

---

**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**



**Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών**

Τομέας Γεωλογικών Επιστημών

Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας & Υδρογεωλογίας

---

---

**Προσομοίωση και βέλτιστη διαχείριση παράκτιων  
υπόγειων υδατικών συστημάτων**

Διδακτορική Διατριβή

**Μάρθα Περδικάκη**

Μηχανικός Μεταλλείων-Μεταλλουργός, Ε.Μ.Π.  
MSc Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων, Ε.Μ.Π.

---

Αθήνα, Ιούνιος 2022



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών**

Τομέας Γεωλογικών Επιστημών

Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας & Υδρογεωλογίας

**Προσομοίωση και βέλτιστη διαχείριση παράκτιων υπόγειων υδατικών  
συστημάτων**

Διδακτορική Διατριβή

**Μάρθα Περδικάκη**

Μηχανικός Μεταλλείων-Μεταλλουργός, Ε.Μ.Π.  
MSc Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων, Ε.Μ.Π.

**Τριμελής Συμβουλευτική επιτροπή:**

Ανδρέας Καλλιώρας, Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π. (Επιβλέπων)

Γεώργιος Καρατζάς, Καθηγητής Πολυτεχνείου Κρήτης

Χρήστος Μακρόπουλος, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

**Επταμελής εξεταστική επιτροπή:**

Ανδρέας Καλλιώρας

Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π. (Επιβλέπων)

Γεώργιος Καρατζάς

Καθηγητής Πολυτεχνείου Κρήτης

Χρήστος Μακρόπουλος

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Δημήτριος Δαμίγος

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Βασίλειος Τσιχριντζής

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Φώτιος- Κωνσταντίνος Πλιάκας

Καθηγητής Δ.Π.Θ.

Κωνσταντίνος Κατσιφαράκης

Καθηγητής Α.Π.Θ

Η έγκριση της διδακτορικής διατριβής από την Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει αποδοχή των γνωμών του συγγραφέα (Ν. 5343/1932, Άρθρο 202).

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η διαφύλαξη και η βιώσιμη χρήση του γλυκού νερού είναι πλέον αναγκαία, σε μία εποχή που χαρακτηρίζεται από κατασπατάληση των φυσικών πόρων. Οι υδροφόροι σχηματισμοί αποτελούν σημαντική ανανεώσιμη πηγή -δυναμικά- πόσιμου νερού, ιδιαίτερα στις παράκτιες ζώνες όπου πολλές φορές αποτελούν και τη μοναδική πηγή γλυκού νερού. Στόχος της παρούσας διατριβής είναι η συμβολή στην επιστήμη στο αντικείμενο της διαχείρισης των υπόγειων υδατικών πόρων παράκτιων υδροφορέων μέσω καινοτόμων τεχνικών μοντελοποίησης και προσομοίωσης: (α) αναπτυγμένων τεχνολογιών Διαχείρισης Εμπλουτισμού των Υδροφορέων για την ανάσχεση της θαλάσσιας διείσδυσης και (β) συμμετοχικών διαδικασιών των εμπλεκόμενων φορέων και χρηστών υπόγειου νερού.

Η παρούσα διδακτορική διατριβή πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας & Υδρογεωλογίας της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Μέρος της έρευνας χρηματοδοτήθηκε από το Ερευνητικό Έργο SUBSOL: bringing coastal SUBsurface water SOLutions to the market” (EU Horizon 2020 Research Programme, 2015-2018) και εν μέρει μέσω υποτροφίας του Ειδικού Λογαριασμού Κονδυλίων Έρευνας του Ιδρύματος- Ε.Λ.Κ.Ε ΕΜΠ.

Η διεξαγωγή και ολοκλήρωση της εν λόγω έρευνας δεν θα ήταν εφικτή χωρίς την ουσιαστική συμβολή ορισμένων ανθρώπων, τόσο σε επαγγελματικό όσο και προσωπικό επίπεδο.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή κο. Ανδρέα Καλλιώρα, Αναπληρωτή Καθηγητή Ε.Μ.Π., για την καθοδήγηση, την υπομονή του και την εμπιστοσύνη που μου έδειξε κατά τη διάρκεια της πολυετούς συνεργασίας μας. Ευχαριστώ πολύ τα μέλη της συμβουλευτικής επιτροπής κο. Χρήστο Μακρόπουλο, Καθηγητή Ε.Μ.Π. και τον κο. Γεώργιο Καρατζά, Καθηγητή Πολ. Κρήτης, για τη συμβολή τους στον έλεγχο και την αξιολόγηση της διατριβής και για τα εύστοχα σχόλια τους που συνετέλεσαν στη βελτίωση της. Ευχαριστώ ακόμη τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής κο. Κωνσταντίνο Κατσιφαράκη, Καθηγητή Α.Π.Θ., κο. Βασίλειο Τσιχριντζή, Καθηγητή Ε.Μ.Π., κο. Φώτιο-Κωνσταντίνο Πλιάκα, Καθηγητή Δ.Π.Θ. και κο. Δημήτριο Δαμίγο, Καθηγητή Ε.Μ.Π., τόσο για το χρόνο που αφιέρωσαν αλλά και για τις παρατηρήσεις τους που βελτίωσαν περαιτέρω το περιεχόμενο της διδακτορικής διατριβής.

Η παρούσα διατριβή δεν θα είχε ολοκληρωθεί χωρίς την συμβολή των μελών του Εργαστηρίου Τεχνικής Γεωλογίας & Υδρογεωλογίας. Ευχαριστώ την κα. Ελένη Βασιλείου και τον κο. Κωνσταντίνο Μαρκαντώνη (Ε.Δ.Ι.Π. του Τομέα Γεωλογικών Επιστημών) για τις συμβουλές και τη βοήθεια τους όλα αυτά τα χρόνια. Ευχαριστώ πάρα πολύ την ομάδα Υ.Δ. που δημιουργήσαμε με την Έφη Ζαβρίδου, τον Αλέξανδρο Παπαδόπουλο και τον Αναστάσιο Μητρόπαπα για την πολύτιμη αλληλοϋποστήριξη και αλληλοβοήθεια αλλά και το Διδάκτορα Χρήστο Πουλιάρη για την πολύχρονη συνεργασία μας και την ουσιαστική βοήθειά του.

Ευχαριστώ πολύ τον κο. Κλεισθένη Δημητριάδη, τον κο. Νικόλαο Καραλέμα, την κα. Κλειώ Μονοκρούσου, το κο. Δημήτρη Ιωσηφίδη και όλη την ομάδα που εργάστηκε στα πλαίσια του προγράμματος

SUBSOL, για την κατασκευή της πιλοτικής εφαρμογής Τεχνητού Εμπλουτισμού στον Σχινιά και τη διενέργεια των πειραμάτων μέσω των οποίων καθορίστηκε μεγάλο μέρος της καινοτομίας της διατριβής.

Σε προσωπικό επίπεδο, ευχαριστώ τους στενούς μου φίλους για την ψυχολογική υποστήριξη που μου προσέφεραν, απαραίτητο στοιχείο για την διεξαγωγή του διδακτορικού. Τέλος, ευχαριστώ πάρα πολύ τους γονείς μου Γιώργο, Γεωργία και την αδερφή μου Ειρήνη για την πολυεπίπεδη υποστήριξη και καθοδήγηση τους.

## ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ

Μέρος της παρούσας έρευνας έχει συμπεριληφθεί στις παρακάτω επιστημονικές δημοσιεύσεις:

### Επιστημονικά περιοδικά

- Perdikaki, M., Makropoulos, C. and Kallioras, A., 2022. Participatory groundwater modeling for managed aquifer recharge as a tool for water resources management of a coastal aquifer in Greece. *Hydrogeology Journal*, 30(1), pp.37-58.
- Perdikaki, M., Pouliaris, C., Makropoulos, C. and Kallioras, A., 2022. Simulation of horizontal injection wells in Managed Aquifer Recharge facilities using the conduit flow process (CFP) code for MODFLOW-2005. *Environmental Modelling & Software*, 148, p.105289.
- Perdikaki, M., Manjarrez, R.C., Pouliaris, C., Rossetto, R., Kallioras, A., 2020. Free and open-source GIS-integrated hydrogeological analysis tool: an application for coastal aquifer systems. *Environmental Earth Sciences*, 79(14), pp.1-16.
- Perdikaki, M., Pouliaris, C., Borsi, I., Rossetto, R. and Kallioras, A., 2017. Management of coastal hydrosystems through the application of free and open-source software tool FREEWAT. *European Water*, 57, 383-388.

### Διεθνή συνέδρια

- Perdikaki, M., Kallioras, A., Makropoulos, C. and Dimitriadis, K., 2019. Conceptualization and Simulation of an Integrated Pump&Treat and Aquifer Storage and Recovery (ASR) pilot scheme in a saline aquifer. 11th World Congress on Water Resources and Environment (EWRA 2019) "Managing Water Resources for a Sustainable Future", Madrid, Spain, 25-29 June 2019, pp. 405-406.
- Perdikaki M., Kallioras A., Monokrousou K., Christoforidis C., Iossifidis D., Bizani E., Zafeiropoulos A., Dimitriadis K., Raat K., van den Berg G., Makropoulos C. (2018). Integrated subsurface water solutions for coastal wetland restoration through integrated pump&treat and aquifer storage and recovery (ASR). *Multidisciplinary Digital Publishing Institute Proceedings*, 2(11):665.
- Perdikaki M., Floros E., Karalemas N. and Kallioras A., 2017. Seawater intrusion investigations in the mediterranean coastal hydrosystem of Marathon, Greece. *Proceedings of the 11th International Hydrogeological Congress of the Hellenic Hydrogeological Committee of the Geological Society of Greece*, 8-10/10/2014, Thessaloniki, Greece, pp. 405-412.

## ΕΚΤΕΝΗΣ ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η διαχείριση των διαθέσιμων υδατικών αποθεμάτων των παράκτιων υδροφορέων αποτελεί πρόκληση για τους επιστήμονες και τους μηχανικούς, καθώς η ιδιαιτερότητα τέτοιων συστημάτων έγκειται στην υδραυλική τους επικοινωνία με τη θάλασσα, ενώ ταυτόχρονα επιβαρύνονται με εκτεταμένες και ανεξέλεγκτες αντλήσεις για αρδευτικούς και άλλους σκοπούς. Για να αντιμετωπιστεί αυτό, οι τεχνικές Διαχείρισης του Εμπλουτισμού των Υδροφορέων έχουν αποδειχτεί ως μια αποτελεσματική τεχνολογία που μπορεί να καλύψει το κενό μεταξύ προσφοράς και ζήτησης υπογείου νερού. Βασικό και αναγκαίο μέρος της διαδικασίας είναι η υδρογεωλογική και υδρολογική έρευνα προκειμένου να αναγνωριστούν τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά, η τρέχουσα κατάσταση και οι διαδικασίες επαναπλήρωσης και εκφόρτισης του υδροφορέα με στόχο την ανάπτυξη του εννοιολογικού μοντέλου του συστήματος. Αναπόσπαστο κομμάτι του σχεδιασμού διαχείρισης είναι η ανάπτυξη αξιόπιστου μαθηματικού μοντέλου υπόγειας ροής που προσομοιώνει αποτελεσματικά τις σχετικές υδρολογικές διεργασίες. Μέσω της μαθηματικής προσομοίωσης είναι δυνατό να προβλεφθεί η απόκριση του συστήματος σε μελλοντικές ή υποθετικές διαφορετικές φυσικές ή ανθρωπογενείς διεργασίες και πιέσεις.

Η παραπάνω μεθοδολογία εφαρμόστηκε στο παράκτιο πεδινό πεδίο του Μαραθώνα, όπου οι υδρογεωλογικές συνθήκες της περιοχής συνθέτουν ένα τυπικό Μεσογειακό φυσικό υδροσύστημα. Ο προσχωματικός υδροφορέας των αλλουβιακών αποθέσεων εναποτίθεται στο καρστικό βύθισμα της πεδιάδας με υποκείμενο και περιβάλλοντα σχηματισμό καρστικού υδροφορέα. Μέσα από εκτενή έρευνα γραφείου και πεδίου καθώς επίσης και μέσω της παρακολούθησης του υδροφόρου συστήματος του Μαραθώνα (βιβλιογραφική έρευνα, έρευνα πεδίου, ποσοτικές και ποιοτικές μετρήσεις υπόγειων νερών), αποσαφηνίστηκαν η υδραυλική συμπεριφορά του προσχωματικού υδροφορέα και η αλληλεπίδραση του με τον καρστικό υδροφορέα και τη θάλασσα. Μέσω του εννοιολογικού μοντέλου καθορίστηκαν τα υδραυλικά και υδρογεωλογικά όρια, η υδροδυναμική συμπεριφορά των υδροφορέων και η οικολογική κατάσταση του υδροφόρου συστήματος. Η φυσική τροφοδοσία του προσχωματικού υδροφορέα και τα επί μέρους στοιχεία του υδρολογικού ισοζυγίου υπολογίστηκαν μέσω υδρολογικών μεθόδων. Οι μετρήσεις στάθμης και οι χημικές αναλύσεις υπόγειου νερού από γεωτρήσεις της περιοχής επιβεβαίωσαν παλαιότερες μελέτες για υφαλμύριση των δύο υδροφορέων (προσχωματικός και καρστικός) εξαιτίας της θαλάσσιας διείσδυσης. Το φαινόμενο παρατηρείται εντονότερα στον υπερκείμενο προσχωματικό σχηματισμό ενώ οι περισσότεροι πληγείς περιοχές βρίσκονται κατά μήκος της ακτογραμμής και σε εκτάσεις που υπάρχει έντονη αγροτική δραστηριότητα.

Μία πιλοτική εγκατάσταση Τεχνητού Εμπλουτισμού - Τ.Ε, κατασκευάστηκε και δοκιμάστηκε στην περιοχή του Σχινιά προκειμένου να αντιμετωπιστούν ζητήματα ποσότητας και ποιότητας του υπογείου νερού στην περιοχή μελέτης. Η πειραματική διάταξη περιλαμβάνει: (α) σύστημα άντλησης νερού από το βαθύτερο καρστικό σχηματισμό ως βασική πηγή νερού εμπλουτισμού της εγκατάστασης Τ.Ε., (β) αποκεντρωμένο υβριδικό σύστημα κατάλληλης επεξεργασίας μέσω Αντίστροφης Όσμωσης (reverse



osmosis) και Προηγμένων Διεργασιών Οξειδωσης (advanced oxidation) για την αφαλάτωση και την απομάκρυνση αγροχημικών ρύπων αντίστοιχα, και (γ) σύστημα άντλησης και εμπλουτισμού του προσχωματικού υδροφορέα μέσω οριζόντιας κατευθυνόμενης (Horizontal Directional Drilled Well) και κατακόρυφων γεωτρήσεων πολλαπλού βάθους. Ο κύριος στόχος της πιλοτικής εγκατάστασης ήταν η βελτίωση της ποιότητας και της ποσότητας του υπογείου νερού για την αντιμετώπιση της θαλάσσιας διείσδυσης.

Η μελλοντική επίδραση των εγκαταστάσεων T.E. μπορεί να προβλεφθεί μέσω της εφαρμογής μαθηματικών μοντέλων που είναι σε θέση να προσομοιώνουν αποτελεσματικά τις σχετικές υδρολογικές διεργασίες μεταξύ του υδροφορέα και κάθε διαφορετικής μεθόδου T.E.. Η οριζόντια γεώτρηση εμπλουτισμού που ορύχθηκε στην εγκατάσταση του Κωπηλατοδρομίου Σχινιά, προσομοιώθηκε με πεπερασμένες διαφορές με τη χρήση του κώδικα MODFLOW-CFP, ο οποίος χρησιμοποιείται για ροή σε πορώδη μέσα (πρωτογενές και δευτερογενές πορώδες – πορώδες διάλυσης) για την προσομοίωση δικτύων καρστικών αγωγών. Για να διερευνηθεί περαιτέρω η δυνατότητα εφαρμογής του κώδικα CFP, η οριζόντια γεώτρηση προσομοιώθηκε ακόμη με το απλούστερο πακέτο WEL του MODFLOW-2005, συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των δύο προσομοιώσεων. Για τα δύο μοντέλα, διεξήχθη ανάλυση ευαισθησίας και βαθμονόμηση μέσω του κώδικα UCODE\_2014, χρησιμοποιώντας πειραματικά δεδομένα από την εγκατάσταση T.E. του πιλοτικού συστήματος του Σχινιά. Και τα δύο μοντέλα βαθμονομήθηκαν με επιτυχία καθώς οι προσομοιωμένες τιμές επέδειξαν αποδεκτή προσαρμογή στα παρατηρούμενα δεδομένα. Η κύρια διαφορά μεταξύ των δύο πακέτων εντοπίστηκε στην άνοδο της στάθμης των υπόγειων νερών κατά μήκος της οριζόντιας γεώτρησης. Βάσει των αποτελεσμάτων, αποδείχτηκε ότι το πακέτο CFP παράγει μια πιο ρεαλιστική αναπαράσταση της οριζόντιας γεώτρησης εμπλουτισμού.

Η βιβλιογραφική έρευνα και τμήμα της έρευνας πεδίου αποτέλεσαν τη βάση για τον καθορισμό των οριακών συνθηκών, των εισροών/εκροών του υπό εξέταση υδροφόρου στρώματος και τη γενικότερη κατασκευή του μαθηματικού μοντέλου του πεδινού τμήματος του Μαραθώνα. Οι υδρογεωλογικές και υδρολογικές μετρήσεις τροφοδότησαν με δεδομένα την κατασκευή του μαθηματικού μοντέλου ώστε στη συνέχεια να πραγματοποιηθεί με επιτυχία η προσομοίωση του προσχωματικού υδροφορέα. Η υπόγεια ροή προσομοιώθηκε με τον κώδικα MODFLOW-2005 ενώ πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας και βαθμονόμηση των παραμέτρων του μοντέλου με τον κώδικα UCODE\_2014. Τα αποτελέσματα της διαδικασίας υπολογισμού παραμέτρων του UCODE\_2014 αξιολογήθηκαν βάσει του διαγράμματος παρατηρημένων-προσομοιωμένων τιμών και θεωρήθηκαν αποδεκτά. Η απόδοση του μοντέλου αποτυπώνεται και στις προσομοιωμένες ισοπιεζομετρικές καμπύλες όπως προέκυψαν από τα αποτελέσματα του μοντέλου για χαρακτηριστικές περιόδους φόρτισης κατά τη σύγκριση τους με την πιεζομετρία που προέκυψε από μετρήσεις υπαίθρου για τις αντίστοιχες περιόδους. Μέσω της σύγκρισης φαίνεται ότι το μοντέλο μπορεί να προβλέψει με ακρίβεια την ανύψωση της στάθμης των υπόγειων νερών του υδροφορέα κατά τη χειμερινή περίοδο καθώς και την απόκριση του συστήματος στις έντονες αντλήσεις και τη μείωση της φυσικής τροφοδοσίας. Κατά την ίδια περίοδο μπορεί να αποτυπώσει τους κώνους πτώσης

στάθμης που δημιουργούνται εξαιτίας των έντονων αντλήσεων καθιστώντας το αξιόπιστο εργαλείο για την πρόβλεψη της ποσοτικής κατάστασης των υπογείων νερών.

Η προσομοίωση της ροής μεταβαλλόμενης πυκνότητας και μεταφοράς μάζας για το πεδινό τμήμα του Μαραθώνα πραγματοποιήθηκε με τον κώδικα SEAWAT v4. Οι παράμετροι που υπολογίστηκαν κατά τη βαθμονόμηση της ροής με τον κώδικα UCODE\_2014 χρησιμοποιήθηκαν για το μοντέλο μεταβαλλόμενης πυκνότητας. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης έδειξαν αποδεκτή απόκλιση παρατηρημένων-προσομοιωμένων τιμών. Τα στατιστικά στοιχεία των διαφορών αυτών σε σχέση με τα αντίστοιχα της προσομοίωσης με τον κώδικα MODFLOW-2005, έδειξαν καλύτερη προσαρμογή των προσομοιωμένων τιμών υδραυλικού φορτίου στις μετρημένες. Συμπερασματικά, αποδεικνύεται ότι για την περίπτωση του Μαραθώνα η ροή προσομοιώνεται καλύτερα συμπεριλαμβάνοντας τη μεταβαλλόμενη πυκνότητα. Μετά από χειροκίνητη βαθμονόμηση των μεταβλητών του πορώδους ( $n$ ) και της κατά μήκος διασποράς ( $\alpha_L$ ) με δεδομένα χημικών αναλύσεων από γεωτρήσεις της περιοχής, αποδείχθηκε ότι η τελευταία παράμετρος δεν επηρεάζει σημαντικά τα αποτελέσματα συγκέντρωσης TDS στον σχηματισμό ενώ μεγαλύτερη επίδραση στο αποτέλεσμα έχει το πορώδες. Η έκταση της ζώνης υφαλμύρισης αυξάνεται προς την ενδοχώρα στην περιοχή των χαμηλών υδραυλικών φορτίων. Το μήκος της ζώνης, επηρεάζεται άμεσα και από την υδραυλική αγωγιμότητα του υδροφορέα καθώς η ζώνη ανάμιξης προχωράει με χαμηλότερους ρυθμούς προς την ενδοχώρα, όταν συναντάται η ζώνη αργίλου-ιλύος χαμηλότερης αγωγιμότητας, αποκλίνοντας έτσι από το τυπικό σχήμα της ζώνης ανάμιξης.

Για την βέλτιστη διαχείριση του υπογείου νερού του Μαραθώνα πραγματοποιήθηκε η διαδικασία της συμμετοχικής μοντελοποίησης. Ο κύριος στόχος της μελέτης ήταν να εντοπίσει το κυρίαρχο πρόβλημα στη διαχείριση του υπόγειου συστήματος στην περιοχή και η εύρεση μίας εφικτής λύσης διαχείρισης, όπως αυτά υπαγορεύτηκαν από τα ενδιαφερόμενα μέρη. Τα αποτελέσματα του συμμετοχικού εργαστηρίου που πραγματοποιήθηκε στον Μαραθώνα χρησιμοποιήθηκαν για τη σύνθεση μιας σειράς εναλλακτικών σεναρίων εφαρμογής T.E. σε συνδυασμό με τις ανάγκες κάθε ομάδας ενδιαφερομένων. Η αξιολόγηση των σεναρίων μοντελοποίησης βασίστηκε στις απόψεις και τις ανάγκες των διαφόρων ενδιαφερομένων μέσω της δημιουργίας ενός δείκτη αξιολόγησης βασισμένο στην Αναλυτική Ιεραρχική Διαδικασία (Analytic Hierarchy Process – AHP). Ο δείκτης αποδείχτηκε ένα χρήσιμο εργαλείο για την λήψη αποφάσεων στην διαδικασία συμμετοχικής μοντελοποίησης για να αναδειχθούν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των διαφόρων σεναρίων και να υποστηριχθούν τα ενδιαφερόμενα μέρη στη διαδικασία λήψης αποφάσεων. Ο δείκτης κατέδειξε ότι η εγκατάσταση μικρών μονάδων T.E. θα μπορούσε άμεσα να αντιμετωπίσει το βασικό πρόβλημα της περιοχής, δηλαδή την αυξημένη αλατότητα του υπόγειου νερού.

## EXTENDED ABSTRACT

Groundwater management of coastal aquifers is a scientific and engineering challenge, as coastal aquifer systems are hydrogeologic features that are hydraulically connected with the sea while at the same time are stressed with extensive exploitation for irrigation. To remedy this, Managed Aquifer Recharge (MAR) is proved to be a sound and effective technology that is able to fill the gap between groundwater supply and demand. Essential part of this procedure is the identification of specific hydrogeological characteristics, hydrologic processes and the ecological status of the aquifer through field and desk studies. The main aim of this procedure is the construction of the conceptual model. An important part of the groundwater management process is a reliable groundwater model that simulates effectively all involved hydrologic processes in order to be able to predict the response of the system under different natural or artificially induced conditions.

The aforementioned framework was applied to the coastal field of Marathon, Attica, Greece. The hydrogeological system of Marathon, forms a typical coastal Mediterranean hydro-system. The alluvial aquifer of the area is formed on the top of karstified marbles. The hydrodynamic conditions of the alluvial unit and its interaction with the karstified marble and the sea was specified through field and desk investigation that conducted in Marathon plain. The research involved a review of past scientific/technical reports, field work and establishment of a monitoring network of multiple wells/ drills in the area. Through this work, the conceptual model of the alluvial aquifer of Marathon was constructed. Water balance components, including groundwater natural recharge, were estimated employing various hydrological approaches. The extensive problem of seawater intrusion in both groundwater formations (alluvial and karstified) was confirmed through water level and hydrochemical measurements. Seawater intrusion is more pronounced in the alluvial aquifer while the most affected areas are located close to the coast as well as at areas of extended agricultural activity where local cones of depression are formed.

A complex pilot MAR scheme was designed, developed, installed and tested in order to mitigate groundwater quantity and quality issues in the study area. The experimental pilot site involved an integrated groundwater engineering cluster composed of (a) a system that abstracts groundwater from the deeper karstic aquifer layer that is used as recharge water, (b) a hybrid decentralised treatment system that employed a Reverse Osmosis (RO) unit for desalination of groundwater as well as an Advanced Oxidation Process (AOP) unit for the reduction of agrochemical pollutant loads, and (c) a pumping/injection system that incorporates a Horizontal Directional Drilling Well (HDDW) as well as multi-level vertical wells to conduct the MAR experiment. The main goal of the pilot setup was the improvement of groundwater quality and quantity of the depleted aquifer with respect to the problem of seawater intrusion.

Future impact of such facilities on the local aquifer scale can be predicted through simulation of the hydrological processes that occur during the artificial recharge activities. The application of a modeling tool, for the simulation of the relative hydrologic processes between the open filter pipe of the injection well and

the surrounding aquifer material was performed with the finite difference method. More specifically, a MAR pilot setup with a horizontal direction injection well was simulated with the Conduit Flow Process (CFP) of MODFLOW-2005 code. To evaluate the effectiveness of the simulation with the MODFLOW-CFP code, the HDDW was conceptualized within an additional pilot-scale groundwater flow model using MODFLOW-2005 code and the application of the WEL package, while the results of the two models were qualitatively compared. For the two aforementioned models, sensitivity analysis was conducted using UCODE\_2014, and both models were calibrated successfully as the simulated values showed an acceptable fit to the observed data. The main difference between the two packages was observed in the rise of groundwater level along the horizontal well. To this end, it was indicated that MODFLOW-CFP offered a more realistic representation of the horizontal injection well.

Scientific research was also conducted in the Marathon plain in order to define hydraulic and hydrologic boundary conditions, the main sinks and sources of the alluvial aquifer and to construct the conceptual model of the hydrosystem. Groundwater flow of the alluvial aquifer at the basin scale was simulated with the finite difference method using the MODFLOW-2005 code, while sensitivity analysis and model calibration were performed with the UCODE\_2014 code. Calibration was accomplished as the “observed vs. simulated” diagram presented an acceptable fit of the model results to the observed values. Model performance was also validated by the shape and elevation of piezometric curves produced by the model, compared to piezometric maps with collected field data. Comparison of several piezometric maps proves that the model can accurately predict groundwater level fluctuation during the winter period as well as the response of the system to the intensive pumping and the reduction of the natural groundwater recharge during summertime. During this period, the model captured several cones of depression in areas with extensive agricultural activities. The groundwater flow model of the alluvial aquifer of Marathon plain area is considered to be a reliable tool for predicting the piezometric status of the aquifer throughout the hydrologic year.

The distribution of the seawater intrusion zone within the alluvial aquifer of Marathon was investigated further through mathematical modeling. More specifically, the aforementioned activities involved the construction of a variable density groundwater flow model with the finite difference method using the SEAWAT code. The parametrization process was achieved using the UCODE\_2014 and the results of the simulation showed an acceptable deviation of observed-simulated residuals. Statistical analysis of the observed vs. simulated residuals compared to those produced with MODFLOW-2005 code, produced a better adjustment of the observed vs simulated hydraulic head. The parameters of porosity ( $n$ ) and longitudinal dispersivity ( $\alpha_L$ ) were calibrated manually. TDS concentration was highly affected by the porosity, while longitudinal dispersivity has a minor effect on aquifer’s qualitative status. The extent of the freshwater-saltwater mixing zone increases inland in areas of low piezometric levels, while the extend of the mixing zone is also affected by the hydraulic conductivity of the aquifer. Due to the existence of silty clay zones throughout the whole extent of the aquifer, the mixing zone does not form the typical sharp interface along the whole length of the coastline.

The aforementioned modelling activities were enhanced by the application of a participatory modelling approach that was employed for the advanced groundwater management of the investigated aquifer system. The main objective was to identify the major groundwater problems in the area, from the point of view of the involved stakeholders and to propose a viable groundwater management plan based on their feedback. The participatory approach included several stakeholder groups such as groundwater users, policymakers, environmental groups and other organizations involved in groundwater exploitation within the area. The main environmental problem that was noted by most of the stakeholders was the high salinity of groundwater in Marathon. The outcomes of the participatory workshop were used to generate five different groundwater management scenarios and to promote the application of a managed aquifer recharge (MAR) setup that could be installed in the area. For the assessment of model results, an index was generated based on the Analytic Hierarchy Process – AHP. The main aim of the index was to quantify the advantages and disadvantages of the several scenarios and to support the stakeholders in the decision-making process. The index suggested that the installation of the pilot MAR setup could facilitate salinity reduction in the shallow aquifer of Marathon plain.

