πληθυσμού της ρωμαϊκής Αθήνας χρησιμοποιώντας αρχαιολογικές ανασκαφές και ιστορικά δεδομένα, με σκοπό τον υπολογισμό της συνολικής υδατικής κατανάλωσης την εποχή εκείνη. Επιπλέον συγκρίνεται η εκτιμώμενη κατανάλωση με την δυνατότητα του υδραγωγείου για να ελεγχθεί η επάρκεια του, και τέλος εκτιμάται η ελάχιστη υδατική ανάγκη της πόλης.

Στο κεφάλαιο 3 περιγράφονται οι γεωλογικοί σχηματισμοί που επικρατούν στην ευρύτερη περιοχή του Αδριάνειου υδραγωγείου και των ενισχυτικών του υδραγωγείων, με σκοπό την κατανόηση της υδρογεωλογικής συμπεριφοράς των σχηματισμών και τελικά την εκτίμηση των παραμέτρων του υποπρογράμματος Ζυγός. Επίσης καθορίζονται και περιγράφονται τα υπόγεια υδατικά συστήματα της ευρύτερης περιοχής του έργου σύμφωνα με το Σχέδιο Διαχείρισης των Λεκανών Απορροής Ποταμών Υδατικού Διαμερίσματος Αττικής της ΕΥΔΑΠ.

Στο κεφάλαιο 4 δίνονται πληροφορίες για το δίκτυο βροχογράφων, των οποίων τα δεδομένα συλλέχθηκαν και στη συνέχεια επεξεργάστηκαν για τους σκοπούς της μελέτης, και περιγράφονται οι βασικές αρχές του προγράμματος Υδρογνώμων και του υποπρογράμματός του Ζυγός που χρησιμοποιήθηκαν. Ακόμη γίνεται αναφορά στις παραμέτρους του υποπρογράμματος Ζυγός που λήφθηκαν υπόψη στην απεικόνιση των υδρολογικών διεργασιών της περιοχής μελέτης. Τέλος περιγράφεται η υπολογιστική διαδικασία που ακολουθήθηκε.

Στο κεφάλαιο 5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων για τη λεκάνη του Κηφισού και των λεκανών απορροής των ενισχυτικών υδραγωγείων στο Αδριάνειο.

Στο κεφάλαιο 6 περιγράφονται τα συμπεράσματα από την υδρολογική διερεύνηση του Αδριάνειου υδραγωγείου και προτείνονται θέματα για μελλοντική έρευνα.

1.3 Η περιοχή μελέτης

Το λεκανοπέδιο της Αττικής ορίζεται από τα βουνά που το περιβάλλουν, Αιγάλεω, Πάρνηθα, Πεντέλη και Υμηττός, και την ακτογραμμή του Σαρωνικού κόλπου. Η δυτική-βορειοδυτική πλευρά οριοθετείται από το όρος Αιγάλεω στο οποίο λείπουν επιφανειακές απορροές. Η βόρειος πλευρά καλύπτεται από το όρος Πάρνηθα ενώ η βορειοανατολική από το όρος Πεντέλη. Η κατεύθυνση των δύο αυτών ορέων επιδρά ανασταλτικά επί των βόρειων ανέμων και επί των βροχοπτώσεων τα οποία σε συνδυασμό με τη γεωλογία τους δημιουργούν ένα πυκνό δίκτυο απορροής των υδάτων. Στα ανατολικά προς νότια εκτείνεται το όρος Υμηττός με επίσης πλούσια απορροή υδάτων. Φυσικό επακόλουθο της γεωγραφίας αυτής είναι τα ποτάμια της Αττικής να έχουν κατεύθυνση από τα βορειοδυτικά προς τα νοτιοανατολικά.

Η εντός του λεκανοπεδίου περιοχή λείπει επιφανειακών απορροών. Υπάρχουν λίγες πηγές ενώ εξαιτίας της υδροπερατότητας του εδάφους το νερό διηθείται δημιουργώντας υπόγειους υδροφορείς. Τα υπόγεια ρεύματα, αν και περνούν κάτω από ένα μικρό ποσοστό της περιοχής, είχαν ιδιαίτερη σημασία στην αρχαία Αθήνα καθώς εξασφάλιζαν όλο το χρόνο πόσιμο υπόγειο νερό στους κατοίκους. Σύμφωνα με αρχαιολογικές έρευνες οι περιοχές κατοικίας συμπίπτουν με τις περιοχές όπου έρρεαν υπόγεια νερά.

Το κλίμα της Αττικής είναι εύκρατο και εντάσσεται κλιματολογικά στο μεσογειακό τύπο κλίματος. Χαρακτηρίζεται από ήπιες θερμοκρασίες, ξηρά και ζεστά καλοκαίρια, ήπιους βροχερούς χειμώνες, μεγάλη φωτεινότητα όλο το χρόνο και δεν εμφανίζονται μεγάλες μετεωρολογικές ακρότητες. Λόγω της διάταξης των ορέων εμποδίζεται η βροχόπτωση εντός του λεκανοπεδίου γι' αυτό και τα ύψη βροχής που σημειώνονται δεν ξεπερνούν τα 400-450mm το χρόνο. Υφίστανται επομένως ιδανικές συνθήκες διαμονής των ανθρώπων οι οποίοι κατοίκησαν το χώρο για πολλούς αιώνες.

Στην αρχαία Ελλάδα απέφευγαν την ίδρυση πόλεως κοντά σε μεγάλα ποτάμια και λίμνες. Πιθανότατα αυτό συνέβαινε για την προστασία των κατοίκων από πλημμύρες και ασθένειες (ελονοσία) όπως επίσης για να απολαμβάνουν το οφέλη ενός ξηρού κλίματος. Όμως η ανεύρεση, διάθεση, επάρκεια και ποιότητα του νερού αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την ίδρυση και την ανάπτυξη μια πόλης.

Οι υδρολογικές συνθήκες, το κλίμα και η θέση καθόρισαν τον τρόπο με τον οποίο υδρεύτηκε η αρχαία Αθήνα. Αρχικά οι ανάγκες σε νερό ικανοποιούνταν από τα πηγάδια, υδατοδεξαμενές όπου μάζευαν το βρόχινο νερό, πηγές και ποτάμια. Όμως αυτοί οι υδάτινοι πόροι δεν έδιναν τακτική και επαρκή ποσότητα, ιδιαίτερα κατά τους θερινούς μήνες, γεγονός που περιόριζε τις δραστηριότητες των κατοίκων και την ενδεχόμενη ανάπτυξη της πόλης. Ο περιορισμός αυτός ανάγκασε τους Αθηναίους να αναζητήσουν νερό από πιο μακρινές περιοχές.

Η μεγάλη απόσταση της Αθήνας από υδάτινα σώματα και το ξηρό κλίμα είχε ως συνέπεια την κατασκευή υδραυλικών έργων για την συλλογή και μεταφορά του νερού. Έτσι άρχισαν να κατασκευάζονται υδραγωγεία μικρής και μεγάλης κλίμακας. Το πιο γνωστό μεγάλο υδραγωγείο είναι το Πεισιστράτειο το οποίο υδρομάστευε τα νερά του Υμηττού. Παράλληλα δημιουργήθηκε και ένα ευρύ δίκτυο διανομής του νερού καθώς και δίκτυο αποχέτευσης.

1.4 Το Αδριάνειο Υδραγωγείο

1.4.1 Η ιστορία του Αδριάνειου Υδραγωγείου

Κατά τη διάρκεια της ρωμαϊκής περιόδου, στην Αθήνα δόθηκε ειδικό καθεστώς αυτονομίας λόγω της έντονης πνευματικής κίνησης που υπήρχε σε αυτή. Η Αθήνα συνέχιζε να συγκεντρώνει σημαντικές προσωπικότητες των γραμμάτων της εποχής ενώ αρκετοί Ρωμαίοι απέκτησαν κατοικίες στην πόλη. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα να κατασκευαστούν πολλά δημόσια έργα, τα σημαντικότερα από τα οποία κατασκευάστηκαν επί αυτοκρατορίας του Αδριανού.

Ο Αυτοκράτορας Αδριανός επιθυμούσε την κυριαρχία μέσω της ειρηνικής οδού. Θέλοντας να ενδυναμώσει την αυτοκρατορία εκ των έσω πραγματοποίησε μεγάλα ταξίδια, επιθεωρώντας και βελτιώνοντας τις ρωμαϊκές επαρχίες. Στις επισκέψεις του συνοδευόταν από πλήθος αυλικών και διοικητικών υπαλλήλων και συχνά έκανε δωρεές ή έδινε οδηγίες για την ανέγερση δημοσίων κτιρίων.

Τα πιο συνηθισμένα δημόσια έργα που κατασκευάζονταν ήταν τα υδραγωγεία. Επί Ρωμαϊκής Αυτοκρατορίας το νερό αναγνωριζόταν ως δημόσιο αγαθό που έπρεπε να είναι προσβάσιμο από όλους τους πολίτες. Σε πολλές επαρχίες της αυτοκρατορίας όμως οι φυσικές πηγές νερού δεν έδιναν αρκετή ποσότητα, οπότε οι αρχές κατασκεύαζαν υδραγωγεία για τη μεταφορά του νερού από διπλανή περιοχή. Η κατασκευή ενός υδραγωγείου ήταν πολύ δαπανηρή. Η χρηματοδότηση του γινόταν από τον αυτοκράτορα και από εύπορους πολίτες. Επομένως μπορεί να εννοηθεί ότι τα υδραγωγεία κατασκευάζονταν για την καλύτερη ποιότητα ζωής και την ανάπτυξη της πόλης και όχι για εμπορικούς σκοπούς.

Ο Αδριανός επισκέφτηκε την Ελλάδα τρεις φορές κατά τη διάρκεια της θητείας του και ανάμεσα στις πολλές ευεργεσίες του ήταν η κατασκευή του Αδριάνειου υδραγωγείου. Κατά πάσα πιθανότητα η κατασκευή ξεκίνησε κατά την πρώτη επίσκεψή του το 125 μ.Χ. και περατώθηκε από το διάδοχό του Αντωνίνο Πίο το 140 μ.Χ..

Κατά το 2ο αιώνα έγινε από τον αυτοκράτορα Αδριανό μια σημαντική επέκταση της πόλης προς τα ανατολικά, στη θέση του σημερινού Εθνικού Κήπου, του Ζάππειου και της περιοχής της πλατείας Συντάγματος. Η νέα συνοικία χαρακτηρίστηκε ως νέα πόλη και ξεχώρισε από την παλιά με μια τιμητική ασίδα που δώρισαν οι Αθηναίοι στον αυτοκράτορα. Η νέα πόλη αποτέλεσε συνέχεια της παλιάς πόλης προς τα ανατολικά και νοτιοανατολικά, αφού καταδαφίστηκε μέρος του οχυρωματικού τείχους της Αθήνας. Η περιοχή προοριζόταν για εύπορους Αθηναίους και Ρωμαίους που εγκαταστάθηκαν στην πόλη και περιλάμβανε οικόπεδα όπου χτιζόταν επαύλεις και χώροι αναψυχής.

Η συμβολή του αυτοκράτορα Αδριανού στην ανάπτυξη της Αθήνας δεν περιορίστηκε μόνο στην κατασκευή νέων κτιρίων ή την επέκταση της πόλης. Όταν ήρθε στην Αθήνα βρήκε ένα πολυδαίδαλο δίκτυο ύδρευσης το οποίο ικανοποιούσε τις βασικές υδρευτικές ανάγκες των κατοίκων. Οι Ρωμαίοι όμως είχαν διαφορετικό τρόπο ζωής. Η περιποίηση του σώματος αποτελούσε ένα βασικό στοιχείο της καθημερινής ζωής τους, γι' αυτό έκαναν ημερήσιο μπάνιο είτε στα δημόσια λουτρά είτε σε ιδιωτικά, ή εάν ήταν αρκετά εύποροι και διέθεταν λουτρά στο σπίτι τους. Για να καλυφθούν οι ανάγκες των Ρωμαίων κατοίκων αλλά και για την αφομοίωση

του μη ρωμαϊκού πληθυσμού ο Αδριανός προχώρησε στην κατασκευή του Αδριάνειου υδραγωγείου.

Στην αρχαιότητα τα υδραγωγεία εξασφάλιζαν τακτικά και ελεγχόμενα νερό σε περιοχές που διαφορετικά δεν θα είχαν επαρκή ποσότητα για οικιακή, αγροτική και βιομηχανική χρήση. Η κατασκευή ξεκινούσε με την ανεύρεση πηγής. Το νερό συλλεγόταν και ύστερα κυλούσε με βαρύτητα μέσω αγωγών φτιαγμένων από πέτρα ή τερακότα. Ανάλογα με την τοπογραφία της περιοχής κατασκευάζονταν σήραγγες, ανοιχτοί ή κλειστοί αγωγοί και γέφυρες.

Αν και σε μεγάλο βαθμό το φυσικό περιβάλλον της Αττικής επέβαλλε τον τρόπο κατασκευής του υδραγωγείου, οι χρησιμοποιούμενες τεχνικές του 2ου αιώνα μ.Χ. σίγουρα επηρέασαν τους Ρωμαίους σχετικά με το πού και πώς αυτό θα κατασκευαζόταν. Το πρώτο βήμα στο σχεδιασμό του υδραγωγείου ήταν από πού θα μεταφερόταν νερό στην πόλη. Σε αντίθεση με τα υπόλοιπα υδραγωγεία που υδρομάστευαν από την Πεντέλη και τον Υμηττό ως πηγή επιλέχτηκαν τα νερά της Πάρνηθας. Το δεύτερο βήμα αφορούσε στο πού θα κατέληγε το υδραγωγείο. Για το άκρο του σχεδιάστηκε μια δεξαμενή στο λόφο του Λυκαβηττού από την οποία μέσω κλειστών αγωγών το νερό μεταφερόταν στην πόλη. Όταν αποφασίστηκε η θέση αρχής και τέλους του υδραγωγείου με βάση την τοπογραφία χαραχτηκε η διαδρομή του.

1.4.2 Η κατασκευή του Αδριάνειου Υδραγωγείου

Η εκσκαφή πηγαδιών και σηράγγων ήταν μια τεχνική γνωστή για τους κατοίκους της εποχής εκείνης. Οι σήραγγες όμως, ιδιαίτερα για μεγάλες αποστάσεις ήταν ασυνήθιστες για ρωμαϊκά υδραγωγεία του 2ου αιώνα μ.Χ. Λόγω των υδρολογικών περιορισμών της περιοχής οι κάτοικοι προσπαθούσαν να αξιοποιήσουν το υπόγειο νερό. Είναι επομένως πιθανό, όταν έφτασαν οι Ρωμαίοι μηχανικοί στην Αθήνα, αφού έκαναν έρευνα, να αποφάσισαν ότι μια βαθιά μεγάλου μήκους σήραγγα ήταν η κατάλληλη λύση για το φυσικό περιβάλλον της περιοχής. Η κατασκευή φαίνεται να είναι μια μείξη παραδοσιακών τοπικών τεχνικών και ρωμαϊκών κατασκευαστικών τεχνικών.

Η σήραγγα κατασκευάστηκε με τη μέθοδο όρυξης εκ διαδοχικών φρεάτων. Ανά 35 - 40 m ανοίγονταν φρεάτια κατά μήκος της χάραξης του υδραγωγείου. Το βάθος τους εξαρτιόταν από την απαιτούμενη κλίση που έπρεπε να έχει ο πυθμένας ώστε το νερό να κυλά με βαρύτητα. Στο αρχικό τμήμα (Πάρνηθα) ποικίλλει μεταξύ 15 έως 35 m ενώ στο τελικό (Αμπελόκηποι) σταδιακά μειώνεται έως ότου βρεθεί στην επιφάνεια. Η εκσκαφή διαδοχικών φρεατίων είχε το πλεονέκτημα δημιουργίας περισσότερων του ενός μετώπων εργασίας, τον αερισμό, τον φωτισμό και τη δυνατότητα μεταφοράς των υλικών.

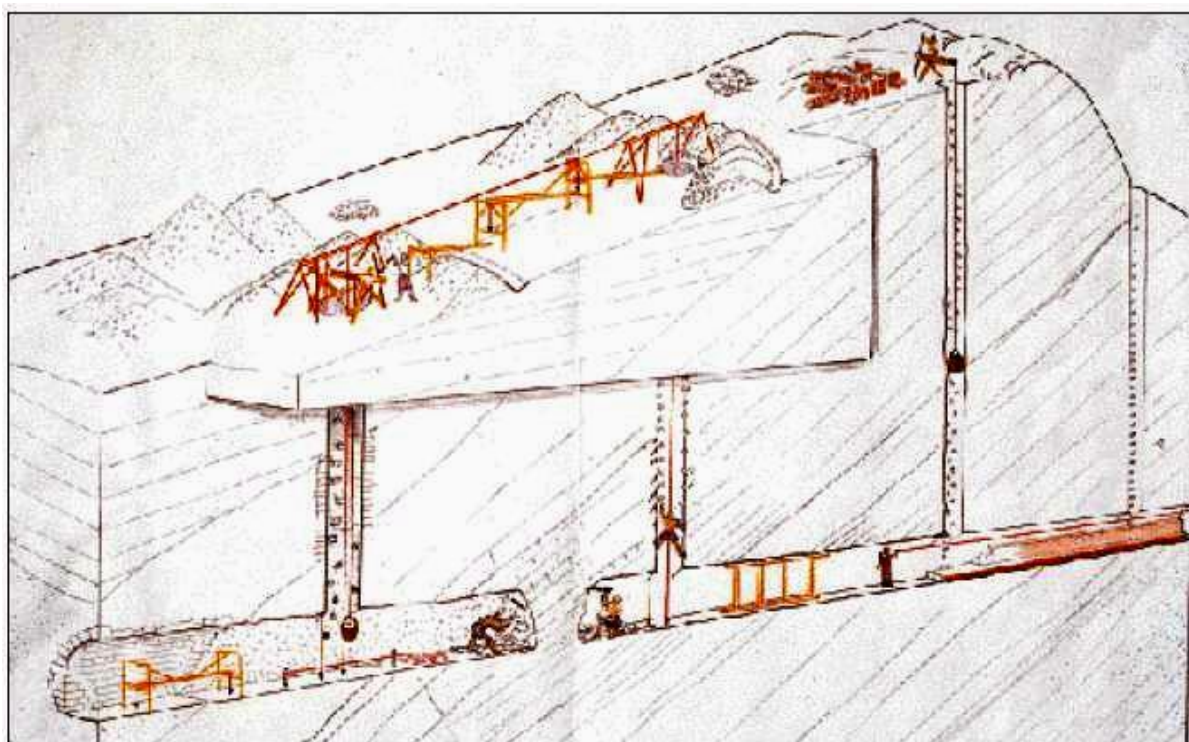
Ο κορμός του έργου είναι μια σήραγγα μήκους 17,8 km, το βορειότερο τμήμα της οποίας σήμερα βρίσκεται στο κέντρο του Ολυμπιακού χωριού των Ολυμπιακών Αγώνων του 2004, στους πρόποδες του όρους της Πάρνηθας, σε βάθος 30,5 m. Εκεί υπάρχει κεκλιμένη στοά που παλαιότερα οδηγούσε το νερό, που έφτανε από επιφανειακό κανάλι, στη σήραγγα. Η σήραγγα καταλήγει κοντά στην εκκλησία του Αγίου Δημητρίου, στην περιοχή των Αμπελοκήπων σε βάθος 6 m. Από το σημείο αυτό και πέρα για τα επόμενα 2,2 km συνεχίζει ως κλειστός αγωγός κατασκευασμένος λίγα μέτρα κάτω από το έδαφος έως το λόφο του Λυκαβηττού κοντά την πόλη της Αθήνας. Το νερό κυλούσε με βαρύτητα ως τη δεξαμενή, μπροστά της οποίας είχε κατασκευαστεί μια μεγάλη πρόσοψη (πρότυλο).

Η δεξαμενή κατασκευάστηκε στη νοτιοδυτική πλαγιά του λόφου του Λυκαβηττού χωμένη κατά το ήμισυ μέσα σε αυτή. Οι διαστάσεις της ήταν 26,10 m μήκος, 9,30 m πλάτος και 1,85 ύψος με χωρητικότητα 450 m³ (Παππάς, 1999). Η οροφή ήταν ρωμαϊκός θόλος και στηριζόταν σε 12 υποστυλώματα.

Στην πρόσοψη της δεξαμενής τοποθετήθηκαν τέσσερις ιωνικοί κίονες χωρίς ραβδώσεις, στους οποίους πάνω από το μεσαίο μετακίονιο σχηματιζόταν τοξωτή καμάρα. Εκατέρωθεν της καμάρας λαξεύτηκε επιγραφή στα λατινικά, η οποία σύμφωνα με τον Κορδέλλα έχει την παρακάτω ερμηνεία: «Αυτοκράτωρ Καίσαρ Αίλιος Αδριανός Αντωνίνος Αύγουστος, ευσεβής ύπατος, υδραγωγείον εν νέαις Αθήναις αρξάμενον υπό του θείου πατρός, επέρανεν και αφιέρωσεν».

Η διάμετρος του κάθε φρεατίου ήταν τέτοια ώστε να χωράει ένας εργάτης. Στην κορυφή του φρεατίου υπήρχε μηχανισμός ανύψωσης με κάδο που χρησίμευε για την απομάκρυνση του εδαφικού υλικού. Όταν η εκσκαφή έφτανε στο επιδιωκόμενο βάθος ο εργάτης άρχιζε να σκάβει προς τα ανάντη να βρει το επόμενο φρεάτιο. Εξαιτίας του ότι το έργο ήταν υπόγειο και της διαθέσιμης τεχνολογίας, η πορεία μερικές φορές παρέκκλινε της γεωμετρικά σχεδιασμένης. Όταν η παρέκκλιση ήταν στο οριζόντιο επίπεδο δημιουργούνταν καμπυλώσεις μορφής S, ενώ όταν ήταν στο κατακόρυφο η σήραγγα αυξανόταν σε ύψος.

Στην εικόνα 1.1 φαίνεται ο τρόπος κατασκευής του Αδριάνειου υδραγωγείου.



Εικόνα 1.1 Ο τρόπος κατασκευής του Αδριάνειου Υδραγωγείου (Πηγή: ένθετο '7 ημέρες' της εφημερίδας Καθημερινή, άρθρο του καθ. Ε. Κορρέ, 24/3/2002)

Η εκσκαφή της σήραγγας σε διάφορα σημεία αντιμετώπιζε προβλήματα ευστάθειας και κατασκευής καθώς τα βάθη των φρεατίων συχνά βρίσκονταν υπό του υδροφόρου ορίζοντα. Το πρώτο εξαρτιόταν από τα πετρώματα που διαπερνούσε. Όταν το πέτρωμα ήταν σκληρό οι διαστάσεις ήταν οι ελάχιστες δυνατές ενώ όταν ήταν μαλακό η σήραγγα χιζόταν εσωτερικά για να υποστηριχθεί. Έτσι κατά μήκος του υδραγωγείου συναντώνται ποικίλες διατομές με διαφορετικά σχήματα οροφής (ημικυκλικές, τριγωνικές, ορθογωνικές), διαφορετικά πλάτη και ύψη και διαφορετικές επενδύσεις (Εικόνα 1.2).



Εικόνα 1.2 Διατομές του Αδριάνειου υδραγωγείου με διαφορετικά σχήματα οροφής, πλάτη και ύψη (Πηγή: Π. Δευτεραίος)

Κατά την κατασκευή του υδραγωγείου ένα δίκτυο οδών που θα συνδέονταν με αυτό ήταν απαραίτητο για τη μεταφορά εργασίας και υλικών. Ακόμη και μετά την ολοκλήρωση της

κατασκευής, η πρόσβαση στο υδραγωγείο θα ήταν απαραίτητη για τη συντήρησή του. Θεωρείται πιθανό πως για τις εργασίες κατασκευής η γη πάνω από τη διαδρομή του υδραγωγείου αγοράστηκε από τους ιδιώτες, ενώ με τη λήξη του έργου χρησιμοποιήθηκε ως αρχαίος δρόμος (Leigh, 1998).

Καθώς τα νερά των πηγών δεν ήταν αρκετά, το υδραγωγείο σχεδιάστηκε έτσι ώστε να εκμεταλλεύεται υπόγεια ύδατα. Χάρη στις ιδιότητες των πετρωμάτων που διαπερνά και το γεγονός ότι σε μεγάλο τμήμα βρίσκεται υπό του υδροφόρου ορίζοντα, κατά μήκος της διαδρομής του το υδραγωγείο συλλέγει υπόγειο νερό. Ακόμη σε κάποια σημεία ενισχύεται με νερά από το βουνό της Πεντέλης. Έτσι καταφέρνει να μεταφέρει επαρκή ποσότητα νερού και να περιορίσει την επίδραση από τις διακυμάνσεις σε νερό των πηγών τους θερινούς μήνες.

1.4.3 Νεότερη Ιστορία του Αδριάνειου υδραγωγείου

Η εγκατάλειψη του υδραγωγείου είναι συνδεδεμένη με την πληθυσμιακή μείωση και οικονομική ύφεση της Αθήνας. Τα τελευταία χρόνια της Ρωμαϊκής αυτοκρατορίας η πόλη λεηλατήθηκε και καταστράφηκε από φυλές του Βορρά ενώ με την ίδρυση του Βυζαντίου και την καθιέρωση της Κωνσταντινούπολης ως πρωτεύουσάς του, έχασε τη θέση της ως πνευματικό κέντρο. Έτσι η Αθήνα μετατράπηκε σε μια απλή περιφερειακή πόλη με λίγους κατοίκους.

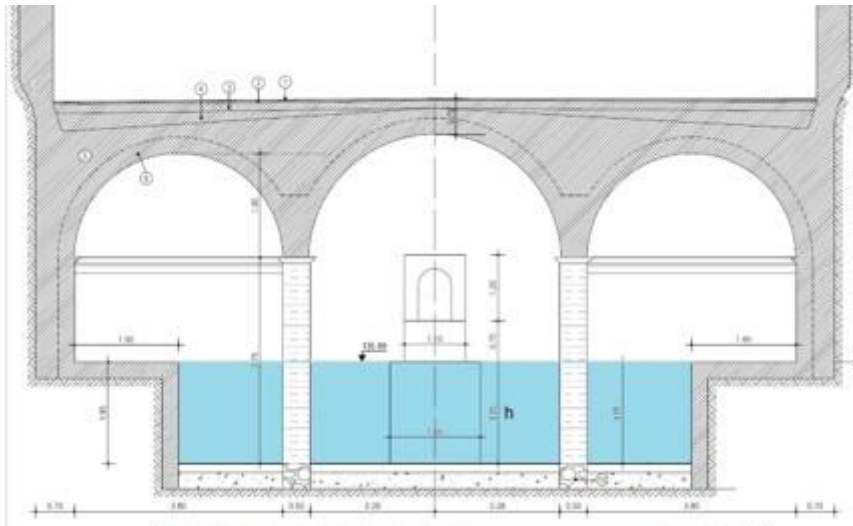
Επί Τουρκοκρατίας η θέση του Αδριάνειου υδραγωγείου δεν ήταν γνωστή. Ήταν γνωστό όμως πως στην περιοχή των Αμπελοκήπων κοντά στην εκκλησία του Αγίου Δημητρίου ανάβλυζε νερό. Στο σημείο εκείνο το περιβάλλον πέτρωμα είναι Αθηναϊκός σχιστόλιθος και η σήραγγα βρίσκεται σε μικρό βάθος υπό του υδροφόρου ορίζοντα, πράγμα που σημαίνει πως ευνοούνται καταπτώσεις της σήραγγας. Πιθανόν λοιπόν σε εκείνο το τμήμα το έδαφος κάθισε και λόγω υπερχειλίσης σχηματίστηκε πηγή. Οι Τούρκοι χρησιμοποίησαν την πηγή αυτή για την άρδευση της γύρω περιοχής (Παππάς, 1999).

Με την απελευθέρωση της Ελλάδας από τους Τούρκους το 1824, η Αθήνα ήταν μια μικρή ημιέρημη και κατεστραμμένη πόλη. Δέκα χρόνια αργότερα, το 1834, αποφασίστηκε η μεταφορά της πρωτεύουσας του νεοσύστατου κράτους από το Ναύπλιο στην Αθήνα. Κατά συνέπεια, για την καλή λειτουργία της νέας πρωτεύουσας, οι τοπικές αρχές έπρεπε να αξιολογήσουν τις ανάγκες της πόλης, να λυθούν τα διάφορα προβλήματα που εμφάνιζε και να αποκτήσει η πόλη οργάνωση και σχέδιο.

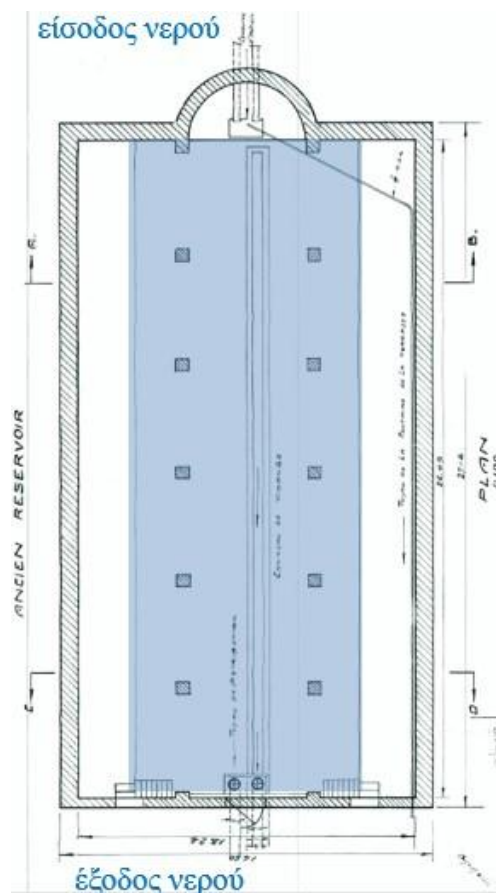
Ένα από τα πρώτα προβλήματα που είχαν να λύσουν οι μηχανικοί που ανέλαβαν το έργο ήταν το πρόβλημα της ύδρευσης. Στις προσπάθειες ανεύρεσης φυσικών πηγών βρέθηκε η πηγή στην περιοχή των Αμπελοκήπων. Έτσι στην αρχή για την ύδρευση της πόλης χρησιμοποιήθηκε αυτή η πηγή, γρήγορα όμως έγινε αντιληπτό πως δεν το νερό δεν ήταν επαρκές (Leigh, 1998). Η έκταση της Αθήνας μεγάλωσε ταχύτατα και παρουσίασε έντονη δημογραφική ανάπτυξη.

Το 1847 υπό δημαρχίας Ελευθέριου Βενιζέλου ξεκίνησε η εκσκαφή της περιοχής γύρω από την εκκλησία του Αγίου Δημητρίου. Βόρεια της εκκλησίας ανακαλύφθηκε το ρωμαϊκό υδραγωγείο και καθαρίστηκε για περίπου 4 km (Κορδέλλας, 1879). Ύστερα το 1870 επί δημαρχίας Π. Κυριακού αποφασίστηκε να χρησιμοποιηθεί το υδραγωγείο για την ύδρευση της Αθήνας. Ξεκίνησαν εργασίες καθαρισμού και ανακατασκευής του τμήματος από τους Αμπελόκηπους προς το Κολωνάκι και κατασκευής μια δεξαμενής στο τέλος του αγωγού. Κατά την εκσκαφή όμως βρέθηκε η ρωμαϊκή δεξαμενή, η οποία καθαρίστηκε και επιδιορθώθηκε.

Η ρωμαϊκή δεξαμενή ανακατασκευάστηκε και τέθηκε σε λειτουργία από το Δήμο Αθηναίων τα έτη 1871-1872. Επειδή παρατηρήθηκε θολότητα στο νερό κατόπιν πρότασης του δημάρχου Π. Κυριακού το 1880, δίπλα από την ανακατασκευασθείσα δεξαμενή κατασκευάστηκε μια νέα λιθόκτιστη δημοτική δεξαμενή που θα λειτουργούσε σαν διυλιστήριο. Οι δύο δεξαμενές μαζί είχαν χωρητικότητα γύρω στα 2200 κυβικά μέτρα νερού και λειτουργούσαν ως διθάλαμο σύστημα. Η δημοτική δεξαμενή διέθετε δύο ίσους θαλάμους διαστάσεων 17,38x18,88 m και βάθους 2,75 m, με διαχωριστικό τοίχο, η στέψη του οποίου χρησίμευε ως υπερχειλιστής (Παππάς, 1999). Στη νέα δεξαμενή το νερό περνούσε από φίλτρο άμμου-χαλικιού, ενώ από την παλαιά δεξαμενή έφευγε στη συνέχεια προς κατανάλωση. Στις εικόνες 1.3 και 1.4 φαίνεται η τομή και η κάτοψη της ανακατασκευασμένης Αδριάνειας δεξαμενής.



Εικόνα 1.3 Τομή ανακατασκευασμένης δεξαμενής (Πηγή: ULEN,1934)



Εικόνα 1.4 Κάτοψη ανακατασκευασμένης δεξαμενής (Πηγή: ULEN, 1934)

Σύμφωνα με τον μηχανικό Ernst Ziller, κατά τον καθαρισμό της δεξαμενής, στη νότια πλευρά της βρέθηκε ένας σωλήνας από μόλυβδο διαμέτρου 0,18 m και πάχους 0,03 m (Leigh, 1998). Για $\mu = 0.7$, η παροχή εξόδου νερού από τη δεξαμενή στο σωλήνα υπολογίζεται $Q = \mu \times \sqrt{2gh} \times A = 0,105 \text{ m}^3/\text{s}$ ή $9070 \text{ m}^3/\text{d}$. Ωστόσο ο Ανδρέας Κορδέλλας στην περιγραφή του για την Αδριάνεια δεξαμενή, αναφέρει πως υπάρχουν δύο ωοειδείς μολύβδινοι σωλήνες για τη

διανομή του νερού στην Αθήνα (Κορδέλλας, 1879). Για διαστάσεις ελλειπτικού σωλήνα με $\alpha=0,18$ m και $\beta= 0,12$ m, προκύπτει ότι η παροχευτικότητα των δύο σωλήνων είναι $Q= 0,14$ m³/s ή 12100 m³/d.

