ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑΣ

ΙΟΥΛΙΑ ΚΑΡΑΝΙΚΟΛΑ
Πτυχιούχος Γεωλόγος

# ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΥΠΟΓΕΙΑΣ ΡΟΗΣ ΣΤΟΝ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΣΙΝΔΟΥ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

*ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ:*
*'ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΓΕΩΛΟΓΙΑ',*
*ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ: 'ΤΕΧΝΙΚΗ ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ'*

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ

2024

ΙΟΥΛΙΑ ΚΑΡΑΝΙΚΟΛΑ
Πτυχιούχος Γεωλόγος

ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΥΠΟΓΕΙΑΣ ΡΟΗΣ ΣΤΟΝ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΣΙΝΔΟΥ

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας του ΑΠΘ στο πλαίσιο του
Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών
'Εφαρμοσμένη και Περιβαλλοντική Γεωλογία'
Κατεύθυνση 'Τεχνική Γεωλογία και Περιβάλλον'

Ημερομηνία Προφορικής Εξέτασης: 08/10/2024

**Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή**

Βουδούρης Κωνσταντίνος, Καθηγητής, Επιβλέπων
Μάττας Χρήστος, Μέλος ΕΔΙΠ, Μέλος Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής
Κακλής Τριαντάφυλλος, Μέλος ΕΔΙΠ, Μέλος Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής

Citation:

Καρανικόλα Ι., 2024 – Υδρογεωλογική έρευνα και προσομοίωση της υπόγειας ροής στον υδροφορέα της περιοχής Σίνδου. Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., 90 σελ.
Karanikola I., 2024. – Hydrogeological investigation and groundwater flow simulation of the aquifer in the Sindos area. Master Thesis, School of Geology, Aristotle University of Thessaloniki, 90 pp.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι εκφράζουν τις επίσημες θέσεις του Α.Π.Θ.

# Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΕΙΚΟΝΩΝ ........ 9
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΠΙΝΑΚΩΝ ........ 10
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ ........ 10
ΠΡΟΛΟΓΟΣ - ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ ........ 11
ΠΕΡΙΛΗΨΗ ........ 12
ABSTRACT ........ 13
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ ........ 15
1.1 Αντικείμενο εργασίας ........ 15
1.2 Εργασίες που πραγματοποιήθηκαν ........ 15
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ ........ 16
2.1 Θέση περιοχής έρευνας ........ 16
2.2 Γεωμορφολογία ........ 17
2.3 Υδρογραφικό δίκτυο ........ 18
2.4 Κλιματικά στοιχεία ........ 19
2.4.1 Βροχόπτωση ........ 19
2.4.2 Θερμοκρασία ........ 21
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΓΕΩΛΟΓΙΑ-ΤΕΚΤΟΝΙΚΗ ........ 23
3.1 Γενικά ........ 23
3.2 Γεωλογία ........ 24
3.2.1 Ζώνη Αξιού ........ 24
3.2.2 Υποζώνη Παιονίας ........ 24
3.2.3 Γεωλογία περιοχής έρευνας ........ 25
3.3 Τεκτονική ........ 25
3.4 Σεισμικότητα ........ 26
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑ-ΥΔΡΟΦΟΡΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ........ 28
4.1 Γενικά ........ 28
4.2 Υπόγειοι υδροφορείς ........ 28
4.3 Υδραυλικά χαρακτηριστικά ........ 32
4.3.1 Υδραυλικό φορτίο (h) ........ 32
4.3.2 Περατότητα - Υδροπερατότητα (k) ........ 33
4.3.3 Αποθηκευτικότητα (S) ........ 33
4.3.4 Μεταβιβαστικότητα (T) ........ 35

4.4 Υδρογεωλογία περιοχής έρευνας ........................................ 35
4.5 Διακύμανση υπόγειας στάθμης στον χρόνο ........................................ 37
4.5.1 Γεώτρηση Σ06Ν ........................................ 37
4.5.2 Γεώτρηση Σ10Α ........................................ 38
4.5.3 Γεώτρηση Σ34 ........................................ 39
4.6 Πιεζομετρικός χάρτης ........................................ 40
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΚΩΔΙΚΑΣ MODFLOW ........................................ 41
5.1 Γενικά ........................................ 41
5.2 Το λογισμικό MODFLOW ........................................ 41
5.2.1 Εξίσωση ροής ........................................ 42
5.2.2 Δομή καννάβου ........................................ 42
5.2.3 Τύποι κελιών (cells) – Οριακές Συνθήκες (Boundary Conditions) ........................................ 43
5.2.4 Κύρια υποπρογράμματα (υπορουτίνες) ........................................ 43
5.2.5 Ρύθμιση προσομοίωσης υπόγειας ροής ........................................ 45
5.3 Μεθοδολογία καθορισμού μοντέλου ........................................ 46
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΣΙΝΔΟΥ ........................................ 47
6.1 Γενικά ........................................ 47
6.2 Εννοιολογικό μοντέλο ........................................ 47
6.2.1 Γεωλογία - Υδρογεωλογία ........................................ 47
6.2.2 Μετεωρολογικά Δεδομένα ........................................ 48
6.2.3 Τροφοδοσία ΥΥΣ ........................................ 48
6.2.4 Στάθμη υπόγειου νερού ........................................ 49
6.2.5 Υδραυλικές παράμετροι ........................................ 49
6.3 Ανάπτυξη μαθηματικού μοντέλου ........................................ 49
6.3.1 Γεωμετρία ομοιώματος ........................................ 49
6.3.2 Συνθήκες Steady State (μόνιμης ροής) ........................................ 50
6.3.2.1 Τροφοδοσία υδροφορέα ........................................ 50
6.3.2.2 Οριακές συνθήκες ........................................ 50
6.3.2.3 Συνολικός εμπλουτισμός ........................................ 51
6.3.2.4 Σημεία ελέγχου ........................................ 51
6.3.2.5 Αρχικές συνθήκες ........................................ 52
6.3.2.6 Αποτελέσματα σε σταθερές συνθήκες ροής (steady state) ........................................ 53
6.3.3 Συνθήκες Transient State (μη-μόνιμης ροής) ........................................ 56
6.3.3.1 Αποτελέσματα από μεταβαλλόμενες συνθήκες (transient state) ........................................ 57
6.4 Σενάρια προσομοίωσης ........................................ 61

6.4.1 Ευνοϊκό σενάριο ....61
6.4.2 Δυσμενές σενάριο ....63
6.5 Βελτίωση ομοιώματος του ΥΥΣ Σίνδου ....64
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ....65
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ....67
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ: ΛΙΘΟΛΟΓΙΚΕΣ ΤΟΜΕΣ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ ....69

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1. Στο κόκκινο πλαίσιο εντοπίζεται η Σίνδος, που αποτελεί την περιοχή του ενδιαφέροντος (Google Earth). ........ 16
Εικόνα 2. Κόκκινο πλαίσιο η ευρύτερη περιοχή της περιοχής μελέτης και με κίτρινο χρώμα η περιοχή μελέτης. (ArcGIS) ........ 17
Εικόνα 3. Μορφολογικός χάρτης ευρύτερης περιοχής, όπου το κόκκινο πλαίσιο η περιοχή μελέτης με άνοδος υψομέτρου στα ΒΑ και η μείωση αυτού στα κεντρικά και ΝΑ. (ArcGIS) ........ 18
Εικόνα 4. Σε κόκκινο πλαίσιο είναι η ευρύτερη περιοχή ενδιαφέροντος, με κίτρινο πλαίσιο είναι η περιοχή μελέτης, με κόκκινη τεθλασμένη γραμμή ο Αξιός ποταμός και με πράσινη ο Γαλλικός ποταμός. (ArcGIS) ........ 18
Εικόνα 5. Σύγκριση τιμών ύψους βροχόπτωσης για τα υδρογεωλογικά έτη 2018-2023. ........ 20
Εικόνα 6. Συγκεντρωτικό ιστόγραμμα ύψους βροχόπτωσης και υδρογεωλογικών ετών. ........ 20
Εικόνα 7. Συγκεντρωτικό ιστόγραμμα μέσων θερμοκρασιών για τα υδρογεωλογικά έτη 2018-2023. ........ 22
Εικόνα 8. Γεωτεκτονικός χάρτης Ελληνίδων ζωνών. Au: Ενότητα Πλακωδών Ασβεστόλιθων, Px: ζώνη Παξών, I: Ιόνιος ζώνη, G: ζώνη Γαβρόβου – Τρίπολης, P: ζώνη Πίνδου, Pk: ζώνη Παρνασσού – Γκιώνας, Sp: Υποπελαγονική ζώνη, Ac: Αττικό-Κυκλαδική ζώνη, Pl: Πελαγονική ζώνη, Ζώνη Αξιού: (Pe: Υποζώνη Παιονίας, Pa: Υποζώνη Πάικου Al: Υποζώνη Αλμωπίας), CR: Περιροδοπική ζώνη, Rh: Μάζα Ροδόπης, Sm: Σερβομακεδονική μάζα. (Μουντράκης, 2020) ........ 23
Εικόνα 9. Ζώνη Αξιού με τις τρεις Υποζώνες Αλμωπίας, Πάικου και Παιονίας. (ArcGIS) ........ 24
Εικόνα 10. Σχηματικός χάρτης με τις ενότητες της υποζώνης Παιονίας. 1. Γιουγκοσλαβία, 2. Σχηματισμοί μεταλπικοί Νεογενούς και Τεταρτογενούς, 3.σχηματισμοί αλπικοί, 4. Κρυσταλλοσχιστώδες υπόβαθρο της ζώνης, 5. Φλύσχης, 6. Κρυσταλλοσχιστώδες της Σερβομακεδονικής, f. Ρήγματα, φ και Φ. ανώμαλες επαφές (Κατά Mercier 1966). F. πιθανό όριο Παιονίας – Περιροδοπικής σύμφωνα με τις νεότερες απόψεις. (Μουντράκης, 2020) ........ 26
Εικόνα 11. Νέος ελληνικός χάρτης σεισμικής επικινδυνότητας (ΕΑΚ 2000). ........ 27
Εικόνα 12. Βασικότερα είδη των υδροφορέων (Βουδούρης, 2013) ........ 29
Εικόνα 13. Λιθολογική τομή γεώτρησης Σ06Ν, στην περιοχή μελέτης. ........ 31
Εικόνα 14. Υδραυλικό φορτίο (h), φορτίο πίεσης ($h_p$), φορτίο ύψους (z) (Βουδούρης, 2021). ........ 32
Εικόνα 15. Γεωτρήσεις περιοχής έρευνας, Σίνδου. (ArcGIS) ........ 36
Εικόνα 16. Διάγραμμα διακύμανσης στάθμης γεώτρησης Σ06Ν. ........ 37
Εικόνα 17. Διάγραμμα διακύμανσης στάθμης γεώτρησης Σ10Α. ........ 38
Εικόνα 18. Διάγραμμα διακύμανσης στάθμης γεώτρησης Σ34. ........ 39
Εικόνα 19. Πιεζομετρικός χάρτης υπόγειου υδροφόρου στην περιοχή έρευνας (ArcGIS). ........ 40
Εικόνα 20. Τρισδιάστατη δομή ενός μοντέλου (McDonald and Harbaugh, 1988). ........ 43
Εικόνα 21. Χάρτης Corine για τις χρήσεις γης της περιοχής μελέτης (ArcGIS) ........ 48
Εικόνα 22. Χάρτης καννάβου από την περιοχή που προσομοιώνεται με τις οριακές συνθήκες και τις συνολικές γεωτρήσεις της περιοχής. ........ 50

Εικόνα 23. Γεωτρήσεις ελέγχου (observation points). ..............................................52
Εικόνα 24. Αρχικές συνθήκες πιεζομετρίας (starting heads) με την κατανομή υδραυλικού φορτίου στην προσομοιωμένη περιοχή..................................................52
Εικόνα 25. Πιεζομετρικός χάρτης της προσομοιωμένης περιοχής (steady state). ......53
Εικόνα 26. Σημεία ελέγχου με τις αποκλίσεις. .........................................................54
Εικόνα 27. Διάγραμμα αποκλίσεων τιμών υδραυλικού φορτίου, μετρημένων και υπολογισμένων...........................................................................................................55
Εικόνα 28. Ημερήσιο υδατικό ισοζύγιο υδροφορέα περιοχής μελέτης......................56
Εικόνα 29. Σύγκριση μετρημένων τιμών των observation points περιόδου 2018-2023 και διακύμανση στάθμης υπόγειου νερού. .................................................................57
Εικόνα 30. Συνθήκη transient state περιόδου 1/04/2020. ..........................................59
Εικόνα 31. Συνθήκη transient state περιόδου 1/10/2020. ..........................................59
Εικόνα 32. Συνθήκη transient state περιόδου 1/04/2021. ..........................................60
Εικόνα 33. Συνθήκη transient state περιόδου 1/10/2021. ..........................................60
Εικόνα 34. Συνθήκη transient state περιόδου 1/04/2022. ..........................................61
Εικόνα 35. Πιεζομετρικός χάρτης πρώτου σεναρίου (ευνοϊκό σενάριο). .................62
Εικόνα 36. Πιεζομετρικός χάρτης δεύτερου σεναρίου (δυσμενές σενάριο)...............63

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1. Ύψη βροχόπτωσης (mm) από τον σταθμό της Σίνδου για τα υδρογεωλογικά έτη 2018-2023, ΜΟ κάθε μήνα, μέγιστες και ελάχιστες τιμές αυτών. ......................................................................................................................19
Πίνακας 2. Συγκεντρωτικός πίνακας μέσων θερμοκρασιών (°C) για τα υδρογεωλογικά έτη 2018-2023. ...........................................................................21
Πίνακας 3. Τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας (k) (Βουδούρης, 2013) ........................33
Πίνακας 4. Γεωτρήσεις περιοχής έρευνας (Σίνδος). ...................................................35
Πίνακας 5. Αποκλίσεις μετρημένων (observed head) με υπολογισμένων (computed head) τιμών. ...............................................................................................................54
Πίνακας 6. Πίνακας ετήσιου υδατικού ισοζύγιου υδροφορέα περιοχής μελέτης........55
Πίνακας 7. Μετρημένες και υπολογισμένες τιμές περιόδου 2020-2022. ....................58
Πίνακας 8. Υπολογισμένες, μετρημένες τιμές και απόκλιση αυτών για το ευνοϊκό σενάριο. ....................................................................................................................62
Πίνακας 9. Υπολογισμένες, μετρημένες τιμές και απόκλιση αυτών για το δυσμενές σενάριο. ....................................................................................................................63

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΕΞΙΣΩΣΕΩΝ

Εξίσωση 1. Εξίσωση υδραυλικού φορτίου. 32
Εξίσωση 2. Συντελεστής αποθηκευτικότητας. 34
Εξίσωση 3. Σχέση ρυθμού ταπείνωσης στάθμης. 34
Εξίσωση 4. Συντελεστής αποθηκευτικότητας στους υπό πίεση υδροφορείς. 34
Εξίσωση 5. Σχέση συντελεστή μεταβιβαστικότητας. 35
Εξίσωση 6. Θεμελιώδης εξίσωση ροής του MODFLOW. 42
Εξίσωση 7. Σχέση απόκλισης RMSD. 45

# ΠΡΟΛΟΓΟΣ - ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία με τίτλο «Υδρογεωλογική έρευνα και προσομοίωση της υπόγειας ροής στον υδροφορέα της περιοχής Σίνδου», εκπονήθηκε στο πλαίσιο του μεταπτυχιακού προγράμματος σπουδών «Εφαρμοσμένη και Περιβαλλοντική Γεωλογία» με ειδίκευση στην «Τεχνική Γεωλογία και Περιβάλλον» στο τμήμα Γεωλογίας του Αριστοτελείου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης.

Το αντικείμενο της παρούσας εργασίας, είναι η προσομοίωση του υπόγειου υδροφόρου συστήματος της περιοχής της Σίνδου, καθώς και μια πιθανή μελλοντική ποσοτική κατάσταση αυτού, με τη μείωση ή αύξηση των αντλήσεων και της τροφοδοσίας του.

Οι τρεις επιβλέποντες που απαρτίζουν την εξεταστική επιτροπή είναι ο κ. Βουδούρης Κωνσταντίνος, Καθηγητής ΑΠΘ, ο κ. Μάττας Χρήστος, Μέλος ΕΔΙΠ ΑΠΘ και ο κ. Κακλής Τριαντάφυλλος, Μέλος ΕΔΙΠ ΑΠΘ.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαιτέρως τον επιβλέποντα καθηγητή κ. Βουδούρη Κωνσταντίνο, για την εμπιστοσύνη του και την ανάθεση μιας τόσο ενδιαφέρουσας θεματολογίας για μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία, καθώς και τη συνεχή διάθεσή του για καθοδήγηση και βοήθεια, που οδήγησε σε μια άριστη συνεργασία. Επίσης, ευχαριστίες θα ήθελα να απευθύνω και στην υπόλοιπη συμβουλευτική επιτροπή για τα σχόλιά της, και στον κ. Μάττα Χρήστο, καθώς χωρίς τη δική του συμβολή και καθοδήγηση, δεν θα είχε επιτευχθεί η χρήση του λογισμικού MODFLOW.

Κλείνοντας, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τον κοινωνικό μου περίγυρο για την ενθάρρυνσή τους, την πίστη τους προς το πρόσωπό μου και τη συνεχή ψυχολογική υποστήριξη που μου παρείχαν.

Μελλοντικά, θα επιθυμούσα η δεδομένη μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία να αποτελέσει την κινητήρια δύναμη για περαιτέρω έρευνα στην παρούσα περιοχή, αλλά και για άλλες περιοχές με παρόμοια προβλήματα, και να γίνει αντιληπτή η χρησιμότητα και αναγκαιότητα της ειδικότητας του γεωλόγου.

# ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η δεδομένη μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία σχετίζεται με το υπόγειο υδροφόρο σύστημα και πιο συγκεκριμένα, έχει ως αντικείμενο τη λειτουργία της υπόγειας ροής με τη χρήση μαθηματικού μοντέλου και την πρόγνωση της μελλοντικής ποσοτικής κατάστασης του υδροφορέα υπό διάφορα διαχειριστικά σενάρια.

Για την ανάπτυξη του μοντέλου και τη διεξαγωγή ασφαλών αποτελεσμάτων έγινε χρήση του λογισμικού GMS. Από το λογισμικό αυτό, έγινε χρήση του MODFLOW (Modular Three Dimensional Finite Difference Ground Water Flow Model) αλλά σημαντικό ρόλο κατείχε και το λογισμικό ArcGIS, του οποίου η βοήθεια κατέστη καταλυτική, καθώς ήταν αρμόδιο για τη σύνθεση του μοντέλου.

Η περιοχή μελέτης είναι η περιοχή της Σίνδου, Θεσσαλονίκης. Σύμφωνα με παρατηρήσεις πεδίου, η περιοχή πολλές φορές υπερχειλίζει και η στάθμη του νερού ξεπερνά το επίπεδο της επιφάνειας του εδάφους, ενώ παρατηρείται και ετερογένεια σε κατακόρυφο επίπεδο.

Σημαντικό βήμα για τη χρήση του μαθηματικού μοντέλου, είναι η διαμόρφωση του εννοιολογικού μοντέλου του υδροφορέα στο οποίο αποτυπώνεται η υπόγεια ροή του νερού. Ακολούθως, με το Model Calibration προσαρμόζονται οι τιμές του μοντέλου και συγκρίνονται μεταξύ τους. Μετά τη σύγκρισή τους, εξάγονται τα σφάλματα που προέκυψαν από τις μετρημένες και υπολογισμένες τιμές, δηλαδή η ελάχιστη διαφορά που προέκυψε μεταξύ των αντίστοιχων τιμών. Οι υπολογισμένες τιμές προέκυψαν από συνεχείς δοκιμές του μοντέλου μέχρι να επιτευχθούν αυτές με την μικρότερη απόκλιση από τις μετρημένες (trial and error). Αντίστοιχη διαδικασία έγινε και για ένα χρονικό διάστημα δύο ετών, η οποία ωστόσο δεν στέφθηκε με επιτυχία.

Στη συνέχεια, αφού επιτεύχθηκε η προσομοίωση της περιοχής, δημιουργήθηκαν δύο υποθετικά σενάρια, τα οποία εφαρμόστηκαν στη ρύθμιση της μόνιμης ροής ώστε να εξεταστεί ένα ενδεχόμενο μελλοντικό ισοζύγιο της περιοχής μελέτης. Στο πρώτο σενάριο, οι αντλήσεις και η τροφοδοσία μειώθηκαν, ενώ στο δεύτερο σενάριο, οι αντλήσεις αυξήθηκαν και η τροφοδοσία μειώθηκε. Η εξαγωγή αποτελεσμάτων ήταν ικανοποιητική στο πρώτο σενάριο, σε αντίθεση με το δεύτερο το οποίο είχε μεγάλη απόκλιση τιμών.

Στο τέλος αυτής της εργασίας, κρίνεται επιτυχές το μοντέλο προσομοίωσης για τη ρύθμιση της μόνιμης ροής, καθώς έγινε η αντιστοιχία με την πραγματικότητα της υπαίθρου της περιοχής της Σίνδου, σε αντίθεση με τη ρύθμιση της μεταβαλλόμενης ροής.

# ABSTRACT

The given master's thesis is related to the aquifer system and more specifically, it has as its object the operation of the groundwater flow with the use of a mathematical model and the possible future state of the balance under different scenarios.

GMS software was used to develop the model and conduct safe results. From this software, MODFLOW (Modular Three-Dimensional Finite Difference Ground Water Flow Model) was used, but an important role was also played by the ArcGIS software, whose help was considerable, as it was responsible for the composition of the model.

The area under study is the area of Sindos. According to field observations, the area often overflows and the water level exceeds the ground surface level, while vertical heterogeneity is also observed.

An important step for the use of the mathematical model is the formation of the conceptual model of the aquifer in which the groundwater flow is captured. Next, with Model Calibration, the model values are adjusted and compared with each other. After comparing them, the errors obtained from the measured and calculated values are extracted, i.e. the minimum difference obtained between the corresponding values. The calculated values resulted from continuous tests of the model until those with the smallest deviation from the measured values were reached (trial and error). A similar procedure was carried out for a period of two years, which however was not crowned with success.

Then, after the simulation of the area was achieved, two hypothetical scenarios were created and applied to the permanent flow setting to consider a possible future balance of the study area. In the first scenario, the withdrawals and supply decreased, while in the second scenario, the withdrawals increased and the supply decreased.

The conduction of the results was satisfactory in the first scenario, in contrast to the second one which had a large price deviation. At the end of this work, the simulation model for permanent flow regulation is judged to be successful, as it has been matched with the rural reality of Sindos region, as opposed to variable flow regulation.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1.1 Αντικείμενο εργασίας

Η δεδομένη μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία, στοχεύει στη μελέτη του υπόγειου υδατικού συστήματος (ΥΥΣ) της περιοχής της Σίνδου και τη χρήση του γνωστού στη διεθνή και ελληνική βιβλιογραφία MODFLOW. Το μαθηματικό αυτό μοντέλο, προσομοιώνει την οριοθετημένη περιοχή, καθώς επίσης, έχει τη δυνατότητα να μετατρέπει τα δεδομένα του υδροφορέα της περιοχής (αντλήσεις, τροφοδοσία) και να υπολογίζει το νέο ισοζύγιο νερού, για νέες μελλοντικές συνθήκες.

## 1.2 Εργασίες που πραγματοποιήθηκαν

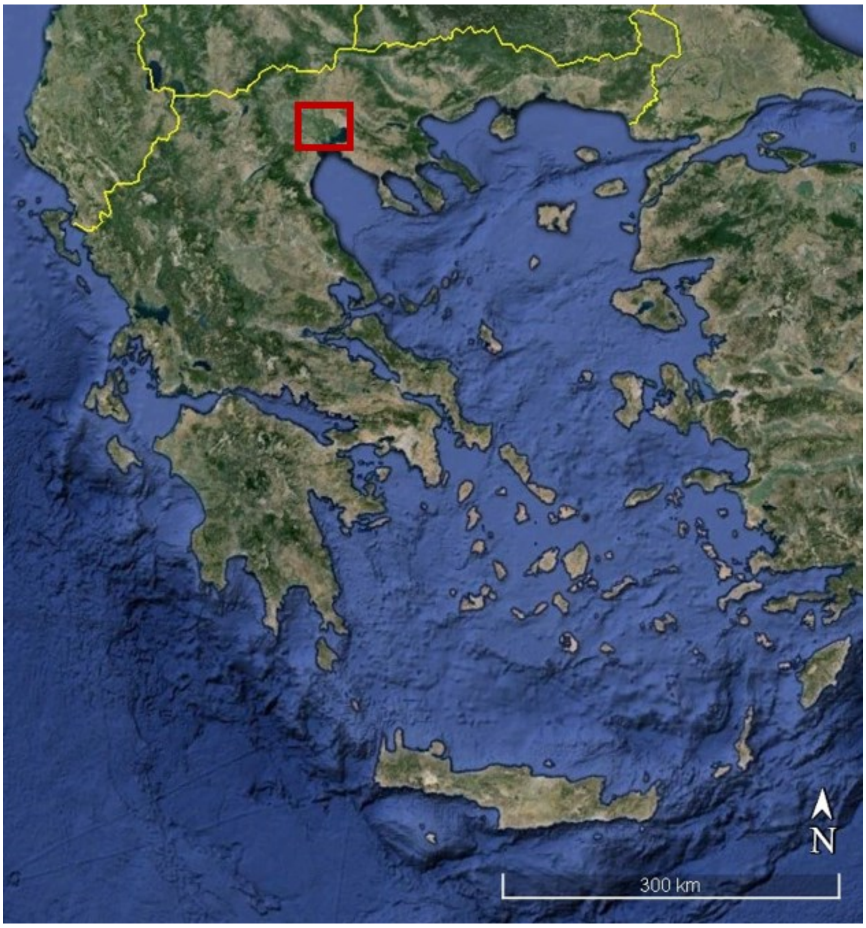
Για την υλοποίηση της συγκεκριμένης εργασίας και τη διεξαγωγή ασφαλών αποτελεσμάτων, πραγματοποιήθηκαν εργασίες γραφείου και χρησιμοποιήθηκαν εξειδικευμένα λογισμικά, και είναι τα ακόλουθα:

- Οι εργασίες γραφείου για την εύρεση των γενικότερων πληροφοριών της ευρύτερης περιοχής (γεωλογία, γεωμορφολογία, τεκτονική, σεισμολογία, υδρογεωλογία).
- Η συγκέντρωση και επεξεργασία κλιματικών δεδομένων (θερμοκρασία, βροχόπτωση).
- Η συλλογή των γεωτρήσεων (τοποθεσία) και ο προσδιορισμός του υδροφορέα με βάση τις λιθολογικές τομές των γεωτρήσεων.
- Η συλλογή των χαρακτηριστικών της περιοχής έρευνας (υδραυλικά χαρακτηριστικά, στάθμες γεωτρήσεων, παροχή, αντλήσεις, τροφοδοσία) για τη χρήση τους στο λογισμικό και τη δημιουργία μοντέλου.
- Δημιουργία χαρτών μέσω λογισμικού ArcGIS και Google Earth.
- Το λογισμικό ArcGIS, το οποίο χρησιμοποιήθηκε για τη δημιουργία shapefile και την εισαγωγή των δεδομένων τους στο λογισμικό MODFLOW.
- Το λογισμικό MODFLOW, για την προσομοίωση του υδροφορέα και τα σενάρια για τη μελλοντική κατάσταση της περιοχής, με βάση πιθανές αλλαγές στην τροφοδοσία και άντληση.

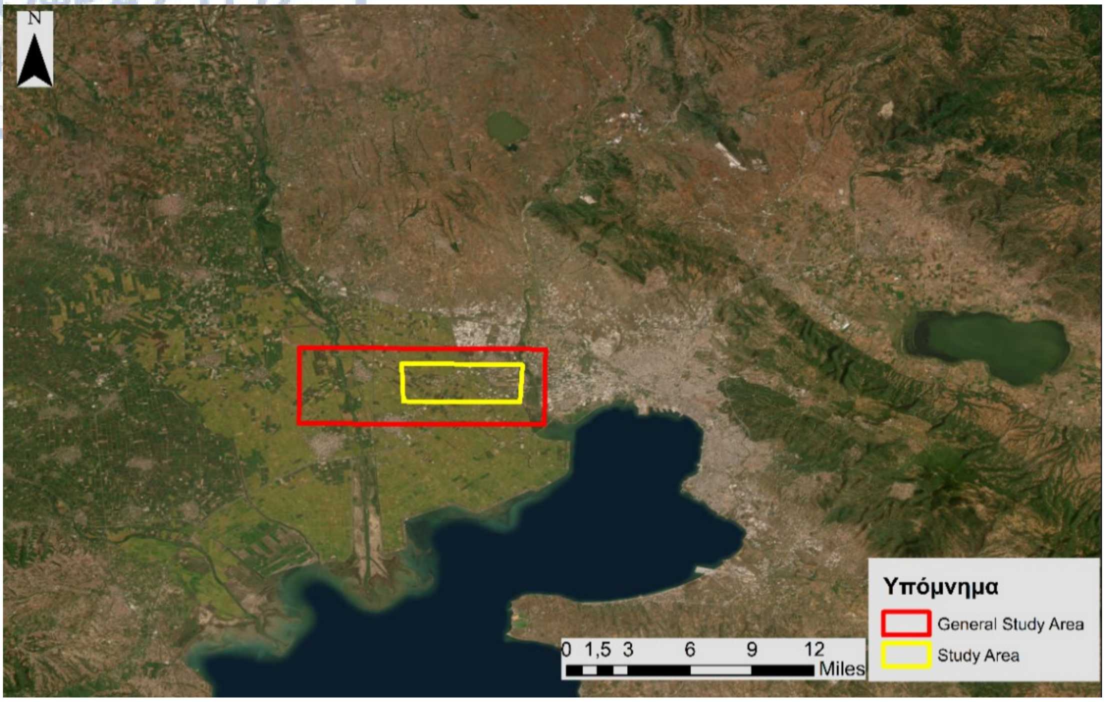
# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

## 2.1 Θέση περιοχής έρευνας

Η περιοχή ενδιαφέροντος της δεδομένης διπλωματικής εργασίας είναι η περιοχή της Σίνδου. Ανήκει στην Περιφερειακή Ενότητα Θεσσαλονίκης με έδρα τη Δημοτική Ενότητα Εχεδώρου και του Δήμου Δέλτα. Βρίσκεται σε απόσταση 14 χιλιομέτρων βορειοδυτικά της Θεσσαλονίκης, δυτικά του Γαλλικού ποταμού στα 2 χιλιόμετρα, ενώ ο πληθυσμός της ανέρχεται στους 10.000 κατοίκους περίπου. Επιπροσθέτως, βόρεια αυτής, βρίσκεται η Βιομηχανική Περιοχή Θεσσαλονίκης, η οποία αποτελεί στην Ελλάδα τη μεγαλύτερη βιομηχανική ζώνη, καθώς επίσης εντοπίζεται και το παράρτημα της Θεσσαλονίκης του Διεθνούς Πανεπιστημίου Ελλάδος.




Εικόνα 1. Στο κόκκινο πλαίσιο εντοπίζεται η Σίνδος, που αποτελεί την περιοχή του ενδιαφέροντος (Google Earth).

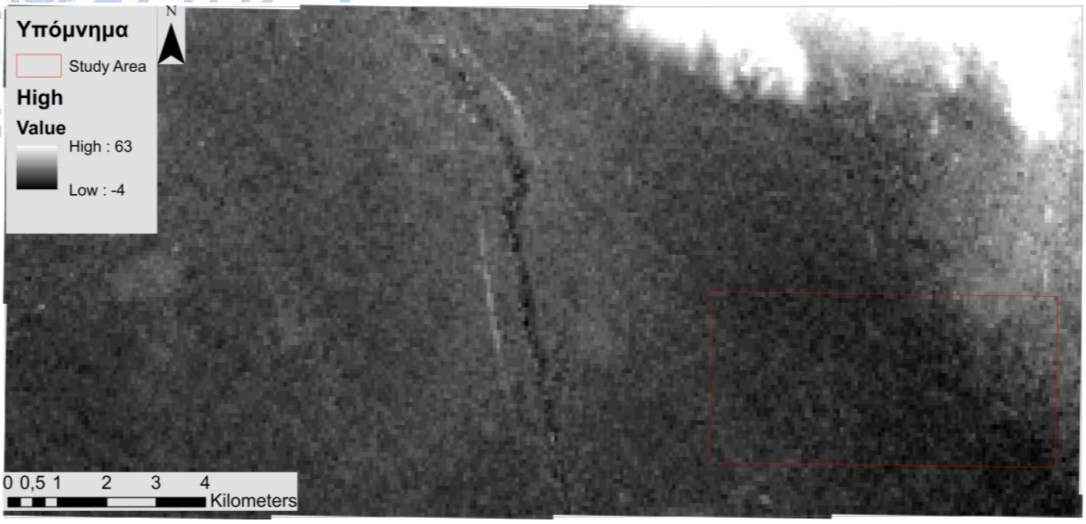



Εικόνα 2. Κόκκινο πλαίσιο η ευρύτερη περιοχή της περιοχής μελέτης και με κίτρινο χρώμα η περιοχή μελέτης. (ArcGIS)

## 2.2 Γεωμορφολογία

Η μορφολογία της ευρύτερης περιοχής μελέτης, όπου εκτείνεται μεταξύ του Χορτιάτη, Πάικου, Βερμίου και Πιέριων, φαίνεται να έχει τη μορφή τεκτονικής τάφρου. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας των ανοδικών και καθοδικών κινήσεων της ηπειρογένεσης, αλλά και της έντονης προσχωματικής δράσης των ποταμών Αξιού και Γαλλικού που διασχίσουν την πεδιάδα.

