



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ – ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ «ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»

«ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΡΟΗΣ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΝΕΡΟΥ ΣΕ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΥΠΟΒΙΒΑΣΜΟΥ ΣΤΑΘΜΗΣ ΣΕ ΥΠΟΓΕΙΑ
ΕΡΓΑ. Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΤΗΣ ΝΕΑΣ
ΕΘΝΙΚΗΣ ΠΙΝΑΚΟΘΗΚΗΣ»

Σαράντου Ευαγγελία

Αθήνα, Φεβρουάριος 2024

Επιβλέπων: Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ,

Α Καλλίωρας

**«ΕΠΙΣΤΗΜΗ &
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ
ΥΔΑΤΙΚΩΝ
ΠΟΡΩΝ»**



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΔΙΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟ - ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ « ΕΠΙΣΤΗΜΗ &
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»

«ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΡΟΗΣ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΝΕΡΟΥ ΣΕ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΥΠΟΒΙΒΑΣΜΟΥ ΣΤΑΘΜΗΣ ΣΕ ΥΠΟΓΕΙΑ
ΕΡΓΑ. Η ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΤΗΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ ΤΗΣ ΝΕΑΣ
ΕΘΝΙΚΗΣ ΠΙΝΑΚΟΘΗΚΗΣ»

Σαράντου Ευαγγελία

Αθήνα, Φεβρουάριος 2024

«ΕΠΙΣΤΗΜΗ &
ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ
ΥΔΑΤΙΚΩΝ
ΠΟΡΩΝ»

Επιβλέπων: Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ,

Α. Καλλίωρας

I. ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του προγράμματος μεταπτυχιακών σπουδών «Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων», του τμήματος Πολιτικών Μηχανικών, του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Η συγκεκριμένη εργασία μελετά το εννοιολογικό υδρογεωλογικό μοντέλο προσομοίωσης της ροής του υπογείου νερού για διαφορετικές περιπτώσεις συστημάτων υποβιβασμού της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα κατά την κατασκευή της νέας Εθνικής Πινακοθήκης. Η ανάθεση και η επίβλεψη της διατριβής έγινε από τον κ. Καλλιώρα Ανδρέα, Αναπληρωτή Καθηγητή της σχολής Μηχανικών Μεταλλείων - Μεταλλουργών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Για την διεξαγωγή της διπλωματικής εργασίας, πραγματοποιήθηκε βιβλιογραφική αναζήτηση στην ελληνική και παγκόσμια βιβλιογραφία πάνω σε θέματα υδρογεωλογίας, γεωλογίας, συμπεριφοράς των υπογείων νερών στα συστήματα υποβιβασμού στάθμης, στην ροή του νερού στους υπογείους υδροφορείς, τα εννοιολογικά υδρογεωλογικά μοντέλα προσομοίωσης και την ερμηνεία τους. Έπειτα συλλέχθηκαν τα απαραίτητα δεδομένα (γεωμορφολογικά, γεωλογικά, υδρογεωλογικά) για την συγκεκριμένη περιοχή μελέτης και τέλος προσομοιώθηκε ο υδροφορέας της περιοχής και με την χρήση του προγράμματος ModelMuse 3.6.3 και του κώδικα MODFLOW 2005.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Ανδρέα Καλλιώρα για την βοήθεια και την καθοδήγηση του καθ' όλη την διάρκεια της σύνταξης της παρούσας διπλωματικής και για την άριστη συνεργασία μας. Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω την κυρία Μάρθα Περδικάκη, Διδάκτορα της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων – Μεταλλουργών, για την βοήθεια της που υπήρξε καθοριστική για την ολοκλήρωση του μοντέλου.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου και τους φίλους μου για την στήριξη τους και σε αυτό το ακαδημαϊκό επίπεδο.

II. ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η διαχείριση των υπόγειων νερών σε τεχνικά έργα αποτελεί ένα από τα βασικότερα ζητήματα του μηχανικού, καθώς είτε καθορίζει, είτε επηρεάζει σε μέγιστο βαθμό το σχεδιασμό τους. Οι διαθέσιμες μέθοδοι και τεχνολογίες για την αντιμετώπιση των υπόγειων νερών σε τεχνικά έργα αφορούν είτε μεθόδους αποκλεισμού, είτε μεθόδους υποβιβασμού της στάθμης του υπογείου νερού. Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή ειδίκευσης πρόκειται να αναπτύξει τεχνικές για την προσομοίωση των διαθέσιμων μεθόδων και τεχνολογιών για τη βέλτιστη διαχείριση του υπογείου νερού σε ένα υπόγειο έργο. Αυτό θα περιλαμβάνει τη χρήση διαφορετικών πακέτων σε μοντέλο πεπερασμένων διαφορών (κώδικας MODFLOW-2005) με στόχο την προσομοίωση των προαναφερθέντων. Η περιοχή μελέτης που θα αναλυθεί παρακάτω είναι η περίπτωση της Εθνικής Πινακοθήκης – Μουσείο Αλεξάνδρου Σούτσου, όπου κατά την επέκταση του κτιρίου με δύο νέα υπόγεια επίπεδα, προέκυψε κατασκευαστικό ζήτημα με την στάθμη του υδροφόρου, η οποία βρισκόταν σε πολύ υψηλότερο επίπεδο από αυτό που είχε υπολογιστεί από την αρχική γεωτεχνική μελέτη.

Η έρευνα και η προσομοίωση βασίστηκε σε υπάρχοντα στοιχεία. Μέσα από αυτή την προσομοίωση και ανάλυση των δεδομένων θα εξεταστούν τα πλεονεκτήματα και οι περιορισμοί της κάθε μεθόδου και θα γίνει η προσπάθεια να αναδειχθεί η βέλτιστη πρακτική για την διαχείριση των υπόγειων νερών στην συγκεκριμένη περιοχή. Τα στοιχεία που συλλέχθηκαν βιβλιογραφικά αφορούν την γεωλογία, την υδρογεωλογία και την γεωμορφολογία της περιοχής μελέτης. Με βάση αυτά τα στοιχεία κατασκευάστηκε ένα υδρογεωλογικό μοντέλο προσομοίωσης με την χρήση του κώδικα MODFLOW-2005 και του λογισμικού πακέτου ModelMuse 3.6.3 της USGS.

Λέξεις - κλειδιά: Εθνική Πινακοθήκη, υπόγειο νερό, υδρογεωλογία, υδρογεωλογικό μοντέλο, προσομοίωση υπόγεια ροής, συστήματα υποβιβασμού, MODFLOW, ModelMuse

III. ABSTRACT

The management of groundwater in engineering projects constitutes one of the foremost concerns for engineers, as it either dictates or significantly influences their design. Available methods and technologies for addressing groundwater in engineering projects involve either exclusion methods or methods for lowering the groundwater level. This postgraduate specialization thesis aims to develop techniques for simulating available methods and technologies for optimal groundwater management in an underground project. This will include the use of different modules in a finite - difference model (MODFLOW-2005 code) to simulate the data. The study area to be analyzed below is the case of the National Gallery - Alexandros Soutsos Museum, where during the expansion of the building with two new underground levels, a construction issue arose with the groundwater level, which was found to be significantly higher than that calculated by the geotechnical study.

The research and simulation were based on existing data. Through this simulation and data analysis, the advantages and limitations of each method will be examined, and an attempt will be made to identify the best practice for managing groundwater in the specific area. The data collected from literature pertains to the geology, hydrogeology, and geomorphology of the study area. Based on these data, a hydrogeological simulation model was constructed using the MODFLOW-2005 code and the ModelMuse 3.6.3 software package by USGS.

Keywords: National Gallery, underground water, hydrogeology, hydrogeological model, ground water flow modelling, drainage systems, MODFLOW, ModelMuse

IV. EXTENDED ABSTRACT

The effective management of groundwater within engineering projects stands as a paramount concern for engineers, given its pivotal role in either dictating or significantly influencing project design. Within the realm of engineering, methods and technologies available for addressing groundwater typically fall into two categories: exclusionary methods, which aim to prevent groundwater infiltration, and methods aimed at groundwater level reduction, which seek to manage and control existing groundwater levels. This postgraduate specialization thesis endeavors to develop techniques for simulating these available methods and technologies to achieve optimal groundwater management within underground projects.

This endeavor encompasses the utilization of various modules within a finite-difference model, specifically employing the MODFLOW-2005 code, to simulate pertinent data. The focal point of analysis lies within the case study of the National Gallery - Alexandros Soutsos Museum. This museum encountered a construction challenge during the expansion phase, specifically concerning the groundwater level discrepancy, which notably exceeded initial estimations provided by the geotechnical study. This unforeseen disparity necessitated a comprehensive reassessment of groundwater management strategies within the project scope.

The research and simulation conducted herein are founded upon existing datasets obtained from comprehensive geotechnical studies and hydrogeological assessments. Through meticulous simulation and data analysis, this study seeks to delineate the advantages and limitations inherent within each groundwater management method. Moreover, an endeavor is made to discern optimal practices for groundwater management within the specified area, taking into account factors such as project constraints, environmental considerations, and sustainability objectives.

The data compiled from literature primarily pertains to the geology, hydrogeology, and geomorphology of the study area, providing crucial insights into the hydrological characteristics and groundwater behavior. Leveraging this foundational data, a hydrogeological simulation model is constructed utilizing the MODFLOW-2005 code, a widely recognized numerical groundwater flow model, and facilitated by the ModelMuse 3.6.3 software package developed by the United States Geological Survey (USGS). This model incorporates various parameters, including hydraulic conductivity, porosity, and boundary conditions, to accurately simulate groundwater flow dynamics within the study area.

Through iterative simulation runs and sensitivity analyses, the performance of different groundwater management methods is evaluated, considering factors such as effectiveness, feasibility, and potential environmental impacts. The findings of this study aim to provide valuable insights into the complex interplay between engineering interventions and groundwater dynamics, ultimately informing decision-making processes for future underground projects and contributing to the advancement of sustainable groundwater management practices in engineering applications.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

I. ΠΡΟΛΟΓΟΣ	I
II. ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	II
III. ABSTRACT	III
IV. EXTENDED ABSTRACT	IV
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	10
1.1.Υδρολογικός κύκλος	10
1.2.Υπόγειο νερό	11
1.3.Υπόγεια νερά και γεωλογικοί σχηματισμοί.....	12
1.4.Ταξινόμηση Υπόγειων Υδροφορέων.....	13
1.5.Νόμος Darcy.....	14
1.6.Ενεργές τάσεις	15
1.7.Διάρθρωση εργασίας.....	16
2. ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΟΥ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΝΕΡΟΥ	17
2.1.Μεθοδολογίες ελέγχου του υπογείου νερού σε τεχνικά έργα.....	17
2.2.Μέθοδος αποκλεισμού υπογείων υδάτων.....	17
2.3.1. Μέθοδοι ανοιχτής άντλησης και προ- αποστράγγισης	20
2.3.3. Μέθοδοι Παθητικής Αποστράγγισης.....	21
2.4.Επιφανειακά ύδατα	23
3. ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΠΟΣΤΡΑΓΓΙΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΦΡΕΑΤΩΝ ΑΝΤΛΗΣΗΣ	24
3.1. Σωληνωτά φρέατα.....	25
3.2. Σωληνωτά φρέατα πολλαπλών επιπέδων	28
3.3.Βαθιές γεωτρήσεις.....	29
4. ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ.....	33
4.1.Γεωμορφολογία λεκανοπεδίου Αττικής.....	34
4.2.Μορφολογία και κλίσεις πρηνών	34
4.3.Υδρογραφικό δίκτυο και υδρογραφικές λεκάνες	35
4.4.Γεωλογία-Υδρογεωλογία	36
4.5.Περιγραφή ενοτήτων	38
4.6.Κάλυψη και Χρήσεις Γης	41
4.7.Ιλισός	43
5. ΠΡΟΣΩΜΟΙΩΣΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ	47
5.1. Εννοιολογικό μοντέλο	47
5.2. Υδρογεωλογικά μοντέλα	48
5.3. Μαθηματικό μοντέλο	49

5.4. Ο κώδικας MODFLOW	53
5.5. Διακριτοποίηση του πεδίου ορισμού του μοντέλου.....	54
5.6. Υδραυλική αγωγιμότητα.....	54
5.7. Υδατικό Ισοζύγιο.....	54
5.8. Οριακές συνθήκες.....	55
6. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ – ΕΘΝΙΚΗ ΠΙΝΑΚΟΘΗΚΗ.....	56
6.1. Ιστορικό.....	56
6.2. Το πρόβλημα των υπόγειων υδάτων	57
6.3. Χωρική, χρονική διακριτοποίηση και γεωμετρία	59
7. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ MODFLOW.....	61
8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	67
9. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	69

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1-1: Ο υδρολογικός κύκλος του νερού. (USGS,2019)	11
Εικόνα 1-2: Υδρολογικός κύκλος και δημιουργία υπόγειων νερών (USGS,2019)	12
Εικόνα 1-3: Εκδήλωση αρτεσιανισμού σε υπό πίεση υδροφόρους ορίζοντες. (USGS, 2019)	14
Εικόνα 2-1: Φρεάτια βαθιών αντλήσεων για την μείωση της στάθμης των υπόγειων νερών σε περιοχή που έχει απομονωθεί από τοίχους στεγανότητας (Cashman & Preene, 2021).....	19
Εικόνα 4-1: Χάρτης γεωγραφικής θέσης της περιοχής μελέτης	33
Εικόνα 4-2: Χάρτης Περιοχών Natura2000 της Περιφέρειας Αττικής.....	34
Εικόνα 4-3:Γεωμορφολογικός χάρτης του λεκανοπεδίου Αττικής	36
Εικόνα 4-4: Γεωλογικός χάρτης λεκανοπεδίου Αττικής (Δ. Παπανικολάου, Μπάση, et al., 2004).....	38
Εικόνα 4-5: Χάρτης χρήσεων γης – λεκανοπέδιο Αττικής	42
Εικόνα 4-6: Πανοραμική φωτογραφία της Αθήνας από τον Λυκαβηττό. Εστιάζοντας φαίνεται ο Ιλισός. (Pascal Sebah, 1870-1874).....	45
Εικόνα 4-7: Ο ποταμός Ιλισός από τους χάρτες Kaupert (1885-1903).....	46
Εικόνα 4-8: Η περιοχή που έρεε ο Ιλισός σήμερα (google maps)	46
Εικόνα 6-1: Εθνική Πινακοθήκη-Μουσείο Αλέξανδρου Σούτσου	56
Εικόνα 6-2: Πραγματική και εκτιμηθείσα στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα της Εθνικής Πινακοθήκης (Αμπατζόγλου Ι., 2018)	57
Εικόνα 6-3: Οι προσεγγιστικές θέσεις των φρεάτων άντλησης κατά τις εκσκαφές του εργοταξίου (Αμπατζόγλου Ι., 2018).....	58
Εικόνα 6-4: Περιοχή μελέτης Εθνική Πινακοθήκη – Μουσείο Αλεξάνδρου Σούτσου.....	59
Εικόνα 6-5: Δημιουργία καννάβου και ορισμός περιοχής μελέτης στο λογισμικό ModelMuse.	60
Εικόνα 7-1: Απεικόνιση της μεταβολής του υδραυλικού φορτίου κατά την λειτουργία 3 βαθιών γεωτρήσεων (deep wells). Σενάριο 1.....	61
Εικόνα 7-2: Μέθοδος άντλησης με βαθιές γεωτρήσεις (deep wells). Σενάριο 2	62
Εικόνα 7-3: Διάταξη σωληνωτών φρεάτων	62
Εικόνα 7-4: Αποτελέσματα προσομοίωσης με την μέθοδο άντλησης μέσω σωληνωτών φρεάτων- Σενάριο 3.....	63
Εικόνα 7-5: Αποτελέσματα προσομοίωσης με την μέθοδο άντλησης μέσω σωληνωτών φρεάτων - Σενάριο 4.....	64
Εικόνα 7-6: Αποτελέσματα προσομοίωσης με την μέθοδο άντλησης μέσω σωληνωτών φρεάτων - Σενάριο 5.....	64
Εικόνα 7-7: Εφαρμογή της μεθόδου αποκλεισμού ανατολικά της περιοχής μελέτης.....	65
Εικόνα 7-8: Εφαρμογή της μεθόδου αποκλεισμού εκατέρωθεν της περιοχής μελέτης.....	65
Εικόνα 7-9: Αποτελέσματα προσομοίωσης με την μέθοδο άντλησης μέσω σωληνωτών φρεάτων - Σενάριο 5.....	66
Εικόνα 7-10: Αποτελέσματα προσομοίωσης με την μέθοδο άντλησης μέσω σωληνωτών φρεάτων - Σενάριο 6	66

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1-1: Χαρακτηρισμός περατότητας (Terzaghi K & Peck R, 1967).....	13
Πίνακας 4-1: Στοιχεία Υδρογραφικού δικτύου στο σύνολο του λεκανοπεδίου Αττικής. (Αντωνίου, 2002).....	35
Πίνακας 4-2: Υδρογραφική συχνότητα και πυκνότητα ανά υδρολογική λεκάνη (Αντωνίου, 2002).....	36
Πίνακας 4-3: Υδρογεωλογική ταξινόμηση γεωλογικών σχηματισμών του λεκανοπεδίου Αττικής. (Αντωνίου, 2002).....	41
Πίνακας 4-4: Εκτιμήσεις του συνολικού όγκου άντλησης των υπόγειων υδάτων (Αμπατζόγλου I., 2018).....	58

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2-1: Έλεγχος υπόγειων νερών με την μέθοδο του αποκλεισμού (Cashman & Preene, 2021).....	19
Σχήμα 2-2: : Έλεγχος υπόγειων νερών με την μέθοδο της άντλησης (Cashman & Preene, 2021).....	20
Σχήμα 2-3: Μέθοδοι ελέγχου υπογείου νερού με ανοιχτή άντληση (Cashman & Preene, 2021)..	21
Σχήμα 2-4: : Μέθοδοι ελέγχου του υπογείου νερού με τη μέθοδο της προ-αποστράγγισης (Cashman & Preene, 2021).....	21
Σχήμα 2-5: Παθητική αποστράγγιση εκσκαφής με έμμεσες αντλήσεις ή διαμόρφωση του πρανούς της εκσκαφής. (Cashman & Preene, 2021).....	22
Σχήμα 3-1: Τυπική διάταξη σωληνωτών φρεάτων σε κάτοψη (a) και προφίλ (b) (Powers, 2007).....	27
Σχήμα 3-2: Περιμετρική εγκατάσταση σωληνωτών φρεάτων σε μεγάλη εκσκαφή (Cashman & Preene, 2021).....	27
Σχήμα 3-3: Υποβιβασμός της στάθμης του υπογείου νερού σε δύο στάδια (Cashman & Preene, 2001).....	28
Σχήμα 3-4: Εγκατάσταση σωληνωτού φρέατος για τον υποβιβασμό της στάθμης σε δύο στάδια (Cashman & Preene, 2021).....	29
Σχήμα 3-5: Σύστημα βαθιών γεωτρήσεων περιμετρικά εκσκαφής μεγάλου μεγέθους. (Cashman & Preene, 2001).....	30
Σχήμα 3-6: Τμήματα βαθιάς γεώτρησης (Cashman & Preene, 2001).....	31
Σχήμα 4-1: Σχηματική απεικόνιση της γεωλογικής δομής του λεκανοπεδίου Αττικής (Δ. Παπανικολάου, Λόζιος, et al., 2004).....	40

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η χρήση του υπεδάφους για την κατασκευή υπογείων έργων αποτελεί έναν αποτελεσματικό τρόπο για την αντιμετώπιση του έντονου φαινομένου της αστικοποίησης, συμβάλλει ουσιαστικά στην κατεύθυνση της βιώσιμης αστικής ανάπτυξης και στην αντιμετώπιση της έλλειψης χώρου. Η έκφραση "υπόγεια ανάπτυξη" περιγράφει τη χρήση του υπογείου χώρου για την εγκατάσταση δραστηριοτήτων οι οποίες δεν απαιτούν μεγάλο επιφανειακό χώρο ή δεν προκαλούν παράγοντες όχλησης. Βέβαια τα υπόγεια έργα από τη φύση τους μειονεκτούν στην αβεβαιότητα και το ρίσκο που αναλαμβάνεται για τη κατασκευή τους και ειδικά στις περιπτώσεις όπου πραγματοποιούνται κάτω από το δομημένο αστικό ιστό.

Ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες για την σωστή κατασκευή υπογείων έργων είναι η αξιολόγηση των υδρογεωλογικών κινδύνων, δηλαδή της εισροής υπογείων υδάτων και της διαρροής κατά την κατασκευή και την λειτουργία του έργου. Γίνεται επομένως επιτακτική ανάγκη η δημιουργία του κατάλληλου μοντέλου διαχείρισης του υπογείου νερού και η επιλογή του σωστού τρόπου διαχείρισης και αντιμετώπισης του.

Κάθε υδρογεωλογική μελέτη, αποτελείται από ορισμένα στάδια εργασίας όπως η αναγνωριστική μελέτη και η οριστική μελέτη. Η αναγνωριστική μελέτη είναι η πρώτη γνωριμία με την περιοχή, όπου εξετάζουμε τα μορφολογικά, λιθολογικά, γεωλογικά και υδρογεωλογικά στοιχεία από όπου αντλούμε διάφορες πληροφορίες και συγκεντρώνουμε βιβλιογραφικά δεδομένα. Η προκαταρκτική μελέτη έχει διάφορες φάσεις εργασίας, με την συγκέντρωση στοιχείων όπως η μορφολογία του εδάφους, η γεωλογία, η τεκτονική, τα υδροληπτικά έργα, τα κλιματολογικά στοιχεία, γεωφυσικές μελέτες, δοκιμαστικές αντλήσεις και προσδιορισμός των υδραυλικών παραμέτρων κλπ. Η οριστική μελέτη αποτελεί τη συνθετική επεξεργασία και ερμηνεία όλων των επί μέρους στοιχείων, τα οποία μας επιτρέπουν την εκτίμηση των διαθέσιμων υδατικών πόρων και τον προγραμματισμό της ορθολογικής τους χρήσης, προτείνει την κατασκευή έργων εκμετάλλευσης των υδατικών πόρων, τον τρόπο παρακολούθησής τους, τον εμπλουτισμό των υδροφόρων οριζώντων κλπ.

1.1. Υδρολογικός κύκλος

Ως *υδρολογικός κύκλος* ή κύκλος του νερού (Εικόνα 1-1) περιγράφεται η συνεχής και σταθερή κυκλοφορία του νερού από την θάλασσα μέσω της ατμόσφαιρας προς την ξηρά και η επιστροφή του από την θάλασσα και την χέρσο πίσω την ατμόσφαιρα. Επομένως και τα τέσσερα επιφανειακά συστήματα (υδρόσφαιρα, ατμόσφαιρα, λιθόσφαιρα, βιόσφαιρα) συμμετέχουν στον υδρολογικό κύκλο, ενώ το νερό εμφανίζεται μέσα σε αυτόν σε όλες τις μορφές (στερεή, υγρή, αέρια), υπό την επιρροή της ηλιακής ενέργειας και της βαρύτητας. Κατά την εξάτμιση των ωκεανών, υδρατμοί παράγονται και ανέρχονται στα κατώτερα 10-12 χιλιόμετρα της ατμόσφαιρας. Σε αυτό το υψόμετρο, ψύχονται και υγροποιούνται. Τα νέφη διακινούνται μέσω της ατμοσφαιρικής κυκλοφορίας και όταν συμπυκνωθούν, παράγουν ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα. Αυτά τα κατακρημνίσματα πέφτουν στη επιφάνεια της γης, είτε στους ωκεανούς, είτε στην ξηρά, υιοθετώντας τις μορφές βροχής, χιονιού, χαλάζιου ή δροσιάς. Ένα ποσοστό των κατακρημνισμάτων που πέφτει στο έδαφος επιστρέφει άμεσα ή έμμεσα από την διαπνοή των φυτών (φωτοσύνθεση) στην ατμόσφαιρα με την μορφή υδρατμών. Αυτό το ποσοστό ονομάζεται *εξάτμισοδιαπνοή*. Ένα άλλο ποσοστό απορροφάται μέσα στους πόρους και στις διακλάσεις των γεωλογικών σχηματισμών και αποτελεί την *κατείσδυση*. Από την κατείσδυση, ένα μέρος κατακρατείται στην επιφανειακή ζώνη αερισμού, ενώ το υπόλοιπο κατεισδύει στα βαθύτερα στρώματα σχηματίζοντας το υπόγειο νερό. Τα υπόγεια νερά

εκφορτίζονται σε χερσαίες και θαλάσσιες πηγές. Το νερό των χερσαίων πηγών ξανά επιστρέφει στην επιφάνεια του εδάφους με αποτέλεσμα να εξατμιστεί, ενώ το νερό των θαλάσσιων πηγών ενσωματώνεται απευθείας στη θάλασσα, η οποία τροφοδοτεί την ατμόσφαιρα με υδρατμούς. Το τελευταίο μέρος του υδρολογικού κύκλου είναι η *επιφανειακή απορροή*, όπου νερό ρέει επιφανειακά μέσω των υδρογραφικών δικτύων και καταλήγει στη θάλασσα. (Παπανικολάου Δ. & Σιδέρης Χρ., 2014)

Ο υδρολογικός κύκλος αποτελεί ένα κλειστό σύστημα με αμετάβλητη συνολική χωρητικότητα (αν και μπορεί να προστεθούν σε αυτό ασήμαντα ποσά υδρατμών μέσα από την ηφαιστειακή δραστηριότητα). Με βάση την παραπάνω παραδοχή ο υδρολογικός κύκλος ποσοτικά εκφράζεται με την εξίσωση $P=E+R+I$,

όπου P: τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα, E: η εξατμισοδιαπνοή, R: η επιφανειακή απορροή και I: η κατείσδυση

Τα παραπάνω μεγέθη υπολογίζονται σε μονάδες όγκου (m^3), είτε σε εκατοστιαία ποσοστά επί των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων. (Παπανικολάου Δ. & Σιδέρης Χρ., 2014)

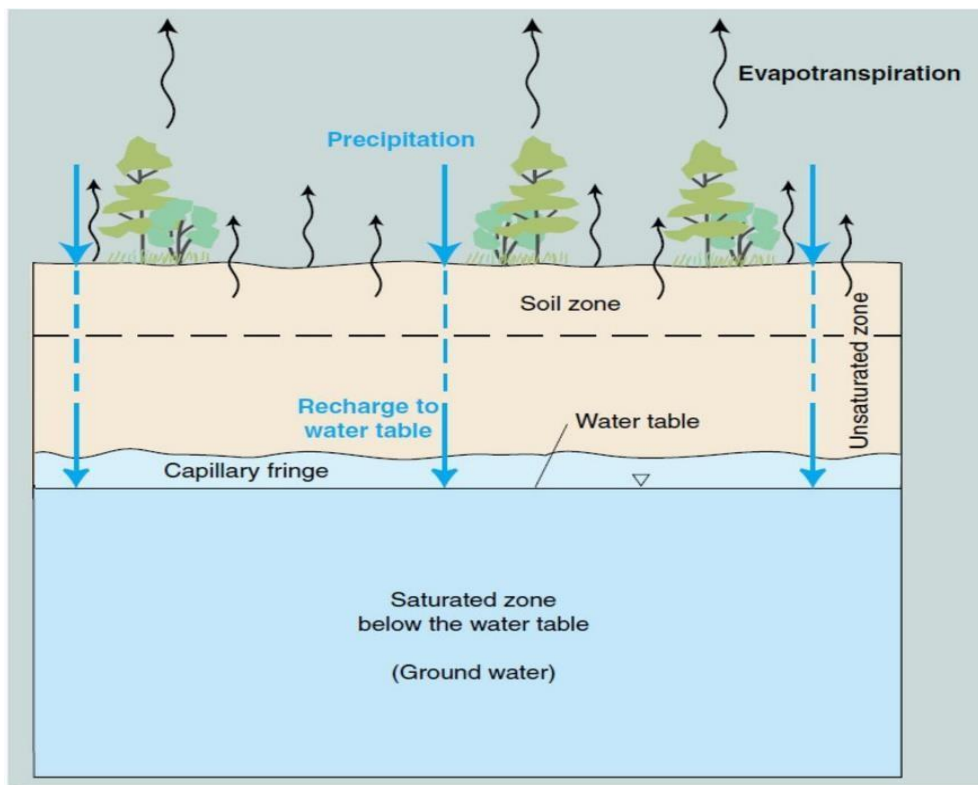


Εικόνα 1-1: Ο υδρολογικός κύκλος του νερού. (USGS,2019)

1.2.Υπόγειο νερό

Το νερό είναι ένας από τους πιο θεμελιώδεις παράγοντες της ύπαρξης και διατήρησης των ζωντανών οργανισμών στη γη. Η μεγαλύτερη διαθέσιμη αποθήκη φρέσκου νερού βρίσκεται στους υδροφορείς κάτω από την επιφάνεια του εδάφους. Το υπόγειο νερό που αντλείται στην επιφάνεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τις διάφορες ανάγκες των ανθρώπων, των ζώων και των φυτών. Τα υπόγεια ύδατα συγχρόνως αποτελούν «εχθρό» για τις υπόγειες κατασκευές καθώς μπορούν να προκαλέσουν δυσμενείς συνθήκες τόσο κατά τη φάση κατασκευής όσο και κατά τη φάση λειτουργίας τους. Σε γενικές γραμμές, κατά τη φάση κατασκευής η εισροή υδάτων δυσκολεύει τις εργασίες και στη φάση λειτουργίας η υδροστατική πίεση ασκεί πρόσθετα φορτία στην τελική επένδυση της σήραγγας. (Παπανικολάου Δ. & Σιδέρης Χρ., 2014)

Όσον αφορά την ροή του ένα μέρος του υπογείου νερού κατά την κατείδυση παραμένει κοντά στην επιφάνεια, είτε εξαιτίας της απορρόφησης του από κάποια αργιλικά ορυκτά, είτε από τριχοειδείς δυνάμεις από τους κόκκους του εδάφους και τις ρίζες των φυτών (Εικόνα 1-2). Αυτή η επιφανειακή ζώνη ονομάζεται *ζώνη αερισμού, ή ακόρεστη ζώνη (unsaturated zone)* με το νερό που κατακρατείται εκεί να μην συμμετέχει στην υπόγεια κυκλοφορία. Το υπόλοιπο νερό που κατειδύει στα βαθύτερα γεωλογικά στρώματα, πληρώνει τα διάκενα και σχηματίζονται οι *υδροφόροι ορίζοντες (aquifers)*. Η προς τα άνω οριακή επιφάνεια ονομάζεται *πιεζομετρική επιφάνεια (water table)* και η ζώνη ανάμεσα στην πιεζομετρική επιφάνεια και το υδατοστεγές υπόβαθρο, ονομάζεται *κορεσμένη ζώνη (saturated zone)*. (Παπανικολάου Δ. & Σιδέρης Χρ., 2014)



Εικόνα 1-2: Υδρολογικός κύκλος και δημιουργία υπόγειων νερών (USGS,2019)

1.3. Υπόγεια νερά και γεωλογικοί σχηματισμοί

Η αποθήκευση και η κίνηση του νερού μέσα στο υπέδαφος έχει άμεση σχέση με την λιθολογική σύσταση και την τεκτονική δομή των διαφόρων σχηματισμών του υπεδάφους. Οι γεωλογικοί σχηματισμοί που υπάρχουν στην επιφάνεια της γης ή λίγο κάτω από αυτή δεν είναι εντελώς συμπαγείς, αν τους εξετάσουμε σε μια κλίμακα ορισμένων κυβικών μέτρων. Παρουσιάζουν πρωτογενές ή δευτερογενές πορώδες έτσι ώστε το νερό που προέρχεται από τα κατακρημνίσματα να κατειδύει και να προστίθεται στους υπογείους υδροφόρους ορίζοντες. (Λέκκας Σ. & Αλεξόπουλος Α., 2009)

Ως *κοκκώδεις ή μικροπερατοί* ονομάζονται οι σχηματισμοί που μπορεί να είναι συμπαγείς ή χαλαροί, αλλά η σύνδεση και η συγκόλληση των τεμαχιδίων έχει γίνει με τέτοιο τρόπο ώστε να υπάρχουν κενά. Τέτοιοι σχηματισμοί είναι γενικά προσχωσιγενείς αλλά και ψαμμίτες, κροκαλοπαγή, μολασσικοί ιζήματα κλπ.