Η σήραγγα παρουσίαζε συχνά προβλήματα καταπτώσεων και, έπειτα από μια ξηρασία το 1898, οι τοπικές αρχές άρχισαν να αναζητούν άλλους τρόπους ύδρευσης της πόλης. Για το σκοπό αυτό αποφασίστηκε η κατασκευή του φράγματος του Μαραθώνα.

Την κατασκευή του φράγματος ανέλαβε η αμερικάνικη εταιρεία ULEN.CO. Ταυτόχρονα η εταιρεία ανέλαβε τον καθαρισμό και την επισκευή του Αδριάνειου Υδραγωγείου, ώστε να τροφοδοτηθεί ικανοποιητικά την Αθήνα μέχρι και την ολοκλήρωση του έργου. Κατά την τοπογραφική αποτύπωση και ανακατασκευή διατηρήθηκαν και αριθμήθηκαν περίπου 300 θέσεις φρεατίων. Η εταιρεία αντικατέστησε επίσης το 1926 το ανακατασκευασμένο επί δημορχίας Κυριακού ρηχό τμήμα του υδραγωγείου, μετά τους Αμπελόκηπους, με μεταλλικό αγωγό.

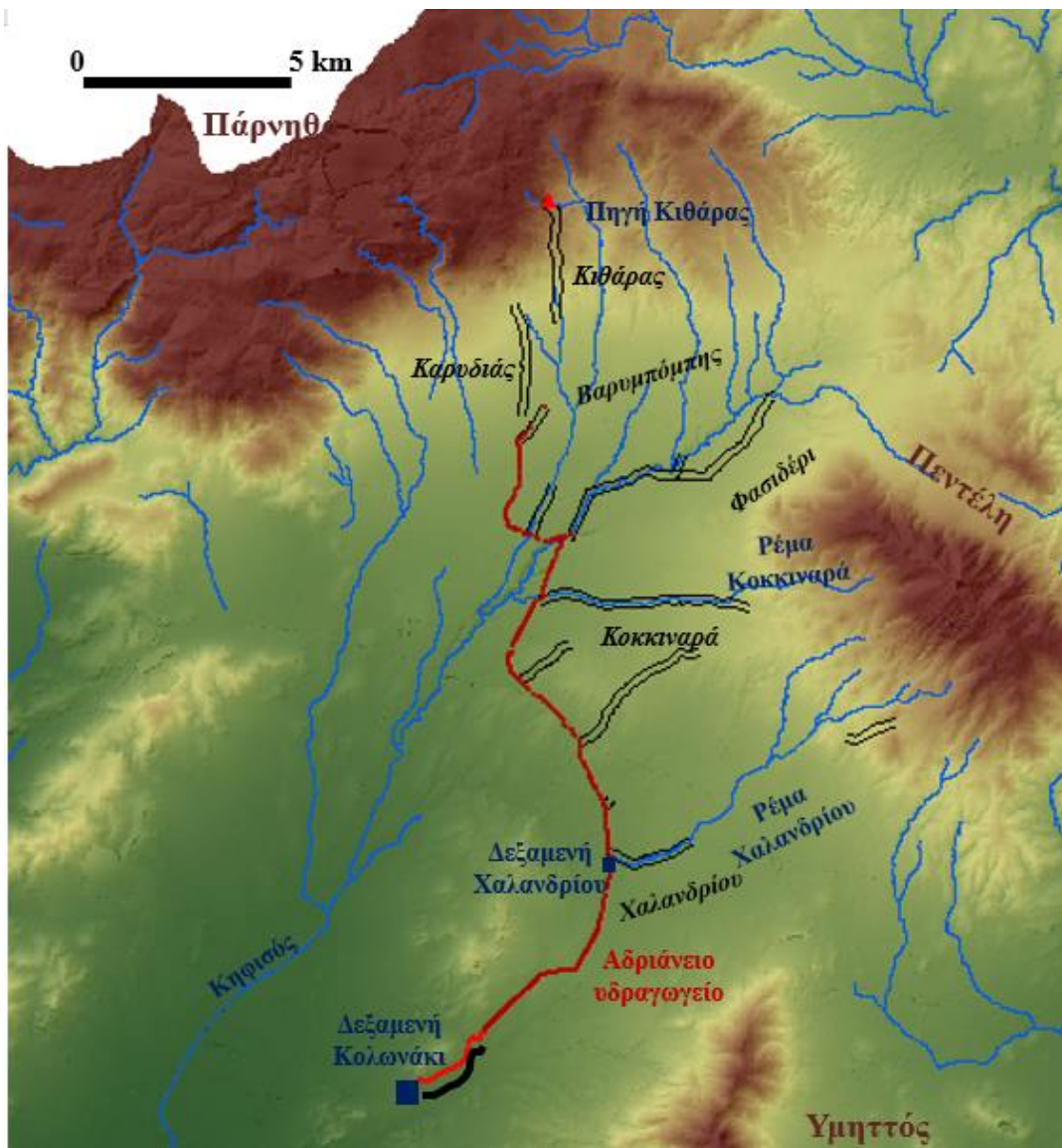
Μέχρι το 1940 η αρχαία δεξαμενή μαζί με τη λιθόκτιστη δημοτική δεξαμενή αποτελούσαν το υδροδοτικό σύστημα της Αθήνας. Με την ολοκλήρωση των έργων κατασκευής του φράγματος στο Μαραθώνα, το Αδριάνειο έπαυσε να υδρεύει την Αθήνα αλλά χρησιμοποιήθηκε για αρδευτικές ανάγκες έως και τη δεκαετία του '70. Ύστερα εγκαταλείφθηκε λόγω αστικής μόλυνσης των υδάτων.

Σήμερα το Αδριάνειο υδραγωγείο, λόγω της υπόγειας υδρομάστευσης εξακολουθεί να λειτουργεί μεταφέροντας σημαντικές ποσότητες νερού. Η σήραγγα, αν και διατηρείται καθ' όλο το μήκος της, λόγω των μικρών διαστάσεων και πλημμυρισμένων τμημάτων, σε διάφορα σημεία είναι απροσπέλαστη. Το νερό που μεταφέρεται καταλήγει στο αποχετευτικό δίκτυο.

Η αρίθμηση των φρεατίων που χρησιμοποιείται σήμερα ξεκινά από τον Άγιο Δημήτριο και καταλήγει στο Ολυμπιακό χωριό στο φρεάτιο με νούμερο 300. Το υδραγωγείο αρχικά κατασκευάστηκε με πολύ περισσότερα φρεάτια. Κάποια καταργήθηκαν σχετικά νωρίς ίσως λόγω της κακής κατάστασης του εδαφικού υλικού των τοιχωμάτων, που ευνοούσε τις καταπτώσεις. Η υπόθεση αυτή τεκμηριώνεται έμμεσα από στοιχεία που προκύπτουν από επισκέψεις στο εσωτερικό του υδραγωγείου, όταν στη θέση όπου θα έπρεπε να βρίσκεται φρεάτιο συναντάται τοπικά επισκευασμένη οροφή με υλικά της τότε εποχής.

1.5 Ενισχυτικά υδραγωγεία

Το Αδριάνειο υδραγωγείο όχι μόνο μετέφερε τα νερά της Πάρνηθας και σύλλεγε υπόγειο νερό στη διαδρομή του, αλλά επίσης ενισχύταν σε διάφορα σημεία από άλλα υδραγωγεία. Ήδη από την αρχαιότητα το υδραγωγείο ενισχύθηκε από εγκάρσια τροφοδοτικά υδραγωγεία ή ρέματα, τα οποία συνέβαλλαν σε φρεάτια του. Μεταγενέστερα κάποια από τα υδραγωγεία ανακατασκευάστηκαν ή προστέθηκαν νέα. Στον χάρτη της εικόνας 1.5 φαίνονται ενισχυτικά υδραγωγεία και ρέματα στο Αδριάνειο.



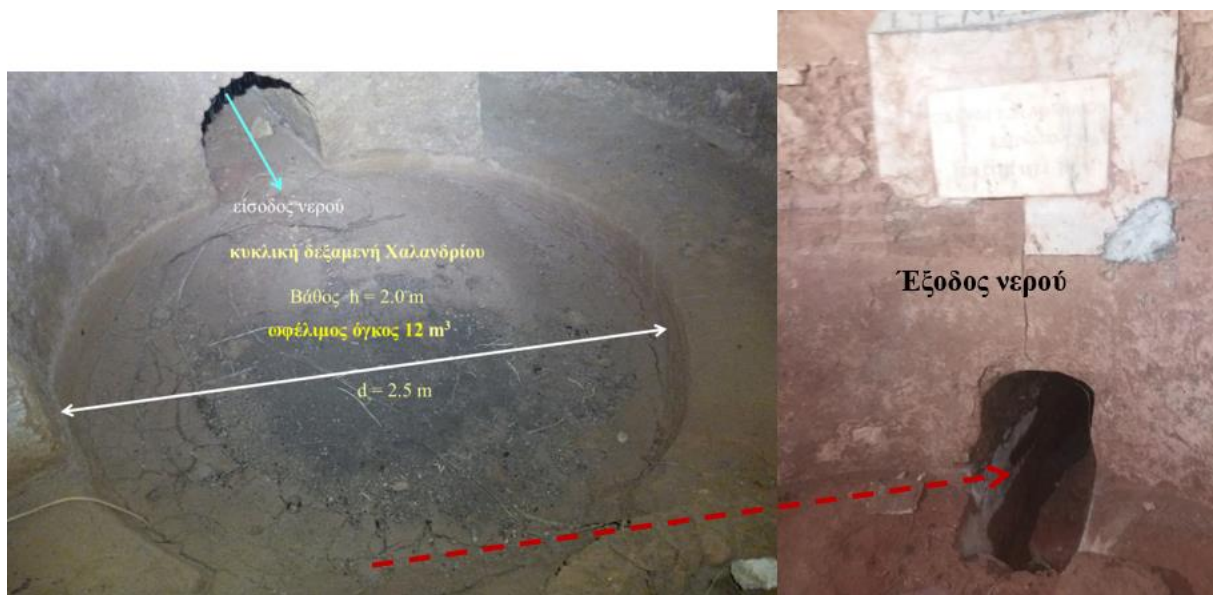
Εικόνα 1.5 Χάρτης με τα ενισχυτικά υδραγωγεία και ρέματα του Αδριάνειου υδραγωγείου. Στους πρόποδες της Πάρνηθας ανακαλύφθηκαν δύο υδραγωγεία που συνδέονται με το Αδριάνειο, τα υδραγωγεία της Καρυδιάς και της Βαρυμπόμπης. Τα δύο αυτά υδραγωγεία ενώνονται σε ένα σημείο και ύστερα συνεχίζουν ως ενιαίος αγωγός για 400 m περίπου μέχρι

να καταλήξουν στην κεκλιμένη στοά (αρχή υπόγειου τμήματος του υδραγωγείου. Η κατασκευή τους χρονολογείται στα τέλη του 19ου αιώνα ωστόσο φέρεται ως πιθανό να είναι αντικαταστάσεις αρχαίων υδραγωγείων (Chiotis, 2018).

Αρχές του 20ου αιώνα για την ενίσχυση των υδάτων που μεταφέρονταν διαμέσου του Αδριάνειου προς την πόλη, κατασκευάστηκε βόρεια του υδραγωγείου της Βαρυμπόμπης ένα επιπλέον υδραγωγείο, το υδραγωγείο της Κιθάρας. Η αφετηρία του υδραγωγείου είναι η πηγή της Κιθάρας, μία από τις υπόγειες πηγές της Πάρνηθας. Από την πηγή μέσω σύγχρονων υπόγειων σωληνώσεων της ULEN, όταν λειτουργούσε το υδραγωγείο, το νερό κατέληγε στην περιοχή της Αγίας Κυριακής, όπου συνέβαλλε ο τοπικός κλάδος της Άμπολης. Από την Αγία Κυριακή το ρηχό υδραγωγείο Βαρυμπόμπης οδηγούσε τα νερά της Άμπολης και της Κιθάρας στο Ολυμπιακό Χωριό, όπου μετά την επιφανειακή συμβολή του καναλιού Καρυδιάς τα νερά έπεφταν μέσω της κεκλιμένης στοάς στο υπόγειο Αδριάνειο. Αν και δεν υπάρχουν ενδείξεις, η πηγή της Κιθάρας, λόγω της θέσης της, είναι πιθανόν να τροφοδοτούσε το Αδριάνειο κατά την αρχαιότητα (Π.Δευτεραίος, 9/2017-3/2018).

Βορειοδυτικά το υδραγωγείο ίσως ενισχύθηκε από νερά του ρέματος Φασιδέρι. Το υδραγωγείο αυτό υδρομαστεύει τη βορειοδυτική λεκάνη του Κηφισού και ανακαλύφθηκε κατά τη διάρκεια καθαρισμού του Αδριάνειου επί δημαρχίας Σπύρου Μερκούρη. Η σήραγγα είναι λαξευμένη σε βάθος 20-30 m και σύμφωνα με την αναφορά των μηχανικών οι οποίοι εκτέλεσαν τις εργασίες καθαρισμού του «είναι καλώς κατασκευασμένο και με τρόπο μεθοδικότατο». Οι διαστάσεις της σήραγγας έχουν πλάτος 0,80-0,90 m και ύψος 1,30 – 1,35 m.

Το υδραγωγείο του Χαλανδρίου είναι ένα επίσης ενισχυτικό υδραγωγείο. Θεωρείται αρχαιότερο του Αδριάνειου και είναι υπόγειο υδρευτικό έργο που τροφοδοτεί το Αδριάνειο με νερά του Πεντελικού όρους μέσω της ρεματιάς Χαλανδρίου. Στο σημείο συμβολής υπάρχει κυκλική δεξαμενή με ωφέλιμο όγκο 12 m³ για την καθίζηση των φερτών υλών. Η συμβολή γίνεται στο φρεάτιο του Αδριάνειου Υδραγωγείου με αριθμό 102 το οποίο βρίσκεται σε βάθος 12 m κάτω από το ρέμα. Στην εικόνα 1.6 φαίνεται η κυκλική δεξαμενή με σημειωμένα τα βασικά χαρακτηριστικά της, και η έξοδος του νερού.



Εικόνα 1.6 Κυκλική δεξαμενή Χαλανδρίου (Πηγή: Π. Δευτεραίος)

Το ρέμα του Κοκκιναρά τροφοδοτεί επίσης το Αδριάνειο. Ξεκινάει στο νοτιοανατολικότερο σημείο της συνοικίας του Δήμου Κηφισιάς, Πολιτεία, στους πρόποδες της δυτικής πλευράς της Πεντέλης και διατρέχει μια πορεία προς τα δυτικά. Κατόπιν, διατρέχει το νότιο άκρο της συνοικίας Στροφύλη, εισέρχεται μετά στη συνοικία Κάτω Κηφισιά, και σύντομα σκεπάζεται για να βγει εκ νέου στην επιφάνεια, στη Λυκόβρυση. Λίγο μετά σκεπάζεται εκ νέου, περνά την Εθνική Οδό Αθηνών-Θεσσαλονίκης και καταλήγει στον Κηφισό ποταμό με τον οποίο συμβάλλει.

Η εταιρεία ULEN.CO για να τροφοδοτήσει ικανοποιητικά την Αθήνα μέχρι την ολοκλήρωση της κατασκευής του φράγματος του Μαραθώνα, βελτίωσε τα προγενέστερα έργα του Δήμου Αθηναίων, που αφορούσαν στην αποδοτικότερη σύνδεση μεγάλου βοηθητικού υδραγωγείου από το ρέμα Κοκκιναρά με το Αδριάνειο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

2 Εκτίμηση πληθυσμού και υδατικών αναγκών της ρωμαϊκής Αθήνας

Στο κεφάλαιο αυτό θα προσπαθήσουμε να εκτιμήσουμε τον πληθυσμό και τις υδατικές ανάγκες της Αθήνας κατά τη ρωμαϊκή εποχή. Ακόμη χρησιμοποιώντας τις καταναλώσεις των κατοίκων της Ρώμης θα εκτιμήσουμε τις υδατικές ανάγκες σε μια ρωμαϊκή πόλη για διάφορα σενάρια πληθυσμού, και αν αυτές οι ανάγκες καλύπτονταν από το Αδριάνειο Υδραγωγείο. Τέλος υπολογίζεται μια ελάχιστη ανάγκη νερού, συνολικά για την πόλη της Αθήνας.

2.1 Εκτίμηση του πληθυσμού της Ρωμαϊκής Αθήνας

Επειδή η Αθήνα είναι μια πόλη που κατοικείται συνεχώς στο ίδιο χώρο για πάρα πολλά χρόνια, είναι δύσκολο να βρεθούν στοιχεία για τη ζωή των ανθρώπων τη συγκεκριμένη χρονική περίοδο. Οι διάσπαρτες αρχαιολογικές ανασκαφές και οι λίγες γραπτές αναφορές είναι η μοναδική πηγή πληροφοριών.

Όταν τα δεδομένα είναι ανεπαρκή και οι συνθήκες δύσκολες, η βασική προσέγγιση για την πληθυσμιακή εκτίμηση είναι η έμμεση εκτίμηση. Οι δημογράφοι έχουν αναπτύξει τεχνικές έμμεσης εκτίμησης για την παραγωγή εκτιμήσεων ενός πληθυσμού με βάση πληροφορίες που σχετίζονται έμμεσα με αυτόν. Για αρχαίους πληθυσμούς αυτό γίνεται με εξέταση της περιοχής της πόλης που χρησιμοποιούνταν για κατοικίες και την εξέταση μιας τυπικής κατοικίας.

Ο υπολογισμός του πληθυσμού της ρωμαϊκής Αθήνας θα γίνει χρησιμοποιώντας δύο στοιχεία: (α) την έκταση της πόλης σύμφωνα με τις αρχαιολογικές ανασκαφές και (β) ένα συντελεστή πυκνότητας πληθυσμού. Ο συντελεστής πυκνότητας πληθυσμού μπορεί να είναι είτε μακροσκοπικός δηλαδή να αναφέρεται για ολόκληρη την περιοχή, είτε μικροσκοπικός δηλαδή να αναφέρεται σε νοικοκυριό. Στην πρώτη περίπτωση υπάρχει κίνδυνος λάθους καθώς δεν λαμβάνονται υπόψη τοπικές κοινωνικές ιδιαιτερότητες, ενώ στη δεύτερη απαιτείται εκτίμηση του αριθμού των νοικοκυριών που δεν είναι εύκολο να προσδιοριστεί. Θα υπολογίσουμε τον αριθμό των νοικοκυριών χρησιμοποιώντας την έκταση μιας τυπικής αθηναϊκής κατοικίας.

2.1.1 Η Έκταση της πόλης

Η έκταση της πόλης θα υπολογισθεί σύμφωνα με τα τείχη της ρωμαϊκής Αθήνας. Κατά την αρχαιότητα αμυντικά τείχη χρησιμοποιούνταν για την προστασία μιας πόλης από εισβολείς.

Στην εντός των τειχών περιοχή υπήρχαν οι κατοικίες, οι ναοί και τα δημόσια κτίρια ενώ η περιοχή εκτός των τειχών χρησιμοποιούνταν για καλλιέργειες και κτηνοτροφία. Η αρχαιότερη οχύρωση της Αθήνας ανάγεται στους ώριμους προϊστορικούς χρόνους όπου οχυρωματικά τείχη περιβάλλαν τον ιερό βράχο της Ακρόπολης. Με την ενοποίηση των αθηναϊκών δήμων και την περαιτέρω ανάπτυξη της πόλης τα όρια της πόλης διευρύνθηκαν και ακολούθως και τα τείχη της. Ύστερα από πολέμους και λεηλασίες, τμήματα του τείχους καταστράφηκαν και ανοικοδομήθηκαν. Το τείχος είχε διατηρηθεί μέχρι την εκπόρθση της Αθήνας από τον Ρωμαίο στρατηγό Σύλλα το 86 π.Χ. Λόγω της ισχύος και υπεροχής της ρωμαϊκής αυτοκρατορίας στη Μεσόγειο, η πόλη έμεινε ανοχύρωτη έως και τις αρχές του 3ου αιώνα. Η επέκταση της πόλης προς την ανατολή και το νότο επέβαλε την ίδρυση ενός νέου οχυρωματικού βραχίονα, που θα συνδεόταν με το παλαιό τείχος και θα περιέκλειε τις νέες εγκαταστάσεις. Πρόκειται για το ονομαζόμενο υστερορωμαϊκό τείχος, το οποίο χτίστηκε έπειτα από την επιδρομή των Ερούλων στα 267 μ.Χ.. Το τείχος είχε την αφετηρία του στα Προπύλαια της Ακροπόλεως, απ' όπου ακολουθούσε κατωφερική πορεία, για να καταλήξει στην Αγορά (στην Στοά του Αττάλου), παράλληλα προς την Οδό Παναθηναίων.

Το τοπογραφικό διάγραμμα της Αθήνας με το υστερορωμαϊκό τείχος της στη σύγχρονη εποχή φαίνεται στην Εικόνα 2.1., ενώ στην Εικόνα 2.2. φαίνεται η τρισδιάστατη απεικόνισή της κατά τον 2ο αιώνα μ.Χ.



Εικόνα 2.1 Τοπογραφικό διάγραμμα της αρχαίας πόλης των Αθηνών και των τειχών της στη ρωμαϊκή εποχή (Πηγή: Τραυλός, 1982)



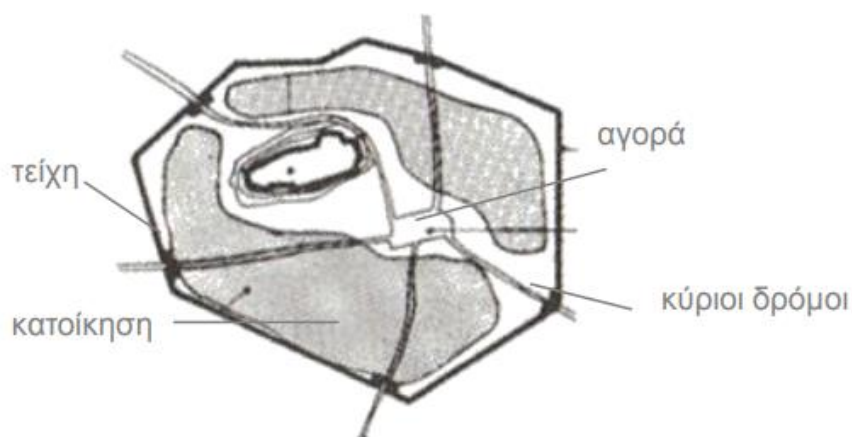
Εικόνα 2.2 Τρισδιάστατη απεικόνιση της ρωμαϊκής Αθήνας κατά τον 2ο αιώνα μ.Χ. Η συνολική επιφάνεια που περικλείει το ρωμαϊκό τείχος υπολογίζεται σε 234 εκτάρια.

Η αγορά αποτελούσε τον κεντρικό δημόσιο χώρο της πόλης αφού σε αυτή συγκεντρωνόταν όλες οι δημόσιες λειτουργίες. Βρισκόταν στο κέντρο βάρους της πόλης και η χρήση της επαρκούσε ώστε να μη χρειαζόταν άλλο δημόσιο κέντρο. Η έκταση της αγοράς υπολογίζεται σε 3 εκτάρια.

Αφαιρώντας 8 εκτάρια που είναι η έκταση του λόφου της Ακρόπολης και 3 εκτάρια η έκταση της αγοράς, προκύπτει ότι η περιοχή που χρησιμοποιούταν για κατοικίες ήταν 223 εκτάρια. Ακόμη θεωρώντας ότι το 85% της έκτασης είναι κατοικίες υπολογίζεται ότι $0,85 \cdot 223 = 189$ εκτάρια ήταν αθροιστικά η έκταση των κατοικιών στην αρχαία Αθήνα.

2.1.2 Εκτίμηση του αριθμού των νοικοκυριών

Ο πρώτος οικισμός της Αθήνας δημιουργήθηκε πάνω σε οικισμό των παλαιότερων χρόνων, ο οποίος με τη σειρά του πιθανόν να αποτελούσε τη συνέχεια κάποιας μικρής εγκατάστασης της προϊστορικής εποχής. Το βασικό χαρακτηριστικό της ήταν ότι οργανώθηκε γύρω από μια ακρόπολη η οποία χρησίμευε στην αποτελεσματική άμυνα των κατοίκων σε καιρό πολέμου. Η οικονομική ευημερία και οι μακρές περίοδοι ειρήνης συντέλεσαν στο να αναπτυχθεί σε μεγάλη πόλη. Η Αθήνα αναπτύχθηκε μέσα από φυσική μεγέθυνση. Η ανάπτυξή της έγινε σε ευρύτερους κύκλους γύρω από την ακρόπολη, ενώ σχηματίστηκε ένας δεύτερος πυρήνας στο χαμηλότερο σημείο, που ήταν η αγορά. Τα δύο βασικά κέντρα λοιπόν της πόλης ήταν η αγορά και η ακρόπολη, ενώ όλοι οι κεντρικοί δρόμοι οδηγούσαν ακτινωτά σε αυτά. Στην εικόνα 2.3 φαίνεται σχηματικά η πολεοδομική ανάπτυξη της Αθήνας.



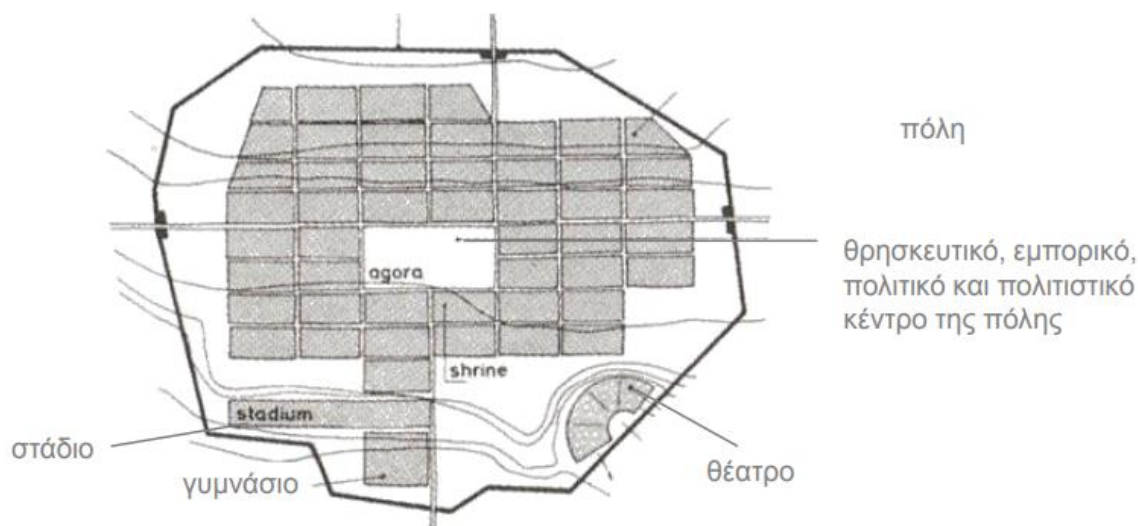
Εικόνα 2.3 Σχηματική απεικόνιση της πολεοδομικής ανάπτυξης της Αθήνας (Πηγή: Μ. Μαυρίκη, 2013)

Στην Αθήνα υπήρχε έντονη οικοδομική δραστηριότητα γιατί κυριότερο μέλημα ήταν η ανοικοδόμηση ή η αποκατάσταση των κατοικιών. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα η πόλη να αναπτυχθεί άναρχα χωρίς πολεοδομικό σχέδιο, με στενούς δρόμους και πυκνοκατοικημένες συνοικίες. Πάντως οι κατοικίες στην αρχαία Αθήνα ήταν απλές και απέριτες πράγμα που ίσχυε και για τις κατοικίες των πλούσιων πολιτών. Όπως έχουν δείξει οι ανασκαφές, τα οικόπεδα είχαν μέγεθος περίπου 200 τετραγωνικά μέτρα (Hoerfner, 1999).

Στο τέλος του 6ου αιώνα και προς τις αρχές του 5ου αιώνα π.Χ. σημειώθηκαν σημαντικές πολιτικές και κοινωνικές μεταβολές, ώστε οι περισσότερες πόλεις – κράτη της Ελλάδας να υιοθετήσουν το δημοκρατικό πολίτευμα. Η διαφοροποίηση των κοινωνικών και των πολιτειακών θεσμών επέτρεψαν την ανάπτυξη ενός διαφορετικού μοντέλου πολεοδομίας. Η συμμετοχή μεγάλου αριθμού πολιτών στα κοινά δημιούργησε την ανάγκη ανοικοδόμησης δημόσιων κτηρίων για τις συναθροίσεις, για τις διοικητικές υπηρεσίες και για τους αξιωματούχους. Τα κτήρια αυτά κατέλαβαν μεγάλες εκτάσεις στο κέντρο της πόλης.

Στη μεταβολή της χωροταξίας της κλασικής εποχής συνέβαλε αποφασιστικά ο Μηλίσιος αρχιτέκτονας Ιππόδαμος. Εκπόνησε σχέδια που είχαν τάξη και κανονικότητα, σε αντίθεση με τον συγκεχυμένο τρόπο με τον οποίο αναπτύχθηκαν οι πόλεις μέχρι εκείνη την εποχή. Πιο συγκεκριμένα, εφαρμόστηκε στο σχεδιασμό των πόλεων το γνωστό πλέον ως ιπποδάμειο σύστημα. Με το σύστημα αυτό εφαρμόστηκε η τυποποιημένη κατοίκηση σε σπίτια σε σειρά, που ανήκουν το καθένα σε μία οικογένεια. Η κατοίκηση ήταν στον ίδιο τύπο, ο οποίος ήταν κοινός για κάθε περιοχή της πόλης και για κάθε πολίτη, ανεξάρτητα από τη θέση του στην κοινωνική ιεραρχία.

Το ιπποδάμειο σύστημα βασίζεται στη χάραξη παράλληλων δρόμων που τέμνονται κάθετα ώστε να δημιουργούνται οικοδομικά τετράγωνα και κανονικές πλατείες. Τα τετράγωνα αυτά χαράσσονται με ακρίβεια και χωρίζονται σε οικόπεδα ίσου εμβαδού. Σε πόλη σχεδιασμένη σύμφωνα με το σύστημα αυτό, οι δρόμοι είναι ευθύγραμμοι και ευρείς, οι πλατείες ευρύχωρες, ενώ οι θέσεις των διοικητικών κτιρίων, των ναών και των κατοικιών είναι καθορισμένες με ακρίβεια (Μ.Μαυρίκη, 2013). Στην εικόνα 2.4 φαίνεται σχηματικά η κάτοψη μιας πόλης αναπτυγμένης με ιπποδάμειο σύστημα.



Εικόνα 2.4 Σχηματική απεικόνιση πόλης αναπτυγμένης με ιπποδάμειο σύστημα (Πηγή: Μαυρίκη Μ., 2013)

Η Αθήνα παρότι αποτελεί πόλη με φυσικό τρόπο ανάπτυξης κι όχι εφαρμογή του ιπποδάμειου μοντέλου, μετά το τέλος των περσικών πολέμων ανοικοδομήθηκε και αποκαταστάθηκε επηρεασμένη από το ιπποδάμειο σύστημα. Η αγορά αντικαταστάθηκε, μια μεγάλη έκταση γης δόθηκε για δημόσια χρήση ενώ οι κατοικίες παρέμειναν λιτές τοποθετημένες σε εμβαδό οικοπέδου 200 με 250 τετραγωνικών μέτρων.

Στην κλασσική εποχή το κάθε οικοδομικό τετράγωνο σε πόλη σχεδιασμένη με ιπποδάμειο σύστημα το αποτελούσαν οκτώ ίδια σπίτια 250 τετραγωνικών μέτρων το καθένα. Αυτό αντιστοιχεί σε 2000 m² εμβαδό ανά οικοδομικό τετράγωνο. Ακόμη σε κάθε οικία έμεναν το μέγιστο περίπου 40 άτομα οπότε υπολογίζεται ότι ζούσαν 200 άτομα ανά εκτάριο.

Το ρωμαϊκό τείχος υπολογίσαμε ότι περικλείει επιφάνεια 189 εκτάρια. Επομένως εκτιμάται ότι η Αθήνα κατά τη ρωμαϊκή περίοδο είχε 37 800 κατοίκους.

2.2 Εκτίμηση της ελάχιστης κατανάλωσης νερού ανά νοικοκυριό

Η περιοχή της Αττικής κατοικείται συνεχώς για πάρα πολλά χρόνια. Καθοριστικός παράγοντας για την ίδρυση και την ανάπτυξη της αποτέλεσε η γεωγραφία και το κλίμα της Αττικής. Το λεκανοπέδιο Αττικής είναι μία περιοχή με χαμηλό μέσο υψόμετρο και σχετικά επίπεδη, κάτι που ευνοεί τις καλλιέργειες, ενώ το κλίμα της είναι μεσογειακό με ήπιους και υγρούς χειμώνες, σχετικά θερμά και ξηρά καλοκαίρια και έχει γενικά μακρές περιόδους ηλιοφάνειας κατά την μεγαλύτερη διάρκεια του έτους. Υφίστανται επομένως ιδανικές συνθήκες διαμονής των ανθρώπων.

Η διάθεση, η επάρκεια και η ποιότητα του νερού αποτέλεσε επίσης καθοριστικό παράγοντα για την ίδρυση και την ανάπτυξη της πόλης. Δύο μεγάλα προβλήματα της Αθήνας στην αρχαία εποχή ήταν η έλλειψη νερού και η υποβάθμιση του υδατικού περιβάλλοντος. Οι κύριες αιτίες των προβλημάτων έλλειψης νερού ήταν η πληθυσμιακή αύξηση, η άνοδος του βιοτικού επιπέδου του πληθυσμού και γενικότερα οι αλλαγές στην καθημερινότητά τους, οι βραχυπρόθεσμες αλλαγές του καιρού και η διαχείριση των υδατικών πόρων.