## ΠΡΩΤΟΤΥΠΙΑ

- Η διδακτορική έρευνα προσεγγίζει το θέμα της βέλτιστης διαχείρισης των παράκτιων υπόγειων υδροφόρων συστημάτων υπό το πρίσμα της συνδυαστικής εφαρμογής καινοτόμων μεθόδων τεχνητού εμπλουτισμού και εργαλείων προσομοίωσης των σχετικών υδρολογικών διεργασιών.
- Αναφορικά με την πειραματική διάταξη στο πεδίο, πρόκειται για πρωτότυπο σχεδιασμό οριζόντιας γεώτρησης εμπλουτισμού μέσω της οποίας επιτυγχάνεται μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα όσον αφορά στον ρυθμό εισαγωγής νερού εμπλουτισμού.
- Όσον αφορά στην προσομοίωση της οριζόντιας γεώτρησης εμπλουτισμού, χρησιμοποιήθηκε με καινοτόμες τεχνικές ο κώδικας MODFLOW-CFP ο οποίος συγκρινόμενος με τα αποτελέσματα της εφαρμογής του κώδικα MODFLOW-2005, παρήγαγε πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα.
- Σχετικά με την προσομοίωση του υπόγειου υδροφόρου συστήματος της περιοχής έρευνας, επιλέχθηκε η διαδικασία της ρύθμισης του μοντέλου ροής πριν την εκτέλεση των σχετικών κωδίκων μεταφοράς μάζας και μεταβαλλόμενης πυκνότητας, μια διαδικασία η οποία αποδείχτηκε ότι παράγει μεγαλύτερη σύμπτωση μεταξύ των τιμών των υπολογισμένων και μετρημένων υδραυλικών φορτίων.
- Η συνδυαστική εφαρμογή των μοντέλων προσομοίωσης μεθόδων τεχνητού εμπλουτισμού σε συνδυασμό με τον καθορισμό σεναρίων από τους ενδιαφερόμενους μέσω συμμετοχικών διαδικασιών, μετατρέπει το υδρολογικό μοντέλο σε ένα κοινωνικό εργαλείο χρήσιμο για τη βέλτιστη διαχείριση των παράκτιων υδροφόρων συστημάτων.
- Παράχθηκε νέο μεθοδολογικό πλαίσιο πολυκριτήριας ανάλυσης για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων με αποτέλεσμα να επιτυγχάνεται περαιτέρω βελτίωση της συμμετοχικής προσομοίωσης.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	v
ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ.....	vii
ΕΚΤΕΝΗΣ ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	viii
EXTENDED ABSTRACT.....	xi
ΠΡΩΤΟΤΥΠΙΑ.....	xiv
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	xv
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ.....	xix
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ.....	xx
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1 Παράκτια υδροφόρα συστήματα.....	1
1.1.1 Γενικά.....	1
1.1.2 Υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά παράκτιων υδροφορέων.....	2
1.1.3 Θαλάσσια διείσδυση - Παράγοντες και διεργασίες.....	3
1.2 Διαχείριση παράκτιων υδροφορέων- Μεθοδολογία.....	6
1.2.1 Συλλογή πρωτογενών στοιχείων πεδίου και δημιουργία βάσης δεδομένων.....	8
1.2.2 Επεξεργασία, ανάλυση και ερμηνεία δεδομένων.....	9
1.2.3 Εννοιολογικό μοντέλο.....	10
1.2.4 Μαθηματικό μοντέλο προσομοίωσης ροής του υπόγειου νερού.....	11
1.2.5 Θέσπιση διαχειριστικών στόχων.....	18
1.3 Πρακτικές διαχείρισης παράκτιων υδροφορέων.....	18
1.3.1 Διαχειριστικές συνιστώσες.....	18
1.3.2 Μη κατασκευαστικές μέθοδοι.....	19
1.3.3 Κατασκευαστικές μέθοδοι.....	20
1.4.1 Θέματα ποιότητας νερού και πηγές τροφοδοσίας νερού εμπλουτισμού.....	23
1.4.2 Τεχνικές διαχείρισης εμπλουτισμού υδροφορέων.....	24
1.4.3 Παράκτιοι υδροφορείς και διαχείριση εμπλουτισμού των υδροφορέων – Περιπτώσεις μελέτης	30

1.5	Εισαγωγή στην περιοχή έρευνας .....	37
2	ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΡΕΥΝΑΣ ΚΑΙ ΕΡΓΑΣΙΕΣ ΠΕΔΙΟΥ .....	40
2.1	Γεωλογικές συνθήκες .....	40
2.2	Τεκτονισμός.....	44
2.3	Έρευνα πεδίου.....	46
2.4	Το υδροσύστημα του Μαραθώνα.....	48
2.5	Υδροδυναμικές συνθήκες.....	52
2.6	Υδροχημικές συνθήκες.....	55
2.7	Στοιχεία επιφανειακής υδρολογίας .....	65
2.7.1	Υδρομετεωρολογικές συνθήκες.....	65
2.7.2	Εξατμισοδιαπνοή.....	66
2.7.3	Επιφανειακή απορροή .....	68
2.7.4	Φυσική τροφοδοσία υδροφορέα από άμεση κατείσδυση.....	70
2.7.5	Παρατηρήσεις ως προς τη χρήση των μεθοδολογιών υπολογισμού του υδρολογικού ισοζυγίου	72
3	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΣΕ ΠΙΛΟΤΙΚΗ ΚΛΙΜΑΚΑ.....	75
3.1	Εισαγωγή .....	75
3.2	Χωροθέτηση, εγκατάσταση και χαρακτηριστικά της πειραματικής διάταξης στον Μαραθώνα	77
3.2.1	Άντληση νερού εμπλουτισμού .....	78
3.2.2	Υβριδική αποκεντρωμένη μονάδα επεξεργασίας νερού .....	79
3.2.3	Σύστημα γεωτρήσεων εμπλουτισμού .....	79
4	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΡΟΗΣ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΝΕΡΟΥ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑ ΟΡΙΖΟΝΤΙΩΝ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ ΤΕΧΝΗΤΟΥ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΥ.....	82
4.1	Κώδικας προσομοίωσης της οριζόντιας γεώτρησης.....	83
4.2	Προσομοίωση της πειραματικής διάταξης MAR του Σχοινιά .....	85
4.2.1	Εννοιολογικό μοντέλο .....	85
4.2.2	Ανάλυση ευαισθησίας.....	88
4.2.3	Εκτίμηση παραμέτρων και αποτελέσματα μοντέλου .....	91
4.2.4	Ανάλυση της προσομοίωσης οριζοντίων γεωτρήσεων εμπλουτισμού .....	95



5	ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΩΝ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ ΤΟΥ ΠΑΡΑΚΤΙΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΕΡΕΥΝΑΣ .....	99
5.1	Μαθηματικοί Κώδικες.....	99
5.1.1	Προσομοίωση ροής υπόγειου νερού: MODFLOW-2005 .....	99
5.1.2	Προσομοίωση μεταφοράς μάζας: MT3DMS.....	100
5.1.3	Προσομοίωση υπόγειας ροής μεταβαλλόμενης πυκνότητας: SEAWAT.....	101
5.1.4	Ανάλυση ευαισθησίας και βαθμονόμηση του μοντέλου ροής: UCODE_2014.....	102
5.2	Ανάπτυξη και κατασκευή μαθηματικού μοντέλου υπόγειας ροής .....	104
5.2.1	Πλατφόρμα Προσομοίωσης.....	104
5.2.2	Ενεργή περιοχή και χωρική διακριτοποίηση .....	105
5.2.3	Καθορισμός στρωμάτων – Έκταση και κατακόρυφη διακριτοποίηση .....	105
5.2.4	Χρονική διακριτοποίηση .....	106
5.2.5	Οριακές συνθήκες, εισροές και εκροές.....	107
5.2.6	Αρχικές συνθήκες .....	109
5.2.7	Παραμετροποίηση και καθορισμός ζωνών.....	109
5.3	Ανάλυση ευαισθησίας και υπολογισμός παραμέτρων.....	111
5.3.1	Ποιότητα δεδομένων .....	111
5.3.2	Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας .....	112
5.3.3	Βαθμονόμηση μοντέλου και αποτελέσματα προσομοίωσης.....	113
5.3.4	Αθροιστικό ισοζύγιο υπογείου νερού .....	117
5.4	Ανάπτυξη και εφαρμογή μαθηματικού μοντέλου μεταβαλλόμενης πυκνότητας .....	118
5.4.1	Έλεγχος παραμέτρων .....	119
5.4.2	Αποτελέσματα προσομοίωσης.....	121
6	ΣΥΜΜΕΤΟΧΙΚΕΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΕΧΝΗΤΟΥ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΩΝ ΩΣ ΕΡΓΑΛΕΙΟ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΣΕ ΠΑΡΑΚΤΙΟΥΣ ΥΔΡΟΦΟΡΕΙΣ .....	128
6.1	Η χρήση της συμμετοχικής διαδικασίας στη διαχείριση υδατικών πόρων .....	128
6.2	Μεθοδολογική προσέγγιση της συμμετοχικής διαδικασίας στην περιοχή του Μαραθώνα ...	132
6.2.1	Διαδικασία προσομοίωσης .....	132
6.2.2	Κύριοι στόχοι της συμμετοχικής μοντελοποίησης.....	133
6.3	Αποτελέσματα.....	142

## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

---

6.3.1	Διαχειριστικά σενάρια.....	142
6.3.2	Αποτελέσματα σεναρίων.....	143
6.4	Αξιολόγηση αποτελεσμάτων διαχειριστικών σεναρίων .....	146
6.5	Ανάλυση συμμετοχικής μοντελοποίησης στην έρευνα του Μαραθώνα.....	147
7	ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	150
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ .....	153
	Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία.....	153
	Ελληνική βιβλιογραφία.....	173
	Σύνδεσμοι .....	174

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1.1 Μαθηματικοί κώδικες για την προσομοίωση της υπόγειας ροής.....	14
Πίνακας 1.2 Μέθοδοι διαχείρισης του εμπλουτισμού υδροφορέων (Πηγή: <a href="https://inowas.com/category/mar-methods/">https://inowas.com/category/mar-methods/</a> με τροποποιήσεις) .....	26
Πίνακας 2.1 Στατιστικά στοιχεία χημικών αναλύσεων για τον προσχωματικό υδροφορέα.....	61
Πίνακας 2.2 Στατιστικά στοιχεία χημικών αναλύσεων για τον καρστικό υδροφορέα.....	62
Πίνακας 2.3 Αριθμός Καμπύλης (Curve Number, CN) ανά κατηγορία εδάφους.....	70
Πίνακας 2.4 Μαθηματικές σχέσεις για το μοντέλο SMB (Bakundukize et al. 2011, με τροποποιήσεις) .....	71
Πίνακας 4.1 Οριακές συνθήκες μοντέλων “CFP” και “WEL” .....	86
Πίνακας 4.2 Χρονική διακριτοποίηση και είδος ροής των μοντέλων .....	88
Πίνακας 4.3 Παράμετροι για την ανάλυση ευαισθησίας του μοντέλου .....	89
Πίνακας 5.1 Παράμετροι μοντέλου.....	109
Πίνακας 5.2 Τιμές παραμέτρων μετά τη βαθμονόμηση .....	114
Πίνακας 5.3 Παράμετροι προσομοίωσης για το μοντέλο μεταφοράς ρύπου .....	121
Πίνακας 5.4 Μήκος μετώπου υφαλμύρισης.....	122
Πίνακας 6.1 Διμερής σύγκριση για τα τρία κριτήρια .....	140
Πίνακας 6.3 Βαρύτητα κριτηρίων .....	141
Πίνακας 6.4 Αποτελέσματα σεναρίων .....	144

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1.1 Διεργασίες στην παράκτια ζώνη: (a) «πόδι» της θαλάσσιας διείδυσης, (b) κυκλοφορία επηρεαζόμενη από την πυκνότητα στη ζώνη του θαλασσινού νερού, (c) ανεστραμμένος κώνος εξαιτίας της υπεράντλησης, (d) διεργασίες θαλάσσιας διείδυσης στην παλιρροιακή ζώνη, (e) επιφανειακή εκδήλωση υπογείου νερού εξαρτώμενη από το υδραυλικό φορτίο (Werner et al. 2013 με τροποποιήσεις).....	5
Σχήμα 1.3 Διαχείριση παράκτιων υδροφορέων .....	7
Σχήμα 1.4 Δημιουργία ολοκληρωμένης βάσης δεδομένων παράκτιων υδροφορέων .....	8
Σχήμα 1.5 Κατανομή έργων υποδομής MAR σε παράκτιες ζώνες (με δεδομένα από την παρούσα έρευνα και τους Stefan και Ansems, 2018) .....	36
Σχήμα 1.6 Περιοχή μελέτης.....	37
Σχήμα 1.7 Κατανομή χρήσεων γης στον Μαραθώνα και την ευρύτερη περιοχή.....	38
Σχήμα 2.1 Στωματογραφική στήλη ΒΑ Αττικής Περιοχή βορειοδυτικού τμήματος του γεωλογικού φύλλου «Ραφήνα», κλίμακας 1:50 000. Κατά Γ. Κατσικάτσο (1991), με τροποποιήσεις) .....	41
Σχήμα 2.2 Γεωλογικός χάρτης Μαραθώνα. Τροποποιημένος από γεωλογικά φύλλα Κηφισιά, Ραφήνα (Ι.Γ.Μ.Ε.).....	45
Σχήμα 2.3 Σημεία παρακολούθησης.....	48
Σχήμα 2.4 Το υδροσύστημα του Μαραθώνα.....	50
Σχήμα 2.5 Πιεζομετρία προσχωματικού σχηματισμού.....	53
Σχήμα 2.6 Υδρολογικό ισοζύγιο προσχωματικού υδροφορέα .....	55
Σχήμα 2.7 Συγκέντρωση χλωριόντων καρστικού και προσχωματικού σχηματισμού .....	59
Σχήμα 2.8 Συγκέντρωση νιτρικών ιόντων καρστικού και προσχωματικού υδροφορέα .....	60
Σχήμα 2.9 Διάγραμμα <i>riper</i> για τα δείγματα της περιόδου Μαΐου 2016 (α) του προσχωματικού υδροφορέα, (β) του καρστικού υδροφορέα και της περιόδου Οκτωβρίου 2016 (γ) του προσχωματικού υδροφορέα, (δ) του καρστικού υδροφορέα .....	63
Σχήμα 2.10 Διάγραμμα SAR για τα δείγματα της περιόδου Μαΐου 2016 (α) του προσχωματικού υδροφορέα, (β) του καρστικού υδροφορέα και της περιόδου Οκτωβρίου 2016 (γ) του προσχωματικού υδροφορέα, (δ) του καρστικού υδροφορέα .....	64
Σχήμα 2.11 Διακύμανση ετήσιας βροχόπτωσης στον μετεωρολογικό σταθμό Ν.Μάκρης.....	66
Σχήμα 2.12 Θηκόγραμμα για (α) την μηνιαία βροχόπτωση και (β) τη μέση μηνιαία θερμοκρασία. Η μέση τιμή των παρατηρήσεων επισημαίνεται με το σύμβολο x και οι εξαιρετικά ακραίες τιμές (outliers) με κουκίδα	66
Σχήμα 2.13 (α) Διακύμανση μηνιαίας εξατμισοδιαπνοής (μέση τιμή ημερών μηνός) για τους μήνες Οκτώβριος 2015 έως Σεπτέμβριος 2020 και (β) μέση μηνιαία εξατμισοδιαπνοή για την ίδια περίοδο .....	68

Σχήμα 2.14 Διάγραμμα συσχέτισης ύψους νερού βροχόπτωσης, απορροής και διήθησης, δυναμικής και πραγματικής εξατμισοδιαπνοής για τα υδρολογικά έτη (α)2015-2016, (β)2016-2017, (γ)2017-2018, (δ)2018-2019, (ε)2019-2020 .....	74
Σχήμα 3.1 Απλοποιημένο σχέδιο πειραματικής διάταξης διαχείρισης εμπουτισμού του υδροφορέα.....	77
Σχήμα 3.2 Χωροθέτηση των τμημάτων της πειραματικής διάταξης Τ.Ε. στην περιοχή του Σχοινιά με γραφική αναπαράσταση της λειτουργίας της .....	78
Σχήμα 3.3 Χωροθέτηση των γεωτρήσεων MAR.....	80
Σχήμα 3.4 Τομή του υδροφορέα κατά μήκος της οριζόντιας γεώτρησης .....	81
Σχήμα 4.1 Οριακές συνθήκες του μοντέλου Τ.Ε. με (α) το πακέτο CFP, (β) το πακέτο WEL.....	87
Σχήμα 4.2 Εννοιολογική προσέγγιση του μοντέλου MODFLOW CFP για την οριζόντια γεώτρηση εμπλουτισμού .....	87
Σχήμα 4.3(α) Επίπεδο ευαισθησίας παραμέτρων με βάση το CSS, (β) Συσχέτιση παραμέτρων, για το μοντέλο CFP .....	90
Σχήμα 4.4 Επίπεδο ευαισθησίας παραμέτρων με βάση το CSS, για το μοντέλο WEL .....	91
Σχήμα 4.5 Εξέλιξη Υδραυλικών φορτίων κατά τη διάρκεια Τ.Ε. για τις παρατηρημένες και προσομοιωμένες τιμές.....	92
Σχήμα 4.6 Παρατηρημένες- Προσομοιωμένες τιμές υδραυλικού φορτίου για α) το μοντέλο “CFP”, β) το μοντέλο “WEL” .....	93
Σχήμα 4.7 Ισοζύγιο όγκου υπογείου νερού για α) το μοντέλο "CFP", β) το μοντέλο "WEL".....	94
Σχήμα 4.8 Πιεζομετρική επιφάνεια του υδροφορέα (α) στην αρχή της προσομοίωσης σε όλο το μοντέλο (β) στην αρχή της προσομοίωσης στην περιοχή της οριζόντιας γεώτρησης, (γ) στο τέλος της προσομοίωσης για το μοντέλο “CFP” (δ) στο τέλος της προσομοίωσης για το μοντέλο “WEL” .....	95
Σχήμα 5.1 Κατασκευή μοντέλου .....	104
Σχήμα 5.2 Καθορισμός ζωνών για (α) το 1ο υπερκείμενο στρώμα, (β) το 2ο ενδιάμεσο στρώμα και (γ) το 3ο υποκείμενο στρώμα .....	106
Σχήμα 5.3 Οριακές συνθήκες για το μοντέλο του προσχωματικού υδροφορέα του Μαραθώνα .....	108
Σχήμα 5.4 (α) Επίπεδο ευαισθησίας παραμέτρων με βάση το CSS, (β) Συσχέτιση παραμέτρων .....	113
Σχήμα 5.5 Διάγραμμα προσομοιωμένων-παρατηρημένων τιμών υδραυλικού φορτίου με τον κώδικα MODFLOW 2005 (α) για την αρχή της προσομοίωσης, (β) μετά τη βαθμονόμηση των παραμέτρων .....	115
Σχήμα 5.6 Κατανομή παρατηρημένου και προσομοιωμένου υδραυλικού φορτίου στον κοκκώδη σχηματισμό του Μαραθώνα .....	116
Σχήμα 5.7 Αθροιστικό ισοζύγιο μαθηματικού μοντέλου (Οκτώβριος 2018-Σεπτέμβριος 2019) .....	117
Σχήμα 5.8 Διάγραμμα προσομοιωμένων-παρατηρημένων τιμών υδραυλικού φορτίου με τον κώδικα SEAWAT .....	120
Σχήμα 5.9 Κατανομή υδραυλικού φορτίου για τα μοντέλα ροής (MODFLOW) και μεταβαλλόμενης πυκνότητας (SEAWAT) στην πεδιάδα του Μαραθώνα για την περίοδο Οκτώβριος 2018-Μάρτιος 2019 ..	123

Σχήμα 5.10 Κατανομή υδραυλικού φορτίου για τα μοντέλα ροής (MODFLOW) και μεταβαλλόμενης πυκνότητας (SEAWAT) στην πεδιάδα του Μαραθώνα για την περίοδο Απρίλιος 2019-Σεπτέμβριος 2019	124
Σχήμα 5.11 Κατανομή συγκέντρωσης ολικών διαλυμένων στερεών για (α) το 1 <sup>ο</sup> υπερκείμενο στρώμα, (β) το 2 <sup>ο</sup> ενδιάμεσο στρώμα και (γ) το 3 <sup>ο</sup> υποκείμενο στρώμα του προσχωματικού υδροφορέα του Μαραθώνα, βάσει του μοντέλου SEAWAT	125
Σχήμα 5.12 Τομές του υδροφορέα με τη συγκέντρωση TDS βάσει του κώδικα SEAWAT	127
Σχήμα 6.1 Θέματα διαχείρισης υπογείων νερών των εμπλεκόμενων φορέων στην περιοχή του Μαραθώνα	136
.....	136
Σχήμα 6.2 Δείκτης καταλληλότητας σεναρίου	144
Σχήμα 6.3 Αποτελέσματα μοντέλου μετά την εφαρμογή των 5 σεναρίων διαχείρισης	145

# 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

## 1.1 Παράκτια υδροφόρα συστήματα

### 1.1.1 Γενικά

Οι παράκτιοι υδροφόροι σχηματισμοί αποτέλεσαν και αποτελούν αποθήκες νερού ζωτικής σημασίας, ιδιαίτερα σε χώρες με ξηρό κλίμα και στην Μεσόγειο όπου τα αποθέματα νερού από επιφανειακές πηγές είναι ανεπαρκή εξαιτίας των περιορισμένων βροχοπτώσεων αλλά και του υψηλού βαθμού εξατμισοδιαπνοής. Πρόκειται για συστήματα μείζονος σημασίας τόσο για τους ανθρώπους, όσο και για τα παράκτια ηπειρωτικά και θαλάσσια οικοσυστήματα, συμβάλλοντας στη διατήρηση εκβολών, υγροτόπων και της βιοποικιλότητας στην παρακείμενη θαλάσσια ζώνη. Οι υδροφορείς στις παράκτιες περιοχές καλύπτουν σε μεγάλο ποσοστό τις ανάγκες σε νερό για οικιακή, βιομηχανική, τουριστική και αγροτική χρήση. Η οικονομική επιβίωση και ευημερία στις παράκτιες ζώνες συνδέεται άμεσα με την εκμετάλλευση των υπόγειων αποθεμάτων νερού, καθώς είτε αποτελούν τη μόνη πηγή, είτε χρησιμοποιούνται συμπληρωματικά των επιφανειακών υδατικών πόρων, με αποτέλεσμα τα υπόγεια συστήματα να υπόκεινται σε υπερεκμετάλλευση (MED-EUWI WG ON GROUNDWATER 2007). Με την αύξηση του πληθυσμού και την παγκόσμια ανάπτυξη σε αγροτικό και βιομηχανικό επίπεδο κατά το πρώτο μισό του 20<sup>ου</sup> αιώνα, οι αντλήσεις νερού ξεπέρασαν την φυσική αναπλήρωση των υδροφορέων προκαλώντας έτσι κατακόρυφη μείωση των αποθεμάτων υπογείου νερού, ενώ σε πολλές παράκτιες ζώνες το επίπεδο του υδροφορέα έπεσε κάτω από τη στάθμη της θάλασσας (Cheng & Ouazar 2005). Η υπερεκμετάλλευση αυτή έχει οδηγήσει σε πολλές περιπτώσεις στην ελάττωση του υδατικού δυναμικού των υδροφόρων στρωμάτων, στην αύξηση της τρωτότητας τους και στην ποιοτική τους υποβάθμιση με κύριο πρόβλημα των παράκτιων σχηματισμών την διείσδυση θαλασσινού νερού στους υδροφορείς. Όπως αναφέρουν και οι Michael κ.α. (2017), η επιφανειακή ρύπανση από το έδαφος σε συνδυασμό με τη θαλάσσια διείσδυση και την υπεράντληση, έχουν οδηγήσει σε συρίκνωση των αποθεμάτων γλυκού νερού στους παράκτιους υδροφορείς, χαρακτηρίζοντας την κατάσταση ως «πίεση στα υπόγεια νερά» ή «groundwater squeeze». Η εξυγίανση, η συντήρηση και η βιώσιμη διαχείριση αυτών των συστημάτων αλλά και η αντιμετώπιση της θαλάσσιας διείσδυσης αποτελεί αντικείμενο συνεχούς έρευνας για τους κλάδους της υδρογεωλογίας και της υδραυλικής, προκειμένου να διασφαλιστεί η διαφύλαξη και η αειφόρος λειτουργία των παράκτιων υδροσυστημάτων.

### **1.1.2 Υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά παράκτιων υδροφορέων**

Από υδρογεωλογική σκοπιά, οι παράκτιοι υδροφορείς διαμορφώνονται σε σχηματισμούς όπου νερό μετεωρικής προέλευσης και νερό θαλάσσιας προέλευσης συναντώνται και αλληλεπιδρούν (Post, 2005), δημιουργώντας μία ζώνη μετάβασης από γλυκό σε αλμυρό νερό.

Κατά την υδρογεωλογική έρευνα, η έκταση της παράκτιας ζώνης δεν είναι προκαθορισμένη βάσει κάποιας έκτασης, κάποιου υψομέτρου ή κάποιου φυσικού ορίου, αλλά προσδιορίζεται βάσει του σκοπού της εκάστοτε έρευνας, τις υδραυλικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα και των ιδιαίτερων γεωλογικών συνθηκών κάθε περιοχής (Jiao and Post 2019). Κάθε υδροφόρο σύστημα είναι μοναδικό καθώς τα χαρακτηριστικά, η υδροφορία, η φυσική τροφοδοσία και η χημική σύσταση καθορίζονται από τις κλιματικές συνθήκες, την υδρολογία, τη γεωμορφολογία, την λιθολογία κάθε περιοχής αλλά και τις ανθρωπογενείς παρεμβάσεις που έχει υποστεί.

Οι γεωλογικοί σχηματισμοί παίζουν κυρίαρχο ρόλο στις υδρογεωλογικές συνθήκες της παράκτιας ζώνης καθώς καθορίζουν τις συνθήκες ροής του νερού. Σε σχέση με άλλους σχηματισμούς, οι χαλαροί εδαφικοί σχηματισμοί θεωρούνται σχετικά ισοτροπικοί και ομοιογενείς. Παρόλα αυτά, κατά κανόνα τα παράκτια συστήματα διαμορφώνονται από στρώματα διαφορετικής κοκκομετρικής διαβάθμισης σχηματίζοντας χαμηλής περατότητας έως αδιαπέρατα στρώματα ιλύος και αργίλου (θαλάσσιας προέλευσης) και περατά στρώματα άμμου και χαλικιών (χερσαίες αποθέσεις) τα οποία αποτέθηκαν σε διαφορετικές περιόδους εξαιτίας της μεταβολής της στάθμης της θάλασσας στον γεωλογικό χρόνο (Jiao and Post 2019, Cattaneo and Steel, 2013; Hutchison κ.α., 2009; Zamrsky κ.α., 2020). Το αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι οι διαφορετικές συνθήκες ροής (ροή υπό πίεση, ελεύθερη ροή) μέσα στον υδροφορέα ενώ σε συνδυασμό με τη λιθολογία της εκάστοτε παράκτιας ζώνης οδηγεί σε διαφορετικά και πολύπλοκα προφίλ αλατότητας στον εδαφικό σχηματισμό. Οι καρστικοί σχηματισμοί (δευτερογενές πορώδες διάλυσης) ουσιαστικά προσεγγίζονται ως ένα σύστημα από μεγάλα τμήματα ενός πετρώματος με πολύ χαμηλή διαπερατότητα, διαχωρισμένα από ένα δίκτυο αγωγών υψηλής περατότητας το οποίο καταλαμβάνει μικρό όγκο σε σχέση με τον συνολικό όγκο του πετρώματος (Pulido-Bosh 2021). Οι ταχύτητες ροής που αναπτύσσονται στα καρστικά συστήματα καθώς και ο όγκος νερού που αποδίδουν μπορεί να είναι μεγάλος ενώ η ροή τους μοιάζει περισσότερο με ροή ενός ποταμού παρά με αυτήν ενός κοκκώδους υδροφορέα στον οποίο αναπτύσσονται πολύ χαμηλότερες ταχύτητες (Jiao και Post, 2019). Στα σκληρά πετρώματα με δευτερογενές πορώδες ρωγμάτωσης (μεταμορφωμένα και πυριγενή πετρώματα) η ροή είναι περιορισμένη, δια μέσσω των ρηγμάτων και των ασυνεχειών, δημιουργώντας συστήματα υδροφορέων μικρής παραγωγικότητας ενώ η ισχυρή γεωλογική τους ετερογένεια καθιστά δύσκολη τη διερεύνηση τους και επομένως κατά την επαφή τους με την ακτογραμμή ο χαρακτηρισμός της



αλληλεπίδρασης γλυκού και θαλασσινού νερού μέσα σε αυτά τα συστήματα αποτελεί μία πρόκληση (Jiao and Post 2019).

### **1.1.3 Θαλάσσια διείσδυση - Παράγοντες και διεργασίες**

Το κοινό χαρακτηριστικό των παράκτιων υδροφορέων εντοπίζεται στην προσβολή τους από την θαλάσσια διείσδυση, ένα πρόβλημα που καλούνται να ερευνήσουν οι επιστήμονες και οι μηχανικοί προκειμένου να αναχαιτίσουν το φαινόμενο.

Η θαλάσσια διείσδυση συμβαίνει μέσω τριών μηχανισμών, όπως και κάθε άλλη διεργασία μεταφοράς ρύπου (Fetter 2001, Todd and Mays 2005):

- i) Υδραυλική μεταφορά ή μεταγωγή (advection) κατά την οποία ο ρύπος μεταφέρεται με τη ροή του νερού λόγω υδραυλικής κλίσης από περιοχές υψηλού σε περιοχές χαμηλού υδραυλικού φορτίου
- ii) Μοριακή διάχυση (molecular diffusion) κατά την οποία ο ρύπος διαχέεται στον υδροφορέα από περιοχές υψηλής συγκέντρωσης σε περιοχές χαμηλής συγκέντρωσης, έως ότου η συγκέντρωση εξισωθεί. Σε αυτήν την περίπτωση η μεταφορά του ρύπου δεν εξαρτάται από την κίνηση του νερού επομένως ο ρύπος διαχέεται και σε στάσιμα νερά
- iii) Υδροδυναμική διασπορά (hydrodynamic dispersion) όπου ο ρύπος μεταφέρεται μέσω της ακανόνιστης ροής δια μέσου των πόρων του εδάφους (μικροσκοπική ταχύτητα) κατά μήκος και εγκάρσια της διεύθυνσης της μέσης κίνησης του νερού

Η αρχική θεώρηση για την επαφή γλυκού και θαλασσινού νερού μέσα στον υδροφορέα, αφορούσε το διαχωρισμό τους μέσω μίας σφηνοειδούς στατικής διεπιφάνειας μεγάλης κλίσης, όπως διατυπώθηκε από τους Badon-Ghyben (1889) και Herzberg (1901) όπου το «ελαφρύτερο» γλυκό νερό επιπλέει στο «βαρύτερο» λόγω διαφοράς πυκνότητας. Στα επόμενα χρόνια το φαινόμενο περιγράφηκε από τους Cooper et al. (1964) και εδραιώθηκε η θεώρηση της ύπαρξης μίας ζώνης μετάβασης από θαλασσινό σε γλυκό νερό όπου μέσω της διάχυσης και της υδροδυναμικής διασποράς, υπάρχει μία ανοδική κίνηση των διαλυμένων ουσιών του θαλασσινού νερού στο γλυκό προς την ακτή όπου και τελικά εκφορτίζονται πάλι προς τη θάλασσα ακολουθώντας τη ροή του υδροφορέα. Παρ' όλα αυτά η σχέση που αναπτύχθηκε κατά τη θεώρηση Ghyben-Herzberg χρησιμοποιείται μέχρι σήμερα ως ένα εργαλείο προσδιορισμού της διεπιφάνειας γλυκού-αλμυρού νερού σε παράκτιους υδροφορείς (π.χ. Zhang et al. 2021, De Biase et al. 2021, Gondwe et al. 2011).

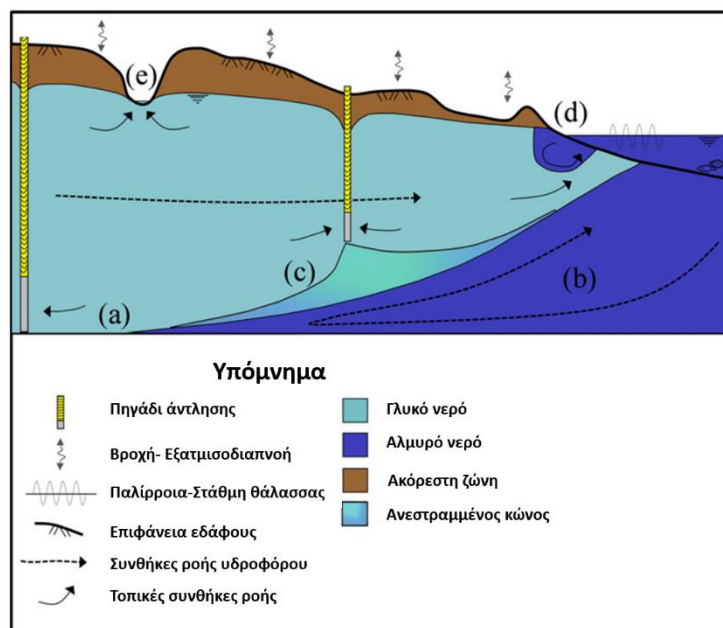
Οι παράγοντες ελέγχου της θαλάσσιας διείσδυσης περιλαμβάνουν δυνάμεις άνωσης που σχετίζονται με τις διακυμάνσεις πυκνότητας (προέρχονται κυρίως από τη συγκέντρωση διαλυμένης μάζας), δυνάμεις υδραυλικής μεταφοράς που προκύπτουν από την εκφόρτιση γλυκού νερού, τον μηχανισμό της διασποράς, και τις υδρολογικές οριακές συνθήκες (Werner et al. 2013). Το σύστημα

υδροφορέας- θάλασσα διατηρείται σε μία ισορροπία. Κατά τη διατάραξη της ισορροπίας του συστήματος λόγω ανθρωπογενούς παρέμβασης είτε φυσικών φαινομένων, μπορεί να επέλθει μετακίνηση της ζώνης μετάβασης προς την ενδοχώρα, δηλαδή θαλάσσια διείσδυση.