Τα πετρώματα που δεν περιέχουν υδατικούς πόρους, αλλά επιτρέπουν την κυκλοφορία του

νερού μέσω ενός δικτύου ρωγμών και κοίλων, όπως οι ασβεστόλιθοι, οι γρανίτες, μπορούν να αναφερθούν ως *ρωγμώδη πετρώματα ή μακροπερατά*. Με τον όρο *περατότητα* εννοούμε την ικανότητα που έχει ένα πέτρωμα να επιτρέπει τη διείσδυση και την κυκλοφορία του νερού μέσα σε αυτό. Η περατότητα μετριέται από την ποσότητα του νερού βαρύτητας που διέρχεται δια μέσου την μονάδας επιφάνειας του σχηματισμού στη μονάδα του χρόνου (m/sec) και συμβολίζεται με το γράμμα k. (Λέκκας Σ. & Αλεξόπουλος Α., 2009)

Γενικά το νερό που υπάρχει στα διάφορα πετρώματα και τους σχηματισμούς μπορούμε να το διακρίνουμε σε τρεις κατηγορίες: νερό πόρων, νερό ρωγμών και νερό σπηλαίων. Για πρακτικούς λόγους στην Υδρογεωλογία, τους διάφορους λιθολογικούς σχηματισμούς τους χωρίζουμε στις εξής κατηγορίες: Διαπερατοί όταν ο συντελεστής περατότητας έχει τιμές μεγαλύτερες ή ίσες της τάξεως 10^{-5} m/sec. Ημιπερατοί όταν ο συντελεστής περατότητας έχει τιμές $10^{-5} - 10^{-7}$ m/sec. Αδιαπέρατοι όταν ο συντελεστής περατότητας είναι μικρότερος από το 10^{-7} m/sec (Πίνακας 1-1). (Λέκκας Σ. & Αλεξόπουλος Α., 2009)

Διακύμανση k (cm/sec)	Χαρακτηρισμός Περαιτότητας
$K \geq 10^{-1}$	ΥΨΗΛΗ
$10^{-3} \leq K \leq 10^{-1}$	ΜΕΣΗ
$10^{-5} \leq K \leq 10^{-3}$	ΧΑΜΗΛΗ
$10^{-7} \leq K \leq 10^{-5}$	ΠΟΛΥ ΧΑΜΗΛΗ
$K < 10^{-7}$	ΠΡΑΚΤΙΚΑ ΑΔΙΑΠΕΡΑΤΟΣ

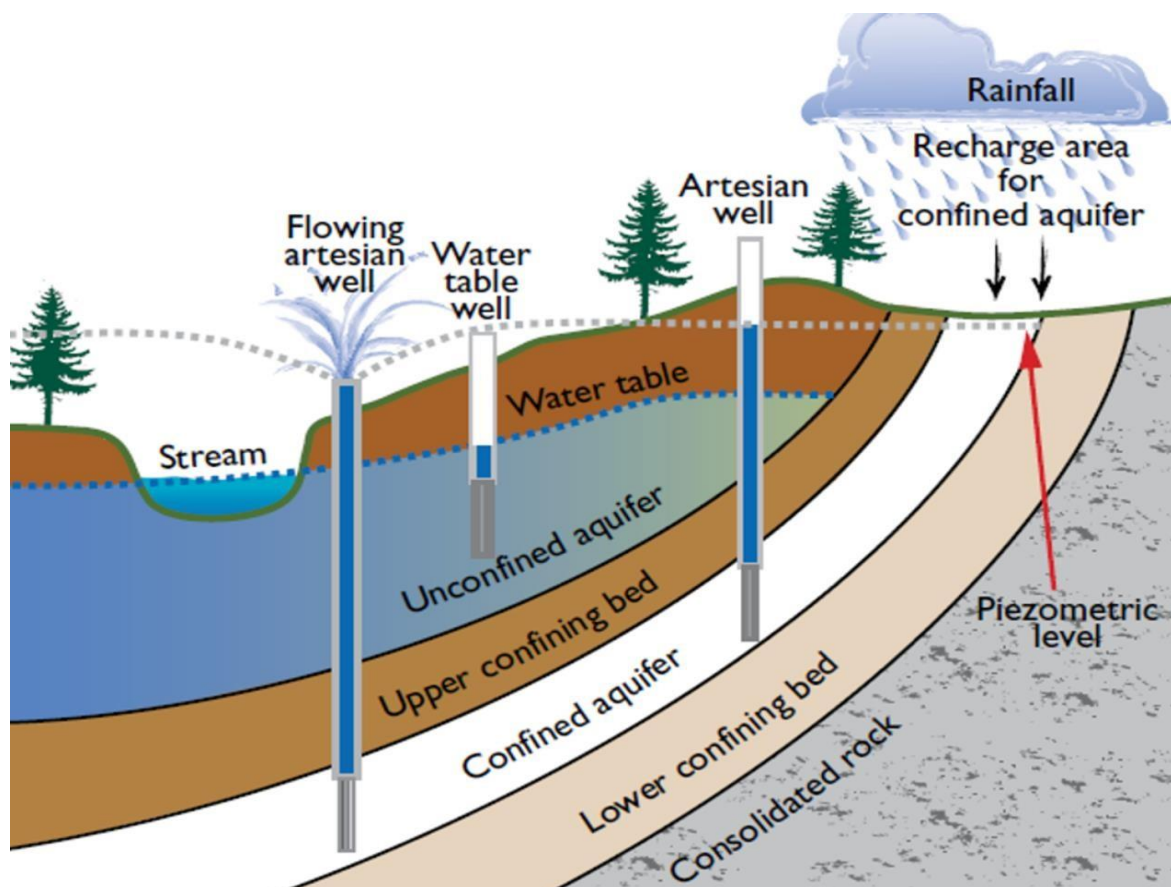
Πίνακας 1-1: Χαρακτηρισμός περατότητας (Terzaghi K & Peck R, 1967)

1.4. Ταξινόμηση Υπόγειων Υδροφορέων

Υδροφορέας ονομάζεται κάθε σχηματισμός ή γεωλογικό στρώμα που περιέχει μέσα στους πόρους του ή τα διάφορα άλλα κενά του, νερό το οποίο μπορούμε να πάρουμε και να χρησιμοποιήσουμε ως πηγή υδατικών πόρων κάτω από γενικά αποδεκτούς οικονομικούς όρους. Τα κύρια χαρακτηριστικά των υδροφορέων είναι η ικανότητα τους να αποθηκεύουν νερό και να το μεταβιβάζουν. Η κίνηση του νερού σε ένα γεωλογικό σχηματισμό γίνεται είτε δια μέσου πόρων (μικροπερατά πετρώματα), είτε δια μέσου των πάσης φύσεως ασυνεχειών (μακροπερατά πετρώματα). Τα καλά υδροφόρα στρώματα αποτελούνται συνήθως από αλλουβιακές αποθέσεις άμμων και χαλικιών. Ένας γεωλογικός σχηματισμός λέγεται αδιαπέρατο ή υδατοστεγές στρώμα, όταν περιέχει στους πόρους του υπόγειο νερό που δεν μπορεί να μετακινηθεί εύκολα σε σημαντική ποσότητα, λόγω της πολύ μικρής διαπερατότητας του. Τα αδιαπέρατα στρώματα αποτελούνται συνήθως από αργιλικές αποθέσεις που περιορίζουν ή απομονώνουν γειτονικά υδροφόρα στρώματα. Όταν ένας γεωλογικός σχηματισμός δεν περιέχει υπόγεια νερά και δεν επιτρέπει τη μετακίνηση του υπόγειου νερού, ονομάζεται άνυδρο στρώμα. Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν γεωλογικοί σχηματισμοί από συμπαγή γρανίτη. (Λέκκας Σ. & Αλεξόπουλος Α., 2009)

Η ταξινόμηση των υδροφορέων (Εικόνα 1-3) γίνεται λαμβάνοντας υπόψη τόσο τη γεωλογική δομή, όσο και τις τοπικές υδραυλικές συνθήκες. Όταν ένας υδροφορέας χαρακτηρίζεται ως υπό πίεση ή περιορισμένος τότε πάνω και κάτω από αυτόν υπάρχουν αδιαπέρατα γεωλογικά στρώματα. Σε έναν υπό πίεση υδροφορέα χαρακτηριστικό του αποτελεί η άνοδος της στάθμης του νερού κατά την διάνοιξη ενός πηγαδιού μέσα σε αυτόν. Έτσι λοιπόν, αυτά τα πηγάδια παρατήρησης, δηλαδή τα πιεζόμετρα, μετράνε το πιεζομετρικό φορτίο στο συγκεκριμένο σημείο. Οι μετρήσεις αυτές ορίζουν μια ιδεατή επιφάνεια η οποία ονομάζεται πιεζομετρική

επιφάνεια. Ένας υπό πίεση υδροφορέας ονομάζεται αρτεσιανός όταν η στάθμη της πιεζομετρικής του επιφάνειας βρίσκεται ψηλότερα από την στάθμη του εδάφους. (Μ.Α. Μιμίκου & Ε.Α. Μπαλτάς, 2006) Η δεύτερη κατηγορία υδροφορέων, είναι οι ελεύθεροι υδροφορείς. Σε αυτή την περίπτωση το κατώτερο όριο τους συμπίπτει με ένα αδιαπέρατο στρώμα και το επάνω όριο αποτελεί την ελεύθερη επιφάνεια του υπογείου νερού. Οι υδροφορείς με ελεύθερη επιφάνεια ή φρεάτιοι υδροφορείς τροφοδοτούνται απευθείας από το διηθούμενο νερό, από την επιφάνεια του εδάφους. Υπάρχουν περιπτώσεις όπου κάποιο ή όλα τα στρώματα του οριοθετούν τους υδροφορείς μπορεί να μην είναι εντελώς αδιαπέρατα, αλλά ημιπερατά. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, ενώ περιορίζουν την κίνηση του νερού, να επιτρέπουν να περάσει μια ποσότητα νερού στον υδροφορέα η οποία μπορεί να είναι σημαντική. Αυτή η περίπτωση υδροφορέα χαρακτηρίζεται ως υπό πίεση με διαρροή. Αντίστοιχα με τους περιορισμένους, υπάρχουν και ελεύθεροι υδροφορείς με διαρροή, όπου το ημιπερατό στρώμα αποτελεί το κάτω όριο τους. (Μ.Α. Μιμίκου & Ε.Α. Μπαλτάς, 2006)



Εικόνα 1-3: Εκδήλωση αρτεσιανισμού σε υπό πίεση υδροφόρους ορίζοντες. (USGS, 2019)

1.5. Νόμος Darcy

Τα υδροδυναμικά χαρακτηριστικά των υδροφορέων είναι αυτά που καθορίζουν την κίνηση του νερού και τις τοπικές συνθήκες ροής. Ο θεμελιώδης νόμος της υδραυλικής των υπογείων νερών διατυπώθηκε από τον Γάλλο μηχανικό Darcy, φέρει το όνομά του, και εκφράζεται ως εξής:

$Q=KAJ$, όπου Q : η παροχή της υπόγειας ροής, K : υδραυλική αγωγιμότητα, A : το εμβαδόν διατομής του υδροφορέα μέσα από το οποίο πραγματοποιείται η ροή και J : η υδραυλική κλίση της ελεύθερης ή της πιεζομετρικής επιφάνειας. (Μ.Α. Μιμίκου & Ε.Α. Μπαλτάς, 2006)

Δύο ακόμη παράμετροι που συμμετέχουν στο μαθηματικό πρόβλημα των υπόγειων ροών είναι η α) μεταφορικότητα T , η οποία χαρακτηρίζει την ικανότητα ενός υδροφορέα να μεταφέρει

νερό και είναι ίση με το γινόμενο της υδραυλικής αγωγιμότητας του υδροφορέα k , επί το πάχος του b και β) η αποθηκευτικότητα S , η οποία εκφράζει την ποσότητα του νερού που αποδίδεται ανά μονάδα επιφάνειας του υδροφορέα, εξαιτίας μιας μοναδιαίας μεταβολής του υδραυλικού φορτίου. (Μ.Α. Μιμίκου & Ε.Α. Μπαλτάς, 2006)

1.6. Ενεργές τάσεις

Η έννοια των ενεργών τάσεων συμβάλει στην κατανόηση των υπογείων υδάτων με τη σταθερότητα των εδαφικών και βραχωδών σχηματισμών. Το 1920, ο Karl Terzaghi πρότεινε την αρχή των ενεργών τάσεων, η οποία αναλύεται λεπτομερώς στο πεδίο της εδαφομηχανικής. Το νερό κινείται μέσα από τους πόρους του εδάφους. Αυτοί οι πόροι δημιουργούν το πορώδες σώμα. Ανάλογα με το εάν ο υδροφόρος ορίζοντας είναι υπό πίεση ή όχι, το πορώδες αυτό μπορεί να είναι κορεσμένο με νερό σε όλο το πάχος του ή να έχει την κορεσμένη ζώνη κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα. Καθώς ασκείται φορτίο στο κορεσμένο έδαφος, η τάση μεταφέρεται τόσο στον σκελετό του εδάφους όσο και στο νερό των πόρων. Η ενεργή τάση (σ') ορίζεται ως η διαφορά μεταξύ της συνολικής τάσης (σ) και της πίεσης του νερού των πόρων (u), σύμφωνα με την εξίσωση του Terzaghi: $\sigma' = \sigma - u$.

Λόγω της πολυφασικής φύσης του εδαφικού συστήματος, η πίεση του νερού στους πόρους του εδάφους έχει σημαντική επίδραση στη συμπεριφορά του. Αυτή η πίεση δρα προς όλες τις κατευθύνσεις, μειώνοντας την αντίσταση του εδάφους μέσω της εσωτερικής τριβής. Καθώς το νερό δεν έχει σημαντική αντοχή στη διάτμηση, ο εδαφικός σκελετός μπορεί να παρουσιάσει παραμόρφωση κατά τη μετακίνηση του νερού στους πόρους, γνωστή ως μεταφορά πίεσης πόρων. Αυτή η δράση συνεχίζεται μέχρι η αντίσταση του εδάφους να ισορροπήσει με τις εξωτερικές δυνάμεις. Ο ρυθμός μεταφοράς του νερού των πόρων εξαρτάται από τη διαπερατότητα του εδάφους και τις συνθήκες στράγγισης. Η ικανότητα του εδάφους να αντιστέκεται στις διατμητικές τάσεις εξαρτάται κυρίως από τη διασωματιδιακή τριβή, και συνεπώς από τις ενεργές τάσεις. Η διατμητική τάση αστοχίας (τ) μπορεί να εκφραστεί με το Κριτήριο Αστοχίας Mohr - Coulomb, όπου ϕ είναι η γωνία τριβής του εδάφους.

Οι παραπάνω εξισώσεις αποδεικνύουν ότι η μείωση της πίεσης του νερού των πόρων, που προκύπτει από την υποχώρηση του υπογείου νερού, θα οδηγήσει σε αύξηση της ενεργής τάσης στο έδαφος στην περιοχή επίδρασης. Αυτό θα προκαλέσει αντίστοιχη αύξηση στην διατμητική αντοχή του εδάφους προκαλώντας βελτίωση στην σταθερότητα του εδάφους κοντά και κάτω από την περιοχή εκσκαφής. Η εκσκαφή σε βραχομάζα προϋποθέτει διαφορετικές δυναμικές σε σύγκριση με την εκσκαφή σε χαλαρά εδάφη, λόγω της ρηγματώδους φύσης του βράχου. Οι ρωγμές λειτουργούν ως κανάλια μεταφοράς νερού στο βράχο και η αλλαγή πίεσης μπορεί να επηρεάσει τη σταθερότητά τους. Κατά την εκσκαφή, η υψηλή πίεση νερού μπορεί να μειώσει την τριβή κατά μήκος των ρωγμών, αυξάνοντας τον κίνδυνο μετατόπισης κομματιών βράχου. Η γεωμετρία και η κατάσταση των ρωγμών μπορεί να επιτρέψει την ολίσθηση τμημάτων του βράχου, επηρεάζοντας την ευστάθεια του πρανού. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε αστοχία του βραχώδους πρανού και ακόμα και σε καταρρεύσεις. Κατά την εκσκαφή σε βραχώδεις σχηματισμούς, είναι σημαντικό να λαμβάνονται υπόψη οι ρωγμές και η ρωγματώδης δομή του βράχου κατά τον σχεδιασμό και την υλοποίηση του έργου, προκειμένου να αντιμετωπιστούν οι πιθανοί κίνδυνοι που σχετίζονται με την αλλαγή της υδρολογικής κατάστασης του βράχου και να διασφαλιστεί η ασφάλεια της εκσκαφής. (Καλλιώρας Α., 2015)

1.7. Διάρθρωση εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελείται από εννέα κεφάλαια, τα οποία είναι τα εξής:

- Κεφάλαιο 1^ο : γίνεται αναφορά σε εισαγωγικά και θεωρητικά θέματα που θα αποτελέσουν την βάση για την ανάλυση των προβλημάτων που θα μελετηθούν παρακάτω.
- Κεφάλαιο 2^ο : περιγράφονται τα προβλήματα που δημιουργούνται κατά την διάνοιξη υπόγειων έργων κάτω από την στάθμη των υπόγειων νερών, ενώ αναλύονται εκτενώς οι μέθοδοι αποστράγγισης των υπόγειων νερών
- Κεφάλαιο 3^ο : περιγράφονται οι τεχνικές άντλησης του υπογείου νερού μέσω φρεάτων
- Κεφάλαιο 4^ο : παρουσιάζεται το γεωμορφολογικό πλαίσιο της περιοχής, το υδρογραφικό δίκτυο και περιγράφεται η γεωλογική δομή της περιοχής μελέτης μέσα από βιβλιογραφικά στοιχεία.
- Κεφάλαιο 5^ο : γίνεται βιβλιογραφική αναφορά στις έννοιες που αποτελούν την βάση μιας προσομοίωσης υπόγειων νερών
- Κεφάλαιο 6^ο : αναλύεται το πρόβλημα για το οποίο απαιτείται η πραγματοποίηση της προσομοίωσης των υπόγειων νερών στην περιοχή μελέτης
- Κεφάλαιο 7^ο : πραγματοποιείται η προσομοίωση ροής των υπόγειων νερών της περιοχής μελέτης με την χρήση του κώδικα MODFLOW-2005, μέσω του λογισμικού πακέτου ModelMuse 3.6.3.
- Κεφάλαιο 8^ο : συνοψίζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων και προτείνονται οι καταλληλότερες μέθοδοι αποστράγγισης
- Κεφάλαιο 9^ο : συνοψίζονται οι βιβλιογραφικές αναφορές που χρησιμοποιήθηκαν για την σύνταξη της παρούσας διπλωματικής εργασίας

2. ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΛΕΓΧΟΥ ΤΟΥ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΝΕΡΟΥ

Κατά την εκσκαφή και την κατασκευή υπόγειων έργων, οι παράγοντες που πρέπει να ελέγχονται είναι η ροή των υπόγειων νερών, η πίεση των νερών των πόρων σε υδροπερατούς σχηματισμούς, αλλά και η απορροή των επιφανειακών νερών. Με την κατανόηση της αλληλεπίδρασης μεταξύ των υπογείων νερών και των τεχνικών έργων προκύπτει η αξιολόγηση των μέτρων ελέγχου και η διασφάλιση της επιτυχίας του έργου. Οι μέθοδοι ελέγχου των υπογείων νερών περιλαμβάνουν την άντληση και τον αποκλεισμό. Πιο συγκεκριμένα, τα υπόγεια νερά μπορούν να ελέγχονται με μεθόδους αποκλεισμού, με μεθόδους αποστράγγισης, ή/και με συνδυασμό των παραπάνω τεχνολογιών. Η διαχείριση των υπογείων υδάτων σε μια εκσκαφή απαιτεί την τοπική μείωση της στάθμης των υπογείων υδάτων και τον περιορισμό των διηθήσεων λόγω κρεμαστών υδροφόρων οριζόντων ή άλλων υπογείων υδάτων που μπορεί να προκαλέσουν προβλήματα στα πρανή ή στη βάση της εκσκαφής. Επιπλέον, περιλαμβάνει τη βελτίωση της ευστάθειας των πρανών εκσκαφής και την αποτροπή της διάβρωσης λόγω στράγγισης υλικού. Αυτό επιτυγχάνεται με τον αποτελεσματικό έλεγχο των υπογείων υδάτων, ο οποίος μπορεί να επιτρέψει τη δημιουργία απότομων κλίσεων των πρανών που θα οδηγήσει στη μείωση των περιοχών εκσκαφής. Ακόμη, περιλαμβάνει την αποτροπή της "υδραυλικής αστοχίας" στη βάση της εκσκαφής, η οποία μπορεί να επηρεάσει τη φέρουσα ικανότητα στο επίπεδο βάσης. Τέλος, περιλαμβάνει τη μείωση των πλευρικών φορτίων σε συστήματα προσωρινής στήριξης, όπως η χρήση χαλύβδινων πασσαλοσανίδων, διαφραγματικών τοίχων από σκυρόδεμα κ.λπ.(Cashman & Preene, 2021)

2.1. Μεθοδολογίες ελέγχου του υπογείου νερού σε τεχνικά έργα

Για τον έλεγχο των υπόγειων νερών υπάρχουν δύο κύριες μεθοδολογίες που μπορούν να ακολουθηθούν:

- Η μέθοδος αποκλεισμού, όπου κατασκευάζονται τοίχοι στεγανότητας, με χαμηλή υδροπερατότητα προκειμένου να αποκλείσουν τα υπόγεια νερά από την εκσκαφή. Αυτοί μπορεί να είναι είτε τεχνητά στοιχεία, όπως τοίχοι πασσάλων, είτε μπορεί να αφορά μια ζώνη εδάφους, η οποία με την κατάλληλη τροποποίηση να μειωθεί η υδροπερατότητα της. Σε αυτή την περίπτωση είναι απαραίτητη η άντληση του νερού που βρίσκεται εγκλωβισμένο στην περιοχή εκσκαφής και του νερού που προέρχεται από τις διαρροές των τοίχων στεγανότητας. (Cashman & Preene, 2021)
- Η μέθοδος υποβιβασμού της στάθμης των υπογείων νερών, μέσω συστοιχίας γεωτρήσεων, είτε φρεάτων προκειμένου να μειωθεί η στάθμη του υπογείου νερού στον υδροφόρα.(Cashman & Preene, 2021)

2.2. Μέθοδος αποκλεισμού υπογείων υδάτων

Για τον αποκλεισμό των υπόγειων υδάτων (Σχήμα 2-1) στην περιοχή εργασίας χρησιμοποιούνται οι εξής τρεις κατηγορίες μεθόδων:

1. Μέθοδοι εισαγωγής διακριτού τοιχώματος ή φραγμού πολύ χαμηλής διαπερατότητας στο έδαφος (πασσαλοσανίδες, διαφραγματικοί τοίχοι)
2. Μέθοδοι επεξεργασίας του εδάφους ώστε να μειωθεί η διαπερατότητα του (μέθοδοι ενεμάτων, τεχνητή κατάψυξη και πήξη εδάφους)
3. Μέθοδοι πεπιεσμένων ρευστών σε θαλάμους πίεσης (σήραγγες ή φρέατα) για

αντιστάθμιση των πιέσεων των υπόγειων νερών

Η πιο συνηθισμένη μέθοδος αποκλεισμού αποτελεί τον σχηματισμό ενός φυσικού, αδιαπέρατου τοίχου στεγανότητας ή ένα φράγμα περιμετρικά της εκσκαφής, ώστε να εμποδίσει την εισροή των υπόγειων νερών στην περιοχή εργασίας. Οι τοίχοι στεγανότητας είναι συνήθως κατακόρυφοι και καταλήγουν σε ένα στρώμα πολύ χαμηλής διαπερατότητας, το οποίο δημιουργεί τη βασική στεγανοποίηση μιας εκσκαφής. Άλλες γεωμετρικές φραγμών υπόγειων υδάτων, όπως κεκλιμένες και υπό-οριζόντιες αποκοπές, μπορεί να είναι απαραίτητες σε έργα διάνοιξης σηράγγων. (Cashman & Preene, 2021)

Κάτω από τον πυθμένα των τοίχων στεγανότητας μπορεί να προκύψει ανοδική διαρροή υπόγειου νερού, εάν δεν υπάρχει κατάλληλο στρώμα, το οποίο να είναι εξαιρετικά χαμηλής διαπερατότητας ή εάν η κατασκευή δεν φτάνει μέχρι ένα πολύ μεγάλο βάθος. Το γεγονός αυτό θα μπορούσε να οδηγήσει σε αστάθεια της βάσης. Σε τέτοιες περιπτώσεις, οι τεχνικές υποβιβασμού στάθμης μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συνδυασμό με μεθόδους αποκλεισμού. Ο στόχος στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι να δημιουργηθεί ένας συνεχής οριζόντιος φραγμός που θα λειτουργεί ως στεγανοποίηση για τα κατακόρυφα στοιχεία του τοίχου. (Cashman & Preene, 2021)

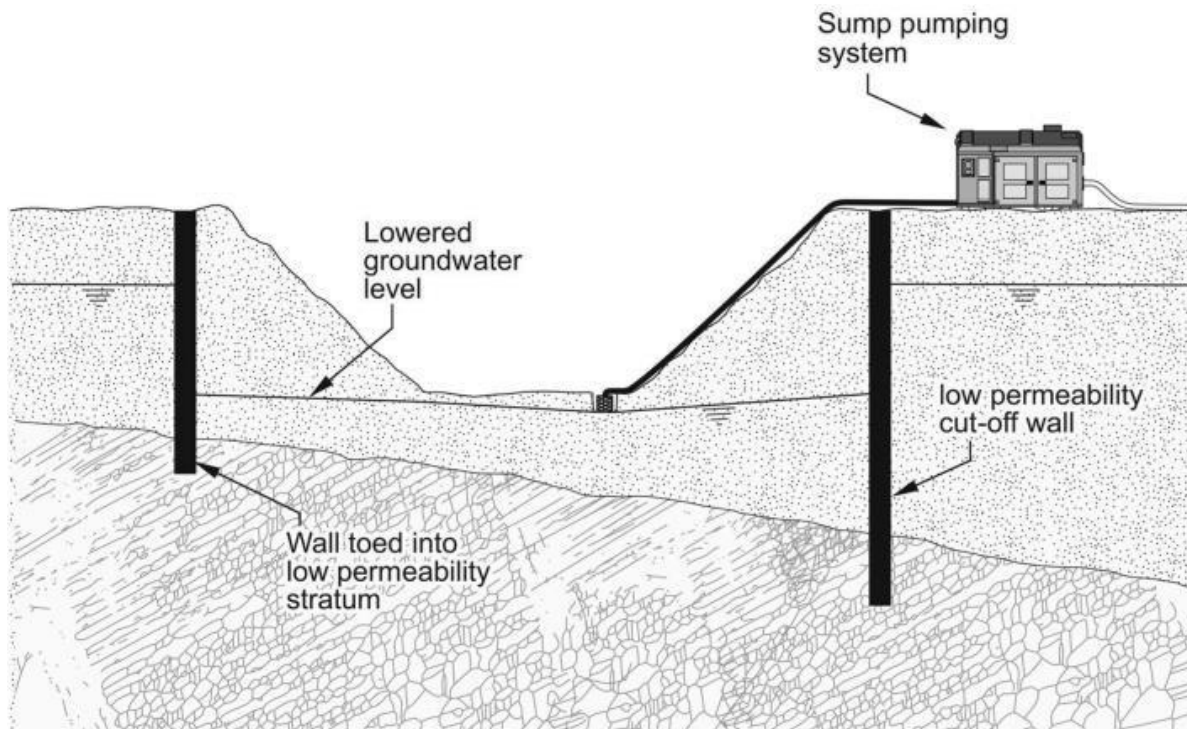
Εάν προκύψει πλήρης φυσική αποκοπή της περιοχής εκσκαφής, τα υπόγεια νερά θα παγιδευτούν στο εσωτερικό της περιοχής εργασίας. Αυτά θα πρέπει να απομακρυνθούν, είτε με τη χρήση φρεάτων άντλησης κατά τη διάρκεια της εκσκαφής, είτε με άντληση μέσω γεωτρήσεων ή σωληνωτών φρεάτων πριν από την έναρξη της εκσκαφής (Εικόνα 2-1). Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι δίνει την δυνατότητα να συνεχίζονται οι εργασίες κάτω από την στάθμη των υπόγειων νερών χωρίς ωστόσο να επηρεάζονται σημαντικά τα υπόγεια νερά εκτός εργοταξίου, με αποτέλεσμα να αποφεύγονται πολλές πιθανές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Σημαντικό για την σωστή εφαρμογή της μεθόδου είναι ο έλεγχος για την εμφάνιση διαρροών δια μέσω των τοίχων στεγανότητας. (Cashman & Preene, 2021)

Πολλά ζητήματα μπορεί να προκύψουν εξαιτίας των διαρροών στην εκσκαφή ή στην περιοχή εργασίας μέσω των τοίχων στεγανότητας. Αρχικά οι διαρροές μπορούν να διακόψουν τις εργασίες στην περιοχή εργασίας και να απαιτηθεί η χρήση φρεάτων άντλησης ή τεχνικού ελέγχου των επιφανειακών υδάτων για να απομακρυνθούν τα ύδατα. Επιπλέον εάν η διαρροή είναι αρκετά μεγάλη υπάρχει η πιθανότητα να μειωθεί τοπικά η στάθμη των υπόγειων υδάτων εκτός του εργοταξίου, γεγονός που θα μπορούσε να οδηγήσει σε καθίζηση ή άλλες δυσμενείς συνέπειες. Τέλος ακόμη και μικρές διαρροές θα μπορούσαν να προκαλέσουν κατασκευαστικά προβλήματα στους τοίχους στεγανότητας, εάν αυτοί αποτελούσαν μέρος της μόνιμης κατασκευής. (Cashman & Preene, 2021)

Στις δύο πρώτες περιπτώσεις η αντιμετώπιση μπορεί να γίνει με ενέματα ή άλλη επεξεργασία. Στην τρίτη περίπτωση οι πολύ μικρές διαρροές είναι πιο δύσκολο να αποφευχθούν. (Cashman & Preene, 2021)



Εικόνα 2-1: Φρεάτια βαθιών αντλήσεων για την μείωση της στάθμης των υπόγειων νερών σε περιοχή που έχει απομονωθεί από τείχους στεγανότητας (Cashman & Preene, 2021)

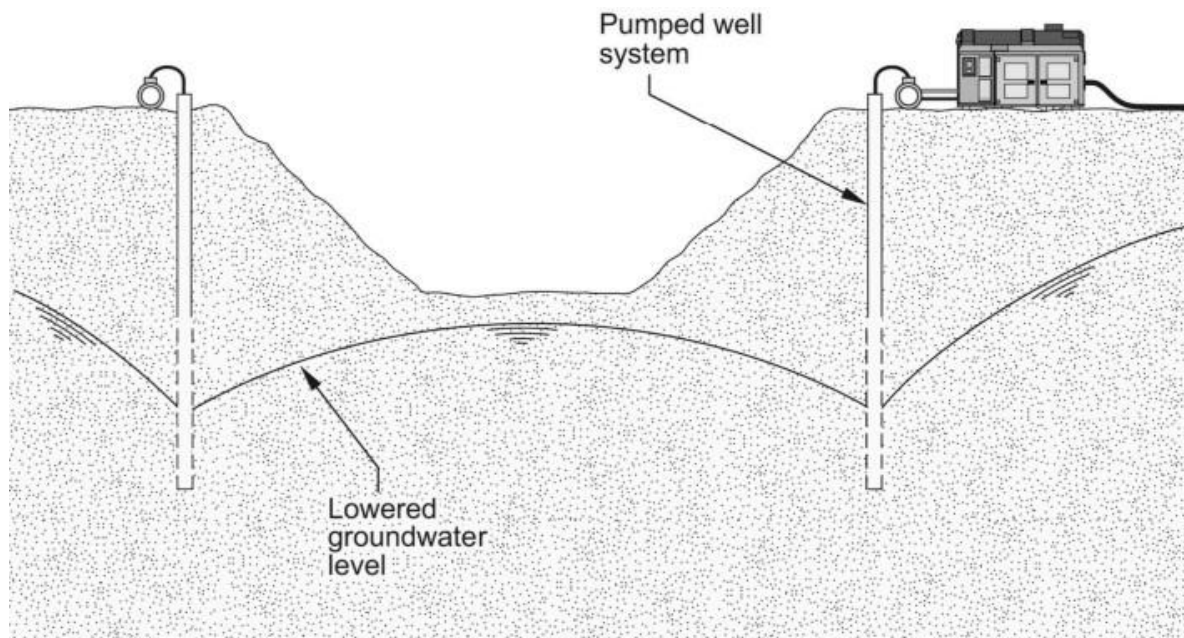


Σχήμα 2-1: Έλεγχος υπόγειων νερών με την μέθοδο του αποκλεισμού (Cashman & Preene, 2021)

2.3. Μέθοδος αποστράγγισης

Με την μέθοδο αποστράγγισης (Σχήμα 2-2) ελέγχονται τα υπόγεια ύδατα μέσω άντλησης, με αποτέλεσμα να προκαλείται τοπική μείωση της στάθμης του υπογείου νερού. Σκοπός της είναι να μειώσει τα επίπεδα των υπόγειων νερών σε μικρή απόσταση (περίπου 0,5m) κάτω από το βαθύτερο επίπεδο της εκσκαφής. (Cashman & Preene, 2021)

Οι δύο βασικές αρχές για την διασφάλιση της σταθερότητας των εκσκαφών, κυρίως σε περιπτώσεις πρानών, με την χρήση αποστράγγισης ή υποβιβασμού του υπογείου νερού είναι αρχικά η αποφυγή συγκράτησης των υπόγειων νερών καθώς αυτό μπορεί να οδηγήσει σε συσσώρευση πιέσεων νερού των πόρων, οδηγώντας στην καταστροφική κίνηση του εδάφους και των υπόγειων νερών. Επιπλέον χρειάζεται να διασφαλιστεί ότι τα λεπτόκοκκα υλικά (άργιλοι, ιλύες, άμμος) δεν μεταφέρονται συνεχώς, καθώς κρίνεται σημαντική η αποτροπή της συνεχής μεταφοράς τους, αφού αυτό μπορεί να οδηγήσει σε διάβρωση και, συνεπώς, σε συνθήκες αστάθειας. Συνιστάται η χρήση κατάλληλου διηθητικού τάπητα για την αποτροπή συσσώρευσης πιέσεων νερού των πόρων και τη μεταφορά των λεπτόκοκκων υλικών.



Σχήμα 2-2: : Έλεγχος υπόγειων νερών με την μέθοδο της άντλησης (Cashman & Preene, 2021)

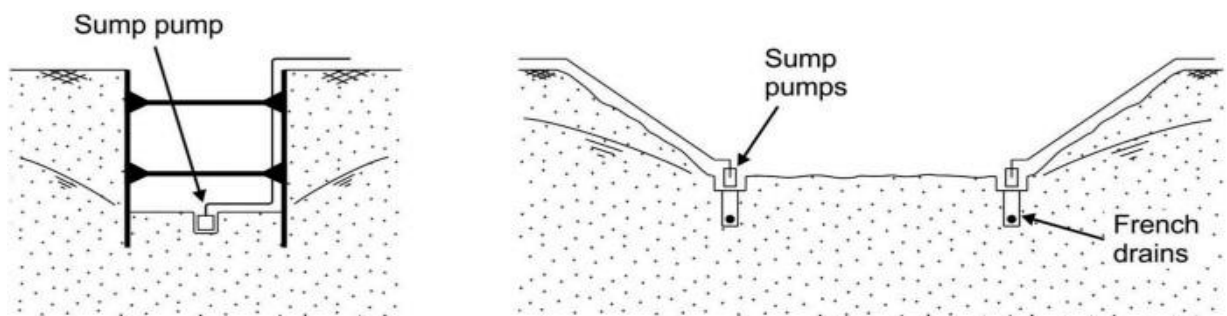
2.3.1. Μέθοδοι ανοιχτής άντλησης και προ- αποστράγγισης

Οι μέθοδοι άντλησης των υπόγειων νερών μπορούν να διακριθούν σε δύο κατηγορίες (Cashman & Preene, 2021):

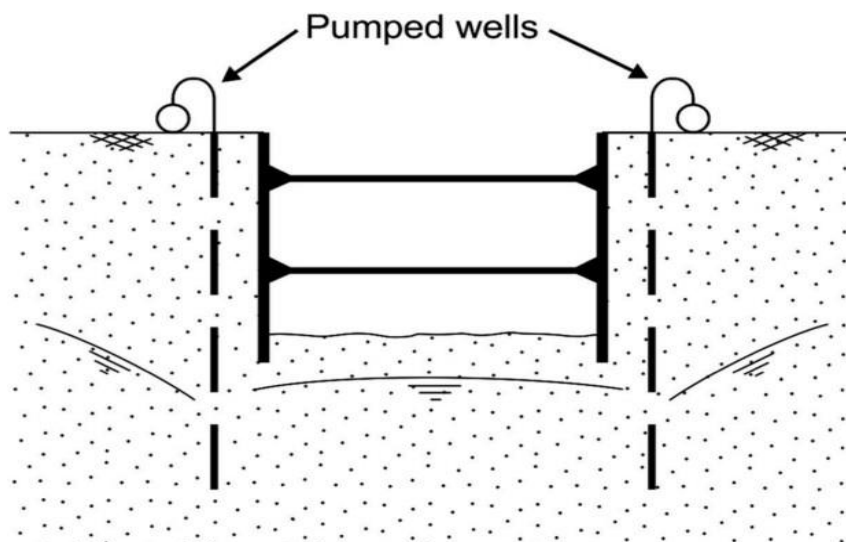
- (i) Η ανοιχτή άντληση, που πραγματοποιείται συνήθως με φρεάτια άντλησης, αναφέρεται σε μια τεχνική όπου τα υπόγεια νερά επιτρέπεται να εισέλθουν στην εκσκαφή και στη συνέχεια απομακρύνονται με τη χρήση αντλιών. Αυτή η τεχνική δεν είναι η βέλτιστη καθώς μπορεί να προκαλέσει προβλήματα αστάθειας λόγω της παροχής νερού προς την εκσκαφή. Ωστόσο, μπορεί να είναι αποδεκτή εάν δεν απομακρύνονται τα λεπτόκοκκα υλικά από τα πρानή και τη βάση της εκσκαφής. Αν και απλή στην εφαρμογή της, έχει το μειονέκτημα ότι τα επίπεδα των υπόγειων υδάτων δεν μπορούν

να μειωθούν πριν από την εκσκαφή. (Σχήμα 2-3)

- (ii) Οι μέθοδοι προ-αποστράγγισης ακολουθούν αντίθετη προσέγγιση της χρήσης των φρεάτων άντλησης για τη μείωση της στάθμης των υπόγειων υδάτων πριν από τις εργασίες εκσκαφής. Συγκεκριμένα, οι γεωτρήσεις άντλησης τοποθετούνται εκτός της περιοχής εκσκαφής και σχηματίζουν ένα δακτύλιο γύρω από την εκσκαφή ή παράλληλα με μεγάλες τάφρους εκσκαφής. Με αυτή την μέθοδο το υπόγειο νερό αντλείται προς τα φρεάτια και όχι προς την εκσκαφή, αποφεύγοντας την εισροή υδάτων στην περιοχή από διαρροές που μπορούν να προκαλέσουν προβλήματα αστάθειας. Αυτή η μέθοδος περιλαμβάνει τεχνικές όπως η άντληση υπογείου νερού μέσω σωληνωτών φρεάτων, βαθιών γεωτρήσεων και εκτοξευτήρων. (Σχήμα 2-4)



Σχήμα 2-3: Μέθοδοι ελέγχου υπογείου νερού με ανοιχτή άντληση (Cashman & Preece, 2021)

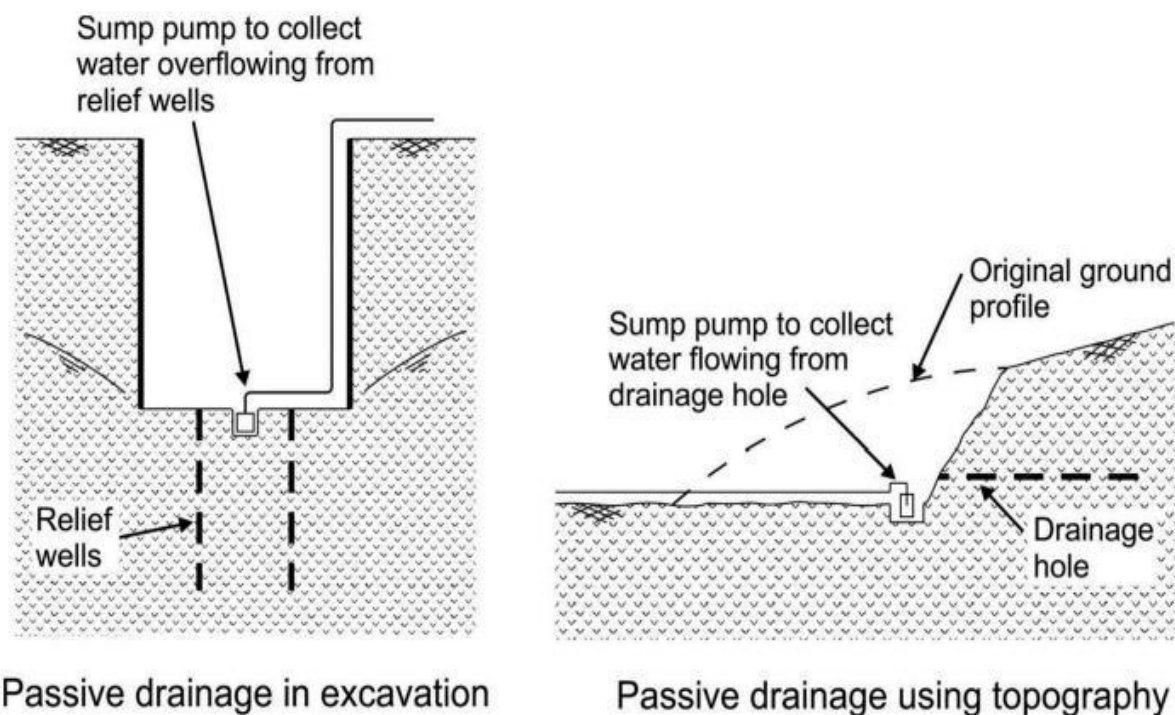


Σχήμα 2-4: Μέθοδοι ελέγχου του υπογείου νερού με τη μέθοδο της προ-αποστράγγισης (Cashman & Preece, 2021)

2.3.3. Μέθοδοι Παθητικής Αποστράγγισης

Οι μέθοδοι ανοιχτής άντλησης και προ- αποστράγγισης που αναφέρθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια ανήκουν στις ενεργές μεθόδους άντλησης. Μια εναλλακτική προσέγγιση στη διαχείριση των υπόγειων υδάτων αποτελούν οι μέθοδοι παθητικής αποστράγγισης. Κατά την διάρκεια εφαρμογής αυτής της μεθόδου τα υπόγεια νερά αντί να αντλούνται από την περιοχή εκσκαφής, κατευθύνονται προς μια συγκεκριμένη κατεύθυνση με την χρήση φυσικών μέσων. Η ουσία της παθητικής αποστράγγισης είναι η δημιουργία ενός φυσικού καναλιού που