Αρχικά οι ανάγκες σε νερό ικανοποιούνταν από τα πηγάδια, υδατοδεξαμενές όπου μάζευαν το βρόχινο νερό, τις λίγες πηγές και ποτάμια. Όμως αυτοί οι πόροι δεν έδιναν τακτική και επαρκή ποσότητα, ιδιαίτερα κατά τους θερινούς μήνες, γεγονός που περιόριζε τις δραστηριότητες των κατοίκων και την ενδεχόμενη ανάπτυξη της πόλης. Ο περιορισμός αυτός, εκτός των άλλων, ανάγκασε τους Αθηναίους να εφαρμόσουν πολιτικές διαχείρισης και ελέγχου του νερού.

Οι Αθηναϊκή πολιτεία εφάρμοσε πολιτικές οι οποίες αποσκοπούσαν στην καθολική πρόσβαση των πολιτών σε νερό καλής ποιότητας και σε επαρκή ποσότητα, και στη διασφάλιση της καλής κατάστασης όλων των υδατικών συστημάτων της ευρύτερης περιοχής. Ως εκ τούτου, είχαν συσταθεί νόμοι με σκοπό την πρόληψη και τον μετριασμό της λειψυδρίας και της ξηρασίας, τον καταμερισμό του δημόσιου νερού, τον περιορισμό του αντλούμενου νερού για άρδευση, την υποχρέωση των πολιτών να διατηρούν τα ιδιωτικά πηγάδια και τις στέρνες σε καλή κατάσταση. Ακόμη είχαν συσταθεί πρόστιμα για την προστασία από μόλυνση του νερού των ποταμών (Koutsoyiannis, 2014).

Ο πιο γνωστός νόμος για την διαχείριση και τον έλεγχο του νερού νομοθετήθηκε από τον Σόλωνα, Αθηναίο πολιτικό και νομοθέτη, στα τέλη του 7ου και αρχές του 6ου αιώνα. Το 594π.Χ. έπειτα από μια μακροχρόνια και βίαιη εξέγερση των πολιτών ενάντια στους ευγενείς, ο Σόλωνας κλήθηκε να επιλύσει τα διάφορα προβλήματα που είχαν δημιουργηθεί. Εξελέγη άρχων από το δήμο της Αθήνας αποκτώντας τις εξουσίες του μεσολαβητή και του νομοθέτη. Αναφορικά με τη διαχείριση των υπόγειων υδάτων, διατύπωσε νόμο που σκοπό είχε να φέρει ισορροπία ανάμεσα στα ιδιωτικά και δημόσια συμφέροντα για την κατασκευή και τη λειτουργία των πηγαδιών. Τα νομοθετικά έργα του Σόλωνα μας είναι γνωστά κυρίως από τον ιστορικό-βιογράφο Πλούταρχο (47-195 μ.Χ.). Σύμφωνα με τον Πλούταρχο στο έργο του Βίοι Παράλληλοι ο νόμος αναφέρει:

ἐπεὶ δὲ πρὸς ὕδωρ οὔτε ποταμοῖς ἐστὶν ἀνάοις οὔτε λίμναις τισὶν οὔτ' ἀφθόνοις πηγαῖς ἢ χώρα διαρκῆς, ἀλλ' οἱ πλεῖστοι φρέασι ποιητοῖς ἐχρῶντο, νόμον ἔγραψεν, ὅπου μὲν ἐστὶ δημόσιον φρέαρ ἐντὸς ἰππικοῦ, χρῆσθαι τούτῳ: τὸ δ' ἰππικὸν διάστημα

τεσσάρων ἦν σταδίων: ὅπου δὲ πλεῖον ἀπέχει, ζητεῖν ὕδωρ ἴδιον: ἐὰν δὲ ὀρύξαντες ὀργυῶν δέκα βάθος παρ' ἑαυτοῖς μὴ εὕρωσι, τότε λαμβάνειν παρὰ τοῦ γείτονος ἐξάχουν ὑδρίαν δις ἐκάστης ἡμέρας πληροῦντας: ἀπορία γὰρ ὤετο δεῖν βοηθεῖν, οὐκ ἀργίαν ἐφοδιάζειν

Επειδὴ ἡ χώρα τῆς Αττικῆς δὲν ἔχει ἐπάρκεια σὲ νερό, καθὼς δὲν διαθέτει ποτάμια μὲ διαρκή ροή, οὔτε κάποιες λίμνες, οὔτε ἀφθονες πηγές, ἀλλὰ οἱ περισσότεροι κάτοικοι χρησιμοποιοῦν τεχνητὰ πηγάδια, ὁ Σόλων θέσπισε νόμο, ὅπου υπήρχε δημόσιο πηγάδι σὲ ἀπόσταση ἐνὸς ἱππικοῦ (το ἱππικὸ ἦταν ἴσο μὲ τέσσερα στάδια δηλαδὴ 710 μέτρα) νὰ βολεύονται ἀπὸ αὐτό· ὅπου ὁμως ἡ ἀπόσταση ἦταν μεγαλύτερη, νὰ ψάχνουν νὰ βρουν δικό τους νερό· σὲ περίπτωση πάλι που ἐσκαβαν σὲ βάθος δέκα ὀργιές (18 μέτρα) καὶ δὲν εὕρισκαν νερό σὲ κτήμα τους, τότε νὰ παίρνουν ἀπὸ τὸν γείτονα γεμίζοντας δυο φορές τὴν ἡμέρα μιαν ἐξάχον στάμνα (μία ἐξάχον στάμνα ἀντιστοιχεῖ σὲ 20 λίτρα). Γιατί πίστευε πως ἔπρεπε νὰ βοηθᾶει ὅσους δὲν εἶχαν, ὄχι ὁμως καὶ νὰ παρέχει ἐφόδια σὲ τὲς τεμπέληδες.

(ΠΛΟΥΤΑΡΧΟΣ)

Ἀν καὶ μετέπειτα κατασκευάστηκαν ἔργα μεταφοράς νεροῦ μεγάλης κλίμακας, ὁ νόμος φαίνεται νὰ διατηρήθηκε καθ' ὅλη τὴ διάρκεια τῆς κλασσικῆς ἐποχῆς. Για νὰ συσταθεῖ τὸ δικαίωμα τῆς μιᾶς ἐξάχονος στάμνας δύο φορές τὴν ἡμέρα προκύπτει ὅτι υπήρχε μία ἐλάχιστη ἀνάγκη για 40 l/d για κάθε νοικοκυριό.

Ἐχοντας υπολογίσει τὴν περιοχή ὅπου ἐκτείνονταν οἱ κατοικίες σὲ 234 ἐκτάρια, καὶ πως κάθε οἰκία εἶχε περίπου 250 τετραγωνικά μέτρα, προκύπτει πως υπήρχαν 9360 νοικοκυριά. Ἐπομένως για τὴν πόλη συνολικά ἡ ἐλάχιστη ἀνάγκη σὲ νερό υπολογίζεται σὲ 374 400 l/d ἢ 374,4 m³ /d.

2.3 Ὑδατικές ἀνάγκες σὲ τὴν ἀρχαία Ρώμη

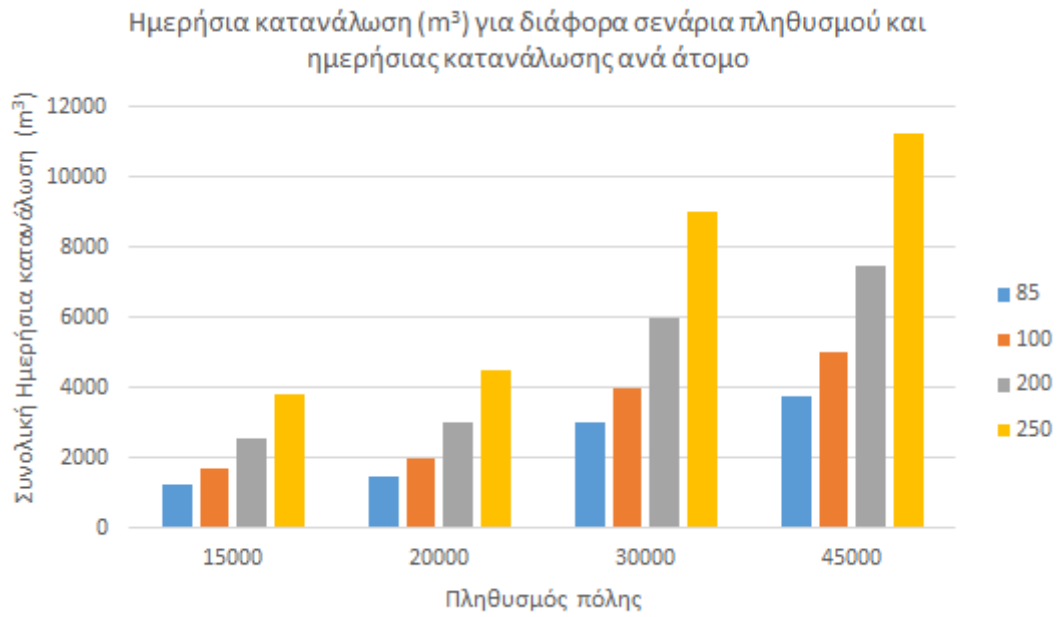
Ἡ περιγραφή τῶν ἔργων ὑδρευσης τῆς Ρώμης, συμπεριλαμβανομένων τῶν νόμων που ἀφοροῦν τὴ χρήση καὶ τὴ διατήρηση τους, γίνεται σὲ τὸ ἔργο *De aquis urbis Romae* τοῦ Ρωμαίου μηχανικοῦ Sextus Julius Frontinus. Ἦταν ἐπίσημη γραπτὴ ἀναφορὰ πρὸς τὸν αυτοκράτορα καὶ ἀφορούσε συγκεκριμένα τὴν κατάσταση τῶν ὑδραγωγείων τῆς πόλης. Ὁ Frontinus ὅταν διορίστηκε υπεύθυνος για τὴν ὑδρευση (Curator aquarum), βρῆκε μιὰ κατάσταση χάους καὶ κακοδιαχείρισης τοῦ νεροῦ. Ἀρχικά κατέστησε ἕνα χάρτη τῆς πόλης μὲ τὰ ὑδραγωγεία, για νὰ ἔχει ἐποπτεία πού βρισκόταν οἱ ἀγωγοὶ μεταφοράς νεροῦ. Ἐπειτα, περιέγραψε συστηματικά κάθε ὑδραγωγεῖο ἀναφορικά μὲ τὸ μήκος του, τὴν ἀπόσταση τῆς πηγῆς ἀπὸ τὴν πόλη καὶ τὴν

παροχή τους εκτιμώμενη από τη διάμετρο των αγωγών. Τέλος, όρισε μια μονάδα μέτρησης για το εμβαδόν, την quinaría. Η quinaría χρησιμοποιήθηκε για να μετρήσει το εμβαδό των σωλήνων στις συμβολές των αγωγών διανομής νερού. Ο μικρότερος σωλήνας είχε εμβαδό που αντιστοιχούσε σε μία quinaría. Σε σημερινά δεδομένα μία quinaría έχει διάμετρο 2,31 cm και εμβαδό 4,2 cm². Εκτιμάται ότι μία quinaría αντιστοιχεί σε παροχή 41,5 m³/d.

Ακόμη έχει εκτιμηθεί ότι το σύστημα μεταφοράς νερού στην αρχαία Ρώμη συνολικά μετέφερε 7 m³/d. Αυτό σημαίνει πως η συνολική ποσότητα ήταν περίπου 600 000 m³.

Ο Frontinus στο βιβλίο του αναφέρει ότι ο συνολικός αριθμός των τοποθετημένων quinaría είναι 14018. Από αυτά, 4063 quinaría διανείμαν νερό έξω από την πόλη και ειδικότερα 1717 quinaría στον αυτοκράτορα και 2345 quinaría σε ιδιώτες. Τα υπόλοιπα 9995 quinaría διανείμαν νερό σε 247 δεξαμενές μέσα στην πόλη. Από τις δεξαμενές 1707 quinaría διανέμονταν για τον αυτοκράτορα, 3847 quinaría προς ιδιώτες και 4401 quinaría για δημόσια χρήση. Προκύπτει ότι 25% της συνολικής ποσότητας μεταφερόταν για τον αυτοκράτορα, 44% για ιδιωτική χρήση και 31% για δημόσια χρήση. Ένα 30% του νερού (1335 quinaría) που προοριζόταν για δημόσια χρήση πήγαινε στις 591 δεξαμενές διανομής νερού στις συνοικίες μέσης και κατώτερης τάξης της Ρώμης, ενώ το υπόλοιπο σε στρατόπεδα, δημόσια λουτρά και σιντριβάνια. Υπολογίζεται ότι στα λουτρά και τα σιντριβάνια πήγαινε 200 l/d νερό. Κάθε δεξαμενή εξυπηρετούσε περίπου 900 κατοίκους, οπότε συνολικά στις συνοικίες εξυπηρετούνταν 531 900 κάτοικοι. Εκτιμάται ότι στις συνοικίες καταναλώνονταν 85 l/d ανά κάτοικο.

Προηγουμένως υπολογίσαμε ότι η Αθήνα κατά τη ρωμαϊκή περίοδο είχε 37 800 κατοίκους. Θεωρώντας ότι η υδατική κατανάλωση κατά άτομο ήταν μεταξύ 85 l/d με 250 l/d και για διάφορα σενάρια πληθυσμού μπορούμε να υπολογίσουμε τις πιθανές ημερήσιες υδατικές ανάγκες της πόλης εκείνη την εποχή. Έπειτα στο τέλος, συγκρίνοντάς τες με τη δυνατότητα του Αδριάνειου υδραγωγείου μπορούμε να εκτιμήσουμε εάν το έργο επαρκούσε για την κάλυψη των αναγκών της πόλης. Στο σχήμα 2.1 που ακολουθεί βλέπουμε την απαιτούμενη συνολική ημερήσια κατανάλωση της πόλης για σενάρια πληθυσμού από 15 000 έως 45 000 κατοίκους.



Σχήμα 2.1 Ραβδόγραμμα συνολικής ημερήσιας κατανάλωσης για διάφορα σενάρια πληθυσμού και ημερήσιας κατανάλωσης ανά άτομο σε μια ρωμαϊκή πόλη

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

3 Υδρογεωλογική Διερεύνηση του Αδριάνειου Υδραγωγείου

Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφονται οι γεωλογικοί σχηματισμοί που διαπερνούν το Αδριάνειο υδραγωγείο και τα ενισχυτικά υδραγωγεία και ρέματά του. Πιο συγκεκριμένα για τον προσδιορισμό των γεωλογικών σχηματισμών χρησιμοποιήθηκε ο γεωλογικός χάρτης της Αττικής του Ινστιτούτου Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (Ι.Γ.Μ.Ε.) για την περιοχή της Κηφισιάς. Ακόμη καθορίζονται και περιγράφονται τα υπόγεια υδατικά συστήματα της ευρύτερης περιοχής του έργου σύμφωνα με το Σχέδιο Διαχείρισης των Λεκανών Απορροής Ποταμών Υδατικού Διαμερίσματος Αττικής της ΕΥΔΑΠ.

Η γνώση της υδρογεωλογικής συμπεριφοράς των σχηματισμών που επικρατούν στην ευρύτερη περιοχή του έργου και το επηρεάζουν, είναι καθοριστικής σημασίας για την μελέτη του Αδριάνειου Υδραγωγείου. Ταυτόχρονα βοηθά αποτελεσματικά στην επιλογή των παραμέτρων για την εκτίμηση του υπόγειου υδατικού δυναμικού.

3.1 Γεωλογικοί σχηματισμοί της περιοχής έρευνας

Ο σχεδιασμός του υδραγωγείου αποσκοπούσε στη συλλογή των νερών της νοτιοανατολικής Πάρνηθας και της δυτικής Πεντέλης και έπειτα διοχέτευσή τους στην πόλη της Αθήνας. Ο κορμός του έργου είναι μια σήραγγα μήκους 17,8 km, το βορειότερο τμήμα της οποίας σήμερα βρίσκεται στο κέντρο του Ολυμπιακού χωριού στους Θρακομακεδόνες σε βάθος 30,5 m. Το υδραγωγείο κατέβαινε μέσα από τα κτήματα στη Βαρυμπόμπη, εν συνεχεία προχωρούσε παράλληλα προς την κοίτη του Κηφισού ποταμού, συνέχιζε προς τη Μεταμόρφωση, διέσχιζε το Νέο Ηράκλειο, έβγαινε στη Λεωφόρο Κηφισιάς, περνούσε από την κυκλική δεξαμενή Χαλανδρίου, ανέβαινε στους πρόποδες του Υμηττού, και πάλι διέσχιζε τη Λεωφόρο Κηφισιάς και τους Αμπελόκηπους. Η σήραγγα καταλήγει κοντά στην εκκλησία του Αγίου Δημητρίου, στην περιοχή των Αμπελοκήπων σε βάθος 6 m. Από το σημείο αυτό και πέρα για τα επόμενα 2,2 km συνεχίζει ως κλειστός αγωγός κατασκευασμένος λίγα μέτρα κάτω από το έδαφος έως το λόφο του Λυκαβηττού κοντά την πόλη της Αθήνας.

Η σήραγγα κατασκευάστηκε με τη μέθοδο όρυξης εκ διαδοχικών φρεάτων. Ειδικά κατά μήκος της διαδρομής ανά 35-40 m διανοίχτηκαν φρεάτια τα οποία ενώθηκαν με σήραγγα. Το βάθος του κάθε φρεάτος εξαρτιόταν από την απαιτούμενη κλίση που έπρεπε να έχει ο πυθμένας ώστε

το νερό να κυλά με βαρύτητα. Στο αρχικό τμήμα (Πάρνηθα) ποικίλλει μεταξύ 15 έως 35 m ενώ στο τελικό (εκκλησία Αγίου Δημητρίου) σταδιακά μειώνεται έως ότου βρεθεί στην επιφάνεια.

Λόγω του μεγάλου μήκους του αλλά και του βάθους στο οποίο κατασκευάστηκε, το υδραγωγείο διέρχεται διαφόρων εδαφικών σχηματισμών της Αττικής. Τα εδαφικά χαρακτηριστικά των εδαφών αυτών όπως και η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα επηρέασαν την κατασκευή και την στήριξη της σήραγγας. Έτσι όταν το πέτρωμα ήταν σκληρό οι διαστάσεις ήταν οι ελάχιστες δυνατές ενώ όταν ήταν μαλακό η σήραγγα για να υποστηριχθεί χτιζόταν εσωτερικά.

Το Ινστιτούτο Γεωλογικών και Μεταλλευτικών Ερευνών (Ι.Γ.Μ.Ε.) έχει αποτυπώσει τη γεωλογική κατανομή των εδαφών της Αττικής σε χάρτες. Συνεπώς τοποθετώντας τη διαδρομή του υδραγωγείου πάνω σε αυτούς τους χάρτες μπορούμε να εντοπίσουμε τους γεωλογικούς σχηματισμούς που διασχίζει και εν συνεχεία να προσδιορίσουμε τα εδαφικά χαρακτηριστικά των σχηματισμών αυτών.

Με αφετηρία την είσοδο της κεκλιμένης στοάς που βρίσκεται στο Ολυμπιακό χωριό και χρησιμοποιώντας ως αρχή για την αρίθμηση των φρεάτων την εκκλησία του Αγίου Δημητρίου στους Αμπελόκηπους, οι γεωλογικοί σχηματισμοί που δομούν την ευρύτερη περιοχή του υδραγωγείου, όπως προέκυψαν από την βιβλιογραφία και τους γεωλογικούς χάρτες κλίμακας 1:50.000 του ΙΓΜΕ, φύλλο Κηφισιά είναι οι εξής:

- *Παλαιά πλευρικά κορήματα και κώνοι κορημάτων*

Η σήραγγα διασχίζει τα κορήματα σε μήκος περίπου 830 m. 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 επιδεκτικές διάβρωσης και υποσκαφών, κυρίως κατά μήκος επαφών με υποκείμενους στεγανούς σχηματισμούς (Δ.Ρόζος, 2017). Τα φρεάτια που διανοίχθηκαν στο έδαφος αυτό είναι από φρέαρ με νούμερο 280 έως το 299. Ο κωδικός του Ι.Γ.Μ.Ε. για τον εδαφικό σχηματισμό είναι Pt.sc, cs (Κώνοι κορημάτων, κορήματα & ριπίδια Πλειστοκαίνου).

- Αδρομερείς ποταμολιμναίοι σχηματισμοί παρυφών Πάρνηθας και Πεντελικού*

Σε μήκος περίπου 620 m η σήραγγα 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 (Παπανικολάου, 2004). Τα φρεάτια που διανοίχθηκαν στο έδαφος είναι από φρέαρ με νούμερο 271 έως το 279. Ο κωδικός του Ι.Γ.Μ.Ε. για τον εδαφικό σχηματισμό είναι Ms.c,l,m (Ιζηματογενείς σχηματισμοί Νεογενούς και Πλειστοκαίνου).
- Λιμναίοι σχηματισμοί Καλογρέζας-Πικερμίου*

Το μεγαλύτερο τμήμα του υδραγωγείου, περίπου 11.9 km, διέρχεται από τους λιμναίους σχηματισμούς Καλογρέζας. Πρόκειται για ηπειρωτικούς σχηματισμούς, οι οποίοι αποτέθηκαν σε περιβάλλον λιμναίο ή εφήμερα λιμναίο. Η ευρύτερη 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. Το έδαφος χαρακτηρίζεται στιφρό έως σκληρό και κατά τόπους πολύ σκληρό (ημιβραχώδες). 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). Στο βορειοανατολικό τμήμα των σχηματισμών αυτών (περιοχή όπου περνά ο αγωγός), παρατηρείται βαθμιαία αύξηση των κλαστικών υλικών. Τα φρεάτια που διανοίχθηκαν στο έδαφος είναι από φρέαρ με νούμερο 81 έως το 270. Ο κωδικός του Ι.Γ.Μ.Ε. για τον εδαφικό σχηματισμό είναι Ms.m, c (Ιζηματογενείς σχηματισμοί Νεογενούς και Πλειστοκαίνου).

- *Αθηναϊκός σχιστόλιθος / Μαργαϊκός ορίζοντας*

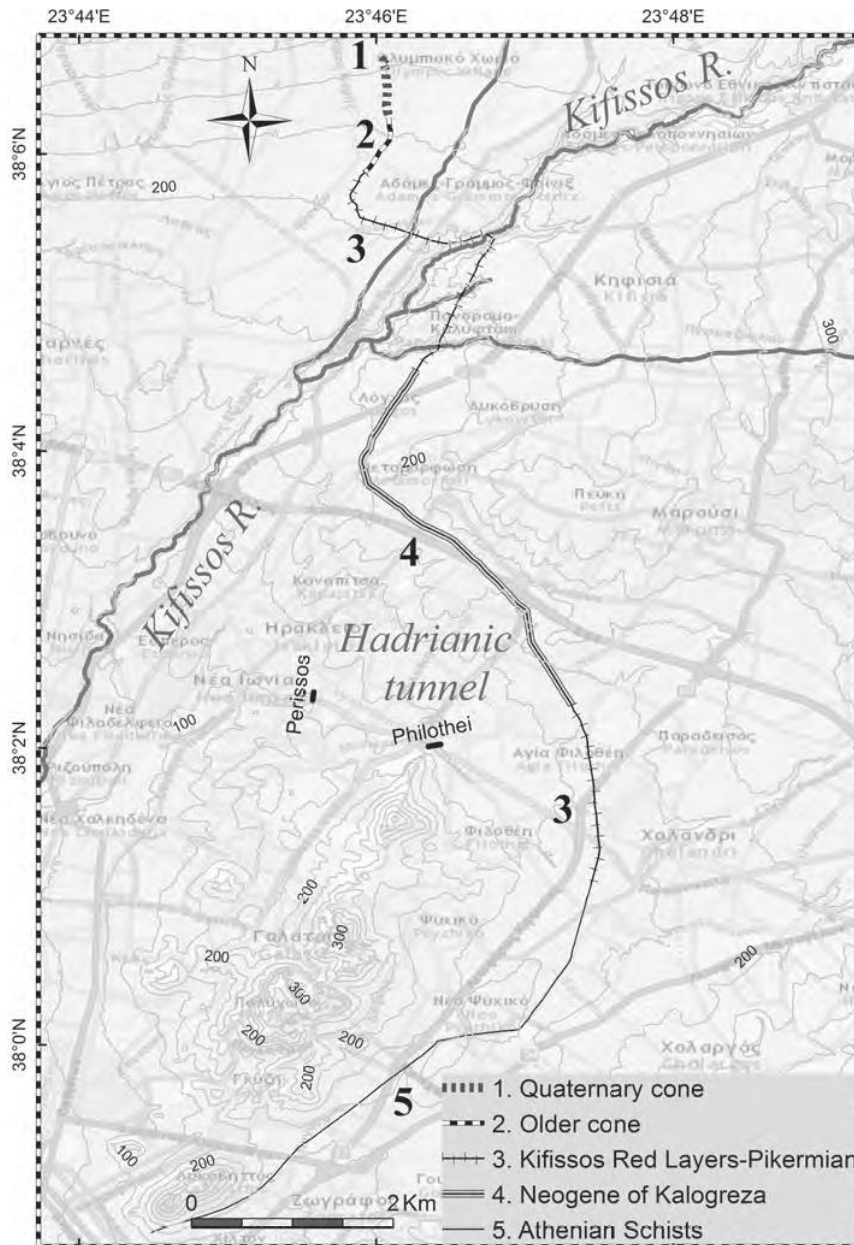
Το τελευταίο τμήμα της σήραγγας μήκους 3.9 km περίπου διέρχεται του αθηναϊκού σχιστόλιθου και του μαργαϊκού ορίζοντα. Ο Αθηναϊκός σχιστόλιθος αποτελείται κυρίως από στρώματα ψαμμιτών, αργιλικών σχιστόλιθων και φυλλιτών με κατά θέσεις ενστρώσεις ασβεστόλιθων. Η έκταση του σχηματισμού είναι πολύ μικρή γύρω από την περιοχή των Τουρκοβουνίων, ενώ στις διπλανές 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 Αθηναϊκού 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 (ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ, 2018).

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.

Τα φρεάτια που διανοίχθηκαν στο έδαφος είναι από φρέαρ με νούμερο 1 έως το 80. Ο κωδικός του Ι.Γ.Μ.Ε. για τον Μαργαϊκό ορίζοντα είναι K9-mk,sch. και για τον Αθηναϊκό σχιστόλιθο είναι K9.sch.

Στην εικόνα 3.1 παρουσιάζεται μια περιγραφή που δόθηκε από τον (Chiotis, 2018) για τους γεωλογικούς σχηματισμούς που διέρχεται η κύρια σήραγγα και διαφέρει ελάχιστα από την με τον χάρτη του ΙΓΜΕ.



Εικόνα 3.1 Οριζοντιογραφία του άξονα του Αδριάνειου υδραγωγείου και οι γεωλογικοί σχηματισμοί κατά μήκος του (Chiotis, 2018)

Εκτός των πηγαίων υδάτων, διοχετεύονταν στη σήραγγα ύδατα από εγκάρσια υδραγωγεία και ρέματα. Τα υδραγωγεία αυτά μετέφεραν νερό από πηγές της νοτιοδυτικής Πάρνηθας και της βορειοδυτικής Πεντέλης και κατέληγαν σε φρεάτια του Αδριάνειου.

Το κυριότερο ενισχυτικό υδραγωγείο είναι το υδραγωγείο του Χαλανδρίου. Είναι υπόγειο υδρευτικό έργο και διέρχεται εξ ολοκλήρου από λιμναίους σχηματισμούς Καλογρέζας-

Πικερμίου. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία είναι αποθέσεις από μάργες και πηλούς με παρεμβολές κροκαλοπαγών, ψαμμιτών και αργιλοαμμωδών υλικών. Εμφανίζουν επίσης ενστρώσεις μαργαϊκών ασβεστολίθων μικρού πάχους. Χαρακτηρίζεται από μικρές αντοχές και ευκολία αποσαθρώσεως. Ως σύνολο πρόκειται για αδιαπέρατο σχηματισμό. Το υδραγωγείο καταλήγει στο φρεάτιο με αριθμό 102.

Λίγο πιο βόρεια του υδραγωγείου του Χαλανδρίου βρίσκεται το ρέμα Κοκκιναρά. Παρόμοια με του Χαλανδρίου, το ρέμα ξεκινά τη διαδρομή του σε αδρομερείς σχηματισμούς της Πάρνηθας και της Πεντέλης, συνεχίζει στους λιμναίους σχηματισμούς του Κηφισού και καταλήγει στους λιμναίους σχηματισμούς Καλογρέζας-Πικερμίου. Έχοντας περιγράψει τους εδαφικούς σχηματισμούς πιο πριν, καταλήγουμε πως η περιοχή χαρακτηρίζεται ως αδιαπέρατη.

Τα υδραγωγεία της Καρυδιάς και της Βαρυμπόμπης, που πιθανολογείται ότι είναι αντικαταστάσεις αρχαίων υδραγωγείων που διοχέτευαν νερό στο Αδριάνειο, έχουν λεκάνη απορροής τις παρυφές της Πάρνηθας. Η περιοχή εκεί δομείται ως επί το πλείστον από αλπικούς σχηματισμούς, ενώ ακόμη απαντώνται μικρές εμφανίσεις λιμναίων νεογενών ιζημάτων 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. Ως προς την περατότητα, η λεκάνη απορροής του ρέματος Κοκκιναρά χαρακτηρίζεται ημιπερατή πολύ χαμηλής υδροπερατότητας.

Η βορειοδυτική λεκάνη του Κηφισού ποταμού διέρχεται αδρομερών ποταμολιμναίων σχηματισμών Πάρνηθας και Πεντέλης, και λιμνοχερσαίων σχηματισμών του Κηφισού. Οι πρώτοι είναι αλουβιακοί κώνοι, ριπίδια και δελταϊκοί σχηματισμοί. Στους πρόποδες των βουνών είναι λατυποπαγή (πέτρωμα κατακερματισμένο με φυσικούς τρόπους σε γωνιώδη τεμάχια) και λατυποκροκαλοπαγή, ενώ σε κάποια απόσταση εναλλάσσονται με πιο λεπτομερή υλικά. Ο Κηφισός διέρχεται κυρίως των λιμνοχερσαίων σχηματισμών που όπως προαναφέρθηκε είναι λεπτομερείς αποθέσεις πηλών, αργίλων και αργιλοαμμούχων υλικών με κατά θέσεις διάσπαρτες κροκάλες και παρεμβολές ψηφιδοπαγών και κροκαλοπαγών. Ως προς την περατότητα η περιοχή χαρακτηρίζεται αδιαπέρατη.

3.2 Υπόγεια υδατικά συστήματα περιοχής έρευνας

Το Αδριάνειο είναι σήραγγα μεταφοράς πηγαίων υδάτων και σήραγγα υδρομάστευσης υπόγειων υδροφορέων. Σε μεγάλο τμήμα του λόγω των βαθιών πηγαδιών του βρίσκεται κάτω του υδροφόρου ορίζοντα με αποτέλεσμα να εφοδιάζεται με υπόγεια νερά.

Τα υπόγεια νερά είναι αναπόσπαστο τμήμα του υδρολογικού κύκλου. Νερό εισέρχεται σε ένα σύστημα υπόγειου νερού μέσω διήθησης επιφανειακού νερού από την επιφάνεια του εδάφους στην κορεσμένη ζώνη του υδροφόρου. Με εξαίρεση την περίπτωση που η κορυφή της κορεσμένης ζώνης είναι στην ή πολύ κοντά στην επιφάνεια του εδάφους, το διηθούμενο νερό μεταναστεύει και κατεισδύει μέσω του επιφανειακού εδάφους ή της ακόρεστης ζώνης, προς την κορεσμένη ζώνη. Μόλις το νερό φθάσει στην κορεσμένη ζώνη, κινείται πλευρικώς καθώς επίσης και κατακορύφως, μέχρι να διαφύγει μέσω της επιφάνειας του εδάφους με τη μορφή πηγών ή να γίνει απόληψή του μέσω γεωτρήσεων ή να απελευθερωθεί σε ποτάμια, λίμνες και ωκεανούς.

Η διαθεσιμότητα των υπογείων νερών ως πηγή νερού εξαρτάται από τη γεωλογία της επιφάνειας και του υπεδάφους. Η ικανότητα του εδαφικού σχηματισμού να συγκρατεί ή να επιτρέπει τη διέλευση του νερού καθορίζεται από το πορώδες και τη διαπερατότητα του. Ως πορώδες χαρακτηρίζεται ο λόγος των κενών προς το συνολικό όγκο του πετρώματος. Η διαπερατότητα εκφράζει την ικανότητα ενός υγρού να μετακινείται μέσω γεωλογικών σχηματισμών. Γεωλογικοί σχηματισμοί με υψηλή διαπερατότητα είναι κατάλληλοι για τη δημιουργία υδροφόρων ζωνών. Προκειμένου το νερό να μετακινηθεί μέσω υδροφόρων ζωνών θα πρέπει τα εσωτερικά κενά να συνδέονται μεταξύ τους ή να επιτρέπεται η κυκλοφορία δια μέσου ρωγμών, διαρρήξεων και κενών που δημιουργούνται λόγω διάβρωσης.

Οι λεκάνες απορροής των επιφανειακών υδάτων συνοδεύονται από ένα δίκτυο υπόγειων νερών, το οποίο, όμως, δεν ακολουθεί πάντα την ίδια πορεία με τα επιφανειακά ύδατα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τα υπόγεια ύδατα συχνά να υπάγονται σε διαφορετική λεκάνη απορροής από τα επιφανειακά. Παρόλα αυτά, τα υπόγεια νερά δεν μπορούν να διαχωριστούν από τα επιφανειακά νερά, επειδή επηρεάζουν και επηρεάζονται τόσο από την ποιότητα όσο και από την ποσότητα αυτών.