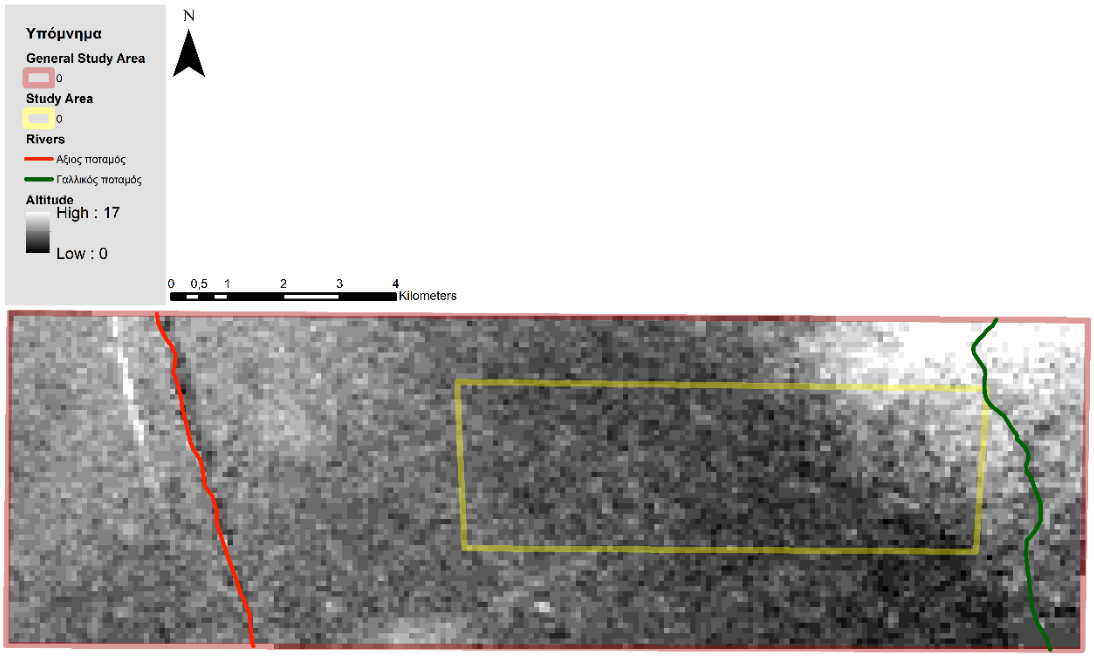
Η μορφολογία της περιοχής μελέτης εξετάστηκε και εξάχθηκε σε χάρτη μέσα από το λογισμικό ArcGIS. Όπως παρουσιάζεται και στον ακόλουθο χάρτη, φαίνεται το υψόμετρο να αυξάνεται και να φτάνει μέχρι και τα 9 m στα ΒΑ της περιοχής μελέτης, στα ΝΑ παρατηρείται μείωση αυτών αγγίζοντας τα μηδέν μέτρα, ενώ προς τα Δ παρατηρούνται οι ανώτερες τιμές των 4 m πάνω από τη θάλασσα. Όπως αποδεικνύεται και από τον χάρτη, η περιοχή παρουσιάζει ομαλή μορφολογία χωρίς μεγάλες διακυμάνσεις.




Εικόνα 3. Μορφολογικός χάρτης ευρύτερης περιοχής, όπου το κόκκινο πλαίσιο η περιοχή μελέτης με άνοδος υψομέτρου στα ΒΑ και η μείωση αυτού στα κεντρικά και ΝΑ. (ArcGIS)

## 2.3 Υδρογραφικό δίκτυο

Ο ακόλουθος χάρτης εξάχθηκε από το λογισμικό ArcGIS και αντιπροσωπεύει το υδρογραφικό δίκτυο της περιοχής μελέτης. Παρατηρείται ότι υπάρχουν δύο κύρια ποτάμια εκατέρωθεν της περιοχής ενδιαφέροντος, ανατολικά ο Γαλλικός ποταμός και δυτικά ο Αξιός ποταμός. Σημαντικό είναι να επισημανθεί, ότι η τροφοδοσία των υπόγειων υδροφορέων γίνεται κυρίως από τον Γαλλικό ποταμό και δευτερευόντως από τον ποταμό Αξιό (Κουκίδου, 2005).




Εικόνα 4. Σε κόκκινο πλαίσιο είναι η ευρύτερη περιοχή ενδιαφέροντος, με κίτρινο πλαίσιο είναι η περιοχή μελέτης, με κόκκινη τεθλασμένη γραμμή ο Αξιός ποταμός και με πράσινη ο Γαλλικός ποταμός. (ArcGIS)

## 2.4 Κλιματικά στοιχεία

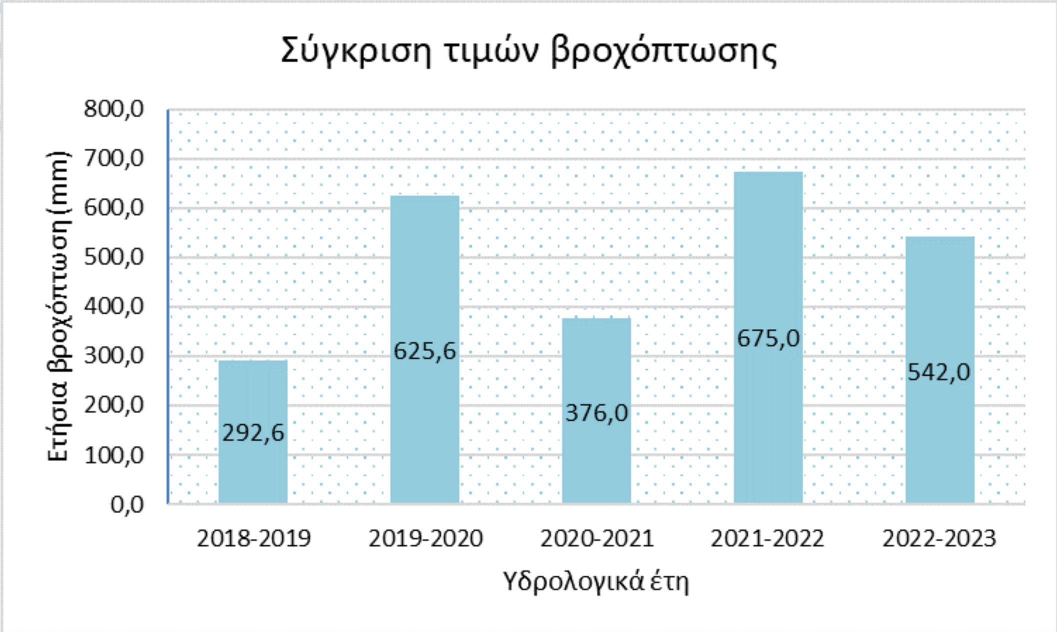
### 2.4.1 Βροχόπτωση

Για τον προσδιορισμό των βροχομετρικών στοιχείων της ευρύτερης περιοχής μελέτης, λήφθηκαν δεδομένα για τα υδρογεωλογικά έτη από το 2018 έως το 2023 από τον μετεωρολογικό σταθμό της Σίνδου. Πιο συγκεκριμένα, υδρογεωλογικό έτος ορίζεται η περίοδος από τον μήνα Οκτώβριο, έως τον μήνα Σεπτέμβριο του επόμενου έτους. Η συλλογή των δεδομένων για τα προαναφερθέντα υδρογεωλογικά έτη, φαίνεται στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 1. Ύψη βροχόπτωσης (mm) από τον σταθμό της Σίνδου για τα υδρογεωλογικά έτη 2018-2023, ΜΟ κάθε μήνα, μέγιστες και ελάχιστες τιμές αυτών.

| | 2018-2019 | 2019-2020 | 2020-2021 | 2021-2022 | 2022-2023 | M.O | Min | Max |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Οκτώβριος** | 0,4 | 28,4 | 17,6 | 157,2 | 7,6 | 42,24 | 0,4 | 157,2 |
| **Νοέμβριος** | 34,6 | 74 | 6,4 | 58,8 | 57,6 | 46,28 | 6,4 | 74 |
| **Δεκέμβριος** | 20,4 | 79,8 | 80,4 | 51 | 46,6 | 55,64 | 20,4 | 80,4 |
| **Ιανουάριος** | 61,4 | 3,8 | 126,4 | 25,8 | 66 | 56,68 | 3,8 | 126,4 |
| **Φεβρουάριος** | 5,2 | 0,6 | 6 | 57 | 13,8 | 16,52 | 0,6 | 57 |
| **Μάρτιος** | 12,6 | 127,4 | 22 | 53,6 | 45,6 | 52,24 | 12,6 | 127,4 |
| **Απρίλιος** | 47,2 | 107,2 | 51,4 | 41,8 | 79,8 | 65,48 | 41,8 | 107,2 |
| **Μάιος** | 26 | 22,4 | 8 | 10,4 | 114,4 | 36,24 | 8 | 114,4 |
| **Ιούνιος** | 19,2 | 42 | 28,2 | 77,8 | 71,4 | 47,72 | 19,2 | 77,8 |
| **Ιούλιος** | 30 | 45,2 | 1,4 | 35,8 | 11,2 | 24,72 | 1,4 | 45,2 |
| **Αύγουστος** | 6 | 78,8 | 6 | 39,8 | 9,2 | 27,96 | 6 | 78,8 |
| **Σεπτέμβριος** | 29,6 | 16 | 22,2 | 66 | 18,8 | 30,52 | 16 | 66 |
| **Σύνολο** | **292,6** | **625,6** | **376** | **675** | **542** | **502,24** | | |

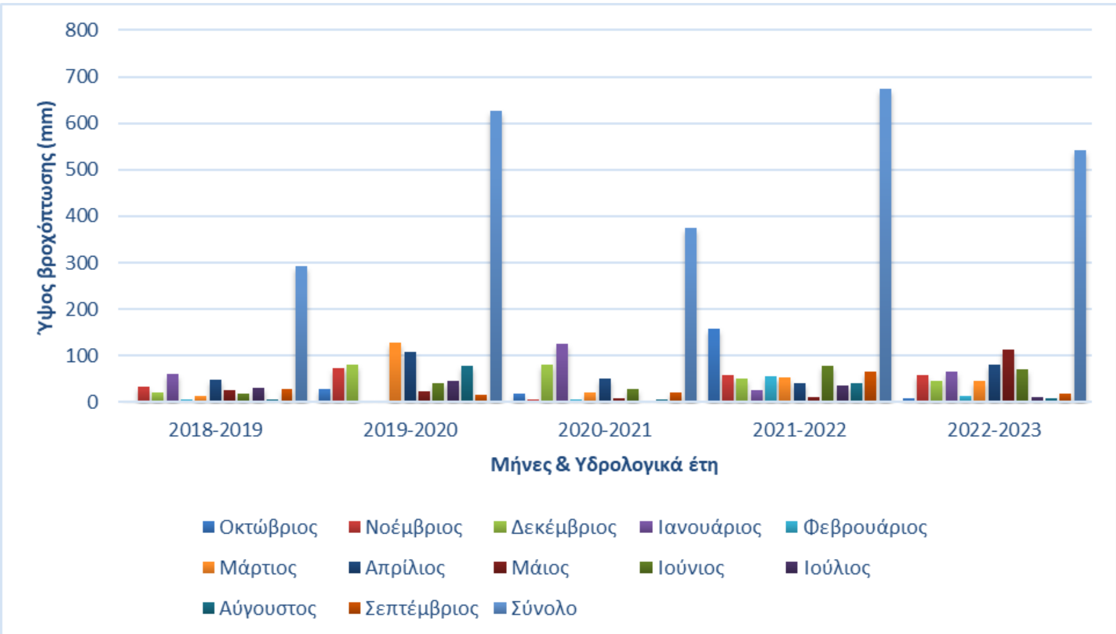
Ειδικότερα, παρατηρείται σύμφωνα με το ιστόγραμμα που ακολουθεί, ότι το υδρογεωλογικό έτος 2021-2022 έχει το μεγαλύτερο μέσο όρο ύψους βροχής στην περιοχή, με τιμή 675 mm βροχής, ενώ το μικρότερο αποδίδεται στο υδρογεωλογικό έτος 2018-2019 με ύψος βροχής που ανέρχεται στα 292,6 mm.




Εικόνα 5. Σύγκριση τιμών ύψους βροχόπτωσης για τα υδρογεωλογικά έτη 2018-2023.

Αναλύοντας τον Πίνακα 1, παρατηρούνται στις δύο τελευταίες στήλες οι μικρότερες και μεγαλύτερες τιμές βροχόπτωσης για τον κάθε μήνα και κάθε έτος ξεχωριστά. Ειδικότερα, εντοπίζεται το χαμηλότερο ύψος βροχής 0,4 mm τον μήνα Οκτώβριο του υδρογεωλογικού έτους 2018-2019 ενώ, τον ίδιο μήνα αλλά το υδρογεωλογικό έτος 2021-2022 σημειώνεται η υψηλότερη τιμή στα 157,2 mm.

Όπως ήταν αναμενόμενο, οι τιμές μειώνονται τους εαρινούς κυρίως μήνες, Μάιο, Ιούνιο, Ιούλιο, Αύγουστο και Σεπτέμβριο, οι οποίες αγγίζουν τιμές έως και 24,72mm, κατά μέσο όρο, τον Ιούλιο. Τους υπόλοιπους μήνες τα ύψη αυξάνονται, με τον μήνα Απρίλιο να κατατάσσεται πρώτος, με μέσο όρο ύψους 65,48 mm και ακολουθούν ο Ιανουάριος και ο Δεκέμβριος με μέσο όρο 56,68 mm και 55,64 mm, αντίστοιχα.




Εικόνα 6. Συγκεντρωτικό ιστόγραμμα ύψους βροχόπτωσης και υδρογεωλογικών ετών.

### 2.4.2 Θερμοκρασία

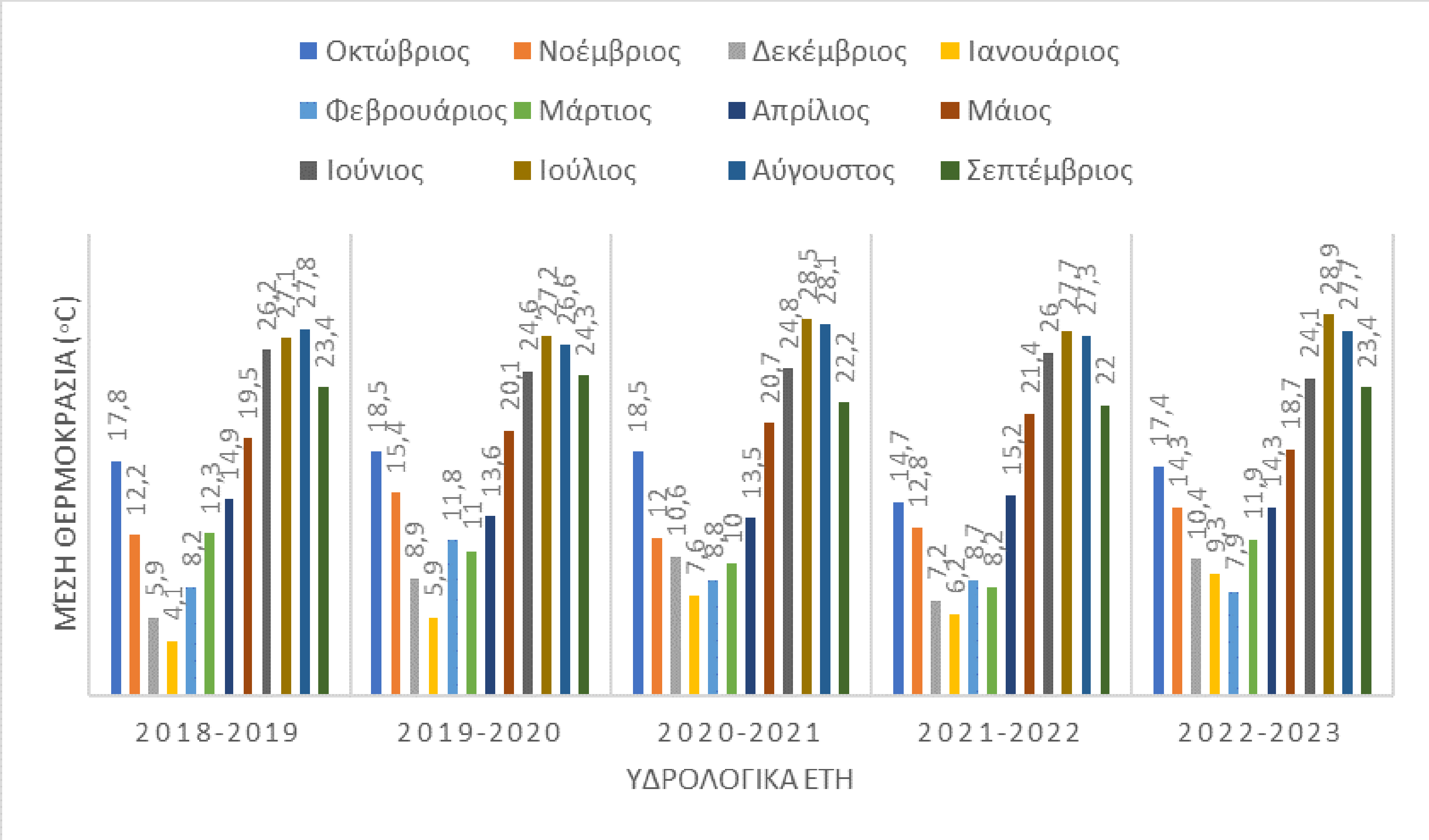
Για την ανάλυση τις θερμοκρασίας, τα δεδομένα αντλήθηκαν από το σταθμό της Σίνδου, όπως και της βροχόπτωσης, και είναι συγκεντρωμένα στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 2. Συγκεντρωτικός πίνακας μέσων θερμοκρασιών (°C) για τα υδρογεωλογικά έτη 2018-2023.

| | 2018 -2019 | 2019-2020 | 2020-2021 | 2021-2022 | 2022-2023 | Min | Max |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Οκτώβριος** | 17,8 | 18,5 | 18,5 | 14,7 | 17,4 | 14,7 | 18,5 |
| **Νοέμβριος** | 12,2 | 15,4 | 12 | 12,8 | 14,3 | 12 | 15,4 |
| **Δεκέμβριος** | 5,9 | 8,9 | 10,6 | 7,2 | 10,4 | 5,9 | 10,6 |
| **Ιανουάριος** | 4,1 | 5,9 | 7,6 | 6,2 | 9,3 | 4,1 | 9,3 |
| **Φεβρουάριος** | 8,2 | 11,8 | 8,8 | 8,7 | 7,9 | 7,9 | 11,8 |
| **Μάρτιος** | 12,3 | 11 | 10 | 8,2 | 11,9 | 8,2 | 12,3 |
| **Απρίλιος** | 14,9 | 13,6 | 13,5 | 15,2 | 14,3 | 13,5 | 15,2 |
| **Μάιος** | 19,5 | 20,1 | 20,7 | 21,4 | 18,7 | 18,7 | 21,4 |
| **Ιούνιος** | 26,2 | 24,6 | 24,8 | 26 | 24,1 | 24,1 | 26,2 |
| **Ιούλιος** | 27,1 | 27,2 | 28,5 | 27,7 | 28,9 | 27,1 | 28,9 |
| **Αύγουστος** | 27,8 | 26,6 | 28,1 | 27,3 | 27,7 | 26,6 | 28,1 |
| **Σεπτέμβριος** | 23,4 | 24,3 | 22,2 | 22 | 23,4 | 22 | 24,3 |

Στον Πίνακα 2 αναγράφονται οι μέσες τιμές της θερμοκρασίας κατά τα υδρογεωλογικά έτη 2018 έως 2023. Παρατηρείται ότι οι εαρινοί μήνες κατατάσσονται στους θερμότερους μήνες, όπως άλλωστε ήταν αναμενόμενο, και οι χειμερινοί στους ψυχρότερους. Ειδικότερα, ο πιο θερμός μήνας ορίζεται ο Ιούλιος του υδρολογικού έτους 2022-2023 με μέση θερμοκρασία 28,9°C, ενώ ο πιο ψυχρός ταυτίζεται με τον Ιανουάριο του 2018-2019 με 4,1°C.

Πιο συγκεκριμένα, τα υδρογεωλογικά έτη δεν έχουν αξιοσημείωτες διαφορές μεταξύ τους. Το έτος με τις μικρότερες, κατά μέσο όρο, θερμοκρασίες είναι το 2021-2022 ενώ με τις υψηλότερες είναι το 2022-2023. Οι εαρινοί μήνες κυμαίνονται μεταξύ των θερμοκρασιών 24,1°C και 28,9°C και οι χειμερινοί μεταξύ των 4,1°C και 11,8°C. Οι θερμοκρασίες που επικρατούν τα καλοκαίρια δεν παρουσιάζουν κάποια ιδιαιτερότητα, καθώς δεν θεωρούνται ούτε πολύ δροσερά, αλλά ούτε και πολύ ζεστά. Αντιθέτως, τους χειμερινούς μήνες η τιμή 11,8°C θεωρείται υψηλή, ειδικά για τον μήνα Φεβρουάριο όπου υπολογίστηκε.

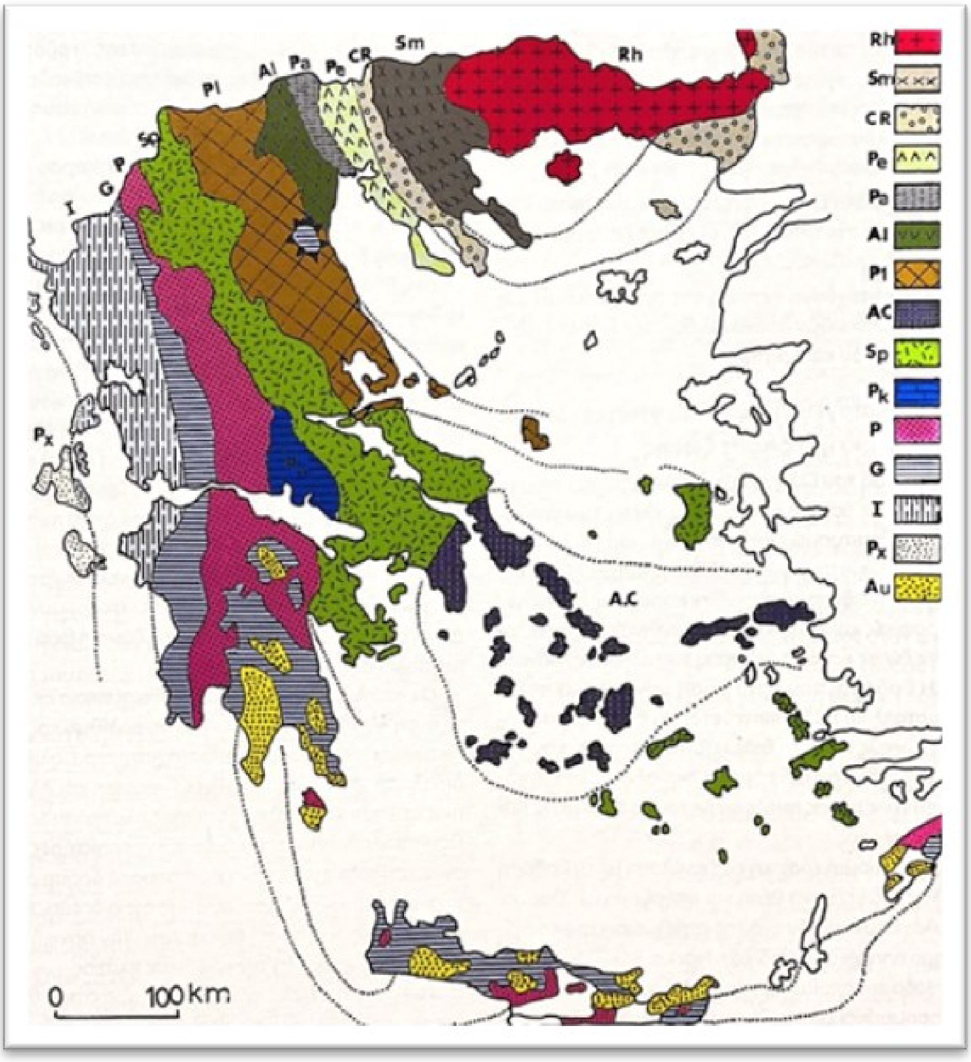



Εικόνα 7. Συγκεντρωτικό ιστόγραμμα μέσων θερμοκρασιών για τα υδρογεωλογικά έτη 2018-2023.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΓΕΩΛΟΓΙΑ-ΤΕΚΤΟΝΙΚΗ

## 3.1 Γενικά

Η περιοχή της Σίνδου αποτελεί την ευρύτερη περιοχή μελέτης της δεδομένης διπλωματικής εργασίας. Ανήκει στις Εσωτερικές Ελληνίδες στη Ζώνη Αξιού, και πιο συγκεκριμένα, στην Υποζώνη Παιονίας.

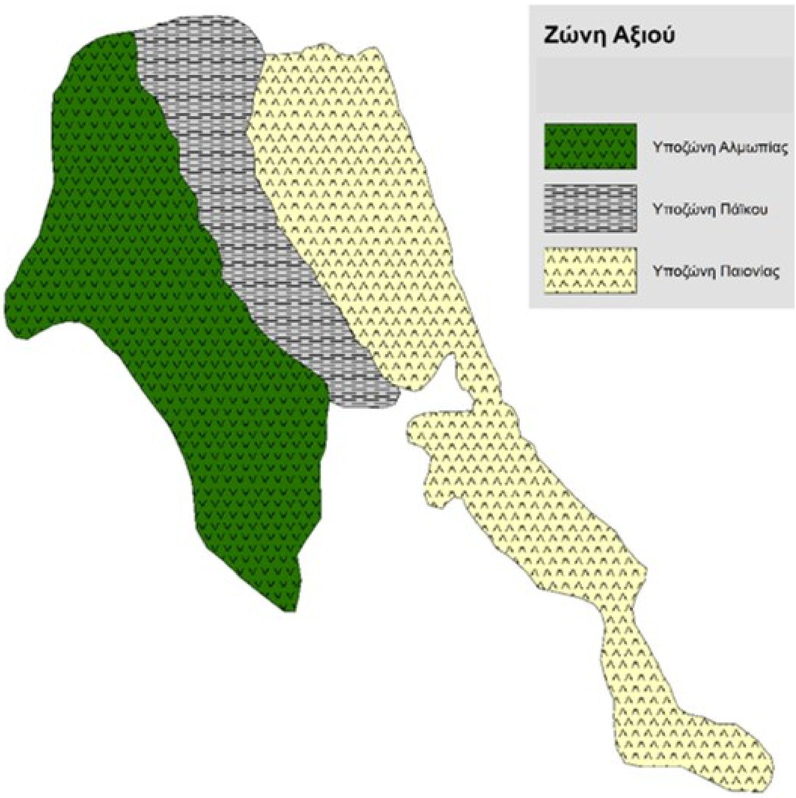



Εικόνα 8. Γεωτεκτονικός χάρτης Ελληνίδων ζωνών. Au: Ενότητα Πλακωδών Ασβεστόλιθων, Px: ζώνη Παξών, I: Ιόνιος ζώνη, G: ζώνη Γαβρόβου – Τρίπολης, P: ζώνη Πίνδου, Pk: ζώνη Παρνασσού – Γκιώνας, Sp: Υποπελαγονική ζώνη, Ac: Αττικό-Κυκλαδική ζώνη, Pl: Πελαγονική ζώνη, Ζώνη Αξιού: (Pe: Υποζώνη Παιονίας, Pa: Υποζώνη Πάικου Al: Υποζώνη Αλμωπίας), CR: Περιροδοπική ζώνη, Rh: Μάζα Ροδόπης, Sm: Σερβομακεδονική μάζα. (Μουντράκης, 2020)

## 3.2 Γεωλογία

### 3.2.1 Ζώνη Αξιού

Η ζώνη Αξιού, ή αλλιώς «Ζώνη Vardar», περικλείεται από την Πελαγονική ζώνη στα Δυτικά και από τη μάζα της Ροδόπης στα Ανατολικά. Η διεύθυνσή της θεωρείται ότι είναι ΒΒΔ – ΝΝΑ ενώ το πλάτος της υπολογίζεται από 30 km έως τα 70 km. Η έκταση της είναι μεγάλη, καθώς γίνεται ορατή από τα Σκόπια της Γιουγκοσλαβίας, διέρχεται από τον Θερμαϊκό κόλπο και περνάει στα νησιά του Αιγαίου και των Βόρειων Σποράδων, ενώ με μια κάμψη καταλήγει προς τη Μικρά Ασία με πιθανή διεύθυνση
ΝΔ – ΒΑ. Η δεδομένη ζώνη αποτελείται από τρεις υποζώνες και είναι οι ακόλουθες: α) Αύλακα Παιονίας, β) Ύβωμα Πάικου και γ) Αύλακα Αλμωπίας, όπου για την παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζεται η υποζώνη Παιονίας.




Εικόνα 9. Ζώνη Αξιού με τις τρεις Υποζώνες Αλμωπίας, Πάικου και Παιονίας. (ArcGIS)

### 3.2.2 Υποζώνη Παιονίας

Σε πρώτο στάδιο, η υποζώνη της Παιονίας, είχε χαρακτηριστεί ως Μεσοζωϊκή αύλακα μεταξύ του υβώματος του Πάικου και της Σερβομακεδονικής ζώνης, ενώ σε δεύτερο στάδιο θεωρήθηκε ότι γεωτεκτονικά αντιπροσωπεύει τμήμα της παλιάς ωκεάνιας περιοχής της Τηθύος. Ωστόσο, υπήρχε πρόβλημα εάν εντοπίζεται διαφορά τόσο παλαιογραφικά όσο και γεωτεκτονικά με την Περιροδοπική ζώνη, το οποίο όμως λύθηκε καθώς επισημάνθηκε ότι η υποζώνη της Παιονίας περιλαμβάνει τα ιζήματα που είχαν αποτεθεί στην ανοιχτή βαθιά θάλασσα ενώ η δεύτερη, ότι αντιπροσωπεύει τα ιζήματα που είχαν αποτεθεί στην παλιά περιφερειακή τάφρο – αύλακα και στην ηπειρωτική κατωφέρεια της Ενδοχώρας.