Ο μηχανισμός της θαλάσσιας διείσδυσης έχει περιγραφεί από πολλούς ερευνητές και μάλιστα με διάφορους ορισμούς. Η πιο κοινή θεώρηση, περιγράφει τη θαλάσσια διείσδυση ως την αντικατάσταση γλυκού νερού από θαλασσινό (Bruington 1972). Η υπερεκμετάλλευση των παράκτιων υδροφόρων θεωρείται η κύρια αιτία της θαλάσσιας διείσδυσης (π.χ. Goma et al. 2021, Custodio 2002, Camp et al. 2014). Όπως παραθέτουν οι Ferguson και Gleeson (2012) στην έρευνα τους, η επίδραση των αντλήσεων στο υπόγειο νερό των παράκτιων υδροφόρων είναι μεγαλύτερη απ' ό τι αυτή της ανύψωσης της στάθμης της θάλασσας ή των αλλαγών στο καθεστώς φυσικού εμπλουτισμού του υδροφορέα. Όταν ο όγκος νερού που αντλείται είναι μεγαλύτερος από τη φυσική τροφοδοσία, τότε ξεκινάει η εισροή θαλασσινού νερού προς την ενδοχώρα. Παρ' όλα αυτά, η διείσδυση της θάλασσας δεν προϋποθέτει απαραίτητα την εκφόρτιση νερού από τον υδροφορέα αλλά συνδέεται και με άλλες φυσικές και ανθρωπογενείς διεργασίες. Η ένταση και η έκταση της υφαλμύρισης εξαρτάται από διεργασίες και παράγοντες που σύμφωνα με τον Custodio (1987) περιλαμβάνουν τη διαδικασία διασποράς, την επίδραση της παλίρροιας, την επίδραση της πυκνότητας, την επιφανειακή υδρολογία (συνθήκες φυσικού εμπλουτισμού, αλληλεπίδραση επιφανειακού-υπόγειου νερού), τις συνθήκες που επικρατούσαν κατά το παρελθόν (σε κλίμακα γεωλογικών χρόνων), την ανθρωπογενή παρέμβαση και τα γεωλογικά χαρακτηριστικά που καθορίζουν τις υδραυλικές συνθήκες του συστήματος. Η αλληλεπίδραση των προαναφερθέντων παραγόντων σε συνδυασμό με άλλες διεργασίες (π.χ. ροή και μεταφορά ρύπου στην ακόρεστη ζώνη, μορφολογία της παραλιακής ζώνης και της ακτογραμμής, τσουνάμι και άλλα σποραδικά φαινόμενα λόγω καιρικών συνθηκών), παράγουν μία σειρά διαφορετικών καταστάσεων και συνθηκών θαλάσσιας διείσδυσης σε κάθε υδροσύστημα (Werner et al. 2013). Για αυτόν τον λόγο, η αναγνώριση των κυριότερων παραγόντων που καθορίζουν τις συνθήκες θαλάσσιας διείσδυσης σε μία περιοχή είναι μία σύνθετη και απαιτητική εργασία, προκειμένου εν τέλει να διερευνηθεί η καλύτερη λύση για την διαχείριση των υδατικών πόρων.

Ως προς τις γεωλογικές συνθήκες, οι παράκτιοι καρστικοί σχηματισμοί είναι γενικά πιο ευάλωτοι στην υφαλμύριση (Dokou & Karantzas 2011). Οι ακανόνιστες ρωγματώσεις και οι αγωγοί που δημιουργούνται κατά τη διάλυση ανθρακικού ασβεστίου δημιουργούν διόδους ροής επιτρέποντας την εισροή θαλασσινού νερού σε αυτούς τους σχηματισμούς (Bear 1999). Στους χαλαρούς εδαφικούς σχηματισμούς, οι λιθολογικοί σχηματισμοί με μεταβαλλόμενο πορώδες και διαπερατότητα έχουν διαφορετική ικανότητα αποθήκευσης νερού σε χωρική κλίμακα. Έτσι, συχνά εντοπίζεται «εγκλωβισμένο» θαλασσινό νερό στη μάζα αργιλικών αποθέσεων που έχει αποθηκευτεί σε

παρελθόντα γεωλογικό χρόνο (Barret et al. 2002), δημιουργώντας εστίες υφαλμύρισης στον υδροφορέα. Η έκταση και το σχήμα της ζώνης υφαλμύρισης, όπως επηρεάζεται από την ετερογένεια που χαρακτηρίζει τους σχηματισμούς αυτούς, έχει διερευνηθεί μέσω μαθηματικών μοντέλων (π.χ. Abarca 2006, Kerrou & Renard 2009, Pool et al. 2015) με κύριο συμπέρασμα το ότι σε ετερογενείς πορώδεις σχηματισμούς η ζώνη μετάβασης γλυκού- αλμυρού νερού εντείνεται σαν αποτέλεσμα των ακανόνιστων συνθηκών ροής (Jiao και Post 2019). Σύμφωνα με τους Michael et al. (2016), η γεωλογική ετερογένεια ασκεί τόσο έντονη επίδραση στις συνθήκες ροής, έτσι ώστε η κατανομή της αλατότητας και το σχήμα της διεπιφάνειας γλυκού-αλμυρού νερού να έχουν ακανόνιστη και πολύπλοκη μορφή χωρίς να θυμίζουν την θεώρηση της σφηνοειδούς διεπιφάνειας. Σε περιπτώσεις υδροφορέων με διαφορετική στρωματογραφία, οι Lu et al. (2013) θεωρώντας ένα υπερκείμενο στρώμα υψηλότερης αγωγιμότητας και ένα υποκείμενο χαμηλότερης αγωγιμότητας, απέδειξαν (μέσω πειραματικών διατάξεων και μαθηματικών μοντέλων) ότι η ζώνη ανάμιξης γλυκού-θαλασσινού νερού ήταν διευρυμένη στο στρώμα χαμηλότερης αγωγιμότητας.



Σχήμα 1.1 Διεργασίες στην παράκτια ζώνη: (α) «πόδι» της θαλάσσιας διείσδυσης, (β) κυκλοφορία επηρεαζόμενη από την πυκνότητα στη ζώνη του θαλασσινού νερού, (γ) ανεστραμμένος κώνος εξαιτίας της υπεράντλησης, (δ) διεργασίες θαλάσσιας διείσδυσης στην παλιρροιακή ζώνη, (ε) επιφανειακή εκδήλωση υπογείου νερού εξαρτώμενη από το υδραυλικό φορτίο (Werner et al. 2013 με τροποποιήσεις)

Η υφαλμύριση εντείνεται και λόγω του φαινομένου του ανεστραμμένου κώνου (up-coning) (Σχήμα 1.1), όπου κατά τη συνεχόμενη άντληση, η υποκείμενη μάζα υφάλμυρου νερού στο δάπεδο του υδροφορέα, ανυψώνεται τοπικά στην περιοχή του πηγαδιού ή της γεώτρησης άντλησης, υποβαθμίζοντας εν τέλει την ποιότητα του αντλούμενου νερού (Todd and Mays 2005). Η προοδευτική ανύψωση της διεπιφάνειας μπορεί να καταστήσει τα πηγάδια ακατάλληλα προς χρήση. Ο ρυθμός

δημιουργίας και η έκταση του ανεστραμμένου κώνου εξαρτάται από πολλούς παράγοντες που σχετίζονται με τις υδραυλικές ιδιότητες του μέσου, τον ρυθμό και τη διάρκεια άντλησης, την αρχική θέση της διεπιφάνειας, τη διαφορά στην πυκνότητα του γλυκού και αλμυρού νερού, τον φυσικό εμπλουτισμό του υδροφορέα, τις διαδικασίες διάχυσης καθώς και τη γεωμετρία του πηγαδιού και του υδροφορέα (Reilly & Goodman 1987, Saeed et al. 2002).

Λαμβάνοντας υπόψη την υδραυλική επικοινωνία μεταξύ παράκτιου υδροφορέα και θάλασσας, είναι ευνόητο ότι το επίπεδο της στάθμης της θάλασσας καθώς και οι φυσικές διεργασίες που συμβαίνουν στην ακτή (παλίρροια, κύματα) ενδέχεται να επηρεάζουν την έκταση της θαλάσσιας διείδυσης. Σε περιπτώσεις ακραίων φαινομένων (π.χ. τσουνάμι) έχει παρατηρηθεί υποβάθμιση στην ποιοτική κατάσταση των υδροφορέων με αύξηση της αλατότητας στην ζώνη ανάμιξης (Illangasekare et al. 2006, Anderson et al. 2008). Όταν η στάθμη της θάλασσας διατηρείται στα όρια της παλιρροιακής ζώνης, η επίδραση που έχει στην ζώνη ανάμιξης γλυκού- αλμυρού νερού είναι μικρή (Ataie-Ashtiani et al. 1998, Inouchi et al. 1990, Cartwright et al. 2004). Παρ' όλα αυτά, μέσα από μετρήσεις πεδίου και μαθηματικά μοντέλα, έχει παρατηρηθεί η δημιουργία ενός πλουμίου στα όρια της ακτογραμμής στο οποίο επανακυκλοφορεί αλατούχο νερό, εξαιτίας της παλιρροιακής δραστηριότητας και των κυματισμών (Robinson and Gibbes 2006, Vandenbohede and Lebbe 2006, Xin et al. 2010) (Σχήμα 1.1d). Η διείδυση της θάλασσας στους παράκτιους υδροφορείς με την επιμήκυνση της ζώνης ανάμιξης και την ποιοτική υποβάθμιση, αναμένεται να αυξηθεί σε μακροχρόνια κλίμακα. Κατά πολλούς ερευνητές, η άνοδος της μέσης στάθμης της θάλασσας ως αποτέλεσμα την μεταβαλλόμενων κλιματικών συνθηκών αναμένεται να έχει αρνητικές επιπτώσεις στους υπόγειους υδροφορείς (π.χ. Befus et al. 2020, Ketabchi et al. 2016, Werner & Simmons 2009, Ranjbar et al. 2020, Chun et al. 2018). Στις παράκτιες περιοχές, ιδίως στις υψομετρικά χαμηλές πεδιάδες, η αύξηση της στάθμης της θάλασσας μπορεί να οδηγήσει σε μείωση του υδραυλικού φορτίου (Michael et al. 2013), μειώνοντας έτσι την εκφόρτιση του υδροφορέα προς τη θάλασσα με αποτέλεσμα η διεπιφάνεια γλυκού –θαλασσινού νερού να εισχωρήσει περισσότερο στην ενδοχώρα (Klassen and Allen 2017).

## **1.2 Διαχείριση παράκτιων υδροφορέων- Μεθοδολογία**

Με τον όρο «Διαχείριση Παράκτιων Υδροφορέων» (Coastal Aquifer Management), νοούνται όλες οι ενέργειες, οι μέθοδοι και οι πρακτικές που ακολουθούνται έτσι ώστε να διασφαλιστεί η βιωσιμότητα, η ποιότητα και η ποσότητα των αποθεμάτων γλυκού νερού στους παράκτιους υδροφορείς βραχυπρόθεσμα και μακροπρόθεσμα, με κύριο γνώμονα την εξυπηρέτηση των ανθρώπινων αναγκών. Σε σχέση με υδροφορείς που εντοπίζονται στην ενδοχώρα, η διαχείριση των παράκτιων υδροφορέων τις περισσότερες φορές επικεντρώνεται στην αντιμετώπιση της θαλάσσιας

διείσδυσης (π.χ. Shi & Jiao 2014, Dentoni et al. 2015, Romanazz et al. 2015). Όπως αναφέρουν και οι Bear et al. (1999), η ελλιπής διαχείριση ενός παράκτιου υδροφορέα μπορεί να οδηγήσει στην καταστροφή του ως πηγή γλυκού νερού, σε σχέση με υδροφορείς που δεν είναι σε επαφή με τη θάλασσα, εξαιτίας της θαλάσσιας διείσδυσης.

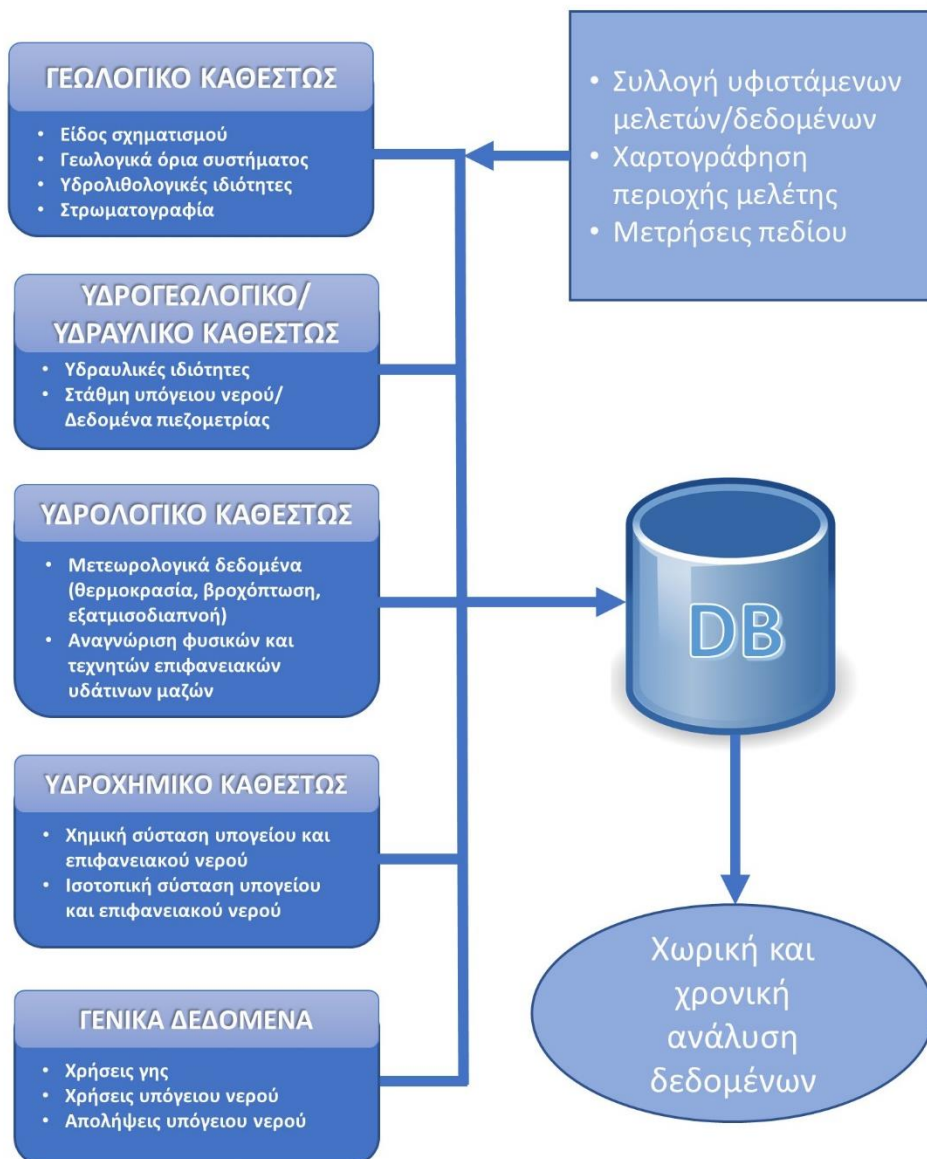
Τα συνήθη βήματα για τη διαχείριση ενός παράκτιου υδροφόρου συστήματος, τα οποία ακολουθούνται και στην παρούσα διατριβή, συνοψίζονται στο διάγραμμα του Σχήματος 1.2, λαμβάνοντας υπόψιν συνήθεις πρακτικές που περιγράφονται από ειδικούς και ερευνητές (π.χ. Cheng & Ouazar 2003, Bear et al. 1999, Jiao & Post 2019, Vengadesan & Lakshmanan 2018).



Σχήμα 1.2 Διαχείριση παράκτιων υδροφορέων

### 1.2.1 Συλλογή πρωτογενών στοιχείων πεδίου και δημιουργία βάσης δεδομένων

Σε κάθε περίπτωση, η διαχείριση ενός παράκτιου υδροφορέα απαιτεί αρχικά τη γνώση της κατάστασης του συστήματος (ποσοτικά και ποιοτικά), την έκταση και τη δυναμική της θαλάσσιας διείσδυσης, καθώς και τον λεπτομερή χαρακτηρισμό του συστήματος. Απαραίτητη προϋπόθεση επομένως είναι η παρακολούθηση του παράκτιου υδροφορέα και αφορά τα πρώτα δύο στοιχεία του διαγράμματος ροής (Σχήμα 1.2). Η προετοιμασία και η συλλογή στοιχείων για τη διαμόρφωση μιας ολοκληρωμένης βάσης δεδομένων (Σχήμα 1.3) συμβάλει στην αποτελεσματικότερη ανάλυση και παρέχει δεδομένα για το μετέπειτα στάδιο της προσομοίωσης του συστήματος.



Σχήμα 1.3 Δημιουργία ολοκληρωμένης βάσης δεδομένων παράκτιων υδροφορέων

Η συλλογή στοιχείων από υπάρχουσες πηγές διευκολύνει την έρευνα μειώνοντας τις εργασίες πεδίου ενώ παράλληλα η ύπαρξη χρονοσειρών παρέχει στον ερευνητή χρήσιμες πληροφορίες για την εξέλιξη της κατάστασης του υδροφορέα και της θαλάσσιας διείσδυσης. Συνήθως τα υπάρχοντα δεδομένα είναι ελλιπή, μπορεί να μην έχουν καλή χωρική και χρονική κατανομή και δεν μπορεί να ελεγχθεί η αξιοπιστία τους επομένως ο ερευνητής καλείται να συλλέξει νέα δεδομένα προκειμένου να δημιουργηθεί μία ολοκληρωμένη βάση. Οι πληροφορίες που δύναται να διαμορφώσουν τη βάση δεδομένων φαίνονται στο Σχήμα 1.3.

### **1.2.2 Επεξεργασία, ανάλυση και ερμηνεία δεδομένων**

Για την ανάλυση του υπόγειου συστήματος, η επεξεργασία των δεδομένων γίνεται σε χωρική και χρονική κλίμακα. Η χωρική ανάλυση πραγματοποιείται συνήθως σε Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (ΓΣΠ-GIS) και επικεντρώνεται στα ποσοτικά (υδραυλικά φορτία και στάθμες) και ποιοτικά (κατανομή συγκεντρώσεων ιόντων, χημικός τύπος) χαρακτηριστικά του υδροφόρου στρώματος (Venkatramanan 2019, Esquivel et al. 2015; Perdikaki et al. 2020, Criollo et al. 2019).

Ειδικότερα τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται για την αναγνώριση της θαλάσσιας διείσδυσης στους παράκτιους σχηματισμούς περιλαμβάνουν:

- Μέτρηση υδραυλικών φορτίων: αποτελεί μία απλή μέθοδο για την αναγνώριση της υφαλμύρισης. Σε γενικές γραμμές, χαμηλά υδραυλικά φορτία κοντά στο επίπεδο της στάθμης της θάλασσας υποδεικνύουν θαλάσσια διείσδυση. Μέθοδοι και σχέσεις υπολογισμού έχουν διατυπωθεί από τους Chun & Ying (2009), Zhou (2011, 2016), Inouchi et al. (1985), Isaacs & Hunt (1986) κ.α.
- Γεωφυσικά δεδομένα: για την παρακολούθηση της θαλάσσιας διείσδυσης, οι γεωφυσικές μέθοδοι εκμεταλλεύονται της φυσικές ιδιότητες του εδάφους και του νερού (ηλεκτρική αγωγιμότητα, ηλεκτρομαγνητική διαπερατότητα, θερμική αγωγιμότητα κ.α.) (π.χ. Meyer et al. 2019, Yang et al. 1999, Barret et al. 2002)
- Υδροχημικές μετρήσεις: η ηλεκτρική αγωγιμότητα και η παρουσία συγκεκριμένων ιόντων στο υπόγειο νερό αποτελούν βασικές παραμέτρους αναγνώρισης της θαλάσσιας διείσδυσης. Για αγωγιμότητες άνω των 750  $\mu\text{S}/\text{cm}$  η ποιότητα νερού θεωρείται φτωχή και το νερό είναι ακατάλληλο προς πόση (Richards et al. 1954) ενώ η αυξημένη ηλεκτρική αγωγιμότητα και αντίστοιχα υψηλές τιμές συνολικών διαλυμένων αλάτων (TDS) στους παράκτιους υδροφορείς, υποδεικνύουν θαλάσσια διείσδυση. Το ίδιο συμβαίνει και με υψηλές τιμές στις συγκεντρώσεις των κύριων ιόντων νατρίου (Na), χλωρίου (Cl), ασβεστίου (Ca), και μαγνησίου (Mg) (Vengadesan & Lakshmanan 2018)

- Ισοτοπικές υπογραφές: Η ισοτοπική ανάλυση αποτελεί έναν τρόπο να καθοριστεί η προέλευση του νερού σε έναν υδροφόρο. Ο μηχανισμός της θαλάσσιας διείσδυσης επιβεβαιώνεται μέσω της υψηλής διαφοροποίησης στις ισοτοπικές υπογραφές μεταξύ υπόγειου νερού και θαλασσινού (Pouliaris et al. 2018, Φλώρος 2016, Ματιάτος 2010)

Στο στάδιο επομένως της επεξεργασίας και ανάλυσης των δεδομένων είναι δυνατό να διερευνηθεί η κατάσταση του παράκτιου υδροφόρου και η πρόοδος της θαλάσσιας διείσδυσης. Χρήσιμα εργαλεία για τον προσδιορισμό των πιο επιβαρυσμένων και τρωτών σημείων είναι οι δείκτες τρωτότητας όπως για παράδειγμα ο δείκτης DRASTIC (Kerr 1985, Babiker et al. 2005, Nahin et al. 2020) κατά τον οποίο αξιολογείται η τρωτότητα του υδροφόρου στην ρύπανση σε νιτρικά ιόντα και ο δείκτης GALDIT που αξιολογεί την τρωτότητα ενός παράκτιου υδροφόρου στην θαλάσσια διείσδυση (Ferreira et al. 2007, Perdikaki et al. 2014).

### **1.2.3 Εννοιολογικό μοντέλο**

Η ορθολογική διαχείριση ενός υδροφόρου, απαιτεί σαν πρώτο βήμα την κατανόηση του φυσικού συστήματος και τη γνώση του τρόπου λειτουργίας του. Τα μοντέλα είναι εργαλεία που σχεδιάστηκαν για να απεικονίσουν μία πιο απλουστευμένη μορφή ενός σύνθετου φυσικού συστήματος όπως συμβαίνει στην πραγματικότητα. Το εννοιολογικό μοντέλο (conceptual model) είναι η βάση για τη μετέπειτα ανάλυση και δημιουργία του μαθηματικού μοντέλου. Στην υδρογεωλογία, είναι μία αναπαράσταση των υδρογεωλογικών ενοτήτων και των συνθηκών ροής ή/και μεταφοράς ρύπου, ενώ στους παράκτιους υδροφορείς περιγράφει και το μηχανισμό λειτουργίας της θαλάσσιας διείσδυσης. Διαμορφώνεται και προκύπτει από τις πληροφορίες και τα δεδομένα που έχουν συλλεχθεί κατά τα πρώτα βήματα στην έρευνα ενός υδροφόρου συστήματος. Ένα ρεαλιστικό εννοιολογικό μοντέλο πρέπει να περιγράφει την πραγματικότητα με έναν απλό τρόπο που ικανοποιεί τους στόχους μοντελοποίησης και τις απαιτήσεις διαχείρισης του συστήματος. Το εννοιολογικό μοντέλο είναι η βασική ιδέα για την κατασκευή και τον τρόπο λειτουργίας των συστημάτων και των διαδικασιών (Bredhoeft 2005).

Κατά τον χαρακτηρισμό ενός υδροφόρου συστήματος και την ανάπτυξη του εννοιολογικού μοντέλου υπόγειας ροής, τρεις γενικές κατηγορίες δεδομένων είναι απαραίτητες: γεωλογία, υδρολογία (υπόγεια και επιφανειακή), υδροχημεία (Plummer et al. 2013). Η ανάλυση της στρωματογραφίας και της γεωλογίας από δεδομένα δειγματοληπτικών γεωτρήσεων και γεωφυσικών διασκοπήσεων, σε συνδυασμό με υδροχημική, ισοτοπική ανάλυση και δεδομένα στάθμεων από γεωτρήσεις και πηγάδια είναι απαραίτητο προκειμένου της αποσαφήνισης του υπόγειου



συστήματος και του μηχανισμού φυσικού εμπλουτισμού του (Bayanzul et al. 2019, Fernandes et al. 2016, Babad et al. 2020, Cetina et al. 2020, Pouliaris et al. 2018)

Η διαμόρφωση του εννοιολογικού μοντέλου παρουσιάζει μεγάλη αβεβαιότητα ως προς την υδρογεωλογική θεώρηση και λειτουργία, λόγω της ποιότητας και της ποσότητας των δεδομένων και των πληροφοριών που καλείται να διαχειριστεί ο ερευνητής.

Όπως αναφέρει και ο Bredehoeft (2005), η υδρογεωλογική ανάλυση εμπεριέχει το στοιχείο της έκπληξης αφού σε πολλές περιπτώσεις νέα δεδομένα καθιστούν το ισχύον εννοιολογικό μοντέλο μη έγκυρο. Σε αυτές τις περιπτώσεις, προτείνει τη συλλογή συμπληρωματικών δεδομένων που μπορούν να οδηγήσουν σε νέες πληροφορίες που αλλάζουν το εννοιολογικό μοντέλο και ο ερευνητής πρέπει να λάβει υπόψη του το ενδεχόμενο να τροποποιήσει εκ βάθρων το εννοιολογικό μοντέλο. Σε τελική ανάλυση η ανάπτυξη του εννοιολογικού μοντέλου ενός συστήματος είναι μάλλον μια δυναμική διαδικασία που τελικά διαμορφώνει τα αποτελέσματα του μαθηματικού μοντέλου και ορίζει τις διαχειριστικές πρακτικές. Η προσομοίωση και αξιολόγηση πολλών διαφορετικών εννοιολογικών μοντέλων ή όπως ονομάζεται “multi-model approach” χρησιμοποιείται ως ένας τρόπος για την αντιμετώπιση της αβεβαιότητας που έχει ένα εννοιολογικό μοντέλο (Zhou & Herath 2017, Enemark et al. 2018, Mustafa et al. 2020). Οι διαφορές μεταξύ των εννοιολογικών μοντέλων οδηγούν σε διαφορετικά μοντέλα προσομοίωσης που, με τη σειρά τους, οδηγούν σε διαφορετικές βέλτιστες διαχειριστικές στρατηγικές αντιμετώπισης ενός προβλήματος (Timani & Peralta 2015, Gondwe et al. 2011).

#### **1.2.4 Μαθηματικό μοντέλο προσομοίωσης ροής του υπόγειου νερού**

Προκειμένου να προταθεί και να διερευνηθεί ένα αποτελεσματικό σχέδιο είναι σημαντικό να προβλεφθεί η επίδραση της διαχειριστικής πρακτικής για το συγκεκριμένο υδροφόρο σύστημα. Τα μαθηματικά μοντέλα είναι αποτελεσματικά εργαλεία για την πρόβλεψη αλλαγών στην ποιότητα και την ποσότητα των υπόγειων νερών, καθορίζουν στρατηγικές προστασίας και διερευνούν την εξέλιξη της ρύπανσης μέσω της εφαρμογής μοντέλων ροής και μεταφοράς μάζας μέσα από αριθμητικές μεθόδους (Karatzas 2017). Αν και η ακρίβεια ενός μοντέλου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από πολλούς παράγοντες, όπως η ποιότητα των δεδομένων εισαγωγής, οι δημόσιοι φορείς και διάφοροι κανονισμοί και οδηγίες, ενθαρρύνουν ή/και απαιτούν την εφαρμογή μαθηματικών μοντέλων για μακροπρόθεσμες προβλέψεις (Bloetcher κ.α. 2005). Η αριθμητική προσομοίωση έχει εφαρμοστεί επίσης σε μεσογειακές περιοχές ως υποστηρικτικό εργαλείο για την αποτελεσματική διαχείριση, τον σχεδιασμό και λήψη αποφάσεων στον τομέα των υπόγειων νερών (Pisinaras et al. 2021, De Filippis et al. 2020, Zghibi et al. 2019, Khadra and Stuyfzand 2018, Vernoux et al. 2020, Lancia et al. 2020). Η χρήση τους στη διαχείριση παράκτιων υδροφορέων είναι ευρεία, αφού σε πολλές έρευνες έχουν

εφαρμοστεί αριθμητικά μοντέλα ως τρόπος διερεύνησης των επιπτώσεων των φαινομένων που σχετίζονται με την εισβολή θαλασσινού νερού στο υπόγειο σύστημα των παράκτιων ζωνών (π.χ. Guo et al. 2019, Costall et al. 2020; Walther et al. 2020, Lal & Datta 2018, Xu et al. 2019, Dibaj et al. 2020).

Για την προσομοίωση των υδραυλικών διεργασιών σε υδροφορείς, πορώδεις ή ρηγματογενείς σχηματισμούς, έχουν αναπτυχθεί μαθηματικοί κώδικες και πλατφόρμες ελεύθερου και ανοιχτού κώδικα ή και εμπορικοί.

Οι επικρατέστερες αριθμητικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την επίλυση μοντέλων υπόγειας ροής και συναντώνται στην βιβλιογραφία είναι η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (finite elements method), η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών (finite difference method) και πεπερασμένου όγκου (finite volume). Η διαφοροποίηση μεταξύ των μεθόδων, έγκειται στη χωρική διακριτοποίηση του πεδίου ροής και στην διαδικασία επίλυσης.

Η χρήση πεπερασμένων διαφορών περιλαμβάνει τη διαίρεση του χώρου με τη χάραξη δικτύου γραμμών παράλληλα προς τους άξονες  $x$  και  $y$ , δημιουργώντας ένα ορθογωνικό δίκτυο, τον κανάβο. Για την επίλυση της ροής, το υδραυλικό φορτίο του υδροφορέα καθορίζεται σε κάθε κελί του κανάβου μέσω σταθερού σημείου που ονομάζεται κόμβος, ορίζοντας μία σταθερή τιμή στην έκταση κάθε κελιού. Η εξίσωση ροής επιλύεται αντικαθιστώντας τις μερικές παραγώγους του φορτίου στις τρεις διαστάσεις ( $x,y,z$ ) με τη διαφορά του υδραυλικού φορτίου μεταξύ δύο κόμβων και οι οριακές συνθήκες ενσωματώνονται στη μαθηματική σχέση για τους κόμβους που περιλαμβάνουν τα όρια (Anderson et al. 2015). Οι Bear & Cheng 2010 αναφέρουν ότι βασικά μειονεκτήματα της μεθόδου είναι η μη αποτελεσματική διακριτοποίηση γύρω από σημεία ενδιαφέροντος και οριακές συνθήκες αλλά και η δυσκολία στην αναπαράσταση πολύπλοκων γεωλογικών ενοτήτων και φακών διαφορετικής εδαφολογικής σύστασης ή και ρωγματώσεων και άλλων ασυνεχειών. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η επίλυση στο ορθογωνικό πλέγμα οδηγεί στην απώλεια ακρίβειας ως προς την πρόβλεψη των υδραυλικών φορτίων κατά μήκος και κοντά στα όρια (Bear & Cheng 2010).