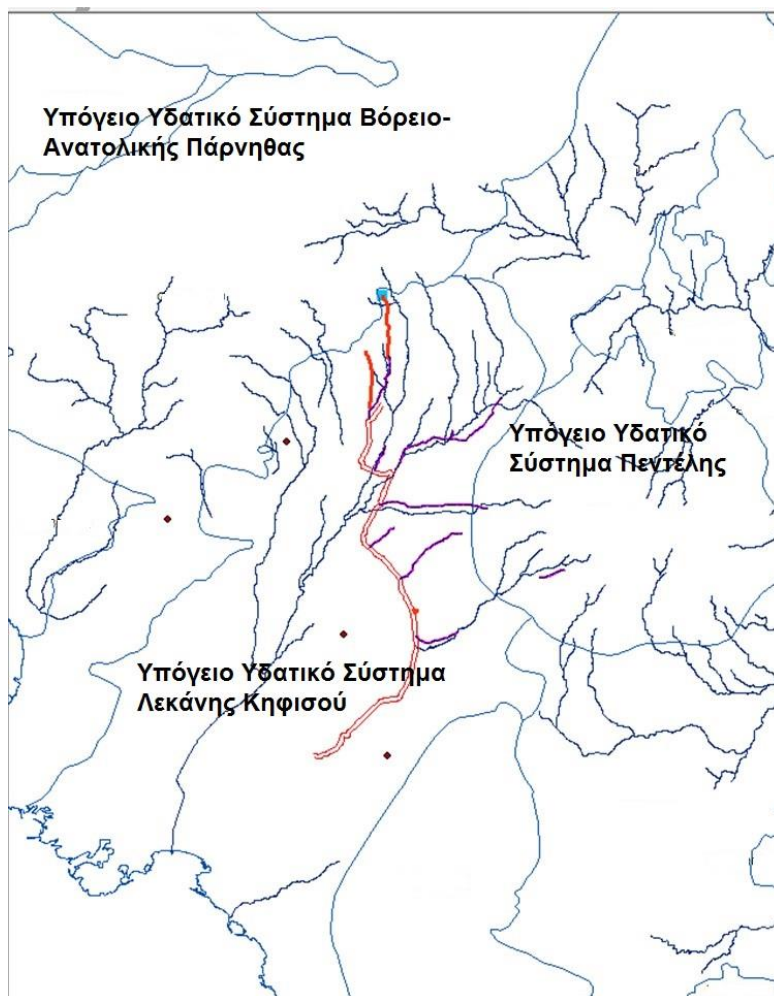
Η Ευρωπαϊκή Ένωση για την προστασία και διατήρηση του υδάτινου περιβάλλοντος προχώρησε στη διαμόρφωση μιας Οδηγίας Πλαισίου μέσω της οποίας θέσπισε τις βασικές αρχές μιας βιώσιμης πολιτικής των υδάτων. Η ελληνική νομοθεσία ενσωμάτωσε τις διατάξεις της Οδηγίας Πλαίσιο, ενώ για την εφαρμογή της συγκροτήθηκε η Ειδική Γραμματεία Υδάτων.

Η διοικητική αυτή δομή έχει ως αρμοδιότητα την κατάρτιση προγραμμάτων προστασίας και διαχείρισης των υδατικών πόρων της χώρας, καθώς και τον συντονισμό των υπηρεσιών και κρατικών φορέων για κάθε ζήτημα που αφορά στην προστασία και διαχείριση των υδάτων.

Αναγκαία για την εφαρμογή της Οδηγίας ήταν η κατάρτιση των Σχεδίων Διαχείρισης Λεκανών Απορροής Ποταμών των δεκατεσσάρων Υδατικών διαμερισμάτων της χώρας. Σκοπός των σχεδίων είναι και η διάκριση των υπογείων υδατικών συστημάτων κάθε Υδατικού Διαμερίσματος. Ειδικότερα σε κάθε Υδατικό Διαμέρισμα έγινε περιγραφή του γεωλογικού - υδρογεωλογικού πλαισίου που διέπει την λειτουργία τους, προσδιορίστηκαν τα χαρακτηριστικά τους και χαρακτηρίστηκαν ως προς την ποσοτική και ποιοτική τους κατάσταση.

Ένα από τα δεκατέσσερα Υδατικά Διαμερίσματα είναι το Υδατικό Διαμέρισμα Αττικής. Αξιολογώντας τις υδρογεωλογικές δομές της περιοχής οριοθετήθηκαν εικοσιένα Υπόγεια Υδατικά Συστήματα. Έτσι δημιουργήθηκε ένας χάρτης με την Αττική χωρισμένη σε εικοσιένα υπόγεια υδατικά διαμερίσματα. Τοποθετώντας τη διαδρομή του υδραγωγείου πάνω στο χάρτη μπορούμε να εντοπίσουμε τα ΥΥΔ που διασχίζει και εν συνεχεία να προσδιορίσουμε τα χαρακτηριστικά των συστημάτων αυτών.

Στο χάρτη της εικόνας 3.1 φαίνεται η διαδρομή του υδραγωγείου και τα υπόγεια υδατικά συστήματα στα οποία ανήκει το Αδριάνειο και τα ενισχυτικά του υδραγωγεία.



Εικόνα 3.2 Τα υπόγεια υδατικά συστήματα της Αττικής και η διαδρομή του Αδριάνειου υδραγωγείου

Το υδραγωγείο διέρχεται εξ ολοκλήρου εντός του Υπόγειου Υδατικού Συστήματος Λεκάνης Κηφισού (Λεκανοπεδίου Αθήνας). Η λεκάνη του Κηφισού ορίζεται στις μάζες των τριτογενών και τεταρτογενών αποθέσεων που σχηματίζουν το πεδινό και λοφώδες τμήμα της, της μεγαλύτερης και σημαντικότερης από τις πεδιάδες της Αττικής, στην οποία έχει αναπτυχθεί η ευρεία αστική περιοχή της πρωτεύουσας. Η έκταση της περιοχής ορισμού του συστήματος είναι 360 km².

Στη μάζα των γεωλογικών υλικών του συστήματος αναπτύσσονται υπόγειες υδροφορίες ως εξής:

- Κοκκώδεις υδροφορίες στα προσχωματικά υλικά, άλλοτε αβαθείς και άλλοτε βαθύτερες υπό-πίεση, στα χαμηλότερα και πλέον εσωτερικά τμήματα της λεκάνης.
- Επάλληλες κοκκώδεις υδροφορίες στα τριτογενή ιζήματα, που βρίσκονται κατά θέσεις μεταξύ τους σε κατακόρυφη και πλευρική υδραυλική επικοινωνία.

- Καρστικές υδροφορίες με περιορισμένη δυναμικότητα στους ανθρακικής σύστασης λόφους που ανυψώνονται κατά θέσεις στο εσωτερικό της λεκάνης (Λυκαβηττός, Τουρκοβούνια κλπ.). Η καρστική υδροφορία κρίνεται συνολικά ήσσονος σημασίας αφού στη λεκάνη επικρατούν συντριπτικά οι κοκκώδεις υδροφορίες των τριτογενών και τεταρτογενών ιζημάτων, με βάση τις οποίες αποδόθηκε και ο συνολικός χαρακτηρισμός του υδατικού συστήματος.

Επομένως στην περιοχή μελέτης, με βάση τη γεωλογική και υδρογεωλογική συμπεριφορά των σχηματισμών, η κίνηση του υπόγειου νερού πραγματοποιείται μέσω τριών κύριων υδροφόρων συστημάτων, τους προσχωματικούς, τους κοκκώδεις σχηματισμούς και τους καρστικούς υδροφόρους.

Η τροφοδοσία του συστήματος, με παρουσίαση κατά φθίνουσα σειρά συνεισφοράς όγκων νερού έχει ως εξής:

- από πλευρικές μεταγίσεις που συντελούνται υπόγεια από τους καρστικούς σχηματισμούς της περιβάλλουσας ορεινής ζώνης.
- από διαρροές των δικτύων ύδρευσης και αποχέτευσης της αστικής περιοχής
- από την απευθείας κατείσδυση του μετεωρικού νερού στην έκταση ανάπτυξης της μάζας των σχηματισμών. Η τροφοδοσία αυτής της μορφής κρίνεται συγκριτικά μειωμένη λόγω της εκτεταμένης κάλυψης της λεκάνης από την δόμηση και τα αδρανή υλικά.

Η γενική κατεύθυνση κίνησης των υπόγειων νερών είναι περίπου ίδια με αυτή των επιφανειακών, δηλαδή προς τον Σαρωνικό Κόλπο.

Η μέση ετήσια τροφοδοσία του συστήματος δεν έχει υπολογισθεί, δεδομένων των συνθηκών και των πλευρικών μεταγίσεων της περιβάλλουσας ορεινής ζώνης. Κάποιες προσεγγίσεις που έχουν δημοσιευθεί κατά το παρελθόν αντιστοιχίζονται σε ετήσια τροφοδοσία της τάξης των $40 \times 10^6 \text{ m}^3$. Οι απολήψεις σε ετήσια βάση εκτιμήθηκαν τουλάχιστον σε $12.8 \times 10^6 \text{ m}^3$.

Το σύστημα αντλείται από περισσότερες από 5000 γεωτρήσεις για όλες σχεδόν τις χρήσεις. Οι γεωτρήσεις του συστήματος αντλούνται ανεξέλεγκτα με διάφορες παροχές. Οι ανεξέλεγκτες από χρόνια αντλήσεις και οι πιέσεις λόγω της αστικοποίησης έχουν οδηγήσει σε μεγάλη ποιοτική υποβάθμιση του νερού του συστήματος. Οι υδροφόροι ορίζοντες στις βόρειες περιοχές του συστήματος παρουσιάζονται σε σχετικά καλή ποιοτική κατάσταση ενώ στις νοτιότερες περιοχές η ποιοτική κατάσταση του συστήματος είναι πολύ υποβαθμισμένη κυρίως

λόγω ανθρώπινων δραστηριοτήτων (NAMA ΣΥΜΒΟΥΛΟΙ ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ & ΜΕΛΕΤΗΤΕΣ ΑΕ - ΓΑΜΜΑ4 ΕΠΕ, Αναθέτουσα αρχή: ΕΥΔΑΠ, Ειδική Γραμματεία Υδάτων, 2013).

Τα υδραγωγεία που ενισχύουν πλευρικά το Αδριάνειο με νερά του Πεντελικού όρους έχουν τμήματά τους στο Υπόγειο Υδατικό Σύστημα Πεντέλης. Το σύστημα ορίζεται από την περιοχή Αγίου Στεφάνου - Κηφισιάς - Γέρακα στα δυτικά μέχρι την πεδιάδα του Μαραθώνα και τον Νότιο Ευβοϊκό Κόλπο στα ανατολικά. Η έκταση της περιοχής ορισμού του συστήματος είναι 140 km².

Τα πετρώματα της Πεντέλης αποτελούν μία διαδοχή μαρμάρων στη βάση της σειράς, με επικείμενους σχιστόλιθους με παρεμβολές και στην οροφή πάλι μάρμαρα. Το βουνό σχηματίζει ένα μεγάλο αντίκλινο, με τα στρώματα του πυρήνα να εμφανίζονται στις υψηλότερες κορυφές, ενώ στις πλευρές τα συγκεκριμένα πετρώματα καλύπτονται σε μεγάλη έκταση από τους σχιστόλιθους Καισαριανής.

Το πάχος της γεωλογικής σύστασης εκτιμάται ότι είναι της τάξης των 1000 m. Ωστόσο το κορεσμένο πάχος του συστήματος είναι σημαντικά μικρότερο, εξαρτώμενο από τις κατά τόπους συνθήκες ανάπτυξης της υπόγειας υδροφορίας.

Στο σύστημα αναπτύσσονται επιμέρους υπόγειες υδροφορίες ως εξής:

- Καρστική υδροφορία στον σχηματισμό ανώτερου μαρμάρου στην δυτική πλευρά της Πεντέλης με επίπεδο αναφοράς τους υποκείμενους σχιστόλιθους Καισαριανής που αποστραγγίζεται προς την λεκάνη του Κηφισού. Το πάχος του συγκεκριμένου υδροφόρου όπως προέκυψε από τις γεωτρήσεις που έχουν εκτελεσθεί, κυμαίνεται από 60 m (Δροσιά), μέχρι και περισσότερα από 100 m (Εκάλη).
- Καρστική υδροφορία στον σχηματισμό ανώτερου μαρμάρου στην ανατολική πλευρά του βουνού, από Άγιο Πέτρο μέχρι τον Βρανά και στα ανατολικά στις προσβάσεις της Νέας Μάκρης.
- Καρστική υδροφορία στον σχηματισμό κατώτερου μαρμάρου στην κεντρική μάζα του βουνού, η οποία αναπτύσσεται κυρίως σε μεγάλο βάθος με βάση το επίπεδο της στάθμης της θάλασσας, αλλά κατά θέσεις και σε υψηλότερα επίπεδα λόγω της παρεμβολής στο μάρμαρο αδιαπέρατων σχιστολιθικών παρεμβολών. Η υδροφορία αυτή αποστραγγίζεται σε βάθος προς τα ανατολικά, προς την θάλασσα.

Η τροφοδοσία των υδροφορέων προέρχεται από την απευθείας κατείδυση του μετεωρικού νερού στην έκταση ανάπτυξης της μάζας τους. Μάρμαρα υψηλής υδροπερατότητας, τριτογενή

και τεταρτογενή υλικά μέτριας υδροπερατότητας, ή οι υδατοστεγανοί σχιστόλιθοι αποτελούν υπερκείμενα στρώματα του συστήματος.

Η μέση ετήσια τροφοδοσία του συστήματος εκτιμάται σε $15.5 \times 10^6 \text{ m}^3$ ιδιαίτερα η καρστική υδροφορία της δυτικής πλευράς της Πεντέλης εκτιμάται σε $2.2 \times 10^6 \text{ m}^3$. Ακόμη οι απολήψεις σε ετήσια βάση εκτιμήθηκαν σε $1.4 \times 10^6 \text{ m}^3$.

Η υπόγεια πηγή της Κιθάρας βρίσκεται στο υπόγειο υδατικό σύστημα της Βόρειο-Ανατολικής Πάρνηθας. Η αναπτυσσόμενη υπόγεια υδροφορία αυτού του συστήματος είναι καρστικής μορφής. Η γεωλογική σύσταση του συστήματος αποτελείται από ασβεστόλιθους που χαρακτηρίζονται από ισχυρή ρηγμάτωση και καρστικοποίηση, ενώ το πάχος της κορεσμένης μάζας του εκτιμάται περίπου στα 50 m. Ασβεστόλιθοι υψηλής υδροπερατότητας, ή τριτογενή και τεταρτογενή υλικά μέτριας υδροπερατότητας αποτελούν υπερκείμενα στρώματα του συστήματος.

Η τροφοδοσία του συστήματος εξασφαλίζεται από την απευθείας κατείσδυση του μετεωρικού νερού, ενώ η εκφόρτισή του γίνεται προς τις πεδινές περιοχές της Αττικής. Η ετήσια τροφοδοσία του συστήματος υπολογίζεται της τάξης των $85 \times 10^6 \text{ m}^3$, ενώ οι απολήψεις εκτιμήθηκαν σε ετήσια βάση σε $9.7 \times 10^6 \text{ m}^3$. Ακόμη το σύστημα εκμεταλλεύονται και μερικές δεκάδες γεωτρήσεις, που αντλούνται κύρια για αρδευτικούς σκοπούς. Τέλος, η ποιότητα του νερού του συστήματος, στο μεγαλύτερο μέρος της έκτασης ανάπτυξής του, είναι καλή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

4 Συλλογή και Επεξεργασία Στοιχείων

Για τον σκοπό της εργασίας, συλλέχθηκαν, αναλύθηκαν και επεξεργάστηκαν βροχομετρικά δεδομένα σε σταθμούς της Αττικής. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκαν τα μετεωρολογικά δεδομένα ενός δικτύου αυτόματων τηλεμετρικών σταθμών του Υδρολογικού Παρατηρητηρίου Αθήνας, το οποίο λειτουργεί με ευθύνη του Εργαστηρίου Υδρολογίας του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστεί το λογισμικό Υδρογνώμων και ιδιαίτερα το υποσύστημά του Ζυγός με το οποίο θα γίνει η προσομοίωση των βασικών υδρολογικών διεργασιών της λεκάνης του Αδριάνειου Υδραγωγείου, καθώς και των λεκανών των ενισχυτικών υδραγωγείων του. Ακόμη, χρησιμοποιώντας τα γεωλογικά και υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά των λεκανών απορροής θα εκτιμηθούν οι τιμές των παραμέτρων του μοντέλου Ζυγός, και τέλος θα περιγραφεί η διαδικασία που θα ακολουθηθεί για την προσομοίωση της απόκρισης του υδατικού συστήματος.

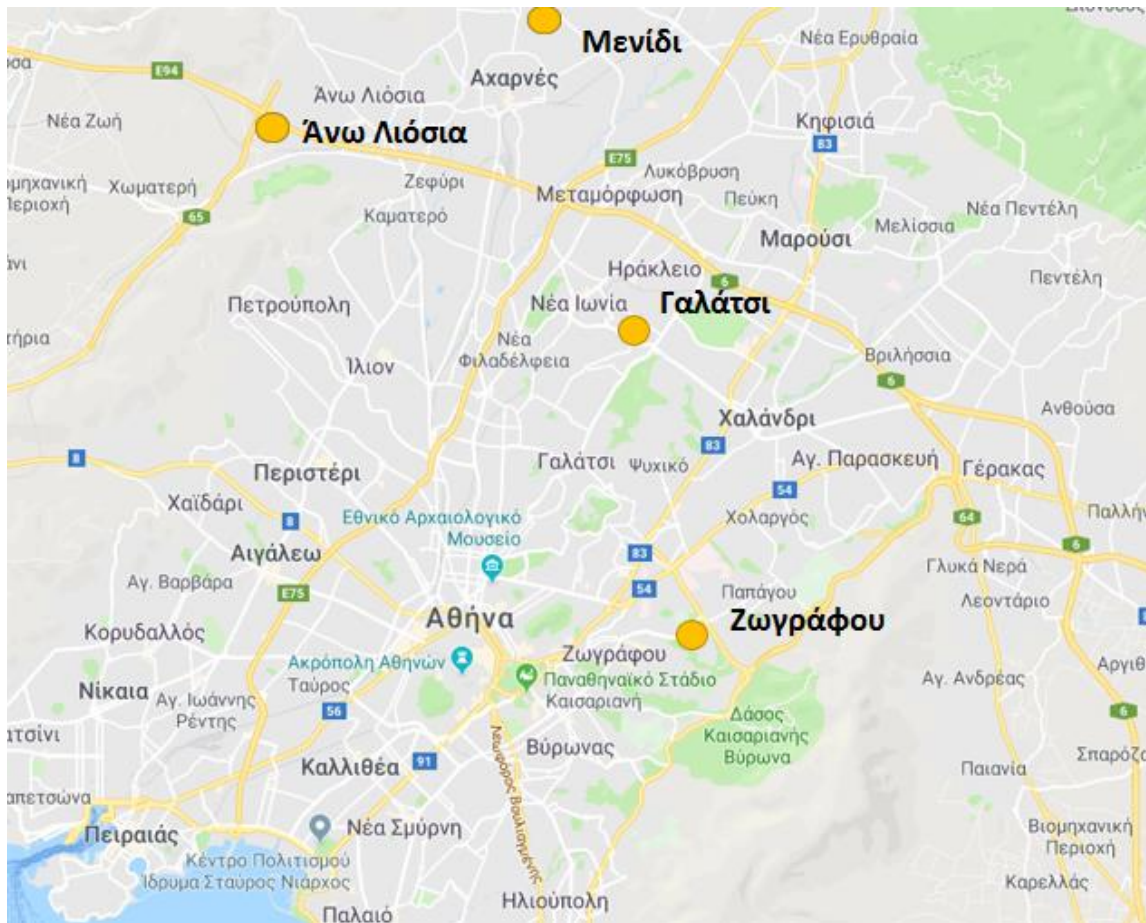
4.1 Το Υδρολογικό Παρατηρητήριο της Αθήνας

Το Υδρολογικό Παρατηρητήριο της Αθήνας είναι ένα δίκτυο αυτόματων τηλεμετρικών υδρομετεωρολογικών σταθμών το οποίο καλύπτει την ευρύτερη περιοχή του λεκανοπεδίου Αττικής. Πρόκειται για την εξέλιξη του υδρομετεωρολογικού δικτύου METEONET και προσφέρει πρόσβαση σε μια βάση δεδομένων. Αναπτύχθηκε και λειτουργεί από το Εργαστήριο Υδρολογίας και Αξιοποίησης Υδατικών Πόρων του ΕΜΠ και αποσκοπεί στην παρακολούθηση και καταγραφή των υδρομετεωρολογικών και βιοκλιματικών συνθηκών της περιοχής (hoa.ntua.gr).

Σε κάθε σταθμό του δικτύου είναι εγκατεστημένοι αισθητήρες μέτρησης βροχόπτωσης, θερμοκρασίας, σχετικής υγρασίας, ταχύτητας-διεύθυνσης-ριπής ανέμου, ηλιακής ακτινοβολίας, καθαρής ακτινοβολίας και διάρκειας ηλιοφάνειας. Οι μετρήσεις των υδρομετεωρολογικών παραμέτρων επαναλαμβάνονται ανά δέκα λεπτά, αποθηκεύονται σε βάση δεδομένων και είναι ελεύθερα προσβάσιμες στο Διαδίκτυο. Οι δεκάλεπτες μετρήσεις αθροίζονται κατάλληλα έτσι ώστε να προκύψουν οι αντίστοιχες εκτιμήσεις σε ημερήσια, μηνιαία ή ετήσια βάση.

Η ευρύτερη περιοχή μελέτης περιλαμβάνει τέσσερις υδρομετεωρολογικούς σταθμούς και πιο συγκεκριμένα τους σταθμούς στο Μενίδι, Γαλάτσι, Ζωγράφου και Άνω Λιόσια. Στον χάρτη

της Εικόνας 4.1 απεικονίζονται οι θέσεις των υδρομετεωρολογικών σταθμών, ενώ τα χαρακτηριστικά αυτών δίνονται στον Πίνακα 4.1.



Εικόνα 4.1 Θέσεις μετεωρολογικών σταθμών

Πίνακας 4.1 Χαρακτηριστικά των μετεωρολογικών σταθμών της περιοχής μελέτης

Όνομασία σταθμού	Υψόμετρο (m)	Συντεταγμένες (ΕΓΣΑ '87)		Διάρκεια μετρήσεων
		X(m)	Y(m)	
Γαλάτσι	176	478 560.86	4208815.5	10/01/2005-30/09/2016
Ζωγράφου	181	481 137	4203010.6	10/01/2005-30/09/2016
Μενίδι	210	476 525.5	4217394.2	10/01/2005-30/09/2016
Άνω Λιόσια	184	470 969.3	4213921.9	10/01/2005-30/09/2016

Η ανάκτηση των δεδομένων, που χρησιμοποιήθηκαν έγινε από το διαδίκτυο και συγκεκριμένα από τη διαδικτυακή σελίδα hoa.ntua.gr, σε ψηφιακή μορφή και σε χρονική κλίμακα 10 min.. Στον διαδραστικό χάρτη μας δίνεται η δυνατότητα να προσδιορίσουμε τους υδρομετεωρολογικούς σταθμούς και να κατεβάσουμε τις ιστορικές χρονοσειρές. Η σελίδα αυτή υποστηρίζεται από το Κέντρο Ηλεκτρονικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Οι χρονοσειρές των δεδομένων είναι αποθηκευμένες σε αρχεία τύπου .hts. Είναι αρχεία κειμένου τα οποία έχουν δημιουργηθεί με το λογισμικό Υδρογνώμων. Η κάθε χρονοσειρά αποθηκεύεται σε ξεχωριστό αρχείο, το οποίο στις ιδιότητες του μεταξύ των άλλων περιλαμβάνει τη χρονική κλίμακα, διάφορα σχόλια, τη μεταβλητή και τη μονάδα μέτρησης της.

Αρχικά λήφθηκαν οι χρονοσειρές για τον υπολογισμό της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής. Αυτές είναι οι χρονοσειρές της θερμοκρασίας, της σχετικής υγρασίας, της ριπής του ανέμου και της διάρκειας της ηλιοφάνειας. Ο υπολογισμός έγινε με τη μεθοδολογία Penman με χρήση του λογισμικού Υδρογνώμων.

Ακόμη λήφθηκαν χρονοσειρές κατακρήμνισης των παραπάνω σταθμών. Έχουν συλλεγεί σε ημερήσια βάση και έχουν γίνει κατάλληλες επεξεργασίες για την εξαγωγή τους σε μηνιαία κλίμακα.

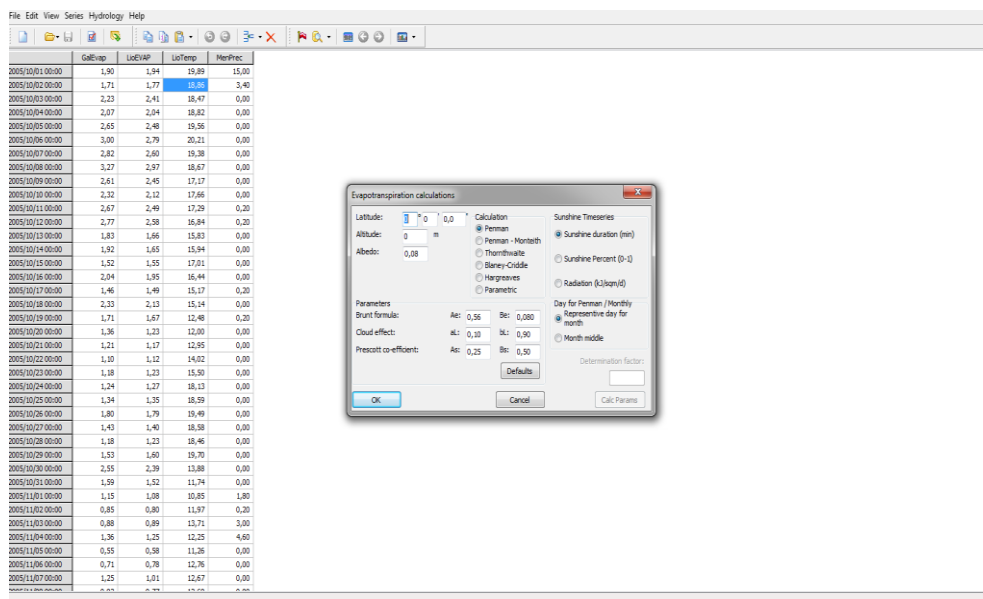
Οι μηνιαίες χρονοσειρές κατακρήμνισης και δυνητικής εξατμισοδιαπνοής για του τέσσερις βροχομετρικούς σταθμούς παρουσιάζονται στο Παράρτημα Α.

4.2 Το λογισμικό Υδρογνώμων

4.2.1 Γενικά για το λογισμικό Υδρογνώμων

Ο Υδρογνώμων είναι μια αυτόνομη εφαρμογή λογισμικού που αναπτύχθηκε από το Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Πρόκειται για ένα σύστημα επεξεργασίας χρονοσειρών που αναπτύχθηκε στα πλαίσια των ερευνητικών έργων με τίτλους «Εκσυγχρονισμός της εποπτείας και διαχείρισης του συστήματος των υδατικών πόρων ύδρευσης της Αθήνας, 1999–2003» και «Ολοκληρωμένη Διαχείριση Υδατικών Συστημάτων σε Σύζευξη με Εξελιγμένο Υπολογιστικό Σύστημα (ΟΔΥΣΣΕΥΣ)» (Σ.Κοζάνης, 2009).

Στην Εικόνα 4.2 φαίνεται η εισαγωγική οθόνη του προγράμματος.



Εικόνα 4.2 Εισαγωγική Οθόνη του λογισμικού Υδρογνώμων

Αναλυτικά οι σημαντικότερες υδρολογικές επεξεργασίες που πραγματοποιεί το υπολογιστικό σύστημα αυτό είναι :

- Μετατροπή χρονοσειρών σε σταθερό χρονικό βήμα
- Εξαγωγή χρονοσειρών μεγαλύτερου χρονικού βήματος (συνάθροιση)
- Μετατροπή χρονοσειρών σε σταθερό χρονικό βήμα
- Εξαγωγή χρονοσειρών μεγαλύτερου χρονικού βήματος (συνάθροιση)
- Τυπικοί έλεγχοι συνέπειας όπως ακραίων τιμών και χρονικής συνέπειας
- Γραμμική παλινδρόμηση μεταξύ χρονοσειρών, πολλαπλή παλινδρόμηση, οργανική συσχέτιση και αυτοσυσχέτιση
- Υδατικά ισοζύγια: αδρομερές μοντέλο βροχής – απορροής (υποσύστημα «Ζυγός»)
- Συμπλήρωση ελλειπουσών τιμών με χρήση της γραμμικής παλινδρόμησης, δυνατότητα εισαγωγή τυχαίου όρου για διατήρηση των στατιστικών χαρακτηριστικών και επέκταση χρονοσειρών
- Γραμμικές πράξεις μεταξύ χρονοσειρών
- Κατάρτιση καμπυλών στάθμης – παροχής με στατιστικές μεθόδους και καμπυλών επέκτασης με χρησιμοποίηση υδραυλικών εξισώσεων
- Υπολογισμός εξάτμισης και δυνητικής εξατμισοδιαπνοής με αναλυτικές ή ημιεμπειρικές μεθόδους
- Επέκταση δειγμάτων εξατμισοδιαπνοής

- Εύρεση στατιστικών χαρακτηριστικών δείγματος χρονοσειράς, προσαρμογή στατιστικών παραμέτρων, στατιστικές προγνώσεις, στατιστικοί έλεγχοι και εύρεση διαστημάτων εμπιστοσύνης (υποσύστημα «Πυθία»).
- Ανάλυση χρονοσειρών εξαιρετικών βροχοπτώσεων - κατάρτιση όμβριων καμπυλών με συνεπείς μεθοδολογίες (υποσύστημα «Όμβρος»).

4.2.2 Το υδρολογικό μοντέλο Ζυγός

Το υποσύστημα του Υδρογνώμων Ζυγός χρησιμοποιείται για την αδρομερή προσομοίωση υδρολογικών διεργασιών σε μια λεκάνη απορροής. Το μοντέλο Ζυγός τροφοδοτείται με χρονοσειρές βροχόπτωσης, δυνητικής εξατμισοδιαπνοής και αντλήσεων από τα υπόγεια ύδατα. Η μορφή του μοντέλου καθορίζεται ανοίγοντας ή κλείνοντας τις κατάλληλες «βάνες» και καθορίζοντας τις παραμέτρους (Σχήμα 4.1).



Σχήμα 4.1 Σχηματική απεικόνιση του μοντέλου Ζυγός

Το μοντέλο Ζυγός βασίζεται πάνω στο απλό μοντέλο υδατικού ισοζυγίου του Thornthwaite με μια επιπλέον δεξαμενή για το υπόγειο νερό. Σύμφωνα με αυτό, η λεκάνη απορροής

προσομοιώνεται με μία απλή δεξαμενή, της οποίας η χωρητικότητα είναι ίση προς K . Η ποσότητα νερού που είναι κάθε φορά αποθηκευμένη στην δεξαμενή παριστάνει την εδαφική υγρασία S , της οποίας η μέγιστη τιμή είναι ίση προς K . Είσοδος στην δεξαμενή είναι η βροχόπτωση P , έξοδος η εξατμισοδιαπνοή E και η επιφανειακή απορροή Q . Η απορροή Q είναι το άθροισμα της άμεσης απορροής, που είναι ένα ποσοστό της βροχόπτωσης, και της επίγειας απορροής, που είναι το νερό που υπερχειλίζει από τη δεξαμενή.

Το υδατικό ισοζύγιο όσο αναφορά την επιφανειακή υδρολογία εκφράζεται από την εξίσωση:

$$\Delta S = P - E - Q$$

Η δεξαμενή του μοντέλου για το υπόγειο νερό δέχεται την κατείδυση PERC από τη δεξαμενή εδαφικής υγρασίας. Ένα ποσοστό του υπόγειου νερού αντλείται από τις γεωτρήσεις που υπάρχουν στο σύνολο του υδροφορέα και ένα άλλο διαφεύγει εκτός λεκάνης. Το πρώτο εκφράζεται με το μέγεθος PUMP και το δεύτερο με το QOUT. Ακόμη εφ' όσον το διαθέσιμο απόθεμα υπόγειου νερού υπερβαίνει την τιμή H_2 παράγεται η βασική ροή του υπόγειου υδροφορέα που εκφράζεται με το μέγεθος QB.

4.2.3 Παράμετροι του μοντέλου Ζυγός

Για την αναπαράσταση των φυσικών διεργασιών των επιμέρους λεκανών απορροής θα χρησιμοποιηθούν τα κλιματολογικά δεδομένα από επεξεργασία μετρήσεων πεδίου και ένα σύνολο υποθέσεων σχετικά με την μαθηματική αναπαράσταση των διεργασιών της λεκάνης.

Το υπολογιστικό σύστημα Ζυγός υλοποιεί ένα σχήμα συνδυασμένης προσομοίωσης των επιφανειακών και υπόγειων νερών. Στο μοντέλο επιχειρείται μία εννοιολογική προσέγγιση που επιτυγχάνεται με την συσχέτιση των υδρολογικών διεργασιών με τα γεωμορφολογικά και φυσιογραφικά χαρακτηριστικά της λεκάνης. Για να είναι αποδοτική η προσομοίωση από πλευράς υπολογιστικού φόρτου, θα χρησιμοποιηθεί ένα μικρό σχετικά πλήθος παραμέτρων και θα θεωρηθούν ενιαίες τιμές για ολόκληρη την έκταση της κάθε λεκάνης. Όσο αυξάνεται το πλήθος των παραμέτρων, αυξάνεται και το πλήθος των δοκιμών οπότε δυσκολεύεται η εύρεση ενός συνδυασμού παραμέτρων που να αντιπροσωπεύουν τη λεκάνη. Συνεπώς, επιδιώκεται η εύρεση μιας ικανοποιητικής λύσης με λογικό πλήθος δοκιμών. Για το σκοπό της εργασίας θα χρησιμοποιηθούν πέντε παράμετροι.