επιτρέπει στο νερό να ρέει προς την επιφάνεια ή προς ένα συγκεκριμένο σημείο αποστράγγισης, χωρίς την ανάγκη για ενεργητική άντληση. Με αυτόν τον τρόπο, μπορεί να ελαχιστοποιηθεί η χρήση ενέργειας και να μειωθεί η επίπτωση στο περιβάλλον. Οι μέθοδοι παθητικής αποστράγγισης περιλαμβάνουν τη χρήση φρεάτων εκτόνωσης ή υπό-οριζόντιων αποστραγγιστικών τάφρων, τα οποία επιτρέπουν στο νερό να συλλέγεται και να αφαιρείται από το έδαφος με φυσικό τρόπο. Αυτές οι μέθοδοι μπορούν να είναι αποτελεσματικές σε ορισμένες περιπτώσεις και μπορούν να μειώσουν το κόστος και την επίπτωση στο περιβάλλον σε σχέση με τις ενεργητικές μεθόδους. (Σχήμα 2-5)



Σχήμα 2-5: Παθητική αποστράγγιση εκσκαφής με έμμεσες αντλήσεις ή διαμόρφωση του πρανούς της εκσκαφής. (Cashman & Preeene, 2021)

Υπάρχουν διάφορες τεχνικές ελέγχου του υπόγειου νερού κατά την κατασκευή ενός υπόγειου έργου. Για την επιλογή των κατάλληλων τεχνικών χρειάζεται η αξιολόγηση των τοπικών συνθηκών, όπως η λιθολογία και η υδροπερατότητα του εδαφικού ή του βραχώδους σχηματισμού, αποτελούν βασικούς παράγοντες για την επιλογή των τεχνολογιών, τεχνικών και μεθοδολογιών ελέγχου των υπόγειων νερών. Εξίσου σημαντικοί παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την επιλογή της βέλτιστης μεθόδου είναι η έκταση της περιοχής που απαιτείται να αποστραγγιστεί, το βάθος της εκσκαφής και ο υποβιβασμός της στάθμης του υπογείου νερού και η γειτνίαση με υπάρχουσες κατασκευές και το είδος θεμελίωσής τους. Ο συνδυασμός αυτών των παραγόντων και η ανάλυσή τους είναι θεμελιώδεις για την ανάπτυξη μιας αποτελεσματικής στρατηγικής ελέγχου των υπόγειων νερών σε κάθε συγκεκριμένη κατασκευή. (Cashman & Preeene, 2021)

2.4. Επιφανειακά ύδατα

Προκειμένου να μεγιστοποιηθεί η αποδοτικότητα των εργασιών εντός της περιοχής εργασίας σκοπός είναι πέρα από την απομάκρυνση των υπόγειων νερών, να πραγματοποιείται και σωστή διαχείριση των επιφανειακών νερών. Η σωστή διαχείριση των υπογείων νερών προϋποθέτει την εξέταση όλων των υδρολογικών ζωνών, τόσο δηλαδή της ακόρεστης και κορεσμένης ζώνης, όσο και της επιφανειακής υδρολογίας. Για τον αποτελεσματικό έλεγχο των επιφανειακών νερών πρέπει να ελέγχεται η πηγή της επιφανειακής απορροής, να συλλέγεται τον επιφανειακό νερό και τέλος να επεξεργάζεται. Ο βασικός κανόνας για τον έλεγχο των πηγών είναι η αντιμετώπιση των επιφανειακών υδάτων πριν αυτά αποτελέσουν πρόβλημα για τις εργασίες. Ουσιαστικά σκοπός είναι ο έλεγχος της επιφανειακής απορροής πριν ακόμα εισέλθει το νερό στο εργοτάξιο. Σε περίπτωση που το νερό εισέλθει στο εργοτάξιο και ρέει μέσα σε αυτό, υπάρχει περίπτωση εξαιτίας του φορτίου του σε λεπτά σωματίδια, να φράξει αποχετεύσεις και τάφρους, αλλά και να προκαλέσει ρύπανση του υδάτινου αποδέκτη. (Cashman & Preene, 2021)

Για την αποτροπή της εισροής επιφανειακών υδάτων στην περιοχή κατασκευής, το σύστημα αποχέτευσης πρέπει να περιλαμβάνει κατάλληλα μέτρα για τη συλλογή και την ανακατεύθυνση των επιφανειακών ροών από τις ανάντη περιοχές που περιβάλλουν την εκσκαφή. Αυτή η προσέγγιση απαιτεί την εγκατάσταση επαρκών συστημάτων αποχέτευσης που είναι είτε προς υψηλότερα σημεία τοπογραφικά, είτε ανάντη της εκσκαφής στο επίπεδο του εδάφους. Ειδικά σε περιοχές με σημαντική τοπογραφική κλίση, πρέπει να ληφθούν απλά μέτρα, όπως η εγκατάσταση τάφρων συλλογής στα υψηλότερα σημεία. Τα αποχετευτικά συστήματα θα πρέπει να οδηγούν το νερό σε συγκεκριμένα σημεία εκροής, όπου θα μπορεί να απομακρύνεται αποτελεσματικά. Αυτά τα σημεία εκροής συνήθως είναι σχεδιασμένα για να είναι χαμηλά στην τοπογραφία και να διαθέτουν φρέατια άντλησης. Τα φρέατα αντλούν το νερό από τα σημεία εκροής και το απομακρύνουν μέσω δικτύου αγωγών προς κατάλληλα διαμορφωμένα σημεία κατάντη, όπου μπορεί να εκτιμηθεί η απόλυτη απομάκρυνση του νερού από το εργοτάξιο, με τη διασφάλιση της αποφυγής πιθανών ζημιών ή επιπτώσεων στο περιβάλλον. (Cashman & Preene, 2021)

Το νερό που συλλέγεται από τα συστήματα αποστράγγισης που υπάρχουν εντός των εργοταξίων είναι εμπλουτισμένα σε αιωρούμενα σωματίδια. Για τον λόγο αυτό η επεξεργασία του νερού που συλλέγεται σε συστήματα αποστράγγισης επιφανειακών νερών πριν από τη διάθεσή του σε υδάτινους αποδέκτες είναι σημαντική για τη μείωση των αιωρούμενων στερεών σε αποδεκτά επίπεδα. Αυτή η επεξεργασία μπορεί να περιλαμβάνει διάφορες τεχνολογίες, ανάλογα με το επίπεδο και τον τύπο της ρύπανσης. Αυτές οι τεχνολογίες μπορεί να είναι από απλές λεκάνες καθίζησης των στερεών σωματιδίων έως αποκεντρωμένες τεχνολογίες επεξεργασίας. (Cashman & Preene, 2021)

3. ΜΕΘΟΔΟΣ ΑΠΟΣΤΡΑΓΓΙΣΗΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΦΡΕΑΤΩΝ ΑΝΤΛΗΣΗΣ

Η αποτελεσματική χρήση φρεάτων άντλησης για τη διαχείριση υπογείων νερών σε εκσκαφές, είτε σε κατασκευαστικά έργα είτε σε μεταλλευτικές δραστηριότητες, πρέπει να πληροί ορισμένες βασικές προϋποθέσεις. Καταρχάς, το φρέαρ πρέπει να τοποθετείται σε ασφαλές βάθος, εξασφαλίζοντας ότι βρίσκεται κάτω από το επίπεδο της εκσκαφής και των στραγγιστηριών των επιφανειακών νερών. Επίσης, το μέγεθος του φρέατος πρέπει να είναι επαρκές για να φιλοξενήσει το αντλητικό σύστημα, ενώ πρέπει να είναι επίσης σταθερό ή να παρέχει μέσα για σταθεροποίηση. Εάν η εκσκαφή είναι βαθιά, μπορεί να απαιτηθεί εκβάθυνση του φρέατος κατά τη διάρκεια της εξέλιξής της. Επιπλέον, η άντληση πρέπει να πραγματοποιείται με σταθερό ρυθμό και το μέγεθος του φρέατος να μην παρεμποδίζει τις εργασίες εντός της εκσκαφής.

Η χρήση φρεάτων άντλησης είναι μια απλή και διαδεδομένη μέθοδος αντιμετώπισης προβλημάτων υπόγειων νερών στις κατασκευές. Παρόλο που μπορεί να είναι αποτελεσματική στη διασφάλιση των εργασιών κάτω από το επίπεδο του υπογείου νερού, απαιτεί προσεκτικό σχεδιασμό για να αποφευχθούν πιθανά προβλήματα. Η βασική φιλοσοφία της μεθόδου είναι η διήθηση του υπογείου νερού προς το εσωτερικό της εκσκαφής και η συλλογή του σε εγκιβωτισμένους θαλάμους για άντληση και διάθεση.

Οι κύριοι στόχοι των φρεάτων άντλησης είναι:

- Η συλλογή επιφανειακών νερών: Τα φρέατα άντλησης συλλέγουν τα επιφανειακά νερά μέσω αυλακώσεων ή καναλιών και τα διατίθενται σε συγκεκριμένα σημεία.
- Η άντληση υπόγειων νερών: Οι αντλήσεις μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για τον υποβιβασμό της στάθμης του υπογείου νερού σε εκσκαφές μικρού βάθους.

Παρόλο που είναι μια αποδοτική μέθοδος, πρέπει να ληφθούν υπόψη οι πιθανές επιπτώσεις, όπως η αστάθεια του εδάφους ή η ρύπανση του υπογείου νερού, και να ληφθούν κατάλληλα μέτρα πρόληψης και διαχείρισης.

Η χρήση φρεάτων άντλησης αποτελεί αποδοτική και οικονομικά προσιτή μέθοδο για τον υποβιβασμό της στάθμης του υδροφορέα σε εδάφη με καλή διαβάθμιση ή σε βραχώδεις σχηματισμούς. Ωστόσο, η ανοικτή άντληση μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα λόγω της κίνησης του νερού και της απόδρασής του εκτός της εκσκαφής. Ένα από τα κύρια προβλήματα είναι η απόπλυση λεπτόκοκκων υλικών λόγω της ροής του νερού μέσα από το πορώδες υλικό. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε καταστάσεις μετακίνησης εδάφους ή καθιζήσεων και να προκαλέσει τη δημιουργία και την κατάρρευση υπεδαφικών κενών. Επίσης, η ανεξέλεγκτη διάθεση νερού με στερεά σωματίδια μπορεί να προκαλέσει περιβαλλοντικά προβλήματα. Για να αντιμετωπιστούν αυτά τα προβλήματα, είναι σημαντικό να ληφθούν κατάλληλα μέτρα πρόληψης και διαχείρισης, όπως η χρήση φίλτρων για την παρεμπόδιση της απόδρασης λεπτόκοκκων υλικών ή ελέγχου της ροής του νερού για τη μείωση της απόπλυσης εδάφους. Επίσης, πρέπει να λαμβάνονται μέτρα για την αποτελεσματική διαχείριση και επεξεργασία των στερεών σωματιδίων πριν από τη διάθεσή τους στο περιβάλλον.

Η ταξινόμηση για τα εδάφη όπου μπορούν να προκληθούν προβλήματα με την κίνηση των λεπτόκοκκων υλικών περιλαμβάνει τα ακόλουθα είδη εδαφών:

- Καλά διαβαθμισμένες λεπτόκοκκες άμμοι
- Μαλακές και χαλαρές ιλύες και άργιλοι
- Μαλακοί και αποσαθρωμένοι βραχώδεις σχηματισμοί όπου οι διακλάσεις μπορούν να

- διευρυνθούν λόγω της υπόγειας ροής (κίνηση νερού με μεγάλες ταχύτητες)
- Βραχώδεις σχηματισμοί των οποίων οι διακλάσεις είναι πληρωμένες με ιλύες, άμμους ή αργίλους
- Ψαμμίτες που μπορούν να υποστούν αποσάθρωση

Αυτά τα είδη εδαφών είναι επιρρεπή σε προβλήματα λόγω της κίνησης των λεπτόκοκκων υλικών και απαιτούν προσεκτική διαχείριση κατά την εκτέλεση κατασκευαστικών έργων ή εργασιών σε αυτά τα περιβάλλοντα. (Cashman & Preene, 2021)

3.1. Σωληνωτά φρέατα

Σε κατασκευές μικρού και μεσαίου βάθους, η χρήση σωληνωτών φρεάτων (well points) αποτελεί την πιο ευρέως διαδεδομένη μέθοδο. (Cashman & Preene, 2021) Η τεχνική των σωληνωτών φρεάτων είναι η παλαιότερη μέθοδος άντλησης, η οποία χρονολογείται από τις αρχές της δεκαετίας του 1920. Αυτή αποτελείται από ένα σύστημα αποστράγγισης που χρησιμοποιείται ευρέως σε εργοτάξια για τη μείωση του υπόγειου νερού και τη διατήρηση ξηρών συνθηκών στον χώρο εργασίας. (Powers, 2007) Ένα σύστημα well points μπορεί να εγκατασταθεί και να μπει σε λειτουργία πολύ γρήγορα, ενώ σε επίπεδο τεχνογνωσίας η εγκατάσταση και η λειτουργία του συστήματος μπορεί να πραγματοποιηθεί εύκολα. (Cashman & Preene, 2021)

Αποτελείται από διάφορα εξαρτήματα και εξυπηρετεί τρεις βασικές λειτουργίες: την άντληση αέρα, την άντληση νερού και τον διαχωρισμό του αέρα από το νερό. Στην πράξη, το σύστημα wellpoint χρησιμοποιείται για να διατηρεί το εργοτάξιο στεγνό, επιτρέποντας τις εργασίες κατασκευής και εκσκαφής να προχωρήσουν απρόσκοπτα και με ασφάλεια, αποφεύγοντας παράλληλα ζημιές από το νερό στις κατασκευές και στο έδαφος. (Powers, 2007)

Τα συστήματα wellpoint είναι ευέλικτα και προσαρμόσιμα σε διάφορες συνθήκες εκσκαφής. Η επιλογή του τρόπου εγκατάστασης και της διάταξης των φρεατίων εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως το βάθος και η έκταση της εκσκαφής, η γεωλογική σύνθεση του εδάφους, και οι ειδικές απαιτήσεις του έργου. (Powers, 2007)

Ένα σύστημα σωληνωτών φρεάτων μπορεί να αποτελείται από μερικά φρέατα ή από χιλιάδες με πολλαπλά αντλιοστάσια. Οι κύριοι περιορισμοί των συστημάτων wellpoint είναι (Powers, 2007):

- Ο βάθος άντλησης: Η αποτελεσματικότητα των wellpoints μειώνεται όταν το απαιτούμενο βάθος αφαίρεσης νερού υπερβαίνει τα 4,5 μέτρα περίπου, λόγω των φυσικών περιορισμών στην ικανότητα ανύψωσης μέσω αναρρόφησης.
- Η υδραυλική αγωγιμότητα: Αν και αποτελεσματικά σε εδάφη χαμηλής υδραυλικής αγωγιμότητας, τα συστήματα wellpoint μπορεί να μην είναι το πιο αποδοτικό εργαλείο για εδάφη με υψηλή υδραυλική αγωγιμότητα, όπου άλλες μέθοδοι αφυδάτωσης μπορεί να είναι πιο κατάλληλες.

Το σύστημα των wellpoints τοποθετείται περιμετρικά της εκσκαφής. Έχει τη δυνατότητα να τοποθετηθούν είτε μέσα σε μια εκσκαφή, είτε έξω από αυτή, ανάλογα με το βάθος της εκσκαφής. Επίσης, μπορεί να τοποθετηθεί κατά μήκος μόνο μιας πλευράς σε περίπτωση που η εκσκαφή προορίζεται για τάφρο στην περίπτωση που έχει περιορισμένο πλάτος, το έδαφος παρουσιάζει ομοιογένεια, δεν υπάρχουν εμπόδια στην επιφάνεια ή κοντά στη βάση της εκσκαφής, και η εκσκαφή δεν ξεπερνά τα 4,5 μέτρα σε βάθος. (Powers, 2007)

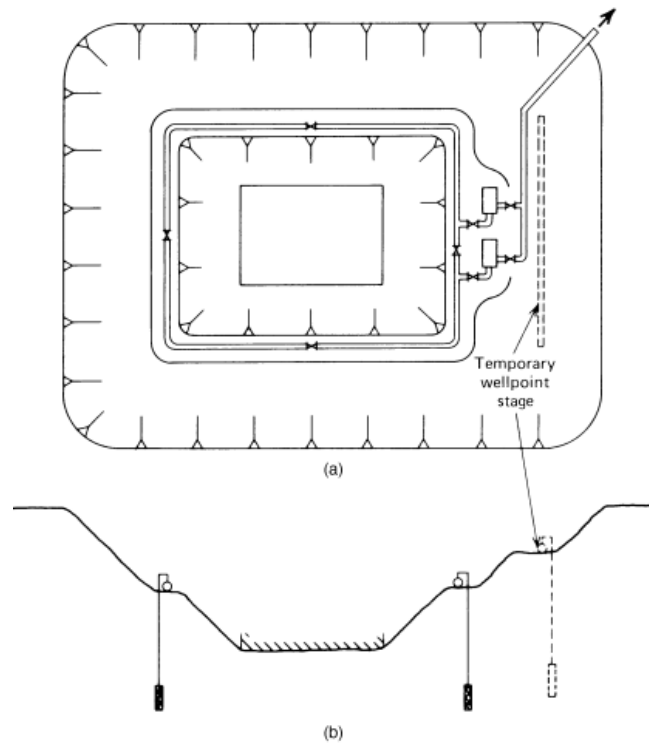
Για μικρού μεγέθους εκσκαφές, με περιορισμένο βάθος, τα σωληνωτά φρέατα θεωρούνται ως η αποτελεσματικότερη μέθοδος. Η βασική διαφορά ανάμεσα στην μέθοδο άντλησης με σωληνωτά φρέατα και στις γεωτρήσεις, αποτελεί η τεχνική διαδικασία άντλησης του υπογείου νερού. Στην μέθοδο άντλησης με σωληνωτό φρέαρ χρησιμοποιείται η αντλία μερικού κενού για την αναρρόφηση του υπογείου νερού μέσω μιας σειράς γεωτρητικών οπών, μικρής διαμέτρου, μέσω ενός κεντρικού αγωγού και παροχετεύεται στην περιοχή διάθεσης. Στα συστήματα βαθιών γεωτρήσεων χρησιμοποιούνται υποβρύχιες αντλίες στο βαθύτερο σημείο για την άντληση του υπογείου νερού. Το νερό που αντλείται και παροχετεύεται στην περιοχή διάθεσης. (Cashman & Preene, 2021)

Όσο αφορά τους περιορισμούς στην χρήση τους, τα σωληνωτά φρέαρ δεν είναι κατάλληλα σε περιπτώσεις που απαιτούν μεγάλες εκσκαφές βάθους μεγαλύτερου από 12-15m. Επιπλέον δεν ενδείκνυται σε περιπτώσεις υπό πίεση υδροφορέων με υψηλό υδραυλικό φορτίο κάτω από το επίπεδο βάσης της εκσκαφής, καθώς αυτό μπορεί να μειωθεί ώστε να διατηρηθεί η ευστάθεια του εδάφους στη βάση της εκσκαφής. Σε τέτοιες περιπτώσεις συνήθως χρησιμοποιείται η συνδυαστική χρήση βαθιών γεωτρήσεων, με γεωτρήσεις εκτόνωσης. (Cashman & Preene, 2021)

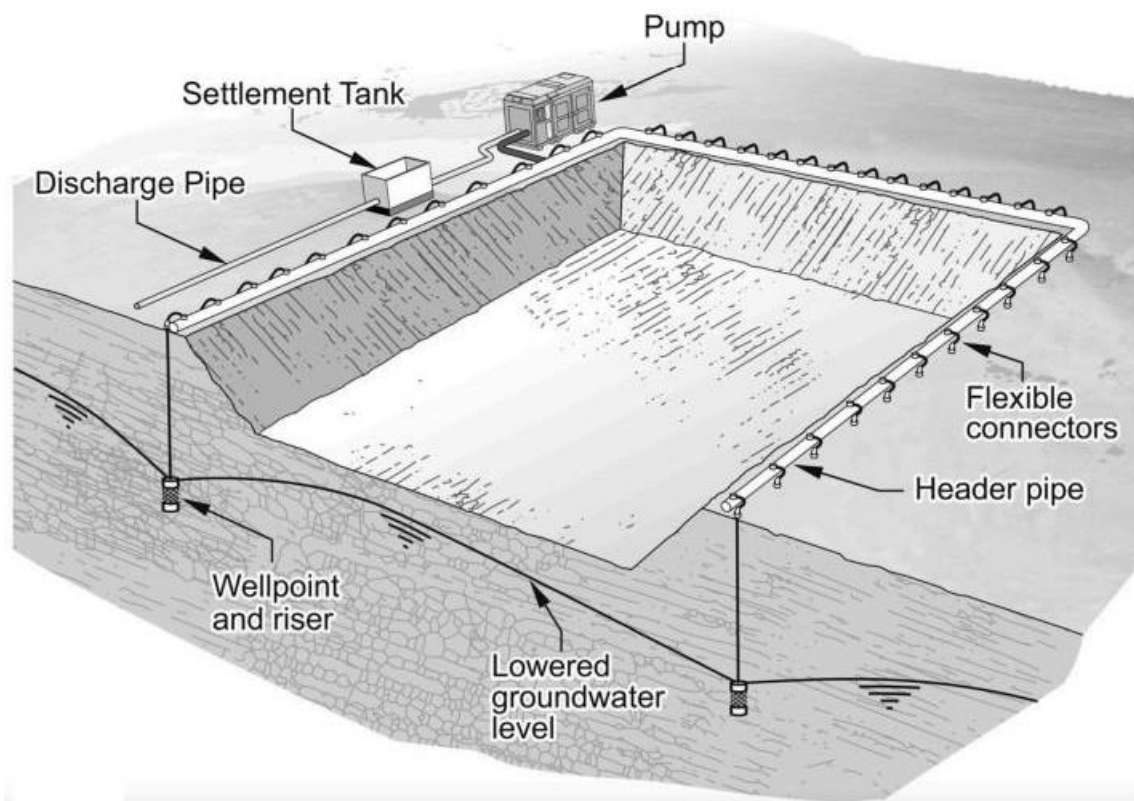
Η τεχνική των wellpoint αποτελεί την πιο συνηθισμένη μέθοδο για την άντληση νερού σε εκσκαφές μεσαίου βάθους, ιδιαίτερα στη δημιουργία τάφρων και σε παρόμοιες κατασκευαστικές εργασίες. Σε κατάλληλες συνθήκες εδάφους, ένα σύστημα wellpoint μπορεί να τοποθετηθεί και να λειτουργήσει γρήγορα. Η τεχνογνωσία που απαιτείται για την εγκατάσταση και την εκμετάλλευση ενός τέτοιου συστήματος δεν είναι περίπλοκη και μπορεί να αποκτηθεί εύκολα. Ωστόσο, η παρουσία έμπειρου προσωπικού για τον σχεδιασμό και την επίβλεψη των εργασιών είναι κρίσιμη, καθώς μπορεί να εντοπίσει και να αντιμετωπίσει οποιαδήποτε απροσδόκητη αλλαγή στις συνθήκες του εδάφους. (Cashman & Preene, 2021)

Η δομή μιας μεθόδου των σωληνωτών φρεάτων αποτελείται από μια συστοιχία γεωτρητικών οπών μικρής διαμέτρου (0,7 έως 1,0m και 40-50mm διάμετρο). Κάθε γεωτρητική οπή συνδέεται με έναν ανυψωτικό σωλήνα μικρότερης διαμέτρου (περίπου 38mm) και στη συνέχεια με τον κεντρικό αγωγό. Όσο αφορά την λειτουργία της μεθόδου, χρησιμοποιείται ένα κατάλληλο αντλητικό σύστημα για την αναρρόφηση του υπογείου νερού μέσω των γεωτρητικών οπών. Το νερό συλλέγεται και παροχετεύεται στην περιοχή διάθεσης. Η εγκατάσταση των σωληνωτών φρεάτων μπορεί να γίνει είτε παράλληλα με την εκσκαφή, είτε περιμετρικά της. Για την αντιστάθμιση του μειωμένου αποτελεσματικού μήκους κάθε φρεατίου, μπορεί να χρειαστεί η τοποθέτηση των σημείων σε πιο κοντινές αποστάσεις. Κάθε σημείο φρεατός συνδέεται τελικά με ένα κεντρικό δίκτυο σωληνώσεων (συνήθως 150 mm διαμέτρου) που δημιουργεί κενό μέσω μιας αντλίας φρεατίου, με τον κεντρικό αγωγό να είναι κατασκευασμένος από υλικό υψηλής αντοχής.

Σημειώνεται ότι η διαδικασία σχεδιασμού του μήκους των γεωτρήσεων πρέπει να είναι προσεκτική, προκειμένου να αποφευχθεί η απόληψη αέρα, καθώς και η διατήρηση της σταθερότητας του εδάφους. Αυτή η μέθοδος αποστράγγισης συνήθως επιλέγεται για εργασίες που απαιτούν γρήγορη εγκατάσταση και χρήση (Σχήμα 3-1 και Σχήμα 3-2). (Cashman & Preene, 2021)



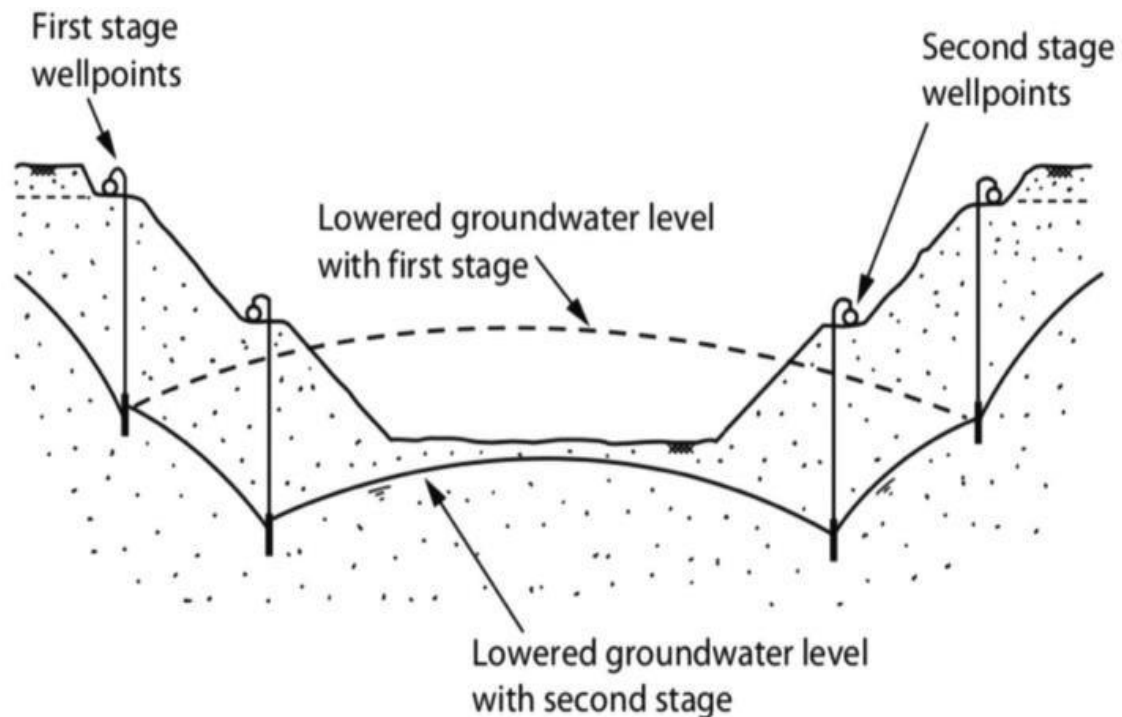
Σχήμα 3-1: Τοπική διάταξη σωληνωτών φρεάτων σε κάτοψη (a) και προφίλ (b) (Powers, 2007)



Σχήμα 3-2: Περιμετρική εγκατάσταση σωληνωτών φρεάτων σε μεγάλη εκσκαφή (Cashman & Preece, 2021)

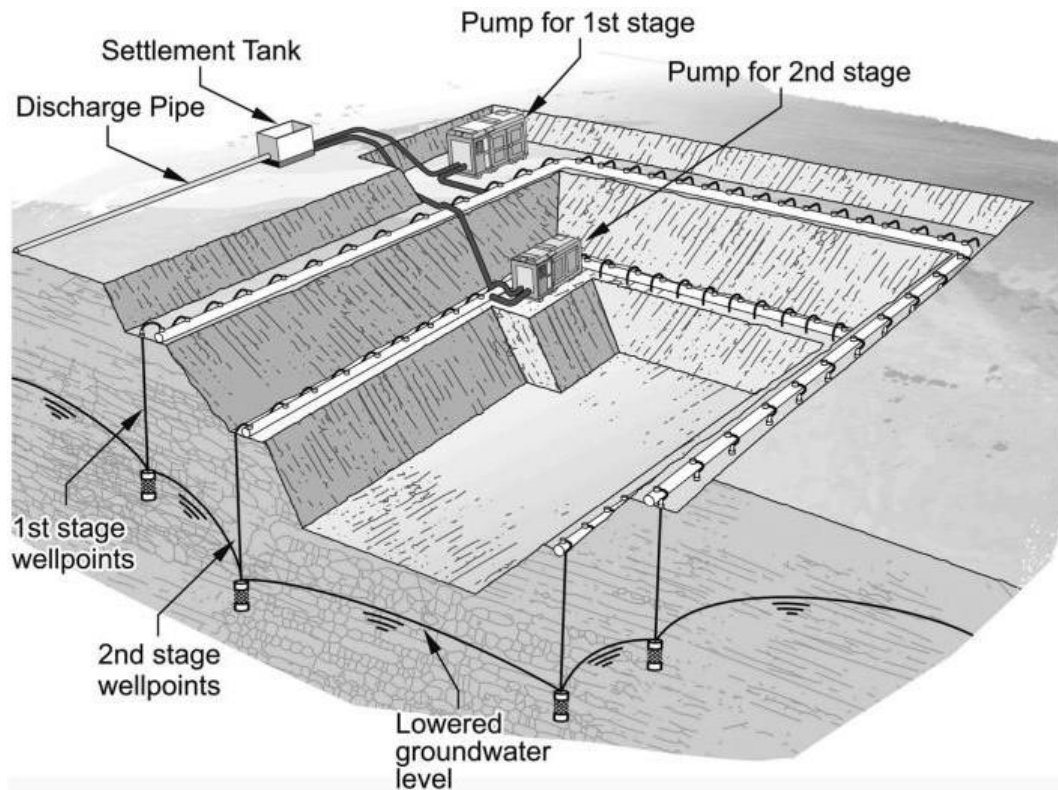
3.2. Σωληνωτά φρέατα πολλαπλών επιπέδων

Μια εναλλακτική μέθοδος θα μπορούσε να θεωρηθεί η εγκατάσταση σωληνωτού φρέατος πολλαπλών επιπέδων σε εκσκαφές που έχουν μεγαλύτερο βάθος και διαστάσεις. Σε αυτή την περίπτωση τα πρηνή οφείλουν να έχουν μια μικρή κλίση και να κατασκευαστούν αναβαθμοί για την τοποθέτηση των κύριων αγωγών στα κατώτερα στάδια (Σχήμα 3-3)



Σχήμα 3-3: Υποβιβασμός της στάθμης του υπογείου νερού σε δύο στάδια (Cashman & Preene, 2001)

Η διαδικασία εγκατάστασης σωληνωτού φρέατος πολλαπλών επιπέδων περιλαμβάνει πραγματοποιείται ως εξής: Αρχικά, γίνεται εκσκαφή μέχρι το επίπεδο της στάθμης ηρεμίας του υπογείου νερού. Σε ορισμένες περιπτώσεις, η εκσκαφή μπορεί να συνεχιστεί και 0,5m περίπου κάτω από αυτό το επίπεδο ηρεμίας. Έπειτα γίνεται η εγκατάσταση του πρώτου επιπέδου του σωληνωτού φρέατος, το οποίο εγκαθίσταται περιμετρικά της εκσκαφής με αποτέλεσμα να δημιουργούνται πρηνή μικρής κλίσης και αναβαθμοί. Στην συνέχεια ξεκινά η συνεχής άντληση σε ολόκληρη την έκταση του πρώτου επιπέδου. Μετά την άντληση πραγματοποιείται η εκσκαφή μέχρι περίπου 0.5m κάτω από το επίπεδο της υποβαθμισμένης στάθμης του υπογείου νερού, όπου και εγκαθίστανται το δεύτερο επίπεδο των σωληνωτών φρεάτων περιμετρικά της εκσκαφής. Η άντληση συνεχίζεται σε ολόκληρη την έκταση του πρώτου και του δεύτερου επιπέδου. Η εκσκαφή συνεχίζεται μέχρι περίπου 0.5m κάτω από το επίπεδο της υποβαθμισμένης στάθμης του υπογείου νερού, και σε αυτά τα δύο στάδια. Η εκσκαφή και η εγκατάσταση του σωληνωτού φρέατος συνεχίζονται σταδιακά και η άντληση συνεχίζεται έως ότου προσεγγιστεί το τελικό βάθος εκσκαφής. Η παραπάνω προσέγγιση εγκατάστασης του σωληνωτού φρέατος πράγματι συνεπάγεται με διακοπές στην εκσκαφή, καθώς η στάθμη του υπογείου νερού υποβαθμίζεται σταδιακά προς το επιθυμητό βάθος. Αυτό σημαίνει ότι σε κάθε στάδιο της διαδικασίας πρέπει να εγκαθίστανται πιεζόμετρα παρατήρησης για την παρακολούθηση της στάθμης του υπογείου νερού και να προγραμματίζεται η περαιτέρω αύξηση του βάθους της εκσκαφής. (Σχήμα 3-4)



Σχήμα 3-4: Εγκατάσταση σωληνωτού φρέατος για τον υποβιβασμό της στάθμης σε δύο στάδια (Cashman & Preene, 2021)

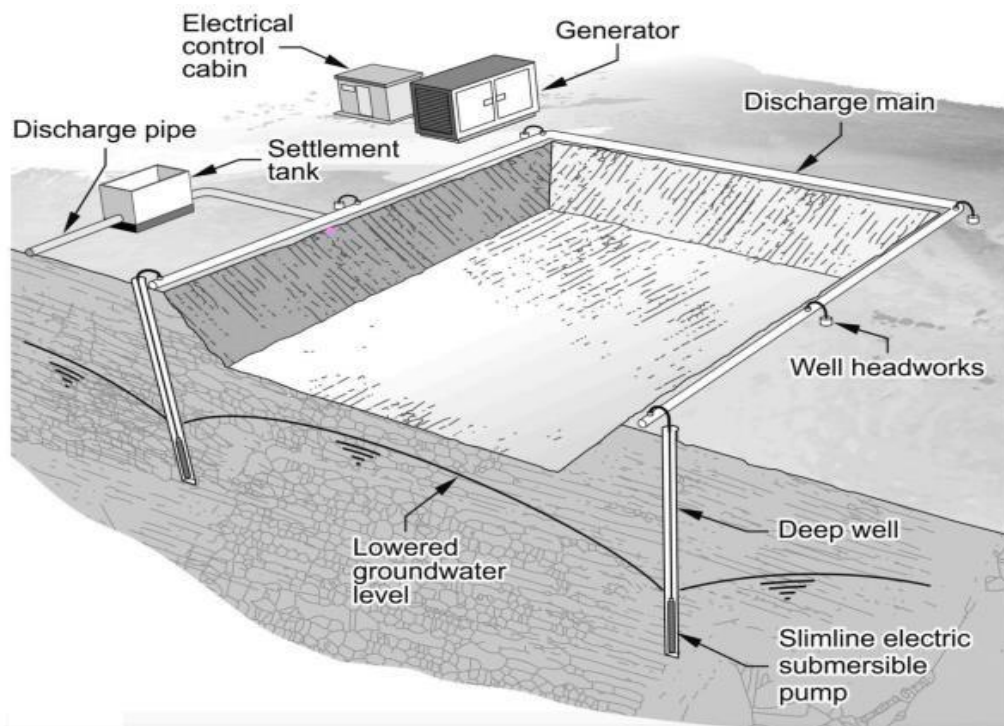
Σε περιπτώσεις πολλαπλών επιπέδων (περισσότερα από δύο επίπεδα), κατά την άντληση του τρίτου επιπέδου, υπάρχει πιθανότητα να μειωθεί η αποτελεσματικότητα του πρώτου επιπέδου και να χρειαστεί να γίνει προσαρμογή του αντλητικού συστήματος. Σε αυτή την περίπτωση το αντλητικό σύστημα του πρώτου επιπέδου θα πρέπει να μεταφερθεί στο τέταρτο επίπεδο (εάν υπάρχει τέτοιο) ή να μεταφερθεί στο τρίτο επίπεδο ως εφεδρικό. Είναι σημαντικό να διατηρηθούν οι κατακόρυφες γεωτρήσεις και οι κυρίως αγωγοί στο πρώτο επίπεδο, καθώς η κατασκευή εξελίσσεται. Αυτό εξασφαλίζει τη σταθερότητα της εκσκαφής και αποτρέπει τον κίνδυνο αιώρησης της κατασκευής λόγω μη ελεγχόμενης ανόδου της στάθμης του υπογείου νερού. Η εγκατάσταση συστημάτων σωληνωτού φρέατος πολλαπλών επιπέδων έχει αποδειχθεί επιτυχημένη σε πολλές βαθιές εκσκαφές και αποτελεί μια οικονομικά αποδοτική μέθοδο. Επιπλέον, η διαδικασία εγκατάστασης απαιτεί λιγότερες εξειδικευμένες γνώσεις σε σύγκριση με τη μέθοδο των βαθιών γεωτρήσεων. (Cashman & Preene, 2021)

3.3. Βαθιές γεωτρήσεις

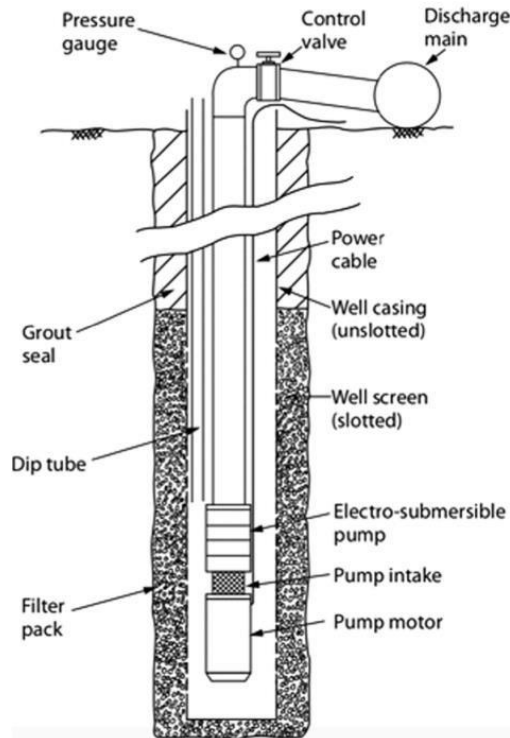
Ένα σύστημα βαθιών γεωτρήσεων (deep wells) χρησιμοποιεί συνήθως μια σειρά γεωτρήσεων, όπου το νερό απομακρύνεται με υποβρύχιες αντλίες που τοποθετούνται στον κατώτερο σημείο της γεωτρητικής οπής. Τα συστήματα βαθιών γεωτρήσεων λειτουργούν ως συνεργαζόμενες συστοιχίες γεωτρήσεων, όπου κάθε γεώτρηση δημιουργεί έναν κώνο πτώσης στάθμης γύρω της, που μπορεί να φτάσει ακόμα και σε αποστάσεις πολλών εκατοντάδων μέτρων σε υδροφόρους σχηματισμούς με μεγάλη υδραυλική αγωγιμότητα.. Σε αυτά τα συστήματα, οι γεωτρήσεις λειτουργούν ως μέρη ενός συνόλου, όπου η επιτυχία του υποβιβασμού της στάθμης οφείλεται στη σύνδεση μεταξύ των κώνων πτώσης στάθμης. Τα συστήματα αποστράγγισης με βαθιές γεωτρήσεις είναι αποτελεσματικά τόσο σε μεγάλες εκσκαφές με σημαντικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά όσο και σε μικρότερες εκσκαφές με μικρότερο βάθος και εμβαδόν. (Cashman & Preene, 2021)

Τα βαθιά φρεάτια εγκαθίστανται συνήθως έξω από τον χώρο της εκσκαφής, αλλά μπορούν επίσης να τοποθετηθούν μέσα στα όρια μιας εκσκαφής, εάν οι ειδικές γεωλογικές συνθήκες το δικαιολογούν, η εκσκαφή είναι εξαιρετικά μεγάλη, ή η πρόσβαση γύρω από την περίμετρο της εκσκαφής είναι περιορισμένη. (Powers, 2007)

Τα βασικά στοιχεία ενός συστήματος βαθιών γεωτρήσεων (Σχήμα 3-5, Σχήμα 3-6) στηρίζονται στην διάμετρο των φίλτρων και των στελεχών, τα οποία πρέπει να έχουν 150-300mm διάμετρο και να είναι κατασκευασμένα από πλαστικό. Η διάμετρος της γεωτρητικής οπής πρέπει να κυμαίνεται περίπου μεταξύ 250 mm έως 450 mm. Όσο αφορά το βάθος της γεώτρησης αυτό μπορεί να κυμαίνεται από 10m έως 50m ανάλογα με την εκσκαφή. Τέλος σε περιπτώσεις όπου υπάρχει κοκκώδης υδροφορέας ή αποσαθρωμένο βραχώδη σχηματισμός, απαιτείται εγκατάσταση διάτρητου φίλτρου και χαλκικόφιλτρου. Εάν η διάτρηση αφορά σε σκληρό και διαρρηγμένο πέτρωμα, το άνω τμήμα της γεώτρησης μπορεί να χρησιμοποιηθεί με κλειστό στέλεχος, ενώ το κατώτερο τμήμα μπορεί να παραμείνει ανοικτό χωρίς την ανάγκη για διάτρητο ή χαλκικόφιλτρο.