Στη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων, η διακριτοποίηση γίνεται ακανόνιστα, σε τυχαία σχήματα- κυρίως τριγωνικά- δημιουργώντας ένα πλέγμα από στοιχεία. Η εξαρτώμενη μεταβλητή (π.χ. το υδραυλικό φορτίο) καθορίζεται σε όλη την έκταση κάθε στοιχείου, εν αντιθέσει με τις πεπερασμένες διαφορές όπου κάθε μεταβλητή καθορίζεται σημειακά στους κόμβους. Τα στοιχεία του πλέγματος ενώνονται μέσω των κόμβων και κάθε στοιχείο καθορίζεται βάσει των κόμβων που βρίσκονται στις ακμές του. Η δημιουργία του πλέγματος είναι μία απαιτητική και σημαντική εργασία καθώς η αλληλουχία της αρίθμησης των κόμβων επηρεάζει την υπολογιστική μνήμη κατά την εκτέλεση του κώδικα και επομένως μπορεί να αυξήσει το υπολογιστικό κόστος (Wang και Anderson 1982). Κατά την εκτέλεση ενός μοντέλου πεπερασμένων διαφορών, η επίλυση της ροής και των υπόλοιπων διεργασιών πραγματοποιείται με τις “συναρτήσεις βάσης” (basis functions). Πρόκειται

για εξισώσεις παρεμβολής με τις οποίες συσχετίζονται οι εξαρτώμενες μεταβλητές μεταξύ κόμβων και στοιχείων και συνήθως είναι γραμμικές (Anderson κ.α. 2015).

Μία ακόμη μέθοδος που χρησιμοποιείται στην επίλυση ροής υπόγειων συστημάτων ροών είναι η μέθοδος των πεπερασμένων όγκων (Finite Volume Method- FVM) και διατίθεται σε μαθηματικούς κώδικες υπόγειας ροής τα τελευταία χρόνια. Το πλέγμα που δημιουργείται σε αυτήν τη μέθοδο, παραμορφώνεται προκειμένου να «ταιριάξει» στη γεωμετρία του πεδίου ροής δημιουργώντας κυρτά πολύγωνα και μπορεί να γίνει πυκνότερο σε περιοχές που το φορτίο παρουσιάζει απότομες αλλαγές, οδηγώντας έτσι σε πιο ακριβή λύση (Bear & Cheng 2010). Η συγκεκριμένη μέθοδος έχει τα πλεονεκτήματα των προηγούμενων δύο μεθόδων καθώς ενώ ξεκινά με τη χρήση της βασικής θεωρίας των πεπερασμένων στοιχείων, καταλήγει στο να χρησιμοποιεί πεπερασμένες διαφορές και για να επιτευχθεί η επίλυση, το άθροισμα των ροών μάζας και ενέργειας στις πλευρές του κάθε πεπερασμένου όγκου πρέπει στην τελική λύση να ισούται με μηδέν (Σούλης 2015).

Οι περιορισμοί που αντιμετωπίστηκαν με τη χρήση πεπερασμένων διαφορών, κυρίως ως προς την απεικόνιση πολύπλοκων γεωλογικών σχηματισμών μπορούν να αντιμετωπιστούν με υβριδικές μεθόδους όπως είναι η μέθοδος όγκων ελέγχου και πεπερασμένων διαφορών (Control-Volume Finite-Difference- CVFD). Στην συγκεκριμένη μέθοδο ένα κελί μπορεί να συνδέεται υδραυλικά με περισσότερα των 6 κελιά (όπως συμβαίνει στα πεπερασμένα στοιχεία) καθώς υποστηρίζεται και η δημιουργία αδόμητου πλέγματος (unstructured grid) που διευκολύνει την απεικόνιση ακανόνιστων γεωλογικών και άλλων φυσικών και τεχνητών ορίων (Langevin et al. 2017).

Στον Πίνακα 1.1 παρουσιάζονται κώδικες και πλατφόρμες για την προσομοίωση διεργασιών και προβλημάτων που σχετίζονται με τα υπόγεια νερά.

Πίνακας 1.1 Μαθηματικοί κώδικες για την προσομοίωση της υπόγειας ροής

ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΣ ΚΩΔΙΚΑΣ	ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ	ΕΦΑΡΜΟΓΗ	ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΠΙΛΥΣΗΣ	ΕΛΕΥΘΕΡΗ ΔΙΑΘΕΣΗ/ ΕΜΠΟΡΙΚΗ	ΠΛΑΤΦΟΡΜΑ	
					ΕΛΕΥΘΕΡΗ	ΕΜΠΟΡΙΚΗ
MODFLOW (USGS-Harbaugh 2005)	3D	Προσομοίωση υπόγειας ροής	Πεπερασμένες Διαφορές	Ελεύθερος Κώδικας	<ul style="list-style-type: none"> <li>ModelMuse(USGS-Winston 2009)</li> <li>FREEWAT (Πρόσθετο εργαλείο στο ελεύθερο πρόγραμμα ΓΣΜ QGIS)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Visual MODFLOW Flex (Waterloo Hydraulics)</li> <li>Groundwater Vistas (STM Environmental)</li> <li>GMS - Groundwater Modeling System (AQUAVEO)</li> </ul>
MODFLOW 6	3D	Προσομοίωση υπόγειας ροής, Προσομοίωση μεταφοράς μάζας, Προσομοίωση ροής μεταβαλλόμενης πυκνότητας	Όγκοι ελέγχου και πεπερασμένες διαφορές	Ελεύθερος Κώδικας	<ul style="list-style-type: none"> <li>ModelMuse(USGS-Winston 2009)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Groundwater Vistas (STM Environmental)</li> </ul>
FEFLOW	3D	Προσομοίωση υπόγειας ροής, Προσομοίωση	Πεπερασμένα Στοιχεία	Εμπορικός κώδικας	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>Feflow (DHI MIKE Software)</li> </ul>

		μεταφοράς μάζας, Προσομοίωση μεταφοράς θερμότητας, Προσομοίωση ροής μεταβαλλόμενης πυκνότητας				
MT3DMS (Zheng & Wang, 1999)	3D	Προσομοίωση μεταφοράς μάζας	Πεπερασμένες Διαφορές	Ελεύθερος Κώδικας	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ModelMuse(USGS-Winston 2009)</li> <li>• FREEWAT (Πρόσθετο εργαλείο στο ελεύθερο πρόγραμμα ΓΣΜ QGIS)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Visual MODFLOW Flex (Waterloo Hydraulics)</li> <li>• Groundwater Vistas (STM Environmental)</li> <li>• GMS - Groundwater Modeling (System (AQUAVEO)</li> </ul>
SEAWAT (Langevin κ.α. 2007)	3D	Προσομοίωση ροής μεταβαλλόμενης πυκνότητας, Προσομοίωση μεταφοράς μάζας, Προσομοίωση	Πεπερασμένες Διαφορές	Ελεύθερος Κώδικας	<ul style="list-style-type: none"> <li>• FREEWAT (Πρόσθετο εργαλείο στο ελεύθερο πρόγραμμα ΓΣΜ QGIS)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Visual MODFLOW Flex (Waterloo Hydraulics)</li> <li>• Groundwater Vistas (STM Environmental)</li> <li>• GMS - Groundwater</li> </ul>

		μεταφοράς θερμότητας				Modeling System (AQUAVEO)
SUTRA (Voss & Provost 2010)	2D/3D	Προσομοίωση ροής μεταβαλλόμενης πυκνότητας, Προσομοίωση μεταφοράς μάζας, Προσομοίωση μεταφοράς ενέργειας	Πεπερασμένα Στοιχεία	Ελεύθερος Κώδικας	• ModelMuse(USGS- Winston 2009)	• Argus ONE (Argus Open Numerical Environments)
MODFLOW- SURFACT	3D	Προσομοίωση ροής μεταβαλλόμενης πυκνότητας, Προσομοίωση μεταφοράς μάζας, Προσομοίωση μεταφοράς θερμότητας	Πεπερασμένες διαφορές	Εμπορικός κώδικας	-	• Groundwater Vistas • Visual MODFLOW
OpenGeoSys (OGS)	3D	Προσομοίωση ροής μεταβαλλόμενης πυκνότητας,	Πεπερασμένα Στοιχεία	Ελεύθερος Κώδικας	• OpenGeoSys	-

		Προσομοίωση μεταφοράς μάζας, Προσομοίωση ροής μεταβαλλόμενης πυκνότητας, Προσομοίωση μεταφοράς θερμότητας				
--	--	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--	--	--	--

### **1.2.5 Θέσπιση διαχειριστικών στόχων**

Αναφορικά με τον ορισμό διαχειριστικών σχεδίων για τη διαφύλαξη ενός παράκτιου υδροφορέα, είναι απαραίτητο βάσει της ανάλυσης δεδομένων να προσδιοριστούν τα βασικά προβλήματα. Βασικά εργαλεία και κριτήρια αξιολόγησης για την κατάσταση ενός υπόγειου συστήματος αποτελούν οι σχετικές εθνικές ή διεθνείς πολιτικές και κανονισμοί για τα νερά. Στην Ευρώπη, η διαχείριση των νερών έχει θεσμοθετηθεί μέσω της Ευρωπαϊκής Οδηγίας Πλαίσιο 2000/60/ΕΚ η οποία έχει ενσωματωθεί στην Ελληνική νομοθεσία με το νόμο 3199/2003. Η οδηγία για τα υπόγεια νερά (2006/118/ΕΚ) σχετίζεται με την προστασία των υπόγειων νερών από τη ρύπανση και την υποβάθμιση και παρέχει βασικές πληροφορίες για τα ποιοτικά πρότυπα των υπογείων νερών όπως ορίζονται και στα αντίστοιχα παραρτήματα.

Σε κάθε περίπτωση, οι στόχοι που ορίζονται πρέπει να εξυπηρετούν τις ανάγκες τις εκάστοτε παράκτιας ζώνης και τις επιταγές των αρμόδιων εθνικών υπηρεσιών. Η διοργάνωση συμμετοχικών δραστηριοτήτων με τα ενδιαφερόμενα μέρη (χρήστες υπόγειου νερού, υπηρεσίες διαχείρισης υδάτων, φορείς διαχείρισης οικοσυστημάτων που εξαρτώνται από τα υπόγεια νερά κ.α.) με την καταγραφή των αναγκών και του οφέλους που θα έχει κάθε ομάδα είναι δυνατό να βοηθήσει στη διαδικασία θέσπισης βραχυπρόθεσμων και μακροπρόθεσμων στόχων (Venkata et al. 2013, Rouillard et al. 2022, Rangan 2016 )

## **1.3 Πρακτικές διαχείρισης παράκτιων υδροφορέων**

### **1.3.1 Διαχειριστικές συνιστώσες**

Σε μία γενικότερη θεώρηση, η διαχείριση των υδατικών πόρων αφορά το νομοθετικό πλαίσιο και τις τεχνολογικές πρακτικές (π.χ. κατασκευαστικά έργα και υποδομές) που ακολουθούνται για την ορθολογική χρήση, την βιωσιμότητα και την εξοικονόμηση του νερού. Οι υδροφορείς αποτελούν μέρος και αναπόσπαστο κομμάτι των υδατικών συστημάτων και είναι αναγκαίο, η διαχείριση τους να ενσωματώνεται στο ευρύτερο διαχειριστικό πλάνο, ως πόρος που επηρεάζει και επηρεάζεται άλλες επιφανειακές υδάτινες μάζες, ενώ είναι απαραίτητο κάθε πρακτική να καθοδηγείται από της αρμόδιες τοπικές και κρατικές αρχές όπως ορίζεται από το κάθε νομοθετικό πλαίσιο. Οι καλές και αποδοτικές διαχειριστικές πρακτικές εξετάζουν και αναγνωρίζουν την πολυπλοκότητα του φυσικού συστήματος παράλληλα με την οικονομικοκοινωνική διάσταση του ζητήματος, ενώ είναι ευέλικτες με κύριο γνώμονα τη βιωσιμότητα (Jiao & Post 2019).

Οι παράκτιοι υδροφορείς συνδέονται άμεσα με τον υδρολογικό κύκλο, τροφοδοτούμενοι από τις ανάντη λεκάνες απορροής από τις οποίες εξαρτώνται (εν μέρει) ποιοτικά και ποσοτικά ενώ



παράλληλα επηρεάζονται από τις φυσικές αλλαγές και την ανθρωπογενή παρέμβαση. Για τους παράκτιους υδροφορείς, οι πρακτικές διαχείρισης στοχεύουν κυρίως στην ελαχιστοποίηση του κινδύνου θαλάσσιας διείσδυσης, στην υπεράντληση των αποθεμάτων γλυκού νερού και στις δυσμενείς επιπτώσεις που επέρχονται σε οικοσυστήματα που εξαρτώνται από αυτούς (Werner κ.α. 2011).

Η διαχείριση των παράκτιων υδροφορέων στη βιβλιογραφία επικεντρώνεται σε μεθόδους που εφαρμόζονται για την αναχαίτηση της θαλάσσιας διείσδυσης (Bear et al. 1999, Cheng & Ouazar 2003, Todd & Mays 2004, Werner et al. 2013) οι οποίες τελικά συμβάλουν στη γενικότερη ποιοτική, ποσοτική αναβάθμιση και εξυγίανση των υπόγειων αποθεμάτων γλυκού νερού. Οι διαχειριστικές πρακτικές που εφαρμόζονται μπορούν να διακριθούν σε «μη κατασκευαστικές» και «κατασκευαστικές».

### **1.3.2 Μη κατασκευαστικές μέθοδοι**

#### 1.3.2.1 Μείωση αντλήσεων

Το πιο άμεσο, απλό και οικονομικά αποδοτικό μέτρο για τον περιορισμό της θαλάσσιας διείσδυσης είναι η μείωση των αντλήσεων, καθώς όπως ειπώθηκε και παραπάνω, η υπεράντληση των παράκτιων υδροφορέων είναι ο παράγοντας που επηρεάζει περισσότερο την εξέλιξη του φαινομένου (Ferguson & Gleeso 2012).

Παρά την απλότητα του μέτρου, η εφαρμογή του είναι μάλλον δύσκολη καθώς πρέπει να εξασφαλιστεί η κάλυψη των αντίστοιχων ποσοτήτων νερού από άλλες πηγές που πιθανότητα είναι δυσεύρετες ή κοστοβόρες (π.χ. αφαλάτωση) ενώ παράλληλα πρέπει να καλύπτουν και τις ποιοτικές προδιαγραφές που απαιτούνται ανάλογα με τη χρήση (ύδρευση, άρδευση, βιομηχανία κ.τ.λ.). Για το λόγο αυτό δεν εντοπίζονται πολλές εφαρμογές αυτού του μέτρου παρά μόνο σε περιπτώσεις που η αύξηση της αλατότητας οδήγησε σε παύση των αντλήσεων σε έναν αριθμό πηγαδιών με αποτέλεσμα την μελλοντική μερική αναχαίτηση της θαλάσσιας διείσδυσης (Han et al. 2015).

#### 1.3.2.2 Προγραμματισμός αντλήσεων και βελτιστοποίηση

Η θέσπιση προγράμματος και η αλλαγή στο καθεστώς αντλήσεων χρησιμοποιείται ως τεχνική για την αναβάθμιση παράκτιων υδροφορέων που προσβάλλονται από τη θαλάσσια διείσδυση. Η βασική προσέγγιση αφορά στην άντληση νερού από πηγάδια που βρίσκονται σε μεγαλύτερη απόσταση από την ακτή, προς την ενδοχώρα, κατά τη διάρκεια της ξηρής περιόδου, ενώ κατά την υγρή περίοδο ο όγκος που αντλείται μετατίθεται κοντά στην ακτή, όταν η στάθμη του υδροφόρου στρώματος βρίσκεται σε υψηλότερα επίπεδα (Kallioras et al. 2013). Το μέτρο φαίνεται να έχει εφαρμοστεί με επιτυχία κατά το παρελθόν αφού η συγκεκριμένη στρατηγική επιτρέπει την αύξηση του όγκου των αντλήσεων χωρίς να προκαλείται περαιτέρω θαλάσσια διείσδυση (Robins et al. 1999, Headworth &

Fox 1986) ενώ αντίστοιχα σενάρια έχουν μελετηθεί και μέσω μαθηματικών μοντέλων (π.χ. Dibaj et al. 2020).

Η σύγχρονη έρευνα σχετικά με την αλλαγή του προγράμματος των αντλήσεων επικεντρώνεται στη χρήση μεθόδων βελτιστοποίησης, σε συνδυασμό με τη προσομοίωση της ροής και την εφαρμογή διαχειριστικών σεναρίων με μαθηματικούς κώδικες. Στο πλαίσιο μοντελοποίησης προσομοίωση – βελτιστοποίηση ως προς τις αντλήσεις, ο διαχειριστικός στόχος είναι η μεγιστοποίηση του ρυθμού άντλησης υπογείου νερού από υφιστάμενα πηγάδια/ γεωτρήσεις ενώ παράλληλα περιορίζεται το μέτωπο της θαλάσσιας διείσδυσης σε περιοχές προς την παράκτια ζώνη (Karatzas & Dokou 2015, Kontos & Katsifarakis 2017).

#### 1.3.2.3 Αλλαγή καλλιέργειας/ χρήσεων γης

Η φυσική τροφοδοσία ενός υδροφορέα καθορίζεται άμεσα από τις χρήσεις γης που επικρατούν σε μία περιοχή. Καθορίζουν το ρυθμό διείσδυσης του νερού στην ακόρεστη ζώνη και μετέπειτα στον υδροφορέα ενώ παράλληλα κατά ένα βαθμό ρυθμίζουν και το ρυθμό άντλησης. Στα παράκτια συστήματα, η φυσική επιφανειακή τροφοδοσία καθορίζει σε μεγάλο βαθμό και το ρυθμό διείσδυσης της θάλασσας στην ενδοχώρα. Κατασταλτικό μέτρο για το μετριασμό της εισροής θαλασσινού νερού και την μείωση της αλατότητας είναι ο κατάλληλος σχεδιασμός των χρήσεων γης. Οι Galvis-Rodriguez et al. (2017) παρατήρησαν ότι κατά την αλλαγή χρήσης γης στο νησί Bonriki (Kiribati) με την αντικατάσταση των φοινικόδεντρων με φωτοβολταϊκές μονάδες, η φυσική τροφοδοσία από βροχόπτωση αυξήθηκε κατά 22% ( από 54% σε 76%). Ιδιαίτερα σε γεωργικές περιοχές που η βασική χρήση του υπόγειου νερού είναι η άρδευση, η αλλαγή καλλιεργειών μπορεί να αποδειχτεί ωφέλιμη για την ποιοτική και ποσοτική κατάσταση του υδροφορέα. Οι εναλλακτικές γεωργικές πρακτικές αφορούν την επιλογή φυτών πιο ανεκτικών στο αλάτι με χαμηλότερες υδατικές ανάγκες σε συνδυασμό με την εφαρμογή προηγμένων τεχνικών καλλιέργειας που μειώνουν την κατανάλωση νερού (Nhung et al. 2019).

### **1.3.3 Κατασκευαστικές μέθοδοι**

Πρόκειται κυρίως για μεθόδους με μεγάλο κόστος κατασκευής, συντήρησης και λειτουργίας, επομένως θα πρέπει να εφαρμόζονται μετά από διεξοδική έρευνα των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών του υδροφόρου σχηματισμού και της ποιοτικής και ποσοτικής του κατάστασης, του μηχανισμού της θαλάσσιας διείσδυσης αλλά των κατασκευαστικών παραμέτρων κάθε μεθόδου. Σημαντικό κομμάτι σε αυτή τη διαδικασία είναι η μοντελοποίηση και προσομοίωση της ροής του υδροφορέα και της κίνησης του ρύπου (θαλάσσια διείσδυση) έτσι ώστε να διερευνηθεί η κατάλληλη μέθοδος για το υπό μελέτη παράκτιο σύστημα.

### 1.3.3.1 Τεχνητά Φράγματα

Η βασική ιδέα της κατασκευής φραγμάτων κατά μήκος της ακτής έγκειται τόσο στη μείωση της ροής γλυκού νερού προς τη θάλασσα όσο και στην παρεμπόδιση της θάλασσας να εισχωρήσει στον υδροφορέα. Οι βασικές κατηγορίες που αναφέρονται στη βιβλιογραφία είναι τα υδραυλικά και τα τεχνητά (π.χ. Todd 1974, Bruington 1972, Jiao & Post 2019, Kallioras et al. 2013).

Τα τεχνητά φράγματα είναι υπόγειες αδιαπέρατες ή ημι-περατές κατασκευές παράλληλες προς την ακτή (κατασκευή κουρτίνας από πασσαλοσανίδες, κατασκευή τάφρων από άργιλο, εισπίεση μέσω γεωτρήσεων νερού και τσιμέντου ή αργίλου) που διακόπτουν την υδραυλική επικοινωνία μεταξύ υδροφορέα και θάλασσας. Στην ξένη βιβλιογραφία ταξινομούνται σε δύο κατηγορίες ως «υπόγεια φράγματα» (subsurface dams) και τοίχοι στεγανότητας (cut-off walls) (Luyun et al. 2011, Kaleris & Ziogas 2013). Η βασική διαφορά τους έγκειται στο ότι οι τοίχοι στεγανότητας εκτείνονται από την κορυφή του υδροφορέα σε κάποιο προκαθορισμένο βάθος ενώ τα υπόγεια φράγματα κατασκευάζονται στη βάση και εκτείνονται προς την επιφάνει του υδροφορέα. Η αποδοτικότητα των συγκεκριμένων μέτρων και τα μειονεκτήματά τους μελετώνται μέσω πειραματικών διατάξεων και μαθηματικών μοντέλων (Nishigaki et al. 2004, Abdoulhalik et al. 2017, Strack et al. 2016). Οι Abd-Elaty et al., στην έρευνα τους για τα τεχνητά φράγματα στον υδροφορέα Biscayne της Φλόριντα (Η.Π.Α.) καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι οι τοίχοι στεγανότητας επιβραδύνουν περισσότερο το φαινόμενο της θαλάσσιας διείσδυσης από ότι τα υπόγεια φράγματα ενώ σύμφωνα με τους Abdoulhalik et al. (2017) ο συνδυασμός των δύο μεθόδων μπορεί να επιφέρει σημαντικά μεγαλύτερη μείωση της θαλάσσιας διείσδυσης από τη χρήση της κάθε μεθόδου μεμονωμένα. Για την εφαρμογή του συγκεκριμένου μέτρου, κάθε μελέτη περίπτωσης θα πρέπει να ερευνηθεί διεξοδικά λόγω των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών κάθε υπόγειου υδροφόρου συστήματος αλλά και βάσει των κατασκευαστικών χαρακτηριστικών των φραγμάτων.

### 1.3.3.2 Υδραυλικοί Φραγμοί

Πρόκειται για γεωτρήσεις εισπίεσης ή άντλησης νερού διατεταγμένες σε σειρά.

Οι φραγμοί εμπλουτισμού όπως ονομάζονται (injection barriers ή positive hydraulic barrier), δημιουργούνται εισπιάζοντας γλυκό νερό μέσω των γεωτρήσεων έτσι ώστε να δημιουργηθεί μία ζώνη με υψηλότερο υδραυλικό φορτίο μεταξύ της ακτής και της ενδοχώρας όπου συγκεντρώνονται και οι περισσότερες αντλήσεις (Todd 1974). Η μέθοδος έχει μελετηθεί και αξιολογηθεί από αρκετούς ερευνητές και θεωρείται ως μία βιώσιμη μέθοδος για την αποκατάσταση παράκτιου υδροφορέα λόγω της θαλάσσιας διείσδυσης (Abarca et al. 2006, Botero-Acosta & Donado 2015, Luyun et al. 2011). Βασικό μειονέκτημα είναι η ανάγκη επαρκούς ποσότητας γλυκού νερού (Mahesha 2001), ενώ η ποιότητα του εισπιαζόμενου νερού θα πρέπει να πληρεί τα περιβαλλοντικά κριτήρια βάσει του νομοθετικού πλαισίου που διέπει τα υπόγεια νερά.

Οι φραγμοί άντλησης (extraction barriers ή negative hydraulic barriers) διαμορφώνονται από μία σειρά γεωτρήσεων εγκατεστημένα κοντά και παράλληλα στην ακτογραμμή από τα οποία αντλείται υφάλμυρο νερό, δημιουργώντας ένα πιεζομετρικό βύθισμα το οποίο αναχαιτίζει την εισροή θαλασσινού νερού προς την ενδοχώρα (Todd 1974). Κρίσιμη παράμετρος που πρέπει να εξεταστεί κατά την εφαρμογή του μέτρου είναι ο ρυθμός άντλησης υφάλμυρου νερού προκειμένου να μην εισχωρήσει αρκετά προς στην ενδοχώρα (Pool & Carrera 2010).

Οι δύο προσεγγίσεις έχουν συνδυαστεί δημιουργώντας ένα μεικτό σύστημα υδραυλικών φραγμών όπου ο φραγμός εμπλουτισμού τοποθετείται μεταξύ της ακτογραμμής και του φραγμού άντλησης ή το αντίστροφο, το οποίο και θεωρείται ως ένα αποτελεσματικό μέτρο κατά της θαλάσσιας διείσδυσης (π.χ. Lu et al. 2012, Abd-Elhamid & Javadi 2011, Ebeling et al. 2019). Βασικό συμπέρασμα των Ebeling et al. (2019) για τη συγκεκριμένη μέθοδο είναι ότι η χωροθέτηση του φραγμού εμπλουτισμού εντός του «ποδιού» της διεπιπέδυνας ενέχει τον κίνδυνο συσσώρευσης αλάτων προς την ενδοχώρα, ενώ η μέθοδος είναι πιο αποτελεσματική από ένα απλό φραγμό άντλησης και η αποκατάσταση του παράκτιου υδροφορέα με μικτούς υδραυλικούς φραγμούς είναι εφικτή εάν εφαρμοστεί σύμφωνα με τις τοπικές συνθήκες και τα χαρακτηριστικά του υδροφορέα.

#### 1.3.3.3 Διαχείριση του Εμπλουτισμού των Υδροφορέων

Είναι μία από τις πιο συνήθεις πρακτικές διαχείρισης ποιοτικά και ποσοτικά υποβαθμισμένων συστημάτων που εφαρμόζεται τόσο σε ηπειρωτικούς όσο και σε παράκτιους υδροφορείς (που προσβάλλονται από θαλάσσια διείσδυση). Σε αυτήν την ομάδα συμπεριλαμβάνονται πολλές διαφορετικές μέθοδοι και τεχνικές οι οποίες ερευνώνται βιβλιογραφικά και αναλύονται στο παρακάτω υποκεφάλαιο στο πλαίσιο του αντικειμένου της παρούσας διατριβής που πραγματεύεται την διαχείριση ενός παράκτιου συστήματος μέσω της διαχείρισης του εμπλουτισμού υδροφορέων.

## 1.4 Διαχείριση Εμπλουτισμού Υδροφορέων σε παράκτια υδροσυστήματα

Διαχείριση Εμπλουτισμού Υδροφορέων (Managed Aquifer Recharge-MAR) είναι η ανθρωπογενής ελεγχόμενη τροφοδοσία γλυκού νερού μέσα σε ένα ρυπασμένο ή/και ποσοτικά υποβαθμισμένο υδροφόρο σύστημα που στοχεύει στην (i) αποκατάσταση του συστήματος -ποιοτικά και ποσοτικά- ή/και (ii) στην αποθήκευση γλυκού νερού με στόχο τη μελλοντική του χρήση (iii) στη διατήρηση φυσικών συστημάτων που εξαρτώνται από τα υπόγεια νερά. Μεταξύ των προαναφερθέντων στρατηγικών, οι τεχνικές T.E. έχουν ένα ευρύ φάσμα δυνατότητας εφαρμογής στους παράκτιους υδροφορείς ως μέτρο διαχείρισης και ελέγχου της θαλάσσιας διείσδυσης καθώς και για την αποκατάσταση της ισορροπίας των υπόγειων νερών.

Η διαχείριση του εμπλουτισμού υδροφορέων έχει οριστεί εναλλακτικά από τον Dillon (2009) ως η σκόπιμη επαναφόρτιση νερού στον υδροφορέα για μετέπειτα ανάκτηση ή για περιβαλλοντικό όφελος. Ο ορισμός αυτός διαχωρίζει ξεκάθαρα την τροφοδοσία που επέρχεται εξαιτίας άλλων ανθρώπινων δραστηριοτήτων που μπορούν επίσης να αυξήσουν την τροφοδοσία των υπόγειων νερών χωρίς κάποιο σχεδιασμό, με ακούσιους τρόπους και χωρίς διαχειριστικό πλάνο. Το αποτέλεσμα τέτοιων δραστηριοτήτων μπορεί να επιφέρει αρνητικές επιπτώσεις στον υδροφορέα όπως υπερχειλίση, αύξηση της αλατότητας ή ποιοτική υποβάθμιση ενώ πρόκειται για νερά που προέρχονται από διαρροές σωλήνων και υπονόμων, σηπτικές δεξαμενές και λύματα που απορρίπτονται ελεύθερα στο περιβάλλον από δήμους ή βιομηχανίες χωρίς προγενέστερη επεξεργασία (Dillon et al. 2019). Ο Maliva (2020) προτείνει τον γενικό όρο “anthropogenic aquifer recharge” (AAR) ή “ανθρωπογενής εμπλουτισμός υδροφορέα” για να περιγράψει την αύξηση της τροφοδοσίας των υπόγειων νερών που προκαλείται από ανθρώπινες δραστηριότητες ενώ σημειώνει ότι οι τεχνικές T.E. είναι ένα υποσύνολο του AAR. Η διαχείριση του εμπλουτισμού υδροφορέων είναι ελεγχόμενη, τόσο από άποψη ποσότητας εμπλουτισμού όσο και ποιότητας του εισερχόμενου νερού στο υδροφόρο σύστημα.

Κατά την επιλογή του τεχνητού εμπλουτισμού ως διαχειριστική πρακτική για έναν υδροφορέα, δύο είναι τα βασικά ζητήματα που προκύπτουν ως διαχειριστικές συνιστώσες: (i) η πηγή τροφοδοσίας και η ποιότητα του νερού εμπλουτισμού (ii) η επιλογή της κατάλληλης τεχνικής.

#### **1.4.1 Θέματα ποιότητας νερού και πηγές τροφοδοσίας νερού εμπλουτισμού**

Απαραίτητη προϋπόθεση για τη διαχείριση ενός υδροφορέα μέσω τεχνικών διαχείρισης του εμπλουτισμού είναι η διαθεσιμότητα μιας πηγής νερού κατάλληλης ποιότητας και σε επαρκή ποσότητα.

Τα υπόγεια νερά που δεν έχουν επηρεαστεί από ανθρωπογενή ρύπανση, συνήθως θεωρούνται νερά πολύ καλής ποιότητας βάσει χημικής και μικροβιολογικής σύστασης. Ωστόσο, ένας υδροφορέας μπορεί να περιέχει υψηλές συγκεντρώσεις ιόντων και βαρέων μετάλλων (π.χ. σίδηρο, μαγνήσιο, αρσενικό, χρώμιο, υψηλή αλατότητα) εξαιτίας φυσικών διεργασιών και παραγόντων (π.χ. χημική σύσταση μητρικού πετρώματος) έτσι ώστε η χρήση του να καθίσταται ακατάλληλη. Επομένως, κατά την εξέταση του αντικτύπου που θα έχει η εφαρμογή διαχείρισης του εμπλουτισμού σε ένα συγκεκριμένο υδρογεωλογικό σύστημα είναι αναγκαίο να κατανοήσουμε τη φυσική ποιοτική κατάσταση των υπόγειων νερών, τις επιπτώσεις από την ανθρώπινη δραστηριότητα και τις διαδικασίες που ελέγχουν την ποιότητα (Gale 2005) προτού κάποιος προβεί στην εφαρμογή κάποιας τεχνικής T.E.. Σημαντική παράμετρος είναι και η ποιοτική κατάσταση που ορίζεται ως στόχος για τον υδροφορέα μέσω της εφαρμογής διαχείρισης του εμπλουτισμού υδροφορέα προκειμένου οι

συγκεντρώσεις ιόντων και μικροοργανισμών να είναι αντίστοιχες των ορίων που έχουν θεσπιστεί ανάλογα με τη χρήση που επιδιώκεται αλλά και αυτών που έχουν θεσπιστεί για την ποιότητα του υπόγειου νερού, μέσα από επιστημονικές έρευνες, ευρωπαϊκές οδηγίες και νομοθετικές ρυθμίσεις (π.χ. Ευρωπαϊκή οδηγία 2020/2184, Ευρωπαϊκής Οδηγίας Πλαίσιο 2000/60/ΕΚ, Ευρωπαϊκή οδηγία για τα υπόγεια νερά 2006/118/ΕΚ, Ν. 3199/2003, FAO 1985).