Στην πραγματικότητα στο έδαφος υπάρχει ετερογένεια και ανομοιομορφία. Οι παράμετροι του εδάφους, όπως οι φυσικές και οι μηχανικές του ιδιότητες, ποικίλουν χωρικά τόσο στον κατακόρυφο όσο και στον οριζόντιο άξονα. Ωστόσο, για τους παραπάνω λόγους διευκόλυνσης

της διαδικασίας, η κάθε λεκάνη απορροής προσομοιάζεται με ενιαία υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά. Αυτό σημαίνει πως θεωρήθηκε ενιαίο πορώδες και ενιαία υδραυλική αγωγιμότητα για όλη την λεκάνη. Οι εν λόγω παράμετροι θα θεωρηθούν αντιπροσωπευτικές ορισμένων μέσων χαρακτηριστικών της λεκάνης.

Οι παράμετροι του μοντέλου Ζυγός που θα χρησιμοποιηθούν αφορούν την άμεση απορροή, την ακόρεστη ζώνη του εδάφους, την κατείδυση, την βασική ροή, τις υπόγειες διαφυγές νερού εκτός λεκάνης.

Ένα μέρος της βροχόπτωσης δεν εισχωρεί στο έδαφος αλλά εισέρχεται αμέσως στα υδατορεύματα ή κινείται πάνω από την επιφάνεια του εδάφους. Όταν η επιφανειακή στρώση της λεκάνης αποτελείται από συνεκτικό έδαφος με μικρή διηθητικότητα, μέρος της βροχής κινείται επιφανειακά. Γενικότερα τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας του εδάφους όπως η τραχύτητα, η δομή και η ύπαρξη μεγάλων θραυσμάτων βράχων, επηρεάζουν τα ποσοστά της άμεσης απορροής. Αυτό το ποσοστό της περίσσειας βροχόπτωσης που εμφανίζεται ως άμεση απορροή, στο μοντέλο Ζυγός αντιπροσωπεύεται με την παράμετρο κ. Είναι μια αδιάστατη παράμετρος και εξαρτάται κυρίως από την έκταση των αδιαπέρατων εδαφικών σχηματισμών της επιφάνειας της λεκάνης.

Το έδαφος αποτελείται από στερεούς κόκκους, νερό και αέρα. Στις περιπτώσεις που το νερό καταλαμβάνει το σύνολο των εδαφικών πόρων, το έδαφος είναι πλήρως κορεσμένο, ενώ στις υπόλοιπες περιπτώσεις που οι πόροι πληρούνται με νερό και αέρα το έδαφος είναι μερικώς κορεσμένο. Η ακόρεστη ζώνη του εδάφους αντιπροσωπεύεται με την πρώτη δεξαμενή του μοντέλου. Η παράμετρος Κ χαρακτηρίζει την πρώτη δεξαμενή και ονομάζεται χωρητικότητα δεξαμενής εδαφικής υγρασίας. Ποσοτικοποιεί την ικανότητα ενός συγκεκριμένου εδάφους να κρατά το βαρυτικό νερό και είναι η μέγιστη εδαφική υγρασία που μπορεί να αποθηκευτεί στο έδαφος. Έχει διαστάσεις ισοδύναμου ύψους νερού και συσχετίζεται με τις ιδιότητες του εδάφους και την φυτοκάλυψη. Σε τυπικά εδαφικά δοκίμια, η τιμή της παραμέτρου χωρητικότητα κυμαίνεται ανάμεσα στα 100-200 mm. Ωστόσο, στα μηνιαία εννοιολογικά μοντέλα, η τιμή αυτή είναι συνήθως αρκετά μεγαλύτερη.

Η μέγιστη εδαφική υγρασία που μπορεί να αποθηκευτεί στην ακόρεστη ζώνη είναι μια μεταβαλλόμενη παράμετρος τόσο χρονικά όσο και χωρικά, καθώς η σύνθεση των εδαφών στην περιοχή μελέτης ποικίλλει. Τη συγκέντρωση και τη χωροχρονική κατανομή της υγρασίας στο έδαφος επηρεάζουν οι φυσικές και οι χημικές ιδιότητες του, όπως η υφή, το πορώδες και η περιεκτικότητα του σε οργανική ύλη. Η υφή, ειδικότερα, μπορεί να ελέγξει τη φύση της

μετάδοσης και της κατακράτησης του νερού στο έδαφος. Τα χονδρόκοκκα εδάφη με υψηλή αναλογία άμμου θα αποστραγγίζονται καλύτερα από τα λεπτώς υγρά εδάφη, όπως οι άργιλοι, και ως εκ τούτου θα έχουν χαμηλότερη χωρητικότητα συγκράτησης νερού. Επιπλέον, η περιεκτικότητα των εδαφών σε οργανική ύλη επηρεάζει άμεσα τις διηλεκτρικές ιδιότητες του εδάφους καθώς δημιουργεί δεσμούς μεταξύ των κόκκων.

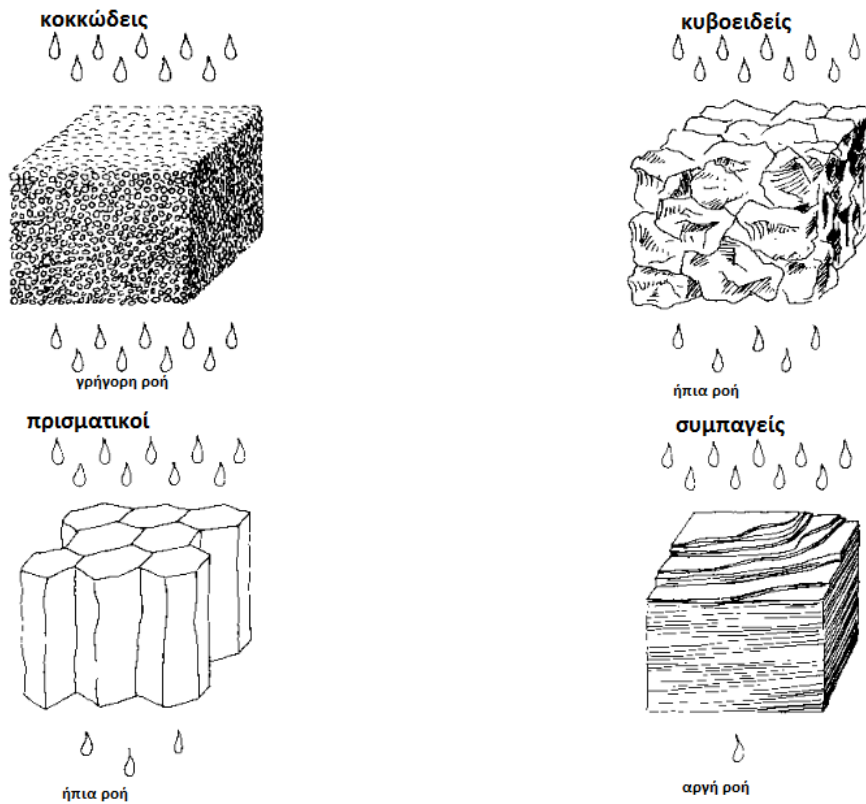
Η δυνατότητα του εδάφους να αποθηκεύσει υγρασία επηρεάζεται από την βλάστηση του υπερκείμενου στρώματος, ιδιαίτερα του τύπου, της πυκνότητας και της ομοιομορφίας της βλάστησης. Μέρος της βροχόπτωσης χρησιμοποιείται για τη διαπνοή των φυτών αλλά και απορροφείται από τις ρίζες. Επιπλέον, η παρουσία φυτοκάλυψης επηρεάζει την υγρασία του εδάφους μέσω της σκίασης του στρώματος του εδάφους, η οποία με τη σειρά της επηρεάζει την ταχύτητα εξάτμισης του νερού από το έδαφος. Προφανώς η επιρροή της βλάστησης δεν είναι τόσο έντονη στις αστικές λεκάνες αλλά στις ορεινές.

Η αρχική εδαφική υγρασία, θεωρήθηκε παντού μηδενική, δεδομένου ότι η προσομοίωση ξεκινά τον Οκτώβριο, που συμπίπτει με το πέρας της ξηρής περιόδου.

Όπως σημειώθηκε παραπάνω, θεωρήθηκε ενιαίο πορώδες για την κάθε λεκάνη απορροής. Η τιμή του πορώδους συνδέεται με τη ευαισθησία στη διακύμανση της στάθμης του υπόγειου υδροφορέα. Με μικρές τιμές πορώδους απαιτούνται μεγάλες μεταβολές της στάθμης για την αποθήκευση όγκου νερού, ενώ αντίθετα για μεγάλες τιμές του πορώδους απαιτούνται μικρές μεταβολές της στάθμης για την αποθήκευση του ίδιου όγκου νερού. Ακόμη, η ταχύτητα ροής του υπόγειου νερού είναι γενικά χαμηλή. Η κίνηση των υπόγειων υδάτων συμβαίνει αργά ως διήθηση διαμέσου των διαστημάτων πόρων μεταξύ σωματιδίων των γαιών ή μέσω ρηγμάτων και ανοιγμάτων των βράχων.

Το σύνολο σχεδόν του νερού που περιέχεται στο έδαφος και τροφοδοτεί τους υπόγειους υδροφορείς προέρχεται από τα επιφανειακά νερά μέσω της κατείσδυσης των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων ή της διήθησης των συγκεντρωμένων επιφανειακών υδάτων. Ο ρυθμός εκφόρτισης των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων που κατεισδύουν εντός του εδάφους στο μοντέλο αντικατοπτρίζεται στην παράμετρο μ . Αναφέρεται στην κατακόρυφη κίνηση του νερού από την ακόρεστη στην κορεσμένη ζώνη, κίνηση που πραγματοποιείται κάτω από την επίδραση των δυνάμεων της βαρύτητας και της τριχοειδούς έλξης. Η τιμή του συντελεστή διήθησης εξαρτάται από το είδος των επιφανειακών εδαφικών σχηματισμών και κυρίως το μέγεθος των κόκκων, την κοκκομετρική διαβάθμιση, την τριβή που αναπτύσσεται μεταξύ των

κόκκων, το σχήμα και την χωρική κατανομή των πόρων ή των ρωγμών στη μάζα του εδάφους ή του βράχου. Στο σχήμα 4.2 φαίνεται η επιρροή της δομής του εδάφους στον ρυθμό διήθησης.



Σχήμα 4.2 Σχηματική απεικόνιση της επιρροής χαρακτηριστικών σχημάτων δομών εδάφους στον ρυθμό διήθησης (Πηγή: Irrigation Water Management (Brouwer, 1985))

Η απορροή μιας λεκάνης είναι το άθροισμα του νερού που κινείται επιφανειακά και οδηγείται προς το υδατόρευμα, με το νερό που διεισδύει στην επιφάνεια του εδάφους και με βαρύτητα αδειάζει και αυτό στο υδατόρευμα. Το δεύτερο είδος ροής ονομάζεται βασική ροή και είναι πολύ σημαντική για τη διατήρηση της ροής σε ρέματα και ποτάμια σε περιόδους χαμηλών βροχοπτώσεων. Στο μοντέλο Ζυγός εκφράζεται με την παράμετρο ξ και ονομάζεται ρυθμός εκφόρτισης δεξαμενής υπόγειου νερού για την παραγωγή βασικής ροής. Η τιμή της παραμέτρου εξαρτάται από τα υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά των επιφανειακών εδαφικών στρώσεων και των βαθύτερων γεωλογικών σχηματισμών της λεκάνης.

Η ποσοτική αξιολόγηση των εισροών και εκροών από ένα υπόγειο υδατικό σύστημα είναι δύσκολη, καθώς δεν αποτελεί ένα κλειστό υδρολογικό σύστημα. Η τροφοδοσία των υπόγειων υδροφορέων εξασφαλίζεται από τις βροχοπτώσεις που διηθούνται στο ανάπτυγμα της λεκάνης, αλλά και από πλευρικές μεταγίσεις νερών των γειτονικών λεκανών, στις περιοχές που οι υδρογεωλογικές συνθήκες το επιτρέπουν. Επιπλέον, από το νερό που κατεισδύει στο έδαφος

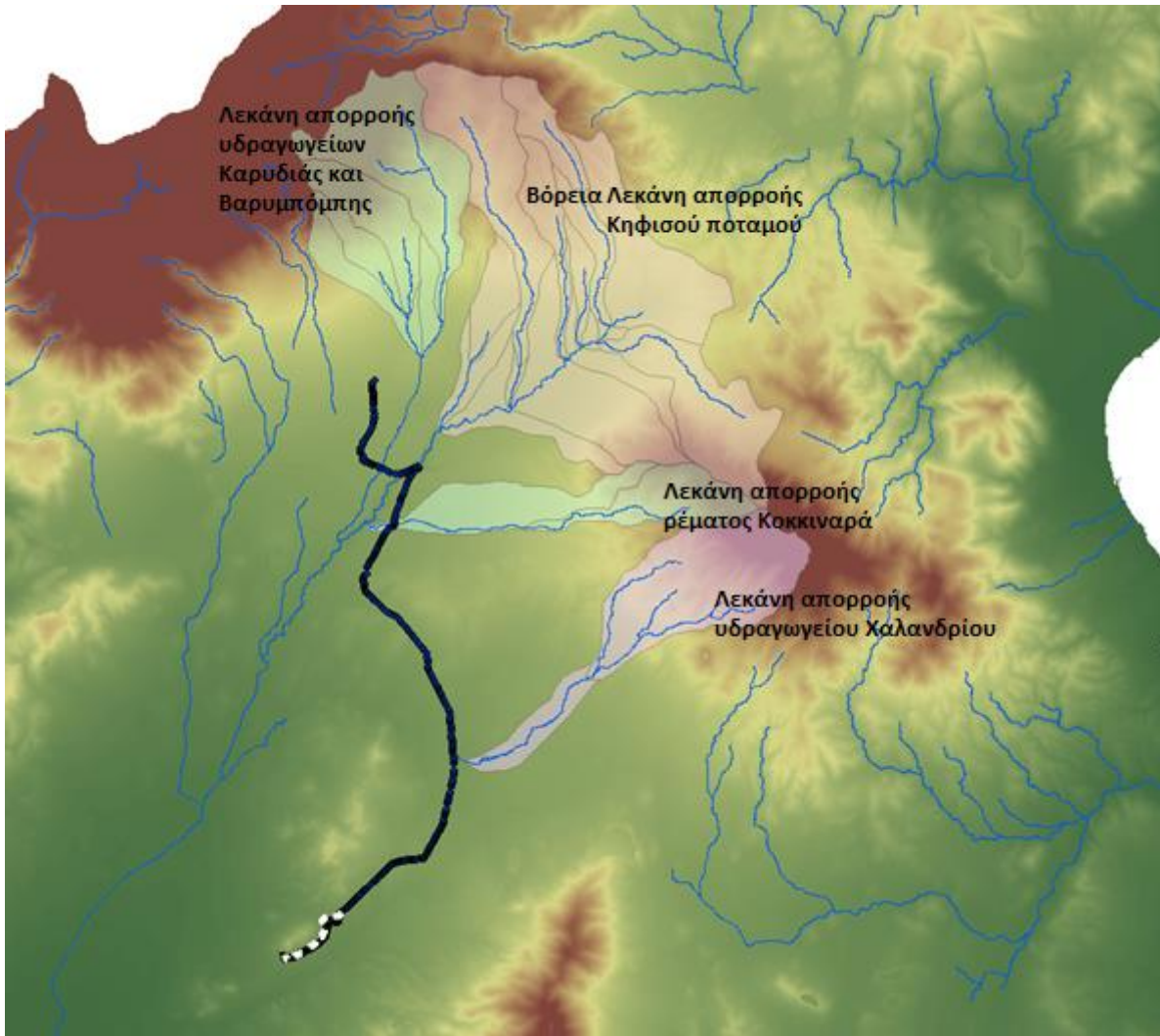
της λεκάνης μόνο ένα μέρος αποθηκεύεται. Το υπόλοιπο είτε αντλείται, είτε χάνεται κινούμενο προς βαθύτερους υδροφόρους ορίζοντες ή γειτονικές λεκάνες.

Ο ρυθμός με τον οποίο το νερό κινείται κατακόρυφα εντός της κορεσμένης ζώνης και διαφεύγει από τον υπόγειο υδροφόρο στο μοντέλο Ζυγός εκφράζεται με την παράμετρο ϕ . Είναι αδιάστατο μέγεθος και εξαρτάται από το βαθμό επικοινωνίας του υπόγειου υδροφόρου με γειτονικές λεκάνες ή τη θάλασσα.

4.3 Επιλογή των τιμών των παραμέτρων και η υπολογιστική διαδικασία

Όπως έχει προαναφερθεί, δεδομένα της παρούσης εργασίας αποτελούν οι καταγραφές τεσσάρων μετεωρολογικών σταθμών εντός της λεκάνης απορροής του Κηφισού. Μαζί με τη λεκάνη απορροής του Κηφισού θα προσομοιωθούν και οι υπολεκάνες της παρακάτω εικόνας 4.3. Οι υπολεκάνες που ορίζονται στο χάρτη, συλλέγουν τα όμβρια ύδατα και έμμεσα μέσω κατείσδυσης τα διοχετεύουν στο υδραγωγείο. Αντιπροσωπεύουν τα κυριότερα πλευρικά υδραγωγεία και ρέματα που ενισχύουν το Αδριάνειο. Αν και οι σταθμοί δεν βρίσκονται εντός των υπολεκανών, τα δεδομένα τους χρησιμοποιήθηκαν για την υδρολογική τους προσομοίωση.

Η επιλογή σταθμών εκτός της λεκάνης απορροής έγινε για να αξιοποιηθούν χρονοσειρές δεδομένων μεγάλου μήκους και υψηλής ποιότητας. Επίσης, καθώς το κλίμα της ευρύτερης περιοχής δεν παρουσιάζει σημαντικές μεταβολές, η χρήση των σταθμών αυτών προσθέτει επιπλέον πληροφορία, χρήσιμη για την εκπόνηση της εργασίας. Η διαπίστωση της κλιματικής ομογένειας της περιοχής έγινε συγκρίνοντας τα στατιστικά χαρακτηριστικά των χρονοσειρών των διαφορετικών σταθμών, όπου και προέκυψε ότι δεν υπάρχουν στατιστικά σημαντικές διαφορές σε αυτά.



Εικόνα 4.3 Λεκάνες απορροής των κυριότερων ενισχυτικών υδραγωγείων στο Αδριάνειο
 Επειδή μας ενδιαφέρει η κατακρήμνιση και πραγματική εξατμισοδιαπνοή που αντιπροσωπεύουν ολόκληρη τη λεκάνη, οι μετρήσεις των τεσσάρων σταθμών ανάγονται σε επιφανειακές. Θεωρήθηκε ότι ο κάθε σταθμός έχει ισόποση επιρροή, ίση με 0,25. Το πρόγραμμα υποστηρίζει γραμμικές πράξεις χρονοσειρών.

1) Στο περιβάλλον του Υδρογνώμων από το βασικό μενού επιλέγουμε

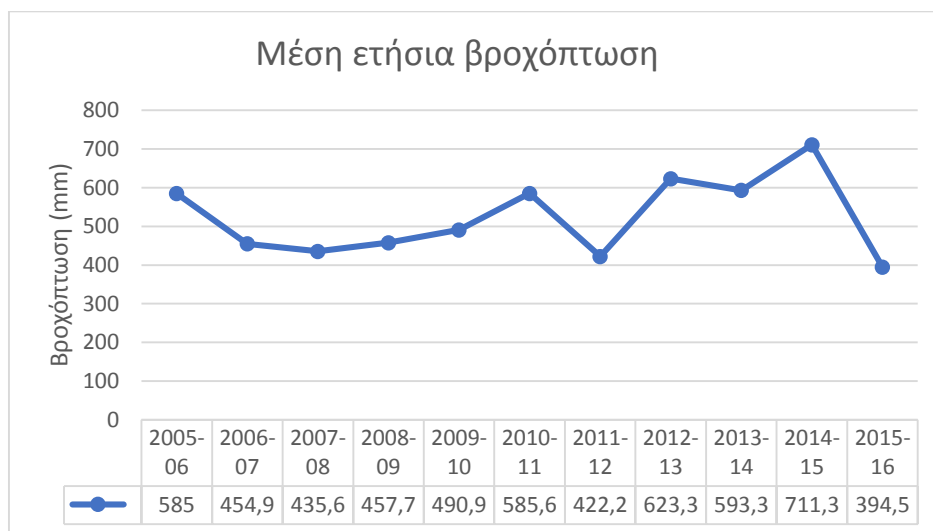
Series → Linear Combinations

2) Έπειτα στη φόρμα που εμφανίζεται συμπληρώνονται οι συντελεστές για κάθε χρονοσειρά, ίσος με 0,25 για όλες, και ο σταθερός όρος ίσος με 0

3) Το αποτέλεσμα είναι μια νέα στήλη, που είναι ο γραμμικός συνδυασμός

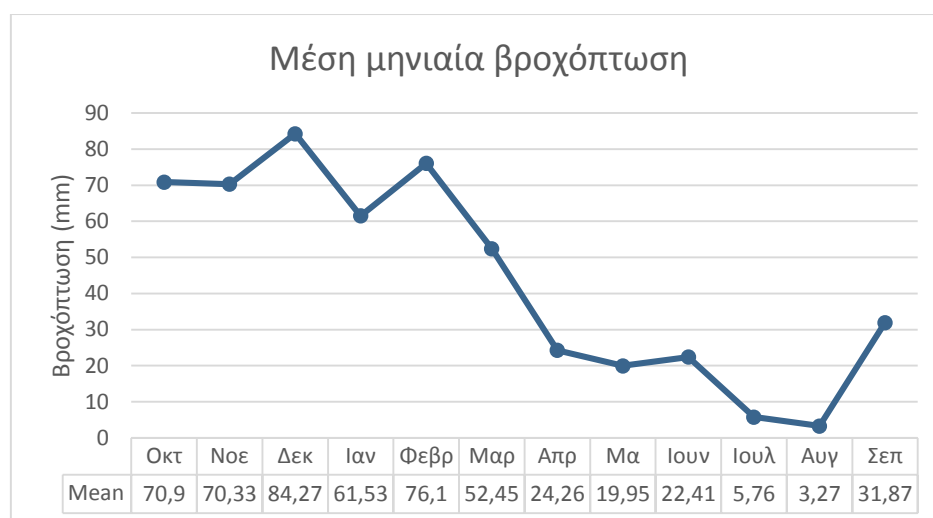
Οι χρονοσειρές κατακρήμνισης και εξατμισοδιαπνοής για ολόκληρη τη λεκάνη του Κηφισού φαίνονται στο Παράρτημα Α.

Από την επεξεργασία των δεδομένων βροχόπτωσης προκύπτει ότι η μέση υπερετήσια βροχόπτωση για την χρονική περίοδο 2005-2016 είναι 523,1 mm.



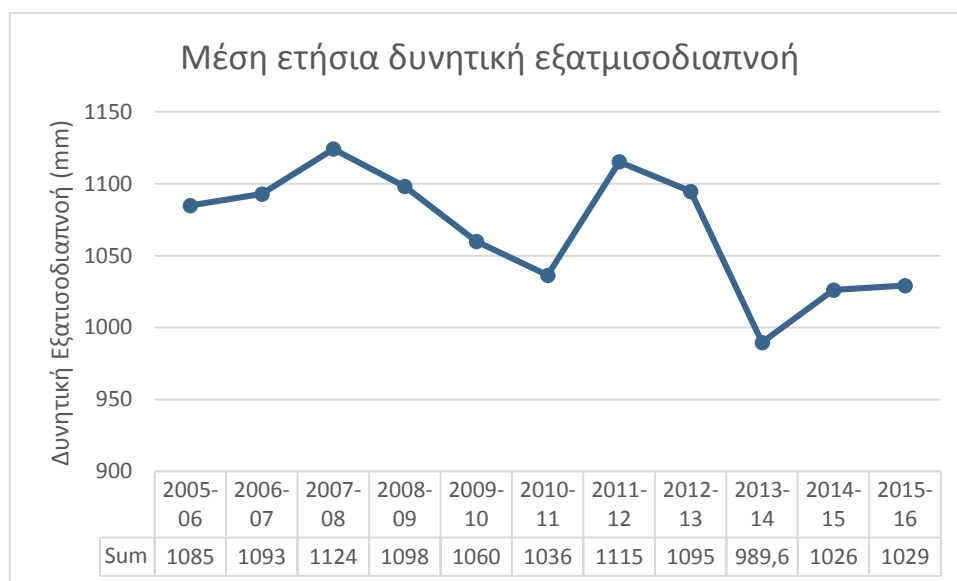
Σχήμα 4.3 Διάγραμμα μέσης ετήσιας βροχόπτωσης της λεκάνης απορροής για την χρονική περίοδο 2005-2016

Ακόμη από την μηνιαία κατανομή προκύπτει ότι η μέγιστη και η ελάχιστη μηνιαία βροχόπτωση παρατηρείται κατά τους μήνες Δεκέμβριο και Αύγουστο αντίστοιχα.



Σχήμα 4.4 Διάγραμμα μέσης μηνιαίας βροχόπτωσης της περιοχής μελέτης για την χρονική περίοδο 2005-2016

Για περίοδο μελέτης από το 2005 έως 2016, από τα κλιματικά δεδομένα προκύπτει ότι η μέση υπερετήσια δυνητική εξατμισοδιαπνοή κατά Penman είναι 1068,31 mm.



Σχήμα 4.5 Διάγραμμα μέσης ετήσιας δυνητικής εξατμισοδιαπνοής της περιοχής μελέτης για την χρονική περίοδο 2005-2016

Η εκτίμηση των παραμέτρων του μοντέλου βασίστηκε στην υδρολιθολογική διάκριση και κατάταξη των γεωλογικών σχηματισμών που συμμετέχουν στη διαμόρφωση της γεωλογικής δομής της λεκάνης απορροής. Η υδρολιθολογική κατάταξη των γεωλογικών σχηματισμών έγινε με βάση την αξιολόγηση και συνεκτίμηση των κύριων παραμέτρων που καθορίζουν τις συνθήκες κίνησης και αποθήκευσης νερού στα διάκενά τους, δηλαδή του πορώδους και της υδροπερατότητας. Οι ιδιότητες αυτές για τον κάθε εδαφικό σχηματισμό περιγράφηκαν εκτενώς στο υποκεφάλαιο 3.1.

Η χωρητικότητα της δεξαμενής εδαφικής υγρασίας θα εκτιμηθεί με βάση την ικανότητα συγκράτησης νερού των εδαφών των λεκανών απορροής. Η ικανότητα των εδαφών να συγκρατήσουν το νερό ποικίλλει ανάλογα με τις εδαφικές υφές τους και τη φυτοκάλυψη της περιοχής. Τα εδάφη με τη ελάχιστη ικανότητα είναι οι άμμοι και τα χαλίκια καθώς είναι συσσωματώματα συγκριτικά μεγαλύτερων σωματιδίων που στερούνται συνοχής. Τα αργιλικά εδάφη έχουν την υψηλότερη ικανότητα συγκράτησης νερού, ικανότητα που εξαρτάται από τον τύπο της αργίλου και την ειδική επιφάνεια του αργιλικού πλακιδίου. Τα σωματίδια της αργίλου είναι τόσο μικροσκοπικά και έχουν πολλούς μικρούς χώρους πόρων που κάνουν το νερό να κινείται πιο αργά (υψηλή ικανότητα συγκράτησης νερού), ενώ λόγω των φορτισμένων επιφανειών προσροφάται νερό. Οι ίλυες έχουν μια ενδιάμεση ικανότητα καθώς είναι λεπτόκοκκα εδάφη, αλλά εμφανίζουν μικρότερη πλαστιμότητα επιτρέποντας του να συγκρατεί λιγότερο νερό. Τέλος, η επιρροή της βλάστησης είναι εμφανής στις ορεινές λεκάνες και όχι τόσο στις αστικές.

Η άμεση απορροή είναι το άθροισμα των κατακρημνισμάτων που εισέρχεται κατευθείαν στα υδατορεύματα και της επίγειας ροής. Επειδή η επιφάνεια του υδρογραφικού δικτύου είναι ένα ασήμαντο ποσοστό της έκτασης της λεκάνης απορροής, η συμμετοχή των άμεσων κατακρημνισμάτων στην συνολική άμεση απορροή είναι αμελητέα. Η επίγεια ροή εξαρτάται από τη διαπερατότητα του ανώτερου στρώματος του εδάφους, και αν αυτή είναι αρκετά μικρή ώστε να μην επιτρέπει την κατείσδυση του νερού. (Δ. Κουτσογιάννης, 1999). Οπότε ο συντελεστής άμεσης απορροής θα εκτιμηθεί εξετάζοντας τη συμπεριφορά του ανώτερου εδαφικού στρώματος που κυριαρχεί στο μεγαλύτερο μέρος της λεκάνης απορροής.

Τα εδάφη που περιέχουν λεπτότερα σωματίδια ή που περιέχουν σημαντικό αριθμό θραυσμάτων βράχων εμφανίζουν μεγάλο ποσοστό άμεσης απορροής. Οι εξεταζόμενες λεκάνες περιέχουν κατά ένα μεγάλο ποσοστό εδαφικά υλικά αργιλικής φύσεως ενώ εμφανίζουν κατά θέσεις θραύσματα βράχων ή κροκάλες σημαντικών διαστάσεων. Ο συντελεστής άμεσης απορροής εκτιμήθηκε συνυπολογίζοντας τα δύο αυτά κριτήρια με βάση τη γεωλογική περιγραφή των λεκανών απορροής.

Η λεκάνη απορροής του Κηφισού δεν είναι ένα κλειστό υδρολογικό σύστημα, δεδομένου ότι δέχεται επιφανειακές εισροές από γειτονικές λεκάνες και υπόγειες εισροές από τους ορεινούς περιμετρικούς όγκους, ενώ εκφορτίζεται στο Σαρωνικό κόλπο, με τις υπόγειες εκφορτίσεις να μας είναι άγνωστες. Το ίδιο συμβαίνει και στις λεκάνες του Χαλανδρίου, του ρέματος Κοκκιναρά, των υδραγωγείων Καρυδιάς και Βαρυμπόμπης και της βόρειας υπολεκάνης του Κηφισού ποταμού. Ο ρυθμός με τον οποίο το νερό διαφεύγει από μία λεκάνη σε άλλη εξαρτάται από την περατότητα των σχηματισμών του υπεδάφους.

Ακόμη, όπως έχει προαναφερθεί, θεωρήθηκαν ενιαίες τιμές παραμέτρων για ολόκληρη την έκταση της κάθε λεκάνης, οι οποίες θεωρήθηκαν αντιπροσωπευτικές ορισμένων μέσων χαρακτηριστικών της λεκάνης.

Κατά συνέπεια, με βάση την ποιοτική περιγραφή των λεκανών καταλήξαμε στον ακόλουθο Πίνακα 4.2.

Πίνακας 4.2 Ποιοτικά χαρακτηριστικά και έκταση των λεκανών απορροής

Όνομα λεκάνης απορροής	Υδρολιθολογικός τύπος αντιπροσωπευτικού σχηματισμού	Συντελεστής απορροής κ	Έκταση λεκάνης (σε km ²)	Ικανότητα κατείσδυσης
Λ. Κηφισού	Αδιαπέρατος	Υψηλός	360.8	Χαμηλή
Λ. Καρυδιάς και Βαρυμπόμπης	Ημιπερατός χαμηλής υδροπερατότητας	Υψηλός	20.3	Χαμηλή
Βόρεια Λ. Κηφισού	Ημιπερατός πολύ χαμηλής υδροπερατότητας	Μέτριος προς υψηλός	57.6	Χαμηλή
Λ. Κοκκιναρά	Αδιαπέρατος	Υψηλός	10.5	Χαμηλή
Λ. Χαλανδρίου	Αδιαπέρατος	Υψηλός	15.1	Χαμηλή

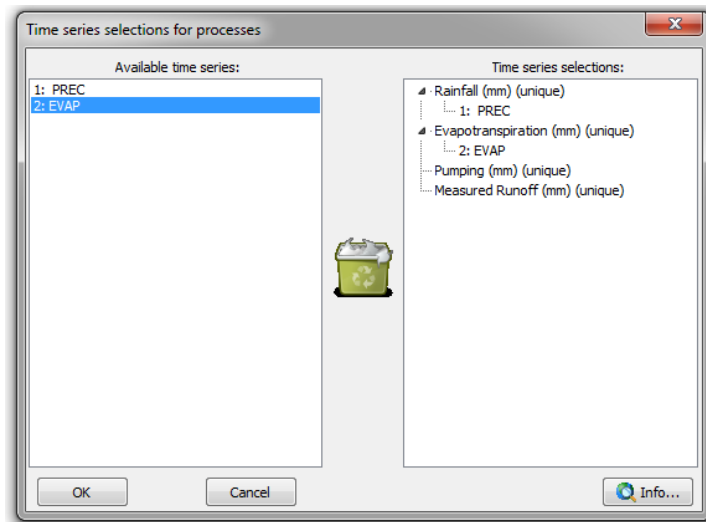
Συνεπώς, ενώ οι χρονοσειρές εισόδου δεν διαφοροποιούνται ανά λεκάνη, διαφοροποιούνται οι παράμετροι του μοντέλου για την προσομοίωση των υδρολογικών διεργασιών της κάθε λεκάνης. Για κάθε συνδυασμό υπολογίζονται τα διάφορα υδρολογικά μεγέθη (επιφανειακή απορροή, κατείσδυση, πραγματική εξατμισοδιαπνοή, υπόγειες διαφυγές) και στη συνέχεια ολοκληρώνονται στην επιφάνεια κάθε λεκάνης.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα βήματα που ακολουθήθηκαν στο λογισμικό Ζυγός ώστε να προσδιοριστούν τα υδρολογικά μεγέθη της κάθε λεκάνης.