### 3.2.3 Γεωλογία περιοχής έρευνας

Η περιοχή έρευνας εκτείνεται μεταξύ των ποταμών Αξιού και Γαλλικού. Επομένως, προκύπτει ότι στην περιοχή εντοπίζονται κατά κύριο λόγο ιζήματα του Τεταρτογενούς. Πιο συγκεκριμένα, είναι χερσαία, λιμναία, ποταμοχειμάρρια και ποτάμια ιζήματα όπου, από τα παλαιότερα προς τα νεότερα, είναι τα ακόλουθα:

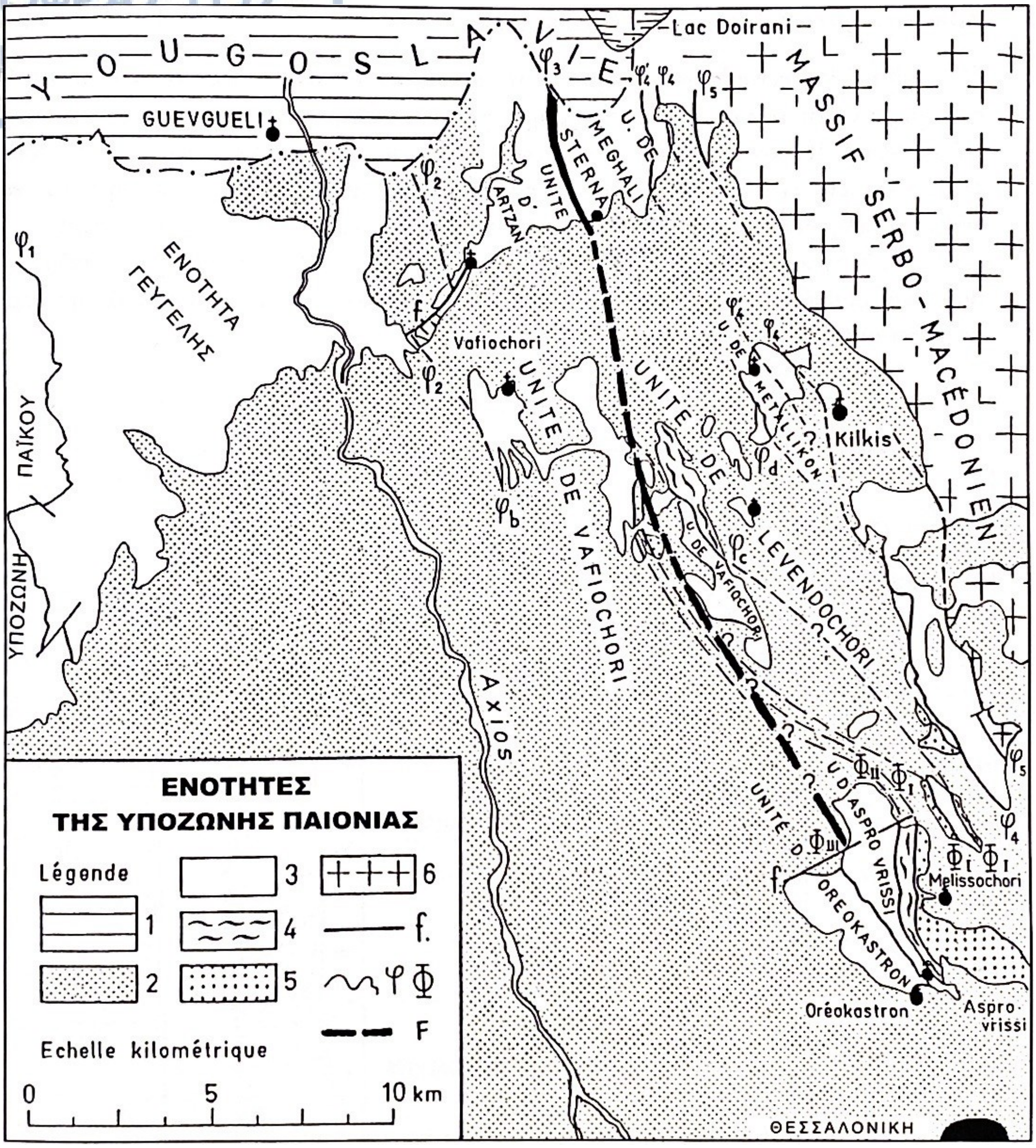
- Πλειστοκαινικές αποθέσεις
- Αργιλώδεις άμμοι κεραμόχρωμου χρώματος, χαλαροί ψαμμίτες όπου καλύπτονται κατά θέσεις από ελλουβιακές αποθέσεις και χαλαρά κροκαλοπαγή
- Ολοκαινικές αποθέσεις
- Ενστρώσεις άμμων, κροκάλων, χαλικιών, αργίλων και ιλύων όπου εμπεριέχονται στις προσχώσεις των κοιλάδων
- Χάλικες, κροκάλες και αμμούχοι άργιλοι που βρίσκονται στις σύγχρονες αποθέσεις των ποταμών
- Ελλουβιακές αποθέσεις που καλύπτουν τις Πλειστοκαινικές αποθέσεις και το γεωλογικό υπόβαθρο, αποτελώντας έναν μανδύα με αποσαθρωμένες λατύπες και σχιστόλιθους
- Αλλουβιακά ριπίδια που συνιστώνται από λεπτόκοκκα και χονδρόκοκκα υλικά

## 3.3 Τεκτονική

Το βασικό τεκτονικό χαρακτηριστικό της υποζώνης της Παιονίας, είναι η λεπιοειδής τεκτονική της. Πιο συγκεκριμένα, αποτελείται από τεκτονικά λέπια τα οποία δημιουργήθηκαν από τη συμπιεστική τεκτονική κατά την περίοδο του Τριτογενούς, και έχουν τόσο μικρές όσο και μεγάλες διαστάσεις. Αυτά τα μεγαλέπια που το καθένα αποτελείται από συγκεκριμένους σχηματισμούς, αποτελούν τις υποενότητες της ζώνης, είναι αποκομμένα μεταξύ τους με κλίση προς τα ΒΑ και παρουσιάζουν συνεχείς εφιππεύσεις προς τα Δ και ΝΔ, ενώ τέλος, βρίσκονται τοποθετημένα το ένα πάνω στο άλλο.

Οι ενότητες – μεγαλέπια που διακρίνονται στην υποζώνη της Παιονίας είναι οι ακόλουθες: α) Ενότητα Λεβεντοχωρίου, β) Ενότητα Μεταλλικού, γ) Ενότητα Άσπρης Βρύσης, δ) Ενότητα Αρτζάν, ε) Ενότητα Βαφειοχωρίου, στ) Ενότητα Ωραιοκάστρου και η) Ενότητα Γευγελής.

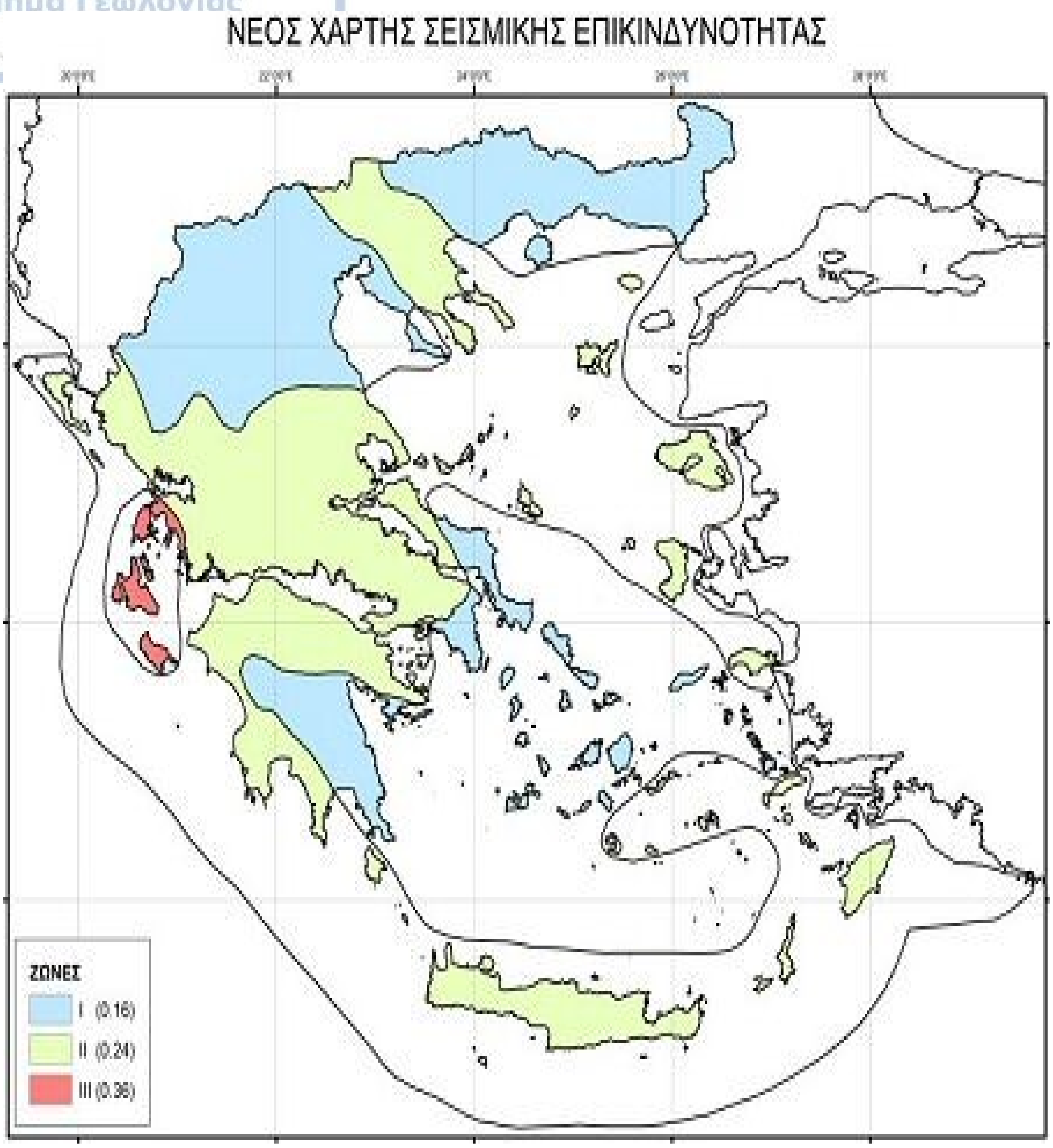
Έτσι, τεκτονικά βυθίσματα που δημιουργήθηκαν από αυτές τις ηπειρογενετικές και ορογενετικές κινήσεις αποτελούν οι λεκάνες απορροής των δύο ποταμών που περιβάλλουν την περιοχή ενδιαφέροντος, του Αξιού και του Γαλλικού.




Εικόνα 10. Σχηματικός χάρτης με τις ενότητες της υποζώνης Παιονίας. 1. Γιουγκοσλαβία, 2. Σχηματισμοί μεταλπικοί Νεογενούς και Τεταρτογενούς, 3.σχηματισμοί αλπικοί, 4. Κρυσταλλοσχιστώδες υπόβαθρο της ζώνης, 5. Φλύσχης, 6. Κρυσταλλοσχιστώδες της Σερβομακεδονικής, f. Ρήγματα, φ και Φ. ανώμαλες επαφές (Κατά Mercier 1966). F. πιθανό όριο Παιονίας – Περιροδοπικής σύμφωνα με τις νεότερες απόψεις. (Μουντράκης, 2020)

## 3.4 Σεισμικότητα

Όσον αφορά τη σεισμικότητα της περιοχής, σύμφωνα με την τελευταία αναθεώρηση το 2003 του χάρτη σεισμικής επικινδυνότητας για την Ελλάδα, με την τροποποίηση των ανάλογων διατάξεων του Ελληνικού Αντισεισμικού Κανονισμού ΕΑΚ 2000, η περιοχή ενδιαφέροντος ανήκει στη μπλε ζώνη. Πιο συγκεκριμένα, αυτή είναι η Ζώνη Ι η οποία φτάνει μέγιστη εδαφική επιτάχυνση PGA 0,16g.




Εικόνα 11. Νέος ελληνικός χάρτης σεισμικής επικινδυνότητας (ΕΑΚ 2000).

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΑ-ΥΔΡΟΦΟΡΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

## 4.1 Γενικά

Το νερό κατατάσσεται σε έναν από τους σημαντικότερους φυσικούς πόρους, καθώς έχει τον κυρίαρχο ρόλο στη ζωή και την ανάπτυξη όλων των οργανισμών. Στον πλανήτη μας εντοπίζεται σε ποικίλες μορφές πχ. υγρή, στερεή, αέρια, ακολουθώντας μια κυκλική τροχιά, τον επονομαζόμενο «υδρολογικό κύκλο». Ειδικότερα, το νερό των επιφανειακών συγκεντρώσεων νερού εξατμίζεται στην ατμόσφαιρα, γίνεται η συμπύκνωσή του στα σύννεφα και κατακρημνίζεται ξανά στην επιφάνεια της γης και στη θάλασσα. Ένα μέρος της ποσότητας που φτάνει στην επιφάνεια του εδάφους, αποθηκεύεται κάτω από την επιφάνειά της και αυτό είναι το λεγόμενο υπόγειο νερό.

## 4.2 Υπόγειοι υδροφορείς

Οι γεωλογικοί σχηματισμοί κάτω από την επιφάνεια του εδάφους που είναι κορεσμένοι με το νερό που αποθηκεύτηκε, ονομάζονται υδροφορείς, και είναι ικανοί να τροφοδοτήσουν πηγές και γεωτρήσεις με γενναιόδωρες ποσότητες ύδατος.

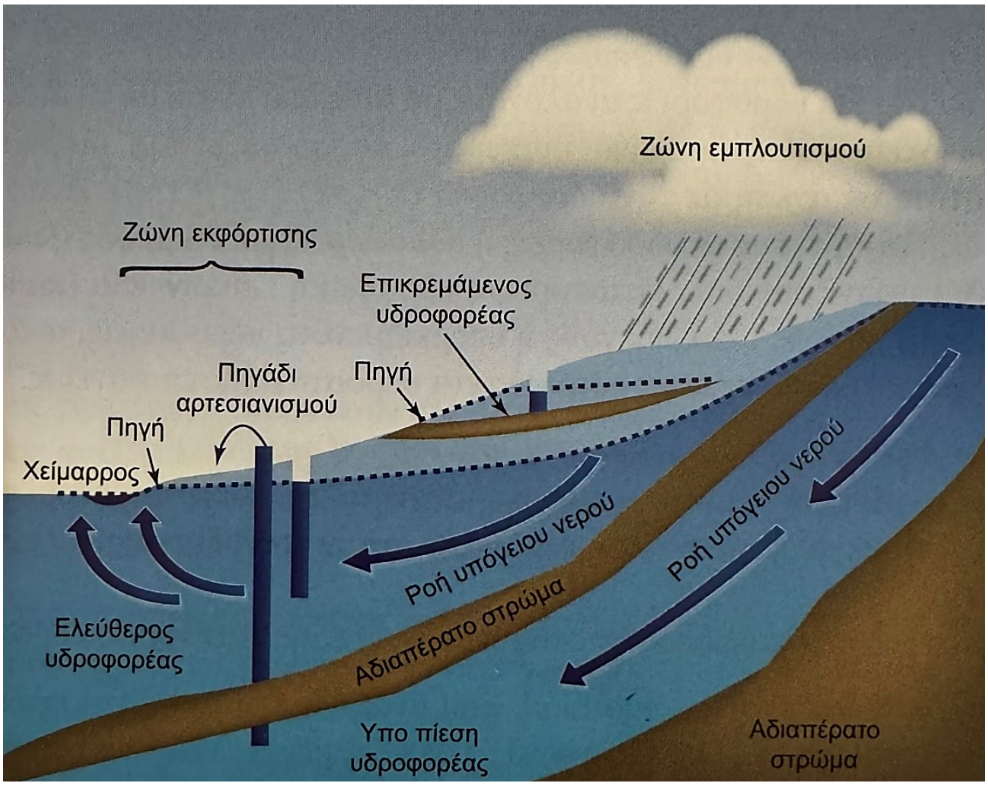
Οι υπόγειοι υδροφορείς χωρίζονται σε τέσσερις (4) βασικούς τύπους και είναι οι ακόλουθοι:

i. Ελεύθεροι υδροφορείς (unconfined aquifers). Οι δεδομένοι υδροφορείς χαρακτηρίζονται από το στεγανό τους δάπεδο ενώ στην οροφή τους δεν εντοπίζεται αδιαπέρατο γεωλογικό στρώμα. Έτσι, η υδροστατική πίεση είναι ίση με την ατμοσφαιρική πίεση στην ελεύθερη επιφάνεια του υπόγειου νερού. Ο όγκος και το πάχος του νερού αυτού, είναι μεταβαλλόμενα ανάλογα με την άντληση που πραγματοποιείται από τις γεωτρήσεις και τα πηγάδια.

ii. Υπό πίεση υδροφορείς (confined aquifers). Το νερό σε αυτούς τους υδροφορείς είναι συγκρατημένο μέσα σε αδιαπέρατη οροφή και δάπεδο. Η πίεση του νερού είναι μεγαλύτερη από την ατμοσφαιρική πίεση ενώ η υδροπερατότητα (k) σε αυτό το στρώμα είναι μη μετρήσιμη, δηλαδή $k \approx 0$. Έτσι, η πιεζομετρική επιφάνεια ταυτίζεται με την υδροστατική επιφάνεια του υδροφορέα και βρίσκεται σε μεγαλύτερο υψόμετρο από την αδιαπέρατη οροφή.

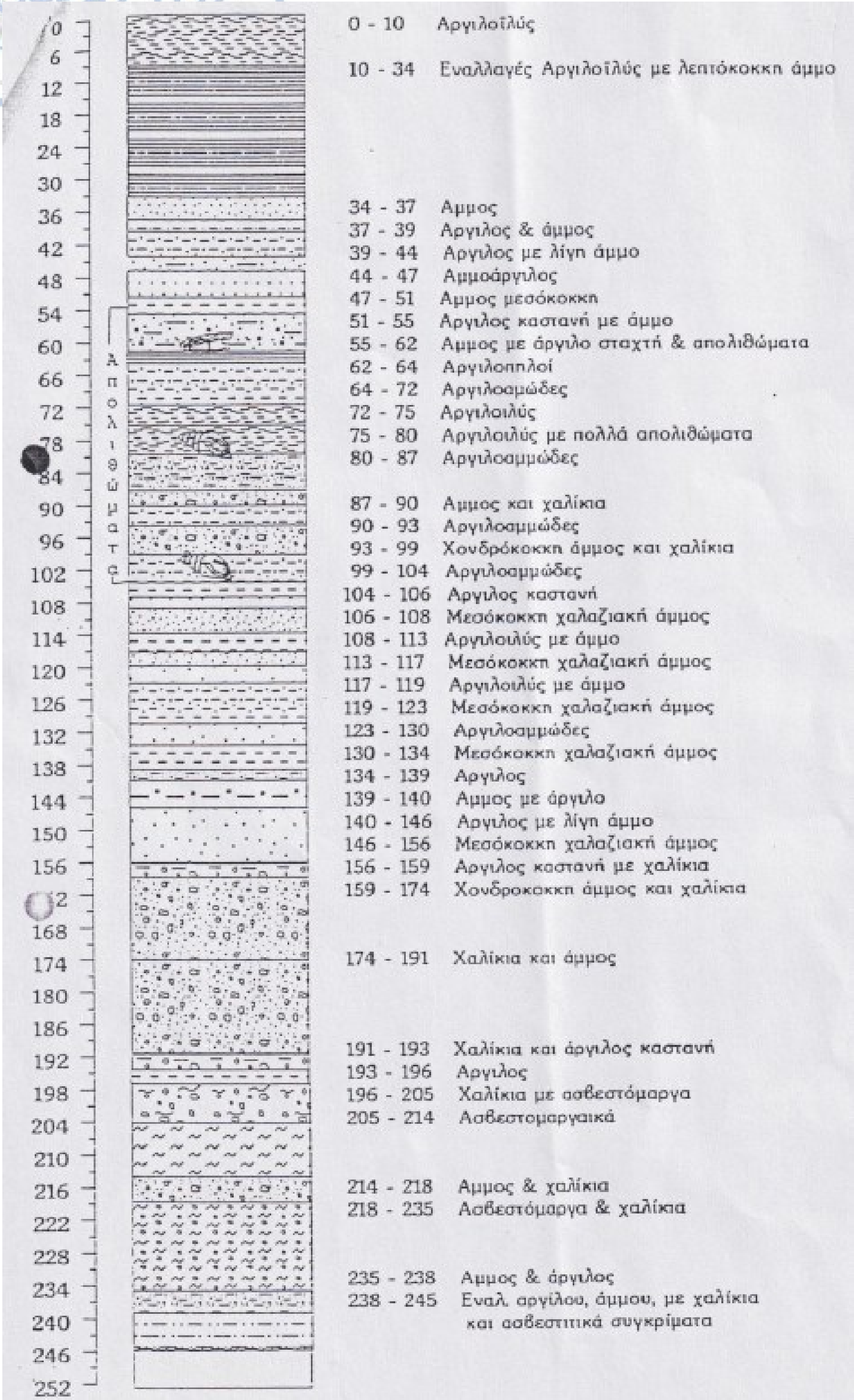
iii. Ημιεγκλωβισμένοι υδροφορείς (semi-confined aquifers). Οι υδροφορείς αυτοί, είναι παραπλήσιοι με τους υπό πίεση, με την ειδοποιό διαφορά ότι το στρώμα της οροφής είναι ημιπερατό. Μπορεί να συναντηθούν και ως ημι-αρτεσιανοί υδροφορείς (leaky aquifers).

iv. Ημιελεύθεροι υδροφορείς (semi-unconfined aquifers). Οι δεδομένοι υδροφορείς χαρακτηρίζονται από τη μεγάλη τους υδροπερατότητα στο στρώμα που υπέρκειται, η οποία όμως δεν ξεπερνά αυτή του υδροφορέα.




Εικόνα 12. Βασικότερα είδη των υδροφορέων (Βουδούρης, 2013)

Στην περίπτωση της περιοχής μελέτης της παρούσας διπλωματικής εργασίας, ο υδροφορέας χαρακτηρίζεται από έναν συνδυασμό ελεύθερου και υπό πίεση υδροφορέας (unconfined/confined aquifer) καθώς τα ανώτερα στρώματα είναι κυρίως άμμος, άργιλος, ιλύς, όπως φαίνεται και στην παρακάτω ενδεικτική τομή από τη γεώτρηση Σ06Ν.




Εικόνα 13. Λιθολογική τομή γεώτρησης Σ06Ν, στην περιοχή μελέτης.

## 4.3 Υδραυλικά χαρακτηριστικά

### 4.3.1 Υδραυλικό φορτίο (h)

Το υδραυλικό φορτίο (hydraulic head) είναι η αιτία που το υπόγειο νερό κινείται, δηλαδή κινείται με την επίδραση της συνολικής ενέργειας που φέρει και η οποία ισούται, ανά μονάδα όγκου, με το άθροισμα της δυναμικής, υδροστατικής και κινητικής ενέργειας. Η σχέση που προσδιορίζει τον δεδομένο παράγοντα είναι η ακόλουθη:

$$h = z + \frac{P}{\gamma} \quad \text{ή} \quad h = z + h_p$$

Εξίσωση 1. Εξίσωση υδραυλικού φορτίου.

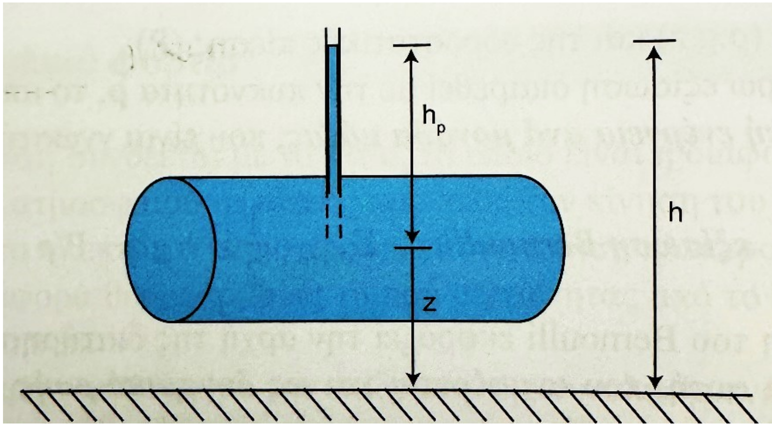
όπου:

z = η απόσταση από το επίπεδο αναφοράς

P = η υδροστατική πίεση

γ = το ειδικό βάρος του νερού

$h_p$ = το ύψος του νερού πάνω από μια επιφάνεια




Εικόνα 14. Υδραυλικό φορτίο (h), φορτίο πίεσης ($h_p$), φορτίο ύψους (z) (Βουδούρης, 2021).

Στους ελεύθερους υδροφορείς το υδραυλικό φορτίο ισούται με το απόλυτο υψόμετρο του νερού μέσα σε μια γεώτρηση, ενώ στους υπό πίεση υδροφορείς ισούται με το απόλυτο υψόμετρο του νερού, αν ο σωλήνας της γεώτρησης επεκτεινόταν πάνω από την επιφάνεια του εδάφους.

### 4.3.2 Περατότητα - Υδροπερατότητα (k)

Η περατότητα (intrinsic permeability) εξαρτάται μόνο από το σχήμα, το μέγεθος και τη διάταξη των κόκκων του πορώδους μέσου και είναι ανεξάρτητη του ρευστού. Μεγαλύτερη περατότητα εμφανίζουν τα χαλαρά υλικά σε σχέση με τα συνεκτικά και έχει τις διαστάσεις της επιφάνειας ($L^2$).

Η υδροπερατότητα (hydraulic conductivity) ή υδραυλική αγωγιμότητα (k) εξαρτάται από τις ιδιότητες του μέσου και αυτές του νερού. Με άλλα λόγια, με την υδραυλική αγωγιμότητα εκφράζουμε τη δυσκολία ή ευκολία του νερού να κινηθεί στο εκάστοτε μέσο και συμμετέχει ως παράμετρος και στο νόμο του Darcy (νόμος κίνησης του υπόγειου νερού). Έχει διαστάσεις ταχύτητας ($L^{-1}.T^{-1}$).

Ως προς την υδροπερατότητα οι σχηματισμοί κατατάσσονται ως εξής (Βουδούρης, 2013):

- Πολύ υδροπερατοί: $k \geq 10^{-1}$ m/s
- Υδροπερατοί: $10^{-6} < k < 10^{-1}$ m/s
- Λίγο υδροπερατοί: $10^{-9} < k < 10^{-6}$ m/s
- Πρακτικά στεγανοί: $k \leq 10^{-9}$ m/s

Οι τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας βασικών γεωλογικών σχηματισμών είναι οι ακόλουθες:

Πίνακας 3. Τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας (k) (Βουδούρης, 2013)

| Σχηματισμός | k (m/s) |
|---|---|
| **Άργιλος** | $10^{-9}$ |
| **Αμμώδης άργιλος** | $10^{-8}$ |
| **Ιλύς** | $10^{-8}$ - $10^{-7}$ |
| **Λεπτόκοκκη άμμος** | $10^{-4}$ - $10^{-5}$ |
| **Μεσόκοκκη άμμος** | $10^{-4}$ |
| **Χονδρόκοκκη άμμος** | $10^{-3}$ - $10^{-4}$ |
| **Χαλίκια μικρού μεγέθους** | $10^{-3}$ |
| **Χαλίκια μεσαίου μεγέθους** | $10^{-3}$ |
| **Μεγάλα χαλίκια** | $10^{-2}$ |

### 4.3.3 Αποθηκευτικότητα (S)

Σε ένα κατακόρυφο πρίσμα ενός υδροφόρου στρώματος με μοναδιαία επιφάνεια ανά μονάδα μεταβολής του φορτίου, ο όγκος του νερού που αποθηκεύεται ονομάζεται αποθηκευτικότητα (S). Η σχέση που αποδίδει την παράμετρο της αποθηκευτικότητας είναι η ακόλουθη:

$$S = \frac{\Delta V}{A.\Delta h}$$

Εξίσωση 2. Συντελεστής αποθηκευτικότητας.

Όπου:

ΔV = ο όγκος νερού που προστίθεται ή απελευθερώνεται

A = οριζόντιας επιφάνειας

Δh = διαφορά φορτίου (πτώση ή αύξηση)

Σύμφωνα με την παραπάνω σχέση προκύπτει, χωρίς να υπάρχει εμπλουτισμός, η ακόλουθη σχέση:

$$\frac{dh}{\Delta t} = \frac{q}{S * A}$$

Εξίσωση 3. Σχέση ρυθμού ταπείνωσης στάθμης.

Όπου:

$\frac{dh}{\Delta t}$ = ρυθμός μείωσης στάθμης

q = παροχή στην άντληση

A = επιφάνεια υπόγειου υδροφορέα

S = αποθηκευτικότητα

Οι τιμές του συντελεστή αποθηκευτικότητας ποικίλουν ανάλογα με τον υδροφορέα. Αυτό συμβαίνει, διότι στους υπό πίεση υδροφορείς η αποθηκευτικότητα αποτελεί συνάρτηση της συμπιεστότητας του περιεχόμενου υπόγειου νερού και της ελαστικότητας του υδροφορέα, δηλαδή την πρόσθεση ή την αφαίρεση νερού που αποδίδεται στη συμπίεση του υδροφορέα και στη διόγκωση του νερού.

- Στους ελεύθερους υδροφορείς παίρνει τιμές 1% - 30%.
- Στους υπό πίεση παίρνει τιμές 0,0001% - 0,5%.

Στους ελεύθερους υδροφορείς ο συντελεστής αποθηκευτικότητας S ταυτίζεται με το ενεργό πορώδες ενώ στους υπό πίεση ισχύει η ακόλουθη σχέση:

$$S = \gamma * D(\alpha + \beta S_y)$$

Εξίσωση 4. Συντελεστής αποθηκευτικότητας στους υπό πίεση υδροφορείς.

Όπου:

γ = ειδικό βάρους του νερού
D = πάχος του υδροφορέα
α = συντελεστής συμπιεστότητας του υδροφορέα
β = συντελεστής συμπιεστότητας του νερού
$S_y$ = το ενεργό πορώδες

### 4.3.4 Μεταβιβαστικότητα (T)

Η μεταβιβαστικότητα (transmissivity) ισούται με τον όγκο του νερού που διαπερνά μια μοναδιαία διατομή του υδροφόρου στρώματος, με την υδραυλική κλίση να ισούται με τη μονάδα και την επικράτηση του κινηματικού ιξώδους. Η σχέση που την εκφράζει, είναι το γινόμενο της υδραυλικής αγωγιμότητας (k) με το πάχος του υδροφόρου στρώματος (D) και είναι η ακόλουθη:

$$T = kD$$

Εξίσωση 5. Σχέση συντελεστή μεταβιβαστικότητας.

## 4.4 Υδρογεωλογία περιοχής έρευνας

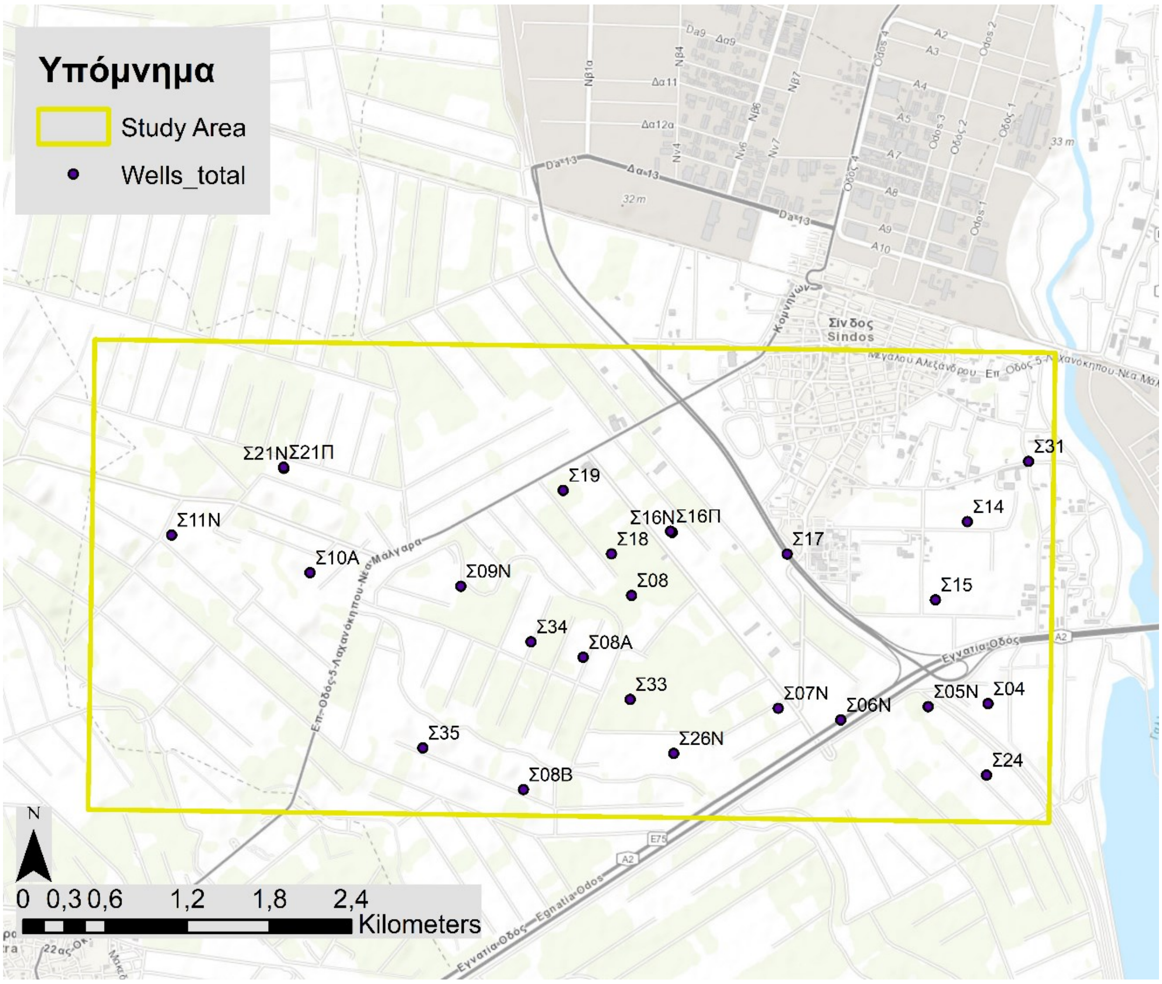
Για την περιοχή έρευνας, τα δεδομένα του υπόγειου νερού λήφθηκαν από τις γεωτρήσεις που υπάρχουν στη Σίνδο, σύμφωνα με την καταγραφή τους από την ΕΥΑΘ Α.Ε. Ανέρχονται στις 25 γεωτρήσεις στην περιοχή έρευνας οι οποίες είναι οι Σ04, Σ05Ν, Σ06Ν, Σ07Ν, Σ08, Σ08Α, Σ08Β, Σ09Ν, Σ10Α, Σ11Ν, Σ14, Σ15, Σ16Ν, Σ16Π, Σ17, Σ18, Σ19, Σ21Ν, Σ21Π, Σ24, Σ26Ν, Σ31, Σ33, Σ34 και η Σ35, και παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα με την ονομασία και την ακριβή τους τοποθεσία.