Φυσικά, η ποιοτική αναβάθμιση του υδροφορέα δεν θα επιτευχθεί αν το εισερχόμενο νερό εμπλουτισμού είναι κακής ποιότητας με συγκεντρώσεις άνω των επιτρεπόμενων ορίων ή ένα δεν επιδέχεται κάποια επεξεργασία προτού εισαχθεί στον υδροφορέα. Όπως αναφέρουν και οι Dillon et al. (2019), διαχείριση του εμπλουτισμού υδροφορέων σημαίνει αποτελεσματική διαχείριση τόσο της ποσότητας όσο και της ποιότητας του εισερχόμενου νερού. Η ζητούμενη ποιότητα του εισερχόμενου νερού εξαρτάται και από την τεχνική του εμπλουτισμού (οι οποίες αναφέρονται παρακάτω) που θα χρησιμοποιηθεί, βάσει του αν θα εισαχθεί στο σύστημα απευθείας μέσω γεωτρήσεων ή εάν διηθηθεί μέσω του εδαφικού μανδύα που λειτουργεί ως φυσικό φίλτρο.

Οι πηγές νερού για τη διαχείριση του εμπλουτισμού υδροφορέων, στο παρελθόν ήταν κυρίως επιφανειακό νερό (Sprenger et al. 2017) ενώ πλέον χρησιμοποιούνται εναλλακτικές πηγές τροφοδοσίας ανάλογα με τη διαθεσιμότητά τους όπως είναι το νερό αφαλάτωσης, κυρίως σε άνυδρες περιοχές (Parimalarenganayaki 2021, Ganot et al. 2018), το ανακτημένο νερό (δευτέρου ή τρίτου βαθμού επεξεργασίας) που προέρχεται από αστικά ή βιομηχανικά λύματα (Bekele et al. 2013, Abiye et al. 2009, Maliva et al. 2011, Zuurbier et al. 2018) και το βρόχινο νερό (όμβρια ύδατα) ιδιαίτερα σε αστικές περιοχές όπου οι περατές επιφάνειες έχουν μειωθεί λόγω πυκνής δόμησης (Vanderzalm et al. 2011, Voisin et al. 2018). Η επαναχρησιμοποίηση ανακτημένου νερού ως νερό εμπλουτισμού ενθαρρύνεται στο πλαίσιο της βιώσιμης και ολοκληρωμένης διαχείρισης υδατικών πόρων μίας περιοχής αλλά είναι αναγκαίο να ακολουθούνται τα ποιοτικά χαρακτηριστικά βάσει της ευρωπαϊκής και εθνικής νομοθεσίας για την αποφυγή ρύπανσης των υπόγειων υδροσυστημάτων. Στην Ελλάδα η επαναχρησιμοποίηση υγρών αποβλήτων για τον εμπλουτισμό υπογείων νερών, νομοθετείται και καθορίζεται υπό τις προϋποθέσεις των διατάξεων του άρθρου 7 του Π.Δ. 51/2-3-2007 και του της Κ.Υ.Α. 145116/2011.

#### **1.4.2 Τεχνικές διαχείρισης εμπλουτισμού υδροφορέων**

Οι Dillon et al. (2019) και οι Stefan & Ansems (2018) κατηγοριοποιούν τις τεχνικές εμπλουτισμού σε πέντε ευρύτερες ομάδες που περιλαμβάνουν τις μεθόδους διαμόρφωσης υδατορέματος, διήθησης μέσω κοίτης ποταμού, εμπλουτισμός από την επιφάνεια, πηγάδια εμπλουτισμού, συγκέντρωση ομβρίων/απορροής. Στην ελληνική και ξένη βιβλιογραφία (π.χ. Καλλέργης 1986, Todd 1980, Dillon 2005, Maliva 2020) οι διάφορες τεχνικές εμπλουτισμού χωρίζονται κυρίως βάσει των

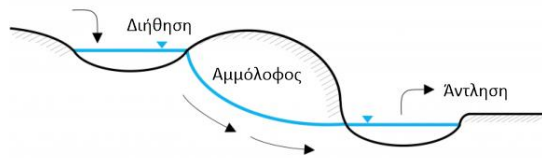
προαναφερθέντων κατηγοριών, αλλά η ορολογία μπορεί να αλλάζει σε διαφορετικές βιβλιογραφικές πηγές ενώ μέθοδοι με παρόμοια χαρακτηριστικά εφαρμογής πολλές φορές συγχέονται σε μία ορολογία.

Πιο αναλυτικά, οι επιμέρους τεχνικές όπως αναφέρει ο Dillon (2005) στο άρθρο του παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.2.

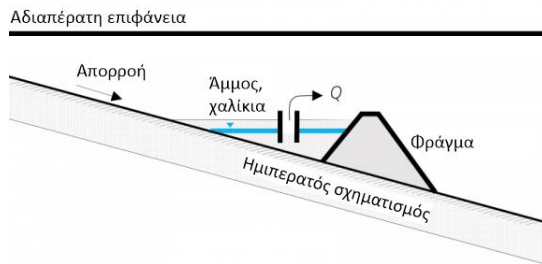
Μεταξύ άλλων στρατηγικών, οι τεχνικές διαχείρισης του εμπλουτισμού υδροφορέων έχουν ευρύ φάσμα εφαρμογής στους παράκτιους υδροφορείς ως μέτρο διαχείρισης και ελέγχου της διείσδυσης θαλασσινού νερού καθώς και για την αποκατάσταση της ισορροπίας των υπόγειων νερών (Malina 2020). Όλες αυτές οι πρακτικές για τα υπόγεια νερά έχουν περιορισμούς, ανάλογα με την διαθεσιμότητα νερού εμπλουτισμού (ποσοτικά και ποιοτικά), την ποιότητα του νερού του υδροφορέα και τις τοπικές γεωλογικές και υδρογεωλογικές συνθήκες (Πλιάκας 1998). Η επιτυχημένη εφαρμογή των διαφόρων τεχνικών διαχείρισης του εμπλουτισμού υδροφορέων έγκειται στην επιλογή και προσαρμογή της μεθόδου στα δεδομένα της εκάστοτε περιοχής μελέτης.

Πίνακας 1.2 Μέθοδοι διαχείρισης του εμπλουτισμού υδροφορέων (Πηγή: <https://inowas.com/category/mar-methods/> με τροποποιήσεις)

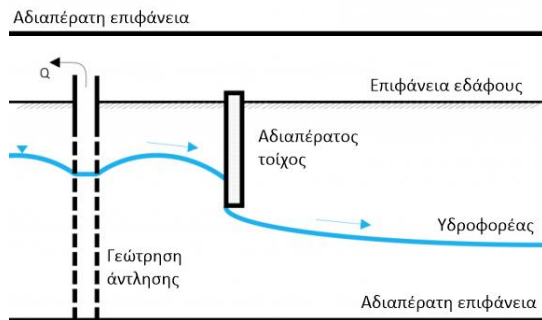
**ΜΕΘΟΔΟΙ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗΣ ΥΔΑΤΟΡΕΜΑΤΟΣ**



*Διήθηση μέσα από αμμοθίνες (Dune filtration):* διήθηση νερού από λεκάνες κατασκευασμένες σε αμμοθίνες, όπου στη συνέχεια το νερό εξάγεται από πηγάδια ή λεκάνες σε χαμηλότερο υψόμετρο (Dillon 2005)

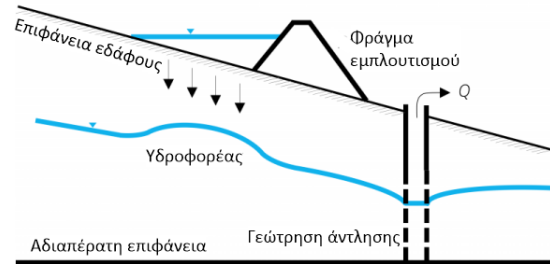


*Φράγματα άμμου (Sand dams):* κατασκευάζονται σε ξηρές περιοχές σε σχηματισμούς χαμηλής περατότητας σε εφήμερα ρέματα με αμμώδη κοίτη. Τα φράγματα παγιδεύουν τα ιζήματα που μεταφέρονται με το νερό και σε εκτεταμένη πλημμύρα ο όγκος των φερτών ιζημάτων δημιουργεί έναν αμμώδη υδροφόρα ο οποίος μπορεί να αντληθεί κατά τη ξηρή περίοδο (π.χ. Ryan and Elsner 2016)



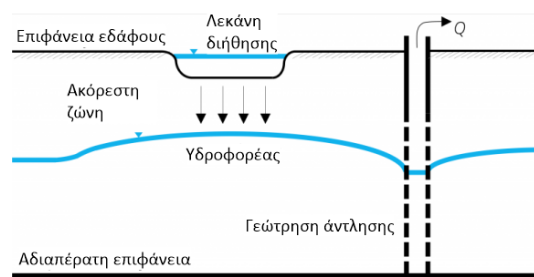
*Υπόγειοι φραγμοί (underground/ subsurface dams):* είναι τοίχοι χαμηλής περατότητας που κατασκευάζονται υπογείως. Αυτές οι κατασκευές μειώνουν ή αποκόπτουν την πλευρική ροή του υπόγειου νερού προκειμένου να αποθηκεύεται το νερό στο υπέδαφος και να ανυψώνεται η στάθμη του υδροφόρα (π.χ. Janardhana κ.α. 2013)





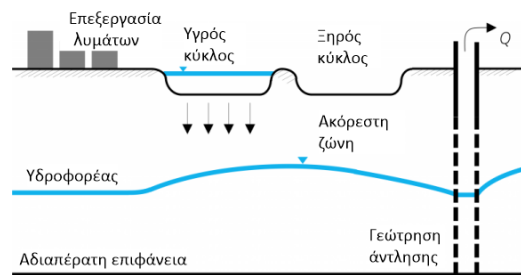
*Φράγματα εμπλουτισμού ή Φράγματα με διαρροή (Leaky or recharge dams):* κατασκευάζονται σε υδατορέματα εφήμερης ροής έτσι ώστε να συγκρατήσουν το νερό της πλημμύρας, ενώ στη συνέχεια το αποθηκευμένο νερό απελευθερώνεται με αργό ρυθμό στην κοίτη του ρέματος, κατάντη του φράγματος έτσι ώστε να διηθείται στον υδροφόρα. (π.χ. Ashraf & Sheikh, 2017)

### ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ



*Λεκάνες εμπλουτισμού/διήθησης (Percolation Tanks/Ponds):* συγκέντρωση νερού σε τεχνητές λεκάνες όπου διηθείται το νερό στον υδροφόρα και στη συνέχεια αντλείται και ανακτάται στην κατάντη περιοχή (Sukhija et al. 2005, Christy and Lakshmanan 2016)

*Λεκάνες διήθησης (Infiltration ponds):* κατασκευάζονται συνήθως εκτός υδατορέματος όπου το επιφανειακό νερό εκτρέπεται στη λεκάνη και διηθείται στον υδροφόρα (π.χ. Ganot et al. 2017, Ganot et al. 2018, Tzoraki et al. 2018)



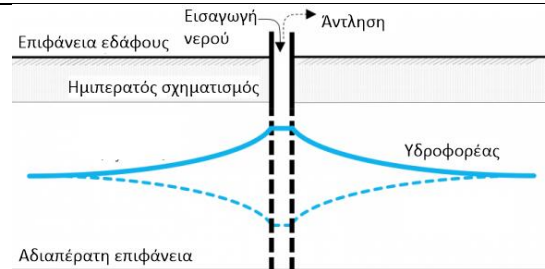
*Συστήματα επεξεργασίας εδάφους-υδροφόρα (Soil Aquifer Treatment Systems, SAT):* ανακτημένο νερό λυμάτων διοχετεύεται σε τεχνητές λεκάνες (σκάμματα) και διηθείται στον υδροφόρα ενώ παράλληλα επιτυγχάνεται μείωση του φορτίου BOD και μικροοργανισμών μέσω της ακόρεστης ζώνης που λειτουργεί ως γεωφίλτρο (π.χ. Grinshpan et al. 2021)

**ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΣ ΣΕ ΚΟΙΤΗ ΠΟΤΑΜΟΥ**

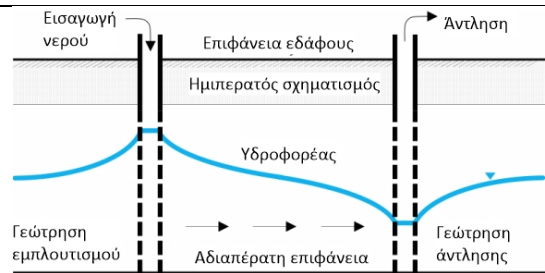


*Διήθηση μέσω κοιτής ποταμού (Bank Filtration):* άντληση υπογείου νερού από γεώτρηση που βρίσκεται κοντά ή κάτω από ποταμό προκειμένου το επιφανειακό νερό να διηθηθεί στον υδροφόρεα μέσω της κοιτής που λειτουργεί ως φυσικό γεωφίλτρο. Η άντληση από γεωτρήσεις κοντά στο πηγάδι μειώνουν το υδραυλικό φορτίο στην περιοχή με αποτέλεσμα η στάθμη του ποταμού να είναι σε υψηλότερο επίπεδο και το νερό να διηθείται στον υδροφόρεα (Casanova et al. 2020, Pliakas et al. 2005).

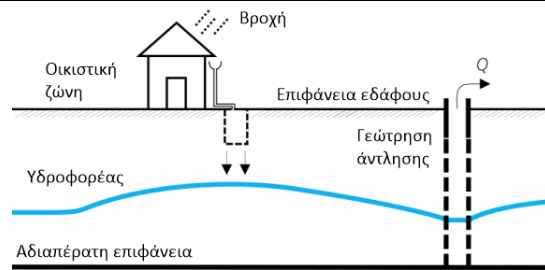
**ΠΗΓΑΔΙΑ/ ΓΕΩΤΡΗΣΕΙΣ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΥ**



*Γεωτρήσεις αποθήκευσης-άντλησης:* εισπίεση νερού σε γεώτρηση για αποθήκευση και ανάκτηση από την ίδια γεώτρηση (Aquifer Storage and Recovery- ASR) είτε από διαφορετική γεώτρηση (Aquifer storage transfer and recovery - ASTR) προκειμένου να επιτευχθεί μεγαλύτερη επεξεργασία νερού αφού διαπεράσει μέρος του υδροφόρεα. Σε αυτές τις μεθόδους, η ποιότητα του εισερχόμενου νερού πρέπει να παρακολουθείται συχνά για να αποφευχθεί ρύπανση του υδροφόρεα (π.χ. Casanova κ.α. 2020, Zuurbier et al. 2018, Ginkel et al. 2014, Ryne 2015, Missimer et al. 2017)



**ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΚΑΙ ΣΥΛΛΟΓΗ ΟΜΒΡΙΩΝ**



*Συγκέντρωση ομβρίων (Rainwater harvesting):* η απορροή της βροχής συλλέγεται από τις οροφές των κατασκευών και στη συνέχεια οδηγείται σε δεξαμενή όπου διαπερνάει από φίλτρο χαλλικιών ή άμμου και στη συνέχεια κατεισδύει στον υδροφορέα (π.χ. Costa κ.α. 2020, Hasan et al. 2018)

### **1.4.3 Παράκτιοι υδροφορείς και διαχείριση εμπλουτισμού των υδροφορέων – Περιπτώσεις μελέτης**

Μεταξύ άλλων στρατηγικών, οι τεχνικές διαχείρισης του εμπλουτισμού των υδροφορέων έχουν ευρύ φάσμα εφαρμογής στους παράκτιους υδροφορείς ως μέτρο διαχείρισης και ελέγχου της διείσδυσης θαλασσινού νερού καθώς και για την αποκατάσταση της ισορροπίας των υπόγειων νερών (Maliva 2020). Στις πρακτικές τεχνικές διαχείρισης του εμπλουτισμού των υδροφορέων σε παράκτια περιβάλλοντα που αναφέρονται στην βιβλιογραφία, εξετάζονται τα αποτελέσματα της μεθόδου που χρησιμοποιούν είτε σε πρακτικό επίπεδο με μελέτες περίπτωσης ευρείας κλίμακας ή πιλοτικής, είτε σε θεωρητικό επίπεδο μέσω μαθηματικών μοντέλων. Όλες αυτές οι πρακτικές για τα υπόγεια νερά έχουν περιορισμούς, ανάλογα με την διαθεσιμότητα νερού εμπλουτισμού (ποσοτικά και ποιοτικά), την ποιότητα του νερού του υδροφορέα και τις τοπικές γεωλογικές και υδρογεωλογικές συνθήκες. Η επιτυχημένη εφαρμογή των διαφόρων τεχνικών διαχείρισης του εμπλουτισμού των υδροφορέων έγκειται στην επιλογή και προσαρμογή της μεθόδου στα δεδομένα της εκάστοτε περιοχής μελέτης.

Οι Ganot et al. (2018) στην έρευνα τους εξετάζουν την χρήση νερού αφαλάτωσης στις υφιστάμενες εγκαταστάσεις τεχνητού εμπλουτισμού Menash, στον παράκτιο Ισραηλινό υδροφορέα ο οποίος εμφανίζει υψηλές συγκεντρώσεις αλάτων λόγω θαλάσσιας διείσδυσης και διείσδυσης υφάλμυρου νερού από υπερκείμενους σχηματισμούς (Shavit & Furman 2001). Οι εγκαταστάσεις περιλαμβάνουν την εκτροπή του υδατορέματος εφήμερης ροής Menashe Heights σε λεκάνη καθίζησης και στη συνέχεια το νερό οδηγείται σε τρεις λεκάνες εμπλουτισμού (infiltration ponds) όπου και κατεισδύει στον αμμώδη σχηματισμό της περιοχής. Οι Ganot et al. (2018) επιβεβαιώνουν την αποδοτικότητα του συστήματος MAR με τη χρήση του περισσεύματος νερού αφαλάτωσης στη μονάδα του τεχνητού εμπλουτισμού, με τη χρήση δεικτών σταθερών ισotόπων και του μαθηματικού κώδικα υπόγειας ροής MODFLOW και μεταφοράς μάζας MT3DMS εκμεταλλευόμενοι τις διαφορετικές τιμές των δεικτών  $\delta^2\text{H}$  και  $\delta^{18}\text{O}$  μεταξύ νερού αφαλάτωσης και νερού υδροφορέα. Τα αποτελέσματα τους για την προσομοίωση της λειτουργίας του τεχνητού εμπλουτισμού με νερό αφαλάτωσης για διάρκεια 50 ετών δείχνουν ότι το μεγαλύτερο μέρος του επαναφορτισμένου αφαλατωμένου νερού (94%) ανακτάται από τα φρεάτια παραγωγής, υποδεικνύοντας την αποτελεσματικότητα της υποδομής διαχείρισης του εμπλουτισμού των υδροφορέα στην περιοχή Menashe.

Οι García-Menendez et al. (2021), εξετάζουν την απόδοση ενός συστήματος διαχείρισης του εμπλουτισμού των υδροφορέων στον αλλουβιακό υδροφορέα της Plana de Castellón (Ισπανική μεσογειακή ακτή) που βρίσκεται υπό καθεστώς θαλάσσιας διείσδυσης τα τελευταία 50 χρόνια. Το σύστημα αποτελείται από ένα φραγμό αποθήκευσης στο οποίο διοχετεύεται νερό από έναν εφήμερο

ποταμό και στη συνέχεια τροφοδοτεί τον υδροφορέα μέσω δύο γεωτρήσεων εμπλουτισμού. Βάσει των μετρήσεων και της υδροχημικής ανάλυσης των ερευνητών, το σύστημα συνέβαλε σημαντικά στην ανύψωση της στάθμης του υδροφορέα στην γύρω περιοχή ενώ η ηλεκτρική αγωγιμότητα μειώθηκε κατά 80-90% και κατά 30% σε απόσταση 60 και 450 μέτρων αντίστοιχα, από τα πηγάδια εμπλουτισμού. Επιπρόσθετα μετά το πέρας της περιόδου εμπλουτισμού, η ηλεκτρική αγωγιμότητα διατηρήθηκε στα όρια των 500 έως 1500  $\mu\text{S}/\text{cm}$  σε απόσταση 80 μέτρων από την τοποθεσία των πηγαδιών.

Οι Tzoraki κ.α. (2018) αναλύουν την επίδραση της χρήσης ανακτημένου νερού από μονάδα επεξεργασίας λυμάτων της Πάφου στην Κύπρο. Το έργο διαχείρισης του εμπλουτισμού των υδροφορέων περιλαμβάνει πέντε λεκάνες εμπλουτισμού κατά μήκος της κοίτης του ποταμού Έζουσα του οποίου η φυσική ροή διακόπτεται με φράγμα, με αποτέλεσμα ο παράκτιος υδροφορέας της περιοχής να μην τροφοδοτείται από τον ποταμό και να κινδυνεύει να προσβληθεί από θαλάσσια διείσδυση. Οι ερευνητές μελέτησαν την απόδοση του συστήματος διαχείρισης του εμπλουτισμού των υδροφορέα στην ποιότητα του νερού μέσω του μαθηματικού μοντέλου ροής και μεταφοράς ρύπου FEFLOW και του γεωχημικού μοντέλου PHREEQC, καταλήγοντας στο ότι τα χημικά συστατικά του υδροφορέα θα πρέπει να εξετάζονται συχνά καθώς καθορίζονται από την ποιότητα του ανακτημένου νερού. Τέλος οι ερευνητές επισημαίνουν ότι για την ελαχιστοποίηση του κινδύνου θαλάσσιας πρέπει να διερευνηθεί το κατάλληλο μοτίβο ρυθμού άντλησης – ρυθμού εμπλουτισμού.

Οι Hasan et al. (2018), εξετάζουν την εφαρμογή διαχείρισης του εμπλουτισμού των υδροφορέων σε πιλοτική κλίμακα στην παραλιακή ζώνη Khulna-Satkhira στο Μπαγκλαντές. Ο υδροφορέας της περιοχής είναι υφάλμυρος εξαιτίας της διείσδυσης θαλασσινού νερού και η εξασφάλιση πόσιμου νερού είναι δύσκολη ιδιαίτερα τους ξηρούς μήνες. Οι συγγραφείς προτείνουν τον εμπλουτισμό του υδροφορέα μετά την εφαρμογή πιλοτικής εγκατάστασης που περιλαμβάνει την συγκέντρωση βρόχινου νερού από την οροφή ενός κτίσματος αλλά και μέσα από τεχνητή λεκάνη που στη συνέχεια οδηγείται σε δεξαμενή διύλισης/ διήθησης και τέλος εισάγεται στον υδροφορέα μέσω γεωτρήσεων. Τα αποτελέσματα κατά τη λειτουργία της πιλοτικής εγκατάστασης διαχείρισης του εμπλουτισμού των υδροφορέα παρουσιάζουν σημαντική μείωση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας και των διαλυμένων αλάτων στο υπόγειο νερό αποδεικνύοντας ότι η συγκεκριμένη τεχνική είναι κατάλληλη για την παράκτια ζώνη του Μπαγκλαντές.

Οι Zuurbier et al. (2018) παρουσιάζουν ένα πιλοτικό σύστημα επαναχρησιμοποίησης νερού από τα υγρά απόβλητα βιομηχανίας ζάχαρης το οποίο τροφοδοτεί τον υφάλμυρο υπόγειο υδροφορέα μέσα από ένα σύστημα ASR, στο Dinteloord της Ολλανδίας. Το σύστημα διαχείρισης του εμπλουτισμού υδροφορέα αποτελείται από μονάδα επεξεργασίας των λυμάτων της βιομηχανίας που στη συνέχεια οδηγείται στη μονάδα ASR και στη συνέχεια εισπιέζεται στον υδροφορέα μέσω 8

γεωτρήσεων. Το αποθηκευμένο νερό, αντλείται πάλι από τον υδροφορέα για την εξασφάλιση της ζήτησης σε μία θερμοκηπιακή μονάδα, την ξηρή περίοδο. Από συνεχείς μετρήσεις παρατηρήθηκε ότι το νερό του υδροφορέα μετά την εφαρμογή του ASR ικανοποιούσε τα ποιοτικά πρότυπα για τη χρήση του στο θερμοκήπιο και μάλιστα ο συγκεκριμένος τρόπος αποθήκευσης νερού καλής ποιότητας αποδείχτηκε πολύ φτηνότερος σε σχέση με την επιφανειακή αποθήκευση νερού. Οι συγγραφείς καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι η επαναχρησιμοποίηση των λυμάτων για την τροφοδοσία των υπόγειων νερών στις παράκτιες περιοχές μέσα από ένα σύστημα ASR μπορεί να συμβάλει στον μετριασμό της θαλάσσιας διείσδυσης και την παραγωγή νερού καλής ποιότητας.

Οι Ketata et al. (2014) αναλύουν τα αποτελέσματα του τεχνητού εμπλουτισμού στην παράκτια μεσογειακή λεκάνη της Enfidha στην Τυνησία. Ο υδροφορέας El Khairat στην περιοχή είχε υποβαθμιστεί ποιοτικά και ποσοτικά μετά την κατασκευή φράγματος στον ποταμό εφήμερης ροής της περιοχής που σε συνδυασμό με τις αντλήσεις οδήγησε σε υφαλμύριση του. Βάσει του σχεδίου διαχείρισης του εμπλουτισμού του υδροφορέα που εφαρμόστηκε, το νερό του φράγματος απελευθερώνεται στην κατάντη λεκάνη με ελεγχόμενη ροή και κατεισδύει στον υδροφορέα σε απόσταση έως και 6 χλμ. Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν μεγάλη αύξηση του υποβαθμισμένου υδραυλικού φορτίου έως και +4 μέτρα αλλά και ποιοτική αναβάθμιση με μείωση των ιόντων χλωρίου στον υδροφορέα με αποτέλεσμα τον μετριασμό της θαλάσσιας διείσδυσης και την παροχή νερού υψηλότερης ποιότητας για την κάλυψη αγροτικών και βιομηχανικών αναγκών στην περιοχή.

Οι Ginkel et al. (2014) αξιολογούν την λειτουργία συστημάτων ASR μικρής κλίμακας, ως μονάδες αποθήκευσης νερού αφαλάτωσης για υδρευτική χρήση στην αιγυπτιακή ακτή της Ερυθράς Θάλασσας μέσω μαθηματικού μοντέλου (SEAWAT). Στην έρευνα τους, οι συγγραφείς προτείνουν την ταυτόχρονη αποθήκευση γλυκού νερού και άντληση υφάλμυρου από κατώτερο επίπεδο προκειμένου να αποφευχθούν φαινόμενα πλευστότητας (buoyancy effects). Βάσει των σεναρίων τους, καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι η απόδοση κατά την ανάκτηση γλυκού νερού από τον υδροφορέα μπορεί να μειωθεί σε περίπτωση που υπάρξουν διακοπές στην άντληση υφάλμυρου νερού κατά το στάδιο του εμπλουτισμού, ενώ η χρήση υπόγειων φραγμών ή ρηχών πηγαδιών για την ανάκτηση περιορίζουν τις επιπτώσεις στον ρυθμό απόδοσης εξαιτίας της υπόγειας ροής και των διακοπών άντλησης υφάλμυρου νερού.

Η δυνατότητα εφαρμογής διαχείρισης του εμπλουτισμού εξετάζεται από τους El-Rawy et al. (2019) στον παράκτιο υδροφορέα Jamma, στο Ομάν, από οικονομική και υδρολογική σκοπιά. Οι El-Rawy et al. (2019) διερεύνησαν μέσω μαθηματικών μοντέλων (MODFLOW, MT3DMS) την δυνατότητα υλοποίησης διαχείρισης του εμπλουτισμού του υδροφορέα με τη χρήση νερού τριτογενούς επεξεργασίας μέσω ενός συστήματος ASR με σκοπό την ανάσχεση της θαλάσσιας διείσδυσης και την βελτίωση της ποιότητας για την κάλυψη της ζήτησης στην ευρύτερη αγροτική περιοχή. Βάσει των

σεναρίων τους, ο εμπλουτισμός του υδροφορέα μπορεί να είναι αποτελεσματικός, μέσω της αύξησης του υδραυλικού φορτίου που συνεπάγεται την υποχώρηση της θαλάσσιας διείσδυσης προς την ακτή. Ακόμη, επισημαίνουν ότι οι διαχειριστικοί στόχοι μπορούν να επιτευχθούν μέσα από ένα ολοκληρωμένο πρόγραμμα διαχείρισης αντλήσεων και εφαρμογής διαχείρισης του εμπλουτισμού των υδροφορέων με το νερό τριτογενούς επεξεργασίας.

Οι Christy & Lakshmanan (2016) παρουσιάζουν την εφαρμογή τεχνικών διαχείρισης του εμπλουτισμού του υδροφορέα στην παράκτια περιοχή Tamil Nadu, στην Βόρεια Τσενάι της Ινδίας. Οι ερευνητές κατασκεύασαν μία λεκάνη διήθησης (percolation pond) μικρής κλίμακας (8×8×1,75 m) η οποία τροφοδοτείται από νερό επιφανειακής απορροής προκειμένου να αντιμετωπίσουν την υψηλή αλατότητα που παρουσιάζει ο υφαλμυρισμένος υδροφορέας έτσι ώστε να βελτιωθεί η ποιότητα τοπικά. Από τις μετρήσεις τους φαίνεται ότι ο υδροφορέας τροφοδοτήθηκε με 98 m<sup>3</sup> σε διάστημα 9 μηνών ενώ παράλληλα βελτιώθηκε και η ποιότητα του υδροφορέα στην περιοχή του T.E.. Σύμφωνα με τους μελετητές, η συγκεκριμένη μέθοδος είναι πολύ οικονομική και αποδείχτηκε κατάλληλη για τους αγρότες της περιοχής αφού μπορεί εύκολα να εφαρμοστεί σε μικρές εκτάσεις ενώ για την ποιοτική αναβάθμιση του υδροφορέα σε μεγαλύτερα βάθη, προτείνουν την κατασκευή λεκανών διήθησης με μεγαλύτερες διαστάσεις.

Στις Ηνωμένες Πολιτείες, υπάρχουν πάνω από 200 προγράμματα ASR για αποθήκευση και επαναχρησιμοποίηση νερού. Ο Ryne (2015) ερευνά την απόδοση ενός συστήματος ASR στο νησί Hilton Head της νότιας Καρολίνας, ως μέτρο εξυγίανσης των υφαλμυρισμένων ασβεστολιθικών στρωμάτων της περιοχής. Το σύστημα αποθήκευσης- ανάκτησης λειτουργεί μέσω μίας γεώτρησης που τροφοδοτεί στο βαθύτερο ασβεστολιθικό στρώμα αφαλατωμένο νερό από τον υδροφορέα, ενώ το νερό αντλείται πάλι από την ίδια γεώτρηση. Σημαντικό στοιχείο του συστήματος είναι η έγχυση ποσότητας νερού πριν την εκκίνηση του τεχνητού εμπλουτισμού, το οποίο θα παραμένει στον υδροφορέα χωρίς να αντλείται λειτουργώντας ως μία ζώνη προστασίας του νερού εμπλουτισμού έτσι ώστε να μην αναμειγνύεται με το υφάλμυρο νερό του υδροφορέα. Ο Ryne (2015) βασίζει τα αποτελέσματα της έρευνας του σε δύο δοκιμαστικούς κύκλους λειτουργίας με κύρια συμπεράσματα την μείωση των ιόντων χλωρίου στον υδροφορέα έτσι ώστε να καθίσταται κατάλληλο για πόση αλλά και τη διατήρησή τους σε χαμηλά επίπεδα για όλη τη διάρκεια της ανάκτησης, δηλαδή την ξηρή περίοδο. Ο συγγραφέας στηρίζει την επιτυχία του προγράμματος T.E. στην δημιουργία της ζώνης προστασίας.