- 1) Στο περιβάλλον του Υδρογνώμων από το βασικό μενού επιλέγουμε

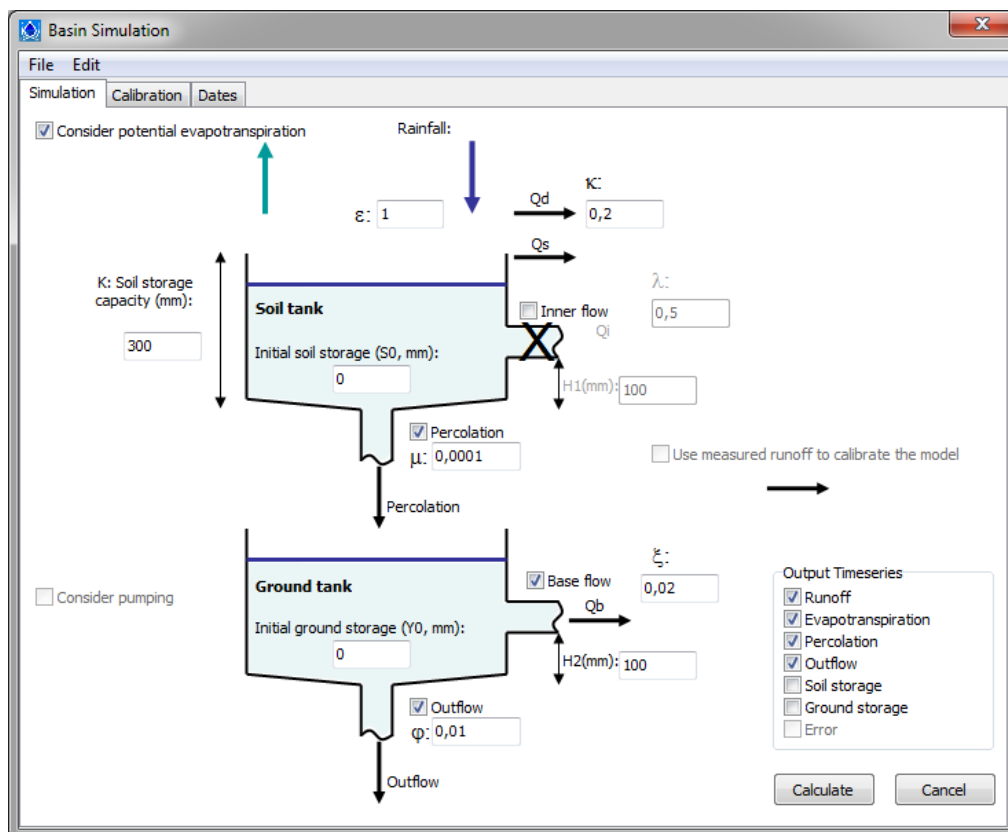
Hydrology →Zygos -Basin Simulation

- 2) Στη φόρμα που εμφανίζεται αντιστοιχίζουμε τις διαθέσιμες χρονοσειρές που έχουν ανοίξει στον Υδρογνώμων με τις κατηγορίες της λίστας στη δεξιά πλευρά της φόρμας.



Εικόνα 4.4 Φόρμα αντιστοίχισης χρονοσειρών

3) Στη συνέχεια ανοίγει η κεντρική φόρμα του μοντέλου Ζυγός



Εικόνα 4.5 Κεντρική φόρμα του μοντέλου Ζυγός

4) Επιλέγουμε τις τιμές των παραμέτρων του μοντέλου κ , K , μ , ϕ και ξ . Με την εκτέλεση από το πρόγραμμα, στην εισαγωγική οθόνη εμφανίζονται οι μηνιαίες χρονοσειρές επιφανειακής απορροής, πραγματικής εξατμισοδιαπνοής, κατείδυσης και υπόγειων διαφυγών.

Έπειτα τα αποτελέσματα μεταφέρονται σε Excel για περαιτέρω επεξεργασία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

5 Αποτελέσματα αριθμητικών αναλύσεων

Προκειμένου να εξασφαλιστεί μια κατά το δυνατόν πιο ρεαλιστική προσομοίωση, πραγματοποιήθηκαν πολλαπλές επιλύσεις με το μοντέλο Ζυγός, δοκιμάζοντας διαφορετικές τιμές των πέντε παραμέτρων.

Λόγω του ότι οι μεταβλητές εισόδου στο μοντέλο είναι μη ελεγχόμενες από μετρήσεις για την τελική επιλογή της “καλύτερης εκτίμησης” των τιμών των παραμέτρων λήφθηκαν υπόψη τα ποιοτικά χαρακτηριστικά της προσομοίωσης που αφορούν στην ευλογοφάνεια των παραμέτρων. Για παράδειγμα, όσον αφορά στους συντελεστές κατεΐσδυσης, οι οποίοι σχετίζονται άμεσα με την περατότητα των σχηματισμών που αναπτύσσονται στις αντίστοιχες λεκάνες απορροής, επιλέχθηκαν κατάλληλα όρια, που εξασφαλίζουν ένα χαμηλό ποσοστό κατεΐσδυσης. Εκτός από την ευλογοφάνεια των τιμών των παραμέτρων, κάθε δοκιμή συνοδεύτηκε από έλεγχο του υδατικού ισοζυγίου στο σύνολο της λεκάνης, ώστε να εξασφαλιστεί αν η κατανομή της βροχόπτωσης σε επιφανειακή απορροή, πραγματική εξατμισοδιαπνοή, κατεΐσδυση και υπόγεια ροή είναι συνεπής με την υδρολογική εμπειρία.

Στο Παράρτημα Γ παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των αριθμητικών αναλύσεων για διάφορες τιμές των πέντε παραμέτρων. Στις δύο πρώτες στήλες είναι οι τιμές των παραμέτρων, στις δύο επόμενες τα υπολογιζόμενα μεγέθη με τη μέση ετήσια τιμή τους σε mm, και στην τελευταία η κατανομή της βροχόπτωσης σε επιφανειακή απορροή, πραγματική εξατμισοδιαπνοή, και υπόγεια ροή. Από τα αποτελέσματα αυτά επιλέχθηκαν τα σενάρια του παρακάτω Πίνακα 5.1.

Πίνακας 5.1 Επιλεγμένα σενάρια του μοντέλου Ζυγός

Σενάριο 1				
Κ	300	Βροχόπτωση	524	Ποσοστά
μ	0,0001	Απορροή	100	19%
κ	0,21	Πραγμ. Εξατμ.	379	72%
φ	0,01	Υπόγεια ροή	42	8%
ξ	0,03			

Σενάριο 2				
Κ	280	Βροχόπτωση	524	Ποσοστά
μ	0,0002	Απορροή	89	17%
κ	0,18	Πραγμ. Εξατμ.	357	68%
φ	0,01	Υπόγεια ροή	77	15%
ξ	0,02			

Σενάριο 3				
Κ	300	Βροχόπτωση	524	Ποσοστά
μ	0,0001	Απορροή	104	20%
κ	0,2	Πραγμ. Εξατμ.	382	73%
φ	0,01	Υπόγεια ροή	42	8%
ξ	0,02			

Σενάριο 4				
Κ	300	Βροχόπτωση	524	Ποσοστά
μ	0,0002	Απορροή	99	19%
κ	0,22	Πραγμ. Εξατμ.	346	66%
φ	0,01	Υπόγεια ροή	77	15%
ξ	0,02			

Σενάριο 5				
Κ	250	Βροχόπτωση	524	Ποσοστά
μ	0,0001	Απορροή	99	19%
κ	0,17	Πραγμ. Εξατμ.	385	74%
φ	0,01	Υπόγεια ροή	39	7%
ξ	0,02			

Σενάριο 6				
Κ	300	Βροχόπτωση	524	Ποσοστά
μ	0,0003	Απορροή	90	17%
κ	0,2	Πραγμ. Εξατμ.	325	62%
φ	0,01	Υπόγεια ροή	108	21%
ξ	0,02			

Οι εκτιμώμενες ποσότητες για τα σενάρια του παραπάνω πίνακα μεταφέρθηκαν στο πρόγραμμα Excel, όπου και υπολογίστηκαν οι μέσες μηνιαίες τιμές των εξεταζόμενων μεγεθών αναφερόμενες στην έκταση της κάθε λεκάνης.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα εφαρμογής του μοντέλου σε μορφή πινάκων και διαγραμμάτων επιφανειακής απορροής και υπόγειας ροής για την κάθε εξεταζόμενη λεκάνη απορροής.

5.1 Λεκάνη απορροής Κηφισού

Το υδραγωγείο διέρχεται εξ ολοκλήρου της λεκάνης του Κηφισού που ορίζεται εντός του λεκανοπεδίου Αττικής. Η έκταση της περιοχής είναι 360 km².

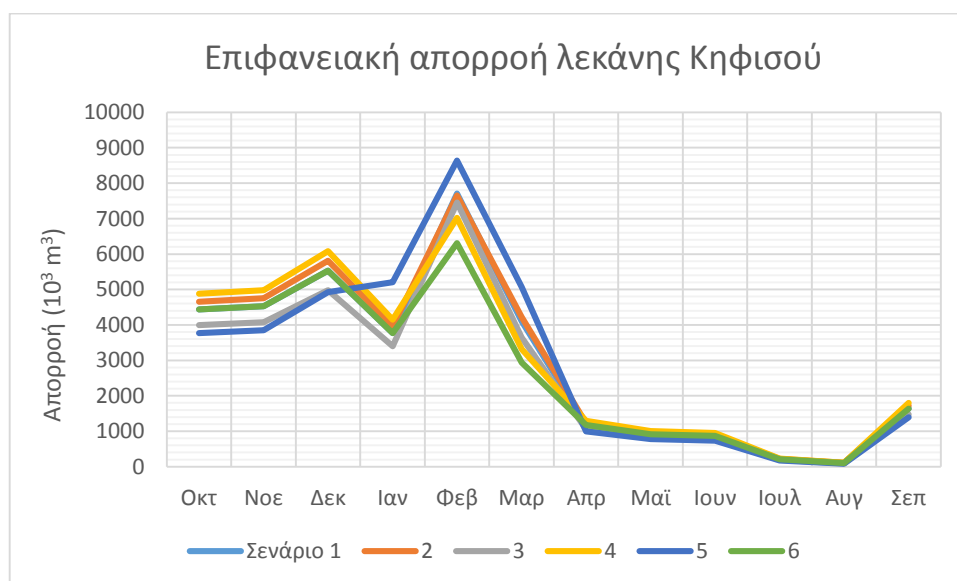
Στον πίνακα 5.2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μηνιαίας επιφανειακής απορροής για την λεκάνη Κηφισού, που έγιναν με το μοντέλο Ζυγός για τα έξι εξεταζόμενα σενάρια.

Πίνακας 5.2 Συγκεντρωτικός πίνακας επιφανειακής απορροής και υπόγειας ροής για τη λεκάνη του Κηφισού (σε 10³ m³)

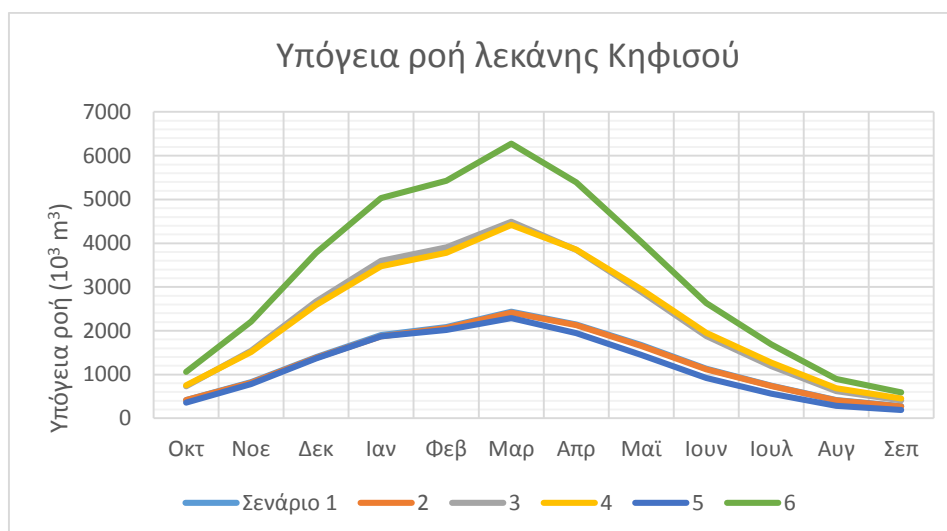
Σενάρια						
Μήνες	1		2		3	
	Επιφ. Απορροή	Υπόγεια Ροή	Επιφ. Απορροή	Υπόγεια Ροή	Επιφ. Απορροή	Υπόγεια Ροή
Οκτ	4434	419	4658	415	3990	732
Νοε	4528	823	4755	812	4077	1541
Δεκ	5531	1400	5809	1382	4979	2666
Ιαν	3770	1898	3958	1873	3395	3597
Φεβ	7707	2085	7656	2060	7458	3907
Μαρ	4106	2435	4221	2414	3640	4488
Απρ	1176	2143	1234	2125	1057	3850
Μαϊ	916	1674	963	1656	826	2886
Ιουν	866	1133	909	1122	779	1876
Ιουλ	206	747	216	740	188	1191
Αυγ	101	419	108	411	90	624
Σεπ	1638	274	1721	271	1476	411
Άθροισμα	34983	15453	36206	15283	31949	27774

Σενάρια						
	4		5		6	
Μήνες	Επιφ. Απορροή	Υπόγεια Ροή	Επιφ. Απορροή	Υπόγεια Ροή	Επιφ. Απορροή	Υπόγεια Ροή
Οκτ	4878	750	3770	357	4434	1061
Νοε	4983	1515	3850	779	4528	2212
Δεκ	6083	2587	4925	1371	5531	3785
Ιαν	4149	3471	5203	1869	3770	5033
Φεβ	7018	3781	8638	2017	6303	5426
Μαρ	3319	4420	5066	2291	2937	6278
Απρ	1292	3853	999	1948	1176	5390
Μαϊ	1007	2944	779	1447	916	4030
Ιουν	953	1952	736	920	866	2630
Ιουλ	227	1270	177	566	206	1689
Αυγ	112	689	87	285	101	898
Σεπ	1800	455	1393	188	1638	595
Άθροισμα	35824	27691	35622	14039	32414	39024

Στα σχήματα 5.1 και 5.2 φαίνεται η μέση μηνιαία επιφανειακή απορροή και υπόγεια ροή της λεκάνης Κηφισού για τα έξι σενάρια.



Σχήμα 5.1 Διάγραμμα μέσης μηνιαίας επιφανειακής απορροής της λεκάνης Κηφισού για τα εξεταζόμενα έξι σενάρια



Σχήμα 5.2 Διάγραμμα υπόγειας ροής ανά μήνα για τη λεκάνη Κηφισού για τα εξεταζόμενα έξι σενάρια

5.2 Λεκάνη απορροής Χαλανδρίου

Ένα από τα κυριότερα ενισχυτικά υδραγωγεία του Αδριάνειου είναι το υδραγωγείο του Χαλανδρίου. Η έκταση της λεκάνης απορροής είναι 15,1 km².

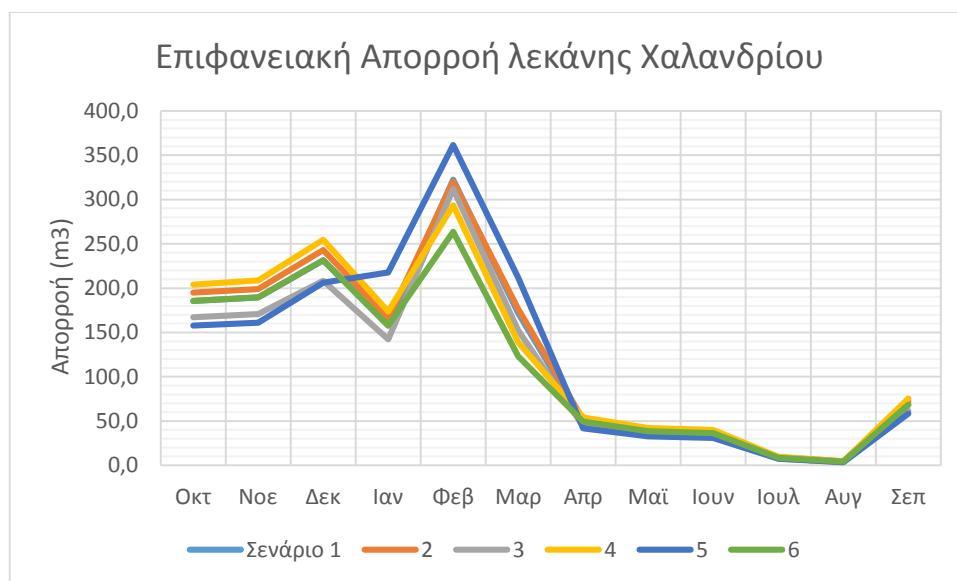
Στον πίνακα 5.3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μηνιαίας επιφανειακής απορροής και υπόγειας ροής για την λεκάνη Χαλανδρίου, που έγιναν με το μοντέλο Ζυγός για τα έξι εξεταζόμενα σενάρια. Οι τιμές είναι σε 10³ m³.

Πίνακας 5.3 Συγκεντρωτικός πίνακας επιφανειακής απορροής και υπόγειας ροής για τη λεκάνη απορροής Χαλανδρίου (σε 10³ m³)

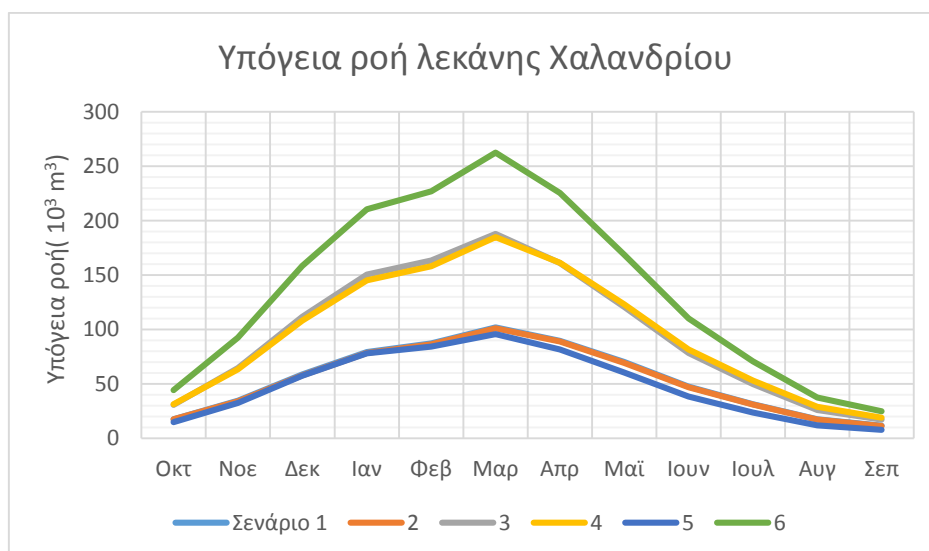
Μήνες	Σενάρια					
	1		2		3	
	Επιφ. Απορροή	Υπόγεια Ροή	Επιφ. Απορροή	Υπόγεια Ροή	Επιφ. Απορροή	Υπόγεια Ροή
Οκτ	186	18	195	17	167	31
Νοε	190	34	199	34	171	64
Δεκ	231	59	243	58	208	112
Ιαν	158	79	166	78	142	151
Φεβ	323	87	320	86	312	164
Μαρ	172	102	177	101	152	188
Απρ	49	90	52	89	44	161
Μαϊ	38	70	40	69	35	121
Ιουν	36	47	38	47	33	79
Ιουλ	9	31	9	31	8	50
Αυγ	4	18	5	17	4	26
Σεπ	69	11	72	11	62	17
Άθροισμα	1464	647	1515	640	1337	1162

Σενάρια						
	4		5		6	
Μήνες	Επιφ. Απορροή	Υπόγεια Ροή	Επιφ. Απορροή	Υπόγεια Ροή	Επιφ. Απορροή	Υπόγεια Ροή
Οκτ	204	31	158	15	186	44
Νοε	209	63	161	33	190	93
Δεκ	255	108	206	57	231	158
Ιαν	174	145	218	78	158	211
Φεβ	294	158	361	84	264	227
Μαρ	139	185	212	96	123	263
Απρ	54	161	42	82	49	226
Μαΐ	42	123	33	61	38	169
Ιουν	40	82	31	39	36	110
Ιουλ	10	53	7	24	9	71
Αυγ	5	29	4	12	4	38
Σεπ	75	19	58	8	69	25
Άθροισμα	1499	1159	1491	588	1357	1633

Στα σχήματα 5.3 και 5.4 φαίνεται η μέση μηνιαία επιφανειακή απορροή και υπόγεια ροή της λεκάνης απορροής Χαλανδρίου για τα έξι σενάρια.



Σχήμα 5.3 Διάγραμμα μηνιαίας επιφανειακής απορροής της λεκάνης Χαλανδρίου για τα εξεταζόμενα έξι σενάρια



Σχήμα 5.4 Διάγραμμα μηνιαίας υπόγειας ροής της λεκάνης απορροής Χαλανδρίου για τα έξι εξεταζόμενα σενάρια

5.3 Λεκάνη απορροής ρέματος Κοκκιναρά

Το ρέμα του Κοκκιναρά ξεκινάει στους πρόποδες της δυτικής πλευράς της Πεντέλης, διατρέχει μια πορεία προς τα δυτικά, και καταλήγει στον Κηφισό ποταμό με τον οποίο συμβάλλει. Η έκταση της λεκάνης απορροής του είναι 10,5 km².

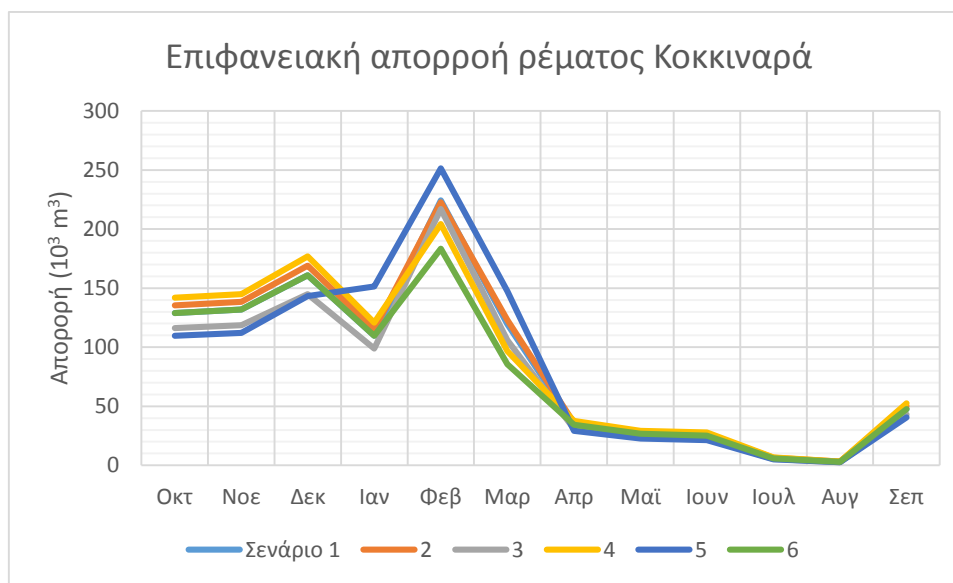
Στον πίνακα 5.4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μηνιαίας επιφανειακής απορροής και υπόγειας ροής για την λεκάνη απορροής του ρέματος Κοκκιναρά, που έγιναν με το μοντέλο Ζυγός για τα έξι εξεταζόμενα σενάρια. Οι τιμές είναι σε 10³ m³.

Πίνακας 5.4 Συγκεντρωτικός πίνακας μηνιαίας επιφανειακής απορροής και υπόγειας ροής του ρέματος Κοκκιναρά (σε 10³ m³)

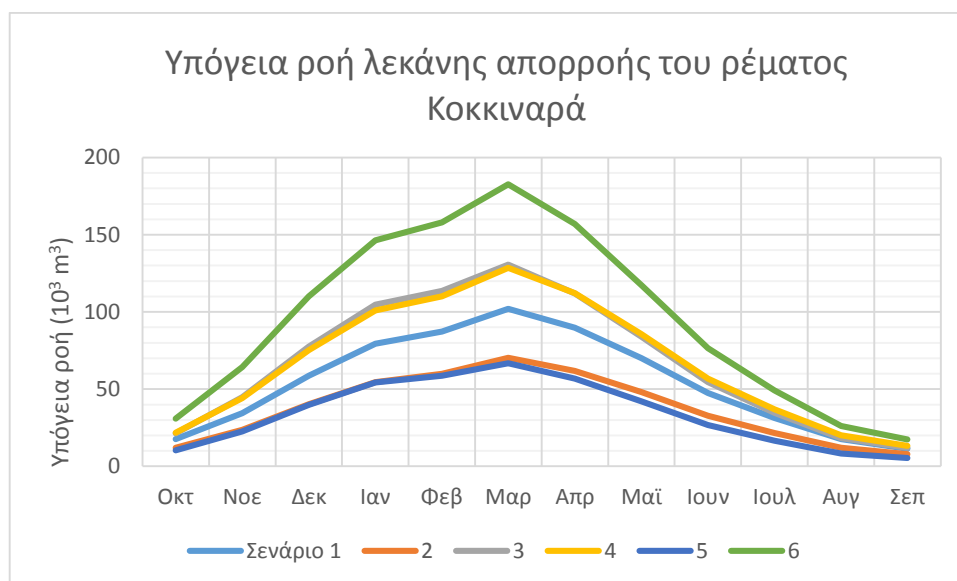
Μήνες	Σενάρια					
	1		2		3	
	Επιφ. Απορροή	Υπόγεια Ροή	Επιφ. Απορροή	Υπόγεια Ροή	Επιφ. Απορροή	Υπόγεια Ροή
Οκτ	129	136	116	142	110	129
Νοε	132	138	119	145	112	132
Δεκ	161	169	145	177	143	161
Ιαν	110	115	99	121	151	110
Φεβ	224	223	217	204	251	183
Μαρ	119	123	106	97	147	85
Απρ	34	36	31	38	29	34
Μαϊ	27	28	24	29	23	27
Ιουν	25	26	23	28	21	25
Ιουλ	6	6	5	7	5	6
Αυγ	3	3	3	3	3	3
Σεπ	48	50	43	52	41	48
Άθροισμα	1018	1054	930	1043	1037	943

Σενάρια						
Μήνες	4		5		6	
	Επιφ. Απορροή	Υπόγεια Ροή	Επιφ. Απορροή	Υπόγεια Ροή	Επιφ. Απορροή	Υπόγεια Ροή
Οκτ	142	22	110	10	129	31
Νοε	145	44	112	23	132	64
Δεκ	177	75	143	40	161	110
Ιαν	121	101	151	54	110	146
Φεβ	204	110	251	59	183	158
Μαρ	97	129	147	67	85	183
Απρ	38	112	29	57	34	157
Μαϊ	29	86	23	42	27	117
Ιουν	28	57	21	27	25	77
Ιουλ	7	37	5	16	6	49
Αυγ	3	20	3	8	3	26
Σεπ	52	13	41	5	48	17
Άθροισμα	1043	806	1037	409	943	1136

Στα σχήματα 5.5 και 5.6 φαίνεται η μέση μηνιαία επιφανειακή απορροή και υπόγεια ροή της λεκάνης απορροής ρέματος Κοκκιναρά για τα έξι σενάρια.



Σχήμα 5.5 Διάγραμμα επιφανειακής απορροής της λεκάνης απορροής του ρέματος Κοκκιναρά για τα εξεταζόμενα έξι σενάρια



Σχήμα 5.6 Διάγραμμα υπόγειας ροής ανά μήνα της λεκάνης απορροής του ρέματος Κοκκιναρά για τα έξι εξεταζόμενα σενάρια

5.4 Λεκάνη απορροής Βόρειας λεκάνης του Κηφισού

Η βόρεια λεκάνη απορροής του Κηφισού που τροφοδοτεί το Αδριάνειο υδραγωγείο έχει έκταση 57,8 km².

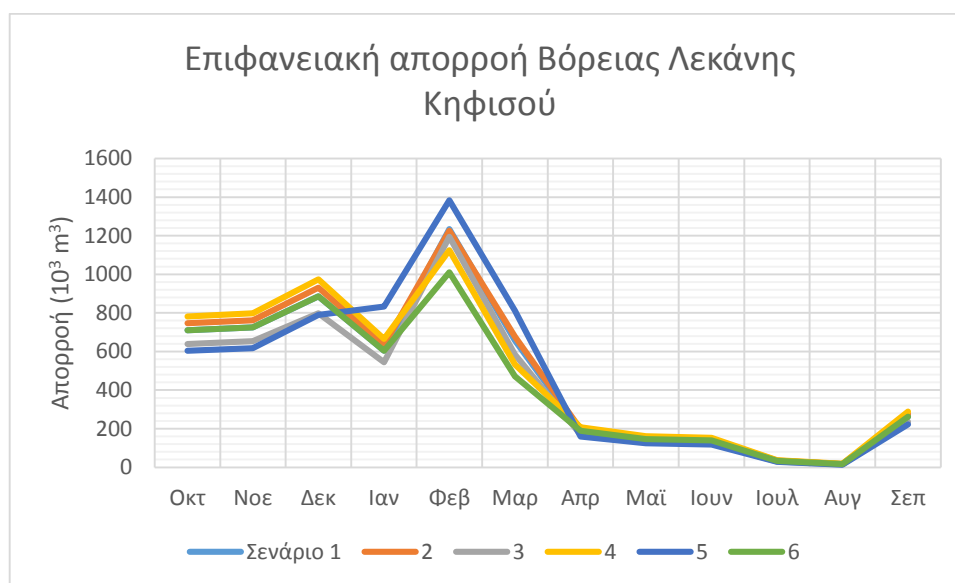
Στον πίνακα 5.5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μηνιαίας επιφανειακής απορροής και υπόγειας ροής για την βόρεια λεκάνη του Κηφισού, που έγιναν με το μοντέλο Ζυγός για τα έξι εξεταζόμενα σενάρια. Οι τιμές είναι σε 10³ m³.

Πίνακας 5.5 Συγκεντρωτικός πίνακας μηνιαίας επιφανειακής απορροής και υπόγειας ροής της Βόρειας λεκάνης του Κηφισού (σε 10³ m³)

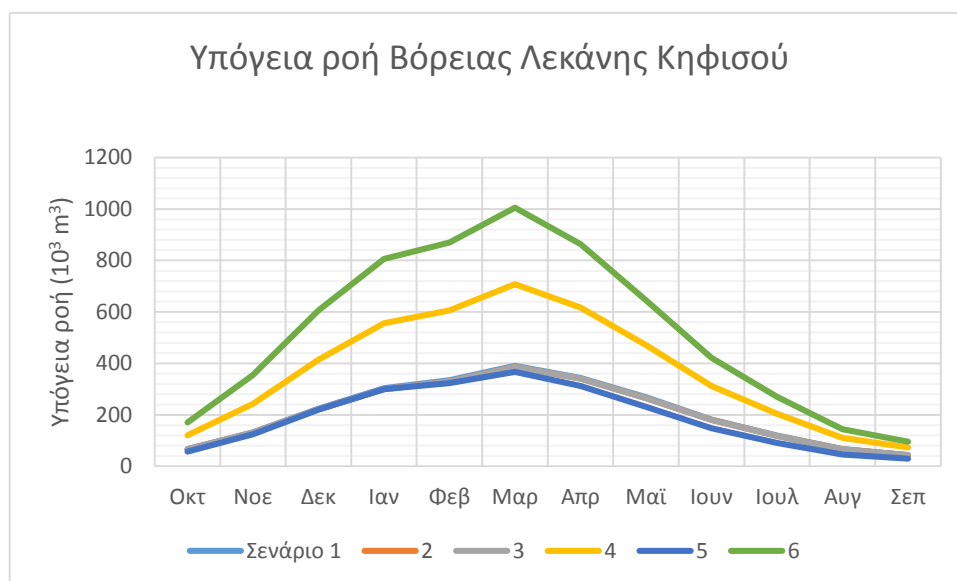
Μήνες	Σενάρια					
	1		2		3	
	Επιφ. Απορροή	Υπόγεια Ροή	Επιφ. Απορροή	Υπόγεια Ροή	Επιφ. Απορροή	Υπόγεια Ροή
Οκτ	710	67	746	66	639	66
Νοε	725	132	762	130	653	130
Δεκ	886	224	931	221	798	221
Ιαν	604	304	634	300	544	300
Φεβ	1235	334	1227	330	1195	330
Μαρ	658	390	676	387	583	387
Απρ	188	343	198	340	169	340
Μαϊ	147	268	154	265	132	265
Ιουν	139	181	146	180	125	180
Ιουλ	33	120	35	118	30	118
Αυγ	16	67	17	66	14	66
Σεπ	262	44	276	43	236	43
Άθροισμα	5604	2476	5800	2448	5118	2448

Σενάρια						
Μήνες	4		5		6	
	Επιφ. Απορροή	Υπόγεια Ροή	Επιφ. Απορροή	Υπόγεια Ροή	Επιφ. Απορροή	Υπόγεια Ροή
Οκτ	781	120	604	57	710	170
Νοε	798	243	617	125	725	354
Δεκ	975	414	789	220	886	606
Ιαν	665	556	833	299	604	806
Φεβ	1124	606	1384	323	1010	869
Μαρ	532	708	812	367	470	1006
Απρ	207	617	160	312	188	864
Μαϊ	161	472	125	232	147	646
Ιουν	153	313	118	147	139	421
Ιουλ	36	203	28	91	33	271
Αυγ	18	110	14	46	16	144
Σεπ	288	73	223	30	262	95
Άθροισμα	5739	4436	5707	2249	5193	6252

Στα σχήματα 5.7 και 5.8 φαίνεται η μέση μηνιαία επιφανειακή απορροή και υπόγεια ροή της λεκάνης Βόρειας λεκάνης Κηφισού για τα έξι σενάρια.