Σχήμα 3-5: Σύστημα βαθιών γεωτρήσεων περιμετρικά εκσκαφής μεγάλου μεγέθους. (Cashman & Preene, 2001)



Σχήμα 3-6: Τμήματα βαθιάς γεώτρησης (Cashman & Preene, 2001)

Η κύρια διαφορά μεταξύ των σωληνωτών φρεάτων και των βαθιών γεωτρήσεων είναι ότι στις βαθιές γεωτρήσεις οι μόνοι περιορισμοί για τον υποβιβασμό της στάθμης του υπογείου νερού είναι το βάθος της γεώτρησης και η στρωματογραφία του υδροφόρου συστήματος. Ο σημαντικότερος παράγοντας είναι πιθανόν η ισχύς του αντλητικού συστήματος, η οποία πρέπει να είναι ικανή να ανταπεξέλθει στο ρυθμό ταπείνωσης της στάθμης του υδροφορέα και στις διαστάσεις της γεώτρησης. Παρόλο που η χρήση των βαθιών γεωτρήσεων μπορεί να συνεπάγεται αυξημένο ενεργειακό κόστος, αυτό ενδέχεται να αντισταθμίζεται στο τέλος λόγω της μεγαλύτερης απόδοσης του συστήματος. Τα εξαρτήματα της γεώτρησης σε ένα τέτοιο σύστημα είναι παρόμοια με εκείνα μιας υδρευτικής γεώτρησης, με τη διαφορά ότι κατασκευάζονται συνήθως από φθηνότερα υλικά λόγω του προσωρινού χαρακτήρα τους. Το σύστημα αποστράγγισης με βαθιές γεωτρήσεις απαιτεί επίσης υψηλό κόστος σχεδιασμού και εγκατάστασης, καθώς και προσεκτική επιτήρηση κατά τη διαδικασία κατασκευής.

Τα τρία βασικά χαρακτηριστικά που λαμβάνονται υπόψη στον σχεδιασμό μιας υδρογεώτρησης είναι το βάθος της διάτρησης και το μήκος των διάτρητων στελεχών, η διάμετρος των κλειστών και διάτρητων στελεχών και το είδος του χαλκίκοφίλτρου.

Στην πράξη, ο σχεδιασμός των γεωτρήσεων γίνεται με βάση τον σχεδιασμό του συστήματος υποβιβασμού της στάθμης του υπογείου νερού. Αυτός ο σχεδιασμός λαμβάνει υπόψη την απαιτούμενη παροχή νερού και το ρυθμό πτώσης της στάθμης του υδροφορέα κατά την άντληση.

Το σύστημα των βαθιών γεωτρήσεων συνήθως πρέπει να εξασφαλίζει τα παρακάτω:

- Επίτευξη του επιθυμητού υποβιβασμού της στάθμης του υπογείου νερού, λαμβάνοντας υπόψη την προσδιορισμένη παροχή νερού και τη συνολική λειτουργία όλων των μονάδων γεώτρησης.
- Διάτρηση του πάχους του υδροφόρου στρώματος, για το οποίο απαιτείται η μείωση της υδραυλικής πίεσης του υπογείου νερού και η μείωση της στάθμης του.

Συνήθως, υπάρχουν κατευθυντήριες οδηγίες για τον υπολογισμό του βάθους των γεωτρήσεων,

οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ενδεικτικές τιμές. Για παράδειγμα, εάν το πάχος του υδροφορέα είναι πολύ μεγαλύτερο από το βάθος των γεωτρήσεων, το βάθος αυτών των γεωτρήσεων πρέπει να είναι μεταξύ 1,5 και 2 φορές το βάθος της εκσκαφής. Η ύπαρξη γεωτρήσεων με μικρότερο βάθος από αυτό μπορεί να μην είναι αποτελεσματική για την αποστράγγιση της περιοχής, εκτός αν τοποθετηθούν κοντά μεταξύ τους για να προσομοιώσουν τα χαρακτηριστικά ενός σωληνωτού φρέατος. Επιπλέον οι τοπικές υδρογεωλογικές συνθήκες παίζουν σημαντικό ρόλο. Σε περιοχές με λεπτό υδροφόρο στρώμα, μπορεί να απαιτηθεί η χρήση επιπλέον γεωτρήσεων εξαιτίας του περιορισμένου μήκους των διάτρητων φίλτρων λόγω του περιορισμένου πάχους του υδροφορέα. Σε περιπτώσεις όπου το υδροφόρο στρώμα είναι υπερβολικά υδροπερατό, μπορεί να απαιτηθεί η επέκταση των γεωτρήσεων σε αυτό το στρώμα, προκειμένου να ενεργοποιηθούν οι διεργασίες διαρροής από τα υψηλότερα στρώματα προς τα κάτω. Συνήθως, προτείνεται η εγκατάσταση εφεδρικών γεωτρήσεων, όχι μόνο για την ενδεχόμενη αύξηση του ρυθμού υποβιβασμού της στάθμης του υπογείου νερού, αλλά και για την αντιμετώπιση προβλημάτων σε περίπτωση διακοπής λειτουργίας κάποιων από τις γεωτρήσεις του συστήματος. Συνήθως, η διάμετρος της γεωτρητικής οπής καθορίζεται με βάση τις ανάγκες του υποβρύχιου αντλητικού συστήματος και την απαιτούμενη χρήση του χαλικόφιλτρου. Ωστόσο, σε περιπτώσεις όπου η γεώτρηση πραγματοποιείται σε απομακρυσμένες περιοχές ή με περιορισμένο εξοπλισμό, η διαδικασία αντιστρέφεται. Αρχικά, καθορίζεται η διάμετρος της γεώτρησης με βάση το διαθέσιμο γεωτρώπανο και στη συνέχεια επιλέγεται ο τύπος της αντλίας που θα χρησιμοποιηθεί. Το πρώτο βήμα είναι να προσδιοριστεί το απαιτούμενο μέγεθος της υποβρύχιας αντλίας που θα τοποθετηθεί στη στήλη της γεώτρησης. Η επιλογή της αντλίας πρέπει να γίνει με βάση την υπολογισμένη παροχή, η οποία θα πρέπει να υπερβαίνει τις ανάγκες για σταθερή ροή κατά 110-150%. (Cashman & Preene, 2021)

4. ΓΕΩΜΟΡΦΟΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ

Η περιοχή μελέτης που θα αναλυθεί στα επόμενα κεφάλαια είναι το λεκανοπέδιο Αττικής και πιο συγκεκριμένα η τοποθεσία όπου βρίσκεται η Εθνική Πινακοθήκη. Η περιοχή αυτή υπάγεται στην Περιφερειακή ενότητα Αττικής. Η Περιφέρεια Αττικής έχει έκταση 3.808 km², το οποίο αντιστοιχεί στο 2,9% της συνολικής έκτασης της χώρας. Γεωγραφικά τοποθετείται στο νοτιοανατολικό τμήμα της Στερεάς Ελλάδας και έχει έδρα την Αθήνα, η οποία είναι και η πρωτεύουσα της Ελλάδας. Η Αττική είναι ως προς το σχήμα της μια τριγωνική χερσόνησος που εισέρχεται στο Αιγαίο Πέλαγος. Στα βόρεια χωρίζεται από την Βοιωτία από την οροσειρά του Κιθαιρώνα (16km μήκος), στα δυτικά βρέχεται από το Αιγαίο, στα νότια βρίσκεται ο Σαρωνικός κόλπος και προς τον βορρά η Εύβοια. Το ανάγλυφο της αποτελείται από βουνά (με κυριότερα την Πεντέλη, τον Υμηττό και την Πάρνηθα), από λόφους, πεδιάδες, ποτάμια (Ασωπό, Κηφισό, Ιλισό), χειμάρρους, λίμνες (λίμνη Μαραθώνα), υγροτόπους και πολυσιχιδείς ακτές. Το ημιορεινό τμήμα της Αττικής αποτελεί το 60% του ανάγλυφου της, ενώ το πεδινό και το ορεινό αντιστοιχούν στο 30% και 10% αντίστοιχα.. (INSETE, 2019)



Εικόνα 4-1: Χάρτης γεωγραφικής θέσης της περιοχής μελέτης

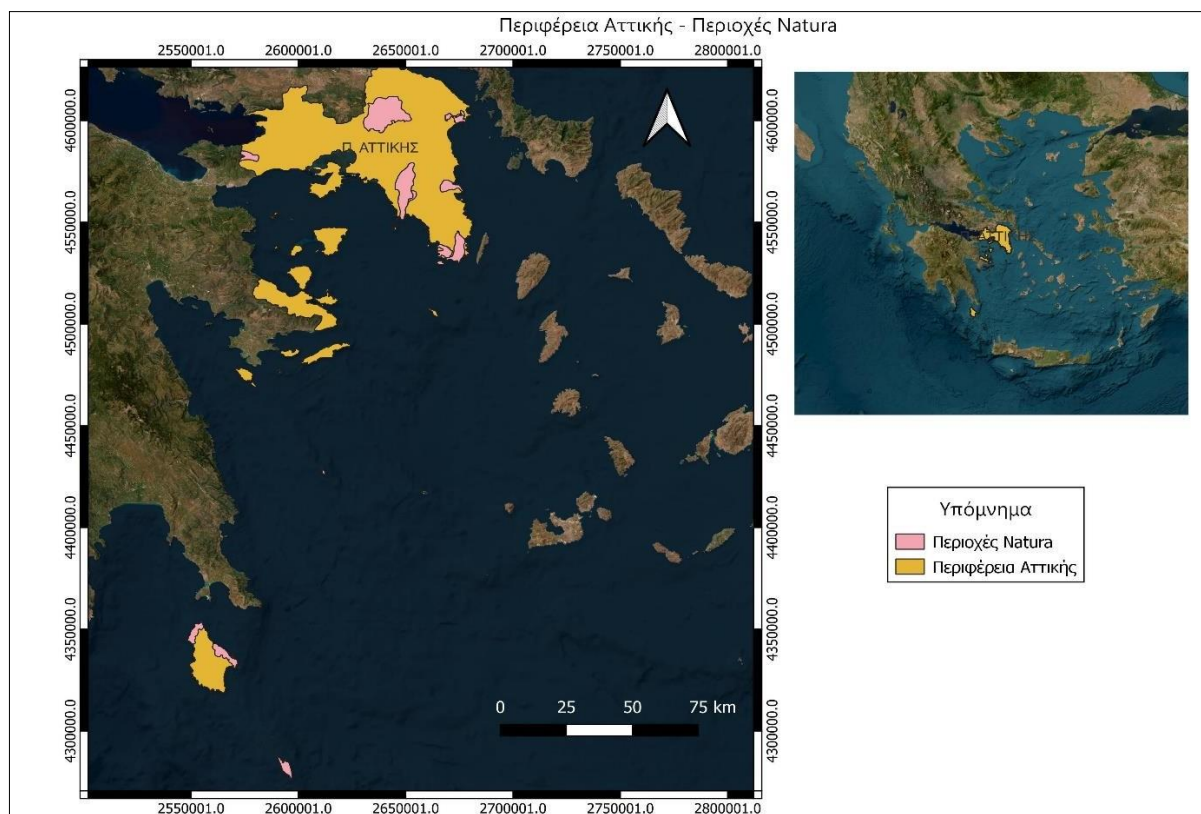
Η Αττική χαρακτηρίζεται από εύκρατο, μεσογειακό κλίμα, το οποίο είναι γενικά ήπιο το μεγαλύτερο μέρος του χρόνου, αν και εμφανίζει μεγάλες διακυμάνσεις της θερμοκρασίας μεταξύ καλοκαιριού και χειμώνα. Όσο αφορά το φυσικό της περιβάλλον, αυτό παρουσιάζει μεγάλη βιοποικιλότητα με πολλά απειλούμενα είδη πανίδας και χλωρίδας, αλλά και περιοχές που έχουν χαρακτηριστεί ως οικότοποι προτεραιότητας από την Ευρωπαϊκή νομοθεσία. Όλα τα παραπάνω στοιχεία συνιστούν το «Αττικό Τοπίο». Με βάση λοιπόν την υφιστάμενη νομοθεσία ως προστατευόμενες περιοχές κρίνονται οι εξής:

- Εθνικό πάρκο Σχοινιά-Μαραθώνα (ΦΕΚ 395/Δ/3700)
- Ορεινός Όγκος Πάρνηθας (ΦΕΚ 336/Δ/24-07-2007)
- Όρος Υμηττός (ΦΕΚ 187/Δ/16-09-2011)

- 24 Παραδοσιακοί Οικισμοί

Επίσης, ιδιαίτερη αναφορά θα πρέπει να γίνει για τον υδροβιότοπο του Βουρκαρίου Μεγάρων και τον υδροβιότοπο Αλυκής στα Μεσόγεια, τα οποία αποτελούν καταφύγιο για εκατοντάδες ζώα, κυρίως μεταναστευτικά ή ενδημικά πτηνά.(INSETE, 2019)

Στον παρακάτω χάρτη απεικονίζονται οι περιοχές Natura2000 της περιφέρειας Αττικής.



Εικόνα 4-2: Χάρτης Περιοχών Natura2000 της Περιφέρειας Αττικής

4.1. Γεωμορφολογία λεκανοπεδίου Αττικής

Το λεκανοπέδιο της Αττικής περιβάλλεται από ημιορεινές - ορεινές περιοχές με το νότιο-νοτιοδυτικό τμήμα του να είναι ανοιχτό προς τον Σαρωνικό κόλπο. Δυτικά βρίσκεται το όρος Αιγάλεω (468m), βόρεια το όρος Πάρνηθα (1.413m), βορειοανατολικά το Πεντελικό όρος (1.109m) και ανατολικά το όρος Υμηττός με ύψος (1.026m). Στο εσωτερικό του λεκανοπεδίου υπάρχουν πολλοί λόφοι και γήλοφοι που διακόπτουν την συνέχεια του. Στο λεκανοπέδιο έχουν αναπτυχθεί δύο ποταμοί. Ο Κηφισός που κινείται δυτικά και ο Ιλισός στα ανατολικά, ενώ και οι δύο εκβάλλουν στον όρμο του Φαλήρου. Εντός του λεκανοπεδίου αναπτύχθηκε και το πολεοδομικό συγκρότημα της Αθήνας, με γρήγορους και απρογραμματίστους ρυθμούς, προκαλώντας πολλά προβλήματα.(Αντωνίου, 2002)

4.2. Μορφολογία και κλίσεις πρανών

Μορφολογικά το λεκανοπέδιο Αθηνών αποτελεί μια επιμήκη λεκάνη με χαμηλό ανάγλυφο (0-400m). Έχει διεύθυνση ΒΒΑ και περιβάλλεται από υψηλού ανάγλυφου όρη. Πιο αναλυτικά, το όρος Αιγάλεω παρουσιάζει μορφολογική κλίση πρανών που κυμαίνεται από 13% στο νότιο τμήμα του, έως 8% στο βόρειο. Η μορφολογική κλίση των ανατολικών πρανών του δεν είναι σταθερή. Το όρος Πάρνηθα παρουσιάζει μεγάλες διαφοροποιήσεις στις τιμές των κλίσεων των

πρανών του. Πιο συγκεκριμένα, οι κλίσεις στο ΝΔ τμήμα του είναι της τάξης του 75%, στο κεντρικό τμήμα 65% και στο ΒΑ είναι 22-28%. Στο Πεντελικό όρος τα πρανή παρουσιάζουν σημαντικές διαβαθμίσεις στην κλίση τους, που κυμαίνονται από 7 έως και 24%. Στα ΝΑ αναπτύσσεται το όρος Υμηττός, του οποίου τα δυτικά πρανή στο βόρειο τμήμα τους παρουσιάζουν σχεδόν σταθερή μορφολογική κλίση με τιμές που κυμαίνονται από 23 - 25%, στο κεντρικό η κλίση παρουσιάζει μία μικρή αύξηση σε 31%, ενώ στο νότιο μειώνεται σταδιακά σε 4%. Στο εσωτερικό του λεκανοπεδίου, οι τιμές της μορφολογικής κλίσης κυμαίνονται από 1,5-6,5%. Εξαιρεση αποτελούν οι λόφοι που αναπτύσσονται σε αυτό, οι οποίοι και εμφανίζουν μεγάλες μορφολογικές κλίσεις, κυρίως εξαιτίας της γεωλογικής τους δομής. (Αντωνίου, 2002)

4.3. Υδρογραφικό δίκτυο και υδρογραφικές λεκάνες

Ο κύριος υδροκρίτης που ορίζει το λεκανοπέδιο Αθηνών ακολουθεί την ακτογραμμή των ορέων Αιγάλεω, Πάρνηθα, Πεντέλη και Υμηττός. Το λεκανοπέδιο εσωτερικά είναι ασυνεχές και διακρίνεται με βάση τους υδροκρίτες σε 15 υδρολογικές λεκάνες, με μεγαλύτερη την λεκάνη του Κηφισού. Στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 4-1) παρατίθενται τα υδρογραφικά στοιχεία του λεκανοπεδίου. (Αντωνίου, 2002)

Κλάδοι	1ης τάξης	2ης τάξης	3ης τάξης	4ης τάξης	5ης τάξης	6ης τάξης	7ης τάξης	Σύνολο
Αριθμός	1525	404	82	20	4	2	1	2038
Μήκος (km)	850.5	419.5	223	69	24.5	11	6	1603.5
Μέσο Μήκος (km)	0.56	1.04	2.72	3.45	6.12	5.5	6	

Πίνακας 4-1: Στοιχεία Υδρογραφικού δικτύου στο σύνολο του λεκανοπεδίου Αττικής. (Αντωνίου, 2002)

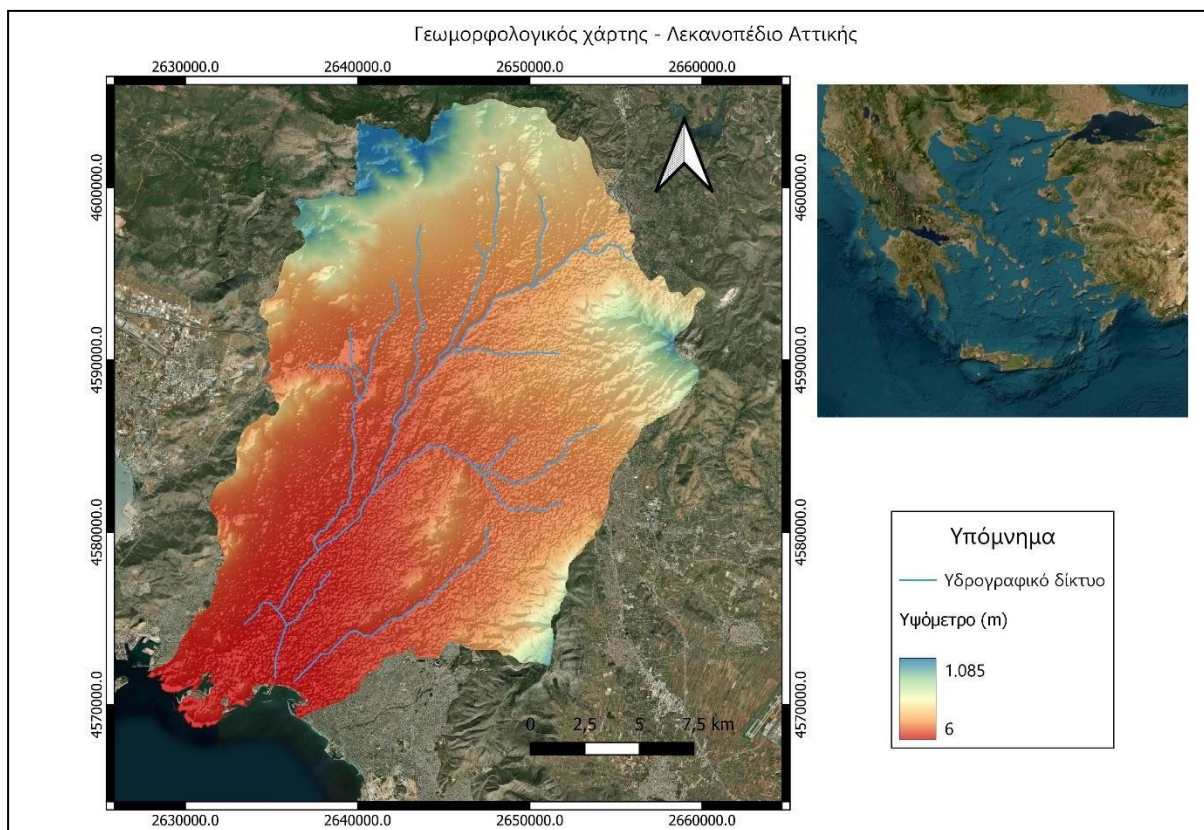
Με βάση τις παραπάνω μετρήσεις προκύπτει ότι στο υδρογραφικό δίκτυο διακρίνεται κλάδος μέχρι 7^{ης} τάξης (κατά Strahler), ο οποίος ανήκει στον Κηφισό. (Αντωνίου, 2002).

Το λεκανοπέδιο των Αθηνών έχει συνολικό εμβαδόν 538,18 km², μέση υδρογραφική πυκνότητα 2,98 km/km² και μέση υδρογραφική συχνότητα 3,79 κλ./km². Οι κλάδοι του υδρογραφικού δικτύου αναγράφονται στον Πίνακα 4-1. Στον Πίνακα 4-2 φαίνονται η υδρογραφική πυκνότητα και συχνότητα όλων των υδρολογικών λεκανών. Η υδρογραφική πυκνότητα των λεκανών δεν παρουσιάζει σημαντική διακύμανση τιμών και κυμαίνεται από 2,11 έως 4,27 km/km². Το 94% του λεκανοπεδίου Αθηνών έχει πυκνότητα που κυμαίνεται μεταξύ 2,51-3,50 km/km². Η υδρογραφική συχνότητα, σε αντίθεση με την πυκνότητα, παρουσιάζει διακυμάνσεις τιμών από 2,89 έως 11,43 κλ./km². Η λεκάνη του Κηφισού έχει υδρογραφική συχνότητα 3,38 κλ./km², μικρότερη από το σύνολο του λεκανοπεδίου, που είναι 3,79 κλ./km². (Αντωνίου, 2002)

Υδρολογικές λεκάνες	Πυκνότητα km/km ²	Συχνότητα κλ./km ²
Κηφισού	2.9	3.38
Ιλισού-Ζωγράφου	3.45	4.77
Ν. Σμύρνης	4.27	4.64
Ηλιούπολης	2.58	4.91
Αργυρούπολης	3.15	3.13
Γλυφάδας	3.1	3.66
Βούλας	2.74	4.81

Καβουρίου	3.8	11.43
Βουλιαγμένης	3.78	7.27
Ν. Φαλήρου	2.99	5.55
Καστέλας	2.11	5.38
Πειραιά	3.45	6.13
Δραπετσώνας	3.98	7.96
Κερατσινίου	2.47	5.31
Περάματος	2.8	4.11

Πίνακας 4-2: Υδρογραφική συχνότητα και πυκνότητα ανά υδρολογική λεκάνη (Αντωνίου, 2002)



Εικόνα 4-3: Γεωμορφολογικός χάρτης του λεκανοπεδίου Αττικής

4.4. Γεωλογία-Υδρογεωλογία

Η γεωλογική δομή του λεκανοπεδίου Αττικής είναι αρκετά σύνθετη. Η πρώτη σύνταξη γεωλογικού χάρτη της περιοχής, σε κλίμακα 1:25.000 πραγματοποιήθηκε από τον (Lepsius, 1893). Τα ορεινά σχηματίσματα καλύπτουν εξολοκλήρου τους γύρω ορεινούς όγκους του λεκανοπεδίου, καθώς και μεγάλο μέρος του εσωτερικού του. Εντούτοις, οι μεταλλικοί σχηματισμοί εκτείνονται πάνω στους αλπικούς, εντός του εσωτερικού τους, καθώς και στα πρανή των ορεινών όγκων. (Αντωνίου, 2002)

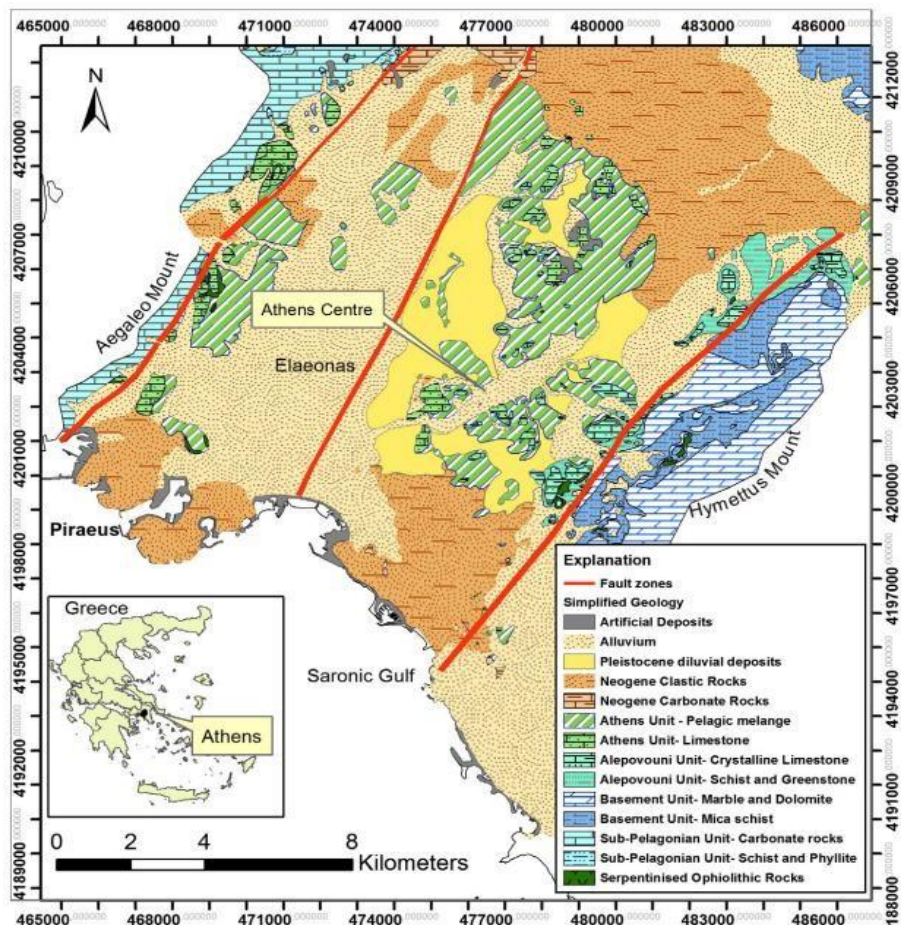
Οι δύο κύριες ενότητες των αλπικών σχηματισμών που δομούν την περιοχή είναι (Αντωνίου, 2002):

- Η Ενότητα Αττικής, η οποία καταλαμβάνει το μεγαλύτερο τμήμα του λεκανοπεδίου και αποτελεί υπόβαθρο του. Αποτελείται από Περμοτριάδικους Σχιστόλιθους, Τριαδικά-Ιουρασικά μάρμαρα, Κρητιδικούς σχιστόλιθους (σχιστόλιθοι Αθηνών) και Ανωκρητιδικούς ασβεστόλιθους (ασβεστόλιθοι Αθηνών).

- Η Υποπελαγονική Ενότητα, η οποία είναι επωθημένη στην Ενότητα Αττικής, δομεί ταδυτικά και βόρεια περιθώρια του λεκανοπεδίου και συνίσταται από Νεοπαλαιοζωικούς – Μεσοτριάδικους κλαστικούς σχηματισμούς (ψαμμίτες, σχιστόλιθους, φυλλίτες), Τριαδικούς – Ιουρασικούς ασβεστόλιθους, επωθημένους οφιολιθικούς σχηματισμούς και επικλυσιγενείς ανωκρητιδικούς ασβεστόλιθους και φλύσχη.
- Οι μεταλλικοί σχηματισμοί διακρίνονται σε:
 - (i) Νεογενείς σχηματισμούς, από λιμναίας, ποταμοχερσαίας και τοπικά παράκτια φάσης, συνεκτικούς έως ημισυνεκτικούς σχηματισμούς από μάργες, μαργαϊκούς ασβεστόλιθους, ψαμμίτες και κροκαλοπαγή,
 - (ii) Πλειστοκαινικούς σχηματισμούς, ποταμοχερσαίας φάσης και μικρής συνεκτικότητας, από ερυθρούς αργιλούχους ιλυόλιθους, άμμους, ψαμμίτες, κροκαλοπαγή και
 - (iii) Ολοκαινικούς σχηματισμούς και αποθέσεις, από ασύνδετα υλικά αργίλων, άμμων και χαλίκων.