Οι Missimer et al. (2017) προτείνουν τη χρήση εμπλουτισμού του υδροφορέα ως ένα μέσο διαχείρισης των διαθέσιμων υδατικών πόρων στα νοτιοδυτικά της Φλόριντα (Η.Π.Α.) σε ένα υδροφόρο σύστημα ιδιαίτερα υφαλμυρισμένο. Στην έρευνα, προτείνεται η ανόρυξη έως 10 γεωτρήσεων εμπλουτισμού έτσι ώστε η περίσσεια της ροής από τον ανάντη ποταμό (Caloosahatchee

River) μετά από επεξεργασία να διοχετεύεται στο περατό στρώμα της περιοχής (Ψαμμίτης) για μετέπειτα χρήση. Τα αποτελέσματα του μαθηματικού μοντέλου μεταβαλλόμενης πυκνότητας SEAWAT για την προσομοίωση του υδροφορέα και του συστήματος ASR, υποδεικνύουν ότι το σύστημα MAR θα μπορούσε να αυξήσει τη δυναμικότητα του υδροφορέα κατά 150.000 m<sup>3</sup>/day ενώ παράλληλα τα διαλυμένα άλατα (TDS) στο νερό του υδροφορέα θα μειωθούν από 18.000 mg/lit σε 5000 mg/lit.

Η παράκτια περιοχή του κόλπου της Βεγγάλης στο Μπαγκλαντές και διαμορφώνεται από το Δέλτα του Γάγγη, αντιμετωπίζει μεγάλο πρόβλημα αλατότητας λόγω θαλάσσιας διείσδυσης τόσο στο έδαφος όσο και στους υδροφορείς (Sanchez κ.α. 2015). Οι Sultana κ.α. (2015) δημιούργησαν ένα πρόγραμμα τεχνητού εμπλουτισμού μέσω πηγαδιών (ASR) προκειμένου να αποθηκεύεται το νερό που συγκεντρώνεται σε μικρές λίμνες κατά την περίοδο των μουσώνων, στους αβαθείς υδροφορείς σχηματισμούς με στόχο τη χρήση του προς πόση για την τοπική κοινωνία κατά τους ξηρούς μήνες. Το πρόγραμμα περιλαμβάνει εγκαταστάσεις πηγαδιών εμπλουτισμού και άντλησης χαμηλού κόστους σε 13 διαφορετικές τοποθεσίες. Πριν την εισαγωγή του νερού στον υδροφορέα το επιφανειακό νερό διοχετεύεται σε δεξαμενή άμμου προκειμένου να απομακρυνθούν παθογόνοι μικροοργανισμοί και να μειωθεί η θολότητα ενώ το νερό αντλείται από τον υδροφορέα με αντλίες χειρός, χωρίς κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας. Τα αποτελέσματα από τα διαφορετικά συστήματα ASR εμφανίζουν μείωση των μικροοργανισμών και ανανέωση του υφάλμυρου νερού στον υδροφορέα υποδεικνύοντας την εφαρμοσιμότητα της μεθόδου για την παραγωγή πόσιμου νερού και μάλιστα με πολύ χαμηλό κόστος έτσι ώστε να είναι μία βιώσιμη πρακτική για τους κατοίκους της περιοχής.

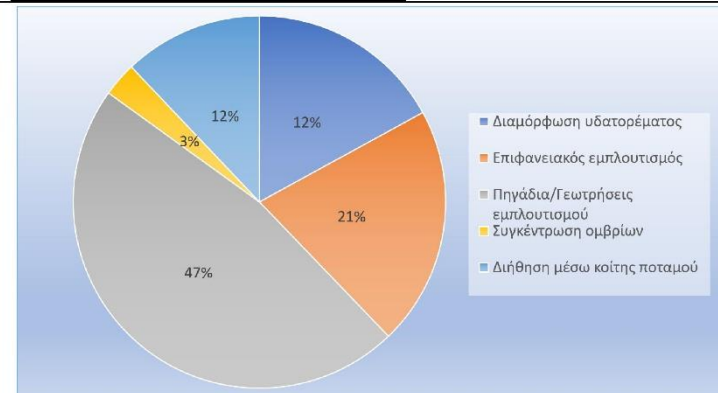
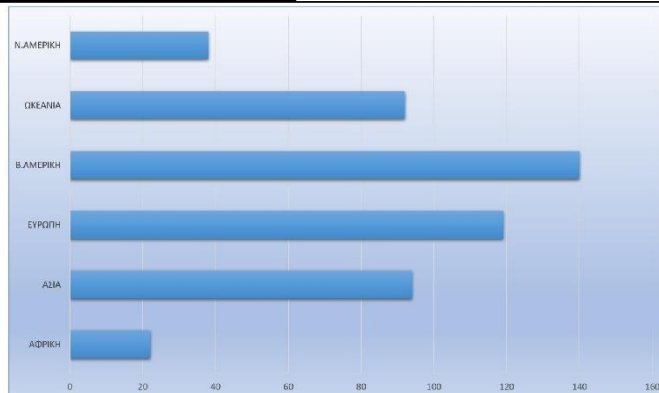
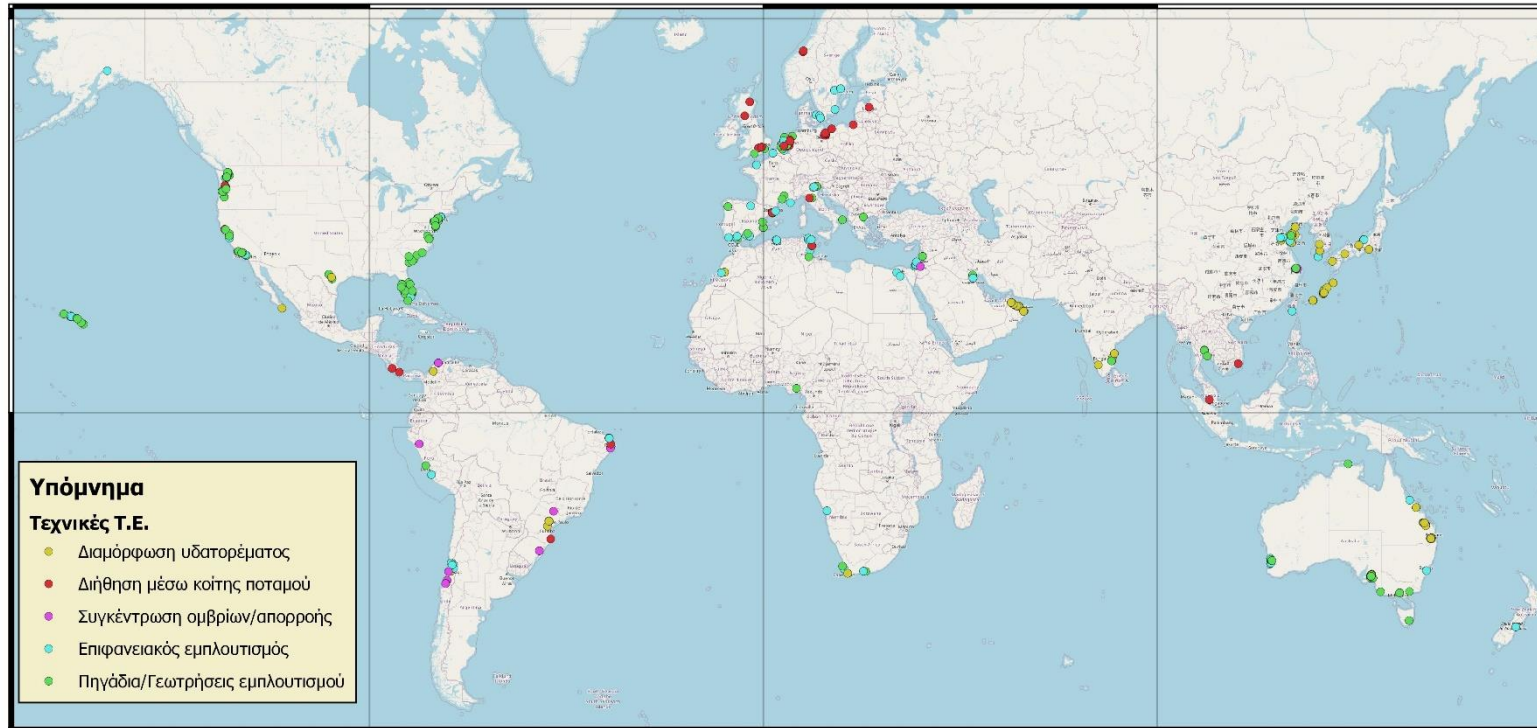
Στην παράκτια περιοχή Andhra Pradesh της Ινδίας, ο υδροφορέας υπόκειται σε καθεστώς θαλάσσιας διείσδυσης εξαιτίας των μη ελεγχόμενων αντλήσεων και της εισροής υφάλμυρου νερού από τη λιμνοθάλασσα Pulicat στο ποτάμι Kalangi. Οι Janardhana et al. (2011) παραθέτουν την έρευνα τους σχετικά με την εφαρμογή MAR στην περιοχή με την κατασκευή υπογείου φράγματος εμπλουτισμού κατά μήκος του ποταμού Kalangi. Πρόκειται για φράγμα αργίλου επενδυμένο με μεμβράνη πολυαιθυλενίου χαμηλής πυκνότητας. Οι ερευνητές παρατήρησαν ότι μετά την εφαρμογή της συγκεκριμένης πρακτικής MAR, η αλατότητα στον κοκκώδη σχηματισμό της περιοχής μειώθηκε εντός των πρότυπων ορίων πόσιμου νερού ενώ η διαθέσιμη ποσότητα αποθεμάτων στον υδροφορέα αυξήθηκε τόσο την περίοδο των μουσώνων όσο και την ξηρή περίοδο στην περιοχή έρευνας έτσι ώστε να καλύπτει τις ανάγκες πόσιμου νερού. Σημαντική συμβολή στην βελτίωση της ποιότητας του νερού είχε και η ανακατασκευή ενός παλιού κυματοθραύστη ο οποίος αποτρέπει την εισροή θαλασσινού νερού στο ποτάμι Kalangi και επομένως και την περαιτέρω υφαλμύριση του υδροφορέα.



Είναι ευνόητο ότι η μέθοδος MAR που θα επιλεγεί βασίζεται στα τοπικά χαρακτηριστικά του φυσικού και τεχνητού περιβάλλοντος, δηλαδή στις κλιματικές, υδρολογικές, υδρογεωλογικές συνθήκες και ανθρωπογενείς παρεμβάσεις στην περιοχή αλλά και στις κοινωνικές ιδιαιτερότητες κάθε κοινωνίας και τους διαθέσιμους οικονομικούς πόρους. Από τις παραπάνω μελέτες που εξετάστηκαν, φαίνεται ότι στην πρόσφατη βιβλιογραφία τόσο σε εφαρμογές πιλοτικής και ευρείας κλίμακας όσο και σε έρευνες τεχνητού εμπλουτισμού (π.χ. εφαρμογή μοντέλων) για τα παράκτια συστήματα, αναφέρονται περισσότερο οι μέθοδοι εμπλουτισμού των υδροφορέων μέσω πηγαδίων και γεωτρήσεων (ASR/ASTR). Σε σχέση με άλλες μεθόδους, είναι μία ακριβή λύση καθώς απαιτεί εγκατάσταση εξοπλισμού και κατανάλωση ενέργειας κατά τη λειτουργία. Παρ' όλα αυτά η μέθοδος ASR μπορεί να εφαρμοστεί και σε μικρότερη κλίμακα με χαμηλό κόστος, προσαρμοσμένη στις ανάγκες και τις δυνατότητες των κατοίκων, όπως αποδεικνύει και η περίπτωση του Μπαγκλαντές όπως παρατίθεται από τους Sultana et al. (2015).

Αναλύοντας τα στοιχεία της διαδικτυακής πλατφόρμας "MAR portal" των Stefan και Ansems (2018) για τα εφαρμοσμένα συστήματα διαχείρισης εμπλουτισμού παγκοσμίως και απομονώνοντας τις παράκτιες περιοχές, παρατηρείται ότι το μεγαλύτερο ποσοστό αυτών αφορούν μεθόδους ASR/ASTR (Σχήμα 1.4). Σε διεθνές επίπεδο, οι τεχνολογίες ASR χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση πόσιμου νερού τόσο σε αβαθείς όσο και σε βαθύτερους υδροφορείς σε ποσοστό περίπου 25% των επιτυχημένων έργων να αποθηκεύουν γλυκό νερό σε υφάλμυρους υδροφορείς (Texas Water Development Board, 2011).

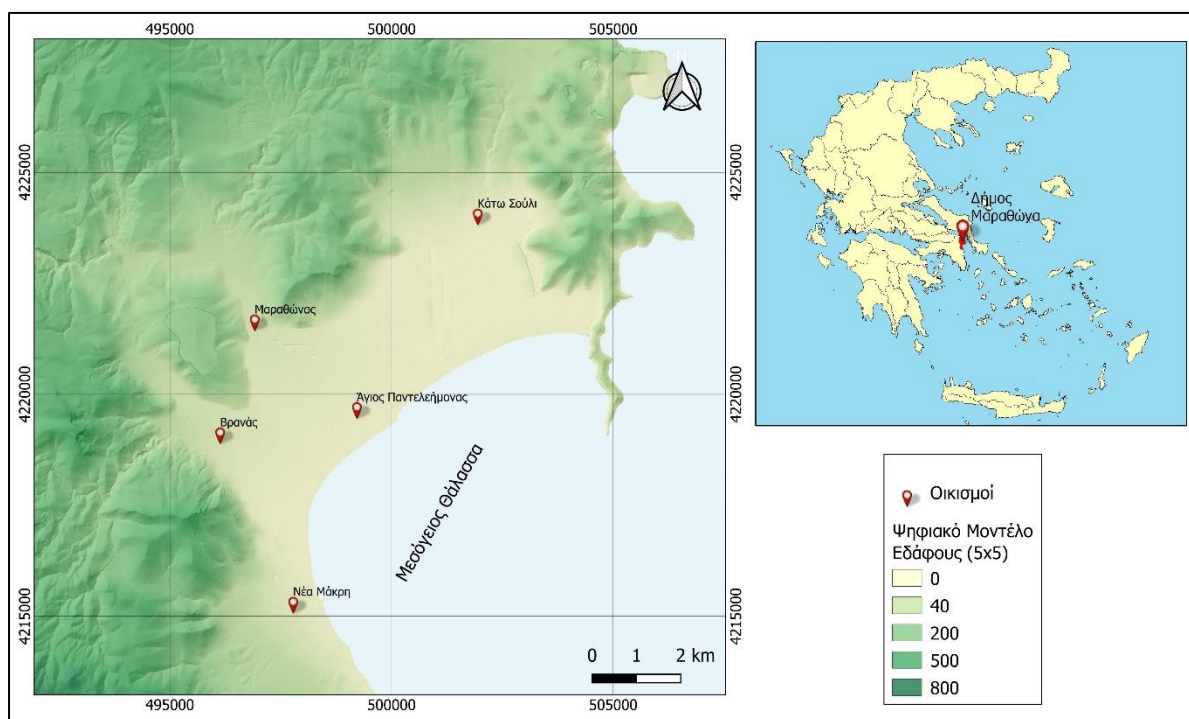
Στην Ευρώπη, η συσσώρευση πληθυσμού στις παράκτιες ζώνες (κατά μήκος της Μεσογείου και της Βόρειας Θάλασσας) και η οικονομική ανάπτυξη γύρω από αυτές αυξάνει συνεχώς τη ζήτηση σε νερό επηρεάζοντας το παράκτιο οικοσύστημα και δημιουργώντας παράλληλα προβλήματα εποχικής ανεπάρκειας νερού, υπεράντλησης υδροφορέων, θαλάσσιας διείσδυσης, σμίκρυνσης των υγροτόπων (Sprenger 2017). Η ανάγκη προστασίας και εξυγίανσης των παράκτιων υπόγειων συστημάτων έχει αναγνωριστεί καθώς η τάση στον τεχνητό εμπλουτισμό είναι ανάπτυξη συστημάτων MAR σε υποβαθμισμένους υδροφορείς με υφάλμυρο νερό δίνοντας μάλιστα έμφαση στις τεχνικές ASR για την αντιμετώπιση φαινομένων που παρατηρούνται εξαιτίας της διαφορετικής πυκνότητας υφάλμυρου και γλυκού νερού (Ward 2007, Ward 2009, Zuurbier 2015, Ginkel 2014).



Σχήμα 1.4 Κατανομή έργων υποδομής MAR σε παράκτιες ζώνες (με δεδομένα από την παρούσα έρευνα και τους Stefan και Ansems, 2018)

## 1.5 Εισαγωγή στην περιοχή έρευνας

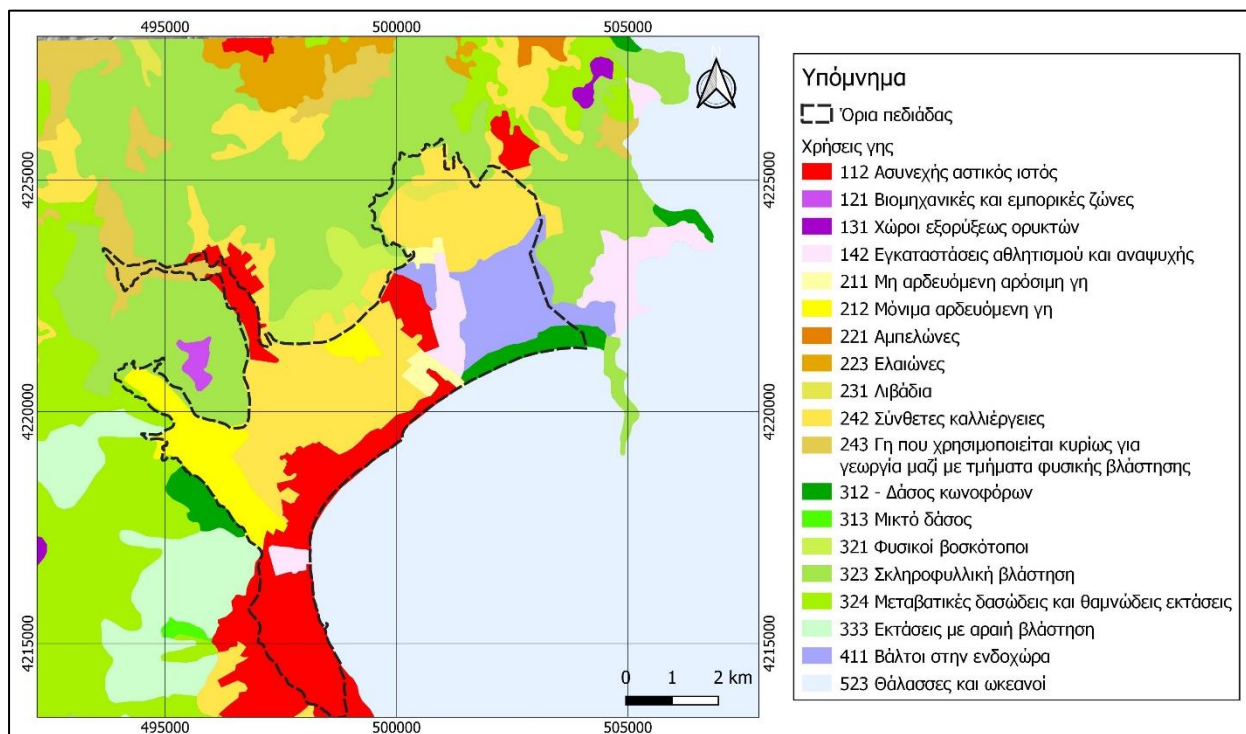
Η περιοχή μελέτης της παρούσας διατριβής είναι η παράκτια πεδιάδα του Μαραθώνα. Πρόκειται για το πεδινό παράκτιο τμήμα που βρίσκεται στο βορειοανατολικό άκρο της Αττικής, το οποίο έχει έκταση περίπου 40 km<sup>2</sup> και διαβρέχεται από τη Μεσόγειο θάλασσα. Χαρακτηρίζεται από ημίξηρο Μεσογειακό κλίμα και κατατάσσεται στην κατηγορία Csa κατά Köppen με ήπιους χειμώνες με βροχοπτώσεις και ξηρά, ζεστά καλοκαίρια. Η ακτογραμμή του Μαραθώνα αναπτύσσεται σε μήκος περίπου 10 km με εκκίνηση την λοφώδη ζώνη της Κυνοσούρας στα ανατολικά καταλήγοντας στη Νέα Μάκρη στο νοτιοδυτικό άκρο. Προς τα Β-ΒΔ, η πεδιάδα οριοθετείται περιμετρικά από ορεινούς όγκους του Πεντελικού Όρους. Η πεδιάδα έχει ήπιο γεωμορφολογικό ανάγλυφο με υψόμετρο που ξεκινά από 0 m (από τη μέση στάθμη της θάλασσας) στην ακτογραμμή ενώ τα μεγαλύτερα υψόμετρα εντοπίζονται προς την επαφή της πεδιάδας με τους ορεινούς όγκους και δεν ξεπερνούν τα 40 m. Οι κοινότητες που εντοπίζονται στην πεδιάδα είναι η Νέα Μάκρη, ο Μαραθώνας, ο Βρανάς, ο Άγιος Παντελεήμονας και το Κάτω Σούλι. Στο Σχήμα 1.5 φαίνεται η περιοχή μελέτης με υπόβαθρο το ψηφιακό μοντέλο εδάφους διάστασης 5 m x 5 m και η τοποθεσία των οικισμών.



Σχήμα 1.5 Περιοχή μελέτης

Το Σχήμα 1.6 παρουσιάζει τις χρήσεις γης στην πεδιάδα και τη γύρω περιοχή, όπως καταγράφηκαν στον κατάλογο CORINE Land Cover (CLC) του Ευρωπαϊκού προγράμματος παρατήρησης της γης «Copernicus» για το έτος 2018. Όπως φαίνεται, το κεντρικό και ΒΑ κομμάτι της πεδιάδας (Βρανάς, Αγ. Παντελεήμονας, Κάτω Σούλι) καταλαμβάνεται κυρίως από καλλιέργειες οι οποίες αρδεύονται ως επί τω πλείστων από τους

υδροφορείς της πεδιάδας. Η οικιστική ζώνη εκτείνεται στη Νέα Μάκρη, στο παραλιακό μέτωπο και βόρεια στον οικισμό του Μαραθώνα. Μεγάλο μέρος της ζώνης αυτής περιλαμβάνει εξοχικές κατοικίες και τουριστικά καταλύματα. Σημαντική έκταση στην περιοχή καταλαμβάνεται από τον υδροβιότοπο του Σχοινιά στα ανατολικά (411) που μαζί με το δάσος της παραλία (312) και το Ολυμπιακό Κωπηλατοδρόμιο Σχοινιά (142) συνθέτουν το Εθνικό Πάρκο Σχοινιά, μέρος του δικτύου Natura 2000.



Σχήμα 1.6 Κατανομή χρήσεων γης στον Μαραθώνα και την ευρύτερη περιοχή

Η ζήτηση νερού της περιοχής διαμορφώνεται από τις διάφορες χρήσεις γης (κυρίως οικιακές, γεωργικές και τουριστικές), δημιουργώντας υψηλή εποχιακή διακύμανση. Η διακύμανση της ζήτησης νερού αντανακλάται στα υπόγεια νερά (κυρίως για αρδευτική χρήση), καθιστώντας τη διαχείριση τους ένα κρίσιμο πρόβλημα. Οι ανθρωπογενείς παρεμβάσεις στον Μαραθώνα και την ευρύτερη περιοχή έχουν επιφέρει σημαντικές αλλαγές στα επιφανειακά και υπόγεια νερά της περιοχής. Πιο συγκεκριμένα, τα κύρια ζητήματα σχετικά με τη διαχείριση των υδάτινων πόρων στην περιοχή είναι τα εξής: (i) η κατασκευή του φράγματος το 1929 από την ΕΥΔΑΠ και η δημιουργία της τεχνητής λίμνης του Μαραθώνα η οποία είχε σημαντικό αντίκτυπο στα επιφανειακά νερά της πεδιάδας (ii) η κατασκευή του Ολυμπιακού Κέντρου Κωπηλασίας του Σχοινιά, το 2003, που είχε σημαντική επίδραση τόσο στην τροφοδοσία του αλλουβιακού υδροφορέα όσο και στην επαναφόρτιση του παρακείμενου υγροτόπου του Σχοινιά (iii) η άντληση υπόγειων νερών από τον αλλουβιακό υδροφορέα για την ικανοποίηση των αρδευτικών αναγκών της γεωργικής περιοχής που έχει προκαλέσει εισροή θαλασσινού νερού στην ενδοχώρα. Ως επακόλουθο των αγροτικών δραστηριοτήτων, το υπόγειο υδροφόρο σύστημα έχει υποστεί και περαιτέρω ποιοτική και ποσοτική υποβάθμιση. Ενώ το πρόβλημα είναι γνωστό τόσο στους κατοίκους και στους χρήστες υπόγειου

νερού όσο και στις αρμόδιες αρχές όπως φαίνεται και από το σχέδιο Διαχείρισης Λεκανών Απορροής Ποταμών Υδατικού Διαμερίσματος Αττικής (ΦΕΚ Β 4672/2017), έως σήμερα δεν έχει οριστεί κάποιο διαχειριστικό πλάνο για την εξυγίανση και διαφύλαξη των υπόγειων νερών.

Στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής ερευνήθηκε το υπόγειο υδροφόρο σύστημα της πεδιάδας του Μαραθώνα προκειμένου να διαπιστωθεί η ποιοτική και ποσοτική κατάσταση των υδατικών πόρων. Η περιοχή χρησιμοποιήθηκε ως μελέτη περίπτωσης για την επίλυση προβλημάτων σχετικών με τα υπόγεια νερά και προκειμένου να εξεταστούν καινοτόμες λύσεις για την εξυγίανση και την αειφόρο διαχείριση των παράκτιων υδροφορέων. Στις τεχνικές που υιοθετήθηκαν συμπεριλήφθηκε και η εφαρμογή διαχείρισης εμπλουτισμού υδροφορέα, βασισμένη σε νέες, καινοτόμες τεχνολογίες σχεδιασμένες για υφάλμυρα υπόγεια συστήματα.

## 2 ΠΕΡΙΟΧΗ ΕΡΕΥΝΑΣ ΚΑΙ ΕΡΓΑΣΙΕΣ ΠΕΔΙΟΥ

### 2.1 Γεωλογικές συνθήκες

Από γεωτεκτονική άποψη η βορειοανατολική Αττική εντάσσεται στην «Ενδιάμεση Τεκτονομεταμορφική ζώνη των Ελληνίδων» όπως ορίστηκε από τον Brunh (1956). Σύμφωνα με τους Marinos & Petrascheck (1956) η περιοχή αποτελεί τμήμα της Αττικοκυκλαδικής μάζας μάλιστα στα όρια της με τη Πελαγονική, ενώ η πεδιάδα του Μαραθώνα βρίσκεται στο βορειοδυτικό τμήμα αυτής.

Ο Κατσικάτος (1991,2002) διαχωρίζει την περιοχή της Αττικής- Ν. Ευβοίας στρωματογραφικά σε δύο ζώνες τύπου «Εσωτερικών Ελληνίδων»: (i) την Ζώνη Αττικής που αποτελεί τη βάση και τη σχετικά αυτόχθονη ζώνη και περιλαμβάνει το «Μεταμορφωμένο σύστημα Αττικής», τριαδικο-ιουρασικής ηλικίας με παραμόρφωση και μεταμόρφωση στο Αν. Ιουρασικό (κανονικά μεταμορφωμένα του Lepsius), (ii) τη Ζώνη Αλμυροποτάμου που εμφανίζεται σε Εύβοια και ΒΑ Αττική, είναι επωθημένη στη προηγούμενη ενότητα και αποτελείται από εναλλαγές μαρμάρων και σχιστολίθων με μεταφλύσχη στην οροφή που επικάθεται στα Ανω-Τριαδικά μάρμαρα Αγ. Γεωργίου-Ευβοίας.

Ο Λόζιος (1993) στη διδακτορική του διατριβή για τη τεκτονική της ΒΑ Αττικής, διακρίνει στρωματογραφικά δύο χαρακτηριστικές μεταμορφωμένες γεωτεκτονικές ενότητες: (i) την Ενότητα «ΒΑ Αττικής» που καταλαμβάνει το μεγαλύτερο τμήμα της περιοχής και αποτελεί τη σχετικά αυτόχθονη ενότητα και το υπόβαθρο της είναι άγνωστο, (ii) την ενότητα «Αγίου Γεωργίου» που είναι αλλόχθονη ενότητα και υπέρκεινται τεκτονικά της προηγούμενης.

Σε μία νεότερη έρευνα, ο Σπανός (2012) αναγνωρίζει δύο κύριες στρωματογραφικές ενότητες της Αττικοκυκλαδικής ζώνης:

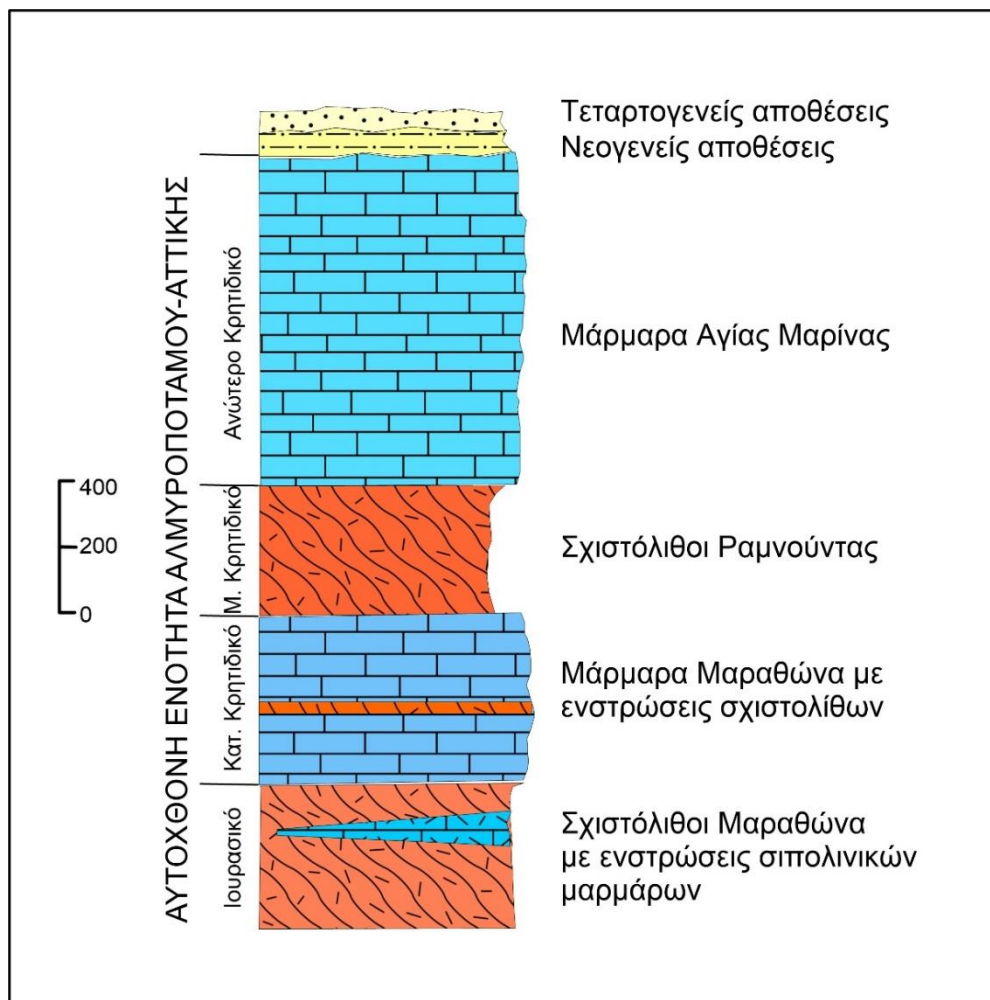
- Την επωθημένη «Ενότητα Κυανοσχιστολίθων» (αλόχθονο σύστημα) που περιλαμβάνει τέσσερις οριζόντες (από τα κατώτερα προς τα ανώτερα στρώματα) (i) μάρμαρα με εναλλαγές κυανοσχιστολίθων και πρασινοσχιστολίθων και ενδιαστρώσεις αμφιβολιτών στη βάση, (ii) πρασινοσχιστολίθους και κυανοσχιστολίθους με ενστρώσεις μαρμάρων και φακούς μεταβασιτών, (iii) Μάρμαρα με ενστρώσεις κυανοσχιστολίθων, πρασινοσχιστολίθων, ιαδειτικών γνευσίων και εκλογιτών (iv) εκλογίτες και γλαυκοφανίτες με μητρικά πετρώματα οφιόλιθους

- Την υποκείμενη «Ενότητα Βάσης» (αυτόχθονο σύστημα) που στρωματογραφικά διαμορφώνεται (από τα κατώτερα προς τα ανώτερα στρώματα) από το Κατώτερο Μάρμαρο, τους Σχιστόλιθους Καισαριανής και το Ανώτερο Μάρμαρο

Στην άμεση περιοχή μελέτης, το πεδινό τμήμα του Μαραθώνα και τους περιβάλλοντες ορεινούς όγκους, οι γεωλογικοί χάρτες του Λόζιου (1998) και του Σπανού (2012) δείχνουν την εμφάνιση μόνο της αυτόχθονης ενότητας, δηλαδή της ενότητας «ΒΑ Αττικής» και της «Ενότητας Βάσης» αντίστοιχα.