Σχήμα 5.7 Διάγραμμα μηνιαίας επιφανειακής απορροής της Βόρειας λεκάνης απορροής Κηφισού για τα έξι εξεταζόμενα σενάρια



Σχήμα 5.8 Διάγραμμα υπόγειας ροής ανά μήνα της λεκάνης απορροής της Βόρειας λεκάνης Κηφισού για τα έξι εξεταζόμενα σενάρια

5.5 Λεκάνη απορροής υδραγωγείων Καρυδιάς και Βαρυμπόμπης

Τα υδραγωγεία της Καρυδιάς και της Βαρυμπόμπης πηγάζουν στους πρόποδες της Πάρνηθας. Η έκταση της λεκάνης απορροής τους είναι 20,3 km².

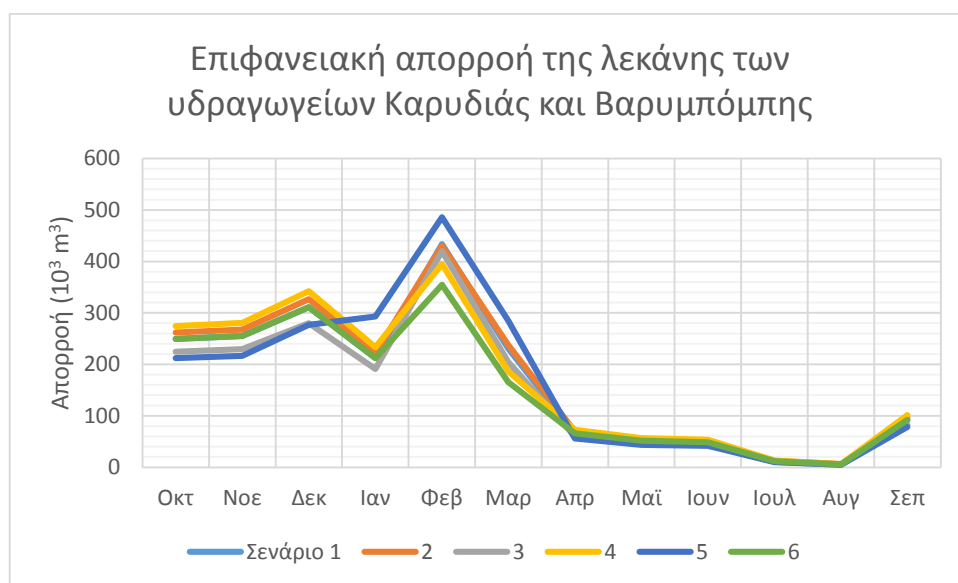
Στον πίνακα 5.6 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα μηνιαίας επιφανειακής απορροής και υπόγειας ροής για την λεκάνη απορροής των δύο υδραγωγείων, που έγιναν με το μοντέλο Ζυγός για τα έξι εξεταζόμενα σενάρια. Οι τιμές είναι σε 10³ m³.

Πίνακας 5.6 Συγκεντρωτικός πίνακας μηνιαίας επιφανειακής απορροής και υπόγειας ροής της λεκάνης απορροής των υδραγωγείων Καρυδιάς και Βαρυμπόμπης (σε 10³ m³)

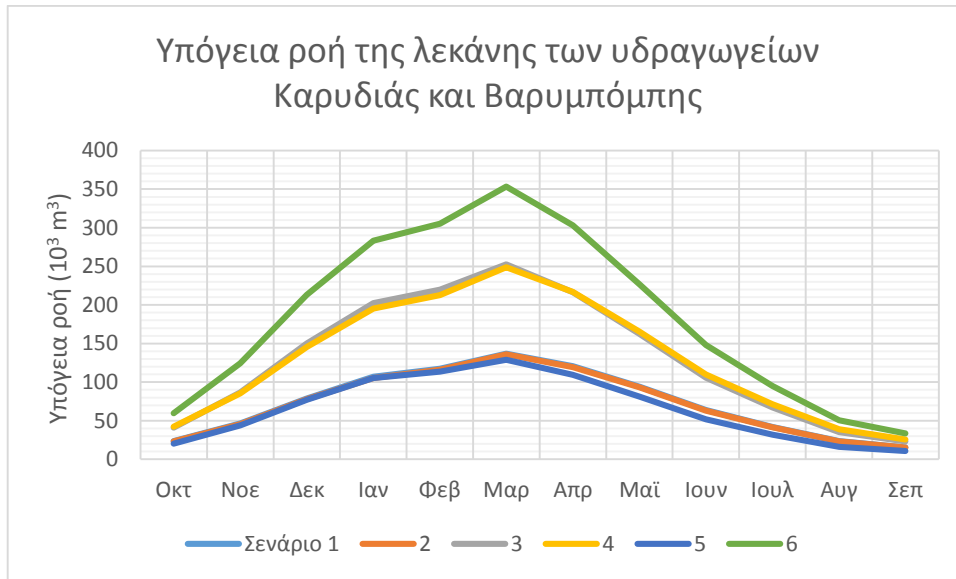
Μήνες	Σενάρια					
	1		2		3	
	Επιφ. Απορροή	Υπόγεια Ροή	Επιφ. Απορροή	Υπόγεια Ροή	Επιφ. Απορροή	Υπόγεια Ροή
Οκτ	249	24	262	23	225	41
Νοε	255	46	268	46	229	87
Δεκ	311	79	327	78	280	150
Ιαν	212	107	223	105	191	202
Φεβ	434	117	431	116	420	220
Μαρ	231	137	238	136	205	253
Απρ	66	121	69	120	59	217
Μαϊ	52	94	54	93	46	162
Ιουν	49	64	51	63	44	106
Ιουλ	12	42	12	42	11	67
Αυγ	6	24	6	23	5	35
Σεπ	92	15	97	15	83	23
Άθροισμα	1968	869	2037	860	1798	1563

Σενάρια						
Μήνες	4		5		6	
	Επιφ. Απορροή	Υπόγεια Ροή	Επιφ. Απορροή	Υπόγεια Ροή	Επιφ. Απορροή	Υπόγεια Ροή
Οκτ	274	42	212	20	249	60
Νοε	280	85	217	44	255	124
Δεκ	342	146	277	77	311	213
Ιαν	233	195	293	105	212	283
Φεβ	395	213	486	113	355	305
Μαρ	187	249	285	129	165	353
Απρ	73	217	56	110	66	303
Μαϊ	57	166	44	81	52	227
Ιουν	54	110	41	52	49	148
Ιουλ	13	71	10	32	12	95
Αυγ	6	39	5	16	6	51
Σεπ	101	26	78	11	92	33
Άθροισμα	2016	1558	2004	790	1824	2196

Στα σχήματα 5.9 και 5.10 φαίνεται η μέση μηνιαία επιφανειακή απορροή και υπόγεια ροή της λεκάνης των υδραγωγείων Καρυδιάς και Βαρυμπόμπης για τα έξι σενάρια.



Σχήμα 5.9 Διάγραμμα επιφανειακής απορροής της λεκάνης των υδραγωγείων Καρυδιάς και Βαρυμπόμπης



Σχήμα 5.10 Διάγραμμα υπόγειας ροής ανά μήνα της λεκάνης απορροής των υδραγωγείων Καρυδιάς και Βαρυμπόμπης για τα έξι εξεταζόμενα σενάρια

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

6 Συμπεράσματα και προτάσεις για μελλοντική έρευνα

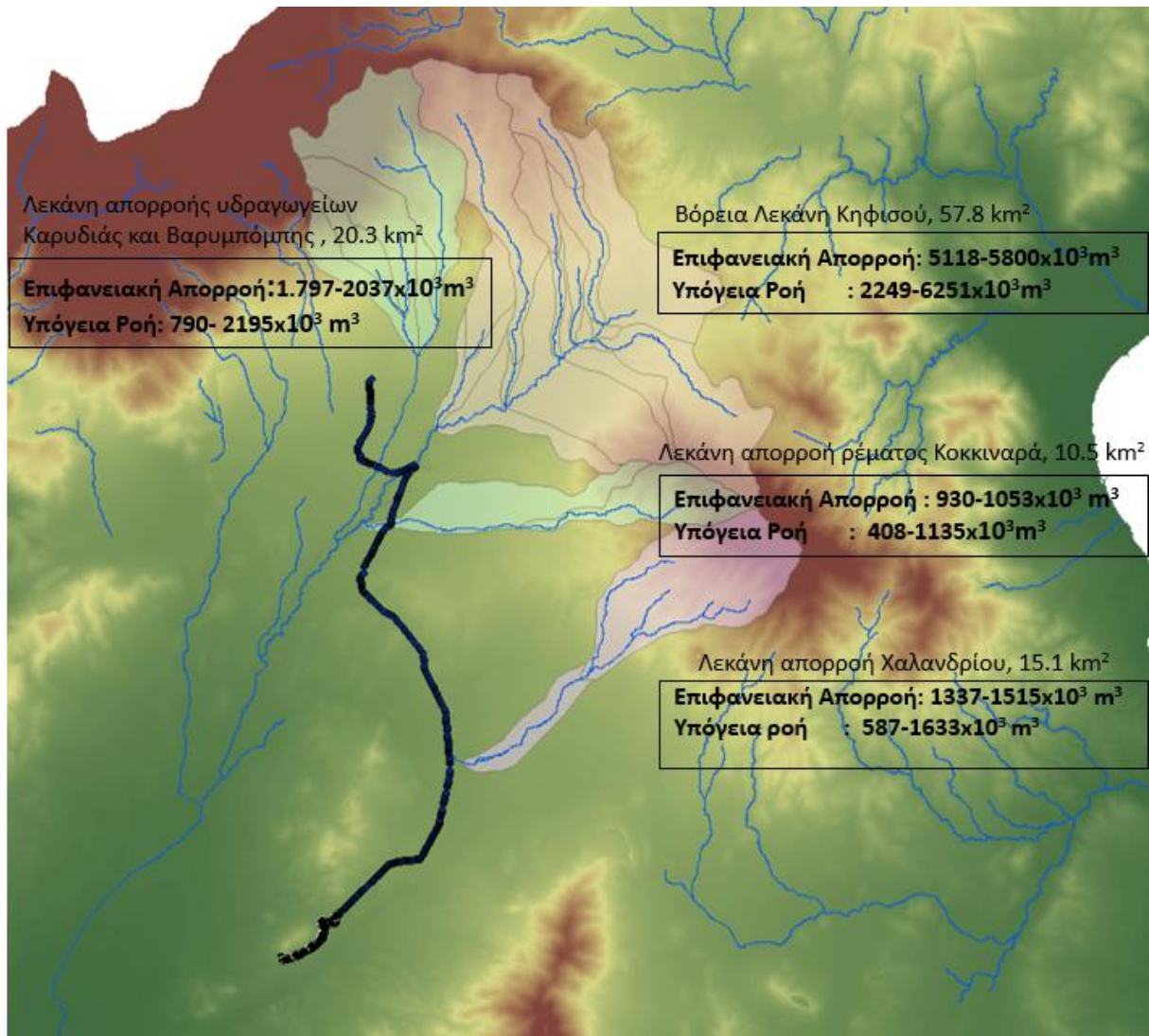
Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν συνολικά από την υδρολογική διερεύνηση που πραγματοποιήθηκε για την ευρύτερη περιοχή του Αδριάνειου Υδραγωγείου.

6.1 Σύνοψη και Συμπεράσματα Διπλωματικής Εργασίας

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, διερευνήθηκε το επιφανειακό και υπόγειο υδατικό σύστημα της λεκάνης απορροής του Κηφισού, η οποία είναι η ευρύτερη περιοχή μελέτης του έργου, και τα αντίστοιχα συστήματα των λεκανών απορροής των ενισχυτικών υδραγωγείων και ρεμάτων στο Αδριάνειο. Η διερεύνηση είχε ως στόχο την κατανόηση και αναπαράσταση των λειτουργιών του υδατικού συστήματος του υδραγωγείου, με ποσοτική εκτίμηση των εισροών και των εκροών από το σύστημα.

Έπειτα από ανάλυση και επεξεργασία των γεωλογικών και των υδρολογικών παραμέτρων της κάθε εξεταζόμενης λεκάνης, πραγματοποιήθηκαν επιλύσεις με το μοντέλο Ζυγός, δοκιμάζοντας διαφορετικές τιμές των παραμέτρων και υπολογίστηκαν οι επιφανειακή απορροή και υπόγεια ροή.

Συνοψίζοντας τα αποτελέσματα της υδρολογικής διερεύνησης προκύπτει ο χάρτης της εικόνας 6.1. Στον χάρτη φαίνονται οι λεκάνες απορροής των ενισχυτικών υδραγωγείων και ρεμάτων στο Αδριάνειο, η έκτασή τους και τα εύρη των εκτιμώμενων υδρολογικών μεγεθών σε $m^3/έτος$.



Εικόνα 6.1 Χάρτης των λεκανών απορροής ενισχυτικών υδραγωγείων στο Αδριάνειο με τις εκτιμώμενες ετήσιες επιφανειακές απορροές και υπόγειες ροές

Το νερό που μεταφερόταν μέσω του Αδριάνειου υδραγωγείου, γέμιζε τη δεξαμενή στο λόφο του Λυκαβηττού, και έπειτα μέσω αγωγών διανεμόταν στην Αθήνα. Η χωρητικότητα της δεξαμενής είναι περίπου 450 m². Από το σχετικά μικρό μέγεθος της φαίνεται ότι δε λειτουργούσε ως δεξαμενή αποθήκευσης νερού, αλλά χρησίμευε για τη διαίρεση του νερού και ακόμη ως δεξαμενή καθίζησης (Εικόνα 6.2).



Εικόνα 6.2 Εσωτερικό δεξαμενής

Η παροχτευτικότητα του υδραγωγείου έχει εκτιμηθεί ότι είναι της τάξης 9.000 με 12.000 m³/d.

Ακόμη, έχουμε εκτιμήσει ότι ο πληθυσμός της Αθήνας κατά τη ρωμαϊκή εποχή ήταν το μέγιστο 37800 κάτοικοι. Θεωρώντας ότι η υδατική κατανάλωση κατά άτομο ήταν μεταξύ 85 l/d με 250 l/d, από τα ραβδογράμματα που προέκυψαν για τα σενάρια πληθυσμού – υδατικής κατανάλωσης μπορούμε πλέον να συμπεράνουμε ότι οι πόροι και οι διαστάσεις του έργου επαρκούσαν για την κάλυψη των υδατικών αναγκών της πόλης κατά τη ρωμαϊκή περίοδο.

Ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά του Αδριανείου υδραγωγείου είναι η βιωσιμότητα και η ανθεκτικότητά του. Η σταθερότητα της αρχαίας σήραγγας οφείλεται στις τεχνικές υποστήριξης που χρησιμοποιήθηκαν και συσχετίζεται με τους γύρω γεωλογικούς σχηματισμούς. Η βιωσιμότητα του υδραγωγείου οφείλεται στο σχεδιασμό του για υδρομάστευση του υπόγειου νερού. Στο ξηρό έδαφος της Αττικής (φτωχό σε επιφανειακές απορροές), το Αδριανείο υδραγωγείο υδρομάστευε υπόγειο νερό κατά μήκος της σήραγγας. Εξαιτίας αυτών, το υδραγωγείο παρέμεινε το κύριο υδραυλικό έργο που προμήθευε την πόλη της Αθήνας με νερό έως και τη δεκαετία του 1930, όπου λόγω της μεγάλης πληθυσμιακής αύξησης δεν ήταν πλέον ικανό να προμηθεύσει την πόλη.

Σήμερα το υδραγωγείο, αν και έχει υποστεί ζημιές σε διάφορα σημεία του, συνεχίζει να μεταφέρει νερό. Το νερό αυτό όμως καταλήγει στο αποχετευτικό δίκτυο. Για την αξιοποίηση

του, το μεταφερόμενο νερό θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την άρδευση των δημοτικών χώρων που διέρχεται ή οποιαδήποτε άλλη δημοτική χρήση κρίνεται κατάλληλη.

6.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Η υδρολογική και η υδρογεωλογική διερεύνηση του Αδριάνειου υδραγωγείου, είχε ως στόχο την κατανόηση και αναπαράσταση των λειτουργιών του υπόγειου υδατικού συστήματος του υδραγωγείου. Έτσι θα διαμορφωθεί μια βάση για τη διαχείριση του έργου και του νερού που μεταφέρεται. Παρακάτω παρουσιάζονται προτάσεις για μελλοντική έρευνα όπως προκύπτουν από την παρούσα διπλωματική εργασία.

Κάθε σύστημα υπόγειων νερών είναι μοναδικό και συχνά πολύ ετερογενές όσον αφορά τη φυσική του διάταξη. Υπό αυτήν την έννοια, δεν είναι δυνατό να περιγραφεί μέσω ενός απλού εννοιολογικού υδρολογικού μοντέλου. Για την καλύτερη αναπαράσταση των υδρολογικών διεργασιών απαιτείται συλλογή δεδομένων και πληροφοριών της περιοχής του έργου.

Συνεπώς, όσο αναφορά την υδρολογική και υδρολογική διερεύνησή του Αδριάνειου υδραγωγείου προτείνεται,

- Περαιτέρω συλλογή και εξέταση δεδομένων για την γεωλογία, την υδρολογία και των πληροφοριών που αναφέρονται στις συνθήκες του υπόγειου υδροφόρου με μετρήσεις πεδίου της ευρύτερης περιοχής του έργου. Με την συλλογή πρόσθετων δεδομένων, θα βελτιωθεί το εννοιολογικό μοντέλο του συστήματος και θα δοθεί μια καλύτερη εικόνα για την διαχείριση του έργου.
- Μετρήσεις παροχών στα σημεία εισόδου των ενισχυτικών υδραγωγείων και σε διάφορα τμήματα της σήραγγας έτσι ώστε να χρησιμοποιηθούν ως δεδομένα επαλήθευσης για τον έλεγχο του μοντέλου.

Βιβλιογραφία

ΑΤΤΙΚΟ ΜΕΤΡΟ , (2018). Τεχνικά Στοιχεία, Γεωλογικά.

https://www.ametro.gr/?page_id=212.

Δ. Κουτσογιάννης, κ. Θ. Ξανθόπουλος (1999), *Τεχνική Υδρολογία* (σσ. 181-343). Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

Δ.Ρόζος. (2017). Τεχνικογεωλογικά στοιχεία και γεωτεχνική συμπεριφορά των σχηματισμών. Στο Δ.Ρόζος, *Εγχειρίδιο Τεχνικής Γεωλογίας I* (σ. Διάλεξη 8η). Αθήνα: ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ.

Κορδέλλας, Α. (1879). *Αι Αθήναι εξεταζόμεναι υπό υδραυλική έποψιν*. Αθήνα: Εκ του Τυπογραφείου της Φιλοκαλίας.

Μ.Μαυρίκη. (2013). *Η ΠΟΛΙΣ,ΚΟΙΝΩΝΙΑ ΤΩΝ ΕΛΕΥΘΕΡΩΝ ΕΣΤΙ*. Αθήνα: Ερευνητική εργασία, Επιβλέπων καθηγητής: Αναστάσιος Σπανομαρίδης.

NAMA ΣΥΜΒΟΥΛΟΙ ΜΗΧΑΝΙΚΟΙ & ΜΕΛΕΤΗΤΕΣ ΑΕ - ΓΑΜΜΑ4 ΕΠΕ, Αναθέτουσα αρχή: ΕΥΔΑΠ, Ειδική Γραμματεία Υδάτων. (2013, Απρίλιος). Χαρακτηρισμός και τυπολογία επιφανειακών υδατικών συστημάτων και αρχικός και περαιτέρω χαρακτηρισμός των υπόγειων υδατικών συστημάτων. *Σχέδιο διαχείρισης Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Αττικής*.

Π.Δευτεραίος, Ν. (9/2017-3/2018). *Ερευνητικό έργο: Εργασίες διερεύνησης του Αδριάνειου Υδραγωγείου της Αθήνας & καταγραφή της υφιστάμενης κατάστασης σε συγκεκριμένα υπόγεια τμήματά του*. Αθήνα: Αναθέτουσα αρχή ΕΥΔΑΠ.

Παπανικολάου Δ., Μπάση Ε., Κράνης Χ., Δανάμος Γ.. (Θεσσαλονίκη Απρίλιος 2004). Παλαιογεωγραφική εξέλιξη του λεκανοπεδίου Αθηνών από το άνω μείοκαινο έως σήμερα. *Δελτίο της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας, τομ. XXXVI, Πρακτικά 10ου Διεθνούς Συνεδρίου*.

Παππάς, Α. (1999). *Η ύδρευσις των αρχαίων Αθηνών* . Αθήνα : Ελεύθερις Σκέψις .

ΠΛΟΥΤΑΡΧΟΣ. (n.d.). Σόλων. Μνημοσύνη, Ψηφιακή Βιβλιοθήκη της Αρχαίας Ελληνικής Γραμματείας.

Σ.Κοζάνης, Ι. Μ. (2009). *Υδρογνώμων ,οδηγός χρήστη για το λογισμικό*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.

- Τόλης , Καβουνίδης , Μπαρδάνης. (2006). *Γεωτεχνικές Ιδιότητες της Αργίλου του Αμαρουσίου*.
Ξάνθη: ΕΔΑΦΟΣ Ε.Π.Ε, 5ο Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής &
Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής,ΤΕΕ.
- Brouwer, C. G. (1985). Soil and water, Chapter 2. Στο C. G. Brouwer, *Irrigation Water Management: Training Manual No. 1-Introduction to Irrigation*. Rome, Italy: FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Chiotis, E. D. (2018). The Hadrian aqueduct of Athens and the underlying tradition of hydraulic engineering. Στο T. T. Georgia Aristodemou, *Great Waterworks in Roman Greece: Aqueducts and Monumental Fountain Structures*. Oxford: Archaeopress Archaeology.
- D. Koutsoyiannis, a. A. Patrikou (2014). Water control in Ancient Greek cities. Στο T. T. Oestigaard, *A History of Water: Water and Urbanization* (σσ. 130-148). London: Tauris.
- Hoepfner, W. (1999, τεύχος 63). «Η Πολεοδομία της Κλασικής Περιόδου». *Αρχαιολογία και τέχνες* .
- Leigh, S. (1998). *A dissertation in art and archaeology in the Mediterranean World, The aqueduct of Hadrian and the water supply of Roman Athens*. University of Pennsylvania.

Πηγές από το Διαδίκτυο

<http://hoa.ntua.gr/>

Παράρτημα Α

Πίνακας Α Μηνιαίες χρονοσειρές βροχόπτωσης

1. Βροχομετρικός Σταθμός Γαλατσίου

	Οκτ.	Νοέ..	Δεκ.	Ιαν.	Φεβ.	Μάρ	Απρ.	Μάιος	Ιούν.	Ιούλ.	Αύγ.	Σεπτ.
2005-06	14	192,6	33,6	51	52	61,6	17,8	0,2	29,4	4,8	0,4	88,6
2006-07	117,8	21,8	13,8	3,4	70,8	57,4	6	46	7	0	0	0
2007-08	91,2	34	51	26	20,4	40,2	59,4	1,2	2	0	7,6	21,6
2008-09	2,6	27,2	80,6	86,6	44,4	52	13,2	11,4	0,4	30,4	8,8	51,4
2009-10	104,4	38,8	114,8	28,4	56,8	11	0,4	13,6	20,8	23	0	28,4
2010-11	104,6	14,2	24,4	82,2	115	31,8	41,2	31,8	37,2	0	0	4,2
2011-12	38,2	2,8	85	29	86,4	13,8	31	27,4	0	0	0	16
2012-13	19	95,2	164,8	95,4	154,6	12,8	3,2	11,8	6,6	0	0	1,2
2013-14	28,4	133,2	58,8	119	17,4	48,4	39,4	3,6	16,8	3,8	2	49,4
2014-15	44,4	38,6	172,4	44,8	48,6	106,4	8,6	6	30	0	0	64,4
2015-16	114	43,8	3	35	22,2	43,2	0,2	2,6	21,6	0	0,2	11

2. Βροχομετρικός Σταθμός Ζωγράφου

	Οκτ.	Νοέ..	Δεκ.	Ιαν.	Φεβ.	Μάρ.	Απρ.	Μάιος	Ιούν.	Ιούλ.	Αύγ.	Σεπτ.
2005-06	15,2	268,8	35,8	99,6	87,6	56,6	17,4	0	31,8	2,8	0	107,8
2006-07	140,4	24,2	18,4	5,2	79	79,8	6,4	68,4	13,8	0	0	0
2007-08	79,2	34,6	54,2	27	31,6	54,6	62	2,2	1,2	0	8	35,4
2008-09	6,4	35	102,6	104,8	55,8	92,6	37	16,6	0,4	11,4	0	58
2009-10	102,4	52,4	129,8	63,8	53	14	0,4	10,2	53,2	39,4	0	30
2010-11	121,8	23,4	30,4	87,2	110	45,2	55,8	27,6	54,8	0	1,2	2,6
2011-12	36,2	2,6	107,2	43,2	123,6	13,8	37,6	29,2	0	0	1	17,2
2012-13	16,8	139,4	153,6	102,8	180,2	19,4	3	11,2	14,2	0	0	0
2013-14	25,4	150,2	65,8	115,4	23	66,2	49	1,2	7,2	33,6	2	91,2
2014-15	36,6	49,2	188,6	54	65,4	125,6	10,8	31,4	34	0	0,2	56
2015-16	100,2	42,4	4,8	53	31,2	66,4	0,4	3,2	42	0	0	4

3. Βροχομετρικός Σταθμός Άνω Λιοσίων

	Οκτ.	Νοέ..	Δεκ.	Ιαν.	Φεβ.	Μάρ.	Απρ.	Μάιος	Ιούν.	Ιούλ.	Αύγ.	Σεπτ.
2005-06	6	189,8	49,2	62,6	56,2	52,4	7	0,2	12	20,2	0	72,2
2006-07	171,8	41,6	15,6	5,8	63,8	80	12,4	64,8	4,6	0	0	0,2
2007-08	133,6	46	41,2	28,8	50,4	46	61	1,2	11	0,2	28,6	26,2
2008-09	0,8	56,6	88	87,8	40,2	56,6	17,4	19,8	8,4	4,4	5	59,6
2009-10	65,4	55,4	145	26,2	59,2	17,2	0	15,2	40	0	0	33,4
2010-11	141,6	11,4	40,2	85,2	114,8	44,4	43,8	49	74,2	0	0	3,8
2011-12	52,2	9,6	127	54,8	122,4	16	45	26	0	0	4,2	27
2012-13	17,8	84,2	171	116,4	175,8	12,8	2,2	12,8	29,6	0	0	4,6
2013-14	36	171,4	95,8	84,4	27,8	65,2	49,4	4,2	10,2	14,6	4	42
2014-15	93,8	50,4	251,4	66,2	103,4	109	17,8	13	36,8	8,4	1,2	55,8
2015-16	162,8	82,8	1,8	44,8	42,2	51,6	0	8,8	47	0	0,6	6,8

4. Βροχομετρικός Σταθμός Μενιδίου

	Οκτ.	Νοέ..	Δεκ.	Ιαν.	Φεβ.	Μάρ.	Απρ.	Μάιος	Ιούν.	Ιούλ.	Αύγ.	Σεπτ.
2005-06	6	190	49,2	62,6	70,6	69,4	33,6	1,2	18,4	16,6	0,8	24,4
2006-07	210	26,2	17,2	9,6	65,4	96,8	19,8	126	8	0	0	0
2007-08	132	50,8	54,4	39,6	42	61	53,2	3	17,8	0	34	36
2008-09	0	48	92,8	81	35,6	58,4	14,4	16,4	4,6	17,8	29	58,6
2009-10	78	54,8	135	34,8	105	18,6	3,8	24,4	30,4	1,4	0	31,4
2010-11	121	24,6	34,6	82,2	190	46,8	44,8	73	66,8	0	0	4
2011-12	38	16,6	126	46,2	118	22,8	53,2	29,2	0	0	2,2	11,6
2012-13	16,8	113	165	123	164	20,2	7,4	15,4	33,8	0	0	1,2
2013-14	28	184	73,8	89,8	29	77,4	59	1,2	13,8	18,4	2,4	40,8
2014-15	83	51	235	67,2	99,4	107	22	11	44,8	2,4	0,4	98,4
2015-16	166	71,4	6,2	51,4	43,6	65,2	0	5,2	49,4	0	0,2	25,8

Μηνιαίες χρονοσειρές δυνητικής εξατμισοδιαπνοής

1. Βροχομετρικός Σταθμός Γαλασίου

	Οκτ.	Νοέ.	Δεκ.	Ιαν.	Φεβ.	Μάρ	Απρ.	Μάιος	Ιούν.	Ιούλ.	Αύγ.	Σεπτ.
2005-06	59,6	22,12	17,58	18,31	29,72	57,38	91,7	142,66	163,83	198,54	166,77	110,06
2006-07	59,56	19,75	14,3	14,21	29,77	68,38	102,87	126,31	150,85	204,02	168,13	105,93
2007-08	63,66	27,12	17,03	18,88	29,78	63,96	90,64	138,41	185,87	196,71	179,61	103,6
2008-09	61,28	30,4	19,71	22,88	29,01	55,11	93,2	139,28	171,41	186,66	177,93	99,67
2009-10	55,59	16,79	15,12	23,16	31,57	63,3	104,48	127,39	142,06	175,89	172,3	101,97
2010-11	53,48	25,83	17,04	16,39	31,3	58,44	94,47	125,62	146,51	181,7	176,65	122,49
2011-12	62,91	27,52	10,82	16,66	32,02	63,84	97,93	124,07	189,86	197,31	177,36	110,22
2012-13	60,23	30,31	11,9	15,19	28,33	59,95	104,12	136,81	157,4	184,74	182,79	102,02
2013-14	55,66	23,04	18,25	14,18	31,9	64,5	83,04	127,55	148	162,89	152,7	93,88
2014-15	57,92	23,9	11,83	14,26	27,83	53,73	94,94	129,84	138,89	186,84	164,96	106,42
2015-16	57,16	18,98	8,31	12,17	29,54	57,38	104,14	115,71	153,97	185,95	162,48	97,76

2. Βροχομετρικός Σταθμός Ζωγράφου

	Οκτ.	Νοέ.	Δεκ.	Ιαν.	Φεβ.	Μάρ.	Απρ.	Μάιος	Ιούν.	Ιούλ.	Αύγ.	Σεπτ.
2005-06	52,2	21,35	21,1	16,8	31,73	59,92	88,59	139,82	155,59	181,4	158,71	98,7
2006-07	57,22	23,86	18,03	25,82	35,89	71,92	99,91	123,31	154,62	193,54	163,1	102,38
2007-08	58,51	29,07	16,77	17,83	28,17	65,25	91,42	134,19	178,37	185,51	165,82	93,61
2008-09	56,31	29,21	24,19	26,25	30,84	56,25	84,55	132,75	168,26	177,73	173,95	89,36
2009-10	53,54	19,39	20,28	25,76	35,12	60,03	95,93	130,34	139,56	164,32	160,34	94,73
2010-11	48,67	29,17	17,7	13,36	25,62	51,91	80,39	106,25	128,21	162,49	123,6	97,87
2011-12	51,83	23,23	15,4	19,07	29,49	55,99	90,66	113,05	163,09	167,6	149,51	95
2012-13	55,82	28,19	17,4	20,51	29,68	57,08	90,55	122,84	133,24	150,07	150,48	89,79
2013-14	47,19	25,19	18,39	20,11	28,27	55,35	73,15	115,31	125,25	141,39	131,21	79,75
2014-15	49,89	22,63	15,85	20,19	28,76	46,27	81,61	111,32	114,22	166,16	142,22	88,67
2015-16	57,16	18,98	8,31	12,17	29,54	57,38	104,14	115,71	153,97	185,95	162,48	97,76

3. Βροχομετρικός Σταθμός Άνω Λιοσίων

	Οκτ.	Νοέ..	Δεκ.	Ιαν.	Φεβ.	Μάρ.	Απρ.	Μάιος	Ιούν.	Ιούλ.	Αύγ.	Σεπτ.
2005-06	57,17	22,54	19,83	18,81	31,76	60,61	97,92	147,36	174,12	192,76	185,06	107,21
2006-07	58,78	21,95	11,25	18,32	30,14	67,46	104,16	132	170,08	212,27	176,89	110,43
2007-08	64,76	28,32	15,7	18,35	28,5	71	100,31	143,26	189,84	201,04	188,08	106,73
2008-09	66,92	31,28	20,9	22,52	32,03	61,23	94,1	146,94	178,1	195,97	180,32	99,44
2009-10	61,49	18	17,41	28,29	37,47	70,16	109,3	145,28	156,18	188,65	177,51	106,7
2010-11	55,04	27,6	20,04	17,23	30,52	66,79	95,43	136,32	157,66	195,31	173,86	124,23
2011-12	69,48	28,44	19,63	27,98	44,81	70,81	115,96	147,67	197,73	197,69	170,66	116,37
2012-13	71,19	38,82	23,91	25,54	34,11	70,73	112,78	159,16	174,44	193,23	184,13	111,02
2013-14	59,37	28,2	21,76	19,43	33,25	67,38	93,5	150,95	166,11	183,63	165,31	102,38
2014-15	68,68	29,77	18,09	23,53	39,05	64,4	105,76	145,6	162,57	192,61	172,73	110,69
2015-16	63,38	25,49	12,72	22,49	35,15	68,74	112,21	140,9	179,88	194,33	172,57	105,65