Πίνακας 4. Γεωτρήσεις περιοχής έρευνας (Σίνδος).

| ΓΕΩΤΡΗΣΗ | COORD_X | COORD_Y |
|---|---|---|
| **Σ04** | 400028,3 | 4500269 |
| **Σ05Ν** | 399591,2 | 4500247 |
| **Σ06Ν** | 398952,1 | 4500150 |
| **Σ07Ν** | 398495,2 | 4500235 |
| **Σ08** | 397423,2 | 4501061 |
| **Σ08Α** | 397068,9 | 4500608 |
| **Σ08Β** | 396633,2 | 4499640 |
| **Σ09Ν** | 396175 | 4501128 |
| **Σ10Α** | 395073 | 4501227 |
| **Σ11Ν** | 394061,8 | 4501503 |
| **Σ14** | 399877,1 | 4501602 |

| | | |
|---|---|---|
| **Σ15** | 399644,1 | 4501029 |
| **Σ16Ν** | 397720,1 | 4501522 |
| **Σ16Π** | 397707,7 | 4501531 |
| **Σ17** | 398560,1 | 4501364 |
| **Σ18** | 397277 | 4501365 |
| **Σ19** | 396922,8 | 4501830 |
| **Σ21Ν** | 394882,5 | 4501991 |
| **Σ21Π** | 394879,3 | 4501999 |
| **Σ24** | 400017,2 | 4499747 |
| **Σ26Ν** | 397730,9 | 4499905 |
| **Σ31** | 400324,5 | 4502043 |
| **Σ33** | 397413 | 4500300 |
| **Σ34** | 396688,5 | 4500722 |
| **Σ35** | 395897 | 4499945 |

Μέσω του λογισμικού ArcGIS εξάχθηκε ο παρακάτω χάρτης, στον οποίο παρουσιάζονται οι γεωτρήσεις στην περιοχή, σύμφωνα με τις γεωγραφικές συντεταγμένες τους από τον Πίνακα 4.



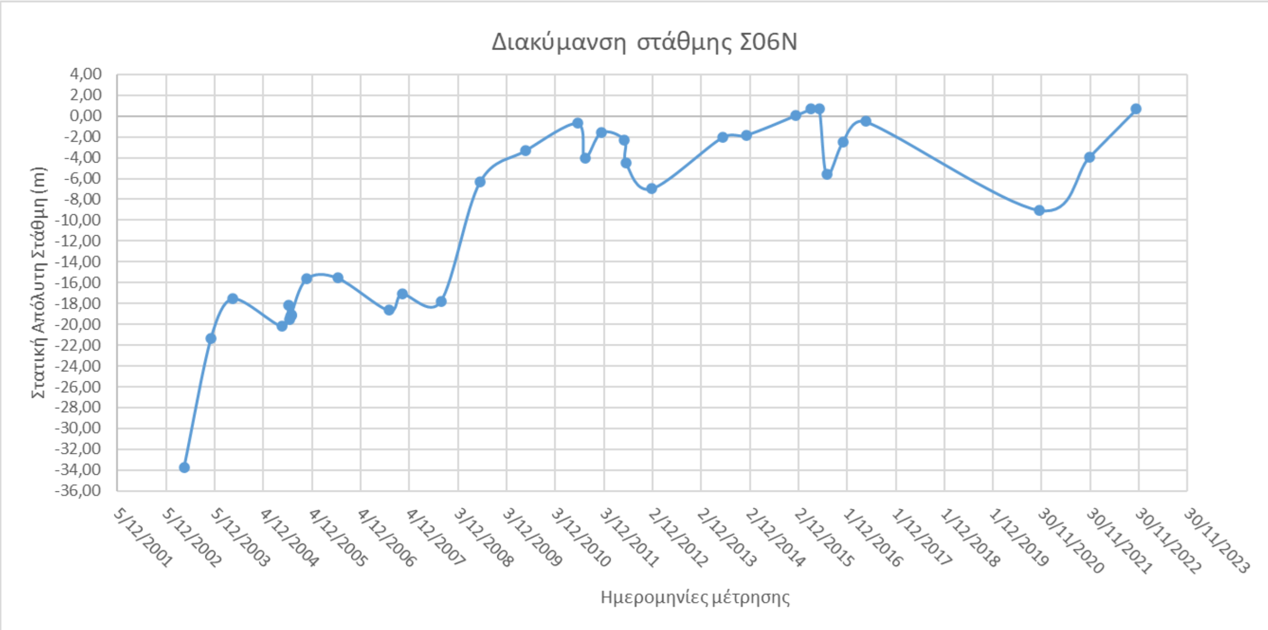

Εικόνα 15. Γεωτρήσεις περιοχής έρευνας, Σίνδου. (ArcGIS)

## 4.5 Διακύμανση υπόγειας στάθμης στον χρόνο

Η στάθμη των υπόγειων υδάτων επηρεάζεται τόσο από τις αντλήσεις στην περιοχή όσο και από την τροφοδοσία στις επιφανειακές συλλογές νερού και στους υπόγειους υδροφορείς. Η κατανόηση της διακύμανσης της υπόγειας στάθμης στην περιοχή ενδιαφέροντος, είναι απαραίτητη. Για τον λόγο αυτό, επιλέχθηκαν τρεις χαρακτηριστικές γεωτρήσεις, οι Σ06Ν, Σ10Α, Σ34 και δημιουργήθηκαν διαγράμματα διακύμανσης.

### 4.5.1 Γεώτρηση Σ06Ν

Η διακύμανση της στάθμης του υπόγειου νερού από τη γεώτρηση Σ06Ν παρουσιάζεται στο παρακάτω διάγραμμα.




Εικόνα 16. Διάγραμμα διακύμανσης στάθμης γεώτρησης Σ06Ν.

Σύμφωνα με το διάγραμμα στην Εικόνα 16, προκύπτουν τα κάτωθι συμπεράσματα:

i. Η χαμηλότερη τιμή της σχετικής απόλυτης στάθμης από τη γεώτρηση Σ06Ν, όπως καταγράφηκε από την παρατήρηση στο πεδίο, εντοπίζεται στις 22/4/2003 με βάθος -33,79 m από την επιφάνεια του εδάφους.
ii. Η υψηλότερη τιμή 0,66 m από την επιφάνεια του εδάφους, είναι στις 4/03/2016, 6/05/2016 και 10/11/2022.

iii. Το διάγραμμα της στάθμης παρουσιάζει αλλεπάλληλες διακυμάνσεις αλλά συνεχώς η στάθμη αυξάνεται με ομαλό ρυθμό. Πιο συγκεκριμένα, από τις 10/11/2003 έως τις 28/07/2008 οι αυξομειώσεις είναι πολύ μικρές, με την μικρότερη τιμή στα -21,36 m και τη μεγαλύτερη στα -15,54 m. Η επόμενη μέτρηση μετά τις 28/07/2008 είναι στις 20/05/2009 και η διαφορά στάθμης είναι μεγάλη, καθώς το 2008 ανερχόταν στα -17,82 m και το 2009 στα -6,31 m. Μετά το 2009, η διακύμανση αυξάνεται ομαλά με αυξομειώσεις ανάλογες με την περίοδο 2003 με 2008, όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Μεταξύ των ετών 2017 με 2020 δεν πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις, ωστόσο, μεγάλη είναι η πτώση της στάθμης, καθώς στις 19/04/2017 η στάθμη ήταν στα -0,52m ενώ στις 9/11/2020 έπεσε στα -9,03m.

### 4.5.2 Γεώτρηση Σ10Α

Από τη γεώτρηση Σ10Α η διακύμανση της στάθμης του υπόγειου νερού παρουσιάζεται στο παρακάτω διάγραμμα.


Εικόνα 17. Διάγραμμα διακύμανσης στάθμης γεώτρησης Σ10Α.

Σύμφωνα με το διάγραμμα στην Εικόνα 17, προκύπτουν τα παρακάτω συμπεράσματα:

i. Η χαμηλότερη τιμής σχετικής απόλυτης στάθμης είναι στα -26,33 m από την επιφάνεια του εδάφους, στις 21/11/2002.
ii. Η υψηλότερη τιμή φτάνει στα 1,66 m στις 6/05/2016.

iii. Όπως και στη γεώτρηση Σ06Ν, οι αυξομειώσεις της στάθμης είναι αλλεπάλληλες και συνεχώς αυξάνεται ομαλά η διακύμανση. Ωστόσο, οι μεταβολές είναι μικρότερες συγκριτικά με τις διακυμάνσεις από τη γεώτρηση Σ06Ν. Από τις 27/04/2007 μέχρι τις 22/03/2022 η διαφορά των σταθμών δεν είναι αξιοσημείωτη καθώς αγγίζει τα 7,47 m, ενώ στη γεώτρηση Σ06Ν η διαφορά ανερχόταν στα 20,82 m.

### 4.5.3 Γεώτρηση Σ34

Η τελευταία ενδεικτική γεώτρηση για τη διεξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τη σχετική απόλυτη στάθμη, είναι η γεώτρηση Σ34, όπου η διακύμανση της στάθμης του υπόγειου νερού παρουσιάζεται στο διάγραμμα που ακολουθεί.


Εικόνα 18. Διάγραμμα διακύμανσης στάθμης γεώτρησης Σ34.

Σύμφωνα με το διάγραμμα στην Εικόνα 18, προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα:

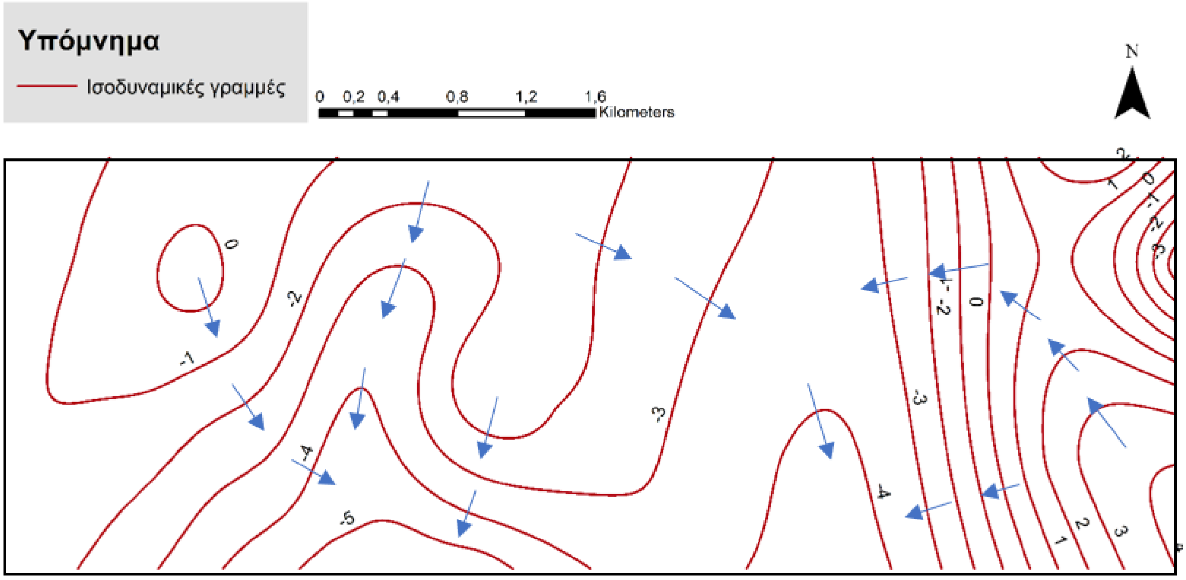
i. Η χαμηλότερη τιμής είναι στα -22,83 m από την επιφάνεια του εδάφους, στις 3/07/2002.
ii. Η υψηλότερη τιμή σχετικής απόλυτης στάθμης εντοπίζεται στα 1,56 m στις 6/05/2016.
iii. Η διακύμανση της στάθμης ακολουθεί παραπλήσια καμπύλη στο διάγραμμα, με αυτήν της γεώτρησης Σ10Α. Η αύξηση των στάθμεων είναι ομαλή και η διαφορά μεταξύ των ημερομηνιών 8/05/2002 και 22/11/2021, σε μεγαλύτερο

διάστημα συγκριτικά με τις διαφορές των προηγούμενων γεωτρήσεων, είναι στα 24,39 m.

## 4.6 Πιεζομετρικός χάρτης

Οι πιεζομετρικοί ή ισοπιεζομετρικοί χάρτες, παρέχουν πληροφορίες σχετικά με τη διεύθυνση της ροής, τι είδους είναι τα γεωλογικά σύνορα, ποιες είναι οι περιοχές που τροφοδοτούν την υφιστάμενη κλπ, σε μια δεδομένη χρονική στιγμή.

Για τη δεδομένη περιοχή έρευνας δημιουργήθηκε πιεζομετρικός χάρτης για την περίοδο του Νοεμβρίου, του έτους 2021 και είναι ο ακόλουθος.




Εικόνα 19. Πιεζομετρικός χάρτης υπόγειου υδροφόρου στην περιοχή έρευνας (ArcGIS).

Από τον παραπάνω χάρτη, εξάγονται κάποια χρήσιμα δεδομένα για την περιοχή μελέτης, τα οποία παρουσιάζονται στη συνέχεια.

i. Οι ισοδυναμικές καμπύλες φαίνεται να είναι στο μεγαλύτερο τμήμα της προσομοιωμένης περιοχής, παράλληλες μεταξύ τους και να μην ισαπέχουν.
ii. Το υπόγειο νερό φαίνεται να έχει γενική διεύθυνση ροής, Βόρεια προς Νότια.
iii. Η απόσταση των ισοδυναμικών γραμμών είναι μικρότερη στα Ανατολικά, δηλαδή δίπλα στον Γαλλικό ποταμό, που αυτό σημαίνει ότι οι υδραυλικές κλίσεις είναι μεγαλύτερες.
iv. Το υδραυλικό φορτίο είναι μεταξύ 0 στο βορειοδυτικό τμήμα, και φτάνει μέχρι -5m στο νότιο τμήμα.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΚΩΔΙΚΑΣ MODFLOW

## 5.1 Γενικά

Με την πάροδο των χρόνων, γίνεται όλο και πιο αναγκαία η κατανόηση της κατανομής των υπόγειων υδάτων καθώς και το ενδεχόμενο μελλοντικών αλλαγών στα δεδομένα, της εκάστοτε περιοχής. Σύμφωνα με το Ινστιτούτο Γεωλογικών Ερευνών Ηνωμένων Πολιτειών (USGS) το GMS (Department of Defense Groundwater Modeling System ή Σύστημα Μοντελοποίησης Υπόγειων Υδάτων) είναι μια εφαρμογή προσομοίωσης υπόγειου νερού. Τα υπολογιστικά μοντέλα που υποστηρίζονται από το GMS είναι τα ακόλουθα:

- MODFLOW 2000
- MT3DMS
- SEAM3D
- MODAEM
- SEEP2D
- PEST
- T-PROGS
- MODPATH
- RT3D
- ART3D
- FEMWATER
- UTCHEM
- UTEXAS

## 5.2 Το λογισμικό MODFLOW

Η συγκεκριμένη διπλωματική μεταπτυχιακή εργασία κάνει χρήση του πιο διαδεδομένου υπολογιστικού κώδικα, του MODFLOW (Modular Three Dimensional Finite Difference Ground Water Flow Model). Με τη χρήση αυτού του υπολογιστικού κώδικα είναι εφικτή η προσομοίωση της ροής των υπόγειων υδάτων από μία μέχρι και τρεις διαστάσεις, η οποία επιτυγχάνεται με την επίλυση μιας διαφορικής εξίσωσης. Γενικά, ο κώδικας MODFLOW χαρακτηρίζεται ως ένα μαθηματικό ντετερμινιστικό αριθμητικό μοντέλο πεπερασμένων διαφορών, δηλαδή η προσομοίωση του υπόγειου νερού γίνεται με την επίλυση μαθηματικών εξισώσεων. Η γλώσσα προγραμματισμού του κώδικα είναι η Fortran και είναι ιδανικός για την κίνηση του νερού σε πορώδεις υδροφορείς μέσα σε κοκκώδη πετρώματα.

### 5.2.1 Εξίσωση ροής

Η κύρια εξίσωση ροής του MODFLOW είναι βασισμένη στην αρχή διατήρησης της μάζας και του νόμου Darcy, και είναι η ακόλουθη:

$$\frac{\partial}{\partial x}(k_x \frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(k_y \frac{\partial h}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(k_z \frac{\partial h}{\partial z}) - W = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

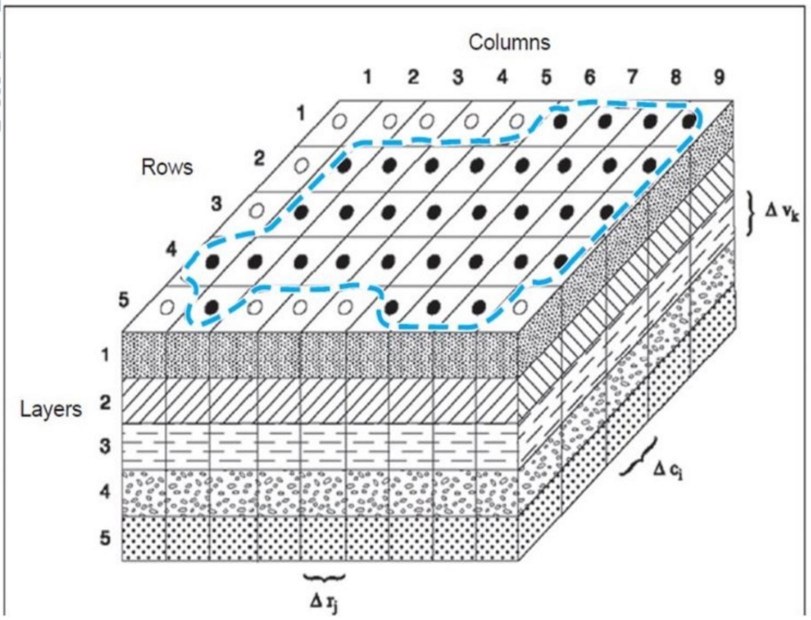
Εξίσωση 6. Θεμελιώδης εξίσωση ροής του MODFLOW

- $k_x$, $k_y$, $k_z$ : οι τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας κατά μήκος των αξόνων x,y,z, που είναι παράλληλοι στους κύριους άξονες υδραυλικής αγωγιμότητας,
- h: το υδραυλικό φορτίο,
- W: ο όγκος του νερού που δέχεται θετικές και αρνητικές τιμές αντίστοιχα για εισροές και εκροές,
- S: η αποθηκευτικότητα του πορώδους μέσου,
- t: ο χρόνος.

Είναι ένα μοντέλο πεπερασμένων διαφορών, όπου στις κυψελίδες του καννάβου, στις οποίες γίνεται η προσομοίωση της κίνησης του υπόγειου νερού, έχουμε επίλυση εξισώσεων (Todd & Mays, 2005, Γιαννέλη, 2009).

### 5.2.2 Δομή καννάβου

Το MODFLOW είναι ένα λογισμικό που δομείται από ένα πλέγμα ή κάνναβο (grid). Ο κάνναβος αυτός, αποτελείται από κελιά (cells) τα οποία έχουν είτε ορθογώνιο είτε τετράγωνο σχήμα. Είναι ορθογώνια και στις δύο διαστάσεις τους, ωστόσο η διάσταση στον άξονα y΄y (καθ' ύψος) είναι εφικτό να ακολουθεί τη γεωλογική δομή. Σημαντικό να επισημανθεί, είναι να μην υπάρχει μεγάλη διαφορά στα μεγέθη των κελιών, δηλαδή καμιά στήλη ή σειρά δεν γίνεται να είναι μεγαλύτερη κατά 50% από την γειτονική της. Εάν η διαφορά είναι μεγαλύτερη από το 50%, τότε κατά την προσομοίωση θα απαιτηθεί αρκετός χρόνος για την περάτωσή της ή/και θα υπάρξουν σφάλματα. Με τη δεδομένη λογική, προτείνεται η δημιουργία μικρών κελιών μόνο κοντά στις γεωτρήσεις άντλησης, αλλά, και στα σημεία του μοντέλου που επιδιώκονται λεπτομερή αποτελέσματα.




Εικόνα 20. Τρισδιάστατη δομή ενός μοντέλου (McDonald and Harbaugh, 1988).

### 5.2.3 Τύποι κελιών (cells) – Οριακές Συνθήκες (Boundary Conditions)

Υπάρχει η δυνατότητα να οριστούν τέσσερα (4) διαφορετικά είδη οριακών συνθηκών σε κελιά που βρίσκονται στα πλευρικά όρια της περιοχής προσομοίωσης, ανάλογα με τις υδρογεωλογικές συνθήκες που επικρατούν, και είναι οι εξής:

i. Κελιά μηδενικής ροής ή ανενεργά (no flow boundary ή inactive): είναι αυτά όπου δεν υπάρχουν εισροές και παίρνουν την τιμή μηδέν (0).
ii. Κελιά σταθερού φορτίου (constant head): είναι αυτά όπου η στάθμη είναι σταθερή καθ' όλη την προσομοίωση και παίρνει την τιμή -1.
iii. Κελιά μεταβαλλόμενου φορτίου (variable head cell): είναι αυτά των οποίων η στάθμη μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Παίρνουν την τιμή 1.
iv. Κελιά σταθερής εισροής (general head boundaries): η εισροή είναι σταθερή και η στάθμη εξαρτάται από τις μεταβολές των περιβαλλόμενων κυψελίδων.

### 5.2.4 Κύρια υποπρογράμματα (υπορουτίνες)

Ο κώδικας MODFLOW εμπεριέχει κάποια βασικά υποπρογράμματα ή υπορουτίνες, τα οποία συμβάλουν στην προσομοίωση της υπόγειας ροής και τα κυριότερα παρουσιάζονται παρακάτω (Βουδούρης (2021), Καραπιλάφης (2008), Παππά Α. (2010), Πλιάκας (1998), McDonald et. Al. (1988)):

- Βασικό πακέτο (Basic Package, BAS). Στο βασικό πακέτο εισάγονται τα δεδομένα που είναι σχετικά με το πλήθος των γραμμών και των στηλών, το πλήθος των υδροφόρων στρωμάτων, τη χρονική περίοδο που γίνεται η προσομοίωση και το βήμα της κάθε περιόδου, τον καθορισμό των μονάδων μέτρησης και τις οριακές συνθήκες στους κόμβους του καννάβου. Στην αρχή της χρονικής περιόδου εισάγεται ως αρχική συνθήκη η πιεζομετρία, η οποία προέρχεται από τις μετρήσεις του πεδίου.

- Πακέτο κεντροβαρικής διάταξης της ροής (Block-Centered Flow Package, BCF). Στο πακέτο κεντροβαρούς διάταξης εισάγεται ο τύπος του υδροφορέα, οι συνθήκες ροής, οι διαστάσεις των κελιών κατά μήκος των αξόνων x και y, τις συνιστώσες του συντελεστή K (υδραυλική αγωγιμότητα) για τους ελεύθερους υδροφορείς ή του συντελεστή T (μεταβιβαστικότητα) για τους υπό πίεση υδροφορείς.
- Εμπλουτισμός (Recharge Package, RCH). Στο πακέτο του εμπλουτισμού εισάγεται η κατείσδυση από τις βροχοπτώσεις, ο τεχνητός εμπλουτισμός αλλά και οι επιστροφές αρδεύσεων. Η τιμή του εμπλουτισμού εισάγεται μόνο στο top layer του καννάβου προσομοίωσης που είναι το ανώτερό του τμήμα και έτσι δεν χρειάζεται να υπολογιστεί ο εμπλουτισμός κατακόρυφα μιας στήλης, καθώς ο φυσικός εμπλουτισμός εισάγεται από την επιφάνεια του εδάφους στον υδροφορέα.
- Γεωτρήσεις (Well Package). Στο δεδομένο πακέτο, εισάγονται οι πληροφορίες σχετικά με τις γεωτρήσεις. Οι γεωτρήσεις μπορεί να είναι είτε εμπλουτισμού είτε άντλησης και αυτό γίνεται αντιληπτό από τις τιμές της παροχής, καθώς όταν είναι θετικές φανερώνουν εμπλουτισμό ενώ όταν είναι αρνητικές φανερώνουν άντληση. Ωστόσο, ο ρυθμός άντλησης είναι ανεξάρτητος από την πιεζομετρική στάθμη και από την έκταση των κελιών.
- Όριο γενικού φορτίου (General Head Boundary, GHB). Το πακέτο GHB είναι ιδανικό για την υπόγεια υδραυλική επικοινωνία μεταξύ των γειτονικών υδροφορέων φανερώνοντας την υδραυλική σύνδεση με υδροφορέα έξω από τα όρια της περιοχής προσομοίωσης. Με τη σύνδεση αυτή υποδηλώνεται η ύπαρξη πλευρικής τροφοδοσίας στην προσομοίωση. Η παροχή της τροφοδοσίας είναι ανάλογη με τη διαφορά της στάθμης ανάμεσα στον εξωτερικό υδροφορέα και στο καθένα κελί ξεχωριστά στην περιοχή μελέτης, και είναι εξαρτώμενη από την αγωγιμότητα των υλικών του εξωτερικού υδροφορέα και των γειτονικών κελιών της προσομοίωσης. Η αγωγιμότητα καθορίζεται από την οριζόντια υδραυλική αγωγιμότητα του κάθε κελιού πολλαπλασιασμένη με την εγκάρσια διατομή της και διαιρείται με την απόστασή της από τον εξωτερικό υδροφορέα (πλευρική τροφοδοσία). Στο κάθε κελί απαραίτητο είναι το γενικό φορτίο και η αγωγιμότητα. Στο γενικό φορτίο υπάγεται το επίπεδο του υδάτινου μέσου στο όριο το οποίο είτε είναι φυσικά προσδιορισμένο είτε να καθοριστεί από το μοντέλο. Η αγωγιμότητα είναι η αντίσταση της ροής μεταξύ του ορίου γενικού φορτίου και των υπογείων νερών της περιοχής προσομοίωσης.
- Σταθερό φορτίο (Constant head). Το συγκεκριμένο πακέτο, όπως προαναγγέλλει και η ονομασία του, είναι τα όρια του σταθερού φορτίου τα οποία παραμένουν αμετάβλητα κατά την προσομοίωση. Για τον λόγο αυτό, τα φορτία μένουν σταθερά καθ’ όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης.

- Εξατμισοδιαπνοή (Evapotranspiration, ET). Το πακέτο της εξατμισοδιαπνοής περιλαμβάνει τα αποτελέσματα της εξάτμισης και της διαπνοής των φυτών από το επίπεδο του εδάφους.
- Έλεγχος εξόδου (Output Control). Σε αυτό το πακέτο οργανώνεται με ποιον τρόπο και σε τι μορφή θα εξαχθούν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης καθώς δίνεται και η δυνατότητα σύνδεσης με εξωτερικά προγράμματα για την καλύτερη παρουσίαση αυτών.

### 5.2.5 Ρύθμιση προσομοίωσης υπόγειας ροής

Το μοντέλο προσομοίωσης χρειάζεται την ονομαζόμενη ρύθμιση (calibration) ώστε να προσδιοριστεί το μοντέλο μετά τον υπολογισμό των παραμέτρων σε κάποια δεδομένη θέση του υδροφορέα. Για τον προσδιορισμό της ρύθμισης, η μετρημένη απόλυτη στάθμη του υπόγειου νερού στην ύπαιθρο συγκρίνεται με τις υπολογισμένες τιμές και έτσι καθορίζεται η απόκλιση RMSD (Root Mean Square Deviation), η οποία δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\mathrm{RMSD} = \frac{1}{n}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(X_{calc} - X_{obs})^2}$$

Εξίσωση 7. Σχέση απόκλισης RMSD.

Όπου έχουμε:

$X_{calc}$: οι υπολογισμένες τιμές στάθμης υπόγειου νερού,

$X_{obs}$: οι μετρημένες τιμές,

n: το πλήθος των σημείων παρατήρησης.

Για την επίτευξη της καλύτερης προσομοίωσης, η τιμή της απόκλισης θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη. Η ρύθμιση στο μοντέλο προσομοίωσης του υπόγειου νερού γίνεται σε δύο συνθήκες και είναι οι ακόλουθες:

- Συνθήκες ισορροπίας (steady state), όπου οι εισροές ισούνται με τις εκροές και ο όγκος του νερού παραμένει σταθερός με τον χρόνο.
- Συνθήκες μεταβαλλόμενου φορτίου (transient state), όπου ο όγκος του νερού αλλάζει με την πάροδο του χρόνου και το φορτίο είναι συνάρτηση αυτού.
  Στο συγκεκριμένο στάδιο προστίθεται και η παράμετρος της ειδικής αποθηκευτικότητας ($S_s$) με μονάδα μέτρησης $m^{-1}$. Η παράμετρος αυτή ανάλογα με τον τύπο του υδροφορέα παίρνει τιμές, π.χ. 1%-30% για τους ελεύθερους υδροφορείς και 0,0001% - 0,5% για τους υπό πίεση υδροφορείς (Βουδούρης, 2021).

## 5.3 Μεθοδολογία καθορισμού μοντέλου

Για τη δημιουργία ενός μοντέλου προσομοίωσης υπογείων υδάτων, απαιτούνται συγκεκριμένα βήματα τα οποία σύμφωνα με το πρωτόκολλο εφαρμογής είναι τα ακόλουθα [(Walton, 1991), (Anderson & Woessner, 1992), (Βουδούρης, 2021)]:

i. Ο καθορισμός του σκοπού της προσομοίωσης.
ii. Η ανάπτυξη του εννοιολογικού μοντέλου με τη συλλογή των απαραίτητων δεδομένων της περιοχής που προσομοιώνεται.
iii. Επιλέγεται ο κατάλληλος κώδικας για την προσομοίωση.
iv. Ο σχεδιασμός του μοντέλου (model design), δηλαδή τη δημιουργία του καννάβου, την εισαγωγή των υδραυλικών παραμέτρων, τα χρονικά βήματα και τις περιόδους φόρτισης. Σημαντική είναι και η εισαγωγή των οριακών συνθηκών.
v. Η ρύθμιση (calibration) του μοντέλου, όπου με τα δεδομένα που εισήχθησαν γίνονται δοκιμές με τη διαδικασία της δοκιμής και λάθους (trial and error) μέχρι την επίτευξη τις ισορροπίας μεταξύ υπολογισμένων και μετρημένων αποτελεσμάτων.
vi. Η ανάλυση ευαισθησίας (sensitivity analysis), για την επίτευξη της καλύτερης προσομοίωσης και αυτό επιτυγχάνεται με τον καθορισμό της σημαντικότητας της κάθε παραμέτρου κατά τις ρυθμίσεις του μοντέλου.
vii. Η επαλήθευση (verification) του μοντέλου με τη χρήση μετρήσεων από την ύπαιθρο. Όσο το μοντέλο επαληθεύεται, γίνεται όλο και πιο έμπιστο.
viii. Η πρόβλεψη (prediction), όπου με την αλλαγή δεδομένων που δύνανται να αλλάζουν με το χρόνο πχ. βροχόπτωση, εμπλουτισμός και αντλήσεις, δημιουργούνται διάφορα σενάρια.
ix. Ο επανέλεγχος του μοντέλου, ο οποίος επιτυγχάνεται με την πάροδο του χρόνου. Πιο συγκεκριμένα, οι μετρήσεις στην ύπαιθρο επαληθεύουν τα αποτελέσματα των σεναρίων του μοντέλου.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΤΗΣ ΠΕΡΙΟΧΗΣ ΣΙΝΔΟΥ

## 6.1 Γενικά

Στην Ελλάδα τα τελευταία χρόνια έχουν γίνει μελέτες βασισμένες στη χρήση του λογισμικού MODFLOW. Μερικές τέτοιες προσομοιωμένες περιοχές είναι η λεκάνη της Μεσσάρας (Παπαμικρούλης, 2018), το Τυμπάκι Κρήτης (Βαλσαμίδου, 2017), τα Νέα Μουδανιά (Σιάρκος, 2012), ο Αλμυρός Βόλου (Lyra A., Loukas A., Sidiropoulos P, Tziatzios G., Mylopoulos N., 2021) κλπ, όπου έγινε προσομοίωση και ελέγχθηκε τόσο η υφαλμύρινση όσο και πηγές ρύπανσης.