Σύμφωνα με τον (Δ Ι Παπανικολάου et al., 2004) η γεωλογία των πετρωμάτων της Αθήνας αποτελείται από 4 διαφορετικές γεωτεκτονικές ενότητες που δομούν τα όρη που περιβάλλουν την πόλη, όπως και σε λόφους εντός του λεκανοπεδίου. Η χαμηλότερη γεωλογική ενότητα αποτελείται από μεταμορφωμένα πετρώματα, όπως μάρμαρα, δολομίτη και σχιστόλιθους. Τεκτονικά επικαλύπτεται από την ενότητα Αλεποβουνίου που αποτελείται επίσης από μεταμορφωμένα πετρώματα συμπεριλαμβανομένου κρυσταλλικών ασβεστόλιθων, και σχιστόλιθων. Η ενότητα των Αθηνών που δομεί το δυτικό και κεντρικό λεκανοπέδιο αποτελεί ένα τεκτονικό mélange το οποίο περιλαμβάνει πελαγικά ιζήματα που αποτελούνται από ασβεστόλιθους, μαργαϊκούς σχιστόλιθους, ψαμμίτες και οφιολίθους (Παπανικολάου, Λόζιος, et al., 2004). Η Υποπελαγονική ενότητα, που αποτελείται κυρίως από ασβεστόλιθο και δολομιτικό ασβεστόλιθο. Σερπεντινωμένα μπλοκ ποικίλων διαστάσεων είναι ενσωματωμένα στη λιθολογία όλων των αλπικών ενοτήτων που εμφανίζονται στην Αθήνα Μετα-ορογενείς νεογενείς έως τεταρτογενείς αποθέσεις καλύπτουν τα αλπικά θεμέλιο. Λιθολογικά, αυτά περιλαμβάνουν νεογενή παράκτια θάλασσα, ηπειρωτική και λιμναία ανθρακικά και κλαστικά ιζήματα, και πυκνοί τεταρτογενείς προσχωσιγενείς σχηματισμοί στους πρόποδες των γύρω βουνών. (Argyrazi & Kelepertzis, 2014)

Στην Εικόνα 8, απεικονίζεται ο γεωλογικός χάρτης του λεκανοπεδίου Αττικής (Δ. Παπανικολάου, Μπάση, et al., 2004)



Εικόνα 4-4: Γεωλογικός χάρτης λεκανοπεδίου Αττικής (Δ. Παπανικολάου, Μπάση, et al., 2004)

4.5. Περιγραφή ενοτήτων

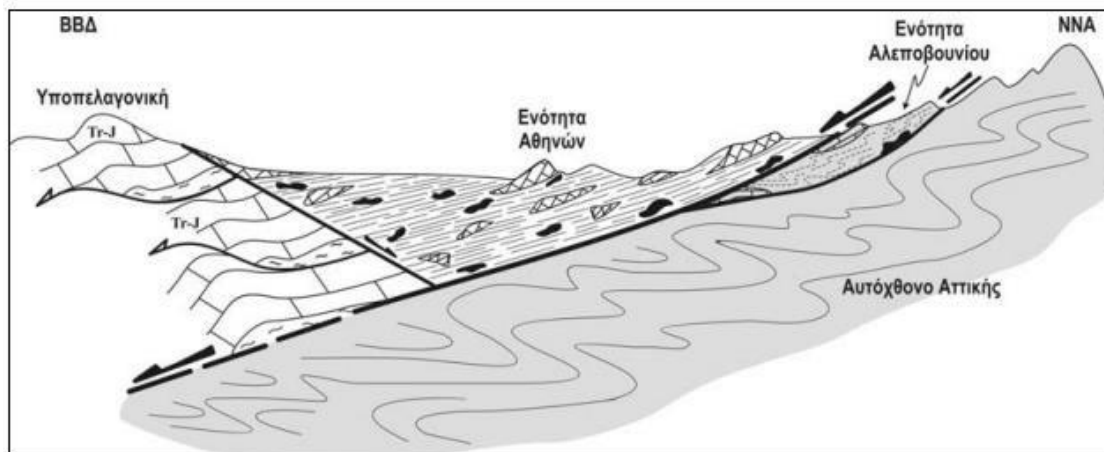
- I. Ενότητα Αθηνών: Δομεί το μεγαλύτερο τμήμα του λεκανοπεδίου των Αθηνών, παρόλο που εμφανίζεται κυρίως στα ανώτερα τμήματα των λόφων στο κεντρικό και δυτικό μέρος, ενώ καλύπτεται συχνά από νεότερες γεωλογικές αποθέσεις. Κατά μήκος της δυτικής πλευράς του λεκανοπεδίου, η παρουσία των γεωλογικών σχηματισμών της ενότητας των Αθηνών δημιουργεί μια επιμήκη ζώνη, με εμφανίσεις στους ορεινούς όγκους του Αιγάλεω και του Ποικίλου. Η βόρεια έκτασή τους φτάνει στα όρια των Δήμων Άνω Λιοσίων και Αχαρνών (Μενιδίου), ενώ προς τα νότια εκτείνονται μεταξύ Νίκαιας και Κερατσινίου. Στο κεντρικό τμήμα της περιοχής, οι γεωλογικοί σχηματισμοί εμφανίζονται στους λόφους μεταξύ των περιοχών του κεντρικού τμήματος της πρωτεύουσας, έχοντας διεύθυνση από το βορρά προς το νότο. Λιθολογικά, η ενότητα των Αθηνών διακρίνεται σε δύο "υποενότητες" που εναλλάσσονται και παρουσιάζουν διαφορετικά γεωλογικά χαρακτηριστικά και τεκτονική δομή. Η πρώτη υποενότητα δεν εμφανίζει μεγάλη λιθολογική ποικιλία, και περιλαμβάνει κυρίως λευκούς έως γκριζωπούς ασβεστόλιθους, με σπάνιες εμφανίσεις καστανόχρωμων, οι οποίοι είναι συμπαγείς και άστρωτοι, με πάχος στρωμάτων που κυμαίνεται μεταξύ 0,5 και 1,5 μέτρων. Σε ορισμένες περιοχές, περιλαμβάνει επίσης δολομιτικούς ασβεστόλιθους. Οι ασβεστόλιθοι αυτοί παρουσιάζουν κατά κύριο λόγο τα ίδια χαρακτηριστικά τόσο στο δυτικό όσο και στο κεντρικό μέρος του λεκανοπεδίου και περιλαμβάνουν τρηματοφόρα, πλήρεις τομές και θραύσματα ρουδιστών, ηλικίας Σενωνίου. Σε ορισμένες περιοχές, αυτοί οι ασβεστόλιθοι εμφανίζονται στην ανώτερη θέση της γεωλογικής σειράς των Αθηνών. Στους ανατολικούς πρόποδες του Ποικίλου, οι ανώτεροι νηρητικοί

ασβεστόλιθοι εμφανίζουν πιο έντονη καστανή απόχρωση σε σύγκριση με τις υποκείμενες εμφανίσεις της ίδιας λιθολογικής υποενότητας. (Παπανικολάου, Λόζιος, et al., 2004) Η δεύτερη υποενότητα περιγράφει ένα περίπλοκο γεωλογικό σύνολο που αποτελείται από διάφορες λιθολογίες και είναι γνωστό με τον όρο "σχιστόλιθοι των Αθηνών".(Μαρίνος et al., 1971) Ωστόσο, αυτή η ονομασία είναι παραπλανητική καθώς δεν αντιπροσωπεύει ακριβώς τη φύση των σχηματισμών. Αυτή η υποενότητα περιλαμβάνει αμεταμόρφωτα κλαστικά ιζήματα, όπως ψαμμίτες, αργίλους, ψαμμούχες μάργες και γραουβάκες, καθώς και τοφρικά ηφαιστειοκλαστικά ιζήματα, πηλίτες και αργιλικό σχίστες. Επιπλέον, περιλαμβάνει πλακώδεις μαργαϊκούς ασβεστόλιθους, οι οποίοι σε ορισμένες περιοχές παρουσιάζουν σημαντική μικροπανίδα του Άνω Κρητιδικού. (Μαρίνος, 1937; Μαρίνος et al., 1971, 1974; Τάταρης, 1966) Η παραμόρφωση στην πρώτη υποενότητα κυρίως προέρχεται από ρηξιγενείς διεργασίες και εκφράζεται μέσω ρηγμάτων. Κάποια από αυτά τα ρήγματα περιορίζονται στη μία υποενότητα, ενώ άλλα επηρεάζουν και τις δύο. Αντίθετα, η παραμόρφωση στη δεύτερη υποενότητα είναι πιο πολύπλοκη και χαρακτηρίζεται από έντονη πτύχωση με ισοκλινείς πτυχές και λεπιώσεις, οι οποίες σε συνδυασμό με τις ρηξιγενείς επιφάνειες ενισχύουν την ανωμαλία της δομής. Η επαφή μεταξύ των δύο λιθολογικών συνόλων είναι τεκτονική. Συνήθως, αυτή η επαφή συνοδεύεται από την παρουσία τεκτονικού λατυποπαγούς, πάχους 1-1,5 μ, το οποίο περιβάλλει θραύσματα και λατύπες κυρίως από τους νηρητικούς ασβεστόλιθους και σε μικρότερο βαθμό μικρότερες λατύπες από πυριτιολίθους, ψαμμίτες και σχίστες. (Δ. Παπανικολάου, Λόζιος, et al., 2004)

Η Ενότητα Αθηνών είναι υπερκείμενη τεκτονικά στους σχηματισμούς της Υποελαγονικής Ενότητας, στο δυτικό τμήμα του λεκανοπεδίου. Στο ανατολικό τμήμα, η Ενότητα Αθηνών επίσης υπέρκειται τεκτονικά των σχηματισμών της μεταμορφωμένης Ενότητας Αλεποβουνίου. Η επαφή τους είναι κυρίως καλλυμένη από μεταλλικούς σχηματισμούς, αναγνωρίζεται όμως κυρίως από το γεωλογικό πέτρωμα που διαμορφώθηκε εκεί και από την ύπαρξη ανάλογων σχηματισμών και στις δύο πλευρές της, τα πετρώματα έχουν υποστεί έντονη διατμητική παραμόρφωση γεγονός που καθιστά ιδιαίτερα δύσκολη την αναγνώριση του ορίου των δύο ενοτήτων. (Δ. Παπανικολάου, Λόζιος, et al., 2004)

- II. Ενότητα Αλεποβουνίου: Εκτείνεται κατά μήκος των δυτικών προπόδων του Υμηττού. Οι εμφανίσεις της παρεμβάλλονται μεταξύ των μεταμορφωμένων σχηματισμών της υποκείμενης, αυτόχθονης Ενότητας Αττικής και των υπερκείμενων σχηματισμών της Ενότητας Αθηνών. Ένα μεγάλο μέρος της καλύπτεται ασύμφωνα από μεταλλικές αποθέσεις. Και σε αυτή την ενότητα διακρίνονται δύο κύρια λιθολογικά σύνολα. Το ανώτερο λιθολογικό σύνολο αποτελείται από συμπαγείς κρυσταλλικούς ασβεστόλιθους, λευκούς έως ερυθρίζοντες, άστρωτους έως και παχυστρωματώδεις. Οι ασβεστόλιθοι εξελίσσονται προς περισσότερο πλακώδεις κρυσταλλικούς ασβεστόλιθους της ίδιας όψης. Η ηλικία των σχηματισμών είναι απροσδιόριστη, εξαιτίας της απουσίας απολιθωμάτων. Το κατώτερο λιθολογικό σύνολο περιλαμβάνει μεταμορφωμένα έως ημιμεταμορφωμένα ψαμμιτικά, σχιστομαργαϊκά στρώματα και φυλλίτες, με έντονες πτυχές και σχιστοποιημένους. Εντός αυτών παρεμβάλλονται τεφροί ή καστανοί, αγκεριτωμένοι πλακώδεις ασβεστόλιθοι, καθώς και πλακώδεις ερυθροί ή κιτρινωποί μικροκοκκώδεις χαλαζίτες. Συχνή είναι η παρουσία τεμαχών πρασινιτών (μεταμορφωμένων βασικών και υπερβασικών πυριγενών πετρωμάτων), ιδιαίτερα στην επαφή των δύο συνόλων, όπου και εμφανίζονται έντονα σχιστοποιημένοι. Η Ενότητα Αλεποβουνίου οριοθετείται από δύο τεκτονικές επαφές μικρής κλίσης, τόσο με τα υποκείμενα μεταμορφωμένα πετρώματα της σχετικά

αυτόχθονης Ενότητας Αττικής, που σχηματίζουν το όρος Υμηττός ανατολικά, όσο και με τα αμεταμόρφωτα πετρώματα της Ενότητας Αθηνών προς τα δυτικά. Η επαφή με τα υποκείμενα μεταμορφωμένα πετρώματα του Υμηττού είναι τεκτονική χαμηλής κλίσης και συνοδεύεται από την παρουσία τεκτονικού πετρώματος ανώτερου ορόφου, το οποίο εμφανίζεται σε πολλές τοποθεσίες, όπως στην ευρύτερη περιοχή του λόφου Αλεποβούνι, στο λόφο Λιθάρι και στην περιοχή του Σταυρού Αγίας Παρασκευής, μεταξύ άλλων (Σχήμα 16).



Σχήμα 4-1: Σχηματική απεικόνιση της γεωλογικής δομής του λεκανοπεδίου Αττικής (Δ. Παπανικολάου, Λόζιος, et al., 2004)

Η Ενότητα Αθηνών είναι η ανώτερη ενότητα του λεκανοπεδίου Αττικής και αποτελεί ένα mélange, με ηλικία Ανωκρητιδικού και περιλαμβάνει δύο lithολογικά σύνολα. Οι εμφανίσεις της είναι στο κεντρικό και δυτικό τμήμα, όπου βρίσκεται υπερκείμενη τεκτονικά της Υποπελαγονικής και της Ενότητας Αλεποβουνίου. Η ενότητα Αλεποβουνίου βρίσκεται στο ανατολικό τμήμα, έχει εν μέρει Τριαδική ηλικία και αποτελείται από δύο lithολογικές ενότητες. Είναι σφηνωμένη μεταξύ της υπερκείμενης Ενότητας Αθηνών και των μεταμορφωμένων πετρωμάτων του Υμηττού μέσω δύο τεκτονικών επαφών που κλίνουν με μικρής έως μεσαία κλίση προς τα βορειοδυτικά. Η Ενότητα Αθηνών έρχεται σε επαφή με ένα κανονικό ρήγμα αποκόλλησης με την Ενότητα Αλεποβουνίου, ενώ με ένα κανονικό ρήγμα που κλίνει προς τα ανατολικά με την Υποπελαγονική. (Δ. Παπανικολάου, Λόζιος, et al., 2004)

Οι αλπικοί και μεταλπικοί σχηματισμοί που δομούν το λεκανοπέδιο Αθηνών, κατηγοριοποιούνται υδρολιθολογικά στις εξής κατηγορίες (Αντωνίου, 2002):

- 1) Περατοί σχηματισμοί στους οποίους εντάσσονται τα μάρμαρα, οι ασβεστόλιθοι και οι ψαμμίτες
- 2) Περατοί- ημιπερατοί σχηματισμοί στους οποίους εντάσσονται οι χαλαροί έως ημισυνεκτικοί Τεταρτογενείς και Νεογενείς σχηματισμοί
- 3) Ημιπερατοί σχηματισμοί, στους οποίους εντάσσονται οι λεπτοστρωματώδεις ασβεστόλιθοι και οι οφιόλιθοι
- 4) Αδιαπέραστοι σχηματισμοί, στους οποίους εντάσσονται οι σχιστόλιθοι

Με βάση τη γεωλογική δομή του λεκανοπεδίου, διαπιστώνεται ότι (Πίνακας 4):

- Το 65% της έκτασής του απαρτίζεται από μεταλπικούς σχηματισμούς, οι οποίοι κυρίως στα ανώτερα επίπεδα είναι χαλαροί έως ημισυνεκτικοί περατοί-ημιπερατοί σχηματισμοί.

- Το 22% καλύπτεται από ανθρακικά περατά πετρώματα, τα οποία, με εξαίρεση ένα πολύ μικρό ποσοστό περίπου 2%, αναπτύσσονται περιφερειακά του λεκανοπεδίου.
- Το 13% του λεκανοπεδίου αποτελείται από σχιστολιθικά υδατοστεγή πετρώματα.

Σχηματισμοί	Περατοί	Περατοί-Ημιπερατοί	Ημιπερατοί	Αδιαπέραστοι
Έκταση (Km ²)	117.65	346.46	4.39	69.68
Ποσοστό (%)	21.86	64.38	0.81	12.95

Πίνακας 4-3: Υδρογεωλογική ταξινόμηση γεωλογικών σχηματισμών του λεκανοπεδίου Αττικής. (Αντωνίου, 2002)

4.6. Κάλυψη και Χρήσεις Γης

1. Αστική περιοχή.

Αυτή η περιοχή χαρακτηρίζεται από πυκνή δόμηση, με σχεδόν 100% της έκτασης καλυμμένη από κατοικίες. Δεν υπάρχουν ακάλυπτοι χώροι μεταξύ τους, ενώ παρουσιάζει έλλειψη πρασίνου και πλήρη ασφαλτόστρωση. (Αντωνίου, 2002)

- Περιοχή αραιής δόμησης. Σε αυτήν την περιοχή, υπάρχει υψηλό ποσοστό δόμησης (περίπου 80%), με κατοικίες αραιά διασκορπισμένες σε απόσταση μεταξύ τους. Υπάρχει λίγο πράσινο, περιορισμένης έκτασης ακάλυπτοι χώροι και πλήρως ασφαλτοστρωμένοι δρόμοι.
- Περιοχή πολύ αραιής δόμησης. Σε αυτήν την περιοχή, το ποσοστό δόμησης είναι χαμηλό (περίπου 40%). Οι κατοικίες είναι διασκορπισμένες σε μεγάλη απόσταση μεταξύ τους, υπάρχουν αρκετοί ακάλυπτοι χώροι, λίγο πράσινο και ασφαλτοστρωμένοι δρόμοι. Πράσινο σε αστική περιοχή. Αυτή η περιοχή περιλαμβάνει χώρους πρασίνου εντός της αστικής περιοχής, χωρίς καμία κατοικία.
- Περιοχή αραιής δόμησης με πράσινο. Σε αυτήν την περιοχή, υπάρχουν αρκετές κατοικίες που είναι διασκορπισμένες (ποσοστό κάλυψης 60%). Σημαντικό ποσοστό της περιοχής καλύπτεται από πράσινο μεταξύ των κατοικιών. Οι δρόμοι είναι ασφαλτοστρωμένοι.
- Περιοχή αραιής δόμησης (έως ακάλυπτη). Σε αυτήν την περιοχή, υπάρχει αραιή εκτός σχεδίου δόμηση (>20%) και ελάχιστο πράσινο. Αυτή η περιοχή βρίσκεται σε κατοικημένη ζώνη.

2. Ημιορεινή έως ορεινή περιοχή

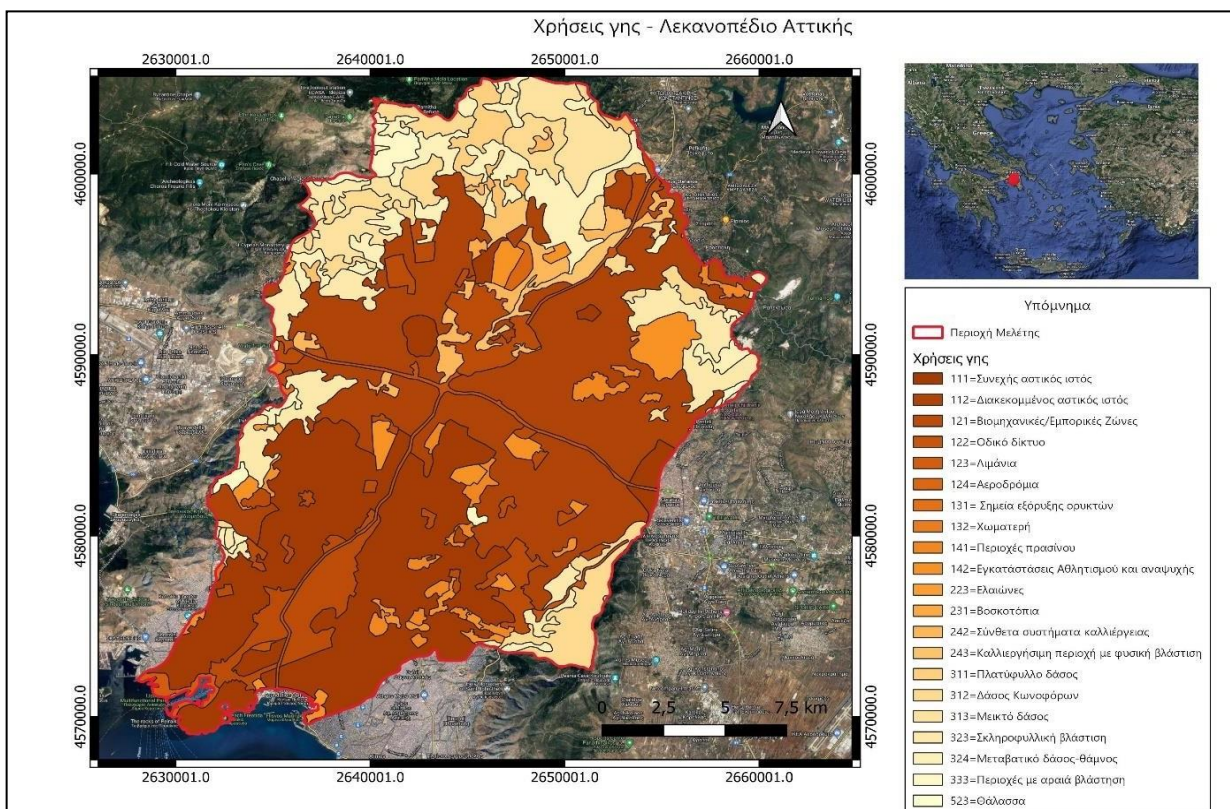
- Περιοχή ημιορεινής ή ορεινής φύσης, χαρακτηριζόμενη από πυκνή θαμνώδη ή δενδρώδη βλάστηση, και βρίσκεται στα περίχωρα της κατοικημένης ζώνης.
- Περιοχή με ανοικτούς ή ελάχιστα καλυμμένους από βλάστηση χώρους, που ανήκει σε ορεινή ή ημιορεινή περιοχή και βρίσκεται στα περίχωρα της κατοικημένης ζώνης.
- Περιοχή ημιορεινής ή ορεινής φύσης, χαρακτηριζόμενη από πυκνή θαμνώδη ή δενδρώδη βλάστηση, και βρίσκεται στα περίχωρα της κατοικημένης ζώνης.
- Περιοχή με ανοικτούς ή ελάχιστα καλυμμένους από βλάστηση χώρους, που ανήκει σε ορεινή ή ημιορεινή περιοχή και βρίσκεται στα περίχωρα της κατοικημένης ζώνης.

Συγκρίνοντας τη γεωλογική δομή και τα υδρολογικά χαρακτηριστικά των σχηματισμών που απαρτίζουν το λεκανοπέδιο, καθώς και την ανάπτυξη του υδρογραφικού δικτύου και τη χρήση της γης, προκύπτουν τα παρακάτω συμπεράσματα (Αντωνίου, 2002):

- Το υδρογραφικό δίκτυο στο λεκανοπέδιο των Αθηνών είναι ανεπτυγμένο με ελάχιστους

κλάδους υψηλής τάξης, κυρίως έναν κλάδο 7ης τάξης. Αυτό εμφανίζεται αριθμητικά από τις χαμηλές τιμές της υδρογραφικής πυκνότητας και συχνότητας, καθώς και από το υψηλό ποσοστό των κλάδων χαμηλής τάξης που ανέρχεται στο 79% του συνολικού μήκους τους και στο 94% του συνόλου των ρεμάτων.

- Το υδρογραφικό δίκτυο χαρακτηρίζεται από την παρουσία πολλών μικρών υδρολογικών λεκανών, τα οποία αντικατοπτρίζουν την τοπογραφία και τις γεωλογικές συνθήκες του υποβάθρου. Αυτές οι λεκάνες αναπτύσσονται κυρίως στη νότια παράκτια περιοχή του λεκανοπεδίου, σε σχηματισμούς αλπικού υποβάθρου και νεογενών σχηματισμών.
- Η ανάπτυξη του υδρογραφικού δικτύου με κλάδους χαμηλής τάξης οφείλεται κυρίως στη γεωλογική δομή, η οποία αντικατοπτρίζει την υδρολιθολογική συμπεριφορά των σχηματισμών και των αποθέσεων. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η λεκάνη του Κηφισού, η οποία, παρόλο που έχει μικρή μέση μορφολογική κλίση (5%) στη μεγαλύτερη έκτασή της (70%), δεν αναπτύσσει τους αναμενόμενα μεγάλους κλάδους.
- Η περιοχή της πυκνής αστικής δόμησης, η οποία το 1960 κάλυπτε το 14% και σήμερα έχει επεκταθεί στο 34%, κυρίως καλύφθηκε από υδρογραφικούς κλάδους υψηλότερης τάξης (>3ης τάξης), οι οποίοι αντιστοιχούν στο 30% του συνολικού μήκους του υδρογραφικού δικτύου.
- Η δόμηση επεκτάθηκε από τους σχιστολιθικούς αδιαπέρατους σχηματισμούς στους νεογενείς και τεταρτογενείς περατούς ή ημιπερατούς σχηματισμούς, οι οποίοι είναι ημισυνεκτικοί έως ασύνδετοι. Αυτό οδήγησε σε σημαντική μείωση του ποσοστού κατείσδυσης των ομβρίων υδάτων. Ως αποτέλεσμα, παρατηρούνται όλο και συχνότερα πλημμυρικά φαινόμενα στο λεκανοπέδιο και αυξημένος σεισμικός κίνδυνος λόγω των προβληματικών εδαφών θεμελίωσης.



Εικόνα 4-5: Χάρτης χρήσεων γης – λεκανοπέδιο Αττικής

4.7. Ιλισός

Ο Ιλισός πήρε το όνομα του από τους Πελασγούς, οι οποίοι ήταν οι πρώτοι κάτοικοι της Αθήνας. Ο ποταμός πήγαζε από την βορειοδυτική πλαγιά του Υμηττού, με ένα τμήμα του να ρέει προς το Μοναστήρι του Αγίου Ιωάννη του Θεολόγου και άλλα δύο τμήματά του προς της Καισαριανή και τα Ιλίσσια. Αργότερα ο ποταμός διέσχισε τον λόφο του Αρδηττού και έρρεε μέσα από την κοιλάδα που σχηματίζεται μεταξύ των λόφων των Μουσών (Φιλοπάππου) και της Σικελίας (λεωφόρος Συγγρού). Στο τέλος της διαδρομής του, συναντούσε την κοίτη του Ηριδανού και συνέχιζε να ενώνεται με τον Κηφισό στα νοτιοανατολικά περνώντας έξω από τα τείχη της αρχαίας πόλης. Αυτό σημαίνει ότι το υδρογραφικό δίκτυο του Ιλισού αποστράγγιζε τους ορεινούς όγκους του Υμηττού, μέρος της Πεντέλης, του νοτιοανατολικού Βριλησσού, του λόφου του Λυκαβηττού και της Ακρόπολης. (Κώτσιαρη Β. & Ευσταθίου Γ., 2015) Στην περιοχή του Αρδηττού όπου είχε την πηγή του ο Ιλισός, δημιουργήθηκε το Βατραχονήσι, μια νησίδα που πήρε το όνομά της από τα πολλά βατράχια που μαζεύονταν εκεί. Είναι πιθανό το νησί αυτό να δημιουργήθηκε από τα ιζήματα, τους ογκόλιθους και τα φερτά υλικά που μετέφερε ο ποταμός Ιλισός κατά την διάρκεια έντονων βροχοπτώσεων. (Τσολάκος, 2003). Τον χειμώνα ο Ιλισός πλημμύριζε τις γύρω περιοχές καθιστώντας τις εύφορες, ενώ το καλοκαίρι χρησιμοποιούνταν από τους κατοίκους της Αθήνας για πόσιμο νερό, για τις καθημερινές τους ανάγκες αλλά και για άρδευση.

Οι αρχικές μελέτες για την διευθέτηση του ποταμού Ιλισού άρχισαν το 1930 υπό την επίβλεψη της “Ανώνυμη Ελληνική Εταιρία Κατασκευής Υπονόμων Αθηνών Πειραιώς Α.Ε.”. Μέχρι εκείνη την περίοδο ο Ιλισός ήταν παραπόταμος του Κηφισού και συνέβαλε στην περιοχή Χαροκόπου-Χαμοστέρνας στον Ταύρο. Το 1937 ξεκίνησαν οι εργασίες διευθέτησης του ποταμού, οι οποίες είχαν ως αποτέλεσμα τη εκτροπή του με συνολικό μήκος 3,141m και την δημιουργία μιας τεχνητής κοίτης στην περιοχή Μοσχάτο - Τζιτζιφιές. Το 2003 ένα μικρό τμήμα του Ιλισού, βρισκόταν στο σημείο όπου υπήρχαν τα βράχια που δημιουργούσαν μικρούς καταρράχτες και λίμνη, κοντά στην πηγή της Καλλιρόης, απέναντι από το εκκλησάκι της Αγίας Φωτεινής. (Τσολάκος, 2003)

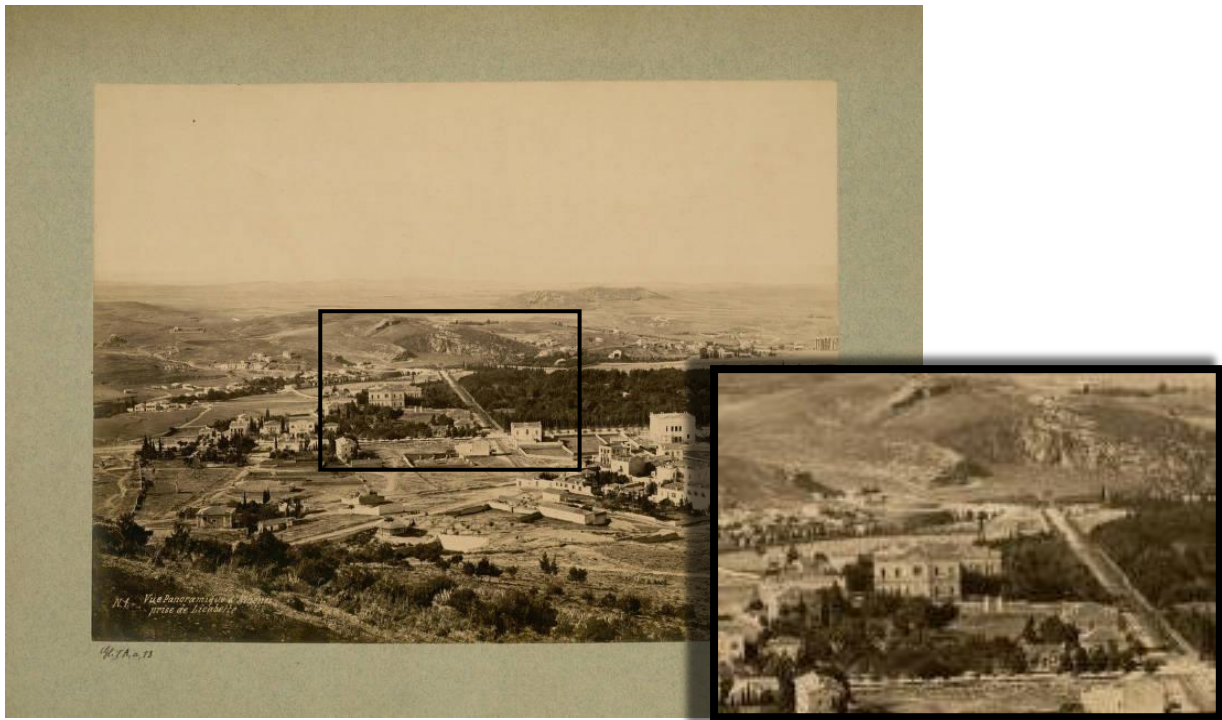
Εξαιτίας της ραγδαίας και έντονης ανοικοδόμησης της Αττικής, το φυσικό τοπίο και το υδρογραφικό δίκτυο της πόλης οδηγήθηκε στην καταστροφή. Πολλά μικρά ρεύματα οικοδομήθηκαν, ενώ άλλα χρησιμοποιήθηκαν ως ανοιχτοί υπόνομοι, χωρίς να υπήρχε κάποιος σχεδιασμός για την εγκατάσταση αποχετευτικού δικτύου. Κατά τον 20ο αιώνα, οι χειμάρροι στην Αθήνα θεωρήθηκαν πρόβλημα και ο τρόπος για να επιλυθεί ήταν με αντιπλημμυρικά έργα, είτε με την κάλυψη τους και την δημιουργία νέων οδικών αξόνων. (Κώτσιαρη Β. & Ευσταθίου Γ., 2015)

Η κάλυψη των χειμάρρων προσφέρθηκε ως μοναδική δημόσια έκταση για την ανάπτυξη νέων αυτοκινητοδρόμων σε περιοχές που απαιτούνταν έργα κυκλοφοριακής ρύθμισης. Αυτό επέτρεπε στο κράτος να αποφεύγει την ανάγκη για δαπανηρές εξοικονομήσεις που συνήθως συνοδεύουν τις απαλλοτριώσεις. (Κοταμπάσης Χ. & Σκέντος Α., 2005) Η εγκατάλειψη και η μόλυνση του Ιλισού ήταν εμφανείς προβληματικές καταστάσεις από την περίοδο της Τουρκοκρατίας. Μετά την απελευθέρωση η κατάσταση επιδεινώθηκε καθώς δόθηκε άδεια σε ανθρώπους να χτίσουν γύρω από το ποτάμι καλύπτοντας τα αρχαία κτίσματα της περιοχής. (Τσολάκος, 2003) Η διαδικασία διευθέτησης του Ιλισού ξεκίνησε στα τέλη της δεκαετίας του 1930 και ολοκληρώθηκε στις αρχές της δεκαετίας του 1960. Αρχικά, μέχρι τις αρχές του 20ού αιώνα, ο Ιλισός δεν έφτανε μέχρι τη θάλασσα αλλά εξέβαλλε στον Κηφισό, συνεισφέροντας στην περιοχή βόρεια του σημερινού Μοσχάτου. Η πρώτη μελέτη για την ανακατασκευή του Ιλισού ως ξεχωριστός ποταμός διεξήχθη το 1905, ενώ η οριστική μελέτη εγκρίθηκε μετά το 1930 από την "Ανώνυμη Ελληνική Εταιρία Κατασκευής Υπονόμων Αθηνών, Πειραιώς και Περίχωρων Α.Ε.". Η νέα κοίτη του Ιλισού σχεδιάστηκε στα όρια των δήμων Μοσχάτου και

Καλλιθέας, με συνολικό μήκος εκτροπής 3.141 μέτρα και εκβολή στο Φαληρικό Όρμο.

Η μελέτη για τη διευθέτηση του ποταμού αρχικά προέβλεπε ανοικτές κοίτες, ωστόσο λόγω της πυκνής οικοδόμησης στην περιοχή αυτό δεν ήταν εφικτό. Έτσι, οι εργασίες επικεντρώθηκαν στην κάλυψη του ποταμού. Ο Ιλισός σήμερα ρέει υπόγεια κάτω από πολλές οδούς, όπως οι οδοί Βασιλέως Κωνσταντίνου, Βασιλέως Αλεξάνδρου, Καλλιρρόης, Χαροκόπου, Χαμοστέρνας, Παναγή Τσαλδάρη και Λεωφόρος Συγγρού, μέχρι να καταλήξει στην λεωφόρο Ποσειδώνος. Τα τελευταία περίπου 7,7 χιλιόμετρα της διαδρομής του, ο Ιλισός ρέει επιφανειακά ανεπένδυτος, εκβάλλοντας στο Φαληρικό Όρμο. (Κώτσαρη Β. & Ευσταθίου Γ., 2015)

Η επικάλυψη του Ιλισού και οι επεμβάσεις στις εκβολές του δεν εμπόδισαν την αναγέννηση του ως πολύτιμου υδροβιότοπου για την Αθήνα. Παρά τις αλλαγές στο φυσικό του περιβάλλον, το δέλτα του Ιλισού έχει επαναφέρει πλούσια βιοποικιλότητα, ιδίως σε πουλιά. Η εκβολή του στο Φαληρικό Όρμο είναι ιδανικός τόπος για πολλά είδη πουλιών, μερικά εκ των οποίων είναι σπάνια στην περιοχή της Αττικής ή απειλούμενα. Οι ορνιθολόγοι έχουν καταμετρήσει περίπου 134 είδη πουλιών στην εκβολή του Ιλισού, τα περισσότερα από τα οποία είναι μεταναστευτικά. Στα ρηχά και ευτροφικά νερά της εκβολής του Ιλισού και στον παρακείμενο θαλάσσιο χώρο, τα κεφαλόπουλα αναπτύσσονται αφθονικά, καθώς η εκβολή λειτουργεί ως φυσικό ιχθυοτροφείο. Εκεί βρίσκουν προστασία από αρπακτικά ψάρια και βρίσκουν τροφή στη λάσπη του ποταμού. Ως αποτέλεσμα, παρατηρούνται εντυπωσιακά ψαροφάγα πουλιά όπως ερωδιοί, κορμοράνοι, βουτηχτάρες και γλαρόνια. Στις αρχές του 20ου αιώνα είχαν καταγραφεί 250 είδη φυτών. Ένα σημαντικό μέρος από αυτά τα είδη φυτών είχε διατηρηθεί μέχρι το 1971, το έτος που η περιοχή επιχωματώθηκε και η παραλία διευρύνθηκε προς τη θάλασσα. Σήμερα, στα διαταραγμένα εδάφη κυριαρχούν φυτικά είδη όπως μαργαρίτες και χαμομήλια. Ωστόσο, επιβιώνουν και ορισμένα φυτικά είδη που υπήρχαν στο παρελθόν, όπως τα αλόφυτα. Κατά την περίοδο που ο Ιλισός ήταν επιφανειακός, τα νερά του φέρανε ακαθαρσίες από τη ρίψη σκουπιδιών και τη ρύπανση, ενώ οι λάκκοι της κοίτης του αποτελούσαν εστίες δυσοσμίας και εκτροφής κουνουπιών. Η επέμβαση για την κάλυψή του θεωρήθηκε ως μέτρο εξυγίανσης και εκσυγχρονισμού. Ωστόσο, αυτή η πρακτική, σε συνδυασμό με λανθασμένες αποφάσεις από τους αρμοδίους, είχε ως αποτέλεσμα τη σταδιακή εξάντληση του ποταμού, ο οποίος φυσικά υποβαθμίζεται λόγω της αστικής ανάπτυξης. (Σκριμιζέα Ε.Μ., 2011) Η αστικοποίηση της περιοχής κατά μήκος του ποταμού Κηφισού, καθώς και της περιοχής του Ιλισού ποταμού, έχουν υποστεί συχνά εκτεταμένες ζημιές κατά την διάρκεια ακραίων και αιγίδων. Περισσότερες από 25 σοβαρές πλημμύρες έχουν συμβεί κατά τη διάρκεια των τελευταίων 117 χρόνων. (Bathrellos et al., 2016; Maroukian et al., 2005)

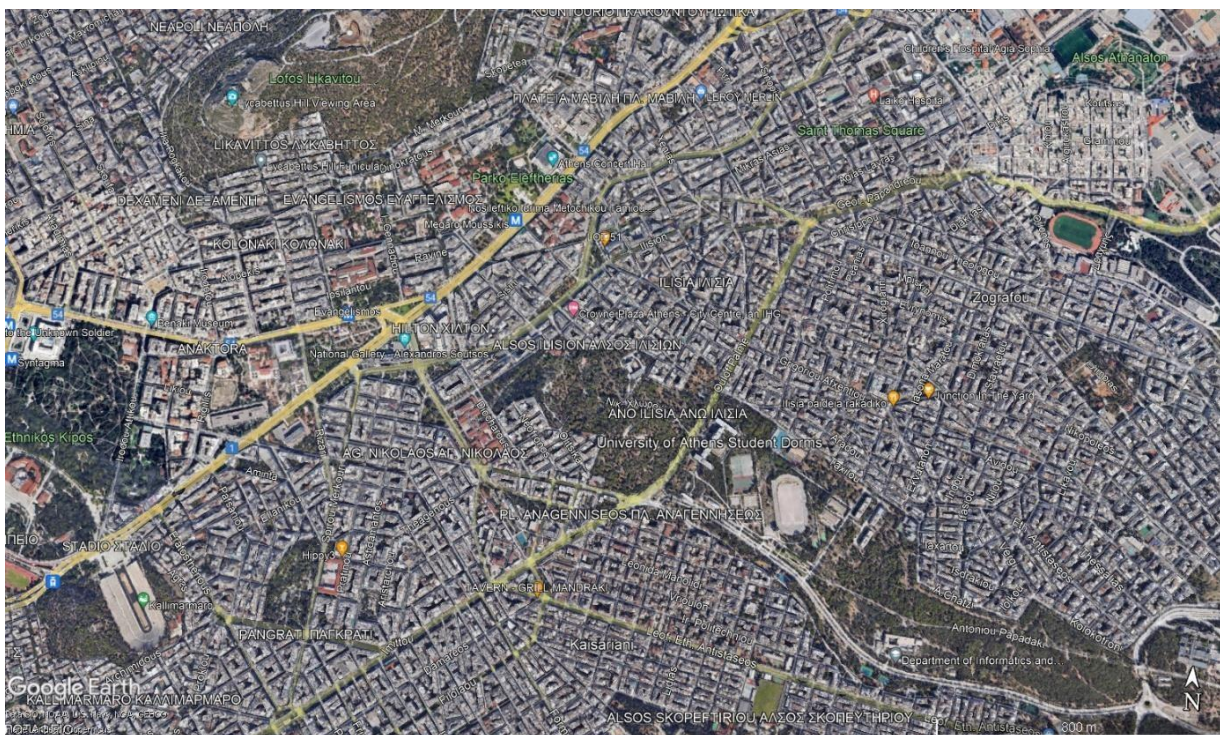


Εικόνα 4-6: Πανοραμική φωτογραφία της Αθήνας από τον Λυκαβηττό. Εστιάζοντας φαίνεται ο Ιλισός. (Pascal Sebah, 1870-1874)

Στις παρακάτω εικόνες (Εικόνα 4-7 και Εικόνα 4-8) φαίνεται η διαφορά της περιοχής του ποταμού Ιλισού, μέσα από τους χάρτες Kaupert, οι οποίοι συντάχτηκαν το 1895-1903, σε αντίθεση με την σημερινή εικόνα που παρουσιάζει η περιοχή από την δορυφορική εικόνα του google maps. Το αστικό τοπίο αναπτυχθεί τόσο ώστε να οδηγήσει στην εξάπλωση του πολεοδομικού ιστού, στον αφανισμό του Ιλισού, ο οποίος πλέον εμφανίζεται υπόγεια και στην ρυμοτόμηση. Πάνω την παλαιά κοίτη του ποταμού έχει αναγερθεί το οικοδομικό συγκρότημα της Εθνικής Πινακοθήκης, ενώ έργα που πιθανώς να επηρέασαν την στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα της περιοχής είναι η δημιουργία του σταθμού μετρό «Ευαγγελισμός», επί της λεωφόρου Βασιλίσσης Σοφίας, η εκσκαφή υπογείων στα κτίρια του Βυζαντινού και Χριστιανικού Μουσείου και η δημιουργία πολυεπίπεδου υπογείου χώρου στάθμευσης αυτοκινήτων, νότια του Πολεμικού Μουσείου.