4. Βροχομετρικός Σταθμός Μενιδίου

	Οκτ.	Νοέ..	Δεκ.	Ιαν.	Φεβ.	Μάρ.	Απρ.	Μάιος	Ιούν.	Ιούλ.	Αύγ.	Σεπτ.
2005-06	60,37	24,44	21,31	21,92	34,4	59,29	94,64	145,35	173,48	201,39	175,56	108,04
2006-07	64,04	24,5	13,09	20,91	31,73	66,89	104,3	128,13	166,14	217,04	175,52	111,94
2007-08	63,58	28,65	18,38	20,14	32,59	68,21	96,78	143,24	192,76	204,77	185,85	106,06
2008-09	64,26	31,51	23,2	22,33	33,34	56,51	91,83	145,38	176,11	190,42	190,68	101,1
2009-10	60,45	21,24	17,35	27,13	38,09	66,75	108,4	141,16	150,47	183,03	176,04	104,21
2010-11	53,21	29,23	20,22	18,51	32,34	61,66	92,78	129,19	153,47	199,26	190,07	130,49
2011-12	62,16	24,27	16,2	22,77	34,52	68,34	105,32	132,95	198,95	207	182,18	114,98
2012-13	64,32	31,41	16,96	20,97	30,44	65,09	110,39	150,76	164,85	195,51	199,41	110
2013-14	59,09	25,57	18,46	17,71	32,14	65,84	83,5	137,7	162,03	173,22	160,56	95,23
2014-15	58,62	24,16	14,12	19,47	31,67	52,25	97,95	140,46	153,07	202,36	172,3	105,26
2015-16	54,37	24,05	9,04	17,21	33,12	59,24	109,11	128,32	168,84	196,33	177,77	102,16

- Μηνιαία χρονοσειρά δυνητικής εξατμισοδιαπνοής για τους τέσσερις σταθμούς

	Οκτ.	Νοέ..	Δεκ.	Ιαν.	Φεβ.	Μάρ.	Απρ.	Μάιος	Ιούν.	Ιούλ.	Αύγ.	Σεπτ.
2005-06	57,3	22,6	20	19	31,9	59,3	93,2	144	167	194	172	106
2006-07	59,9	22,5	14,2	19,8	31,9	68,7	103	127	160	207	171	108
2007-08	62,6	28,3	17	18,8	29,8	67,1	94,8	140	187	197	180	103
2008-09	62,2	30,6	22	23,5	31,3	57,3	90,9	141	173	188	181	97,4
2009-10	57,8	18,9	17,5	26,1	35,6	65,1	105	136	147	178	172	102
2010-11	52,6	28	18,8	16,4	30	59,7	90,8	124	146	185	166	119
2011-12	61,6	25,9	15,5	21,6	35,2	64,8	102	129	187	192	170	109
2012-13	62,9	32,2	17,5	20,6	30,6	63,2	104	142	157	181	179	103
2013-14	55,3	25,5	19,2	17,9	31,4	63,3	83,3	133	150	165	152	92,8
2014-15	58,8	25,1	15	19,4	31,8	54,2	95,1	132	142	187	163	103
2015-16	55,1	23,1	10,3	17,8	32,1	59,6	104	123	160	183	162	99,7

- Μηνιαία χρονοσειρά κατακρήμνισης για τους τέσσερις σταθμούς

	Οκτ.	Νοέ..	Δεκ.	Ιαν.	Φεβ.	Μάρ.	Απρ.	Μάιος	Ιούν.	Ιούλ.	Αύγ.	Σεπτ.
2005-06	10,30	210,25	41,95	68,95	66,60	60,00	18,95	0,40	22,90	11,10	0,30	73,25
2006-07	160,10	28,45	16,25	6,00	69,75	78,50	11,15	76,30	8,35	0,00	0,00	0,05
2007-08	108,95	41,35	50,20	30,35	36,10	50,45	58,90	1,90	8,00	0,05	19,55	29,80
2008-09	2,45	41,70	91,00	90,05	44,00	64,90	20,50	16,05	3,45	16,00	10,70	56,90
2009-10	87,55	50,35	131,05	38,30	68,60	15,20	1,15	15,85	36,10	15,95	0,00	30,80
2010-11	122,15	18,40	32,40	84,20	132,40	42,05	46,40	45,35	58,25	0,00	0,30	3,65
2011-12	41,15	7,90	111,20	43,30	112,60	16,60	41,70	27,95	0,00	0,00	1,85	17,95
2012-13	17,60	108,05	163,55	109,45	168,75	16,30	3,95	12,80	21,05	0,00	0,00	1,75
2013-14	29,45	159,75	73,55	102,15	24,30	64,30	49,20	2,55	12,00	17,60	2,60	55,85
2014-15	64,45	47,30	211,85	58,05	79,20	112,05	14,80	15,35	36,40	2,70	0,45	68,65
2015-16	135,70	60,10	3,95	46,05	34,80	56,60	0,15	4,95	40,00	0,00	0,25	11,90

Παράρτημα Β

Πίνακας Β Συγκεντρωτικός πίνακας των χαρακτηριστικών των εδαφικών σχηματισμών που διαπερνά το Αδριάνειο υδραγωγείο

Γεωλογικός σχηματισμός	Μήκος στο σχηματισμό	Χαρακτηριστικά γεωλογικού σχηματισμού
<p>Αθηναϊκός σχιστόλιθος / Μαργαϊκός ορίζοντας</p> <p>Ο κωδικός του πετρώματος κατά Ι.Γ.Μ.Ε. είναι K9-mk,sch.</p>	<p>3900 m</p> <p>Τα φρεάτια που διανοίχθηκαν στο έδαφος είναι από φρέαρ με νούμερο 1 έως το 80.</p>	<p>Το τελευταίο τμήμα της σήραγγας μήκους 3.9 km περίπου διέρχεται του αθηναϊκού σχιστόλιθου και του μαργαϊκού ορίζοντα. Ο Αθηναϊκός 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 διπλανές 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. Είναι συχνή η παρουσία ψαμμιτών και κροκαλολατυποπαγών με κροκάλες-λατύπες. Στον ορίζοντα αυτόν απαντώνται ενστρώσεις πλακωδών μικριτικών ασβεστολίθων σημαντικών διαστάσεων.</p> <p>Το σύστημα του Αθηναϊκού Σχιστόλιθου παρουσιάζει μεγάλη ετερογένεια και τεκτονική καταπόνηση από ρήγματα και διατμήσεις. Προηγηθείσα τεκτονική καταπόνηση έχει δημιουργήσει αδυναμίες στο έδαφος που τελικά επηρέασαν την ποιότητα και την συμπεριφορά των γεωυλικών του προκαλώντας εκτεταμένη αποσάθρωση και η εξαλλοίωση. Υπάρχει μια 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</p>

		<p>του υλικού καθιστώντας τις ακριβείς προβλέψεις δύσκολες. Η <i>περατότητα του σχιστόλιθου είναι εν γένη μικρή</i> 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.</p> <p>Η παρουσία ασβεστολιθικών ή αμμώδους συστατικών βελτιώνει την γεωτεχνική συμπεριφορά των. Όμως τοπικά μια ρωγμή μπορεί να προκαλέσει πρόβλημα. Η <i>εκσκαφή</i> είναι σχετικά εύκολα αλλά απαιτείται υποστήριξη. Οι μάργες αν και έχουν καλύτερες μηχανικές ιδιότητες από τους σχιστόλιθους, υπόκεινται σε πλαστικές παραμορφώσεις και ερπυσμό.</p>
<p>Λιμναίοι σχηματισμοί Καλογρέζας-Πικερμίου</p> <p>Ο κωδικός του πετρώματος κατά I.G.M.E. είναι Ms.m, c</p>	<p>11900μ</p> <p>Τα φρεάτια που διανοίχθηκαν στο έδαφος είναι από φρέαρ με νούμερο 81 έως 270</p>	<p>Το μεγαλύτερο τμήμα του υδραγωγείου, περίπου 11.9 km, διέρχεται από τους λιμναίους σχηματισμούς Καλογρέζας. Πρόκειται για ηπειρωτικούς σχηματισμούς, οι οποίοι αποτέθηκαν σε περιβάλλον λιμναίο ή εφήμερα λιμναίο. Η ευρύτερη 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. Το έδαφος χαρακτηρίζεται στιφρό έως σκληρό και κατά τόπους</p>

		πολύ σκληρό (ημιβραχώδες). Στην περιοχή του ΟΑΚΑ η <i>άργιλος είναι υπερστερεοποιημένη, αναμειγμένη με άμμο και ιλύ</i> , οπότε δεν ευνοούνται ο ερπυσμός και οι καταπτώσεις
Αδρομερείς ποταμολιμναίοι σχηματισμοί παρυφών Πάρνηθας και Πεντελικού Ο κωδικός του πετρώματος κατά Ι.Γ.Μ.Ε. είναι Ms.c,l,m	620μ Τα φρεάτια που διανοίχθηκαν στο έδαφος είναι από φρέαρ με νούμερο 271 έως 279	Η σήραγγα διέρχεται λατυποπαγών και κροκαλολατυποπαγών σχηματισμών στις περιοχές που γειτνιάζουν με τους ορεινούς όγκους της Πάρνηθας και του Πεντελικού. Πρόκειται κυρίως για πλειστοκαινικά <i>πλευρικά κορήματα</i> 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 <i>αργίλους και κροκαλοπαγή</i> . Η γεωμετρία των σχηματισμών ποικίλει. Γενικά είναι έντονα διαταραγμένα στρώματα με διάφορες κλίσεις προς σχεδόν όλες τις κατευθύνσεις.
Παλαιά πλευρικά κορήματα και κώνοι κορημάτων Ο κωδικός του πετρώματος κατά Ι.Γ.Μ.Ε. είναι Pt.sc, cs	830μ Τα φρεάτια που διανοίχθηκαν στο έδαφος είναι από φρέαρ με νούμερο 280 έως 299	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 <i>ισχυρά συγκολλημένα συνήθως με ασβεστομαργαϊκό ή ασβεστοψαμμιτικό</i> συνδετικό υλικό. Έχουν πάχος που κυμαίνεται από μερικά μέτρα μέχρι πολλές δεκάδες μέτρων και παρουσιάζουν <i>αυξημένη υδροπερατότητα</i> 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 επιδεκτικές διάβρωσης και υποσκαφών, κυρίως κατά μήκος επαφών με υποκείμενους στεγανούς σχηματισμούς.

Παράρτημα Γ

Πίνακας Γ Αποτελέσματα αριθμητικών αναλύσεων για τα διάφορα σενάρια

Κ	300	Βροχόπτωση	524	Ποσοστά
μ	0,0004	Επιφαν. Απορροή	92	18%
κ	0,2	Πραγμ. Εξατμ.	352	67%
φ	0,1	Υπόγεια Ροή	79	15%
ξ	0,02			

Κ	300	Βροχόπτωση	524	Ποσοστά
μ	0,0003	Επιφαν. Απορροή	90	17%
κ	0,2	Πραγμ. Εξατμ.	325	62%
φ	0,01	Υπόγεια Ροή	108	21%
ξ	0,02			

Κ	300	Βροχόπτωση	524	Ποσοστά
μ	0,0001	Επιφαν. Απορροή	104	20%
κ	0,22	Πραγμ. Εξατμ.	377	72%
φ	0,01	Υπόγεια Ροή	42	8%
ξ	0,02			

Κ	300	Βροχόπτωση	524	Ποσοστά
μ	0,001	Επιφαν. Απορροή	85	16%
κ	0,2	Πραγμ. Εξατμ.	211	40%
φ	0,01	Υπόγεια Ροή	223	43%
ξ	0,02			

Κ	200	Βροχόπτωση	524	Ποσοστά
μ	0,0001	Επιφαν. Απορροή	130	25%
κ	0,2	Πραγμ. Εξατμ.	362	69%
φ	0,01	Υπόγεια Ροή	32	6%
ξ	0,02			

Κ	300	Βροχόπτωση	524	Ποσοστά
μ	0,0006	Επιφαν. Απορροή	86	16%
κ	0,2	Πραγμ. Εξατμ.	265	51%
φ	0,01	Υπόγεια Ροή	172	33%
ξ	0,02			

Κ	200	Βροχόπτωση	524	Ποσοστά
μ	0,0002	Επιφαν. Απορροή	119	23%
κ	0,2	Πραγμ. Εξατμ.	343	66%
φ	0,01	Υπόγεια Ροή	60	12%
ξ	0,02			

Κ	300	Βροχόπτωση	524	Ποσοστά
μ	0,003	Επιφαν. Απορροή	71	14%
κ	0,15	Πραγμ. Εξατμ.	337	64%
φ	0,01	Υπόγεια Ροή	114	22%
ξ	0,02			

Κ	200	Βροχόπτωση	524	Ποσοστά
μ	0,0003	Επιφαν. Απορροή	110	21%
κ	0,2	Πραγμ. Εξατμ.	327	62%
φ	0,01	Υπόγεια Ροή	86	16%
ξ	0,02			

Κ	200	Βροχόπτωση	524	Ποσοστά
μ	0,0003	Επιφαν. Απορροή	99	19%
κ	0,15	Πραγμ. Εξατμ.	335	64%
φ	0,01	Υπόγεια Ροή	90	17%
ξ	0,02			

Κ	300	Βροχόπτωση	524	Ποσοστά
μ	0,0005	Επιφαν. Απορροή	87	17%
κ	0,2	Πραγμ. Εξατμ.	282	54%
φ	0,01	Υπόγεια Ροή	154	29%
ξ	0,02			

Κ	250	Βροχόπτωση	524	Ποσοστά
μ	0,0002	Επιφαν. Απορροή	84	16%
κ	0,15	Πραγμ. Εξατμ.	365	70%
φ	0,01	Υπόγεια Ροή	74	14%
ξ	0,02			

Κ	250	Βροχόπτωση	524	Ποσοστά
μ	0,0005	Επιφαν. Απορροή	92	17%
κ	0,2	Πραγμ. Εξατμ.	289	55%
φ	0,01	Υπόγεια Ροή	143	27%
ξ	0,02			

Κ	300	Βροχόπτωση	524	Ποσοστά
μ	0,0004	Επιφαν. Απορροή	50	9%
κ	0,1	Πραγμ. Εξατμ.	324	62%
φ	0,01	Υπόγεια Ροή	149	28%
ξ	0,02			

Κ	300	Βροχόπτωση	524	Ποσοστά
μ	0,0002	Επιφαν. Απορροή	99	19%
κ	0,22	Πραγμ. Εξατμ.	346	66%
φ	0,01	Υπόγεια Ροή	77	15%
ξ	0,02			

Κ	300	Βροχόπτωση	524	Ποσοστά
μ	0,0005	Επιφαν. Απορροή	48	9%
κ	0,1	Πραγμ. Εξατμ.	302	58%
φ	0,01	Υπόγεια Ροή	172	33%
ξ	0,02			

Κ	300	Βροχόπτωση	524	Ποσοστά
μ	0,0002	Επιφαν. Απορροή	71	14%
κ	0,15	Πραγμ. Εξατμ.	337	64%
φ	0,01	Υπόγεια Ροή	114	22%
ξ	0,02			

Κ	300	Βροχόπτωση	524	Ποσοστά
μ	0,0002	Επιφαν. Απορροή	65	12%
κ	0,12	Πραγμ. Εξατμ.	372	71%
φ	0,01	Υπόγεια Ροή	85	16%
ξ	0,02			

Κ	250	Βροχόπτωση	524	Ποσοστά
μ	0,0005	Επιφαν. Απορροή	37	7%
κ	0,05	Πραγμ. Εξατμ.	320	61%
φ	0,01	Υπόγεια Ροή	167	32%
ξ	0,02			

Κ	300	Βροχόπτωση	524	Ποσοστά
μ	0,0005	Επιφαν. Απορροή	56	11%
κ	0,12	Πραγμ. Εξατμ.	298	57%
φ	0,01	Υπόγεια Ροή	169	32%
ξ	0,02			

Κ	300	Βροχόπτωση	524	Ποσοστά
μ	0,0001	Επιφαν. Απορροή	100	19%
κ	0,21	Πραγμ. Εξατμ.	379	72%
φ	0,01	Υπόγεια Ροή	42	8%
ξ	0,03			

Κ	250	Βροχόπτωση	524	Ποσοστά
μ	0,0004	Επιφαν. Απορροή	86	16%
κ	0,18	Πραγμ. Εξατμ.	312	60%
φ	0,01	Υπόγεια Ροή	125	24%
ξ	0,02			

Κ	300	Βροχόπτωση	524	Ποσοστά
μ	0,0005	Επιφαν. Απορροή	87	17%
κ	0,2	Πραγμ. Εξατμ.	282	54%
φ	0,01	Υπόγεια Ροή	154	29%
ξ	0,02			

Κ	300	Βροχόπτωση	524	Ποσοστά
μ	0,0001	Επιφαν. Απορροή	97	19%
κ	0,2	Πραγμ. Εξατμ.	382	73%
φ	0,01	Υπόγεια Ροή	43	8%
ξ	0,02			

Κ	280	Βροχόπτωση	524	Ποσοστά
μ	0,0002	Επιφαν. Απορροή	89	17%
κ	0,18	Πραγμ. Εξατμ.	357	68%
φ	0,01	Υπόγεια Ροή	77	15%
ξ	0,02			

Κ	330	Βροχόπτωση	524	Ποσοστά
μ	0,0001	Επιφαν. Απορροή	99	19%
κ	0,22	Πραγμ. Εξατμ.	378	72%
φ	0,01	Υπόγεια Ροή	45	9%
ξ	0,02			

Κ	280	Βροχόπτωση	524	Ποσοστά
μ	0,0003	Επιφαν. Απορροή	85	16%
κ	0,18	Πραγμ. Εξατμ.	331	63%
φ	0,01	Υπόγεια Ροή	107	20%
ξ	0,02			

Κ	300	Βροχόπτωση	524	Ποσοστά
μ	0,0002	Επιφαν. Απορροή	99	19%
κ	0,22	Πραγμ. Εξατμ.	346	66%
φ	0,01	Υπόγεια Ροή	77	15%
ξ	0,02			

Κ	250	Βροχόπτωση	524	Ποσοστά
μ	0,0004	Επιφαν. Απορροή	101	19%
κ	0,22	Πραγμ. Εξατμ.	303	58%
φ	0,01	Υπόγεια Ροή	120	23%
ξ	0,02			

Κ	200	Βροχόπτωση	524	Ποσοστά
μ	0,0001	Επιφαν. Απορροή	123	24%
κ	0,17	Πραγμ. Εξατμ.	368	70%
φ	0,01	Υπόγεια Ροή	32	6%
ξ	0,02			

Κ	250	Βροχόπτωση	524	Ποσοστά
μ	0,0003	Επιφαν. Απορροή	103	20%
κ	0,22	Πραγμ. Εξατμ.	323	62%
φ	0,01	Υπόγεια Ροή	96	18%
ξ	0,02			

Κ	150	Βροχόπτωση	524	Ποσοστά
μ	0,0001	Επιφαν. Απορροή	157	30%
κ	0,17	Πραγμ. Εξατμ.	341	65%
φ	0,01	Υπόγεια Ροή	25	5%
ξ	0,02			

Κ	100	Βροχόπτωση	524	Ποσοστά
μ	0,0001	Επιφαν. Απορροή	206	39%
κ	0,2	Πραγμ. Εξατμ.	301	57%
φ	0,01	Υπόγεια Ροή	17	3%
ξ	0,02			

Κ	100	Βροχόπτωση	524	Ποσοστά
μ	0,0001	Επιφαν. Απορροή	203	39%
κ	0,17	Πραγμ. Εξατμ.	303	58%
φ	0,01	Υπόγεια Ροή	17	3%
ξ	0,02			

Κ	150	Βροχόπτωση	524	Ποσοστά
μ	0,0001	Επιφαν. Απορροή	161	31%
κ	0,2	Πραγμ. Εξατμ.	338	65%
φ	0,01	Υπόγεια Ροή	25	5%
ξ	0,02			

Κ	100	Βροχόπτωση	524	Ποσοστά
μ	0,0001	Επιφαν. Απορροή	206	39%
κ	0,2	Πραγμ. Εξατμ.	301	57%
φ	0,01	Υπόγεια Ροή	17	3%
ξ	0,02			

Κ	200	Βροχόπτωση	524	Ποσοστά
μ	0,0001	Επιφαν. Απορροή	130	25%
κ	0,2	Πραγμ. Εξατμ.	362	69%
φ	0,01	Υπόγεια Ροή	32	6%
ξ	0,02			

Κ	100	Βροχόπτωση	524	Ποσοστά
μ	0,0002	Επιφαν. Απορροή	195	37%
κ	0,2	Πραγμ. Εξατμ.	296	56%
φ	0,01	Υπόγεια Ροή	29	6%
ξ	0,02			

Κ	250	Βροχόπτωση	524	Ποσοστά
μ	0,0001	Επιφαν. Απορροή	99	19%
κ	0,17	Πραγμ. Εξατμ.	385	74%
φ	0,01	Υπόγεια Ροή	39	7%
ξ	0,02			

Κ	100	Βροχόπτωση	524	Ποσοστά
μ	0,0004	Επιφαν. Απορροή	177	34%
κ	0,2	Πραγμ. Εξατμ.	284	54%
φ	0,01	Υπόγεια Ροή	63	12%
ξ	0,02			

Κ	300	Βροχόπτωση	524	Ποσοστά
μ	0,0005	Επιφαν. Απορροή	95	18%
κ	0,22	Πραγμ. Εξατμ.	277	53%
φ	0,01	Υπόγεια Ροή	151	29%
ξ	0,02			

Κ	300	Βροχόπτωση	524	Ποσοστά
μ	0,0001	Επιφαν. Απορροή	48	9%
κ	0,1	Πραγμ. Εξατμ.	302	58%
φ	0,01	Υπόγεια Ροή	172	33%
ξ	0,02			

Κ	300	Βροχόπτωση	524	Ποσοστά
μ	0,0001	Επιφαν. Απορροή	100	19%
κ	0,21	Πραγμ. Εξατμ.	379	72%
φ	0,01	Υπόγεια Ροή	42	8%
ξ	0,03			

Κ	280	Βροχόπτωση	524	Ποσοστά
μ	0,0002	Επιφαν. Απορροή	89	17%
κ	0,18	Πραγμ. Εξατμ.	357	68%
φ	0,01	Υπόγεια Ροή	77	15%
ξ	0,02			

Κ	300	Βροχόπτωση	524	Ποσοστά
μ	0,0001	Επιφαν. Απορροή	104	20%
κ	0,22	Πραγμ. Εξατμ.	377	72%
φ	0,01	Υπόγεια Ροή	42	8%
ξ	0,02			

Κ	300	Βροχόπτωση	524	Ποσοστά
μ	0,0002	Επιφαν. Απορροή	99	19%
κ	0,22	Πραγμ. Εξατμ.	346	66%
φ	0,01	Υπόγεια Ροή	77	15%
ξ	0,02			

Κ	250	Βροχόπτωση	524	Ποσοστά
μ	0,0001	Επιφαν. Απορροή	99	19%
κ	0,17	Πραγμ. Εξατμ.	385	74%
φ	0,01	Υπόγεια Ροή	39	7%
ξ	0,02			

Κ	300	Βροχόπτωση	524	Ποσοστά
μ	0,0003	Επιφαν. Απορροή	90	17%
κ	0,2	Πραγμ. Εξατμ.	325	62%
φ	0,01	Υπόγεια Ροή	108	21%
ξ	0,02			

Κ	300	Βροχόπτωση	524	Ποσοστά
μ	0,0004	Επιφαν. Απορροή	92	18%
κ	0,2	Πραγμ. Εξατμ.	352	67%
φ	0,1	Υπόγεια Ροή	79	15%
ξ	0,02			

Κ	300	Βροχόπτωση	524	Ποσοστά
μ	0,0003	Επιφαν. Απορροή	90	17%
κ	0,2	Πραγμ. Εξατμ.	325	62%
φ	0,01	Υπόγεια Ροή	108	21%
ξ	0,02			

Κ	300	Βροχόπτωση	524	Ποσοστά
μ	0,0001	Επιφαν. Απορροή	104	20%
κ	0,22	Πραγμ. Εξατμ.	377	72%
φ	0,01	Υπόγεια Ροή	42	8%
ξ	0,02			

Κ	300	Βροχόπτωση	524	Ποσοστά
μ	0,001	Επιφαν. Απορροή	85	16%
κ	0,2	Πραγμ. Εξατμ.	211	40%
φ	0,01	Υπόγεια Ροή	223	43%
ξ	0,02			

Κ	200	Βροχόπτωση	524	Ποσοστά
μ	0,0001	Επιφαν. Απορροή	130	25%
κ	0,2	Πραγμ. Εξατμ.	362	69%
φ	0,01	Υπόγεια Ροή	32	6%
ξ	0,02			

Κ	300	Βροχόπτωση	524	Ποσοστά
μ	0,0006	Επιφαν. Απορροή	86	16%
κ	0,2	Πραγμ. Εξατμ.	265	51%
φ	0,01	Υπόγεια Ροή	172	33%
ξ	0,02			

Κ	200	Βροχόπτωση	524	Ποσοστά
μ	0,0002	Επιφαν. Απορροή	119	23%
κ	0,2	Πραγμ. Εξατμ.	343	66%
φ	0,01	Υπόγεια Ροή	60	12%
ξ	0,02			

Κ	300	Βροχόπτωση	524	Ποσοστά
μ	0,003	Επιφαν. Απορροή	71	14%
κ	0,15	Πραγμ. Εξατμ.	337	64%
φ	0,01	Υπόγεια Ροή	114	22%
ξ	0,02			

Κ	200	Βροχόπτωση	524	Ποσοστά
μ	0,0003	Επιφαν. Απορροή	110	21%
κ	0,2	Πραγμ. Εξατμ.	327	62%
φ	0,01	Υπόγεια Ροή	86	16%
ξ	0,02			

Κ	200	Βροχόπτωση	524	Ποσοστά
μ	0,0003	Επιφαν. Απορροή	99	19%
κ	0,15	Πραγμ. Εξατμ.	335	64%
φ	0,01	Υπόγεια Ροή	90	17%
ξ	0,02			

Κ	300	Βροχόπτωση	524	Ποσοστά
μ	0,0005	Επιφαν. Απορροή	87	17%
κ	0,2	Πραγμ. Εξατμ.	282	54%
φ	0,01	Υπόγεια Ροή	154	29%
ξ	0,02			

Κ	250	Βροχόπτωση	524	Ποσοστά
μ	0,0002	Επιφαν. Απορροή	84	16%
κ	0,15	Πραγμ. Εξατμ.	365	70%
φ	0,01	Υπόγεια Ροή	74	14%
ξ	0,02			

Κ	250	Βροχόπτωση	524	Ποσοστά
μ	0,0005	Επιφαν. Απορροή	92	17%
κ	0,2	Πραγμ. Εξατμ.	289	55%
φ	0,01	Υπόγεια Ροή	143	27%
ξ	0,02			

Κ	300	Βροχόπτωση	524	Ποσοστά
μ	0,0004	Επιφαν. Απορροή	50	9%
κ	0,1	Πραγμ. Εξατμ.	324	62%
φ	0,01	Υπόγεια Ροή	149	28%
ξ	0,02			

Κ	300	Βροχόπτωση	524	Ποσοστά
μ	0,0002	Επιφαν. Απορροή	99	19%
κ	0,22	Πραγμ. Εξατμ.	346	66%
φ	0,01	Υπόγεια Ροή	77	15%
ξ	0,02			

Κ	300	Βροχόπτωση	524	Ποσοστά
μ	0,0005	Επιφαν. Απορροή	48	9%
κ	0,1	Πραγμ. Εξατμ.	302	58%
φ	0,01	Υπόγεια Ροή	172	33%
ξ	0,02			

Κ	300	Βροχόπτωση	524	Ποσοστά
μ	0,0002	Επιφαν. Απορροή	71	14%
κ	0,15	Πραγμ. Εξατμ.	337	64%
φ	0,01	Υπόγεια Ροή	114	22%
ξ	0,02			

Κ	300	Βροχόπτωση	524	Ποσοστά
μ	0,0002	Επιφαν. Απορροή	65	12%
κ	0,12	Πραγμ. Εξατμ.	372	71%
φ	0,01	Υπόγεια Ροή	85	16%
ξ	0,02			

Κ	250	Βροχόπτωση	524	Ποσοστά
μ	0,0005	Επιφαν. Απορροή	37	7%
κ	0,05	Πραγμ. Εξατμ.	320	61%
φ	0,01	Υπόγεια Ροή	167	32%
ξ	0,02			

Κ	300	Βροχόπτωση	524	Ποσοστά
μ	0,0005	Επιφαν. Απορροή	56	11%
κ	0,12	Πραγμ. Εξατμ.	298	57%
φ	0,01	Υπόγεια Ροή	169	32%
ξ	0,02			

Κ	300	Βροχόπτωση	524	Ποσοστά
μ	0,0001	Επιφαν. Απορροή	100	19%
κ	0,21	Πραγμ. Εξατμ.	379	72%
φ	0,01	Υπόγεια Ροή	42	8%
ξ	0,03			

Κ	250	Βροχόπτωση	524	Ποσοστά
μ	0,0004	Επιφαν. Απορροή	86	16%
κ	0,18	Πραγμ. Εξατμ.	312	60%
φ	0,01	Υπόγεια Ροή	125	24%
ξ	0,02			

Κ	300	Βροχόπτωση	524	Ποσοστά
μ	0,0005	Επιφαν. Απορροή	87	17%
κ	0,2	Πραγμ. Εξατμ.	282	54%
φ	0,01	Υπόγεια Ροή	154	29%
ξ	0,02			

Κ	300	Βροχόπτωση	524	Ποσοστά
μ	0,0001	Επιφαν. Απορροή	97	19%
κ	0,2	Πραγμ. Εξατμ.	382	73%
φ	0,01	Υπόγεια Ροή	43	8%
ξ	0,02			

Κ	280	Βροχόπτωση	524	Ποσοστά
μ	0,0002	Επιφαν. Απορροή	89	17%
κ	0,18	Πραγμ. Εξατμ.	357	68%
φ	0,01	Υπόγεια Ροή	77	15%
ξ	0,02			

Κ	330	Βροχόπτωση	524	Ποσοστά
μ	0,0001	Επιφαν. Απορροή	99	19%
κ	0,22	Πραγμ. Εξατμ.	378	72%
φ	0,01	Υπόγεια Ροή	45	9%
ξ	0,02			

Κ	280	Βροχόπτωση	524	Ποσοστά
μ	0,0003	Επιφαν. Απορροή	85	16%
κ	0,18	Πραγμ. Εξατμ.	331	63%
φ	0,01	Υπόγεια Ροή	107	20%
ξ	0,02			

Κ	300	Βροχόπτωση	524	Ποσοστά
μ	0,0002	Επιφαν. Απορροή	99	19%
κ	0,22	Πραγμ. Εξατμ.	346	66%
φ	0,01	Υπόγεια Ροή	77	15%
ξ	0,02			

Κ	250	Βροχόπτωση	524	Ποσοστά
μ	0,0004	Επιφαν. Απορροή	101	19%
κ	0,22	Πραγμ. Εξατμ.	303	58%
φ	0,01	Υπόγεια Ροή	120	23%
ξ	0,02			

Κ	100	Βροχόπτωση	524	Ποσοστά
μ	0,0002	Επιφαν. Απορροή	195	37%
κ	0,2	Πραγμ. Εξατμ.	296	56%
φ	0,01	Υπόγεια Ροή	29	6%
ξ	0,02			

Κ	250	Βροχόπτωση	524	Ποσοστά
μ	0,0003	Επιφαν. Απορροή	103	20%
κ	0,22	Πραγμ. Εξατμ.	323	62%
φ	0,01	Υπόγεια Ροή	96	18%
ξ	0,02			

Κ	100	Βροχόπτωση	524	Ποσοστά
μ	0,0004	Επιφαν. Απορροή	177	34%
κ	0,2	Πραγμ. Εξατμ.	284	54%
φ	0,01	Υπόγεια Ροή	63	12%
ξ	0,02			

Κ	100	Βροχόπτωση	524	Ποσοστά
μ	0,0001	Επιφαν. Απορροή	206	39%
κ	0,2	Πραγμ. Εξατμ.	301	57%
φ	0,01	Υπόγεια Ροή	17	3%
ξ	0,02			

Κ	300	Βροχόπτωση	524	Ποσοστά
μ	0,0001	Επιφαν. Απορροή	48	9%
κ	0,1	Πραγμ. Εξατμ.	302	58%
φ	0,01	Υπόγεια Ροή	172	33%
ξ	0,02			

Κ	150	Βροχόπτωση	524	Ποσοστά
μ	0,0001	Επιφαν. Απορροή	161	31%
κ	0,2	Πραγμ. Εξατμ.	338	65%
φ	0,01	Υπόγεια Ροή	25	5%
ξ	0,02			

Κ	300	Βροχόπτωση	524	Ποσοστά
μ	0,0005	Επιφαν. Απορροή	95	18%
κ	0,22	Πραγμ. Εξατμ.	277	53%
φ	0,01	Υπόγεια Ροή	151	29%
ξ	0,02			

Κ	200	Βροχόπτωση	524	Ποσοστά
μ	0,0001	Επιφαν. Απορροή	130	25%
κ	0,2	Πραγμ. Εξατμ.	362	69%
φ	0,01	Υπόγεια Ροή	32	6%
ξ	0,02			

Κ	150	Βροχόπτωση	524	Ποσοστά
μ	0,0001	Επιφαν. Απορροή	157	30%
κ	0,17	Πραγμ. Εξατμ.	341	65%
φ	0,01	Υπόγεια Ροή	25	5%
ξ	0,02			

Κ	250	Βροχόπτωση	524	Ποσοστά
μ	0,0001	Επιφαν. Απορροή	99	19%
κ	0,17	Πραγμ. Εξατμ.	385	74%
φ	0,01	Υπόγεια Ροή	39	7%
ξ	0,02			

Κ	100	Βροχόπτωση	524	Ποσοστά
μ	0,0001	Επιφαν. Απορροή	203	39%
κ	0,17	Πραγμ. Εξατμ.	303	58%
φ	0,01	Υπόγεια Ροή	17	3%
ξ	0,02			

Κ	200	Βροχόπτωση	524	Ποσοστά
μ	0,0001	Επιφαν. Απορροή	123	24%
κ	0,17	Πραγμ. Εξατμ.	368	70%
φ	0,01	Υπόγεια Ροή	32	6%
ξ	0,02			

Κ	100	Βροχόπτωση	524	Ποσοστά
μ	0,0001	Επιφαν. Απορροή	206	39%
κ	0,2	Πραγμ. Εξατμ.	301	57%
φ	0,01	Υπόγεια Ροή	17	3%
ξ	0,02			