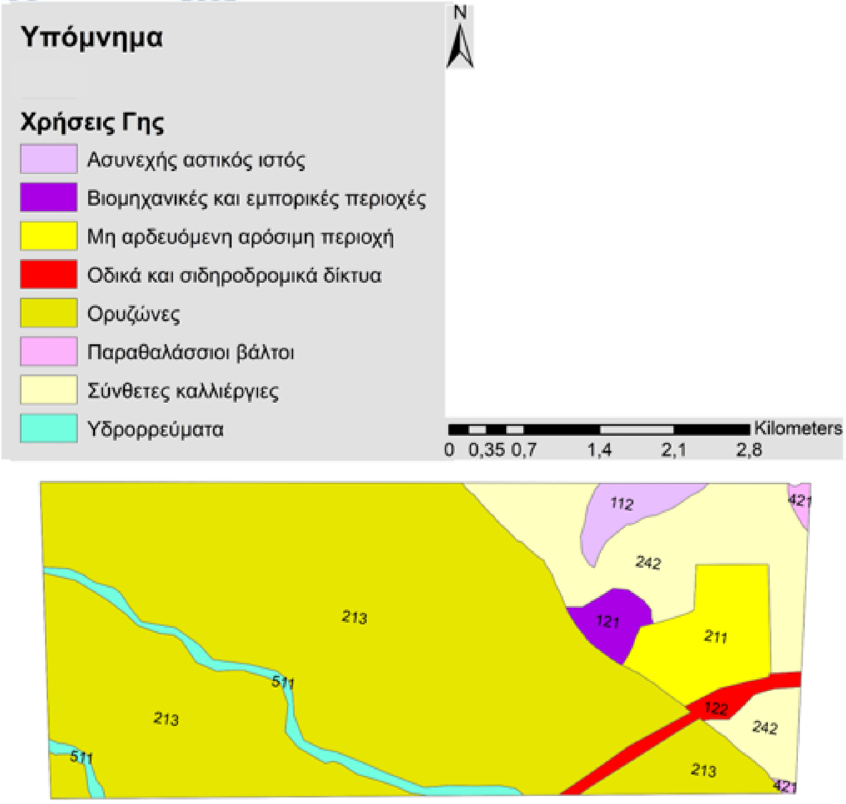
Η περιοχή της Σίνδου είναι η περιοχή μελέτης της παρούσας διπλωματικής μεταπτυχιακής εργασίας, όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενα κεφάλαια. Η περιοχή παρουσιάζει ενδιαφέρον διότι, ενώ υπάρχουν γεωτρήσεις όπου γίνονται αντλήσεις και η στάθμη του υπόγειου νερού μειώνεται, εμφανίζεται και το φαινόμενο της υπερχείλισης, δηλαδή το υπόγειο νερό είναι σε υψηλότερο υψόμετρο από την επιφάνεια του εδάφους.

## 6.2 Εννοιολογικό μοντέλο

### 6.2.1 Γεωλογία - Υδρογεωλογία

Η προσομοιωμένη περιοχή, βρίσκεται στην πεδιάδα που εκτείνεται μεταξύ των ποταμών Γαλλικού και Αξιού, από τα Ανατολικά προς τα Δυτικά και η έκτασή της ανέρχεται στα 24,15 $km^2$. Όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα 3.2.3, επαληθεύεται από τις γεωτρήσεις, ότι στην περιοχή εντοπίζονται ενστρώσεις και εναλλαγές αργίλου, άμμου, χαλίκων και ιλύος. Σύμφωνα με αυτές τις πληροφορίες, ο υδροφορέας θεωρείται confined/unconfined aquifer (ελεύθερος/υπό πίεση).

Η περιοχή μελέτης σύμφωνα με τον ακόλουθο χάρτη Corine, ο οποίος εξάχθηκε από το λογισμικό ArcGIS, παρουσιάζει τη χρήση γης που είναι κυρίως ορυζώνες, δηλαδή γεωργικές εκτάσεις πλημμυρισμένες το μεγαλύτερο μέρος του χρόνου και καλλιεργούνται ημιυδρόβια φυτά, σύνθετες καλλιεργούμενες εκτάσεις, ασυνεχής αστικός ιστός αλλά εντοπίζεται και βιομηχανική και εμπορική περιοχή, η οποία όμως δεν καταλαμβάνει μεγάλη έκταση.




Εικόνα 21. Χάρτης Corine για τις χρήσεις γης της περιοχής μελέτης (ArcGIS).

### 6.2.2 Μετεωρολογικά Δεδομένα

Όπως αναφέρθηκε εκτενώς στο κεφάλαιο 2.4, ο κλιματικός τύπος που επικρατεί στην περιοχή είναι μεσογειακός. Στα χρόνια μεταξύ 2018 έως 2023, τη χαμηλότερη θερμοκρασία έχει ο μήνας Ιανουάριος του υδρογεωλογικού έτους 2018-2019 με 4,1°C και την υψηλότερη ο Ιούλιος με 28,9°C του έτους 2022-2023.

Όσον αφορά τη βροχόπτωση, σύμφωνα με τον Πίνακα 1, για την ίδια χρονική περίοδο (2018-2023) το μέσο ετήσιο ύψος βροχής ανέρχεται στα 502,2 mm. Ο μήνας που κατέγραψε το υψηλότερο ύψος βροχής ήταν ο Απρίλιος στα 65,48 mm και το χαμηλότερο ο Φεβρουάριος και μετά ο Ιούλιος, στα 16,52mm και 24,72mm αντίστοιχα.

### 6.2.3 Τροφοδοσία ΥΥΣ

Το υπόγειο υδροφόρο σύστημα της περιοχής που βρίσκεται υπό έρευνα, εξασφαλίζει την τροφοδοσία του με τους κάτωθι μηχανισμούς:

- από το βόρειο όριο της προσομοιωμένης περιοχής όπου γίνεται εισροή υδάτων,
- από την βροχόπτωση,
- από τις επιστροφές αρδεύσεων.

### 6.2.4 Στάθμη υπόγειου νερού

Η άντληση και η τροφοδοσία είναι οι κύριες παράμετροι που επηρεάζουν τη στάθμη του υπόγειου νερού, καθώς δύνανται να προκαλέσουν αξιοσημείωτες διακυμάνσεις. Σύμφωνα με τις τρεις χαρακτηριστικές γεωτρήσεις, όπως παρουσιάστηκε στην ενότητα 4.5, και μεταξύ των ετών 2006 έως και 2023 που οι μετρήσεις είναι συστηματικές, φαίνονται οι διακυμάνσεις της στάθμης να έχουν εύρος από 3 έως 19 μέτρα. Ωστόσο, τα τελευταία δέκα (10) χρόνια των μετρήσεων (2012-2022) παρατηρείται σταθερότητα της στάθμης με απόκλιση στη γεώτρηση Σ06Ν στα 9,69 m, στην Σ10Α στα 2,51 m και στην Σ34 στα 9,69 m. Επομένως, αυτό δείχνει την ισορροπία μεταξύ των εισροών και εκροών στη συγκεκριμένη περιοχή.

### 6.2.5 Υδραυλικές παράμετροι

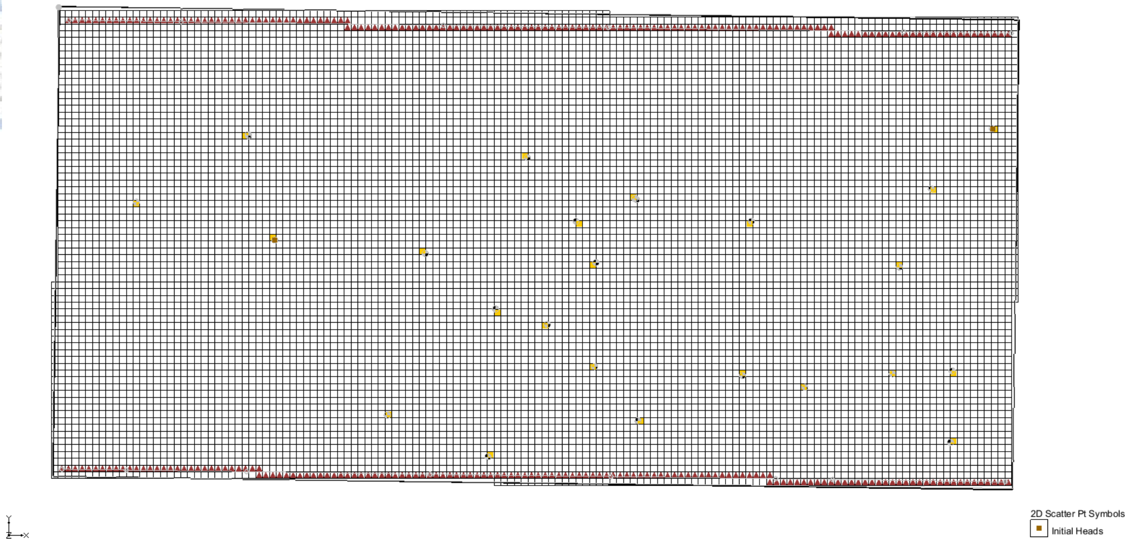
Σύμφωνα με τα αντλητικά στοιχεία της περιοχής, υπολογίστηκαν οι παρακάτω παράμετροι, απαραίτητοι για τη λειτουργία της προσομοιωμένης περιοχής:

- Η υδροπερατότητα (k) με τιμή 2 m/day.
- Η αποθηκευτικότητα (S) με τιμή 0,005.
- Η μεταβιβαστικότητα (T) με τιμή 380 $m^2$/day.

## 6.3 Ανάπτυξη μαθηματικού μοντέλου

### 6.3.1 Γεωμετρία ομοιώματος

Η οριοθετημένη περιοχή μελέτης, έχει έκταση 24,15 $km^2$ και το πάχος του υδροφορέα ανέρχεται στα 200m. Ο κάνναβος που δημιουργήθηκε είναι ομοιόμορφος καθώς τα κελιά είναι διαστάσεων 50m x 50m.




Εικόνα 22. Χάρτης καννάβου από την περιοχή που προσομοιώνεται με τις οριακές συνθήκες και τις συνολικές γεωτρήσεις της περιοχής.

### 6.3.2 Συνθήκες Steady State (μόνιμης ροής)

#### 6.3.2.1 Τροφοδοσία υδροφορέα

Για την τροφοδοσία του υπόγειου υδροφόρου συστήματος, όπως αναπτύχθηκε και στην ενότητα 6.2.3, υπεύθυνοι είναι οι παρακάτω μηχανισμοί:

- το βόρειο όριο της προσομοιωμένης περιοχής όπου γίνεται εισροή υδάτων,
- η βροχόπτωση,
- οι επιστροφές αρδεύσεων.

#### 6.3.2.2 Οριακές συνθήκες

Όσον αφορά τις οριακές συνθήκες της περιοχής της Σίνδου που προσομοιώνεται, το ανώτερο όριο του ομοιώματος ορίζεται η επιφάνεια του εδάφους. Από εκεί θεωρείται η κατείσδυση του νερού των βροχοπτώσεων, καθώς και οι επιστροφές αρδεύσεων. Το πακέτο αυτό στο λογισμικό ορίζεται ως Recharge Package.

Για τον ορισμό του κατώτερου ορίου, αφαιρέθηκαν από την επιφάνεια του εδάφους 200m, όπου υπήρχαν στοιχεία από τις γεωτρήσεις της περιοχής, και έτσι δημιουργήθηκε η γεωμετρία του υδροφορέα.

Για την προσέγγιση των οριακών συνθηκών χρησιμοποιήθηκαν από το λογισμικό τα εργαλεία Well και General Head Boundary. Η εισροή νερού στο μοντέλο και η ανταλλαγή αυτού με τις περιοχές εκτός του ομοιώματος, γίνεται από τα κελιά στα οποία έχουν τοποθετηθεί οι ιδιότητες που προαναφέρθηκαν.

Στο βόρειο τμήμα, η περιοχή δέχεται την εισροή υπόγειων υδάτων τα οποία έχουν κίνηση που κατευθύνεται νότια, κατά κύριο λόγο. Η εκφόρτιση αυτών γίνεται από τα κατάντη της προσομοιωμένης περιοχής.

Από το πακέτο Wells του λογισμικού, ορίζονται οι αντλήσεις για την περιοχή που προσομοιώνεται. Στη δεδομένη περίπτωση έγινε η εισαγωγή 25 γεωτρήσεων, όπως φαίνεται και στην εικόνα 15.

### 6.3.2.3 Συνολικός εμπλουτισμός

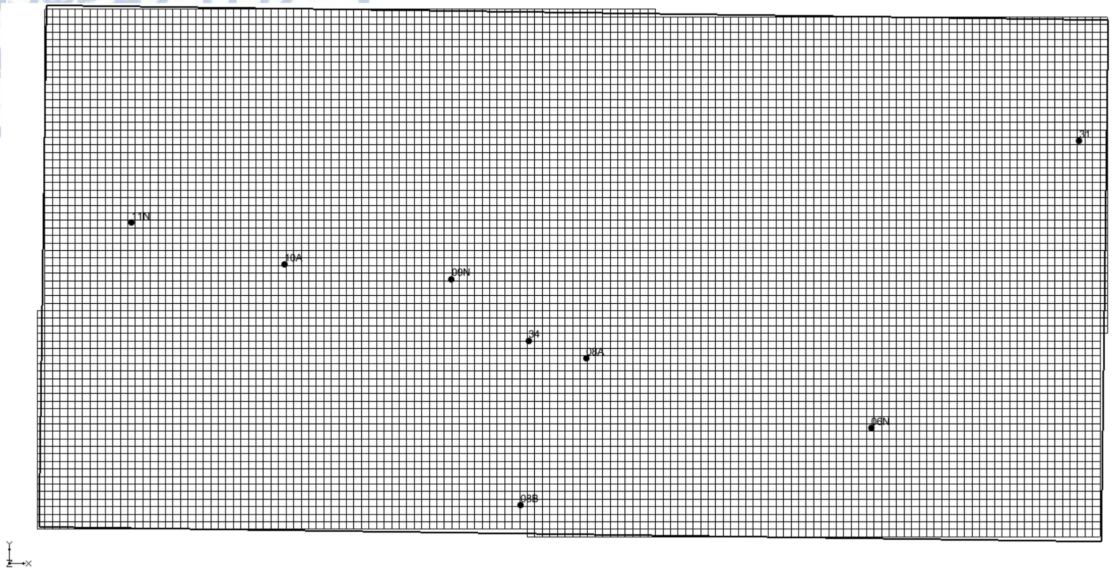
Ο ένας από τους παράγοντες που επηρεάζουν την τροφοδοσία της περιοχής είναι η βροχόπτωση. Η μέση ετήσια βροχόπτωση, όπως φαίνεται στον Πίνακα 1 της ενότητας 2.4.1 για τα έτη 2018 έως 2023, ανέρχεται στα 502 mm ενώ ο συντελεστής κατείσδυσης της περιοχής εκτιμήθηκε στο 10%. Επομένως, η κατείσδυση του νερού της βροχής υπολογίζεται στα 0,00013753 m/d.

Οι επιστροφές από τις αρδεύσεις στην περιοχή μελέτης θεωρούνται στο 10% του συνολικού όγκου νερού που αντλείται από τις γεωτρήσεις. Οι ετήσιες αντλήσεις ανέρχονται στα 3.561.420 $m^3$, επομένως ο εμπλουτισμός από τις επιστροφές είναι στα 0,00004041 $m^3/d$.

Ο συνολικός εμπλουτισμός της περιοχής από τις βροχοπτώσεις και τις επιστροφές αρδεύσεων, υπολογίζεται στα 0,00017761 m/d, δηλαδή $1{,}5x10^6$ $m^3$ ετησίως.

### 6.3.2.4 Σημεία ελέγχου

Σημαντική είναι η επαλήθευση των υπολογισμένων τιμών του μοντέλου που δημιουργήθηκε για την προσομοίωση, σε σχέση με τις τιμές που μετρήθηκαν στο πεδίο το έτος 2021. Το πλήθος διαθέσιμων γεωτρήσεων παρατήρησης είναι οχτώ (8) και φαίνονται στην παρακάτω εικόνα.

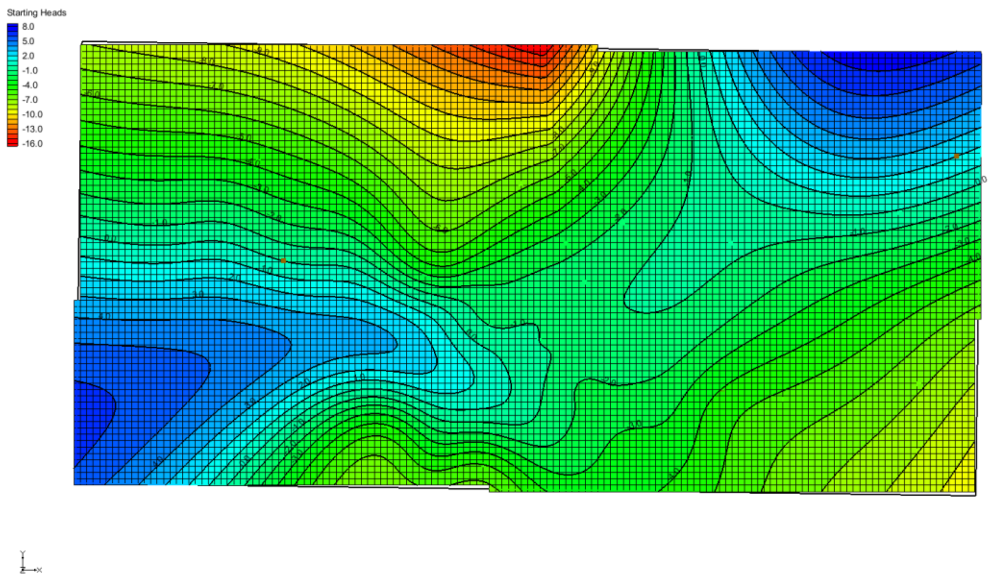



Εικόνα 23. Γεωτρήσεις ελέγχου (observation points).

### 6.3.2.5 Αρχικές συνθήκες

Για να υπολογιστεί το αρχικό φορτίο (starting heads) επιλέχθηκε να γίνει στο λογισμικό MODFLOW χωρική παρεμβολή (interpolation) του μετρημένου υδραυλικού φορτίου στον υδροφόρο. Μετρημένες τιμές, οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν για τη χωρική παρεμβολή, υπάρχουν για 11 γεωτρήσεις, την περίοδο του Νοεμβρίου του έτους 2021.

Η προαναφερόμενη κατανομή του υδραυλικού φορτίου απεικονίζεται στην παρακάτω εικόνα.




Εικόνα 24. Αρχικές συνθήκες πιεζομετρίας (starting heads) με την κατανομή υδραυλικού φορτίου στην προσομοιωμένη περιοχή.

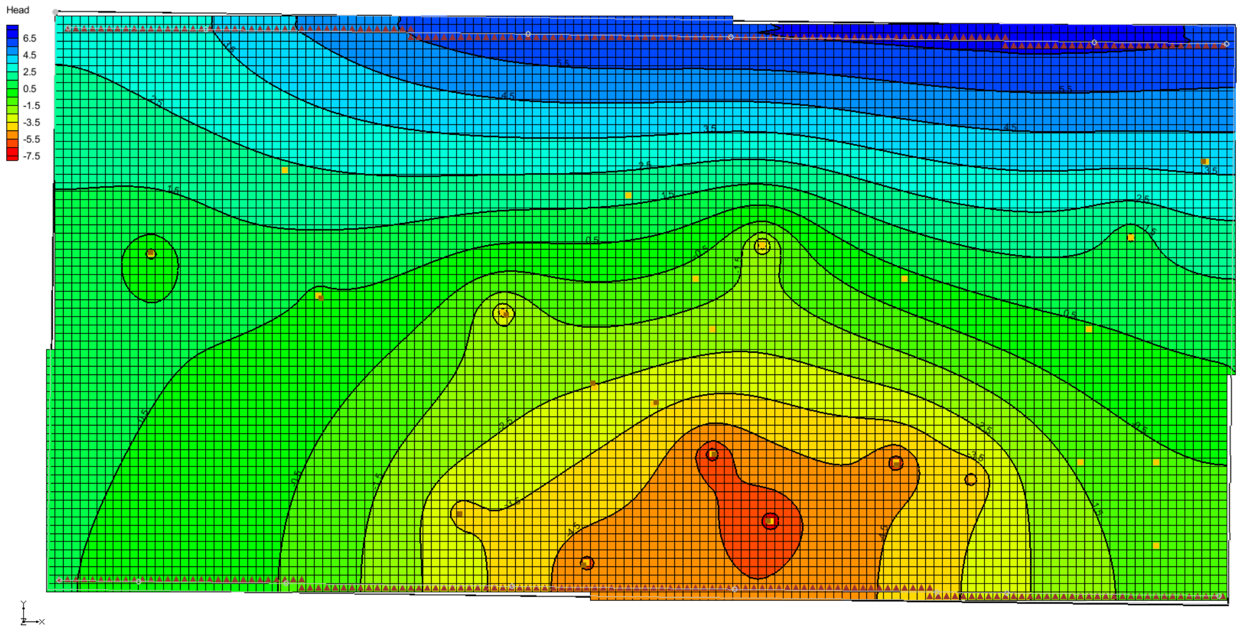
#### 6.3.2.6 Αποτελέσματα σε σταθερές συνθήκες ροής (steady state)

Όσον αφορά τη ρύθμιση για την προσομοίωση της υπόγειας ροής εφαρμόστηκαν κάποια κριτήρια και είναι τα ακόλουθα:

- Έγινε σύγκριση των υπολογισμένων και μετρημένων υδραυλικών φορτίων στις θέσεις των σημείων παρακολούθησης.
- Ο πιεζομετρικός χάρτης που προέκυψε από το μοντέλο συγκρίνεται με χάρτες προηγούμενων μελετών ή με χάρτες που προκύπτουν από τις μετρήσεις.
- Το συνολικό, αλλά και ανά παράμετρο (εμπλουτισμός, άντληση νερού κλπ), υδατικό ισοζύγιο του υδροφόρου συστήματος της προσομοίωσης που υπολογίζεται από το λογισμικό, συγκρίνεται με αυτό που προκύπτει από την κλασσική υδρογεωλογική έρευνα.

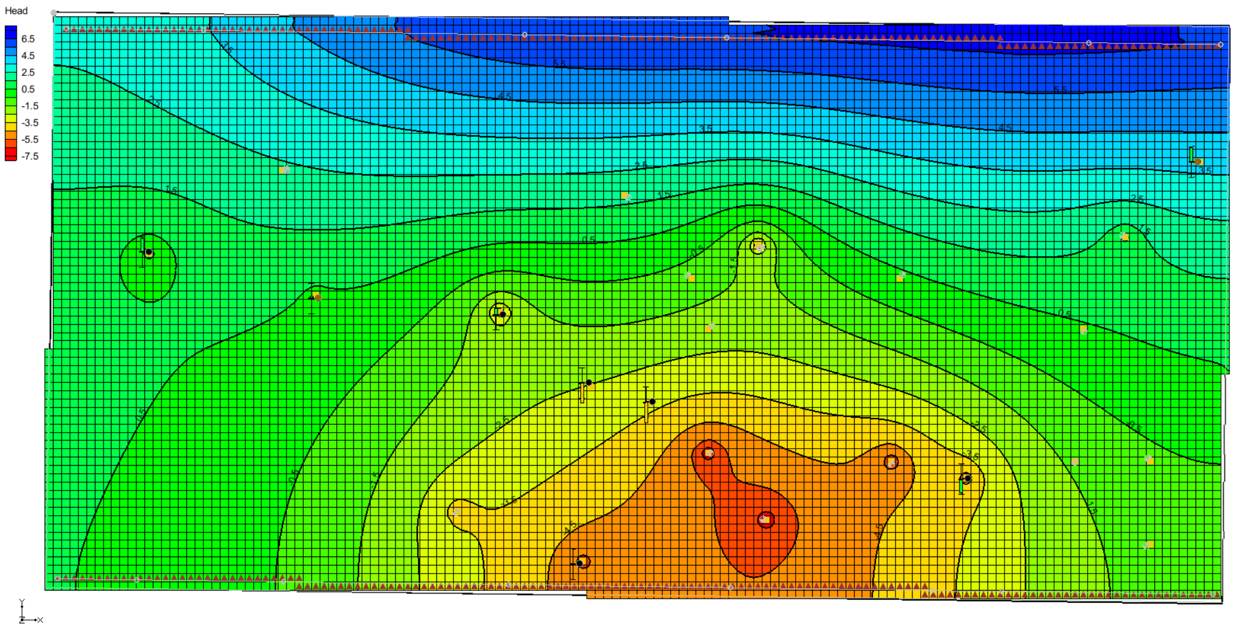
Πραγματοποιήθηκε το τρέξιμο του ομοιώματος και είχε ως αποτέλεσμα τον ακόλουθο πιεζομετρικό χάρτη. Από την ανάλυση αυτού, εξάχθηκαν τα εξής συμπεράσματα:

- Η ροή του υπόγειου νερού ακολουθεί διεύθυνση βόρεια προς νότια, όπως φαίνεται και από τις πιεζομετρικές καμπύλες.
- Στα νότια της περιοχής που προσομοιώθηκε, παρατηρείται κώνος πτώσης στάθμης, όπου εκεί βρίσκονται δύο γεωτρήσεις και εμφανίζεται το φαινόμενο της υπεράντλησης.
- Ο πιεζομετρικός χάρτης που προκύπτει από το λογισμικό, είναι αρκετά όμοιος με την πιεζομετρία της περιοχής που ήδη έχει εξαχθεί.




Εικόνα 25. Πιεζομετρικός χάρτης της προσομοιωμένης περιοχής (steady state).

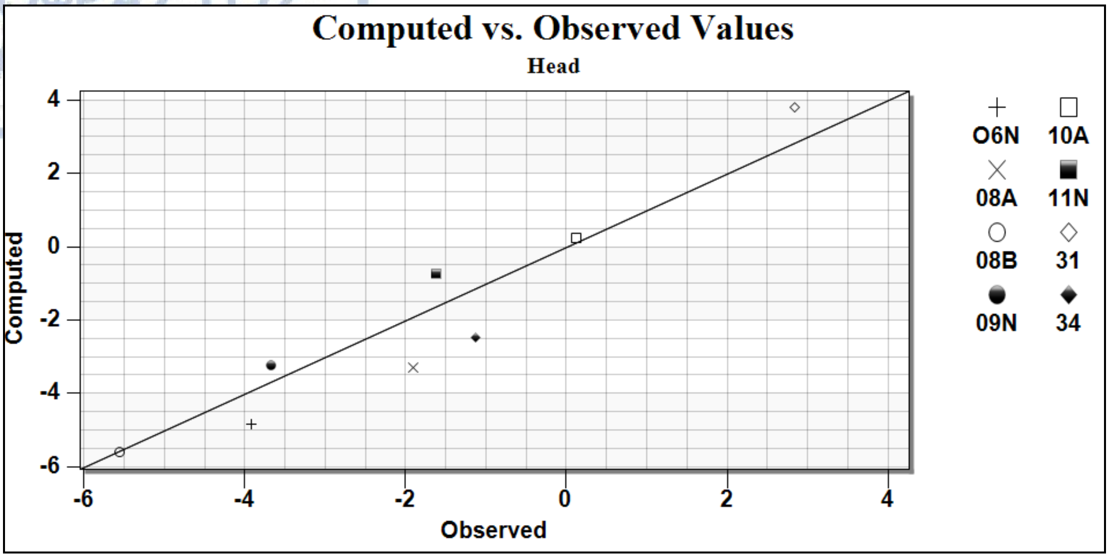
- Το υδραυλικό φορτίο που υπολογίστηκε έχει πολύ μικρή απόκλιση με τις μετρημένες τιμές και στις οχτώ (8) γεωτρήσεις, όπως φαίνεται στην Εικόνα 26, στον Πίνακα 5 και Εικόνα 27.
- Το RMSE (μέσο τετραγωνικό σφάλμα) ισούται με 0.89, το οποίο θεωρείται ικανοποιητική τιμή λόγω του μικρού αριθμού των γεωτρήσεων.




Εικόνα 26. Σημεία ελέγχου με τις αποκλίσεις.

Πίνακας 5. Αποκλίσεις μετρημένων (observed head) με υπολογισμένων (computed head) τιμών.

| Γεώτρηση | X | Y | Μετρημένη τιμή (m) | Υπολογισμένη τιμή (m) | Απόκλιση (m) |
|---|---|---|---|---|---|
| **06N** | 398952.0 | 4500149.0 | -3.92 | -4.84 | 0.92 |
| **08A** | 397068.0 | 4500608.0 | -1.91 | -3.28 | 1.37 |
| **08B** | 396633.0 | 4499640.0 | -5.56 | -5.58 | 0.027 |
| **09N** | 396175.0 | 4501128.0 | -3.67 | -3.24 | -0.42 |
| **10A** | 395073.0 | 4501227.0 | 0.12 | 0.24 | -0.12 |
| **11N** | 394061.0 | 4501503.0 | -1.62 | -0.72 | -0.89 |
| **31** | 400324.0 | 4502042.0 | 2.84 | 3.78 | -0.95 |
| **34** | 396688.0 | 4500722.0 | -1.13 | -2.46 | 1.33 |




Εικόνα 27. Διάγραμμα αποκλίσεων τιμών υδραυλικού φορτίου, μετρημένων και υπολογισμένων.

Κατά την προσομοίωση σταθερής ροής, υπολογίστηκαν οι εισροές και εκροές στον υπό εξέταση υδροφορέα ετησίως, οι οποίες παρατίθενται στον ακόλουθο πίνακα.

Πίνακας 6. Πίνακας ετήσιου υδατικού ισοζύγιου υδροφορέα περιοχής μελέτης.

| Εισροές (×10⁶ m³) | | Εκροές (×10⁶ m³) | |
|---|---|---|---|
| **Recharge** | 1.56 | **Wells** | 3.71 |
| **General Head Boundary (Πλευρική τροφοδοσία)** | 2.15 | **General Head Boundary (Υπόγειες εκροές)** | 0,00108 |
| **Constant head (σταθερό φορτίο)** | 0 | **Constant head (σταθερό φορτίο)** | 0 |
| **Σύνολο** | 3.71 | **Σύνολο** | 3.71 |

```
 VOLUMETRIC BUDGET FOR ENTIRE MODEL AT END OF TIME STEP   1 IN STRESS PERIOD   1
 ------------------------------------------------------------------------------

    CUMULATIVE VOLUMES      L**3       RATES FOR THIS TIME STEP      L**3/T
    ------------------                 ------------------------

          IN:                                      IN:
          ---                                      ---
            STORAGE =           0.0000               STORAGE =           0.0000
      CONSTANT HEAD =           0.0000         CONSTANT HEAD =           0.0000
              WELLS =           0.0000                 WELLS =           0.0000
    HEAD DEP BOUNDS =        5888.6865       HEAD DEP BOUNDS =        5888.6865
           RECHARGE =        4276.3008              RECHARGE =        4276.3008

           TOTAL IN =       10164.9873              TOTAL IN =       10164.9873

         OUT:                                     OUT:
         ----                                     ----
            STORAGE =           0.0000               STORAGE =           0.0000
      CONSTANT HEAD =           0.0000         CONSTANT HEAD =           0.0000
              WELLS =       10162.0000                 WELLS =       10162.0000
    HEAD DEP BOUNDS =           2.9844       HEAD DEP BOUNDS =           2.9844
           RECHARGE =           0.0000              RECHARGE =           0.0000

          TOTAL OUT =       10164.9844             TOTAL OUT =       10164.9844

           IN - OUT =       2.9297E-03              IN - OUT =       2.9297E-03

PERCENT DISCREPANCY =           0.00     PERCENT DISCREPANCY =           0.00
```

Εικόνα 28. Ημερήσιο υδατικό ισοζύγιο υδροφορέα περιοχής μελέτης.