Εικόνα 4-7: Ο ποταμός Ιλισός από τους χάρτες Kaupert (1885-1903)



Εικόνα 4-8: Η περιοχή που έρε ο Ιλισός σήμερα (google maps)

5. ΠΡΟΣΩΜΟΙΩΣΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ

Ο σχεδιασμός ενός συστήματος αποστράγγισης υπόγειων υδάτων απαιτεί προσεκτική προετοιμασία και ανάλυση. Αρχικά, καθορίζεται το πρόβλημα των υπόγειων νερών και στη συνέχεια συλλέγονται δεδομένα και ερευνητικά στοιχεία για την ανάλυση της υδρολογικής κατάστασης. Αφού κατανοηθεί το πρόβλημα, προτείνονται και αναπτύσσονται λύσεις και τεχνολογίες αποστράγγισης. Κατά την υλοποίηση, είναι σημαντική η συνεργασία με ειδικούς υδρογεωλόγους και μηχανικούς για την ανάπτυξη βιώσιμων λύσεων. Η διαδικασία περιλαμβάνει την προσομοίωση, την ανάλυση και την κρίση των προτεινόμενων λύσεων, με στόχο την επίτευξη αποτελεσματικών και βιώσιμων αποτελεσμάτων.

Η διαδικασία για τη δημιουργία ενός προσδιοριστικού, μαθηματικού μοντέλου οποιουδήποτε φυσικού συστήματος μπορεί να γενικευθεί ως εξής: Αρχικά, γίνεται κατανόηση της φυσικής συμπεριφοράς του συστήματος και διατυπώνεται ένα εννοιολογικό μοντέλο για τον τρόπο λειτουργίας του. Στη συνέχεια, οι φυσικές αρχές μεταφράζονται σε μαθηματικούς όρους, δημιουργώντας το μαθηματικό μοντέλο. Αυτό περιλαμβάνει τις κατάλληλες απλοποιήσεις και την ανάπτυξη των εξισώσεων που διέπουν το σύστημα. Στη συγκεκριμένη περίπτωση της ροής υπόγειου νερού, το μαθηματικό μοντέλο περιλαμβάνει μια εξίσωση μερικών παραγώγων μαζί με τις κατάλληλες οριακές και αρχικές συνθήκες που εκφράζουν τη διατήρηση της μάζας και περιγράφουν τις συνεχείς μεταβλητές του συστήματος. Τέλος, χρησιμοποιούνται αριθμητικές μέθοδοι για τη λύση των εξισώσεων και την πρόβλεψη της συμπεριφοράς του συστήματος με την πάροδο του χρόνου. Αυτή η διαδικασία απαιτεί τη χρήση δεδομένων εισόδου και τη διεξαγωγή προσομοιώσεων, με το αποτέλεσμα να παρέχει προβλέψεις και αναλύσεις που χρησιμοποιούνται για τη λήψη αποφάσεων σχετικά με τη διαχείριση των υπόγειων νερών και την αντιμετώπιση περιβαλλοντικών προκλήσεων. (Reclamation et al., 2011)

5.1. Εννοιολογικό μοντέλο

Η εννοιολογία αποτελεί την αρχή για τον σχεδιασμό μοντέλων και εξηγεί τη λειτουργία ενός συστήματος σε ευρύ κοινό. Ένα εννοιολογικό (υδρογεωλογικό) μοντέλο περιγράφει μια ερμηνεία των γεωλογικών και υδρολογικών συνθηκών ενός συστήματος υπόγειων υδάτων. Κατά την ανάπτυξη ενός εννοιολογικού μοντέλου, η αναπαράσταση της πραγματικότητας, της γενικότητας και της ακρίβειας δεν μπορούν να επιτευχθούν στο απόλυτο μέγιστο επίπεδο ταυτόχρονα. Η διαδικασία ανάπτυξης ενός μοντέλου περιλαμβάνει την απλοποίηση ενός σύνθετου συστήματος υπόγειων υδάτων, προκειμένου να αντιπροσωπεύσει τη βασική συμπεριφορά του. (Australia. National Water Commission. & Sinclair Knight Merz (Firm), 2012; Levins, 1966)

Ένα εννοιολογικό μοντέλο περιγράφεται ως μια θεωρητική περιγραφή που αναπαριστά τα φαινόμενα που μελετώνται και βασίζεται σε ένα σύνολο μεταβλητών με λογικές και ποσοτικές σχέσεις. Ουσιαστικά ένα εννοιολογικό μοντέλο είναι μια απλουστευμένη μη μαθηματική αναπαράσταση ενός συστήματος υπόγειων υδάτων που βοηθά στην κατανόηση των συνθηκών των υπόγειων υδάτων. Μέχρι να αναπτυχθεί το εννοιολογικό μοντέλο, δεν είναι δυνατόν να ληφθούν ορθολογικές αποφάσεις σχετικά με ποια από τις αναλυτικές μεθόδους μοντελοποίησης είναι κατάλληλη για το πρόβλημα. Προκειμένου να αναπτυχθεί ένα εννοιολογικό μοντέλο, ο μελετητής πρέπει να είναι εξοικειωμένος με τις έννοιες της ροής των υπόγειων υδάτων, υδροφορείς, οριακές συνθήκες, διαπερατότητα κ.ο.κ. Βασικοί παράγοντες που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στα εννοιολογικά μοντέλα περιλαμβάνουν (Cashman & Preene, 2021):

- Οι τύποι των υδροφορέων και οι ιδιότητές τους. Οι υδροφορείς μπορούν να ταξινομηθούν ως περιορισμένοι ή ελεύθεροι. Είναι απαραίτητο να προσδιορίζεται η διαπερατότητα, η ανισοτροπία και ο συντελεστής εναποθήκευσης τους.
- Το βάθος και το πάχος του υδροφορέα. Αυτές οι διαστάσεις θα πρέπει να εκτιμηθούν εάν είναι ίδιες σε όλη την έκταση του υδροφορέα που επηρεάζεται από την άντληση

- Η παρουσία αδιαπέρατων στρωμάτων τα οποία μπορεί να λειτουργούν ως εμπόδια στην κατακόρυφη ροή των υπόγειων υδάτων.
- Απόσταση της επιρροής άντλησης και τα όρια του υδροφορέα. Επιπλέον σημαντικός παράγοντας είναι η ύπαρξη πιθανών πηγών και η παρουσία οποιουδήποτε φραγμού τα οποία μπορεί να επηρεάσουν την ροή των υπογείων υδάτων.
- Την αρχική στάθμη υπογείων υδάτων και το προφίλ τα πίεσης του νερού των πόρων. Η αρχική στάθμη των υπόγειων νερών καθορίζει το ποσό της απαιτούμενης άντλησης.
- Η παρουσία συνεκτικών πετρωμάτων.

Σημαντικό είναι να σημειωθεί η αβεβαιότητα των εννοιολογικών μοντέλων. Τα εννοιολογικά μοντέλα μπορούν να προσεγγίσουν ένα μικρό ποσοστό του όγκου του εδάφους που θα επηρεαστεί από το σύστημα ελέγχου των υπόγειων υδάτων. Δεν μπορούν να αποκαλύψουν όλες τις πιθανές πολυπλοκότητες και μεταβλητότητες των στρωμάτων. Επιπλέον τα επίπεδα των υπόγειων υδάτων παρακολουθούνται μόνο για ένα πεπερασμένο χρονικό διάστημα και ενδέχεται να μην προσδιορίζουν τα πραγματικά μέγιστα και ελάχιστα επίπεδα των υπόγειων νερών. (Cashman & Preeene, 2021)

Το εννοιολογικό μοντέλο αποτελεί τη βάση για τον σχεδιασμό, καθώς περιγράφει τις συνθήκες του εδάφους και του υπογείου νερού σε μια περιοχή. Χωρίς ένα ακριβές μοντέλο, η ποιότητα του σχεδιασμού μπορεί να υποφέρει. Είναι ζωτικής σημασίας ο μελετητής να γνωρίζει και να αντιλαμβάνεται τους παράγοντες που επηρεάζουν τη ροή του υπογείου νερού. Το μοντέλο πρέπει να λαμβάνει υπόψη όλους τους σημαντικούς παράγοντες και να είναι ακριβές και αντιπροσωπευτικό. Η αξιολόγηση και η ανάπτυξη του μοντέλου πρέπει να γίνεται προσεκτικά, ενώ η καταγραφή των ελέγξιμων και μη ελέγξιμων παραγόντων είναι απαραίτητη για την επιτυχή υλοποίηση του σχεδιασμού. (Cashman & Preeene, 2021)

5.2. Υδρογεωλογικά μοντέλα

Ένα μοντέλο υπόγειων υδάτων αποτελεί μια απλουστευμένη αναπαράσταση ενός συστήματος υπόγειων υδάτων. Σκοπός του μοντέλου είναι να ενισχύσει την κατανόηση των συνθηκών που διέπουν ένα υδάτινο σύστημα και όχι να το αναπαραστήσει ακριβώς. Η αξία του υδρογεωλογικού μοντέλου είναι η δυνατότητα που έχει να συνδέει το παρόν με το μέλλον ή το παρελθόν. Ένα θεμελιώδες στοιχείο σχετικά με τα μοντέλα υπογείων υδάτων είναι ότι κανένα μοντέλο δεν πρέπει να προσπαθεί να προσομοιάζει ακριβώς την πραγματικότητα, καθώς κάτι τέτοιο είναι αδύνατο. Αντίθετα ο στόχος του θα πρέπει να είναι η ανάπτυξη ενός μοντέλου που θα βοηθά στην κατανόηση των προβλημάτων που αντιμετωπίζονται. Κύριοι στόχοι του μοντέλου είναι:

- Η αξιολόγηση των παροχών άντλησης για τον σχεδιασμό της αποστράγγισης του υπογείου νερού
- Η εκτίμηση του απαιτούμενου βάθους και πάχους των τοίχων αποκλεισμού
- Η εκτίμηση του μεγέθους της ζώνης επιρροής της άντλησης
- Η εκτίμηση των πιθανών εξωτερικών επιπτώσεων (π.χ. καθίζηση του εδάφους), που προκαλούνται από τη μείωση των υπόγειων υδάτων.

Ένα δεδομένο πρόβλημα μοντελοποίησης μπορεί να έχει πολλαπλούς στόχους. Αυτοί οι στόχοι μπορεί να προσεγγίζονται από ένα μοντέλο ή να χρειάζονται πολλαπλές προσεγγίσεις. (Cashman & Preeene, 2021)

Τα μοντέλα χρησιμεύουν σε αναγνωριστικές μελέτες, σε μελέτες ερμηνείας και σε μελέτες πρόβλεψης. (Mercer & Faust, 1980) Τα μοντέλα αποτελούν χρήσιμα εργαλεία για την προσομοίωση των υπογείων νερών και έχουν τα εξής τρία κύρια χαρακτηριστικά: (Prickett,

1979)

- Λύνουν σύνθετα προβλήματα ροής υπογείων νερών
- Διατίθενται σε οποιονδήποτε θέλει να ασχοληθεί με τα υπόγεια νερά
- Μεταβιβάζονται, με πολύ απλό τρόπο μέσω των Η/Υ,

Οι κυριότερες εφαρμογές των μοντέλων υπόγειων νερών, αφορούν τις παρακάτω παραμέτρους (Oude Essink, 2000; Καλλιώρας Α., 2015)

- Πρόβλεψη και προσομοίωση συγκεκριμένων μετρήσεων και δραστηριοτήτων,
- Σχεδιασμός και αποτίμηση διαφόρων σεναρίων και στρατηγικών,
- Βελτιστοποίηση της χρήσης των υδατικών πόρων.

Η σύγχρονη εφαρμογή διαφόρων μοντέλων προσφέρει λύσεις σε ευρύ φάσμα προβλημάτων. Αυτά περιλαμβάνουν την προσομοίωση υδροφορέων για την εντοπισμό περιοχών τεχνητού εμπλουτισμού και εκροής νερού, την παρακολούθηση της συμπεριφοράς των υδροφόρων συστημάτων σε μεγάλα χρονικά διαστήματα και την πρόβλεψη της κατάστασής τους, καθώς και τη μελέτη της αλληλεπίδρασης ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων και ταμειυτήρων υπογείου νερού. Επιπλέον, ασχολούνται με υποχωρήσεις εδάφους, θαλάσσια διείσδυση και προσομοίωση διάδοσης ρύπων στα υπόγεια νερά. (Καλλιώρας Α., 2015) Τα υδρογεωλογικά δεδομένα ταξινομούνται ανάλογα με το είδος του προβλήματος που εξετάζουν, δηλαδή αν είναι ποσοτικό ή ποιοτικό. Για παράδειγμα αν η προσομοίωση είναι ποσοτική, τα υδραυλικά ομοιώματα ή μοντέλα, αφορούν την χρήση των μαθηματικών εξισώσεων για την ανάλυση και ερμηνεία της ροής του υπογείου νερού, όπως ο Νόμος του Darcy και η εξίσωση συνέχειας. Για την ανάπτυξη ομοιώματος ποιοτικών παραμέτρων, υπεισέρχεται η εφαρμογή της εξίσωσης advection - dispersion, για την ομοίωση της μεταφοράς ρυπαντών, συμπεριλαμβάνοντας τις χημικές και φυσικές αντιδράσεις. (Oude Essink, 2000) Στο σημείο αυτό σημειώνεται ότι τα ποιοτικά μοντέλα, ασχολούνται επίσης με την μεταφορά θερμότητας στο υδρογεωλογικό σύστημα με την εφαρμογή της εξίσωσης convection - diffusion. (Καλλιώρας Α., 2015) Σήμερα, διατίθεται μεγάλος αριθμός υπολογιστικών κωδικών στην αγορά λόγω της ικανότητας τους να προσαρμόζονται στις συγκεκριμένες υδρογεωλογικές συνθήκες της περιοχής έρευνας. Οι παράμετροι που λαμβάνονται υπόψη κατά τη δημιουργία ενός υδρογεωλογικού μοντέλου περιλαμβάνουν τα φυσικά χαρακτηριστικά του υδρογεωλογικού συστήματος (υδραυλικές και υδροχημικές συνθήκες, γεωλογικές συνθήκες, είδος υδροφορίας κλπ.), τις υπολογιστικές αρχές (διαστάσεις, αριθμητικές μεθόδους, οριακές συνθήκες, παράμετροι εισόδου-εξόδου κλπ.) καθώς και άλλες πτυχές όπως γραφικές παραστάσεις, περιβάλλοντα εκτέλεσης και λειτουργικά συστήματα στα οποία θα χρησιμοποιηθεί ο κώδικας. Κατά την ταξινόμησή τους, τα μοντέλα υδρογεωλογίας κατατάσσονται σε δύο κατηγορίες, ανάλογα με το αν επικεντρώνονται στις υδραυλικές ή υδροχημικές διεργασίες. (Καλλιώρας Α., 2015)

5.3. Μαθηματικό μοντέλο

Γενικά, τα μαθηματικά μοντέλα στην υδρογεωλογία χρησιμοποιούνται για να επιλύσουν προβλήματα που σχετίζονται με την κίνηση του υπογείου, όπως η ροή του υπογείου νερού, η μεταφορά θερμότητας και ρύπων. Αυτά τα μοντέλα λαμβάνουν υπόψη τη γεωμετρία του συστήματος, τις συνθήκες στα όρια και τις αρχικές συνθήκες της διαδικασίας. Η χρήση αυτών των μοντέλων συνήθως συνοδεύεται από την εφαρμογή αναλυτικών ή αριθμητικών μεθόδων. Για την δημιουργία ενός μαθηματικού μοντέλου το πρώτο βήμα είναι να κατανοήσουμε τη φυσική συμπεριφορά

- **Αναλυτικές μέθοδοι**

Στο παρελθόν, οι αναλυτικές μέθοδοι χρησιμοποιούνταν ευρέως για την αντιμετώπιση υδρογεωλογικών προβλημάτων. Παρόλα αυτά, η αποτελεσματικότητά τους ήταν περιορισμένη και εφαρμόζονταν μόνο σε περίπου το 20% των περιπτώσεων. Μια κοινή χρήση αυτών των μεθόδων ήταν η επίλυση εξισώσεων πίεσης και ροής υπογείου νερού σε διάφορες χωρικές και χρονικές συνθήκες. Πολλοί ερευνητές ανέπτυξαν αναλυτικές λύσεις για τη μονοδιάστατη ροή υπογείου νερού και τη μεταφορά διαλυμένων ουσιών. Πλεονέκτημα αυτών των μεθόδων αποτελεί η αποτελεσματική επίλυση διάφορων φυσικών παραμέτρων του υδροφόρου, όπως η μεταβιβασιμότητα και η αποθηκευτικότητα. Ωστόσο, η χρήση τους περιορίζεται σε απλά και ιδεατά προβλήματα, όπως ομογενείς υδροφόροι, μονοδιάστατη ή δισδιάστατη ροή, και σταθερή διεπιφάνεια αλμυρού-γλυκού νερού.

- **Αριθμητικές μέθοδοι**

Για να αντιμετωπίσουμε πολύπλοκα υδρογεωλογικά φαινόμενα, όπως ανομοιογενείς και ανισότροπους υδροφόρους, σχηματισμό επαλληλίας υδροφόρων με ημιπερατά στρώματα, ανομοιόμορφα δίκτυα παραγωγικών υδρογεωτρήσεων, και την παρουσία ποταμών και χειμάρρων, η απλή χρήση αναλυτικών μεθόδων αποδεικνύεται ανεπαρκής. Σε τέτοιες περιπτώσεις, είναι αναγκαίο να αξιοποιήσουμε αριθμητικές μεθόδους και, συνεπώς, να βασιστούμε στους ηλεκτρονικούς υπολογιστές. Τα αριθμητικά μοντέλα χρησιμοποιούνται για να προσομοιάσουν φυσικά φαινόμενα σε συστήματα υπόγειων νερών. Κατ' αρχάς, ορίζονται με όσο το δυνατόν περισσότερη ακρίβεια οι γεωλογικές και υδρογεωλογικές παράμετροι του πεδίου μελέτης. Στη συνέχεια, εντοπίζονται οι κύριες φυσικές διεργασίες που επικρατούν και επιλέγονται οι αντίστοιχοι φυσικοί νόμοι που τις διέπουν, εκφραζόμενοι μαθηματικά μέσω διαφορικών εξισώσεων. Στη συνέχεια, αυτές οι εξισώσεις, που συνήθως δεν είναι δυνατόν να λυθούν αναλυτικά, επιλύονται με αριθμητικές μεθόδους. Το κύριο πλεονέκτημα των αριθμητικών μοντέλων είναι ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να μελετήσουν και να προβλέψουν την εξέλιξη σύνθετων φαινομένων που σχετίζονται με τις υπόγειες ροές, όπως η εκμετάλλευση και διαχείριση υπόγειων πόρων, η προστασία από την υπαλμύριση παράκτιων υδροφορέων και άλλα.

Η ανάγκη για τη χρήση αριθμητικών μεθόδων προσομοίωσης απορρέει από τη δυσκολία των αναλυτικών λύσεων να ανταπεξέλθουν αξιόπιστα στα πρακτικά προβλήματα των διαφόρων εφαρμογών. Συγκεκριμένα, οι αναλυτικές λύσεις συχνά αντιμετωπίζουν δυσκολίες ή αδυναμίες στα ακόλουθα σενάρια: τη σύνταξη αναλυτικών λύσεων για τις γενικές μορφές των διαφορικών εξισώσεων ροής στους υπογείους υδροφορείς, ιδίως για πολυδιάστατα προβλήματα, την περιγραφή πεδίων ροής με σύνθετη ή ακανόνιστη γεωμετρία ορίων, και την επίλυση προβλημάτων που αφορούν την έντονη ετερογένεια των παραμέτρων και τη λειτουργία συστημάτων πηγαδιών.

Οι αριθμητικές μέθοδοι επίλυσης διαφορικών εξισώσεων διακρίνονται στις εξής κύριες κατηγορίες:

1. Μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών: Στην συγκεκριμένη μέθοδο, ο χώρος μελέτης διαιρείται σε ένα πλέγμα ορθογώνιας μορφής και οι εξισώσεις επιλύονται στα σημεία αυτού του πλέγματος. Αν και αυτή η μέθοδος είναι αποτελεσματική σε προβλήματα δύο ή τριών διαστάσεων, γενικά δεν θεωρείται η βέλτιστη λόγω των περιορισμών που επιβάλλει η ορθογωνική μορφή του πλέγματος και της δυσκολίας που προκύπτει σε

ορισμένες περιπτώσεις για την ακριβή αριθμητική διακριτοποίηση των εξισώσεων. Όσον αφορά την αριθμητική τεχνική που χρησιμοποιείται, αυτή η μέθοδος θεωρείται η πιο απλή, κατανοητή και ευέλικτη από υπολογιστικής άποψης, καθιστώντας την άμεσα εφαρμόσιμη.

2. Μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων: Σύμφωνα με αυτήν τη μέθοδο, το πεδίο εφαρμογής διαιρείται σε μικρότερες υποπεριοχές, γνωστές ως πεπερασμένα στοιχεία. Οι εξισώσεις επιλύονται εντός κάθε στοιχείου με τη χρήση της μεθόδου των διαφορών ή της μεθόδου των σταθμισμένων υπολοίπων. Στη συνέχεια, η σύνθεση των αποτελεσμάτων από τα επιμέρους στοιχεία οδηγεί σε ένα αλγεβρικό πρόβλημα που πρέπει να επιλυθεί.

Τα βασικά πλεονεκτήματα της μεθόδου που την καθιστούν εξαιρετικά χρήσιμη και αποτελεσματική είναι τα εξής: Καταρχάς, αναπαριστά φυσικά τα ακανόνιστα γεωμετρικά όρια των πεδίων και τις οριακές συνθήκες, προσφέροντας μια ρεαλιστική αναπαράσταση του πραγματικού περιβάλλοντος. Δεύτερον, προσομοιώνει την ακρίβεια, την ετερογένεια και την ανισοτροπία των πεδίων ροής, λαμβάνοντας υπόψη τις ποικίλες συνθήκες που επικρατούν στο σύστημα. Τέλος, προσομοιώνει με ακρίβεια ειδικές περιοχές όπου υπάρχουν ή αναμένονται έντονες μεταβολές του φορτίου, καθώς είναι εύκολο να προσαρμοστεί η πυκνότητα των σημείων του δικτύου σε τοπικό επίπεδο.

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται επιτυχώς τόσο σε δισδιάστατα όσο και σε τρισδιάστατα προβλήματα. Στα δισδιάστατα προβλήματα, το πεδίο ροής μπορεί να είναι είτε οριζόντιο είτε κατακόρυφο, καλύπτοντας έτσι όλο το φάσμα των πρακτικών εφαρμογών. Επιπλέον, επιτρέπει μια πιο ευέλικτη διακριτοποίηση του πεδίου και των ορίων του σε σύγκριση με άλλες μεθόδους όπως η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών.

Ωστόσο, μειονεκτήματα της μεθόδου περιλαμβάνουν την πολυπλοκότητα των τελικών αλγορίθμων και τη δυσκολία στον προγραμματισμό. Η ανάπτυξη αποτελεσματικών αλγορίθμων μπορεί να απαιτήσει περίπλοκες διαδικασίες, ενώ η υλοποίησή τους σε προγραμματιστικό κώδικα μπορεί να απαιτήσει εξειδικευμένες γνώσεις και δεξιότητες.

3. Μέθοδος των οριακών στοιχείων

Η μέθοδος των οριακών στοιχείων φαίνεται να διαθέτει πλεονεκτήματα σε σύγκριση με τις μεθόδους "πεδίου", όπως οι μέθοδοι πεπερασμένων διαφορών και πεπερασμένων στοιχείων. Ανάμεσα στα πλεονεκτήματά της συγκαταλέγονται η μεγάλη ακρίβεια στο εσωτερικό του πεδίου, η απλότητα εισαγωγής δεδομένων και το μικρό μέγεθος των συστημάτων αλγεβρικών εξισώσεων. Παρόλα αυτά προκύπτουν ορισμένα μειονεκτήματα, όπως η δυσκολία να περιγραφούν τα ετερογενών πεδίων και η έλλειψη απλότητας για την επίλυση των μη μόνιμων ροών. Παρ' όλα αυτά, η μέθοδος αποτελεί εξαιρετική επιλογή για ειδικές κατηγορίες προβλημάτων, ιδίως όταν εμπλέκονται συστήματα πηγαδιών, με το μεγαλύτερο πλεονέκτημά της να είναι η μείωση των διαστάσεων του προβλήματος. Η εξέλιξη στον τομέα των αριθμητικών μεθόδων για τη μοντελοποίηση της ροής των υπόγειων υδάτων αναδεικνύει τη σημασία της συνεχούς έρευνας και ανάπτυξης. Παρά την τεράστια πρόοδο που έχει σημειωθεί, υπάρχουν ακόμα πολλές προκλήσεις και πεδία βελτίωσης στον τομέα αυτό. (Καλλιώρας Α., 2015)

Τα αριθμητικά μοντέλα στον τομέα της υδρογεωλογίας χωρίζονται συνήθως σε τρεις κύριες κατηγορίες βάσει της χρήσης τους. Τα μοντέλα πρόβλεψης χρησιμοποιούνται για να προβλέψουν την εξέλιξη ενός υδροφόρου συστήματος με την πάροδο του χρόνου, απαιτώντας

συνήθως συχνές μετρήσεις για τη διόρθωση και τη βελτίωση της ακρίβειάς τους. Τα μοντέλα ερμηνείας χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν και να μελετήσουν την υδροδυναμική κατάσταση ενός συστήματος, καθώς επίσης και για τη διοργάνωση των σχετικών δεδομένων. Τα μοντέλα ανάλυσης εστιάζουν στην ανάλυση των υπόγειων ροών σε συγκεκριμένα υδρογεωλογικά συστήματα, εστιάζοντας συνήθως σε πιο συγκεκριμένες πτυχές της ροής, όπως η κίνηση του υδάτινου ροής μέσω ενός υπογείου σχηματισμού ή η επίδραση από εισροές ή αποθέματα. Κάθε κατηγορία μοντέλων έχει τον δικό της ρόλο και χρησιμοποιείται για συγκεκριμένους σκοπούς στο πεδίο της υδρογεωλογίας. (Καλλιώρας Α., 2015)

Τα στάδια για την εφαρμογή ενός αριθμητικού μοντέλου προσομοίωσης των υπόγειων νερών περιλαμβάνουν τα ακόλουθα:

1. Καθορισμός του σκοπού εφαρμογής του μοντέλου: Αποφασίζεται ο σκοπός για τον οποίο θα χρησιμοποιηθεί το μοντέλο.
2. Προσδιορισμός του εννοιολογικού μοντέλου: Καθορίζονται οι υδρογεωλογικές παράμετροι και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του υδροφορέα με βάση τα δεδομένα υπαίθρου.
3. Επιλογή της κυρίαρχης εξίσωσης και του υπολογιστικού προγράμματος: Επιλέγεται η κύρια εξίσωση που θα χρησιμοποιηθεί για το μοντέλο και το κατάλληλο υπολογιστικό πρόγραμμα.
4. Σχεδιασμός του μοντέλου: Δημιουργείται το μοντέλο, συμπεριλαμβανομένου του σχεδιασμού του κανάβου, της επιλογής των βημάτων χρόνου και των αρχικών και οριακών συνθηκών.
5. Ρύθμιση του μοντέλου: Πραγματοποιείται επεξεργασία των δεδομένων υπαίθρου που έχουν εισαχθεί στο μοντέλο, συνήθως με τη χρήση τεχνικών όπως η δοκιμή και σφάλμα ή η αυτόματη αντιστροφή.
6. Επαλήθευση του μοντέλου: Αξιολογείται η ικανότητα του μοντέλου να προσομοιώσει την υδροδυναμική κατάσταση του συστήματος.
7. Εφαρμογή του μοντέλου: Εφαρμόζεται το μοντέλο για την ερμηνεία, πρόβλεψη ή ανάλυση των υπόγειων ροών.
8. Παρουσίαση των αποτελεσμάτων: Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται και αναλύονται.

Παρόλο που τα σύγχρονα λογισμικά για υδρογεωλογικά μοντέλα χρησιμοποιούνται ευρέως, συχνά αντιμετωπίζουν προβλήματα σχετικά με την ενημέρωση και τη διαθεσιμότητά τους. Επίσης, παρά το γεγονός ότι τα αριθμητικά υδρογεωλογικά μοντέλα σχεδιάζονται για συγκεκριμένα προβλήματα, μερικές φορές μπορεί να είναι δύσκολα στη χρήση. Επιπλέον, η προσαρμογή και η εφαρμογή τους σε νέα περιβάλλοντα με νέα δεδομένα μπορεί να απαιτεί τη δημιουργία νέων μοντέλων από την αρχή. Παρόλες αυτές τις δυσκολίες, τα αριθμητικά υδρογεωλογικά μοντέλα αποτελούν ισχυρά εργαλεία για τους ερευνητές όταν χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με αντίστοιχη γεωλογική έρευνα και υδρολογική ανάλυση. Στις εφαρμογές τεχνητού εμπλουτισμού, σχεδόν αποκλειστικά χρησιμοποιούνται τα αριθμητικά μοντέλα, όπως καταδεικνύουν πολλές. Η ακρίβεια στην εκτίμηση της υδραυλικής φόρτισης από αυτά τα μοντέλα, με την υποστήριξη των αριθμητικών μεθόδων, εξαρτάται κυρίως από την σωστή κατανόηση του προβλήματος και την επιλογή της κατάλληλης μεθόδου. Αυτά τα μοντέλα, λόγω της ευελιξίας και της αξιοπιστίας τους, είναι εξίσου χρήσιμα τόσο σε μεγάλες εφαρμογές όσο και σε μικρότερες έρευνες. Έχουν προσφέρει σημαντική βοήθεια στον σχεδιασμό και την υλοποίηση μεγάλων εφαρμογών τεχνητού εμπλουτισμού.

(Καλλιώρας Α., 2015) Κατά τη διάρκεια της εφαρμογής ορισμένων τύπων τεχνητού εμπλουτισμού, παρουσιάζονται περίπλοκες υδρολογικές συνθήκες. Παραδείγματα αυτών περιλαμβάνουν τις συνθήκες ροής σε φρεάτιους υδροφόρους με σημαντικές μεταβολές στην κορεσμένη ζώνη, τις συνθήκες ροής σε μερικώς κορεσμένα συστήματα που απαιτούν τη συνδυαστική χρήση μοντέλων υπόγειας ροής με μοντέλα επιφανειακής υδρολογίας, τις συνθήκες ροής σε περίπλοκα συνδυασμένα υπόγεια-επιφανειακά συστήματα νερού, την αλληλεπίδραση μεταξύ υδρολογικών και οικονομικών παραγόντων, καθώς και τη μεταφορά ρυπαντών στον υδροφόρο.

5.4. Ο κώδικας MODFLOW

Αρχικά, το MODFLOW αναπτύχθηκε μόνο ως ένα μοντέλο ροής υπόγειων υδάτων. Οι δημιουργοί του θεώρησαν ότι η επίλυση πρόσθετων σχετικών εξισώσεων θα πρέπει να γίνεται με ξεχωριστά προγράμματα. Για παράδειγμα, μια σχετική εξίσωση μπορεί να είναι μια εξίσωση μεταφοράς που χρησιμοποιεί τις ροές που υπολογίζονται από την εξίσωση ροής υπόγειων υδάτων. Μια άλλη προσέγγιση είναι η εκτίμηση παραμέτρων, η οποία λύνει μια επιπρόσθετη εξίσωση για να υπολογίσει τις βέλτιστες υδραυλικές παραμέτρους που ταιριάζουν καλύτερα με τις παρατηρήσεις στον πραγματικό κόσμο. Προς τα τέλη της δεκαετίας του '90, πολλοί προγραμματιστές προγραμμάτων μοντελοποίησης πίστευαν ότι η συμπερίληψη τέτοιων σχετικών δυνατοτήτων σε ένα μόνο πρόγραμμα θα διευκόλυνε την ανάπτυξη και χρήση του. Έτσι, έγινε η απόφαση να διευρυνθεί το πεδίο εφαρμογής του MODFLOW για να επιτρέψει την άμεση ενσωμάτωση δυνατοτήτων όπως η μεταφορά και η εκτίμηση παραμέτρων. (Harbaugh, 2005)

Ο κώδικα MODFLOW αποτελεί έναν από τους πιο διαδεδομένους υπολογιστικούς κώδικες για την μελέτη και την ερμηνεία της υπόγειας ροής του νερού. Με την χρήση αυτού του κώδικα το νερό προσομοιώνεται μέσω ενός συνόλου μαθηματικών εκφράσεων που αναπαριστούν τόσο την ροή, όσο και τα φυσιογραφικά χαρακτηριστικά του συστήματος. Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών, συνδυάζεται η εξίσωση ροής του Darcy με την εξίσωση συνέχειας. Έτσι, ο κώδικας MODFLOW επιτρέπει την προσομοίωση της σταθερής ροής, καθώς και της μεταβατικής ροής, τόσο σε μονοδιάστατες όσο και σε δισδιάστατες και τρισδιάστατες συνθήκες. (Καλλιώρας Α., 2015)

Η αρχή του μαθηματικού μοντέλου του κώδικα MODFLOW περιλαμβάνει μια σειρά από μαθηματικές απλοποιήσεις και υποθέσεις με σκοπό τη μετατροπή των πραγματικών δεδομένων που περιγράφουν το υδρογεωλογικό σύστημα σε αντίστοιχο μαθηματικό μοντέλο που μπορεί να αναλυθεί από τον υπολογιστή. Ορισμένες από τις αρχές που διέπουν τον κώδικα περιλαμβάνουν τα εξής: το υδρογεωλογικό σύστημα μπορεί να προσομοιωθεί για συνθήκες σταθερής και μεταβαλλόμενης ροής, το μαθηματικό υδρογεωλογικό σύστημα εφαρμόζει και αξιοποιεί την αρχή των πεπερασμένων διαφορών για ένα block-center, δεν υφίσταται ροή πέρα από τα όρια του μοντέλου, το μέσο (κατά πρώτιστα πορώδες) που πρόκειται να προσομοιωθεί δύναται να είναι ομοιογενές ή ανισοτροπικό, το σύστημα ροής μπορεί να έχει ακανόνιστο σχήμα, περιλαμβάνοντας ελεύθερο, μερικώς υπό-πίεση ή υπό-πίεση υδροφόρο, καθώς και συνδυασμό των παραπάνω, και πραγματοποιεί πλήρη προσομοίωση της ροής σε τρισδιάστατη μορφή ή απεικόνιση.

Ο κώδικας λειτουργεί βάσει ορισμένων παραδοχών για την ακρίβεια της προσομοίωσης. Καταρχάς, υποθέτουμε ότι η πυκνότητα του υπογείου νερού παραμένει σταθερή σε όλο τον υδροφόρο. Επιπλέον, η κίνηση του υπογείου νερού περιγράφεται σε τρεις διαστάσεις (x, y, z), λαμβάνοντας υπόψη τη γεωμετρία του εδάφους. Τέλος, υποθέτουμε ομοιόμορφη και ομοιογενή

κατανομή των υδρογεωλογικών ιδιοτήτων, όπως η περατότητα, σε κάθε κελί του υδρογεωλογικού μοντέλου. (Καλλιώρας Α., 2015)

5.5. Διακριτοποίηση του πεδίου ορισμού του μοντέλου

Ο υπολογιστικός κώδικας MODFLOW χρησιμοποιεί ένα πεδίο ορισμού μοντέλου, το οποίο διακριτοποιείται σε επιμέρους blocks, χωρίζοντας τη συνολική επιφάνεια σε αποσπώμενες μονάδες. Κάθε block θεωρείται ομοιογενές σε οριζόντια και κατακόρυφη διεύθυνση, με το μέγεθός του να ορίζεται από τον χρήστη κατά τη διάρκεια της προεπεξεργασίας. Αυτή η διακριτοποίηση επιτρέπει μια ποικίλη χωρική ανάλυση για την περιοχή έρευνας, με τα στοιχεία του μοντέλου να διαφέρουν σε μέγεθος και όγκο, ενώ η κατανομή των υδραυλικών παραμέτρων κρίνεται ως ομοιογενής.