Τυπικό παράδειγμα της λιθοστρωματογραφικής διάρθρωσης ΒΑ Αττικής – Νοτίου Ευβοίας, φαίνεται το επόμενο σχήμα (Σχήμα 2.1), όπως παρουσιάστηκε στους Γεωλογικούς χάρτες του Ι.Γ.Μ.Ε. (Κατσικάτσος 1991)

Στο γεωλογικό χάρτη του Σχήματος 2.2, φαίνεται η κατανομή των σχηματισμών στην ΒΑ Αττική, με έμφαση στο παράκτιο πεδίο του Μαραθώνα και την περιβάλλουσα περιοχή.



Σχήμα 2.1 Στρωματογραφική στήλη ΒΑ Αττικής Περιοχή βορειοδυτικού τμήματος του γεωλογικού φύλλου «Ραφήνα», κλίμακας 1:50 000. Κατά Γ. Κατσικάτσο (1991), με τροποποιήσεις)

Στην στενότερη περιοχή μελέτης απαντώνται τα παρακάτω στρώματα (Κύρια βιβλιογραφική πηγή: Μελισσάρης και Σταυρόπουλος, 1999)

- Μάρμαρα Πεντέλης: αποτελούν τον κατώτερο ορίζοντα της σειράς σχηματισμών της βορειοανατολικής Αττικής. Πρόκειται για μάρμαρα λευκά ή λευκότεφρα ή κυανού χρώματος, χονδροκρυσταλλικά, μεσοστρωματώδη έως παχυστρωματώδη και κατά θέσεις δολομιτικά.

- Σχιστόλιθοι Διονύσου: εμφανίζονται στη περιοχή της Πεντέλης και το πάχος τους κυμαίνεται από 250 μέτρα (στα Δυτικά της Πεντέλης) μέχρι και 1000 μέτρα (στα Ανατολικά). Πρόκειται για μεταμορφωμένα πετρώματα χαμηλού έως μέσου βαθμού μεταμόρφωσης. Τέτοια πετρώματα είναι οι επιδοτικοί κερροστιλβικοί γνεύσιοι, επιδοτικοί αμφιβολίτες, επιδοτικοί- αλβιτικοί- χώριτικοί σχιστολιθοι, μοσχοβιτικοί γνεύσιοι και μοσχοβιτικοί σχιστόλιθοι.

- Μάρμαρα Γραμματικού: Στον χάρτη φαίνονται ως Μάρμαρα ΒΑ Αττικής (Σχήμα 2.2). Είναι ανεπτυγμένα στη δυτική πλαγιά της Πεντέλης, με πάχος πάνω από 200 μέτρα, ενώ στα ανατολικά μηδενίζεται. Τα μάρμαρα αυτά εμφανίζονται και βορειότερα στη περιοχή Διονύσου- Γραμματικού με κυμαινόμενο πάχος, ενώ στη περιοχή της λίμνης Μαραθώνα φτάνουν πάχος μερικών δεκάδων μέτρων. Τα μάρμαρα αυτά είναι λεπτοστρωματώδη έως μεσοστρωματώδη, τεφρόλευκα, αδροκρυσταλλικά μέτριας καρστικότητας, ενώ κατά θέσεις μεταπίπτουν σε σιπολινικά μάρμαρα και ασβεστιτικούς σχιστόλιθους.

- Σχιστόλιθοι Μαραθώνα: στη περιοχή της πόλης του Μαραθώνα έχουν πάχος περίπου 100 μέτρα και αυξάνεται βαθμιαία προς τα βόρεια, μέχρι και τα 1500 μέτρα μεταξύ Γραμματικού και ακτής Νότιου Ευβοϊκού κόλπου. Πρόκειται για 42 χλωριτικούς και μαρμαρυγιακούς σχιστόλιθους με ενστρώσεις μαρμάρων μικρού πάχους.

- Μάρμαρα Μαραθώνα: αναπτύσσονται κυρίως στη περιοχή μεταξύ Μαραθώνα και Κάτω Σουλίου. Το πάχος τους κυμαίνεται από μερικές δεκάδες έως 500 μέτρα. Είναι μικροκρυσταλλικοί σχηματισμοί με φακούς ή και λεπτές στρώσεις πυριτολίθων ενώ κατά τόπους εμφανίζονται δολομιτικά μάρμαρα και ενστρώσεις σχιστολίθων.

- Σχιστόλιθοι Ραμνούνας: εμφανίζονται με μορφή μεγάλης ένστρωσης μεταξύ των Μαρμάρων Μαραθώνα και Αγίας Μαρίνας. Είναι μοσχοβιτικοί, χλωριτικοί, χαλαζιακοί και ανθρακικοί με μικρές ενστρώσεις σιπολινικών μαρμάρων. Κατά μεγάλο μέρος καλύπτονται από νεογενείς και τεταρτογενείς σχηματισμούς. Το πάχος τους φτάνει τα 400 μέτρα.

- Μάρμαρα Αγίας Μαρίνας: βρίσκονται στη περιοχή της Αγίας Μαρίνας και η συνέχεια τους διακόπτεται από τη θάλασσα του Ευβοϊκού κόλπου. Αποτελούν τα ανώτερα μέρη της σειράς των αυτόχθονων μεταμορφωμένων σχηματισμών (Ενότητα Αλμυροποτάμου κατά



Κατσικάτο 1977). Τα μάρμαρα αυτά είναι τεφρά έως υπόλευκα και κατά θέσεις λευκά. Το πάχος τους, από την επιφάνεια, φτάνει τα 1000 μέτρα.

Κατά το Λόζιο (1993), οι χαλαροί σχηματισμοί της πεδιάδας του Μαραθώνα αποτελούνται από δύο στρώματα:

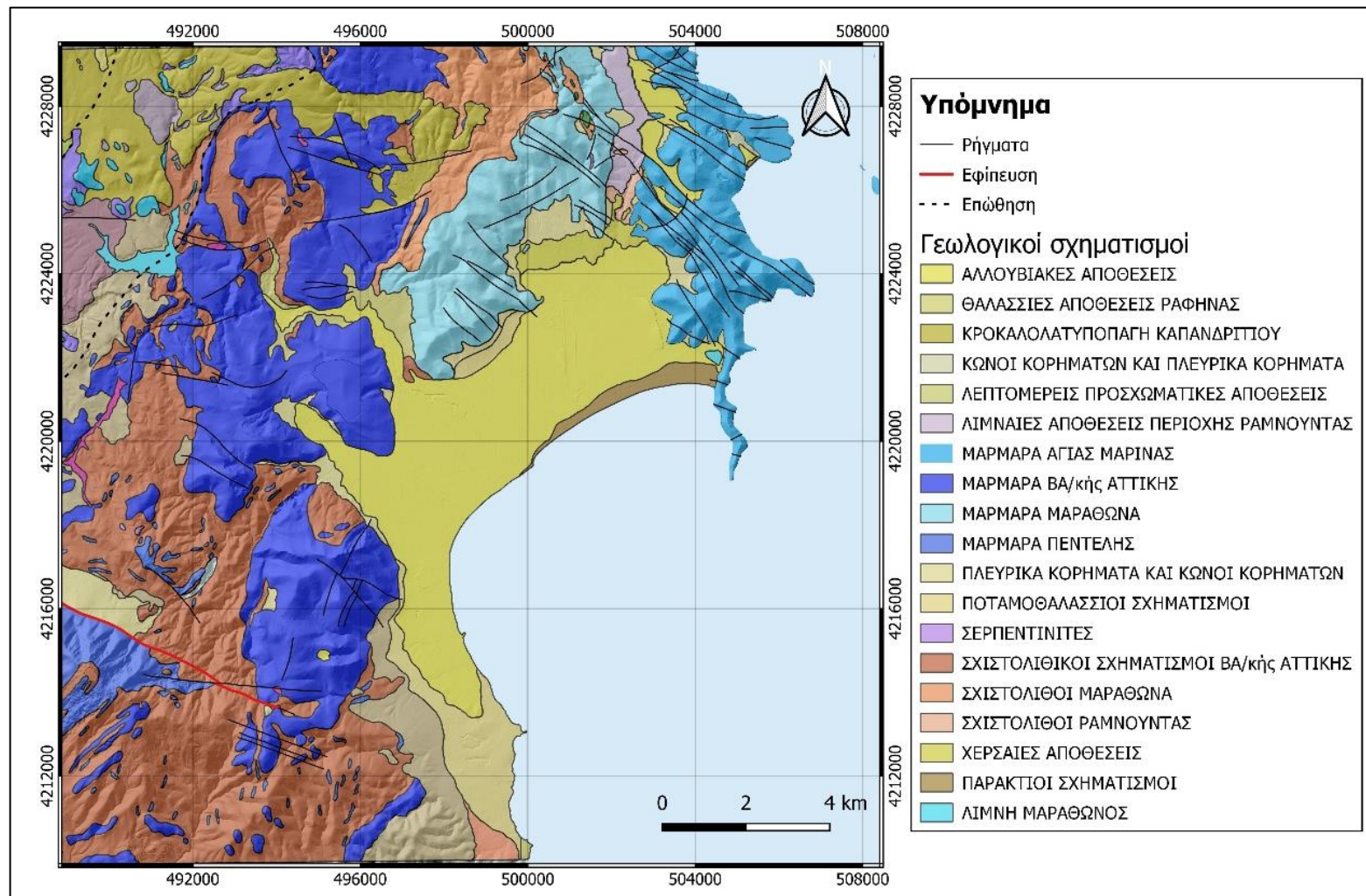
- Σχηματισμοί του Νεογενούς : διαμορφώνονται από κλαστικά (κροκαλοπαγή, λατυποπαγή, αργίλοι, άμμοι) και μη κλαστικά ιζήματα (μαργαϊκοί και τραβερτινοειδείς ασβεστόλιθοι). Αποτελούν ποταμολιμναίες, χερσοποτάμιες και λιμναίες αποθέσεις.
- Τεταρτογενείς σχηματισμοί αποτελούνται από
  - παράκτιους σχηματισμούς: άμμοι, κροκάλες, χαλίκια, ψαμμίτες)
  - αλλουβιακές αποθέσεις: χαλαρά αργιλοαμμώδη υλικά από άμμους και κροκαλολατύπες στις κοίτες των χειμάρων
  - πλευρικά κορήματα και κώνοι κορημάτων
  - χερσαίες αποθέσεις: παλαιότερες προσχώσεις και υλικά των παλιών κώνων κορημάτων. Είναι λεπτομερή υλικά με διάσπαρτες κροκαλολατύπες, διαφόρων μεγεθών και κυρίως ερυθρού χρώματος.

Από στοιχεία για τη γεωλογική και τεκτονική συγκρότηση της περιοχής, η Μαργώνη (2006) αναφέρει ότι η ευρύτερη περιοχή αποτελούσε ένα καρστικό σύστημα και η πεδιάδα του Μαραθώνα δημιουργήθηκε ως ένα καρστικό τεκτονικό βύθισμα της λοφώδους ζώνης της ΒΑ Αττικής. Το καρστικό βύθισμα πληρώθηκε με υλικά προερχόμενα από διεργασίες αποσάθρωσης και διάβρωσης. Τα υλικά αυτά έχουν αποτεθεί πάνω σε καρστική επιφάνεια ανθρακικών πετρωμάτων και ως εκ τούτου το υπόβαθρο των αποθέσεων αναμένεται να είναι μάρμαρο. Η στρωματογραφία της πεδιάδας του Μαραθώνα έχει διαμορφωθεί από διάφορες εξελικτικές φάσεις και διεργασίες οι οποίες οδήγησαν στη στρωματογραφική διάρθρωση του αλλουβιακού πεδίου. Δεδομένα γεωτρήσεων (Μαργώνη 2006) και γεωφυσικών διασκοπήσεων (Μελισσάρης και Σταυρόπουλος 1999) αποδεικνύουν την ύπαρξη στρώσεων διαφορετικής κοκκομετρικής διαβάθμισης και σύστασης με εναλλαγές αργίλου, ιλύος, άμμου, χαλικιών. Το πάχος των αποθέσεων της πεδιάδας έχει υπάρξει πεδίο έρευνας και έχουν διατυπωθεί διαφορετικές θεωρίες. Κατά την μελέτη του Υπουργείου Γεωργίας για το υπόγειο σύστημα του Μαραθώνα (Μελισσάρης & Σταυρόπουλος 1999) πραγματοποιήθηκαν γεωφυσικές διασκοπήσεις στις οποίες εκτιμήθηκε το μέγιστο πάχος των αποθέσεων στα 60 m στο κεντρικό τμήμα της λεκάνης, ενώ στα όρια της λεκάνης κυμαίνεται μεταξύ 40-55m. Πολύ διαφορετικά αποτελέσματα παρουσίασαν στην ανάλυση τους οι Tzanis κ.α. (2008) βάσει άλλων γεωφυσικών διασκοπήσεων κατά τις οποίες το υπόβαθρο του χαλαρού

σηματισμού τοποθετείται σε πολύ μεγαλύτερα βάθη, ξεπερνώντας τα 200 m. Για τις ανάγκες της παρούσας διατριβής υιοθετήθηκε η θεωρία και το μοντέλο υπεδάφους των Μελλισάρη και Σταυρόπουλου (1999).

## 2.2 Τεκτονισμός

Το αλπικό υπόβαθρο της περιοχής διαμορφώνεται σε μεταμορφωμένα πετρώματα τα οποία έχουν υποστεί δύο φάσεις πλαστικής παραμόρφωσης και μία φάση εύθραυστης (Λόζιος 1993). Σύμφωνα με τους Παπανικολάου et al. (2007), η περιοχή της ΒΑ Αττικής αποτελεί ένα ρηξιτέμαχος το οποίο οριοθετείται από το ρήγμα του Ωρωπού στα βόρεια και το ρήγμα των Αιφιδών στα νότια ενώ περιστρέφεται προς τα N-ΝΔ. Το ρηξιτέμαχος διαιρείται μέσω ενός ρήγματος αποκόλλησης, με διεύθυνση ΒΒΑ-ΝΝΔ, στο ανατολικό τμήμα με μεταμορφωμένα πετρώματα και στο δυτικό με μη μεταμορφωμένα. Αυτό το ρήγμα αποκόλλησης, προκάλεσε μία καθοδική κίνηση της μη μεταμορφωμένης και την ανοδική κίνηση της μεταμορφωμένης ενότητας από ένα βαθύτερο επίπεδο της λιθόσφαιρας, όπου πραγματοποιήθηκε η μεταμόρφωση κατά το Ηώκαινο- Ολιγόκαινο (Παπανικολάου et al. 2007). Ο Λόζιος (1993) στη διατριβή του για το τεκτονικό σύστημα της ΒΑ Αττικής, υποδηλώνει ότι η ευρύτερη περιοχή χαρακτηρίζεται από τέσσερα συστήματα ρηγμάτων που έχουν προσανατολισμό ΒΔ-ΝΑ, Β-Ν, ΒΑ-ΝΔ και Α-Δ. Στην έρευνα του στην περιοχή του Μαραθώνα, αναγνωρίζει ότι τα κυρίαρχα συστήματα ρηγμάτων έχουν κατεύθυνση ΒΔ-ΝΑ και ΒΑ-ΝΔ και διατάσσονται παράλληλα με την ακτογραμμή του νότιου Ευβοϊκού διαχωρίζοντας τη περιοχή σε μικρότερα ρηξιτεμάχη. Το πρώτο σύστημα είναι μια σημαντική ρηξιγενής ζώνη που εντοπίζεται στο ΒΑ τμήμα της περιοχής, στη μεταμορφωμένη ενότητα. Ο προσανατολισμός του δεύτερου συστήματος χαρακτηρίστηκε από τα χαρακτηριστικά των προσχωματικών αποθέσεων, που αναπτύχθηκαν κατά μήκος των ρωγματώσεων. Η κλίση των ρηξιγενών επιφανειών παρουσιάζει συνήθως φορά προς τα ΒΑ, δημιουργώντας μία σταδιακή κλιμακωτή καταβύθιση προς αυτήν τη κατεύθυνση. Η έντονη τεκτονική δραστηριότητα έχει επιδράσει καθοριστικά στη διαμόρφωση του υδρογραφικού δικτύου της λεκάνης, χαρακτηρίζοντας το από ασύμμετρη ανάπτυξη και απότομες αλλαγές στη διεύθυνση των κλάδων του καθώς και τη κατεύθυνση αυτών σε ορισμένες μόνο διευθύνσεις (Λόζιος 1993). Στον παρακάτω χάρτη (Σχήμα 2.2) παρουσιάζεται η γεωλογία και ο τεκτονισμός της περιοχής του Μαραθώνα, βάσει των γεωλογικών φύλλων «Ραφήνα» και «Κηφισιά» του ΙΓΜΕ.



Σχήμα 2.2 Γεωλογικός χάρτης Μαραθώνα. Τροποποιημένος από γεωλογικά φύλλα Κηφισιά, Ραφήνα (Ι.Γ.Μ.Ε.)

## 2.3 Έρευνα πεδίου

Ο προγραμματισμός και η δημιουργία πλάνου για την διαχείριση ενός υδροφορέα απαιτεί πρώτα την παρακολούθηση αυτού με στόχο τον προσδιορισμό των υδρολογικών διεργασιών που πραγματοποιούνται μαζί με την υδραυλική σχέση μεταξύ των στοιχείων του συστήματος. Έχοντας ως βάση τις γεωλογικές συνθήκες που επικρατούν, τα χαρακτηριστικά του υδροφορέα πρέπει να αποσαφινιστούν προκειμένου να καθοριστεί ένα εννοιολογικό μοντέλο που αντιπροσωπεύει επαρκώς το φυσικό σύστημα.

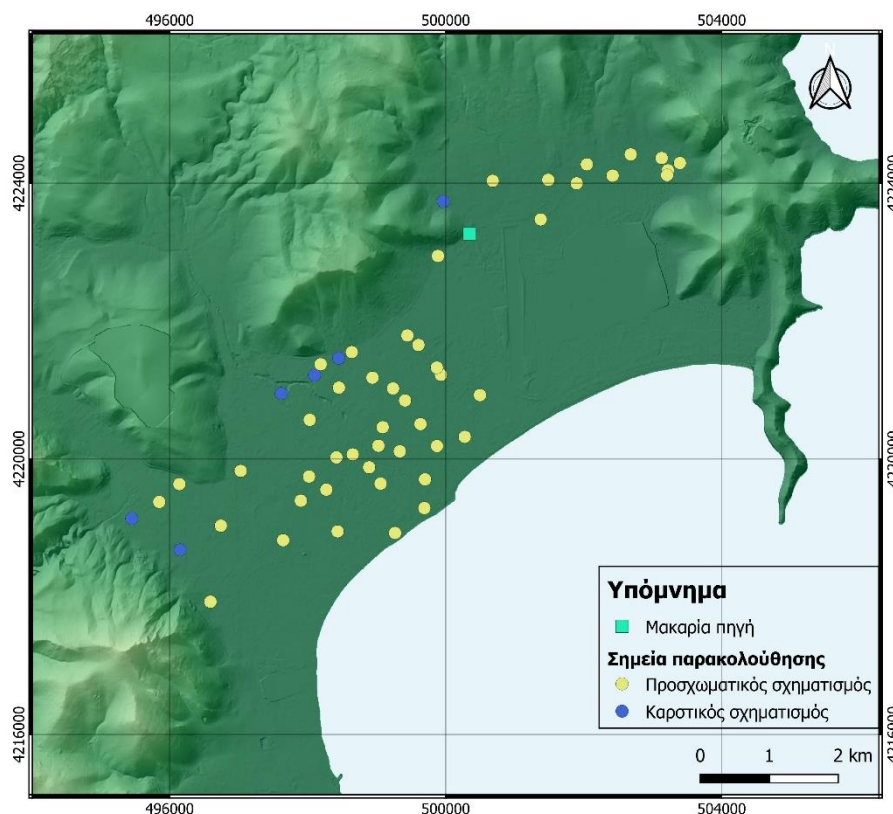
Εξετάζοντας τη γεωλογική δομή της πεδιάδας του Μαραθώνα και της ευρύτερης περιοχής, είναι ευνόητο ότι διακρίνονται δύο σχηματισμοί που αναπτύσσουν υδροφορία: τα μάρμαρα και οι προσχωματικές αποθέσεις της πεδιάδας. Εν συντομία, το υδρογεωλογικό περιβάλλον περιλαμβάνει ένα πολυστρωματικό σύστημα υδροφορέων που αποτελείται από τον ανώτερο στρώμα του κοκκώδους σχηματισμού που καταλαμβάνεται κυρίως από αλλουβιακές αποθέσεις και το περιβάλλον και υποκείμενο στρώμα καρστικού υδροφορέα με υπόβαθρο ένα αδιαπέραστο στρώμα σχιστολίθου.

Κατά την εκπόνηση της παρούσας διατριβής, μετά από βιβλιογραφική έρευνα για την περιοχή, διενεργήθηκε εκτεταμένη έρευνα στην πεδιάδα του Μαραθώνα – ξεκινώντας από τον Ιούνιο του 2015 - προκειμένου να αποσαφηνιστούν οι υδρογεωλογικές συνθήκες της περιοχής μελέτης. Ο κύριος σκοπός της έρευνας ήταν η υδροδυναμική σχέση μεταξύ του καρστικού και του κοκκώδους προσχωματικού σχηματισμού, το υδροχημικό καθεστώς του υπογείου νερού και επίσης η επίδραση της διείσδυσης θαλασσινού νερού στην περιοχή. Ιδιαίτερα σημαντική ήταν η βιβλιογραφική ανασκόπηση και η χρήση πληροφοριών από παλαιότερες έρευνες για τη διαμόρφωση του υδρογεωλογικού τοπίου. Στο πλαίσιο αυτής της ανασκόπησης λήφθηκαν υπόψη γεωφυσικά, υδρογεωλογικά και υδροχημικά δεδομένα.

Κατά τη διάρκεια της έρευνας πεδίου, πραγματοποιήθηκαν αρκετές εκστρατείες παρακολούθησης του υπόγειου νερού με τη συλλογή δεδομένων στάθμης και δειγμάτων υπόγειων νερών καθώς και με επιτόπιες μετρήσεις ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC), pH, θερμοκρασίας και διαλυμένου οξυγόνου (DO). Για την ολοκλήρωση της έρευνας, τα δείγματα που συλλέγονταν, αναλύονταν χημικά, ως προς τα βασικά ιόντα ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ ). Στο δίκτυο παρακολούθησης συμπεριλήφθηκαν 52 σημεία (πηγάδια και γεωτρήσεις) τα οποία επιλέχθηκαν βάσει της θέσης τους και της προσβασιμότητάς τους (Σχήμα 2.3). Η πλειοψηφία των σημείων παρακολούθησης είναι στον κοκκώδη υδροφορέα. Για την επιλογή των σημείων παρακολούθησης στον αλλουβιακό υδροφορέα δεν χρησιμοποιήθηκε κάποια μεθοδολογία βέλτιστης κατανομής (π.χ. Amiri et

al. 2022, Peng et al. 2022, Azadi et al. 2020). Τα σημεία που χρησιμοποιήθηκαν κατανέμονται στην πεδιάδα. Επιπλέον, βάσει των μετρήσεων στάθμης και ηλεκτρικής αγωγιμότητας θεωρούνται επαρκή καθώς καταγράφεται και επομένως λαμβάνεται υπόψη η εποχιακή διακύμανση των δύο προαναφερθέντων μεγεθών συμπεριλαμβανομένων και των ιδιαίτερα επιβαρυμένων περιοχών, όπως παρουσιάζεται και στα Σχήματα 2.5, 2.7 και 2.8. Ακόμη δεν θα ήταν δυνατή η δημιουργία νέων σημείων παρακολούθησης στην περιοχή κατά μήκος της ακτογραμμής όπου δεν υπήρχαν υφιστάμενες γεωτρήσεις ή πηγάδια, λόγω της έλλειψης προϋπολογισμού για τη διάνοιξη γεωτρήσεων.

Στον καρστικό σχηματισμό οι υφιστάμενες γεωτρήσεις εντοπίζονται μόνο στις παρυφές του Πεντελικού Όρους όπου ο υδροφορέας αναπτύσσεται σε μικρή απόσταση από την επιφάνεια του εδάφους. Στο κεντρικό τμήμα της πεδιάδας δεν εντοπίστηκε καμία γεώτρηση στον καρστικό υδροφορέα κατά τη διάρκεια της εκτενούς έρευνας πεδίου. Το μεγάλο βάθος στο οποίο εντοπίζεται ο υδροφορέας σε σχέση με τον προσχωματικό και η μεγάλη σκληρότητα του σχηματισμού καθιστά τόσο το κόστος διάνοιξης γεώτρησης όσο και το κόστος άντλησης νερού ιδιαίτερα δαπανηρό σε σχέση με τις γεωτρήσεις στον προσχωματικό υδροφορέα. Αν και χρησιμοποιήθηκε περιορισμένος αριθμός γεωτρήσεων στον βαθύτερο καρστικό σχηματισμό, τα σημεία παρακολούθησης σε αυτό το στρώμα κατανέμονται ομοιόμορφα κατά μήκος των βόρειων υδραυλικών και υδρογεωλογικών ορίων της περιοχής ενδιαφέροντος. Τα σημεία αυτά, αποδείχτηκαν σημαντικά για την υποστήριξη του μοντέλου του αλουβιακού υδροφορέα μέσω του καθορισμού των οριακών συνθηκών στην επαφή μεταξύ των δύο σχηματισμών. Η έρευνα επικεντρώθηκε στον κοκκώδη σχηματισμό με σκοπό την εξυπηρέτηση του σκοπού της διατριβής, δηλαδή την ανάπτυξη μαθηματικού μοντέλου του σχηματισμού για την αναζήτηση βέλτιστων και αποτελεσματικών τρόπων διαχείρισης του.



Σχήμα 2.3 Σημεία παρακολούθησης

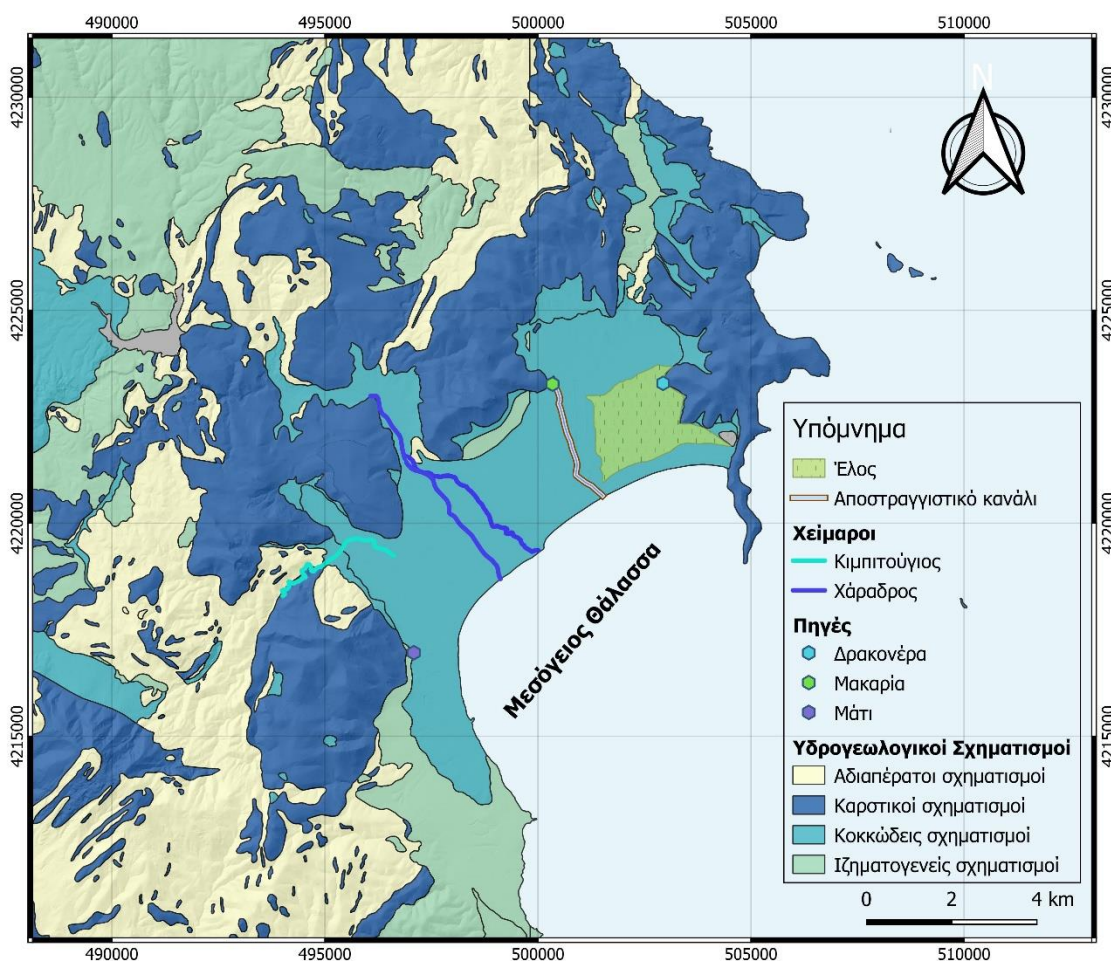
## 2.4 Το υδrosύστημα του Μαραθώνα

Οι δύο υδροφορείς αλληλοεπιδρούν και βρίσκονται σε υδραυλική επικοινωνία, αλλά τα χαρακτηριστικά τους διαφέρουν ως προς τις υδραυλικές συνθήκες, την έκταση και τον όγκο του νερού που διαρρέει στη μάζα τους. Το σύστημα των δύο υδροφορέων εκφορτίζεται στη Μεσόγειο Θάλασσα, ενώ τα υπόγεια νερά που αντλούνται από ρηχά και βαθύτερα πηγάδια –χρησιμοποιούνται κυρίως για γεωργικούς σκοπούς - θεωρείται μια άλλη σημαντική απώλεια από το σύστημα.