## 6.3.3 Συνθήκες Transient State (μη-μόνιμης ροής)

Ο υδροφορέας εκτός από σταθερές συνθήκες ροής, προσομοιώθηκε και σε συνθήκες μη-μόνιμης ροής (μεταβαλλόμενου ισοζυγίου). Αυτή η προσομοίωση βασίστηκε στο προηγούμενο βήμα, που ήταν η προσομοίωση του υδροφορέα σε ρύθμιση steady state. Η περίοδος που προσφερόταν να εξεταστεί σύμφωνα με τα δεδομένα που υπήρχαν, ήταν από τον Οκτώβριο του 2020 έως τον Οκτώβριο του 2022, με εξαμηνιαίο βήμα, από τον Απρίλιο έως τον Σεπτέμβριο και από τον Οκτώβριο έως τον Μάρτιο του επερχόμενου έτους. Ωστόσο, κατά την προσομοίωση όπως θα παρουσιαστεί παρακάτω, δεν προέκυψαν ικανοποιητικά αποτελέσματα καθώς υπήρχαν πολύ μεγάλες αποκλίσεις μεταξύ μετρημένων και υπολογισμένων τιμών, εκτός από τη ξηρή περίοδο (Απρίλιος-Σεπτέμβριος) του έτους 2021.

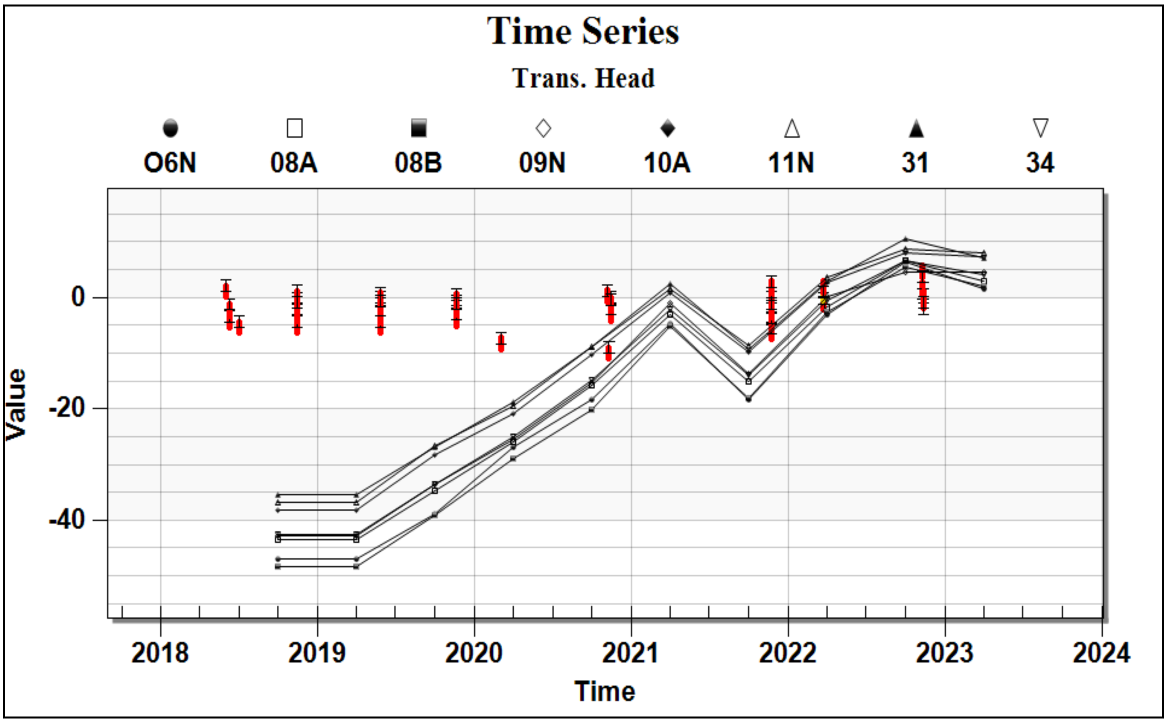
Για τη ρύθμιση μη-μόνιμης ροής, απαραίτητος είναι ο συντελεστής ειδικής αποθηκευτικότητας S (primary storage), ο οποίος είναι ίσος με 0,005, ενώ ο secondary storage coefficient είναι ίσος με 0,00045, καθώς ο υδροφορέας προσομοιώθηκε ως confined/unconfined.

#### 6.3.3.1 Αποτελέσματα από μεταβαλλόμενες συνθήκες (transient state)

Όπως ειπώθηκε και στην παραπάνω υποενότητα, χρησιμοποιήθηκαν οι μετρήσεις από τον Οκτώβριο του 2020 έως τον Οκτώβριο του 2022, με τις γεωτρήσεις παρατήρησης (observation points) που υπήρχαν και στη ρύθμιση steady state.

Στο παρακάτω διάγραμμα, φαίνονται οι αποκλίσεις των μετρήσεων για τις γεωτρήσεις σε κάθε εξάμηνο. Παρατηρείται η μεγάλη απόκλιση που έχουν στις άλλες περιόδους, εκτός από τη ξηρή περίοδο του 2021. Αυτή η απόκλιση είναι πιθανό να οφείλεται στο γεγονός ότι η προσομοίωση έγινε με βάση το steady state του Νοεμβρίου 2021 και για τον λόγο αυτό, η δεδομένη ξηρή περίοδος είναι με μικρότερες αποκλίσεις συγκριτικά με τις άλλες.

Στις παρακάτω εικόνες, η υπολογισμένη στάθμη συγκρίνεται με τη μετρημένη, με αποτέλεσμα, όταν το χρώμα στις μπάρες είναι πράσινο να υποδηλώνει απόκλιση μικρότερη του ενός μέτρου, όταν είναι κίτρινο είναι μεταξύ 1-2 μέτρων και όταν είναι κόκκινο, οι αποκλίσεις υπερβαίνουν τα 2 μέτρα.




Εικόνα 29. Σύγκριση μετρημένων τιμών των observation points περιόδου 2018-2023 και διακύμανση στάθμης υπόγειου νερού.

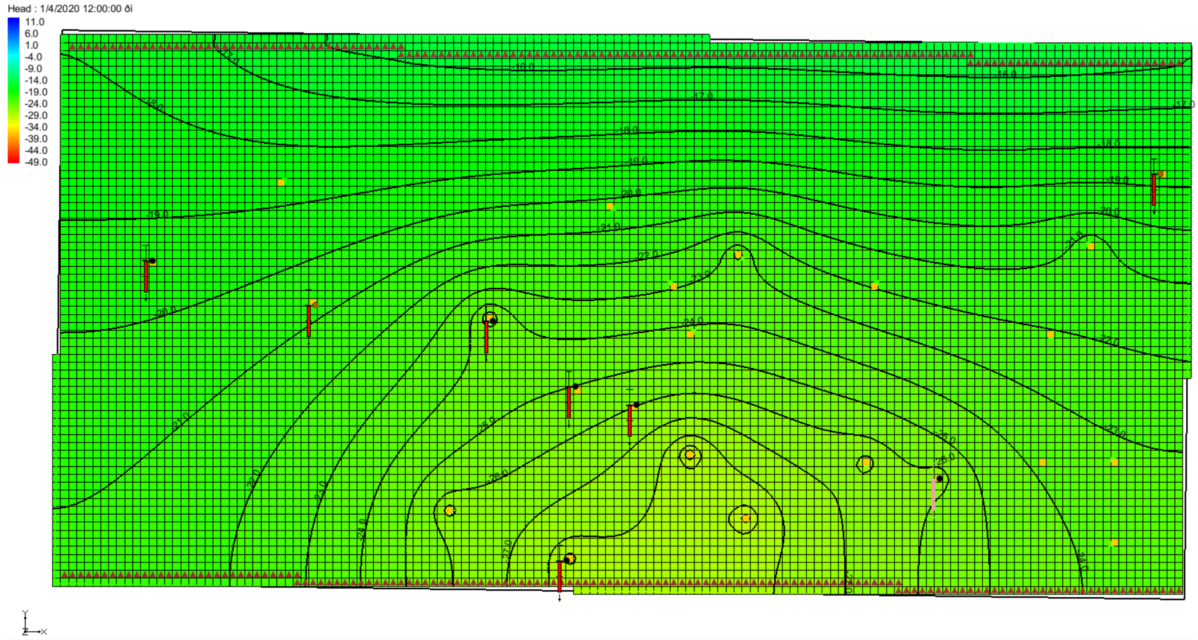
Στον ακόλουθο πίνακα, παρουσιάζονται οι υπολογισμένες και οι μετρημένες τιμές των γεωτρήσεων παρατήρησης από το έτος 2020 έως το 2022. Δεν λήφθηκαν υπόψη οι ημερομηνίες από το 2018 έως το 2020, διότι, οι αποκλίσεις είναι πολύ μεγάλες.

Πίνακας 7. Μετρημένες και υπολογισμένες τιμές περιόδου 2020-2022.

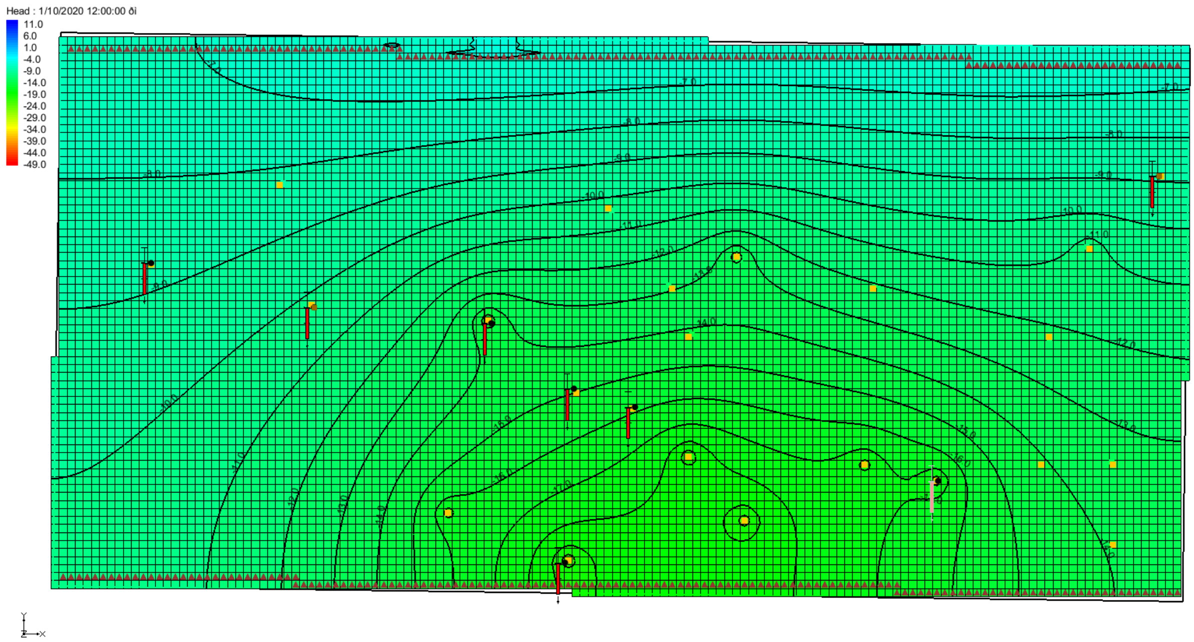
| Γεώτρηση | Ημερομηνία | Μετρημένη τιμή (m) | Υπολογισμένη τιμή (m) | Απόκλιση (m) |
|---|---|---|---|---|
| **06Ν** | 9/11/2020 | -9,03 | -15,3 | 6,31 |
| | 22/11/2021 | -3,92 | -13,9 | 9,97 |
| | 10/11/2022 | 0,66 | 5,25 | -4,59 |
| **08Α** | 12/11/2020 | -0,43 | -12,8 | 12,4 |
| | 22/11/2021 | -1,91 | -11,2 | 9,24 |
| | 11/11/2022 | -2 | 5,69 | -7,69 |
| **08Β** | 3/3/2020 | -7,29 | -30,6 | 23,3 |
| | 22/11/2021 | -5,56 | -13,6 | 8,02 |
| | 22/3/2022 | -0,19 | -3,42 | 3,23 |
| **09Ν** | 22/11/2021 | -3,67 | -9,74 | 6,07 |
| | 22/3/2022 | 0,93 | -0,601 | 1,53 |
| **10Α** | 12/11/2020 | 0,03 | -7,66 | 7,69 |
| | 22/11/2021 | 0,12 | -6,15 | 6,27 |
| | 22/3/2022 | 1,06 | 2,12 | -1,06 |
| **11Ν** | 12/11/2020 | -2,15 | -6,34 | 4,19 |
| | 22/11/2021 | -1,62 | -5,04 | 3,42 |
| | 22/3/2022 | 0,93 | 2,96 | -2,03 |
| | 11/11/2022 | -0,88 | 8,6 | -9,48 |
| **31** | 6/11/2020 | 1,25 | -6,61 | 7,86 |
| | 22/11/2021 | 2,84 | -5,83 | 8,67 |
| | 10/11/2022 | 3,71 | 9,73 | -6,02 |
| **34** | 12/11/2020 | -0.37 | -11,9 | 11,5 |
| | 22/11/2021 | -1.13 | -10,1 | 8,96 |

Από την ανάλυση του Πίνακα 7 και για τις οχτώ (8) γεωτρήσεις παρατήρησης, η μικρότερη απόκλιση καταγράφεται στη γεώτρηση Σ10Α στις 22/3/2022 με τιμή 1,06 m και η μέγιστη στην Σ08Β στις 3/3/2020 με τιμή 23,3 m. Επιπροσθέτως, σημαντικός είναι και ο υπολογισμός της μέσης απόκλισης που ανέρχεται στα 4,68 m. Οι δεδομένες τιμές δεν θεωρούνται ικανοποιητικές για να θεωρηθεί επιτυχημένο το μοντέλο. Το αποτέλεσμα αυτό θα μπορούσε να αποδοθεί στο μικρό εύρος της χρονοσειράς των διαθέσιμων μετρήσεων. Επίσης, στην έλλειψη πληροφορίας όσον αφορά τις οριακές συνθήκες τροφοδοσίας και εκφόρτισης της προσομοιούμενης περιοχής, καθώς εξετάζεται ένα μικρό τμήμα ενός μεγαλύτερου υδροφορέα και είναι δύσκολο να υπολογιστούν. Τέλος, όσον αφορά στα χαρακτηριστικά του υδροφορέα (περατότητα, συντελεστής αποθήκευσης κ.λπ.) αυτά εκτιμήθηκαν βιβλιογραφικά καθώς δεν υπήρχαν αξιόπιστα διαθέσιμα δεδομένα από μετρήσεις στον υδροφορέα. Αξιοσημείωτος λόγος επίσης, θα μπορούσε να είναι ο εμπλουτισμός, ο οποίος στο μοντέλο θεωρείται σταθερός για όλες τις περιόδους, λόγω έλλειψης πληροφοριών, αλλά στην πραγματικότητα μεταβάλλεται σε κάθε μια από αυτές.

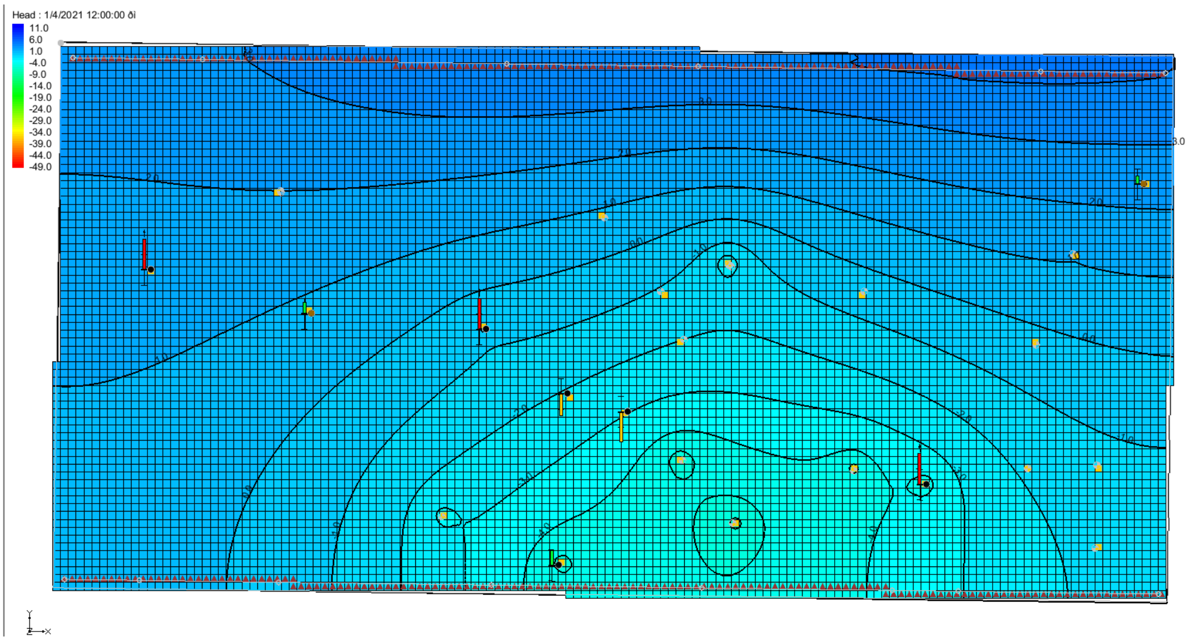
Στις παρακάτω εικόνες, παρουσιάζονται οι πιεζομετρικοί χάρτες της περιοχής που εξάχθηκαν από το μοντέλο και, όπως προαναφέρθηκε, δεν είναι καλή η προσομοίωσή τους. Αυτό θα γίνει αντιληπτό και από το χρώμα που έχουν οι μπάρες ανά εξάμηνη περίοδο, καθώς οι περισσότερες είναι κόκκινες, που υποδηλώνει σφάλμα μεγαλύτερο των δύο (2) μέτρων.



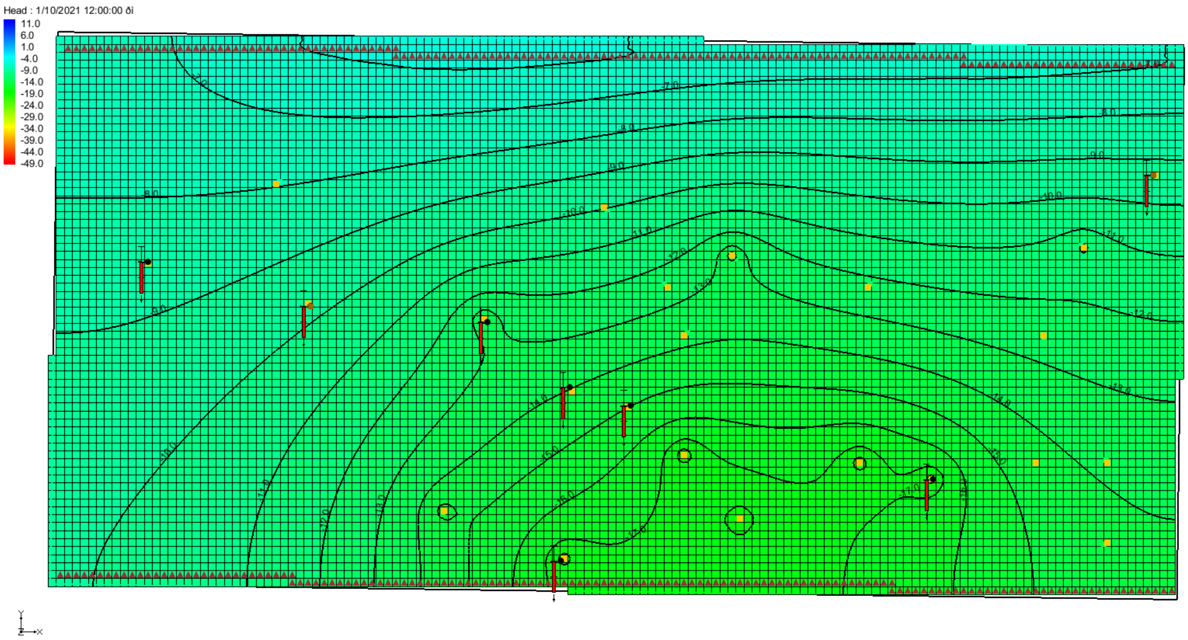

Εικόνα 30. Συνθήκη transient state περιόδου 1/04/2020.



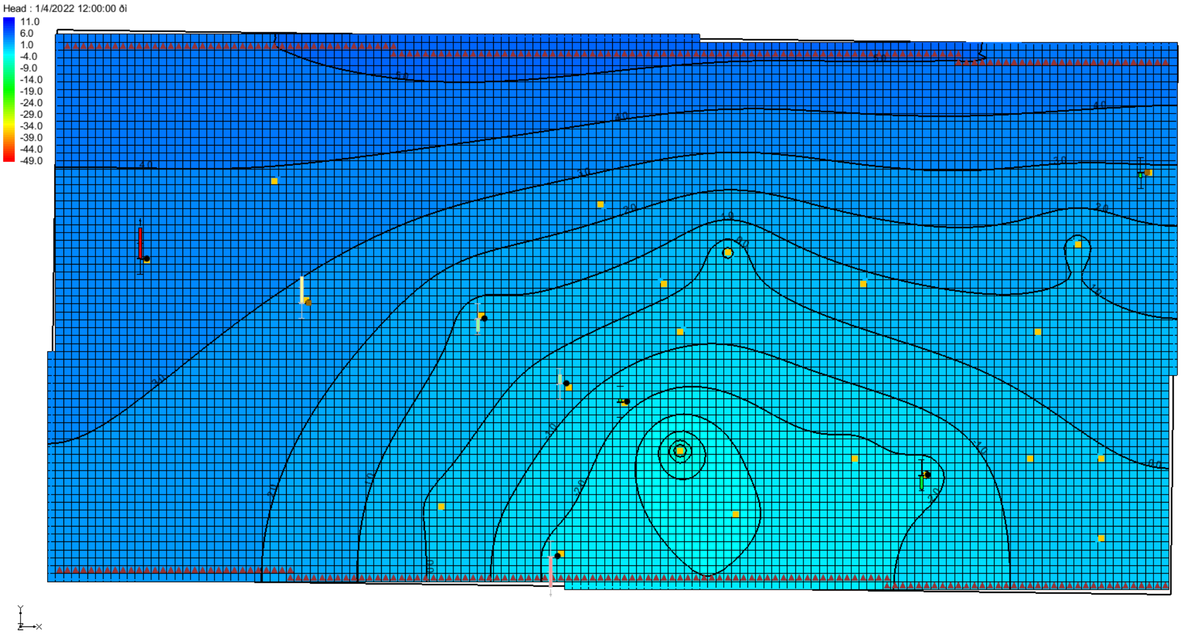

Εικόνα 31. Συνθήκη transient state περιόδου 1/10/2020.




Εικόνα 32. Συνθήκη transient state περιόδου 1/04/2021.




Εικόνα 33. Συνθήκη transient state περιόδου 1/10/2021.




Εικόνα 34. Συνθήκη transient state περιόδου 1/04/2022.

## 6.4 Σενάρια προσομοίωσης

Συμπληρωματικά, για την ολοκλήρωση της δεδομένης έρευνας, προτάθηκαν δύο σενάρια για την παρατήρηση της εξέλιξης του ΥΥΣ λόγω αλλαγών στα κλιματικά δεδομένα. Το ένα σενάριο ορίζεται ως το ευνοϊκό σενάριο, ως προς το ΥΥΣ, και το άλλο ως δυσμενές, όπως αναλύονται και παρακάτω.

- Ευνοϊκό σενάριο: Σύμφωνα με το σενάριο αυτό, μειώνεται η τροφοδοσία (recharge) κατά 10% και οι αντλήσεις κατά 15%.
- Δυσμενές σενάριο: Κατά το δυσμενές σενάριο, μειώνεται η τροφοδοσία (recharge) κατά 10% και αυξάνονται οι αντλήσεις κατά 15%.

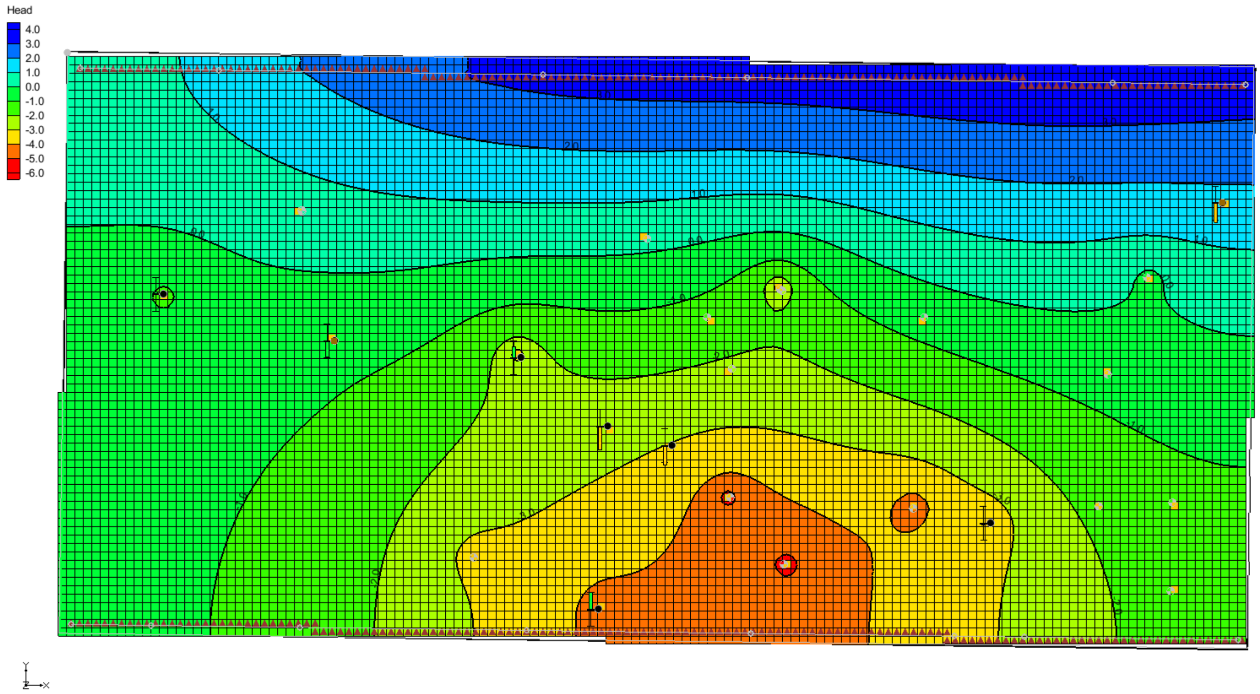
### 6.4.1 Ευνοϊκό σενάριο

Το πρώτο σενάριο ορίζεται ως το ευνοϊκό. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, θεωρούνται ότι η τροφοδοσία του υδροφορέα και οι αντλήσεις μειώνονται κατά 10% και 15% αντίστοιχα. Πιο συγκεκριμένα, οι αντλήσεις μειωμένες κατά 15% ανέρχονται στα 3.117.207 m$^3$ ετησίως και η τροφοδοσία στα 0,0001556 m ανά ημέρα.

Η προσομοίωση έγινε στη ρύθμιση της μόνιμης ροής (steady state), όπως παρουσιάστηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο. Στον πίνακα και στην εικόνα που ακολουθούν, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα, αφού έγιναν οι αλλαγές στην τροφοδοσία και στις αντλήσεις.

Πίνακας 8. Υπολογισμένες, μετρημένες τιμές και απόκλιση αυτών για το ευνοϊκό σενάριο.

| Γεώτρηση | X | Y | Μετρημένη τιμή (m) | Υπολογισμένη τιμή (m) | Απόκλιση (m) |
|---|---|---|---|---|---|
| **06N** | 398952.0 | 4500149.0 | -3.92 | -4.019 | 0.099 |
| **08A** | 397068.0 | 4500608.0 | -1.91 | -3.041 | 1.131 |
| **08B** | 396633.0 | 4499640.0 | -5.56 | -4.561 | -0.998 |
| **09N** | 396175.0 | 4501128.0 | -3.67 | -3.005 | -0.664 |
| **10A** | 395073.0 | 4501227.0 | 0.12 | -0.825 | 0.945 |
| **11N** | 394061.0 | 4501503.0 | -1.62 | -1.462 | -0.157 |
| **31** | 400324.0 | 4502042.0 | 2.84 | 1.701 | 1.138 |
| **34** | 396688.0 | 4500722.0 | -1.13 | -2.523 | 1.393 |




Εικόνα 35. Πιεζομετρικός χάρτης πρώτου σεναρίου (ευνοϊκό σενάριο).

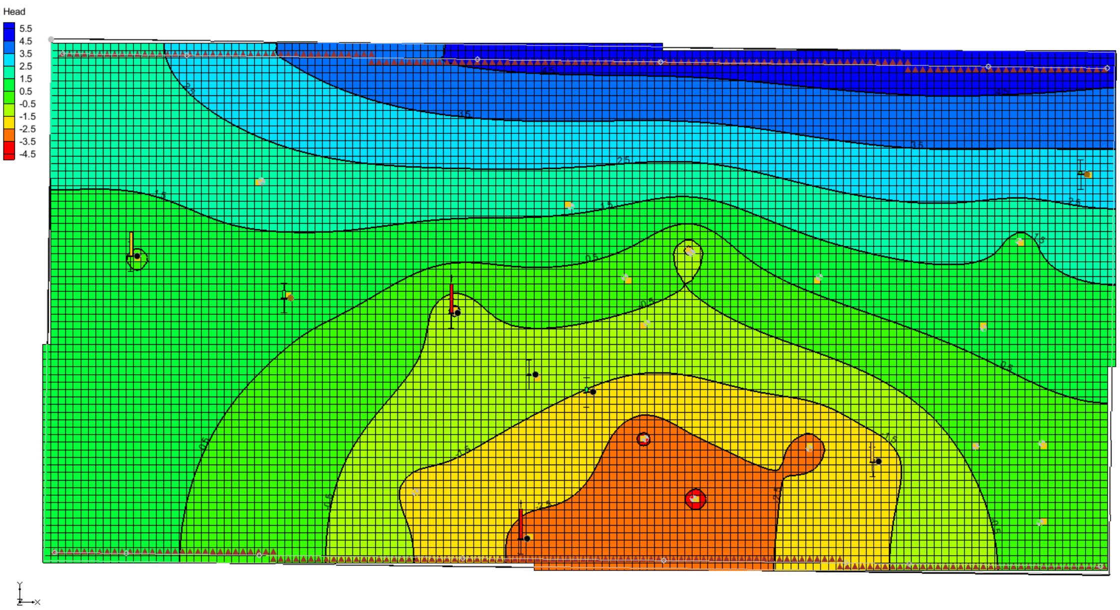
Στη συγκεκριμένη περίπτωση, φαίνεται ότι με τις αλλαγές που έγιναν, οι αποκλίσεις εξακολουθούν να είναι μικρές (μικρότερες των δύο μέτρων) και το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMSE) υπολογίζεται στα 0,92. Η τιμή αυτή θεωρείται αποδεκτή και αρκετά κοντινή με αυτήν που προέκυψε από το steady state στα 0,89, όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο 6.3.2.6. Πιο συγκεκριμένα, οι στάθμες των υπολογισμένων τιμών του δεδομένου σεναρίου είναι μικρότερες από τις υπολογισμένες του steady state και ο μέσος όρος από τις διαφορές των αποκλίσεων της εκάστοτε προσομοίωσης είναι 0,06875.

### 6.4.2 Δυσμενές σενάριο

Το δεύτερο σενάριο είναι το δυσμενές σενάριο. Στο συγκεκριμένο, θεωρούνται ότι οι αντλήσεις αυξάνονται κατά 15%, ενώ η τροφοδοσία μειώνεται κατά 10%. Με βάση τα αρχικά δεδομένα, οι αντλήσεις ανέρχονται στα 4.095.633 $m^3$ ετησίως ενώ η τροφοδοσία στα 0,00016559 m. Με την εφαρμογή των νέων αυτών δεδομένων, εξάχθηκαν τα παρακάτω αποτελέσματα.

Πίνακας 9. Υπολογισμένες, μετρημένες τιμές και απόκλιση αυτών για το δυσμενές σενάριο.

| Γεώτρηση | X | Y | Μετρημένη τιμή (m) | Υπολογισμένη τιμή (m) | Απόκλιση (m) |
|---|---|---|---|---|---|
| **06N** | 398952.0 | 4500149.0 | -3.92 | -2.564 | -1.355 |
| **08A** | 397068.0 | 4500608.0 | -1.91 | -1.584 | -0.325 |
| **08B** | 396633.0 | 4499640.0 | -5.56 | -3.082 | -2.477 |
| **09N** | 396175.0 | 4501128.0 | -3.67 | -1.558 | -2.111 |
| **10A** | 395073.0 | 4501227.0 | 0.12 | 0.635 | -0.515 |
| **11N** | 394061.0 | 4501503.0 | -1.62 | 0.003 | -1.623 |
| **31** | 400324.0 | 4502042.0 | 2.84 | 3.062 | -0.222 |
| **34** | 396688.0 | 4500722.0 | -1.13 | -1.065 | -0.064 |




Εικόνα 36. Πιεζομετρικός χάρτης δεύτερου σεναρίου (δυσμενές σενάριο).