Στην προσομοίωση σταθερής κατάστασης, τόσο οι εισαγόμενες όσο και οι εξαγόμενες τιμές παραμένουν σταθερές. Ωστόσο, στη μεταβατική ροή, τα εισαγόμενα και εξαγόμενα στοιχεία του μοντέλου, καθώς και οι εξαγόμενες πηγές, μεταβάλλονται με το χρόνο. Ένα παράδειγμα αυτού είναι η μεταβολή του ρυθμού φυσικού εμπλουτισμού κατά τη διάρκεια μιας συγκεκριμένης χρονικής περιόδου, που αντιπροσωπεύει ένα χρονικά εξαρτώμενο στοιχείο εισόδου του μοντέλου. (Καλλιώρας Α., 2015)

Εξίσωση πεπερασμένης διαφοράς

Η εξίσωση πεπερασμένης διαφοράς του MODFLOW, θεωρώντας σταθερή την πυκνότητα του υγρού, έχει ως εξής (Oude Essink, 2000; Καλλιώρας Α., 2015)

$$\sum Q_i = S_s \frac{\Delta\phi}{\Delta t} \Delta V$$

Όπου:

Ss: η ειδική αποθηκευτικότητα του πορώδους υλικού

Qi: ο συνολικός ρυθμός παροχής σε κάθε block

ΔV : ο όγκος του συγκεκριμένου block

$\Delta\phi$: η μεταβολή του υδραυλικού φορτίου για χρονικό διάστημα Δt

5.6. Υδραυλική αγωγιμότητα

Το μέγεθος της υδραυλικής αγωγιμότητας περιγράφεται μαθηματικά από την παρακάτω εξίσωση

$$CR_{i,j+1/2,k} = \frac{k_{i,j+1/2,k} \Delta y \Delta z}{\Delta x}$$

, όπου $CR_{i,j+1/2,k}$ η υδραυλική αγωγιμότητα μεταξύ των κομβικών σημείων (ή κόμβων) $[i, j, k]$ και $[i, j+1, k]$ στην κατεύθυνση της γραμμής. Τα χαρακτηριστικά των στρωμάτων και ο ρυθμός κορεσμού καθορίζουν την τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας. (Καλλιώρας Α., 2015)

5.7. Υδατικό Ισοζύγιο

Στο συνολικό πεδίο ορισμού του μοντέλου, ο κώδικας MODFLOW υπολογίζει το υδατικό ισοζύγιο προκειμένου να επιβεβαιώσει την εγκυρότητα και την αξιοπιστία της μαθηματικής επίλυσης και να δώσει την συνολική απεικόνιση του συστήματος ροής. (Καλλιώρας Α., 2015)

5.8. Οριακές συνθήκες

Το MODFLOW είναι ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο για τη μοντελοποίηση υδρογεωλογικών συστημάτων. Το "Πρόβλημα Dirichlet" αναφέρεται στον τρόπο με τον οποίο ορίζονται οι πιέσεις (ή οι πιεζομετρικές τιμές) σε συγκεκριμένα σημεία του μοντέλου. Η δυνατότητα προσομοίωσης οριακών συνθηκών με σταθερή ροή ή του "Προβλήματος Neumann" είναι σημαντική γιατί επιτρέπει την προσομοίωση πιο πολύπλοκων σεναρίων. Με τη χρήση εξωτερικών πηγών εντός των ορίων, μπορείς να προσομοιώσεις διάφορες συνθήκες ροής και πιέσεων που μπορεί να προκύψουν σε πραγματικά υδρογεωλογικά συστήματα. Αυτό επιτρέπει στους μοντελιστές να εξετάζουν πιο πολύπλοκες καταστάσεις που μπορεί να επηρεάσουν τη ροή του νερού σε ένα υδρογεωλογικό σύστημα. Με τη χρήση αυτών των δυνατοτήτων, το MODFLOW γίνεται πιο ευέλικτο εργαλείο για τη μελέτη και την πρόβλεψη της συμπεριφοράς των υδρογεωλογικών συστημάτων. (Καλλιώρας Α., 2015)

6. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ – ΕΘΝΙΚΗ ΠΙΝΑΚΟΘΗΚΗ

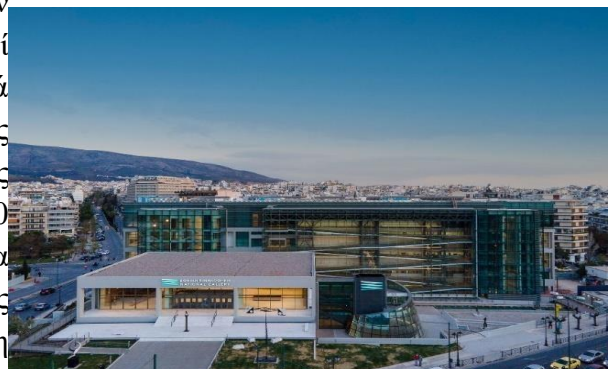
6.1. Ιστορικό

Η Εθνική Πινακοθήκη ιδρύθηκε στις 10 Απριλίου 1900 με νόμο που προέβλεπε και τη θέση του εφόρου του Ιδρύματος. Σε αυτή τη θέση διορίστηκε ο διάσημος ζωγράφος Γεώργιος Ιακωβίδης. Στις 28 Ιουνίου 1900 θεσμοθετήθηκε ο κανονισμός λειτουργίας της με τις πρώτες συλλογές να προέρχονταν από το Πολυτεχνείο και το Πανεπιστήμιο. Σε αυτές προστέθηκαν αμέσως μετά σημαντικές δωρεές. Σήμερα, η Εθνική Πινακοθήκη περιλαμβάνει περισσότερα από 20.000 έργα ζωγραφικής, γλυπτικής, χαρακτικής και άλλων μορφών τέχνης και αποτελεί το θησαυροφυλάκιο της νεότερης ελληνικής καλλιτεχνικής δημιουργίας, καλύπτοντας μια περίοδο από τα μεταβυζαντινά χρόνια ως τις μέρες μας. Διαθέτει επίσης μία αξιόλογη συλλογή δυτικοευρωπαϊκής ζωγραφικής. Η Εθνική Πινακοθήκη το 1954, συνενώθηκε με το κληροδότημα του Αλεξάνδρου Σούτσου, από όπου απέκτησε και την διπλή της ονομασία. Η Εθνική Πινακοθήκη έχει έναν θεσμικό ρόλο που περιλαμβάνει τη συλλογή, διαφύλαξη, συντήρηση, μελέτη και έκθεση έργων τέχνης. Ο σκοπός αυτών των δραστηριοτήτων είναι πολύπλευρος:

- Η αισθητική καλλιέργεια του κοινού, καθώς μέσω της έκθεσης των έργων τέχνης καθώς η Πινακοθήκη συμβάλλει στην εμπάθυνση της αισθητικής κατανόησης και εκτίμησης της τέχνης από το ευρύ κοινό.
- Την δια βίου εκπαίδευση μέσω της τέχνης μέσα από εκπαιδευτικά προγράμματα και εκθέσεις που ενισχύουν την εκπαιδευτική εμπειρία μέσα από την τέχνη, προωθώντας τη δια βίου μάθηση.
- Αποτελεί πηγή ψυχαγωγίας και απόλαυσης για το κοινό, προσφέροντας μια διαφορετική εμπειρία.
- Κατανόηση του πολιτισμού, των αξιών της κοινωνίας και την ιστορία του τόπου, μέσα από την επαφή με την ιστορία της τέχνης.

Έτσι, η Εθνική Πινακοθήκη αναδεικνύεται ως σημαντικός πολιτιστικός φορέας που συμβάλλει στην πνευματική και εκπαιδευτική ενδυνάμωση της κοινωνίας. Η Εθνική Πινακοθήκη - Μουσείο Αλεξάνδρου Σούτσου διαθέτει επίσης μια πλούσια βιβλιοθήκη με ανεκτίμητο υλικό και εξειδικευμένα εργαστήρια συντήρησης, εξοπλισμένα με τα πιο σύγχρονα συστήματα ανίχνευσης, μελέτης και αποκατάστασης έργων τέχνης.

Το 2000, πραγματοποιήθηκε ανακαίνιση του παλαιού κτιρίου, η οποία όμως δεν επαρκούσε ώστε να λυθούν τα προβλήματα επάρκειας χώρου. Το 2008 το Υπουργείο Πολιτισμού και Αθλητισμού διενήργησε δημόσιο διεθνή διαγωνισμό για την επέκταση των χώρων της Εθνικής Πινακοθήκης. Οι εργασίες ξεκίνησαν το 2014 και τελείωσαν τον Μάρτιο του 2021. Στο παλαιό κτίριο το οποίο είχε έκταση 9.720m², προστέθηκαν άλλα 11.040m², με αποτέλεσμα να υπερδιπλασιαστεί ο λειτουργικός χώρος του μουσείου σε συνολικά 20.760m². Το μουσείο απέκτησε πρόσθετους εκθεσιακούς χώρους εμβαδού 2.230m², σύγχρονες αποθήκες έργων τέχνης 1.645m², αμφιθέατρο 240 θέσεων, βιβλιοθήκη, σύγχρονα εργαστήρια συντήρησης, γραφεία διοίκησης, χώρους εκπαιδευτικών προγραμμάτων και μια μεγάλη αίθουσα υποδοχής 910m².



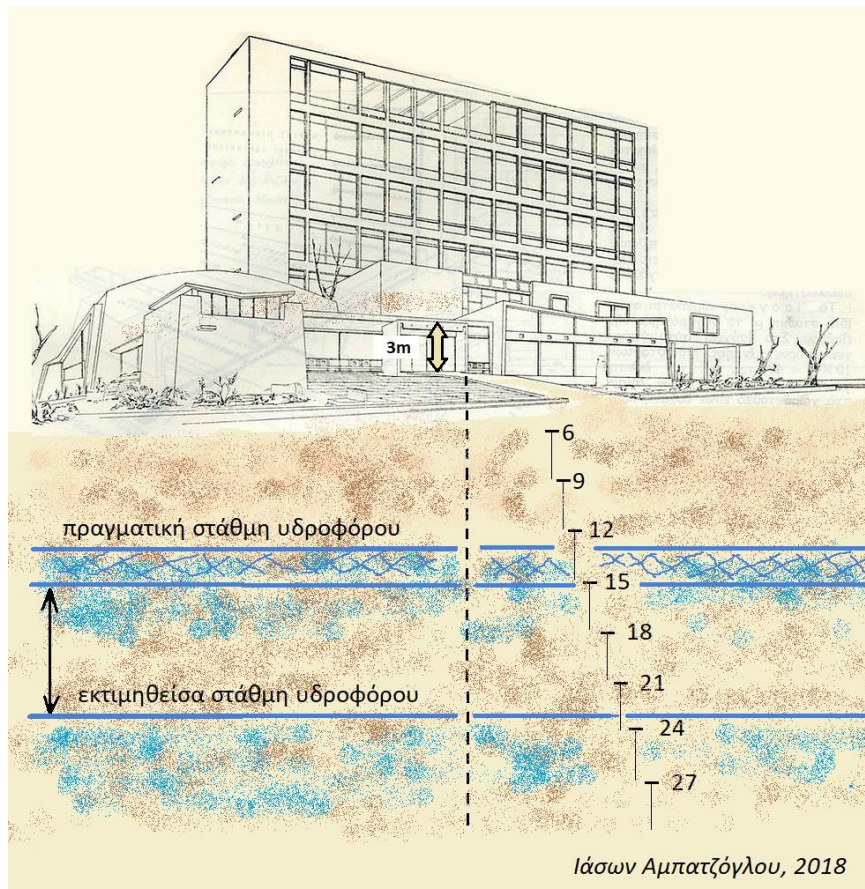
Εικόνα 6-1: Εθνική Πινακοθήκη-Μουσείο Αλεξάνδρου Σούτσου

6.2. Το πρόβλημα των υπόγειων υδάτων

Τον Μάρτιο του 2013, ξεκίνησαν τα έργα εκσκαφής για την κατασκευή των νέων κτιρίων της Εθνικής Πινακοθήκης. Σκοπός του χρονοδιαγράμματος ήταν το μουσείο να ανοίξει ξανά για το κοινό πριν τα Χριστούγεννα του 2015. Με την έναρξη των κατασκευών οι αρμόδιοι φορείς και η ανάδοχος εταιρία ήρθαν αντιμέτωποι με την λανθασμένη πρόβλεψη της αρχικής γεωτεχνικής μελέτης που αφορούσε το ύψος στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα της περιοχής. Πιο συγκεκριμένα η αρχική μελέτη έκανε λόγο για την στάθμη του υδροφόρου στα 15,85m έως 24,7m κάτω από το επίπεδο αναφοράς. Στην διάρκεια της εκσκαφής όμως η στάθμη του υδροφόρου εντοπίστηκε στα 4,5 με 7,7 μέτρα από το επίπεδο αναφοράς. Συγκρίνοντας λοιπόν την αρχική πρόβλεψη και τις πραγματικές συνθήκες, προκύπτει μια διαφορά της τάξεως των 8m περίπου. (Αμπατζόγλου Ι., 2018)

Τον Δεκέμβριο του 2013 συνεδρίασε το Κεντρικό Συμβούλιο Νεότερων Μνημείων για να δοθεί η έγκριση της νέας μελέτης (Εικόνα 6-2). Σύμφωνα με την νέα στατική μελέτη προκύπτουν τα παρακάτω:

- Η στάθμη σχεδιασμού του υδροφόρου ορίζοντα ορίζεται στα 4,2 μέτρα, δηλαδή στα 30 εκατοστά πάνω από τη μετρηθείσα και που σε σχέση με το δάπεδο του ισογείου του κεντρικού κτιρίου της Πινακοθήκης είναι στα -12,5 μέτρα.
- Προστίθενται φρεάτια άντλησης για την απομάκρυνση των νερών από τις εκσκαφές
- Κατασκευάζονται τρία μόνιμα αντλιοστάσια εξωτερικά του κτιρίου για λόγους ασφαλείας (δηλαδή, για την ανεπιθύμητη περίπτωση στην οποία παρατηρηθούν εισροές υδάτων στα υπόγεια του κτιρίου). (Αμπατζόγλου Ι., 2018)



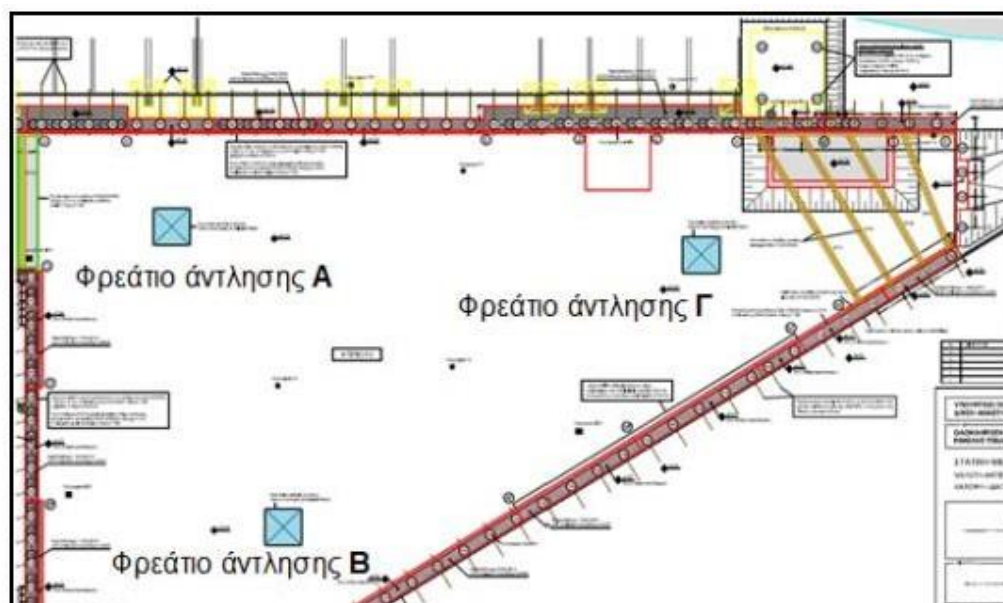
Εικόνα 6-2: Πραγματική και εκτιμηθείσα στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα της Εθνικής Πινακοθήκης (Αμπατζόγλου Ι., 2018)

Οι θέσεις των τριών φρεατίων άντλησης των υδάτων αποτυπώνονται προσεγγιστικά στο παρακάτω σχήμα (Εικόνα 6-3). Η παροχή άντλησης είναι $20\text{m}^3/\text{h}$ και η περίοδος άντλησης είναι από 08/08/2014 έως και 22/04/2016 (620 μέρες περίπου). Οι αντλήσεις δεν έγιναν σε μόνιμη βάση με σταθερό ρυθμό άντλησης για όλη αυτή την περίοδο, οπότε οι εκτιμήσεις για τον συνολικό όγκο των αντληθέντων υδάτων περιγράφονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 4-4).

Εκτιμήσεις συνολικού όγκου αντληθέντων υδάτων (m^3)					
Από 8/8/2014		Παροχή: $20\text{ m}^3 / \text{h}$			
έως 22/4/2016		Μέσος όρος ωρών λειτουργίας / 24ωρο			
δηλ. ≈ 621 ημέρες		8	12	16	24
70%	=435	69.552	104.328	139.104	208.656
80%	=497	79.488	119.232	158.976	238.464
90%	=559	89.424	134.136	178.848	268.272

Πίνακας 6-1: Εκτιμήσεις του συνολικού όγκου άντλησης των υπόγειων υδάτων (Αμπατζόγλου Ι., 2018)

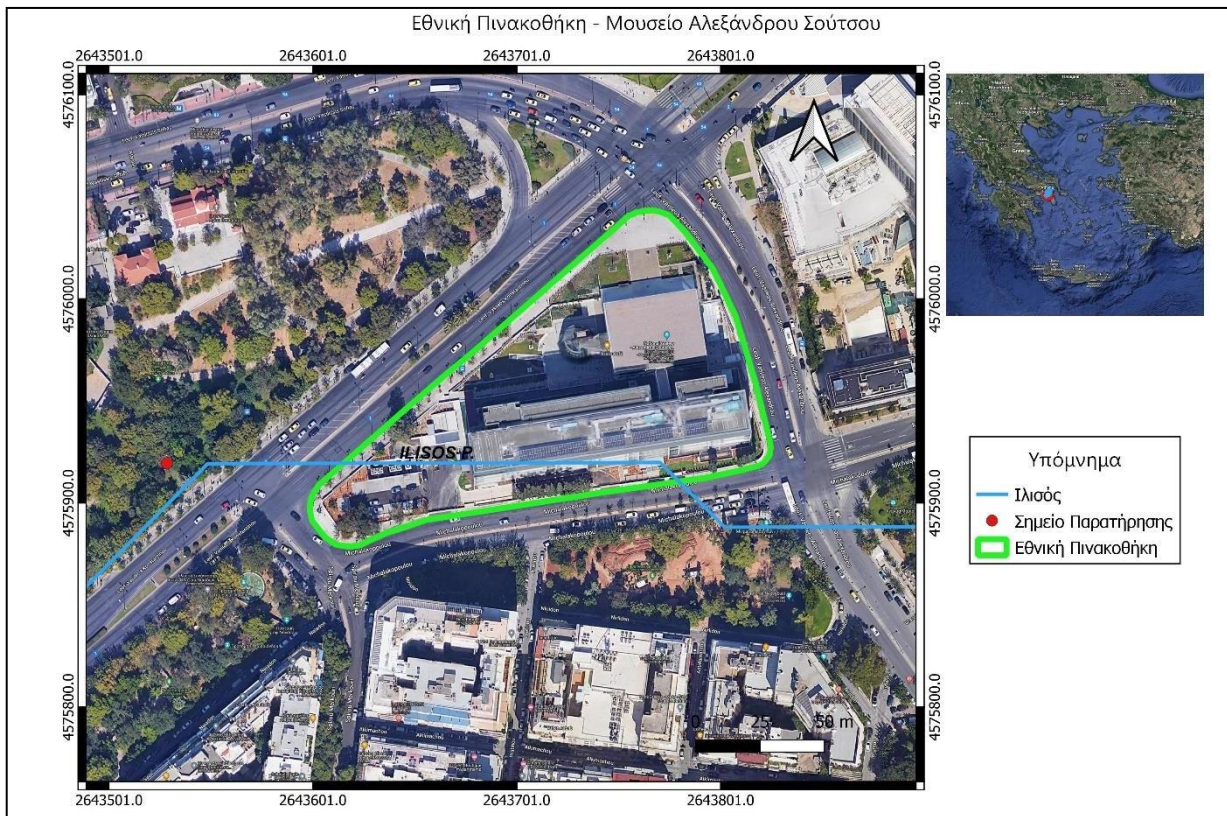
Οι ποσότητες του νερού που αντλήθηκαν από το υπέδαφος του εργοταξίου, διοχετεύτηκαν σε αγωγό του αποχετευτικού δικτύου της ΕΥΔΑΠ. Το γεγονός αυτό δεν ενδείκνυται στα πλαίσια της βιώσιμης διαχείρισης του υδροφόρου ορίζοντα, καθώς υπάρχουν αρκετές διαθέσιμες εναλλακτικές προτάσεις που θα μπορούσαν να αξιοποιήσουν τα ύδατα αυτά.



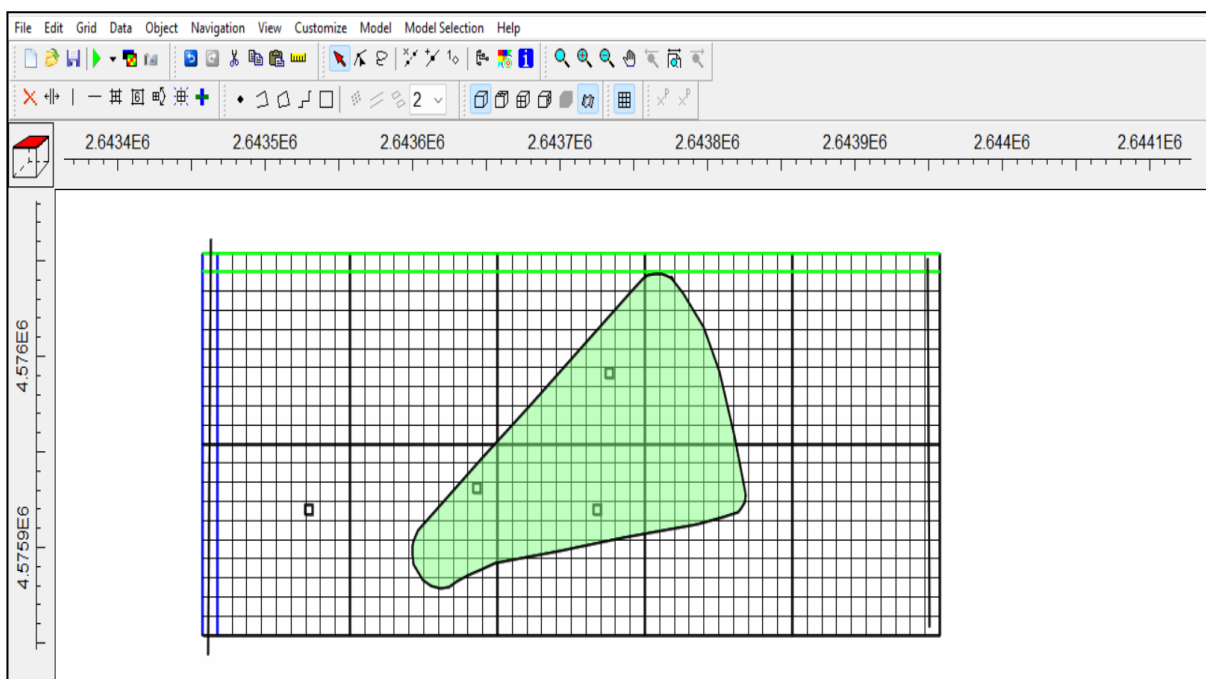
Εικόνα 6-3: Οι προσεγγιστικές θέσεις των φρεατίων άντλησης κατά τις εκσκαφές του εργοταξίου (Αμπατζόγλου Ι., 2018)

6.3. Χωρική, χρονική διακριτοποίηση και γεωμετρία

Για την χωρική διακριτοποίηση δημιουργήθηκε ένας κάρναβος με ισοδιάσταση κελιών στα 10m. Η περιοχή μελέτης έχει διαστάσεις 500m * 200m. Για την προσομοίωση του μοντέλου ροής θεωρήσαμε ότι ο υδροφόρος αποτελείται από 30 στρώματα, πάχους ίσο με 1m, με ίδια υδραυλικά χαρακτηριστικά. Ο υδροφόρος ορίζοντας εμφανίζεται στα 12 μέτρα κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, σύμφωνα και με τα παραπάνω δεδομένα. Οι υδραυλικές παράμετροι προσδιορίστηκαν από την βιβλιογραφία. (Εικόνα 6-4, Εικόνα 6-5)



Εικόνα 6-4: Περιοχή μελέτης Εθνική Πινακοθήκη – Μουσείο Αλεξάνδρου Σούτσου



Εικόνα 6-5: Δημιουργία καννάβου και ορισμός περιοχής μελέτης στο λογισμικό ModelMuse.

Οι οριακές συνθήκες που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση της υπόγειας ροής είναι οι εξής:

- Η βόρεια και η νότια πλευρά της έκτασης της Εθνικής Πινακοθήκης ορίστηκαν ως όριο σταθερού υδραυλικού φορτίου με το πακέτο Constant Head Package (CHD).
- Για την προσομοίωση των τριών φρεάτων άντλησης χρησιμοποιήθηκε το πακέτο Well package (WELL), με αρνητικό πρόσημο άντλησης ώστε να θεωρηθεί ως εκροή από το υπό μελέτη υδάτινο σύστημα.
- Για την σύγκριση των παρατηρούμενων προσομοιωμένων τιμών χρησιμοποιήθηκε το πακέτο Head Observation Package (HOB), κατά το οποίο χρησιμοποιήθηκε ένα πηγάδι παρακολούθησης το οποίο βρίσκεται απέναντι από το κτίριο της Εθνικής Πινακοθήκης.

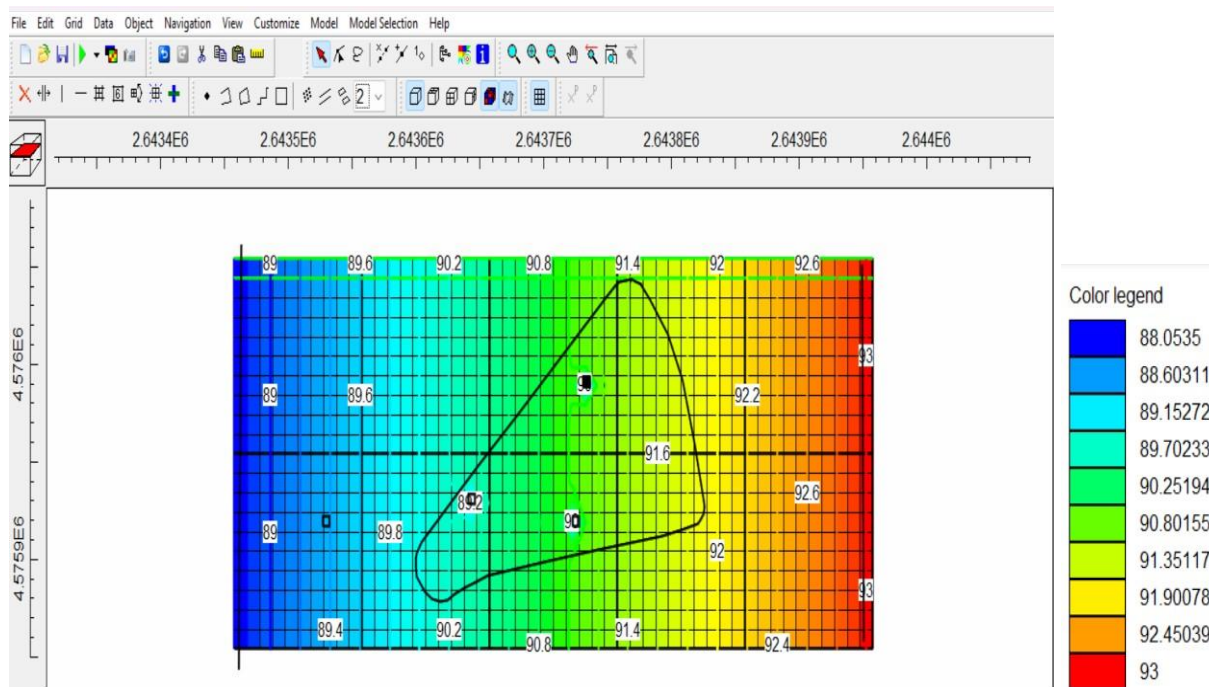
Οι χρονικές συνθήκες που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση της υπόγειας ροής είναι οι εξής:

- Η προσομοίωση για την τεχνική των βαθιών αντλήσεων έγινε αρχικά σε 4 χρονικές περιόδους με διάρκεια μίας (1) ώρας η καθεμία. Έπειτα έγιναν διάφορες αλλαγές στις χρονικές περιόδους άντλησης προκειμένου να παρατηρηθεί η αλλαγή στάθμης του υδροφόρου.

7. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ MODFLOW

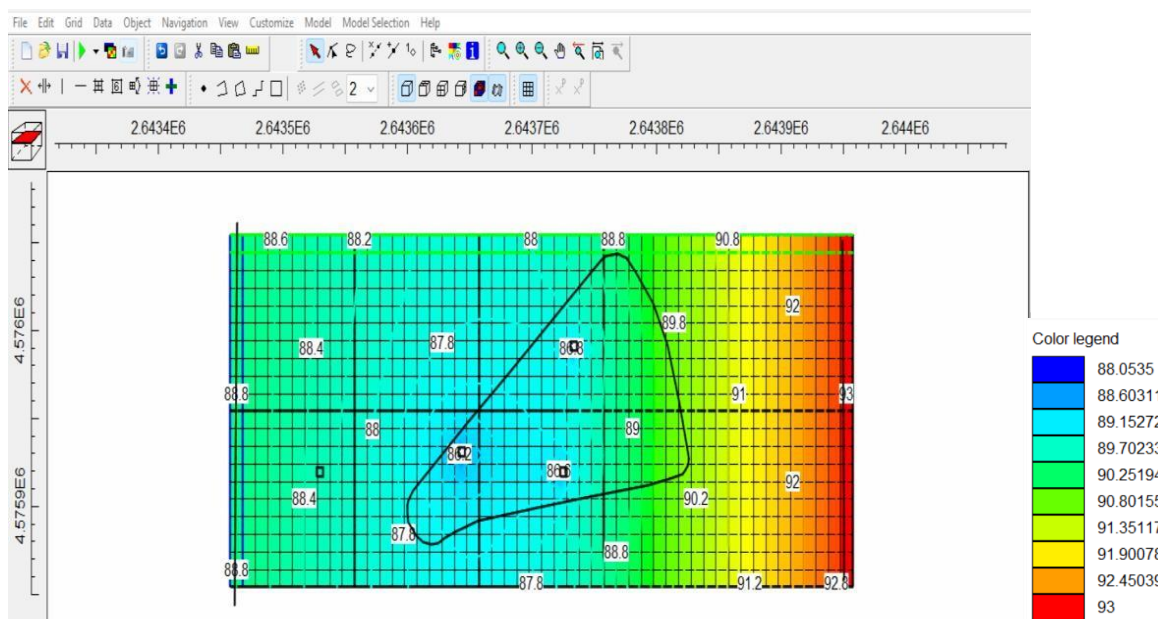
Στο μοντέλο ροής εφαρμόστηκαν σενάρια για διαφορετικές τεχνικές υποβιβασμού της στάθμης των υπόγειων νερών. Η πρώτη μέθοδος που εφαρμόστηκε ήταν των βαθιών αντλήσεων (deep wells), η οποία προσέγγιζε την πραγματική τεχνική που ακολουθήθηκε στο εργοτάξιο. Έπειτα εφαρμόστηκε η μέθοδος άντλησης με σωληνωτά φρέατα (point wells), δημιουργώντας σενάρια, αλλάζοντας την παροχή και το χρόνο άντλησης προκειμένου να βρεθεί η βέλτιστη λύση για την μεγαλύτερη πτώση στάθμης του υδροφόρου. Τέλος εφαρμόστηκε η μέθοδος αποκλεισμού των υδάτων (cut off walls), ώστε να παρατηρηθεί η συμπεριφορά των υπόγειων νερών σε αυτή την τεχνική.

Κατά το πρώτο σενάριο, τα τρία φρέατια άντλησης, λειτουργούν για 4 χρονικές περιόδους, διάρκειας μίας (1) ώρας, για κάθε χρονική περίοδο (stress period), με συνολικό ρυθμό άντλησης, στα $-3\text{m}^3/\text{h}$ η κάθε γεώτρηση για κάθε χρονικό βήμα. Το βάθος άντλησης ορίζεται από τα -12m έως τα -15m . Παρατηρείται μια πτώση του υδραυλικού φορτίου κατά -2m περίπου, εντός της περιοχής μελέτης. (Εικόνα 7-1)



Εικόνα 7-1: Απεικόνιση της μεταβολής του υδραυλικού φορτίου κατά την λειτουργία 3 βαθιών γεωτρήσεων (deep wells). Σενάριο 1

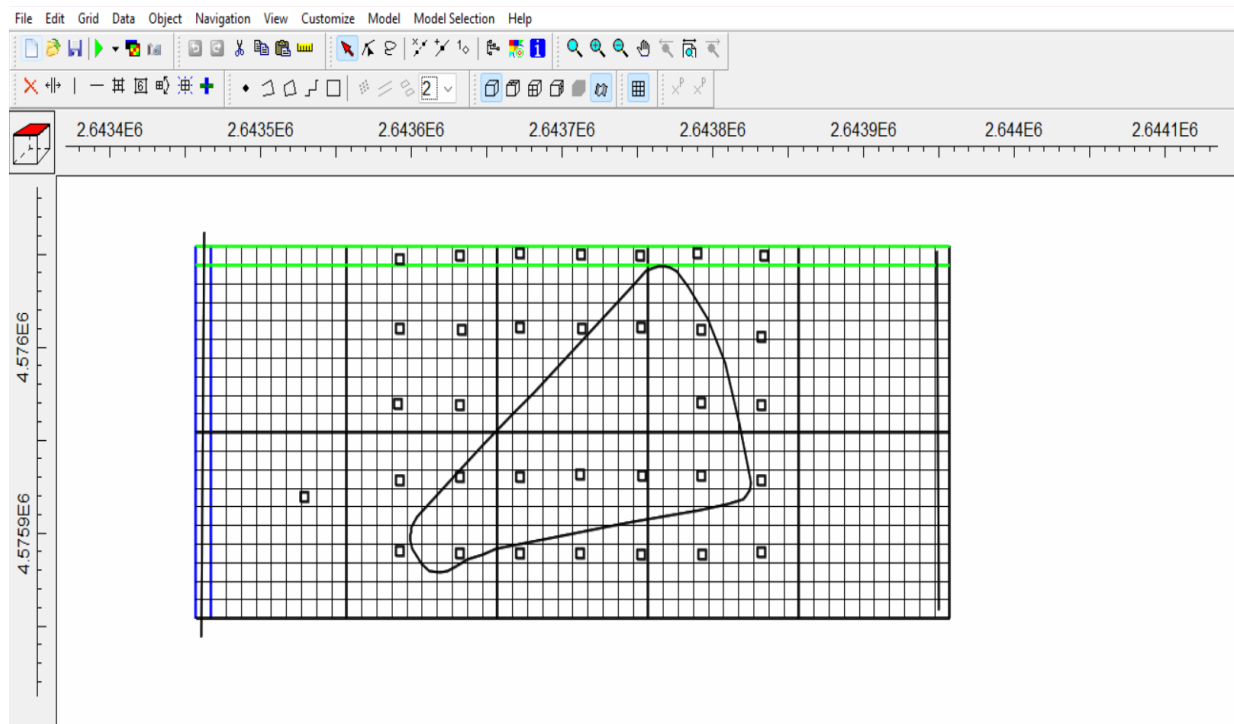
Στο δεύτερο σενάριο ο ρυθμός άντλησης διπλασιάζεται και στις τρεις φρεάτιες αντλήσεις, ανά χρονικό βήμα, για 4 χρονικές περιόδους. (Εικόνα 7-2)



Εικόνα 7-2: Μέθοδος άντλησης με βαθιές γεωτρήσεις (deep wells). Σενάριο 2

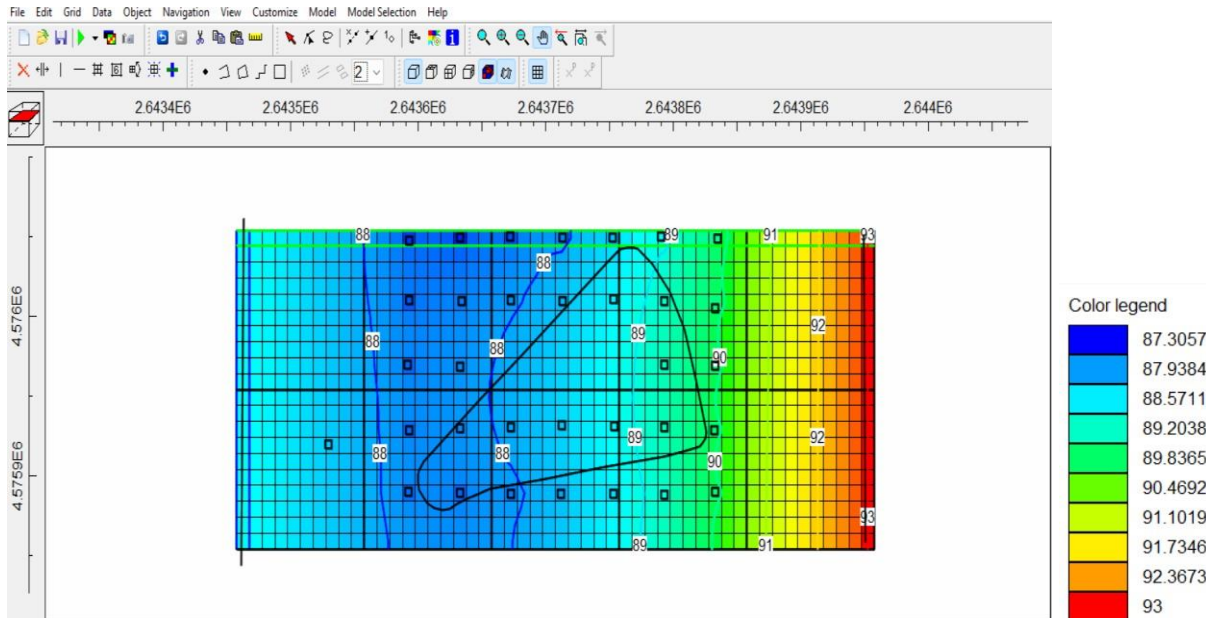
Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης σε αυτή την περίπτωση δείχνουν ότι το υδραυλικό φορτίο υποχωρεί στα 86,2m περίπου, δηλαδή αναφερόμαστε σε μια πτώση στάθμης σχεδόν 6 μέτρων. Επομένως καθώς διπλασιάζεται η άντληση ταυτόχρονα και στις τρεις γεωτρήσεις κρατώντας τον χρόνο σταθερό, η πτώση στάθμης τριπλασιάζεται.