Κατά το δυσμενές σενάριο, φαίνονται οι αποκλίσεις οι οποίες είναι μεγαλύτερες από αυτές της πρώτης ρύθμισης steady state. Ειδικότερα, στις γεωτρήσεις Σ08Β και Σ09Ν παρατηρήθηκε απόκλιση μεγαλύτερη των δύο μέτρων, ενώ το RMSE υπολογίζεται στα 1,39. Είναι μεγαλύτερο της μονάδας και από μόνο του, και αυτό φανερώνει την μεγάλη απόκλιση των τιμών. Οι τιμές των στάθμεων των υπολογισμένων τιμών στο δυσμενές σενάριο είναι υψηλότερες από τις υπολογισμένες στο steady state και ο μέσος όρος των διαφορών των αποκλίσεων από τις δύο ρυθμίσεις, είναι 0,19.

## 6.5 Βελτίωση ομοιώματος του ΥΥΣ Σίνδου

Η προσομοίωση που έγινε στην περιοχή, χρειάζεται ορισμένες βελτιώσεις ώστε να καταστεί δυνατή η επιτυχής προσομοίωση αυτής.

- Απαραίτητα είναι τα δεδομένα μετρήσεων στάθμης από τις γεωτρήσεις της περιοχής, για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα.
- Πραγματοποίηση αντλήσεων στις ίδιες ημερομηνίες κάθε έτος.
- Δημιουργία περισσότερων γεωτρήσεων για μεγαλύτερη κάλυψη της περιοχής και την εξαγωγή ακριβέστερων αποτελεσμάτων.
- Πραγματοποίηση δοκιμαστικών αντλήσεων για την ακριβέστερη εκτίμηση των υδραυλικών παραμέτρων.
- Ανόρυξη ερευνητικών γεωτρήσεων στα όρια της περιοχής μελέτης για τον προσδιορισμό των οριακών συνθηκών.
- Εγκατάσταση υδρομέτρων για τον ακριβέστερο προσδιορισμό του αντλούμενου όγκου τόσο για υδρευτική όσο και για αρδευτική χρήση.

# ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Στην παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία, πραγματοποιήθηκε υδρογεωλογική έρευνα στην περιοχή της Σίνδου και έγινε προσομοίωση του υδροφορέα της περιοχής. Επιπρόσθετα, έγινε πρόβλεψη για τη μελλοντική ποσοτική του κατάσταση με τη χρήση του λογισμικού MODFLOW, ενός μαθηματικού μοντέλου προσομοίωσης της υπόγειας ροής. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν είναι τα ακόλουθα:

- Η περιοχή της Σίνδου εντοπίζεται μεταξύ του Γαλλικού ποταμού στα Ανατολικά και του Αξιού στα Δυτικά στην Περιφερειακή Ενότητα Θεσσαλονίκης.
- Οι χρήσεις γης στη μεγαλύτερη έκτασή τους είναι ορυζώνες, δηλαδή πλημμυρισμένες περιοχές το μεγαλύτερο μέρος του χρόνου, όπου καλλιεργούνται ημιυδρόβια φυτά.
- Γεωλογικά καλύπτεται από τεταρτογενή ιζήματα (χερσαία, λιμναία, ποτάμια και ποταμοχειμάρρια), τα οποία αποτελούνται από εναλλαγές χαλίκων, άμμου, κροκάλων και αργίλων.
- Το κλίμα είναι μεσογειακό, με μέγιστη θερμοκρασία 28,9°C και ελάχιστη 4,1°C, τη διάρκεια των ετών 2018-2023.
- Το μέσο ετήσιο ύψος βροχόπτωσης είναι 502,2 mm τη διάρκεια των ετών 2018-2023.
- Βάσει του πιεζομετρικού χάρτη που κατασκευάστηκε, η γενική διεύθυνση της υπόγειας ροής είναι από Βόρεια προς Νότια.
- Η στάθμη του υπόγειου νερού τα τελευταία δέκα (10) χρόνια κυμαίνεται από 2,50 m έως 9,50 m από την επιφάνεια του εδάφους, δείχνοντας ισορροπία μεταξύ εισροών και εκροών.
- Ο υδροφορέας αποτελεί έναν συνδυασμό ελεύθερου και υπό πίεση υδροφορέα (unconfined/confined), λόγω των εναλλαγών αργίλου, άμμου, χαλίκων και κροκαλών.
- Η προσομοίωση της περιοχής, με το λογισμικό MODFLOW, θεωρήθηκε επιτυχημένη για τη ρύθμιση με σταθερή ροή, καθώς οι μετρημένες με τις υπολογισμένες τιμές έχουν πολύ μικρή απόκλιση (μικρότερη των 2 m).
- Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMSE) στην προσομοίωση σταθερής ροής, είναι ίσο με 0.89, τιμή αποδεκτή λόγω του μικρού αριθμού γεωτρήσεων παρατήρησης.
- Η προσομοίωση για μεταβαλλόμενη ροή είχε αστοχίες καθώς το εύρος των χρονολογιών που χρησιμοποιήθηκαν δεν ήταν επαρκές για ασφαλή αποτελέσματα, και έτσι το αντίστοιχο RMSE, υπολογίσθηκε με τιμή μεγαλύτερη της μονάδας.
- Εξετάστηκαν δύο διαχειριστικά σενάρια για ενδεχόμενη μελλοντική ποσοτική κατάσταση της περιοχής, ένα ευνοϊκό και ένα δυσμενές για τον υδροφορέα. Στο ευνοϊκό σενάριο, μειώνεται η τροφοδοσία (recharge) κατά 10% και οι

αντλήσεις κατά 15%. Στο δυσμενές σενάριο, μειώνεται η τροφοδοσία (recharge) κατά 10% και αυξάνονται οι αντλήσεις κατά 15%.

- Επιβεβαιώθηκε ότι με τη μείωση των αντλήσεων και της τροφοδοσίας, ο υδροφορέας θα βρίσκεται σε ευνοϊκότερη κατάσταση από την παρούσα με το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (RMSE) να είναι στα 0.92, ενώ με την αύξηση των αντλήσεων και μείωση της τροφοδοσίας, ο υδροφορέας θα βρίσκεται σε δυσμενέστερη κατάσταση με RMSE στα 1.39.

Για τη βελτίωση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης, προτείνονται: η ανόρυξη ερευνητικών γεωτρήσεων στα όρια της περιοχής μελέτης για τον προσδιορισμό των οριακών συνθηκών, περισσότερες γεωτρήσεις για τη μεγαλύτερη κάλυψη της περιοχής, δοκιμαστικές αντλήσεις για τον ακριβή προσδιορισμό των υδραυλικών παραμέτρων, καθώς και η εγκατάσταση υδρομέτρων για να προσδιοριστεί ο αντλούμενος όγκος τόσο για υδρευτική όσο και για αρδευτική χρήση.

Επίσης, για την καλύτερη ποσοτική κατάσταση του υδροφορέα προτείνεται η μείωση των αντλήσεων και η αύξηση της τροφοδοσίας (εμπλουτισμού), καθώς από τα δεδομένα διαφαίνεται πτώση της στάθμης του υπόγειου νερού με την πάροδο του χρόνου.

Τέλος, η δεδομένη έρευνα θα μπορούσε να επεκταθεί και να αποτελέσει τη βάση για τη διερεύνηση, σε βάθος χρόνου, της ποσοτικής κατάστασης του ΥΥΣ της Σίνδου, ώστε να επιτευχθεί η βιώσιμη διαχείριση και προστασία του υπόγειου υδροφορέα της περιοχής με τη λήψη κατάλληλων μέτρων.

# ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ


Αναστασιάδου-Αναστασίου, Σ.-Η. Μ. (2016). *Διαχρονικές μεταβολές της στάθμης του υπόγειου νερού στην περιοχή της Σίνδου, Ν. Θεσσαλονίκης.* Θεσσαλονίκη: Διπλωματική εργασία ΑΠΘ.

Αντωνίου, Μ. (2015). *Βελτιστοποίηση της διαχείρισης υπόγειων υδατικών πόρων με σύνδεση του αλγορίθμου αναζήτησης αρμονίας και του τριδιάστατου μοντέλου υπόγειας ροής MODFLOW.* Θεσσαλονίκη: Διπλωματική εργασία ΑΠΘ.

Βαλσαμίδου, Α. (2017). *Μοντελοποίηση του φαινομένου της υφαλμύρινσης με χρήση του προσομοιωτή MODFLOW – SEAWAT στην περιοχή Τυμπακίου, Κρήτης.* Χανιά: Διπλωματική εργασία.

Βουδούρης, Κ. (2009). *Υδρογεωλογία Περιβάλλοντος – Υπόγεια Νερά και Περιβάλλον.* Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Τζιόλα.

Βουδούρης, Κ. (2021). *Τεχνική Υδρογεωλογία - Υπόγεια νερά.* Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Τζιόλα.

Βουδούρης, Κ. (2022). *Εκμετάλλευση και Διαχείριση Υπόγειου Νερού.* Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Τζιόλα.

Δούλμπατζη, Θ. (2019). *Υδρογεωλογικές συνθήκες στην περιοχή της Σίνδου.* Θεσσαλονίκη: Διπλωματική εργασία, Τμήμα Γεωλογίας ΑΠΘ.

ΕΥΑΘ. *Αρχείο στάθμεων και χημικών στοιχείων του νερού των γεωτρήσεων της Σίνδου.*

Κουκίδου, Ε. (2005). *Υδρογεωλογικές συνθήκες και διακυμάνσεις της στάθμης του υπόγειου νερού στην περιοχή Σίνδου Ν. Θεσσαλονίκης.* Θεσσαλονίκη: Διπλωματική εργασία, Τμήμα Γεωλογίας ΑΠΘ.

Μελαδιώτης, Ι. (1984). *Γεωλογική μελέτη του ανατολικού τμήματος της πεδιάδας Θεσσαλονίκης-Γιαννιτσών και ειδικότερα της περιοχής μεταξύ των ποταμών Αξιού και Γαλλικού όπου αναπτύσσονται εκμεταλλεύσιμοι υπόγειοι υδροφορείς.* Διδακτορική διατριβή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών ΑΠΘ.

Μουντράκης, Δ. (2010). *Γεωλογία και γεωτεκτονική εξέλιξη της Ελλάδας.* Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις University Studio Press.

Μπέλλιου, Δ. (2019). *Ανάπτυξη και εφαρμογή μαθηματικών μοντέλων προσομοίωσης υπόγειων υδροφορέων.* Θεσσαλονίκη: Μεταπτυχιακή Διπλωματική εργασία.

Παπαμικρούλης, Μ. (2018). *Εφαρμογή - Ανάλυση ευαισθησίας του υδρογεωλογικού μοντέλου MODFLOW στη λεκάνη της Μεσσαράς.* Αθήνα: Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία.

Σούλιος, Γ. (2010). *Γενική Υδρογεωλογία - Πρώτος τόμος, 2η Έκδοση.* Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις University Studio Press.

Στουρνάρας, Γ. (2010). *Υδάτινοι πόροι - Υπόγεια νερά και Περιβάλλον.* ΕΚΠΑ Αθήνα.

Τρανός, Μ. (2016). *Γεωλογικές χαρτογραφήσεις, Γεωλογικοί χάρτες και τομές.* Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις University Studio Press.

Υδάτων, Ε. Γ. (2014). *Σχέδιο Διαχείρισης των Λεκανών Απορροής Ποταμών του Υδατικού Διαμερίσματος Κεντρικής Μακεδονίας (GR10).*

Lyra, A., Loukas, A., Sidiropoulos, P, Tziatzios, G., Mylopoulos, N. (2021). *An Integrated Modeling System for the Evaluation of Water Resources in Coastal Agricultural Watersheds: Application in Almyros Basin, Thessaly, Greece. Water 13*(3), 268; HYPERLINK "https://doi.org/10.3390/w13030268" https://doi.org/10.3390/w13030268

MODFLOW – Automated Parameter Estimation.en.el.pdf

MODFLOW – Conceptual Model Approach.en.el.pdf

MODFLOW – Model Calibration.en.el.pdf

Siarkos I., Latinopoulos P. (2012). *Delineation of wellhead protection zones for the control of point pollution sources in the aquifer of N. Moudania, Greece. EWRA, European Water 40, 3-17.*

## Διαδικτυακές πηγές

- ArcGIS
- Google Earth
- MODFLOW

# ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ: ΛΙΘΟΛΟΓΙΚΕΣ ΤΟΜΕΣ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ

## ΓΕΩΤΡΗΣΗ Σ04

| ΟΝΟΜΑ | ΥΛΙΚΟ | ΑΡΧΗ (m) | ΤΕΛΟΣ (m) |
|---|---|---|---|
| Σ04 | προσχώσεις | 0 | 5 |
| Σ04 | άργιλος | 5 | 11 |
| Σ04 | άμμος | 11 | 13 |
| Σ04 | άργιλος | 13 | 30 |
| Σ04 | χαλίκια | 30 | 35 |
| Σ04 | πηλός | 35 | 37 |
| Σ04 | χαλίκια | 37 | 39 |
| Σ04 | πηλός | 39 | 44 |
| Σ04 | χαλίκια | 44 | 46 |
| Σ04 | πηλός | 46 | 54 |
| Σ04 | άργιλος | 54 | 58 |
| Σ04 | άμμος | 58 | 59 |
| Σ04 | πηλός | 59 | 63 |
| Σ04 | άμμος | 63 | 64 |
| Σ04 | χάλικες | 64 | 65 |
| Σ04 | πηλός | 65 | 66 |
| Σ04 | πηλός | 66 | 81 |
| Σ04 | χαλίκια | 81 | 82 |
| Σ04 | άμμος | 82 | 85 |
| Σ04 | πηλός | 85 | 94 |
| Σ04 | χάλικες | 94 | 96 |
| Σ04 | πηλός | 96 | 98 |
| Σ04 | χάλικες | 98 | 99 |
| Σ04 | πηλός | 99 | 101 |
| Σ04 | πηλός | 101 | 102 |
| Σ04 | πηλός | 102 | 103 |
| Σ04 | πηλός | 103 | 109 |
| Σ04 | χάλικες | 109 | 115 |
| Σ04 | άμμος | 115 | 116 |
| Σ04 | πηλός | 116 | 118 |
| Σ04 | χάλικες και πηλός | 118 | 121,5 |

**ΓΕΩΤΡΗΣΗ Σ05Ν**

| ΟΝΟΜΑ | ΥΛΙΚΟ | ΑΡΧΗ (m) | ΤΕΛΟΣ (m) |
|---|---|---|---|
| **Σ05Ν** | **αργιλοϊλύς καστανή** | **0** | **9** |
| **Σ05Ν** | **αργιλοϊλύς πράσινη με απολιθώματα** | **9** | **31** |
| **Σ05Ν** | **άμμος χονδρόκοκκη με απολιθώματα** | **31** | **33** |
| **Σ05Ν** | **άργιλοι,χαλίκια** | **33** | **40** |
| **Σ05Ν** | **χαλίκια,άργιλος** | **40** | **45** |
| **Σ05Ν** | **αργιλοϊλύς καστανή με απολιθώματα** | **45** | **52** |
| **Σ05Ν** | **άμμος,χαλίκια** | **52** | **53** |
| **Σ05Ν** | **άργιλοι,άμμος,χαλίκια** | **53** | **56** |
| **Σ05Ν** | **αργιλοϊλύς πράσινη με χαλίκια και απολιθώματα** | **56** | **59** |
| **Σ05Ν** | **αργιλοπηλός τεφροπράσινος** | **59** | **62** |
| **Σ05Ν** | **άμμος και άργιλος** | **62** | **63** |
| **Σ05Ν** | **άργιλος καστανή** | **63** | **71** |
| **Σ05Ν** | **χαλίκια,άμμος,άργιλος** | **71** | **73** |
| **Σ05Ν** | **εναλλαγές αργίλων-άμμων με διάσπαρτα χαλίκια** | **73** | **80** |
| **Σ05Ν** | **αμμοχάλικες** | **80** | **89** |
| **Σ05Ν** | **άμμος** | **89** | **92** |
| **Σ05Ν** | **άργιλος κίτρινη με διάσπαρτα χαλίκια** | **92** | **101** |
| **Σ05Ν** | **αμμοχάλικες** | **101** | **103** |
| **Σ05Ν** | **αργιλοϊλύς** | **103** | **107** |
| **Σ05Ν** | **χαλίκια,κροκάλες** | **107** | **110** |
| **Σ05Ν** | **άργιλος με διάσπαρτα χαλίκια** | **110** | **124** |
| **Σ05Ν** | **χαλίκια,κροκάλες** | **124** | **128** |
| **Σ05Ν** | **άργιλος με διάσπαρτα χαλίκια** | **128** | **136** |
| **Σ05Ν** | **χαλίκια,κροκάλες** | **136** | **140** |
| **Σ05Ν** | **άργιλος,χαλίκια** | **140** | **144** |
| **Σ05Ν** | **χαλίκια,κροκάλες** | **144** | **165** |
| **Σ05Ν** | **χαλίκια** | **165** | **167** |
| **Σ05Ν** | **άργιλος** | **167** | **170** |
| **Σ05Ν** | **ασβεστομαργαϊκά νεογενούς** | **170** | **200** |

ΓΕΩΤΡΗΣΗ Σ06Ν

| ΟΝΟΜΑ | ΥΛΙΚΟ | ΑΡΧΗ (m) | ΤΕΛΟΣ (m) |
|---|---|---|---|
| Σ06Ν | αργιλοϊλύς | 0 | 10 |
| Σ06Ν | αργιλοϊλύς,λεπτόκοκκη άμμος σε εναλλαγές | 10 | 34 |
| Σ06Ν | άμμος | 34 | 37 |
| Σ06Ν | άργιλος και άμμος | 37 | 39 |
| Σ06Ν | άργιλος με λίγη άμμο | 39 | 44 |
| Σ06Ν | αμμοάργιλος | 44 | 47 |
| Σ06Ν | άμμος μεσόκοκκη | 47 | 51 |
| Σ06Ν | άργιλος καστανή με άμμο | 51 | 55 |
| Σ06Ν | άμμος με άργιλο σταχτή και απολιθώματα | 55 | 62 |
| Σ06Ν | αργιλοπηλοί | 62 | 64 |
| Σ06Ν | αργιλοαμμώδες | 64 | 72 |
| Σ06Ν | αργιλοϊλύς | 72 | 75 |
| Σ06Ν | αργιλοϊλύς με πολλά απολιθώματα | 75 | 80 |
| Σ06Ν | αργιλοαμμώδες | 80 | 87 |
| Σ06Ν | άμμος και χαλίκια | 87 | 90 |
| Σ06Ν | αργιλοαμμώδες | 90 | 93 |
| Σ06Ν | χονδρόκοκκη άμμος και χαλίκια | 93 | 99 |
| Σ06Ν | αργιλοαμμώδες | 99 | 104 |
| Σ06Ν | άργιλος καστανή | 104 | 106 |
| Σ06Ν | μεσόκοκκη χαλαζιακή άμμος | 106 | 108 |
| Σ06Ν | αργιλοϊλύς με άμμο | 108 | 113 |
| Σ06Ν | μεσόκοκκη χαλαζιακή άμμος | 113 | 117 |
| Σ06Ν | αργιλοϊλύς με άμμο | 117 | 119 |
| Σ06Ν | μεσόκοκκη χαλαζιακή άμμος | 119 | 123 |
| Σ06Ν | αργιλοαμμώδες | 123 | 130 |
| Σ06Ν | μεσόκοκκη χαλαζιακή άμμος | 130 | 134 |
| Σ06Ν | άργιλος | 134 | 139 |
| Σ06Ν | άμμος με άργιλο | 139 | 140 |
| Σ06Ν | άργιλος με λίγη άμμο | 140 | 146 |
| Σ06Ν | μεσόκοκκη χαλαζιακή άμμος | 146 | 156 |
| Σ06Ν | άργιλος καστανή με χαλίκια | 156 | 159 |
| Σ06Ν | χονδρόκοκκη άμμος και χαλίκια | 159 | 174 |
| Σ06Ν | χαλίκια και άμμος | 174 | 191 |
| Σ06Ν | χαλίκια και άργιλος καστανή | 191 | 193 |
| Σ06Ν | άργιλος | 193 | 196 |
| Σ06Ν | χαλίκια με ασβεστόμαργα | 196 | 205 |
| Σ06Ν | ασβεστομαργαϊκά | 205 | 214 |
| Σ06Ν | άμμος και χαλίκια | 214 | 218 |
| Σ06Ν | ασβεστόμαργα και χαλίκια | 218 | 235 |
| Σ06Ν | άμμος και άργιλος | 235 | 238 |
| Σ06Ν | εναλ. αργίλου, άμμου, με χαλίκια και ασβεστιτικά συγκρίματα | 238 | 245 |

ΓΕΩΤΡΗΣΗ Σ07Ν

| ΟΝΟΜΑ | ΥΛΙΚΟ | ΑΡΧΗ (m) | ΤΕΛΟΣ (m) |
|---|---|---|---|
| Σ07Ν | αργιλοϊλύς | 0 | 10 |
| Σ07Ν | εναλλαγές αργιλοϊλύς με πηλό | 10 | 38 |
| Σ07Ν | αργιλοϊλύς τεφρόλευκη | 38 | 44 |
| Σ07Ν | άργιλος και άμμος | 44 | 56 |
| Σ07Ν | αργιλοϊλύς με λίγη άμμο | 56 | 59 |
| Σ07Ν | χαλίκια | 59 | 61 |
| Σ07Ν | αργιλοπηλοί με πολλά απολιθώματα | 61 | 71 |
| Σ07Ν | άμμος με απολιθώματα | 71 | 74 |
| Σ07Ν | αργιλοϊλύς τεφρόλευκη και απολιθώματα | 74 | 79 |
| Σ07Ν | χαλίκια και άμμος | 79 | 80 |
| Σ07Ν | αργιλοϊλύς με απολιθώματα | 80 | 85 |
| Σ07Ν | αργιλοϊλύς | 85 | 98 |
| Σ07Ν | αργιλοϊλύς με χαλίκια | 98 | 101 |
| Σ07Ν | χαλίκια και άμμος | 101 | 102 |
| Σ07Ν | εναλλαγές χαλικιών και άμμων με αργίλους | 102 | 108 |
| Σ07Ν | άμμος και χαλίκια | 108 | 113 |
| Σ07Ν | άργιλος και χαλίκια | 113 | 117 |
| Σ07Ν | άμμος και άργιλος | 117 | 122 |
| Σ07Ν | άμμος και χαλίκια | 122 | 124 |
| Σ07Ν | άργιλος | 124 | 128 |
| Σ07Ν | χαλίκια και άμμος | 128 | 133 |
| Σ07Ν | αργιλοϊλύς με άμμο | 133 | 154 |
| Σ07Ν | μεσόκοκκη χαλαζιακή άμμος | 154 | 156 |
| Σ07Ν | εναλλαγές αργίλου με άμμο | 156 | 165 |
| Σ07Ν | χαλίκια και άμμος | 165 | 176 |
| Σ07Ν | άργιλος | 176 | 178 |
| Σ07Ν | άμμοι και χαλίκια | 178 | 195 |
| Σ07Ν | άργιλος και χαλίκια | 195 | 198 |
| Σ07Ν | άργιλος κόκκινη | 198 | 200 |
| Σ07Ν | ασβεστομαργαϊκά με χαλίκια | 200 | 202 |
| Σ07Ν | ασβεστομαργαϊκά | 202 | 215 |

**ΓΕΩΤΡΗΣΗ Σ08**

| ΟΝΟΜΑ | ΥΛΙΚΟ | ΑΡΧΗ (m) | ΤΕΛΟΣ (m) |
|---|---|---|---|
| Σ08 | δεν υπάρχει περιγραφή | 0 | 40 |
| Σ08 | άμμος,χαλίκια | 40 | 43 |
| Σ08 | άργιλος | 43 | 55 |
| Σ08 | άργιλος | 57 | 66 |
| Σ08 | ιλύς | 66 | 68 |
| Σ08 | άργιλος | 68 | 73 |
| Σ08 | άμμος χονδρόκοκκη | 73 | 74 |
| Σ08 | αργιλοάμμος | 74 | 77 |
| Σ08 | χαλίκια, άμμος | 77 | 85 |
| Σ08 | άργιλος | 85 | 94 |
| Σ08 | χαλίκια, άμμος | 94 | 96 |
| Σ08 | άργιλος | 96 | 99 |
| Σ08 | άμμος χονδρόκοκκη | 99 | 101 |
| Σ08 | άργιλος | 101 | 108 |
| Σ08 | άμμος χονδρόκοκκη | 108 | 109 |
| Σ08 | άργιλος | 109 | 124 |
| Σ08 | χαλίκια, άμμος | 124 | 127 |
| Σ08 | άργιλος | 127 | 130 |
| Σ08 | χαλίκια | 130 | 133 |
| Σ08 | άργιλος | 133 | 151 |
| Σ08 | χαλίκια, άμμος | 151 | 153 |
| Σ08 | αργιλοάμμος | 153 | 161 |
| Σ08 | χαλίκια, άμμος | 161 | 167,5 |
| Σ08 | άργιλος, χαλίκια | 167,5 | 183 |
| Σ08 | κροκάλες μικρές | 183 | 185 |
| Σ08 | άργιλος, κροκάλες | 185 | 191 |
| Σ08 | κροκάλες | 191 | 198 |
| Σ08 | άργιλος, κροκάλες, χαλίκια | 198 | 202 |

**ΓΕΩΤΡΗΣΗ Σ08Α**

| ΟΝΟΜΑ | ΥΛΙΚΟ | ΑΡΧΗ (m) | ΤΕΛΟΣ (m) |
|---|---|---|---|
| Σ08Α | φυτική γη | 0 | 7 |
| Σ08Α | αργιλοϊλύς με ενδιαστρώσεις λεπτόρευστων άμμων και ζωικών και φυτικών απολιθωμάτων | 7 | 63 |
| Σ08Α | άμμος λεπτόκοκκη-μεσόκοκκη | 63 | 66 |
| Σ08Α | αργιλοϊλύς | 66 | 79 |
| Σ08Α | άμμος χονδρόκοκκη, χάλικες | 79 | 88 |
| Σ08Α | άργιλος | 88 | 98 |
| Σ08Α | άμμος ,χαλίκια | 98 | 105 |
| Σ08Α | άργιλος | 105 | 107 |
| Σ08Α | άμμος ,χαλίκια | 107 | 115 |
| Σ08Α | άργιλος | 115 | 130 |
| Σ08Α | άμμος,χαλίκια,κροκάλες | 130 | 138 |
| Σ08Α | χαλίκια,κροκάλες | 138 | 140 |
| Σ08Α | άργιλος | 140 | 145 |
| Σ08Α | χαλίκια, κροκάλες | 145 | 150 |
| Σ08Α | άργιλος | 150 | 155 |
| Σ08Α | άμμος ,χαλίκια | 155 | 158 |
| Σ08Α | άργιλος | 158 | 164 |
| Σ08Α | χαλίκια, κροκάλες | 164 | 168 |
| Σ08Α | άργιλος | 168 | 180 |
| Σ08Α | κροκάλες, χαλίκια | 180 | 186 |
| Σ08Α | άργιλος | 186 | 190 |
| Σ08Α | κροκαλοπαγές | 190 | 209 |
| Σ08Α | άργιλος | 209 | 229 |

**ΓΕΩΤΡΗΣΗ Σ08Β**

| ΟΝΟΜΑ | ΥΛΙΚΟ | ΑΡΧΗ (m) | ΤΕΛΟΣ (m) |
|---|---|---|---|
| Σ08Β | άμμος λεπτόρευστη | 0 | 3 |
| Σ08Β | άμμος λεπτόρευστη με οργανομιγή | 3 | 25 |
| Σ08Β | άργιλος απολιθωματοφόρος | 25 | 42 |
| Σ08Β | άργιλος και άμμοι απολιθωματοφόροι σε εναλλαγές | 42 | 60 |
| Σ08Β | άργιλος μελανή | 60 | 63 |
| Σ08Β | άμμος,χαλίκια | 63 | 66 |
| Σ08Β | άργιλος καφέ | 66 | 71 |
| Σ08Β | άμμος,χαλίκια | 71 | 74 |
| Σ08Β | άργιλος γκρι με απολιθώματα | 74 | 84 |
| Σ08Β | άργιλος καφέ | 87 | 89 |
| Σ08Β | αμμοχάλικες | 89 | 93 |
| Σ08Β | άργιλος με ενδιαστρώσεις άμμων | 93 | 111 |
| Σ08Β | αμμοχάλικες | 111 | 114 |
| Σ08Β | άργιλος γκρι | 114 | 123 |
| Σ08Β | αμμοχάλικες με λίγη άργιλο | 123 | 126 |
| Σ08Β | άργιλος καφέ | 126 | 128 |
| Σ08Β | αμμοχάλικες | 128 | 134 |
| Σ08Β | άργιλος γκρι | 134 | 137 |
| Σ08Β | άργιλος καφέ | 137 | 142 |
| Σ08Β | αμμοχάλικες | 142 | 144 |
| Σ08Β | άργιλος καφέ | 144 | 148 |
| Σ08Β | αμμοχάλικες | 148 | 149 |
| Σ08Β | άργιλος καφέ | 149 | 154 |
| Σ08Β | άργιλος γκρι ιλύες | 154 | 166 |
| Σ08Β | άργιλος καφέ με άμμους | 166 | 171 |
| Σ08Β | άργιλος καφέ με άμμους | 172 | 177 |
| Σ08Β | αμμοχάλικες με λίγη άργιλο | 177 | 198 |
| Σ08Β | άργιλος καφέ με άμμους | 198 | 200 |
| Σ08Β | αμμοχάλικες | 200 | 206 |
| Σ08Β | άργιλος καφέ με άμμους | 206 | 214 |

ΓΕΩΤΡΗΣΗ Σ09Ν

| ΟΝΟΜΑ | ΥΛΙΚΟ | ΑΡΧΗ (m) | ΤΕΛΟΣ (m) |
|---|---|---|---|
| Σ09Ν | αργιλοϊλύς | 0 | 11 |
| Σ09Ν | αργιλοϊλύς τεφρή με τύρφη και σαπρόφυτα | 11 | 22 |
| Σ09Ν | άργιλος τεφρή με απολιθώματα | 22 | 40 |
| Σ09Ν | εναλλαγές τεφρής και καστανής αργίλου με απολιθώματα | 40 | 49 |
| Σ09Ν | αμμοχάλικο | 49 | 51 |
| Σ09Ν | αργιλοαμμώδες με απολιθώματα | 51 | 54 |
| Σ09Ν | αμμοχάλικο | 54 | 55 |
| Σ09Ν | αργιλοαμμώδες με απολιθώματα | 55 | 60 |
| Σ09Ν | άργιλος και πηλός με πολλά απολιθώματα | 60 | 72 |
| Σ09Ν | άμμος με πολλά απολιθώματα | 72 | 74 |
| Σ09Ν | άργιλος και άμμος με πολλά απολιθώματα | 74 | 78 |
| Σ09Ν | αργιλοϊλύς με απολιθώματα | 78 | 84 |
| Σ09Ν | αργιλοαμμώδες καστανό με απολιθώματα | 84 | 87 |
| Σ09Ν | άμμος με απολιθώματα | 87 | 89 |
| Σ09Ν | άργιλος καστανή | 89 | 93 |
| Σ09Ν | άμμος-χαλίκια-άργιλος με απολιθώματα | 93 | 99 |
| Σ09Ν | αργιλοϊλύς καστανή με διάσπαρτα χαλίκια | 99 | 103 |
| Σ09Ν | άργιλος καστανή | 103 | 109 |
| Σ09Ν | αμμοχάλικο | 109 | 114 |
| Σ09Ν | άργιλος και άμμος | 114 | 118 |
| Σ09Ν | αμμοχάλικο | 118 | 121 |
| Σ09Ν | άμμος και άργιλος τεφρή | 121 | 126 |
| Σ09Ν | άμμος και άργιλος καστανή | 126 | 128 |
| Σ09Ν | άμμος και χαλίκια | 128 | 130 |
| Σ09Ν | αργιλοαμμώδες | 130 | 137 |
| Σ09Ν | χαλίκια και άμμος | 137 | 139 |
| Σ09Ν | αργιλοϊλύς | 139 | 143 |
| Σ09Ν | άμμος | 143 | 148 |
| Σ09Ν | εναλλαγές άμμου και αργίλου | 148 | 158 |
| Σ09Ν | άμμοι και χαλίκια | 158 | 159 |
| Σ09Ν | άμμος σε εναλλαγές με άργιλο | 159 | 165 |
| Σ09Ν | χαλίκια και άμμος | 165 | 174 |
| Σ09Ν | άργιλος κόκκινη και άμμος | 174 | 176 |
| Σ09Ν | χαλίκια και άμμος | 176 | 185 |
| Σ09Ν | άμμος και άργιλος | 185 | 188 |
| Σ09Ν | άμμος | 188 | 191 |
| Σ09Ν | άργιλος | 191 | 194 |
| Σ09Ν | εναλλαγές άμμου και αργίλων | 194 | 220 |

**ΓΕΩΤΡΗΣΗ Σ10Α**

| ΟΝΟΜΑ | ΥΛΙΚΟ | ΑΡΧΗ (m) | ΤΕΛΟΣ (m) |
|---|---|---|---|
| Σ10Α | φυτική γη | 0 | 6 |
| Σ10Α | αργιλοϊλύς με ενδιαστρώσεις λεπτόρευστων άμμων και ζωικών και φυτικών απολιθωμάτων | 6 | 95 |
| Σ10Α | άμμος χονδρόκοκκη | 95 | 101 |
| Σ10Α | άργιλος | 101 | 104 |
| Σ10Α | χαλίκια με άργιλο | 104 | 110 |
| Σ10Α | αμμοχάλικες | 110 | 116 |
| Σ10Α | άμμος,χαλίκια με λίγη άργιλο | 116 | 128 |
| Σ10Α | αμμοχάλικες | 128 | 132 |
| Σ10Α | άργιλος | 132 | 134 |
| Σ10Α | άμμος,χαλίκια,κροκάλες | 134 | 154 |
| Σ10Α | άργιλος | 154 | 157 |
| Σ10Α | άμμος,χαλίκια,κροκάλες | 157 | 161 |
| Σ10Α | άργιλος | 161 | 167 |
| Σ10Α | αμμοχάλικες | 167 | 175 |
| Σ10Α | άργιλος | 175 | 186 |

**ΓΕΩΤΡΗΣΗ Σ11Ν**

| ΟΝΟΜΑ | ΥΛΙΚΟ | ΑΡΧΗ (m) | ΤΕΛΟΣ (m) |
|---|---|---|---|
| Σ11Ν | αργιλοϊλύς | 0 | 7 |
| Σ11Ν | άργιλος με λεπτόκοκκη άμμο | 7 | 9 |
| Σ11Ν | άργιλος με απολιθώματα | 9 | 13 |
| Σ11Ν | λεπτόκοκκη άμμος | 13 | 15 |
| Σ11Ν | σαπρόφυτα και λιμνοθαλάσσια απολιθώματα | 15 | 17 |
| Σ11Ν | αργιλοπηλοί με απολιθώματα | 17 | 30 |
| Σ11Ν | πηλός | 30 | 44 |
| Σ11Ν | πηλός | 44 | 51 |
| Σ11Ν | αργιλοϊλύς με ορίζοντες πηλού | 51 | 58 |
| Σ11Ν | πηλός με απολιθώματα και φυτικά | 58 | 75 |
| Σ11Ν | μεσόκοκκη άμμος | 75 | 77 |
| Σ11Ν | πηλός | 77 | 84 |
| Σ11Ν | πηλός και άμμος | 84 | 86 |
| Σ11Ν | ιλύς | 86 | 87 |
| Σ11Ν | μεσόκοκκη άμμος | 87 | 88 |
| Σ11Ν | αργιλοϊλύς | 88 | 102 |
| Σ11Ν | άμμος χαλαζιακή | 102 | 104 |
| Σ11Ν | αργιλοϊλύς και άμμος | 104 | 110 |
| Σ11Ν | αργιλοϊλύς | 110 | 119 |
| Σ11Ν | άργιλος τεφρή | 119 | 130 |
| Σ11Ν | άργιλος και άμμος | 130 | 133 |
| Σ11Ν | άμμος με λίγα χαλίκια | 133 | 135 |
| Σ11Ν | άργιλος | 135 | 138 |
| Σ11Ν | άμμος μεσόκοκκη | 138 | 142 |
| Σ11Ν | άργιλος με άμμο | 142 | 146 |
| Σ11Ν | άργιλος | 146 | 151 |
| Σ11Ν | άμμος και άργιλος | 151 | 153 |
| Σ11Ν | άργιλος | 153 | 160 |
| Σ11Ν | αργιλοϊλύς | 160 | 162 |
| Σ11Ν | άμμος με λίγα χαλίκια | 162 | 174 |
| Σ11Ν | άργιλος | 174 | 177 |
| Σ11Ν | άμμος | 177 | 198 |
| Σ11Ν | άργιλος τεφρόλευκη με λεπτόκοκκη άμμο | 198 | 217 |
| Σ11Ν | άμμος | 217 | 232 |
| Σ11Ν | άργιλος τεφρόλευκη | 232 | 250 |

ΓΕΩΤΡΗΣΗ Σ14

| ΟΝΟΜΑ | ΥΛΙΚΟ | ΑΡΧΗ (m) | ΤΕΛΟΣ (m) |
|---|---|---|---|
| Σ14 | άμμος | 0 | 2 |
| Σ14 | άργιλος | 2 | 10 |
| Σ14 | κογχύλια | 10 | 12 |
| Σ14 | άργιλος | 12 | 25 |
| Σ14 | χαλίκια, κροκάλες | 25 | 30 |
| Σ14 | άργιλος | 30 | 35 |
| Σ14 | χαλίκια, κροκάλες | 35 | 37 |
| Σ14 | άργιλος | 37 | 45 |
| Σ14 | χαλίκια μικρές κροκάλες | 45 | 51 |
| Σ14 | άργιλος | 51 | 61 |
| Σ14 | χαλίκια, κροκάλες | 61 | 63 |
| Σ14 | άργιλος με χαλίκια | 63 | 64 |
| Σ14 | άργιλος με άμμο | 64 | 72 |
| Σ14 | χαλίκια μικρές κροκάλες | 72 | 77 |
| Σ14 | άργιλος και άμμος | 77 | 83 |
| Σ14 | χαλίκια, κροκάλες | 83 | 84 |
| Σ14 | άργιλος | 84 | 85 |
| Σ14 | χάλικες | 85 | 86 |
| Σ14 | άργιλος | 86 | 91 |
| Σ14 | χαλίκια, κροκάλες | 91 | 93 |
| Σ14 | άργιλος | 93 | 94 |
| Σ14 | χαλίκια, κροκάλες | 94 | 110 |
| Σ14 | άργιλος | 110 | 130 |

**ΓΕΩΤΡΗΣΗ Σ15**

| ΟΝΟΜΑ | ΥΛΙΚΟ | ΑΡΧΗ (m) | ΤΕΛΟΣ (m) |
|---|---|---|---|
| Σ15 | άμμος | 0 | 2 |
| Σ15 | άργιλος | 2 | 9 |
| Σ15 | κογχύλια | 9 | 10 |
| Σ15 | άργιλος | 10 | 12 |
| Σ15 | χαλίκια | 12 | 15 |
| Σ15 | άργιλος | 15 | 28 |
| Σ15 | χαλίκια,κροκάλες | 28 | 30 |
| Σ15 | άργιλος | 30 | 35 |
| Σ15 | χαλίκια,κροκάλες | 35 | 37 |
| Σ15 | άργιλος | 37 | 53 |
| Σ15 | χαλίκια,κροκάλες | 53 | 55 |
| Σ15 | άργιλος | 55 | 56 |
| Σ15 | χαλίκια,κροκάλες | 56 | 58 |
| Σ15 | άργιλος | 58 | 62 |
| Σ15 | χαλίκια | 62 | 63 |
| Σ15 | άργιλος | 63 | 72 |
| Σ15 | χαλίκια | 72 | 74 |
| Σ15 | άργιλος | 74 | 80 |
| Σ15 | χαλίκια,κροκάλες | 80 | 86 |
| Σ15 | άργιλος | 86 | 93 |
| Σ15 | χαλίκια,κροκάλες | 93 | 96 |
| Σ15 | άργιλος | 96 | 101 |
| Σ15 | χαλίκια,κροκάλες | 101 | 103 |
| Σ15 | άργιλος | 103 | 104 |
| Σ15 | χαλίκια,κροκάλες | 104 | 112 |
| Σ15 | άργιλος | 112 | 130 |

**ΓΕΩΤΡΗΣΗ Σ16Ν**

| ΟΝΟΜΑ | ΥΛΙΚΟ | ΑΡΧΗ (m) | ΤΕΛΟΣ (m) |
|---|---|---|---|
| Σ16Ν | άργιλος καφέ | 0 | 33 |
| Σ16Ν | χάλικες | 33 | 36 |
| Σ16Ν | άργιλος γκριζοπράσινη | 36 | 45 |
| Σ16Ν | χάλικες | 45 | 46 |
| Σ16Ν | άργιλος γκριζοπράσινη | 46 | 50 |
| Σ16Ν | αργιλομάργες γκρι απολιθωματοφόρες | 50 | 52 |
| Σ16Ν | αργιλομάργες γκρι | 52 | 53 |
| Σ16Ν | άργιλος καφέ | 53 | 58 |
| Σ16Ν | αμμοχάλικες, κροκάλες | 58 | 59 |
| Σ16Ν | κροκαλοπαγές | 59 | 62 |
| Σ16Ν | άργιλος καφέ | 62 | 65 |
| Σ16Ν | αμμοχάλικα | 65 | 67 |
| Σ16Ν | άργιλος καφέ | 67 | 68 |
| Σ16Ν | αμμοχάλικα | 68 | 69 |
| Σ16Ν | αμμοχάλικες, κροκάλες | 69 | 71 |
| Σ16Ν | άργιλος γκρι | 71 | 72 |
| Σ16Ν | άργιλος καφέ, χαλίκια | 72 | 74 |
| Σ16Ν | άργιλος καφέ | 74 | 84 |
| Σ16Ν | άργιλος και λεπτόκοκκή άμμος | 84 | 87 |
| Σ16Ν | αμμοχάλικες, κροκάλες | 87 | 93 |
| Σ16Ν | άργιλος καφέ | 93 | 100 |
| Σ16Ν | ψηφιδοπαγές χαλαζιακό | 100 | 102 |
| Σ16Ν | άργιλος καφέ | 102 | 106 |
| Σ16Ν | ψηφιδοπαγές χαλαζιακό | 106 | 107 |
| Σ16Ν | άργιλος - αμμοχάλικες | 107 | 109 |
| Σ16Ν | κροκαλοπαγές χαλαζιακό | 109 | 115 |
| Σ16Ν | άργιλος - αμμοχάλικες | 115 | 116 |
| Σ16Ν | άργιλος καφέ | 116 | 118 |
| Σ16Ν | άργιλος, άμμος λεπτόκοκκη | 118 | 121 |
| Σ16Ν | κροκαλοπαγές χαλαζιακό | 121 | 130 |
| Σ16Ν | άργιλος καφέ - άμμος λεπτόκοκκη | 130 | 137 |
| Σ16Ν | άργιλος καφέ | 137 | 140 |

**ΓΕΩΤΡΗΣΗ Σ16Π**

| ΟΝΟΜΑ | ΥΛΙΚΟ | ΑΡΧΗ (m) | ΤΕΛΟΣ (m) |
|---|---|---|---|
| Σ16Π | άργιλος | 0 | 2 |
| Σ16Π | άργιλος τεφρά αμμούχος | 2 | 8 |
| Σ16Π | άμμος λεπτόκοκκη τεφρή | 8 | 13 |
| Σ16Π | μάργα πλαστική τεφρά απολιθωματοφόρος | 13 | 29 |
| Σ16Π | άμμος χονδρόκοκκη | 29 | 30 |
| Σ16Π | άργιλος καστανή,χαλίκια | 30 | 32 |
| Σ16Π | χαλίκια,ψηφίδες,άμμος | 32 | 36 |
| Σ16Π | άργιλος καστανή | 36 | 40 |
| Σ16Π | άμμος χονδρόκοκκη | 40 | 41 |
| Σ16Π | άργιλος αμμούχος | 41 | 43 |
| Σ16Π | άμμος λεπτόκοκκη | 43 | 44 |
| Σ16Π | μάργα πλαστική τεφρά απολιθωματοφόρος | 44 | 52 |
| Σ16Π | άμμος λεπτόκοκκη, συνεκτική | 52 | 54 |
| Σ16Π | άργιλος με λεπτές ενστρώσεις ψαμμίτου | 54 | 57 |
| Σ16Π | κροκάλες, χαλίκια, ψηφίδες | 57 | 61 |
| Σ16Π | άργιλος καστανή | 61 | 66 |
| Σ16Π | χαλίκια,ψηφίδες,άμμος χονδρόκοκκη | 66 | 70 |
| Σ16Π | άργιλος καστανή | 70 | 88 |
| Σ16Π | κροκάλες,χαλίκια,άμμος | 88 | 93 |
| Σ16Π | άργιλος καστανή | 93 | 106 |
| Σ16Π | κροκάλες,χαλίκια,άμμος | 106 | 114 |
| Σ16Π | άργιλος αμμούχος με λίγες κροκάλες | 114 | 130 |

**ΓΕΩΤΡΗΣΗ Σ17**

| ΟΝΟΜΑ | ΥΛΙΚΟ | ΑΡΧΗ (m) | ΤΕΛΟΣ (m) |
|---|---|---|---|
| Σ17 | φυτική γη | 0 | 3 |
| Σ17 | άμμος λεπτόκοκκη τεφρή | 3 | 13 |
| Σ17 | μάργα τεφροπράσινη με απολιθώματα οστράκων | 13 | 33 |
| Σ17 | κροκάλες,χαλίκια,άμμος χονδρόκοκκη | 33 | 36 |
| Σ17 | άργιλος καστανή | 36 | 41 |
| Σ17 | κροκάλες,χαλίκια,άμμος χονδρόκοκκη | 41 | 48 |
| Σ17 | άργιλος καστανή | 48 | 61 |
| Σ17 | κροκάλες,χαλίκια,άμμος | 61 | 64 |
| Σ17 | άργιλος καστανή | 64 | 74 |
| Σ17 | κροκάλες,χαλίκια,άμμος | 74 | 77 |
| Σ17 | άργιλος τεφροπράσινη | 77 | 81 |
| Σ17 | άργιλος καστανή | 81 | 89 |
| Σ17 | κροκάλες,χαλίκια,άμμος χονδρόκοκκη | 89 | 97 |
| Σ17 | άργιλος καστανή | 97 | 103 |
| Σ17 | κροκάλες,χαλίκια,άμμος | 103 | 108 |
| Σ17 | άργιλος καστανή | 108 | 115 |
| Σ17 | κροκάλες,χαλίκια,άμμος | 115 | 118 |
| Σ17 | άργιλος καστανή | 118 | 130 |

**ΓΕΩΤΡΗΣΗ Σ18**

| ΟΝΟΜΑ | ΥΛΙΚΟ | ΑΡΧΗ (m) | ΤΕΛΟΣ (m) |
|---|---|---|---|
| Σ18 | άργιλος φαιά | 0 | 3 |
| Σ18 | αμμοϊλύς | 3 | 12 |
| Σ18 | άμμος χονδρόκοκκη | 34 | 41 |
| Σ18 | άργιλος φαιά | 41 | 60 |
| Σ18 | άργιλος με άμμο | 60 | 69 |
| Σ18 | άμμος χονδρόκοκκη | 69 | 73 |
| Σ18 | άργιλος με χάλικες | 73 | 86 |
| Σ18 | άμμος χονδρόκοκκη | 86 | 98 |
| Σ18 | άργιλος με χάλικες | 98 | 103 |
| Σ18 | άμμος χονδρόκοκκη με χαλίκια | 103 | 111,5 |
| Σ18 | άργιλος με άμμο | 111,5 | 122,5 |
| Σ18 | άμμος χονδρόκοκκη | 122,5 | 124 |
| Σ18 | άργιλος με άμμο | 124 | 130 |

**ΓΕΩΤΡΗΣΗ Σ19**

| ΟΝΟΜΑ | ΥΛΙΚΟ | ΑΡΧΗ (m) | ΤΕΛΟΣ (m) |
|---|---|---|---|
| Σ19 | φαιά αργιλοϊλύς | 0 | 3 |
| Σ19 | φαιά ιλύς | 3 | 4 |
| Σ19 | άργιλος με λεπτόκοκκη άμμο | 4 | 18 |
| Σ19 | ιλύς μελανόχρους | 18 | 32 |
| Σ19 | άμμος μεσόκοκκη-χονδρόκοκκη με χαλίκια | 32 | 35 |
| Σ19 | ιλύς μελανόχρους με άμμο | 35 | 39 |
| Σ19 | άμμος χονδρόκοκκη με χαλίκια | 39 | 44 |
| Σ19 | άμμος λεπτόκοκκη-χονδρόκοκκοι με κογχύλια | 44 | 68 |
| Σ19 | άργιλος φαιά | 68 | 95 |
| Σ19 | άμμος χονδρόκοκκη,χάλικες,κροκάλες | 95 | 110 |
| Σ19 | άργιλος φαιά | 110 | 114,2 |
| Σ19 | άμμος χονδρόκοκκη με χαλίκια | 114,2 | 122,7 |
| Σ19 | άργιλος με χάλικες | 122,7 | 130 |

**ΓΕΩΤΡΗΣΗ Σ21Π**

| ΟΝΟΜΑ | ΥΛΙΚΟ | ΑΡΧΗ (m) | ΤΕΛΟΣ (m) |
|---|---|---|---|
| Σ21Π | αργιλοϊλύς | 0 | 30 |
| Σ21Π | άμμος λεπτόκοκκη-μεσόκοκκη με απολιθώματα και λίγα χαλίκια | 30 | 40 |
| Σ21Π | άμμος μεσόκοκκη ως χονδρόκοκκη με απολιθώματα | 40 | 48 |
| Σ21Π | άμμος μεσόκοκκη ως χονδρόκοκκη με κογχύλια | 48 | 58 |
| Σ21Π | άργιλος, χαλίκια | 58 | 61,55 |
| Σ21Π | άμμος μεσόκοκκη ως χονδρόκοκκη με κογχύλια | 61,55 | 64,67 |
| Σ21Π | άργιλος με λεπτόκοκκη άμμο | 64,67 | 68 |
| Σ21Π | χάλικες με χονδρόκοκκη άμμο | 68 | 74 |
| Σ21Π | άργιλος | 74 | 78,38 |
| Σ21Π | άμμος χονδρόκοκκη με χαλίκια | 78,38 | 81,5 |
| Σ21Π | άργιλος | 81,5 | 84 |
| Σ21Π | άμμος χονδρόκοκκη | 84 | 88 |
| Σ21Π | άργιλος με λεπτόκοκκη άμμο | 88 | 91,06 |
| Σ21Π | άμμος χονδρόκοκκη | 91,06 | 103,6 |
| Σ21Π | άργιλος με μικρή ποσότητα λεπτόκοκκου άμμου | 103,6 | 122 |
| Σ21Π | άμμος χονδρόκοκκη με χαλίκια | 122 | 128 |
| Σ21Π | άργιλος | 128 | 130 |
| Σ21Π | χαλίκια με κόκκινη άργιλο | 130 | 146 |
| Σ21Π | χάλικες με χονδρόκοκκη άμμο | 146 | 154 |
| Σ21Π | άργιλος | 154 | 160 |

**ΓΕΩΤΡΗΣΗ Σ21Ν**

| ΟΝΟΜΑ | ΥΛΙΚΟ | ΑΡΧΗ (m) | ΤΕΛΟΣ (m) |
|---|---|---|---|
| Σ21Ν | αργιλοϊλύς | 0 | 2 |
| Σ21Ν | άμμος λεπτόκοκκη | 2 | 6 |
| Σ21Ν | πηλός με απολιθώματα | 6 | 12 |
| Σ21Ν | χαλίκια, άμμοι | 12 | 14 |
| Σ21Ν | πηλός με απολιθώματα | 14 | 40 |
| Σ21Ν | αμμοχάλικα με εναλλαγές πηλού | 40 | 42 |
| Σ21Ν | πηλός | 42 | 46 |
| Σ21Ν | άργιλος και μαύροι πηλοί | 46 | 50 |
| Σ21Ν | άργιλοι,χαλίκια και πηλοί | 50 | 56 |
| Σ21Ν | πηλός με απολιθώματα | 56 | 68 |
| Σ21Ν | χαλίκια, άμμοι | 68 | 70 |
| Σ21Ν | άργιλος και πηλοί | 70 | 74 |
| Σ21Ν | άμμος χονδρόκοκκη με πηλούς | 74 | 82 |
| Σ21Ν | άμμος χονδρόκοκκη | 82 | 96 |
| Σ21Ν | χαλίκια με απολιθώματα | 96 | 104 |
| Σ21Ν | άργιλος | 104 | 122 |
| Σ21Ν | χαλίκια, άμμοι | 122 | 126 |
| Σ21Ν | άργιλος | 126 | 138 |
| Σ21Ν | χαλίκια, άμμοι | 138 | 142 |
| Σ21Ν | αργιλοάμμος | 142 | 146 |
| Σ21Ν | άργιλοι,χαλίκια | 146 | 154 |
| Σ21Ν | χαλίκια και άργιλος | 154 | 162 |
| Σ21Ν | χαλίκια, άμμοι | 162 | 196 |
| Σ21Ν | χαλίκια, άμμοι με τεφρόλευκες αργίλους | 196 | 220 |

ΓΕΩΤΡΗΣΗ Σ24

| ΟΝΟΜΑ | ΥΛΙΚΟ | ΑΡΧΗ (m) | ΤΕΛΟΣ (m) |
|---|---|---|---|
| Σ24 | φυτική γη | 0 | 2 |
| Σ24 | άργιλος αμμούχος, τεφρά | 2 | 10 |
| Σ24 | άργιλος τεφρά με όστρακα | 10 | 31 |
| Σ24 | χαλίκια και άμμος | 31 | 37 |
| Σ24 | άργιλος καστανή | 37 | 41 |
| Σ24 | άμμος χονδρόκοκκη | 41 | 43 |
| Σ24 | άργιλος καστανή | 43 | 45 |
| Σ24 | άμμος χονδρόκοκκη,ψηφίδες | 45 | 50 |
| Σ24 | άργιλος | 50 | 51 |
| Σ24 | χάλικες, άμμος, ψηφίδες | 51 | 57 |
| Σ24 | άργιλος καστανή | 57 | 63 |
| Σ24 | ιλυόμαργα, όστρακα | 63 | 69 |
| Σ24 | άργιλος | 69 | 72 |
| Σ24 | άργιλος, χαλίκια | 72 | 75 |
| Σ24 | άργιλος | 75 | 81 |
| Σ24 | χαλίκια και άμμος | 81 | 83 |
| Σ24 | άργιλος | 83 | 93 |
| Σ24 | χαλίκια και άμμος | 93 | 95 |
| Σ24 | άργιλος | 95 | 98 |
| Σ24 | χαλίκια και άμμος | 98 | 100 |
| Σ24 | άργιλος | 100 | 104 |
| Σ24 | χαλίκια και άμμος | 104 | 107 |
| Σ24 | άργιλος | 107 | 112 |
| Σ24 | χαλίκια και άμμος | 112 | 115 |
| Σ24 | άργιλος | 115 | 119 |
| Σ24 | χαλίκια και άμμος | 119 | 123 |
| Σ24 | άργιλος καστανή | 123 | 133 |
| Σ24 | κροκάλες,χαλίκια,άμμος | 133 | 140 |
| Σ24 | άργιλος | 140 | 143 |
| Σ24 | κροκάλες,χαλίκια,άμμος | 143 | 146 |
| Σ24 | άργιλος | 146 | 148 |
| Σ24 | κροκάλες, χαλίκια, ψηφίδες | 148 | 155 |
| Σ24 | άργιλος, κροκάλες | 155 | 161 |
| Σ24 | κροκάλες, χαλίκια, ψηφίδες | 161 | 179 |
| Σ24 | άργιλος, κροκάλες | 179 | 189 |
| Σ24 | άργιλος αμμούχος | 189 | 192 |
| Σ24 | χαλίκια και άμμος | 192 | 195 |
| Σ24 | άργιλος | 195 | 210 |

ΓΕΩΤΡΗΣΗ Σ26Ν

| ΟΝΟΜΑ | ΥΛΙΚΟ | ΑΡΧΗ (m) | ΤΕΛΟΣ (m) |
|---|---|---|---|
| Σ26Ν | αργιλοπηλιτικά | 0 | 14 |
| Σ26Ν | αργιλοϊλύς: με μαύρους πηλούς | 14 | 38 |
| Σ26Ν | χαλίκια με απολιθώματα | 38 | 42 |
| Σ26Ν | αργιλοπηλιτικά | 42 | 70 |
| Σ26Ν | χαλίκια και άμμος | 70 | 76 |
| Σ26Ν | χαλίκια και άμμος με ορίζοντες μαύρων πηλών | 76 | 80 |
| Σ26Ν | χαλίκια και άμμος | 80 | 90 |
| Σ26Ν | άργιλος, χαλίκια | 90 | 102 |
| Σ26Ν | χαλίκια και άμμος | 102 | 116 |
| Σ26Ν | άργιλος, χαλίκια | 116 | 126 |
| Σ26Ν | χάλικες | 126 | 134 |
| Σ26Ν | άργιλος με λίγα χαλίκια | 134 | 160 |
| Σ26Ν | χαλίκια και άμμος | 160 | 170 |
| Σ26Ν | άργιλος | 170 | 174 |
| Σ26Ν | χαλίκια και άμμος | 174 | 180 |
| Σ26Ν | κροκάλες, χαλίκια, άργιλος | 180 | 210 |

ΓΕΩΤΡΗΣΗ Σ31

| ΟΝΟΜΑ | ΥΛΙΚΟ | ΑΡΧΗ (m) | ΤΕΛΟΣ (m) |
|---|---|---|---|
| Σ31 | αμμοάργιλος | 0 | 30 |
| Σ31 | χαλίκια | 30 | 42 |
| Σ31 | άργιλος | 42 | 48 |
| Σ31 | χαλίκια, άργιλος | 48 | 54 |
| Σ31 | άργιλος | 54 | 61 |
| Σ31 | χαλίκια | 61 | 67 |
| Σ31 | αργιλοάμμος | 67 | 74 |
| Σ31 | χαλίκια | 74 | 99 |
| Σ31 | άργιλος | 99 | 117 |
| Σ31 | χαλίκια | 117 | 123 |
| Σ31 | άργιλος | 123 | 135 |
| Σ31 | χαλίκια, άμμος | 135 | 148 |
| Σ31 | άργιλος | 148 | 153 |
| Σ31 | χαλίκια | 153 | 166 |
| Σ31 | άργιλος | 166 | 175 |

**ΓΕΩΤΡΗΣΗ Σ33**

| ΟΝΟΜΑ | ΥΛΙΚΟ | ΑΡΧΗ (m) | ΤΕΛΟΣ (m) |
|---|---|---|---|
| Σ33 | φυτική γη | 0 | 2 |
| Σ33 | κροκάλες,χαλίκια,άμμος | 2 | 6 |
| Σ33 | άργιλος γκρι έως φαιοπράσινη | 6 | 12 |
| Σ33 | άμμος λεπτόκοκκη με λεπτές στρώσεις αργίλου και κελύφη οστράκων | 12 | 46 |
| Σ33 | άμμος χονδρόκοκκη με λεπτές στρώσεις αργίλου και κελύφη οστράκων | 46 | 83,7 |
| Σ33 | ψαμμίτης σκληρός και χαλαζιακός | 83,7 | 88,2 |
| Σ33 | κροκάλες,χαλίκια,άμμος | 88,2 | 90,2 |
| Σ33 | ψαμμίτης σκληρός και χαλαζιακός | 90,2 | 101 |
| Σ33 | άργιλος γκρι | 101 | 114 |
| Σ33 | ψαμμίτης αδρόκοκκος σκληρός και χαλαζιακός | 114 | 119 |
| Σ33 | άργιλος γκρι | 119 | 121,8 |
| Σ33 | ψαμμίτης αδρόκοκκος σκληρός και χαλαζιακός | 121,8 | 125,2 |
| Σ33 | άργιλος γκρι | 125,2 | 126,3 |
| Σ33 | ψαμμίτης αδρόκοκκος σκληρός και χαλαζιακός | 126,3 | 138 |
| Σ33 | άμμος λεπτόκοκκη | 138 | 144,2 |
| Σ33 | ψαμμίτης λεπτόκοκκος σκληρός και χαλαζιακός με στρώσεις κροκαλοπαγών | 144,2 | 160 |
| Σ33 | άργιλος γκρι | 160 | 162,1 |
| Σ33 | ψαμμίτης λεπτόκοκκος σκληρός και χαλαζιακός με στρώσεις κροκαλοπαγών | 162,1 | 196 |
| Σ33 | άργιλος γκρι | 196 | 198 |
| Σ33 | ψαμμίτης λεπτόκοκκος σκληρός και χαλαζιακός με στρώσεις κροκαλοπαγών | 198 | 230 |

ΓΕΩΤΡΗΣΗ Σ34

| ΟΝΟΜΑ | ΥΛΙΚΟ | ΑΡΧΗ (m) | ΤΕΛΟΣ (m) |
|---|---|---|---|
| Σ34 | φυτική γη | 0 | 2 |
| Σ34 | άμμος λεπτόκοκκη | 2 | 48 |
| Σ34 | άργιλος πράσινη με κελύφη οστράκων και λεπτές στρώσεις άμμου | 48 | 52 |
| Σ34 | άμμος λεπτόκοκκη | 52 | 54 |
| Σ34 | άργιλος πράσινη με κελύφη οστράκων | 54 | 57 |
| Σ34 | άμμος λεπτόκοκκη | 57 | 58,5 |
| Σ34 | άργιλος πράσινη | 58,5 | 62 |
| Σ34 | άμμος χονδρόκοκκη με κελύφη οστράκων | 62 | 80 |
| Σ34 | άργιλος πράσινη | 80 | 84,5 |
| Σ34 | άμμος λεπτόκοκκη, άργιλος | 84,5 | 101 |
| Σ34 | άργιλος φαιοπράσινη | 101 | 112 |
| Σ34 | άμμος λεπτόκοκκη, άργιλος | 112 | 120,5 |
| Σ34 | άργιλος φαιοπράσινη με λεπτές στρώσεις άμμου | 120,5 | 128 |
| Σ34 | άμμος χονδρόκοκκη | 128 | 136 |
| Σ34 | άργιλος φαιοπράσινη | 136 | 137,8 |
| Σ34 | ψαμμίτης χαλαζιακός λεπτόκοκκος σκληρός | 137,8 | 139,8 |
| Σ34 | άργιλος φαιοπράσινη με λεπτές στρώσεις άμμου | 139,8 | 154 |
| Σ34 | ψαμμίτης χαλαζιακός λεπτόκοκκος σκληρός | 154 | 156 |
| Σ34 | αμμοάργιλος | 156 | 158 |
| Σ34 | ψαμμίτης χαλαζιακός μεσο-λεπτόκοκκος με χαλαζιακά κροκαλοπαγή | 158 | 184 |
| Σ34 | αμμοάργιλος | 184 | 185,5 |
| Σ34 | ψαμμίτης χαλαζιακός μεσο-λεπτόκοκκος με χαλαζιακά κροκαλοπαγή | 185,5 | 230 |

**ΓΕΩΤΡΗΣΗ Σ35**

| ΟΝΟΜΑ | ΥΛΙΚΟ | ΑΡΧΗ (m) | ΤΕΛΟΣ (m) |
|---|---|---|---|
| Σ35 | άμμος χονδρόκοκκη | 0 | 2 |
| Σ35 | πηλός | 2 | 8 |
| Σ35 | άμμος χονδρόκοκκη με θραύσματα απολιθωμάτων | 8 | 26 |
| Σ35 | πηλός | 26 | 28 |
| Σ35 | πηλός με άμμο και απολιθώματα | 28 | 40 |
| Σ35 | πηλός | 40 | 46 |
| Σ35 | άμμος με φυτικά απολιθώματα | 46 | 50 |
| Σ35 | άμμος,χαλίκια με απολιθώματα | 50 | 52 |
| Σ35 | άμμος | 52 | 70 |
| Σ35 | πηλός με άμμο και απολιθώματα | 70 | 124 |
| Σ35 | αργιλοάμμος | 124 | 142 |
| Σ35 | άργιλος καφέ | 142 | 160 |
| Σ35 | αμμοάργιλος | 160 | 168 |
| Σ35 | αργιλοάμμος | 168 | 176 |
| Σ35 | άμμος χονδρόκοκκη,ψηφίδες,χάλικες | 176 | 194 |
| Σ35 | άργιλος | 194 | 196 |
| Σ35 | αμμοάργιλος | 196 | 206 |
| Σ35 | άργιλος μαργαϊκή με άμμο | 206 | 216 |
| Σ35 | άμμος, χαλίκια | 216 | 222 |
| Σ35 | άμμος τεφρή | 222 | 224 |