Για το τρίτο σενάριο προσομοίωσης, εφαρμόστηκε η τεχνική των well points. Εισήχθησαν στο μοντέλο 35 γεωτρήσεις περιμετρικά της περιοχής μελέτης, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (Εικόνα 7-3):



Εικόνα 7-3: Διάταξη σωληνοτόπων φρεάτων

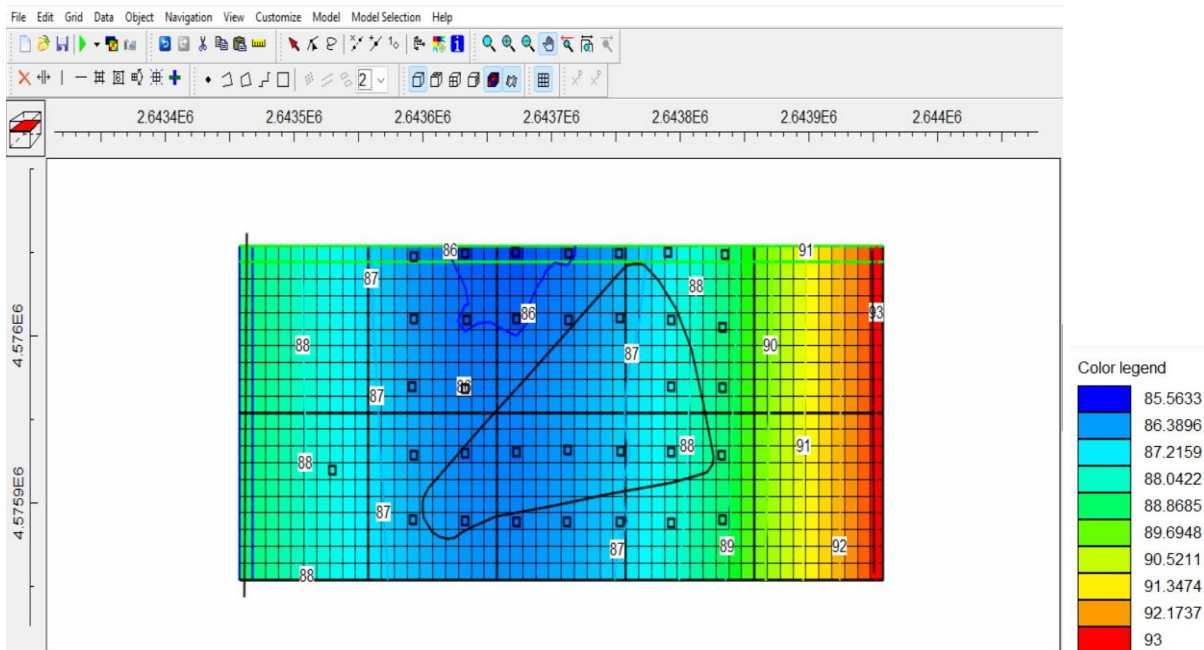
Οι 20 εξωτερικές γεωτρήσεις με βάση την παραπάνω διάταξη αντλούν νερό από το επίπεδο -12 έως το -13 για το πρώτη χρονική περίοδο (1h) με ρυθμό άντλησης 1m^3 η κάθε μια. Η εσωτερική διάταξη των γεωτρήσεων αντλεί νερό από το αμέσως επόμενο υδροφόρο στρώμα -13 έως το -14. Οι γεωτρήσεις αυτές λειτουργούν σε δεύτερο χρόνο, δηλαδή στο επόμενο χρονικό βήμα (stress period) για 1h με ρυθμό άντλησης 1m^3 η κάθε μια. Τα αποτελέσματα του μοντέλου είναι τα εξής:



Εικόνα 7-4: Αποτελέσματα προσομοίωσης με την μέθοδο άντλησης μέσω σωληνοτών φρεάτων- Σενάριο 3

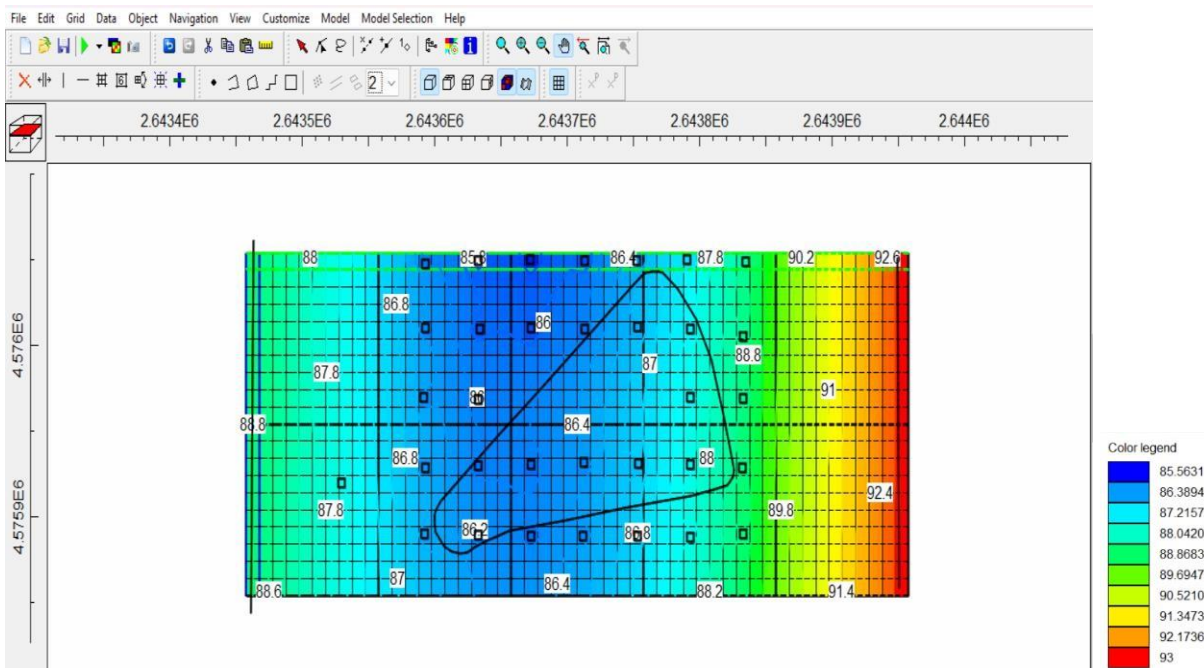
Κατά την προσομοίωση φαίνεται να υπάρχει πτώση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα σχεδόν 4 μέτρα μέσα στην περιοχή της Εθνικής Πινακοθήκης, όπου και θα γίνουν οι εκσκαφές. Το υδραυλικό φορτίο υποχωρεί από τα 92m περίπου στα 88m κατά την λειτουργία των αντλήσεων. (Εικόνα 7-4)

Στο τέταρτο σενάριο η διάταξη λειτουργεί για 2 χρονικές περιόδους, με χρονικό βήμα μίας ώρας. Η άντληση των γεωτρήσεων ορίζεται για $-1\text{m}^3/\text{h}$. Η εξωτερική διάταξη των γεωτρήσεων αντλεί από το στρώμα -12 και η εσωτερική από το στρώμα -13. Το υδραυλικό φορτίο κατέρχεται στα 87m. (Εικόνα 7-5)



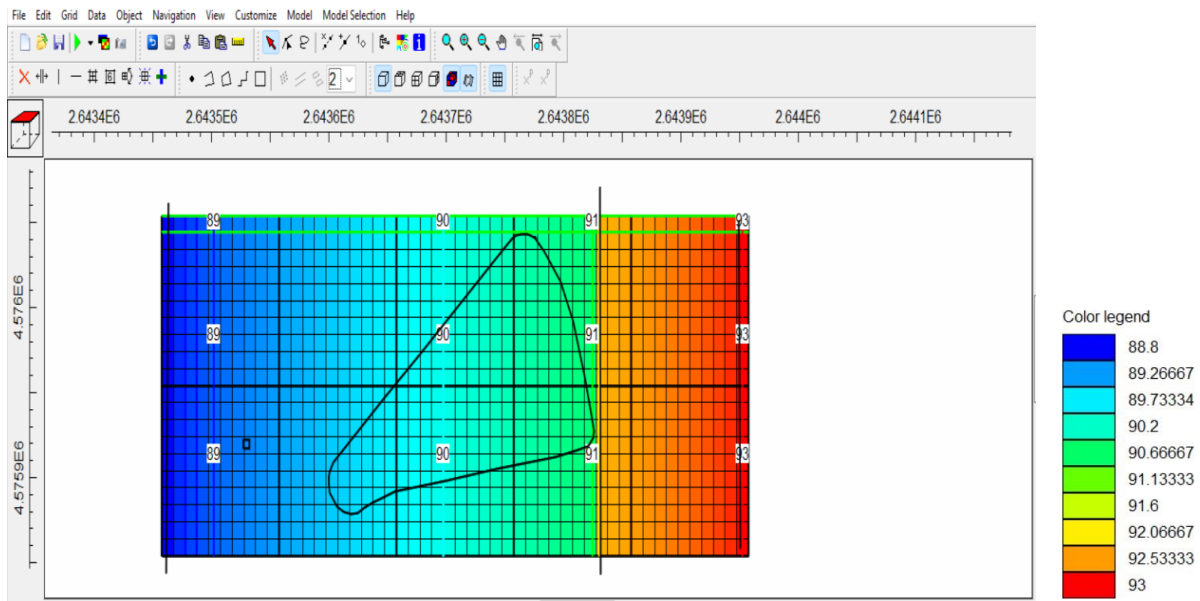
Εικόνα 7-5: Αποτελέσματα προσομοίωσης με την μέθοδο άντλησης μέσω σωληνωτών φρεάτων - Σενάριο 4

Στο πέμπτο σενάριο η διάταξη λειτουργεί για 4 χρονικές περιόδους, με χρονικό βήμα μίας ώρας. Η άντληση των γεωτρήσεων ορίζεται για $-1 \text{ m}^3/\text{h}$. Η εξωτερική διάταξη των γεωτρήσεων αντλεί από το στρώμα υδρογεωλογικό στρώμα -12 και η εσωτερική από το στρώμα -13. Το υδραυλικό φορτίο κατέρχεται στα 86,4m. (Εικόνα 7-6)

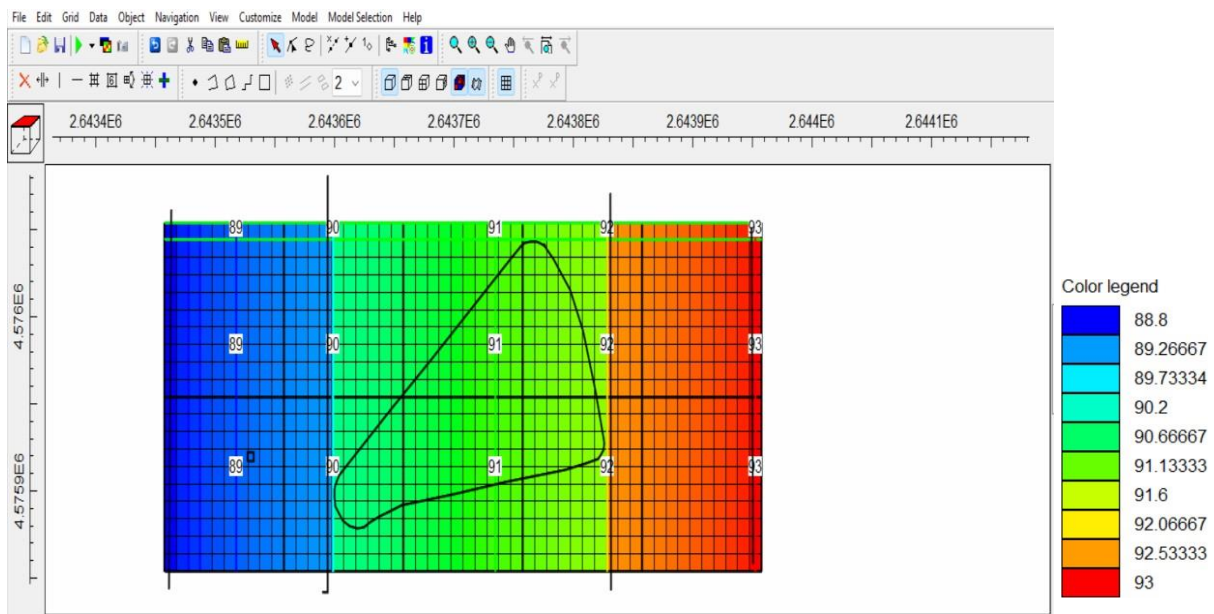


Εικόνα 7-6: Αποτελέσματα προσομοίωσης με την μέθοδο άντλησης μέσω σωληνωτών φρεάτων - Σενάριο 5

Στο πέμπτο σενάριο θα εφαρμοστεί η τεχνική των cut-off walls προκειμένου να αποτραπεί η είσοδος των υπόγειων νερών στην περιοχή εργασίας. Θεωρούμε ότι εισάγεται ένας φραγμός πολύ χαμηλής διαπερατότητας στο έδαφος. (Εικόνα 7-7, Εικόνα 7-8)



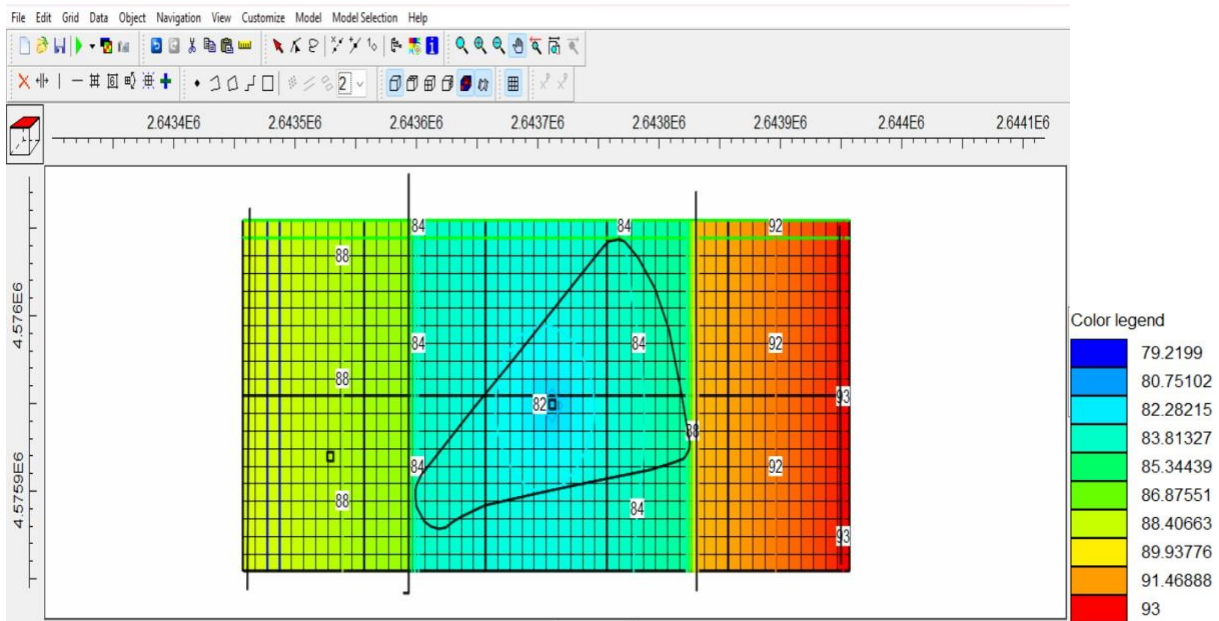
Εικόνα 7-7: Εφαρμογή της μεθόδου αποκλεισμού ανατολικά της περιοχής μελέτης



Εικόνα 7-8: Εφαρμογή της μεθόδου αποκλεισμού εκατέρωθεν της περιοχής μελέτης

Όπως φαίνεται ο φυσικός φραγμός που εφαρμόστηκε έχει σταματήσει την ροή του νερού στην περιοχή εργασίας, όμως μια ποσότητα υπογείου νερού έχει παγιδευτεί εκεί. Για να μπορέσει να απομακρυνθεί και να υποχωρήσει το υδραυλικό φορτίο, τίθεται σε λειτουργία ένα φρεάτιο άντλησης.

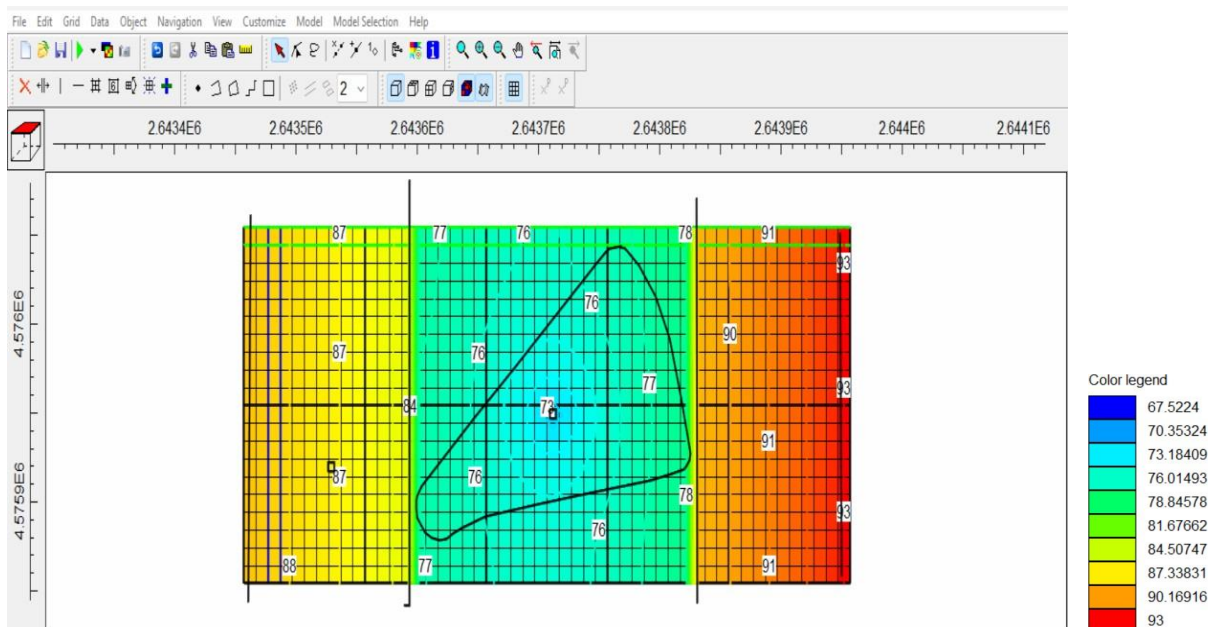
Γίνεται μια αρχική δοκιμή, όπου το φρεάτιο άντλησης λειτουργεί για ένα stress period, μιας ώρας, και αντλεί $-20\text{m}^3/\text{h}$.



Εικόνα 7-9: Αποτελέσματα προσομοίωσης με την μέθοδο άντλησης μέσω σωληνωτών φρεάτων - Σενάριο 5

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης δείχνουν από την πρώτη ώρα λειτουργίας της άντλησης, πως το υδραυλικό φορτίο στην περιοχή της εκσκαφής έχει κατέλθει στα 82m. Η διαφορά λοιπόν από το αρχικό υδραυλικό φορτίο το οποίο ήταν στα 92m, αντιστοιχεί σε 10m πτώση. (Εικόνα 7-9)

Διπλασιάζοντας την άντληση ($-40\text{m}^3/\text{h}$), τότε προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα που δείχνουν την πτώση στάθμης να κατέρχεται στα -15 περίπου μέτρα (Εικόνα 7-10):



Εικόνα 7-10: Αποτελέσματα προσομοίωσης με την μέθοδο άντλησης μέσω σωληνωτών φρεάτων - Σενάριο 6

Όσο αφορά τις διαρροές κατά την λειτουργία της άντλησης παρατηρείται μια πτώση στάθμης περίπου 2 μέτρων εκατέρωθεν της αποκλεισμένης περιοχής. Αυτή η παρατήρηση οδηγεί στο συμπέρασμα ότι οι διαρροές είναι σημαντικές και ενδεχομένως να επηρεάσουν τις κατασκευές που βρίσκονται στην επιφάνεια των συγκεκριμένων περιοχών (π.χ. καθιζήσεις).

8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάστηκαν οι μέθοδοι αποκλεισμού και αποστράγγισης των υπόγειων νερών του υδροφόρου ορίζοντα κάτω από τα θεμέλια της Εθνικής Πινακοθήκης–Μουσείο Αλεξάνδρου Σούτσου. Η περιοχή αυτή βρίσκεται εντός του λεκανοπεδίου Αθηνών, ανήκει στην Περιφέρεια Αττικής και δέχεται την επίδραση της υπόγειας ροής του Ιλισού ποταμού, ο οποίος πλέον έχει καλυφθεί από τον αστικό ιστό. Όσον αφορά την γεωμορφολογία, την υδρογεωλογία και την γεωλογία της περιοχής προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα.

- Το λεκανοπέδιο Αττικής περιβάλλεται από το όρος Αιγάλεω, Πάρνηθα, Πεντέλη και τον Υμηττό. Επίσης έχουν αναπτυχθεί δύο ποταμοί ο Κηφισός που κινείται δυτικά και ο Ιλισός στα ανατολικά, ενώ στο εσωτερικό του λεκανοπεδίου έχει αναπτυχθεί το πολεοδομικό συγκρότημα της Αθήνας.
- Το υδρογραφικό δίκτυο του λεκανοπεδίου χαρακτηρίζεται ως 7^{ης} τάξης (κατά Strahler), έχει μέση υδρογραφική πυκνότητα 2,98 km/km² και μέση υδρογραφική συχνότητα 3,79 κλ./km².
- Γεωλογικά το λεκανοπέδιο δομείται από την ενότητα Αθηνών, που αποτελεί ένα τεκτονικό mélange από ασβεστόλιθους, μαργαικούς σχιστόλιθους, ψαμμίτες και οφιολίθους, από μεταμορφωμένα μάρμαρα, από την Υποπελαγονική ενότητα που αποτελείται από ασβεστόλιθους και δολομιτικούς ασβεστόλιθους και την ενότητα Αλεποβουνίου που αποτελείται από μεταμορφωμένα μάρμαρα. Επιπλέον η αλπική δομή καλύπτεται από νεογενή ιζήματα.
- Η έντονη αστικοποίηση οδήγησε σε κάλυψη των κλάδων του υδρογραφικού δικτύου, υψηλής τάξης, ενώ επεκτάθηκε πέρα από αδιαπέρατους σχηματισμούς και σε ημισυνεκτικούς περατούς σχηματισμούς. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα τα έντονα πλημμυρικά φαινόμενα που παρατηρούνται στο λεκανοπέδιο. Ανάλογη αντιμετώπιση είχε και ο ποταμός Ιλισός ο οποίος έρεε στην περιοχή της Εθνικής Πινακοθήκης.

Όσον αφορά πιο συγκεκριμένα την περιοχή εργασίας προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

- Η επέκταση και η ανακατασκευή του κτιρίου της Πινακοθήκης περιλάμβανε δύο υπόγεια επίπεδα με αποτέλεσμα να προκύψει γεωτεχνικό ζήτημα με την διαχείριση των υπόγειων νερών του υδροφορέα. Σύμφωνα λοιπόν με τις μελέτες η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα βρίσκεται στα -12,5 m σε σχέση με το δάπεδο του ισόγειου. Προκειμένου να απομακρυνθούν τα υπόγεια ύδατα από την περιοχή εργασίας, κατασκευάστηκαν τρία φρεάτια άντλησης και μόνιμα αντλιοστάσια.
- Κατά την προσομοίωση δοκιμάστηκαν διαφορετικές τεχνικές αποκλεισμού και άντλησης των υπογείων υδάτων για διαφορετικούς χρόνους άντλησης και διατάξεις γεωτρήσεων, έτσι ώστε να βρεθεί η καταλληλότερη προσέγγιση για την αποστράγγιση της περιοχής εργασίας
- Για την προσομοίωση της περιοχής μελέτης στο περιβάλλον του ModelMuse δημιουργήθηκε ένας κάρναβος κελιών με ισοδιάσταση 10m και διαστάσεις 500m*200m. Θεωρήσαμε ότι ο υδροφορέας της περιοχής αποτελείται από 30 στρώματα, πάχους 1m, με τα ίδια υδραυλικά χαρακτηριστικά. Οι υδραυλικές παράμετροι προσδιορίστηκαν βιβλιογραφικά. Ο υδροφόρος ορίζοντας ορίζεται στα 12m κάτω από την επιφάνεια του εδάφους.
- Η πρώτη τεχνική που εφαρμόστηκε ήταν των βαθιών γεωτρήσεων (deep wells). Σε αυτή

την μέθοδο θεωρήσαμε τρία φρεάτια άντλησης. Η πρώτη δοκιμή ήταν για 4 stress periods, της μιας ώρας. Το βάθος άντλησης ορίστηκε από τα -12m έως τα -15m. Με σταθερή άντληση $-3\text{m}^3/\text{h}$ για κάθε χρονικό βήμα, σε κάθε γεώτρηση, προκύπτει μια πτώση στάθμης περίπου 2m εντός της περιοχής εργασίας. Διπλασιάζοντας την άντληση σε σταθερό χρόνο, παρατηρήθηκε τριπλασιασμός της πτώσης στάθμης εντός της περιοχής εργασίας.

- Έπειτα εφαρμόστηκε η τεχνική των σωληνωτών φρεάτων (well points). Σε αυτή την τεχνική δημιουργήθηκε δυο συστοιχίες γεωτρήσεων οι οποίες λειτουργούσαν περιμετρικά της περιοχής μελέτης και αντλούσαν σε μικρά βάθη. Πιο συγκεκριμένα η πρώτη λειτουργούσε από την στάθμη που εντοπίζεται ο υδροφόρος ορίζοντας (δηλαδή στα -12m) και για ένα μέτρο κάτω από αυτόν. Η δεύτερη συστοιχία άντλησε από το αμέσως επόμενο στρώμα, δηλαδή από τα -13m έως τα -14m. Αντλήσαμε με σταθερή άντληση ανά χρονικό βήμα σε κάθε σωληνωτό φρέαρ, η οποία είναι $-1\text{m}^3/\text{h}$. Αρχικά ορίσαμε στην πρώτη ώρα η άντληση να γίνεται μόνο από την εξωτερική συστοιχία σωληνωτών φραγμάτων και έπειτα στην δεύτερη ώρα να λειτουργούν και οι δύο συστοιχίες ταυτόχρονα. Σε αυτή την περίπτωση η πτώση στάθμης ήταν περίπου 4m. Όταν λειτούργησαν και οι δύο συστοιχίες ταυτόχρονα και για τα δύο χρονικά βήματα τότε η πτώση στάθμης έφτασε σχεδόν στα -5m. Στην επόμενη προσομοίωση λειτούργησαν τα σωληνωτά φρέατα για τέσσερις χρονικές περιόδους. Σε αυτή την περίπτωση η στάθμη του υδροφόρου κατέρχεται στα -5,5m περίπου.
- Τέλος εφαρμόστηκε η τεχνική του αποκλεισμού των υπόγειων υδάτων (cut-off walls). Αφού δημιουργήθηκαν εκατέρωθεν της περιοχής εργασίας δύο τοίχοι στεγανότητας, μικρής περατότητας, προκειμένου να αποκλειστεί η περιοχή από την εισροή των υπόγειων υδάτων, τέθηκε σε λειτουργία ένα φρέαρ άντλησης προκειμένου να απομακρύνει τα νερά που παγιδεύτηκαν στην περιοχή. Στην περίπτωση αυτή για άντληση μίας ώρας με ρυθμό άντλησης $-20\text{m}^3/\text{h}$, η πτώση στάθμης φαίνεται να είναι περίπου -10m, ενώ όταν διπλασιάστηκε η άντληση, η πτώση στάθμης έφτασε τα -15m.
- Αν και στην τελευταία μέθοδο φαίνεται ότι η πτώση στάθμης είναι αρκετά μεγάλη και σε σύντομο χρονικό διάστημα άντλησης, προκύπτει ένα ζήτημα σχετικά με τις διαρροές μέσα από τους τοίχους στεγανότητας όπου μπορεί να προκαλέσουν προβλήματα καθιζήσεων στις περιοχές γύρω από την περιοχή εργασίας που έχει αποκλειστεί.
- Τέλος ένα ακόμα θέμα που θα μπορούσε να αναλυθεί περαιτέρω είναι η διάθεση του νερού που αντλείται από την περιοχή εκσκαφής και το οποίο διοχετεύεται σε αγωγό του αποχετευτικού δικτύου ενώ θα υπάρχουν αρκετές εναλλακτικές προτάσεις που θα προσέφεραν την σωστή αξιοποίηση αυτών των υδάτων.

9. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Argyraki, A., & Kelepertzis, E. (2014). Urban soil geochemistry in Athens, Greece: The importance of local geology in controlling the distribution of potentially harmful trace elements. *Science of the Total Environment*, 482–483(1), 366–377. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.02.133>
- Australia. National Water Commission., & Sinclair Knight Merz (Firm). (2012). Australian groundwater modelling guidelines. National Water Commission.
- Bathrellos, G. D., Karymbalis, E., Skilodimou, H. D., Gaki-Papanastassiou, K., & Baltas, E. A. (2016). Urban flood hazard assessment in the basin of Athens Metropolitan city, Greece. *Environmental Earth Sciences*, 75, 1–14.
- Cashman, P. M., & Preene, M. (2021). *Groundwater Lowering in Construction: A Practical Guide to Dewatering*; 3rd Edition. <https://www.routledge>.
- Harbaugh, A. W. (2005). MODFLOW-2005, The U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model-the Ground-Water Flow Process. http://water.usgs.gov/software/ground_water.html/.
- INSETE. (2019). Περιφέρεια Αττικής: Ετήσια έκθεση ανταγωνιστικότητας και διορθωτικής προσαρμογής στον τομεα του τουρισμού για το 2018.
- Lepsius, R. (1893). *Geologie von Attika: Ein Beitrag zur Lehre vom Metamorphismus der Gesteine*. D. Reimer.
- Levins, R. (1966). The strategy of model building in population biology. *American Scientist*, 54(4), 421–431. <http://www.jstor.org/stable/27836590>
- Maroukian, V., Ssermegas, E., Gaki-Papanastassiou, J., & Karymbalis, E. (2005). The role of morphometric parameters and human interference in floods at the lower reaches of Kifisos River delta (Attica). *Proceedings of the 7th Panhellenic Congress on Hydrogeology*, 1, 289–299.
- Mercer, J. W., & Faust, C. R. (1980). Ground-Water Modeling: Applications ^a. *Groundwater*, 18(5), 486–497. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1980.tb03425.x>
- Oude Essink, G. H. P. (2000). *Groundwater Modelling*.
- Powers, J. Patrick. (2007). *Construction dewatering and groundwater control: new methods and applications*. Wiley.
- Prickett, T. A. (1979). Ground-Water Computer Models — State of the Art ^a. *Groundwater*, 17(2), 167–173. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1979.tb03296.x>
- Reclamation, B. O., Reclamation, B. of, & Interior, U. S. D. (2011). *Ground Water Manual: A Guide for the Investigation, Development, and Management of Ground-Water Resources (A Water Resources Technical Publication)*. Books Express Publishing. <https://books.google.gr/books?id=ITBAnQEACAAJ>
- Terzaghi K, & Peck R. (1967). *Soil Mechanics in Engineering Practice*. (2nd Edition). John Wiley and Sons.
- Αμπατζόγλου Ι. (2018). Υδρολογικά και γεωλογικά δεδομένα περιοχής, εξέλιξη αστικού

τοπίου και τεχνικά ζητήματα: η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα και η άντληση υδάτων.

- Αντωνίου, Β. (2002). “Το φυσικό και ανθρωπογενές περιβάλλον του λεκανοπεδίου Αθηνών= natural and human environment of Athens basin.” . Πανελλήνια Και Διεθνή Γεωγραφικά Συνέδρια, Συλλογή Πρακτικών 2, 311–318.
- Καλλιώρας Α. (2015). Ειδικά θέματα Αξιοποίησης και Διαχείρισης Υπογείων Νερών: Υδρογεωλογικά Μοντέλα και Υπολογιστικοί κώδικες. . Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο .
- Κοταμπάσης Χ., & Σκέντος Α. (2005). Γεωμορφολογική ανάλυση της υδρογραφικής λεκάνης απορροής του Κηφισού ποταμού και ανθρώπινες επεμβάσεις. Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο.
- Κώτσιαρη Β., & Ευσταθίου Γ. (2015). Ανθρωπογενείς επεμβάσεις στο υδρογραφικό δίκτυο του Ιλισσού ποταμού (Αττική)=Anthropogenic interventions in the drainage network of Pissos river (Attica). Πανελλήνια Και Διεθνή Γεωγραφικά Συνέδρια, Συλλογή Πρακτικών, 1423–1442.
- Λέκκας Σ., & Αλεξόπουλος Α. (2009). Εισαγωγή στην Υδρογεωλογία. Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος, ΕΚΠΑ.
- Μ.Α. Μιμίκου, & Ε.Α. Μπαλάς. (2006). Τεχνική Υδρολογία (4η έκδοση). Παπασωτηρίου.
- Μαρίνος, Γ. (1937). Η τεκτονική θέσις του συστήματος των σχιστόλιθων των Αθηνών εις την δυτικήν ζώνην αυτού. Ιστορική Βιβλιοθήκη Ε.Μ.Π. <https://doi.org/10.26240/HEAL.NTUA.25155>
- Μαρίνος, Γ., Κατσιακάτσος, Γ., Γεωργιάδου - Δικαιούλια, Ε., & Μίρκου, Ρ. (1971). Το σύστημα των Σχιστολίθων Αθηνών. Ι. Στρωματογραφία και τεκτονική. *Ann. Geol. Pays Hell*, 23, 183–216.
- Μαρίνος, Γ., Κατσιακάτσος, Γ., & Μίρκου - Περιττοπούλου, Ρ. (1974). Το σύστημα των σχιστολίθων των Αθηνών. *Ann. Geol. Pays Hell*, 439–444.
- Παπανικολάου, Δ Ι, Λόζιος, Σ. Γ., Σούκης, Κ. Ι., & Σκούρτσος, Ε. Ν. (2004). Πρακτικά 10 ου Διεθνούς Συνεδρίου, Θεσ/νίκη Απρίλιος. In *Bulletin of the Geological Society of Greece: Vol. XXXVI*.
- Παπανικολάου, Δ., Λόζιος, Σ., Σούκης, Κ., & Σκούρτσος, Εμ. (2004). THE GEOLOGICAL STRUCTURE OF THE ALLOCHTHONOUS “ATHENS SCHISTS.” *Bulletin of the Geological Society of Greece*, 36(4), 1550. <https://doi.org/10.12681/bgsg.16513>
- Παπανικολάου, Δ., Μπάση, Ε. Κ., Κράνης, Χ., & Δανάμος, Γ. (2004). Paleogeographic evolution of the Athens basin from upper Miocene to Present. In *Bulletin of the Geological Society of Greece (Vol. 36, Issue 2, pp. 816–825)*.
- Παπανικολάου Δ., & Σιδέρης Χρ. (2014). Γεωλογία. Η επιστήμη της Γης (7th ed.). Πατάκης.
- Σκριμιζέα Ε.Μ. (2011). Επιχειρησιακό πρόγραμμα για την διαχείριση τμήματος παράκτιας ζώνης της νοτιοδυτικής Αττικής. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο .
- Τάταρης, Αθ. (1966). Παρατηρήσεις επί της δομής της περιοχής Σκαρामαγκά - Όρους

Αιγάλεω - Πειραιώς - Αθηνών (Αττική) = Observations on the structure of Skaramaga - Aegaleo Mountain - Piraeus - Athens area (Attica). Δελτίον Της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας, 7(1), 52–88. <http://geolib.geo.auth.gr/index.php/bgsg/article/view/143>

- Τσολάκος, Κ. Δ. (2003). Η ιστορία της Αθήνας του ποταμού Ιλισσού και των γύρω περιοχών του. Εντός.

➤ **ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΕΣ**

- U.S. Geological Survey: <https://www.usgs.gov/>
- Γεωχωρικά δεδομένα: <https://geodata.gov.gr/>
- Εθνική Πινακοθήκη: <https://www.nationalgallery.gr/>
- Πανεπιστήμιο του Στρασβούργου - Βιβλιοθήκη Πολιτιστικής Κληρονομιάς: <http://docnum.u-strasbg.fr/cdm/singleitem/collection/coll4/id/212/rec/1>
- Χάρτες Kaupert: https://dipylon.org/gr/2021/03/30/karten_von_attika/