Η ενότητα των καρστικοποιημένων μαρμάρων στην περιοχή μπορεί να διαχωριστεί σε 5 ξεχωριστές ενότητες σύμφωνα με τους Μελίσσαρη και Σταυρόπουλο (1999). Η πεδιάδα του Μαραθώνα έρχεται σε επαφή τρεις από αυτές, την ενότητα μαρμάρων «Αγίας Μαρίνας» στα ανατολικά, την ενότητα «Μαραθώνα» στα ΒΑ και την ενότητα μαρμάρων «Γραμματικού» στο ΒΔ τμήμα του κάμπου. Το πάχος τους υπερβαίνει τα 400 m, ενώ οι τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας κυμαίνονται μεταξύ  $10^{-5}$  και  $10^{-4}$  m / sec (Σιέμος 2010). Το υπόβαθρο του καρστικού υδροφορέα αποτελείται από ένα αδιαπέραστο στρώμα σχιστολίθου της αυτόχθονης ενότητας. Το καρστικό σύστημα τροφοδοτείται με μετεωρικό νερό και εκφορτίζεται στο παράκτιο κοκκώδες στρώμα του Μαραθώνα καθώς και στη Μεσόγειο Θάλασσα μέσω διάχυτης ροής και μέσω παράκτιων και υποθαλάσσιων πηγών. Το σύστημα

Μαρμάρων «Γραμματικού» εκφορτίζεται δυτικά, στις περιοχές της Νέας Μάκρης και του Βρανά, το σύστημα μαρμάρων «Μαραθώνα» εκφορτίζεται στα κεντρικά της πεδιάδας και στην περιοχή του Κάτω Σουλίου και το σύστημα «Αγίας Μαρίνας» διαχέεται στα Ανατολικά του Κάτω Σουλίου και στο έλος. Μετά από την γεωλογική-υδρογεωλογική χαρτογράφηση που πραγματοποιήθηκε στην περιοχή μελέτης, συμπεράναμε ότι ο όγκος νερού που διαρρέει στην συγκεκριμένη ενότητα είναι περιορισμένος λόγω της μικρής έκτασης των Μαρμάρων Αγίας Μαρίνας, ενώ παράλληλα ενδέχεται να εκφορτίζεται κυρίως προς τα Ανατολικά στον Ευβοϊκό κόλπο και μικρό μέρος αυτής να τροφοδοτεί τον υδροφορέα του Μαραθώνα και μάλιστα με υφάλμυρο νερό λόγω της άμεσης υδραυλικής επαφής των μαρμάρων με τη θάλασσα.

Επιφανειακά σημεία εκφόρτισης του καρστικού συστήματος στην περιοχή έχουν εντοπιστεί στην Νέα Μάκρη η πηγή «Μάτι» με καρστικό νερό των μαρμάρων «Γραμματικού» και η πηγή «Δρακονέρα» που αποτελεί εκφόρτιση των μαρμάρων «Αγίας Μαρίνας». Κατά την έρευνα πεδίου που διενεργήθηκε δεν εντοπίστηκε το σημείο εκφόρτισης που αναφέρεται ως «Δρακονέρα» στην περιοχή που υποδεικνύεται στην βιβλιογραφία (Μαργώνη 2006). Παρ'όλα αυτά φαίνεται ότι το νερό συγκεντρώνεται στην περιοχή βόρεια του σημείου αυτού και όπως αναφέρουν και οι Μελισσάρης και Σταυρόπουλος (1999) το νερό της πηγής (με παροχή 0,02 m<sup>3</sup>/sec) διαχέεται στον υδροβιότοπο του Σχινιά και στη συνέχεια αποστραγγίζεται μέσω καναλιού στη θάλασσα. Αναφέρουν μάλιστα ότι το νερό είναι κυρίως θαλάσσιας προέλευσης βάσει των τιμών ηλεκτρικής αγωγιμότητας που μετρήθηκαν. Βάσει αυτών των πληροφοριών και λαμβάνοντας υπόψη ότι στην έκταση του υγρότοπου το ανώτερο λεπτό κοκκώδες στρώμα είναι αργλικό και επομένως δεν διευκολύνει την κατείσδυση νερού στον υδροφορέα, συμπεραίνεται ότι η συγκεκριμένη πηγή δεν συνεισφέρει ως εισροή στο υδρολογικό ισοζύγιο του προσχωματικού υδροφορέα.



Σχήμα 2.4 Το υδροσύστημα του Μαραθώνα

Ένα σημαντικό σημείο εκφόρτισης της ενότητας μαρμάρων Μαραθώνα στο ΒΑ τμήμα της περιοχής είναι η πηγή Μακαρία με μέσο ρυθμό εκφόρτισης  $810 \text{ m}^3/\text{h}$  (Perleros, 2001) σχηματίζοντας μικρή λίμνη έκτασης 1,15 στρ. περίπου. Η πηγή αυτή έχει χρησιμοποιηθεί κατά το παρελθόν ως συμπληρωματική πηγή υδροδότησης της Αθήνας από την ΕΥΔΑΠ. Σήμερα, μέρος του νερού της τροφοδοτεί το Ολυμπιακό Κωπηλατοδρόμιο του Σχινιά και τον κοκκώδη σχηματισμό ενώ η παραμένουσα ποσότητα απορρέει επιφανειακά στη θάλασσα μέσω αποστραγγιστικού καναλιού.

Υδρογεωλογικά, ο κοκκώδης υδροφορέας διαμορφώνεται από τα φυσικά όρια του συστήματος, τα οποία είναι οι ενότητες καρστικοποιημένου μαρμάρου στο βόρειο και δυτικό τμήμα της πεδιάδας και η ακτογραμμή στο νότιο τμήμα (Σχήμα 2.4). Στα ανατολικά, η περιοχή περιλαμβάνει τον παράκτιο υγρότοπο έκτασης περίπου 47 στρ. που συνδέεται υδραυλικά με το υποκείμενο στρώμα του προσχωματικού υδροφορέα. Ο αλλουβιακός υδροφορέας που εκτείνεται στην πεδιάδα του Μαραθώνα έχει πάχος που ξεκινάει από μερικά μέτρα έως και 80 μέτρα, ενώ είναι ένα στρώμα χαμηλότερης διαπερατότητας με τιμές υδραυλικής



αγωγιμότητας που κυμαίνονται από  $10^{-6}$  έως  $10^{-5}$  m/sec (Σιέμος 2010). Διαμορφώνεται μέσα στις προσχώσεις του τεταρτογενούς και τις αποθέσεις του νεογενούς, που πλήρωσαν το καρστικό βύθισμα του παράκτιου πεδίου στον Μαραθώνα. Όπως αναφέρθηκε και στο κεφάλαιο της γεωλογικής δομής της περιοχής, το πάχος του συγκεκριμένου σχηματισμού έχει εκτιμηθεί διαφορετικό από άλλους μελετητές με εκτιμήσεις από μέγιστο βάθος 60 m (Μελισσάρης και Σταυρόπουλος 1999) έως 200 m (Tzanis et al. 2008). Το κοκκώδες στρώμα αποτελείται από ιζήματα διαφορετικής σύστασης και κοκκομετρίας με στρώσεις πηλού, ιλύος, αργίλου, άμμου και χαλικιών ενώ στη μάζα του περιέχονται ψαμμίτες και λατυποκροκαλοπαγή. Παρόλο που ο υδροφορέας θεωρείται ελεύθερος, η εμφάνιση εκτεταμένων αργιλικών φακών μικρού πάχους οδηγεί στο σχηματισμό περιορισμένου υδροφορέα σε μικρές εκτάσεις στην πεδιάδα. Αυτό το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό καθιστά ακόμη πιο δύσκολη την έρευνα, την παρακολούθηση και τη διαχείριση του αλλουβιακού υδροφορέα λόγω των διαφορετικών υδροδυναμικών συνθηκών που δημιουργούνται στον σχηματισμό.

Η περιοχή του υγροτόπου (μεταξύ Κάτω Σουλίου και ακτογραμμής) καταλαμβάνεται από λεπτό στρώμα αργίλου κατακρατώντας τα εισρέοντα νερά. Πρόκειται μία περιοχή με χαμηλή τοπογραφία που σε σημεία παρουσιάζει και αρνητικά υψόμετρα ενώ το μέγιστο ύψος υπολογίζεται στα 2,5m στο βόρειο τμήμα του έλους (βάσει του χάρτη της Γ.Υ.Σ.). Η ύπαρξη του λεπτόκοκκου στρώματος αργίλου σε συνδυασμό με τη χαμηλή τοπογραφία, δημιουργεί μία έκταση στην οποία κατακρατούνται τα εισερχόμενα νερά (κυρίως βρόχινα και από την καρστική ενότητα των μαρμάρων Αγίας Μαρίνας) με αποτέλεσμα την διαμόρφωση του έλους-υγροτόπου του Σχινιά. Στην έκταση του έλους, το υποκείμενο υδροφόρο στρώμα δεν έχει διερευνηθεί επαρκώς και σε όλη την έκτασή του λόγω της εγκατάστασης αμερικάνικης ναυτικής βάσης κατά το παρελθόν και της μη ύπαρξης βαθύτερων γεωτρήσεων. Στα πλαίσια της μελέτης «Έργα αποκατάστασης ζώνης Α1 πάρκου Σχοινία» του Υπουργείου Περιβάλλοντος, Χωροταξίας και Δημοσίων Έργων, πραγματοποιήθηκαν αβαθείς διερευνητικές γεωτρήσεις (5 μέτρων) από την εταιρεία «GeoPraxis- Αβραμίδης & Συνεργάτες» (2005) στην έκταση του έλους και εκτελέστηκαν δοκιμές περατότητας MAAG. Βάσει αυτών, η υδραυλική αγωγιμότητα στο έλος κυμαίνεται μεταξύ  $1,89 \times 10^{-8}$  m/sec και  $2,34 \times 10^{-5}$  m/sec. Ακόμη, οι γεωφυσικές διασκοπήσεις των Μελισσάρη και Σταυρόπουλου (2009) υπέδειξαν ότι το στρώμα αργίλου φτάνει στα 6 μέτρα.

Στην πεδιάδα του Μαραθώνα καταλήγουν τα ρέματα των υδρολογικών λεκανών του Χάραδρου, της Ραπεντώσας (χείμαρος Κιμπιτούγιος) και της Μυρτιάς τα οποία μάλιστα έχουν παίξει και πολύ σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση του προσχωσιγενούς πεδίου (Μαργώνη

2006). Τα ρέματα που εντοπίζονται στην περιοχή είναι εφήμερα χωρίς σταθερή ροή, ενώ κατά το παρελθόν έχουν παρατηρηθεί πλημμυρικά φαινόμενα γύρω από την κοίτη τους (Διακάκης 2013). Αυτά τα ρέματα φαίνεται να συμμετέχουν σε κάποιο βαθμό ως εισροή στο υδρολογικό ισοζύγιο του υδροφορέα. Περαιτέρω ανάλυση της ποσότητας με την οποία τροφοδοτείται ο υδροφορέας από τους χειμάρρους δεν είναι δυνατή εξαιτίας της έλλειψης μετρήσεων.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η επιφανειακή εκφόρτιση των μαρμάρων Μαραθώνα σχηματίζει την καρστική λιμνοπηγή Μακαρία η οποία συμμετέχει στο ισοζύγιο του προσχωματικού υδροφορέα, ενώ η υπερχειλίση της οδηγείται στο αποστραγγιστικό κανάλι προς το κωπηλατοδρόμιο και προς τη θάλασσα. Βάσει μετρήσεων αγωγιμότητας που έγιναν στην πηγή και το αποστραγγιστικό κανάλι τον Δεκέμβριο του 2016, καθώς και συνεχούς παρατήρησης της ροής του καναλιού φαίνεται ότι:

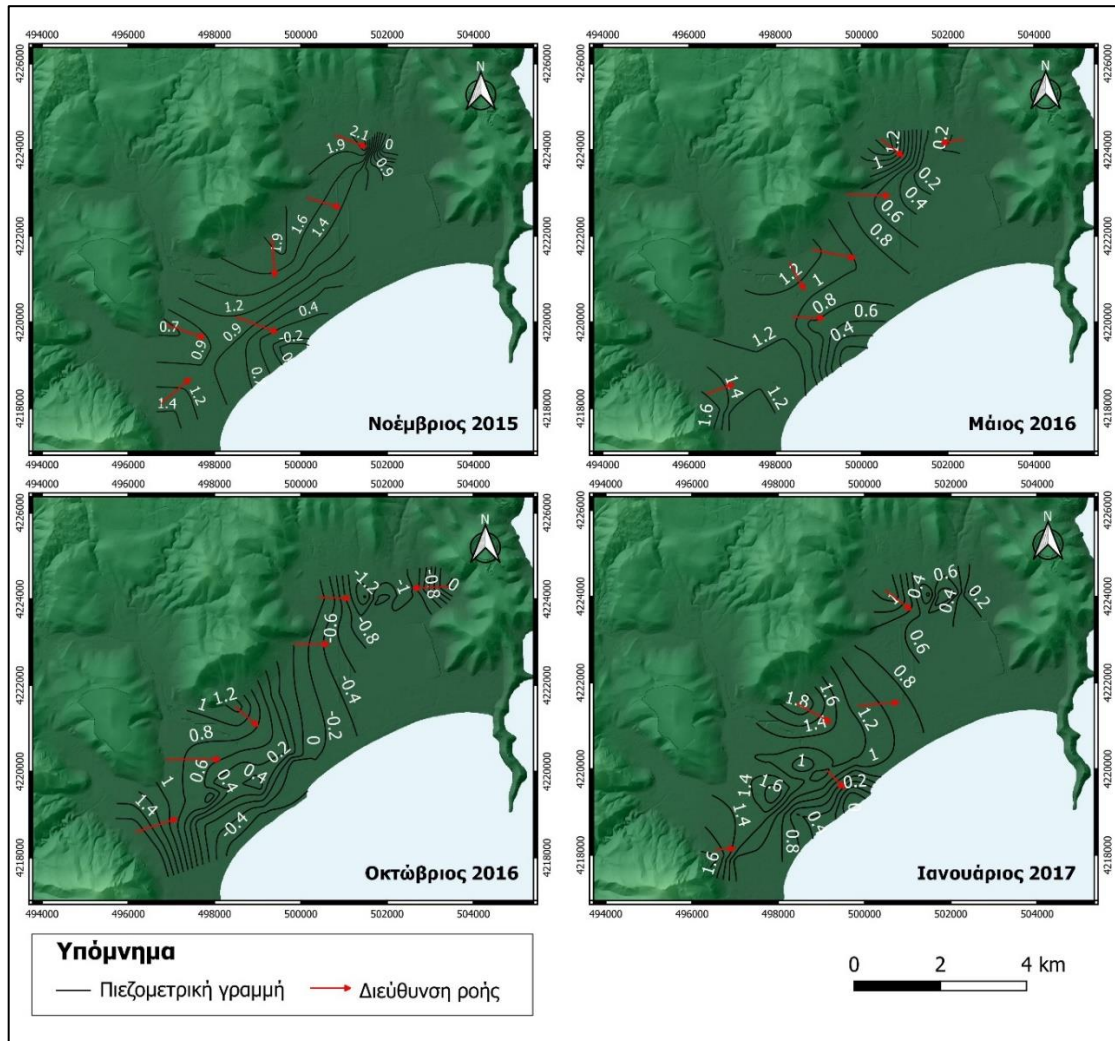
- Η ηλεκτρική αγωγιμότητα της καρστικής πηγής κυμαίνεται μεταξύ 980-1300  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Στα ίδια επίπεδα κυμαίνονται και οι τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας στα δείγματα υπογείου νερού του καρστικού συστήματος Μαρμάρων Μαραθώνα
- Η χαμηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα ( $\approx 1000 \mu\text{S}/\text{cm}$ ) συνεχίζει για 500 περίπου μέτρα έως το σημείο που κανάλι διακλαδώνεται και συνεχίζει ανατολικά προς το κωπηλατοδρόμιο και νότια προς τη θάλασσα. Έως αυτό το σημείο, το νερό που έρχεται από τη λίμνη έχει πολύ μικρή ροή. Στα κατάντη, η ροή είναι πολύ μεγαλύτερη και η αγωγιμότητα αυξάνεται φτάνοντας τα 4600-4700  $\mu\text{S}/\text{cm}$  κατά μήκος όλου του καναλιού έως ότου φτάσει στη θάλασσα. Σε αυτό το εύρος τιμών κυμαίνεται και η αγωγιμότητα του προσχωματικού υδροφορέα δυτικά του καναλιού.

Συμπερασματικά, φαίνεται ότι το νερό που παροχετεύεται στο αποστραγγιστικό κανάλι είναι σε πολύ μικρή ποσότητα νερό της πηγής και οι ποσότητες νερού που καταλήγουν τη θάλασσα είναι υπόγειο νερό του προσχωματικού υδροφορέα.

## 2.5 Υδροδυναμικές συνθήκες

Οι πιεζομετρικοί χάρτες του σχήματος 2.5 σχεδιάστηκαν βάσει των μετρήσεων στάθμης που πραγματοποιήθηκαν κατά την έρευνα πεδίου στον προσχωματικό υδροφορέα και αφορούν ενδεικτικές περιόδους μέσα στο υδρολογικό έτος. Βάσει αυτών, φαίνεται ο προσχωματικός σχηματισμός να εμπλουτίζεται από τα μάρμαρα μέσω διάχυτης ροής και ρέοντας προς την ακτογραμμή, εκφορτίζεται στη θάλασσα. Οι βασικές ζώνες τροφοδοσίας φαίνονται από τη διεύθυνση ροής, με διευθύνσεις: (i) BA και NA από τους όγκους των

Μαρμάρων Γραμματικού (ii) ΝΑ προς το κεντρικό τμήμα της πεδιάδας , Α (από την περιοχή της Μακαρίας πηγής) προς τον υγρότοπο , ΑΝΑ προς το Κάτω Σούλι από τον όγκο των Μαρμάρων Μαραθώνα και (iii) Δ προς το Κάτω Σούλι από τα Μάρμαρα Αγίας Μαρίνας. Είναι αισθητή η διακύμανση της στάθμης των υπόγειων νερών μεταξύ του τέλους υγρής και του τέλους της ξηράς περιόδου. Το υδραυλικό φορτίο παρουσιάζει αρνητικές τιμές (κάτω από τη μέση στάθμη της θάλασσας) προς την ακτογραμμή καθώς και στην περιοχή του Κάτω Σουλίου μετά το πέρας της ξηρής περιόδου (Οκτώβριος 2016).



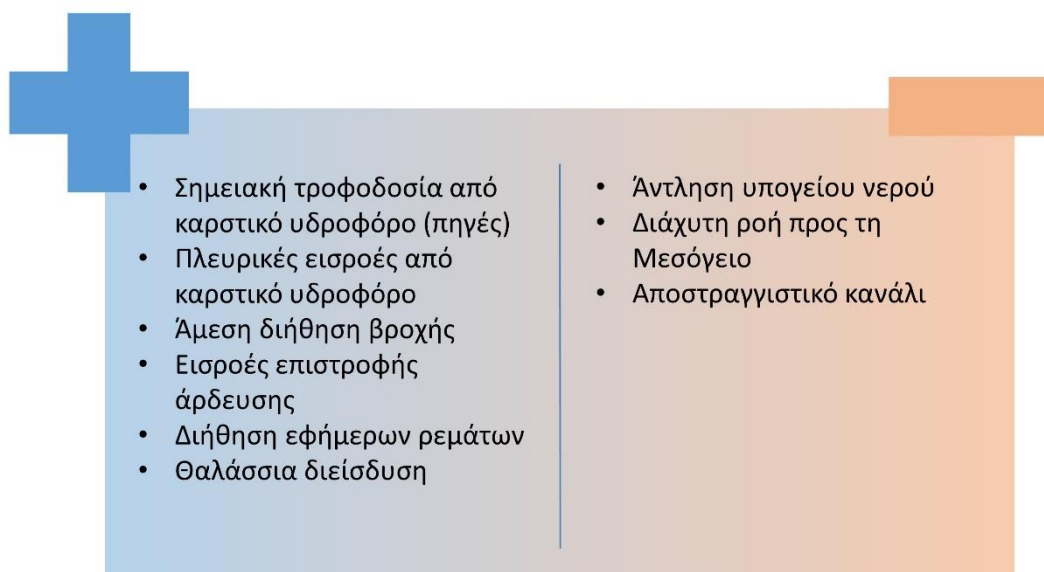
Σχήμα 2.5 Πιεζομετρία προσχωματικού σχηματισμού

Οι τιμές αρνητικού φορτίου υποδεικνύουν την υποβάθμιση του υδροφορέα εξαιτίας της συνεχόμενης άντλησης υπογείου νερού κατά την ξηρή περίοδο όπου παράλληλα δεν υπάρχει φυσικός εμπλουτισμός λόγω χαμηλών βροχοπτώσεων και υψηλής εξατμισοδιαπνοής ενώ μειώνεται αντίστοιχα και ο εμπλουτισμός του υδροφορέα από το νερό του καρστικού υδροφορέα. Από την πιεζομετρία της περιοχής, φαίνεται ότι η τροφοδοσία από τον ορεινό όγκο της Αγίας Μαρίνας δεν είναι σημαντική, συγκρίνοντας την με τις πιεζομετρικές

συνθήκες που επικρατούν κατάντη των ορεινών όγκων μαρμάρων Γραμματικού και Μαραθώνα, κάτι που επιβεβαιώνει την αρχική θεώρηση για το καρστ του συγκεκριμένου ορεινού όγκου στην διαδικασία χαρτογράφησης της περιοχής. Συμπερασματικά, το χαμηλό πιεζομετρικό φορτίο (έως και αρνητικό) στα ανατολικά του Κάτω Σουλίου ενδεχομένως οφείλεται στις έντονες αντλήσεις, στην ελλειπή τροφοδοσία από τα μάρμαρα Αγ. Μαρίνας και στην ύπαρξη υπερκείμενου λεπτού στρώματος αργίλου στην περιοχή με αποτέλεσμα να μειώνεται η φυσική τροφοδοσία από τα κατακριμνήσματα.

Η άμεση υδραυλική επαφή του υδροφορέα με τη θάλασσα κατά μήκος της ακτογραμμής υποδηλώνει την πιθανότητα θαλάσσιας διείσδυσης, ενώ η πιεζομετρική γραμμή του 0 και οι αρνητικές τιμές πιεζομετρίας στην ενδοχώρα κοντά στην ακτογραμμή φαίνεται να επιβεβαιώνουν την εξέλιξη του φαινομένου. Εξετάζοντας την κατανομή των ισοπιεζομετρικών καμπυλών στο χάρτη του σχήματος 2.5, φαίνεται ότι κατά την υγρή περίοδο παρατηρείται παθητική θαλάσσια διείσδυση. Οι σχεδόν αμελητέες υδραυλικές κλίσεις προς την ενδοχώρα κατά την ξηρή περίοδο οφείλονται στην μείωση της φυσικής τροφοδοσίας κατά τους θερινούς μήνες και την έντονη αύξηση των αντλήσεων, προκαλώντας ενεργητική θαλάσσια διείσδυση σε εποχιακό επίπεδο. Η παθητική θαλάσσια διείσδυση εμφανίζει μικρότερες συνέπειες από αυτές της ενεργητικής. Η διείσδυση του θαλασσινού νερού προς την ενδοχώρα συμβαίνει με χαμηλότερο ρυθμό και η διεπιφάνεια αλμυρού-γλυκού νερού κινείται αργά έως ότου να έρθει σε νέα ισορροπία.

Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα παραπάνω, το υδρολογικό ισοζύγιο του προσχωματικού σχηματισμού διαμορφώνεται από (Σχήμα 2.6): (i) άμεσης διήθησης από τη βροχή (ii) πλευρικές εισροές από τα γύρω καρστικοποιημένα μάρμαρα (iii) εισροές επιστροφής άρδευσης και (iv) την καρστική πηγή της Μακαρίας στο ΒΑ τμήμα της περιοχής, (v) θαλάσσια διείσδυση. Ως απώλειες του συστήματος αναγνωρίστηκαν: (i) η άντληση υπογείου νερού για την εξυπηρέτηση γεωργικών αναγκών, (ii) η διάχυτη ροή προς τη θάλασσα και (iii) το αποστραγγιστικό κανάλι της Μακαρίας.



Σχήμα 2.6 Υδρολογικό ισοζύγιο προσχωματικού υδροφορέα

## 2.6 Υδροχημικές συνθήκες

Οι ανθρωπογενείς δραστηριότητες στην πεδιάδα του Μαραθώνα -κυρίως γεωργικές και τουριστικές- έχουν οδηγήσει σε υποβάθμιση των υπόγειων νερών τα οποία έχουν επηρεαστεί ποσοτικά και ποιοτικά. Η διείσδυση θαλασσινού νερού στην ηπειρωτική χώρα έχει παρατηρηθεί και στους δύο σχηματισμούς, ενώ έχει παρατηρηθεί υψηλή συγκέντρωση ιόντων (π.χ. Koumantakis et al. 1993, Psychogiou et al. 2006, Sotiropoulos et al. 2007, Perdikaki et al. 2020). Η ποιότητα του νερού στον προσχωματικό σχηματισμό είναι γενικά πιο υποβαθμισμένη, κυρίως εξαιτίας του πολύ μεγαλύτερου αριθμού πηγαδιών και γεωτρήσεων που χρησιμοποιούνται σε σχέση με το βαθύτερο στρώμα αλλά και της άμεσης επαφής του εδάφους με οποιαδήποτε ανθρωπογενή παρέμβαση (π.χ. χρήση λιπασμάτων για γεωργικούς σκοπούς).

Οι δειγματοληψίες, οι επί τόπου μετρήσεις (T, EC, pH, DO) και οι χημικές αναλύσεις υπογείου νερού έλαβαν χώρα για διαφορετικές περιόδους έτσι ώστε να ελεγχθεί η εποχιακή διακύμανση της ποιότητας. Οι χημικές παράμετροι που αναλύθηκαν επιλέχθηκαν με βάση τις κύριες πηγές μόλυνσης στην περιοχή ενδιαφέροντος, οι οποίες προκαλούνται από ανθρωπογενείς δραστηριότητες (κυρίως γεωργικές) και τη διείσδυση θαλασσινού νερού:  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ .

Η επίδραση της θαλάσσιας διείσδυσης είναι σαφής στην υδροχημική ταυτότητα των δειγμάτων (Σχήμα 2.1, Πίνακας 2.1, Πίνακας 2.2) παρέχοντας μια αναλυτικότερη εικόνα για

την εξέλιξη του φαινομένου, κάτι που δεν μπορεί να αναγνωρισθεί μόνο από πιεζομετρικά δεδομένα. Μία πρώτη ένδειξη για την ύπαρξη υφάλμυρου νερού είναι η υψηλές τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας. Ως υφάλμυρο νερό θεωρείται το νερό με αγωγιμότητα μεγαλύτερη των 1000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  ενώ βάσει της οδηγίας (ΕΕ) 2020/2184 της Ευρωπαϊκής Επιτροπής έχει θεσπιστεί το όριο των 2500  $\mu\text{S}/\text{cm}$  για νερό ανθρώπινης κατανάλωσης. Από τους Πίνακες 2.1 και 2.2 φαίνεται ότι το νερό και των δύο σχηματισμών θεωρείται υφάλμυρο. Ένα χρήσιμο εργαλείο για την παρακολούθηση της διείσδυσης θαλάσσιου νερού είναι η παραγωγή θεματικών χαρτών με τη χωρική κατανομή των συγκεντρώσεων ιόντων με το χλώριο να είναι ο καταλληλότερος δείκτης για τον προσδιορισμό της έκτασης της υφαλμύρισης σε έναν υποβαθμισμένο υδροφορέα. Στο Σχήμα 2.7 παρατίθεται η διακύμανση των ιόντων χλωρίου σύμφωνα με τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν, για διαφορετικές περιόδους. Συγκρίνοντας ποιοτικά τη συμπεριφορά του υδροφορέα στις διαφορετικές περιόδους δειγματοληψίας, φαίνεται ότι αν και η ποσοτική κατάσταση (Σχήμα 2.5) εμφανίζει κάποια βελτίωση κατά τη διάρκεια και μετά το πέρας της υγρής περιόδου (Ιανουάριος και Μάιος αντίστοιχα), η ποιότητα των υπογείων νερών δεν έχει σημαντική βελτίωση στο τέλος της υγρής περιόδου. Αυτό μπορεί να οφείλεται αφενός στο ότι η φυσική επαναφόρτιση του υδροφορέα από τα κατακρημνίσματα δεν είναι επαρκής ώστε να βελτιώσει σημαντικά την ποιότητα του νερού και αφ' ετέρου στο ότι η ποιότητα των καρστικών νερών που επαναφορτίζουν τον κοκκώδη σχηματισμό είναι ήδη επιβαρυνμένη (σε μικρότερο βαθμό) από τη θαλάσσια διείσδυση (Πίνακας 2.2). Ένας ακόμη παράγοντας, είναι το γεγονός ότι δεν υπάρχει παύση των αντλήσεων κατά την υγρή περίοδο, αφού στην περιοχή λειτουργούν και θερμοκηπιακές μονάδες ενώ από τις παρατηρήσεις στη διάρκεια των μετρήσεων πεδίου, πολλά αγροτεμάχια μετατρέπονται σε θερμοκήπια κατά τη διάρκεια του χειμώνα.

Στον αλλουβιακό σχηματισμό, οι υψηλές τιμές των χλωριόντων δείχνουν την εξέλιξη της θαλάσσιας διείσδυσης. Μεγαλύτερες συγκεντρώσεις παρατηρούνται κυρίως στο κεντρικό τμήμα της περιοχής και κοντά στην ακτή όπου τα χλωριόντα υπερβαίνουν τα 800 mg / lt ενώ η αλατότητα μειώνεται βόρεια, στο δυτικό τμήμα του Κάτω Σουλίου και στο ΝΔ τμήματα της πεδιάδας όπου ο κοκκώδης σχηματισμός συναντά τον καρστικό. Και στους δύο σχηματισμούς (αλλουβιακό και καρστικό), υπάρχουν τιμές που υπερβαίνουν το όριο συγκέντρωσης ιόντων χλωρίου των 200-250 mg / lt που δίνεται από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή, σύμφωνα με το παράρτημα 3 της οδηγίας για τα υπόγεια νερά. Η απόκλιση από τα ευρωπαϊκά πρότυπα είναι πολύ πιο έντονη στον επιφανειακό κοκκώδη σχηματισμό όπου η πλειοψηφία των δειγμάτων υπογείου νερού είναι πάνω από τα όρια συγκέντρωσης χλωρίου.

Η διαφορά μεταξύ των συγκεντρώσεων ιόντων στους δύο σχηματισμούς προκύπτει από τις διαφορές στις υδροδυναμικές συνθήκες, τα υδραυλικά χαρακτηριστικά και την τροφοδοσία και εκφόρτιση υπόγειων νερών. Η απόκλιση στις συγκεντρώσεις ιόντων αλλουβιακού-καρστικού υδροφορέα έγκειται στον ρυθμό άντλησης υπογείου νερού, καθώς επηρεάζει τον αλλουβιακό υδροφορέα περισσότερο από την καρστική ενότητα ως αποτέλεσμα των πολλαπλών φρεατίων και γεωτρήσεων στο σχετικά ρηχό στρώμα και των περιορισμένων γεωτρήσεων στο καρστ. Λαμβάνοντας υπόψη την συγκέντρωση χλωριόντων Οκτωβρίου 2016 (Σχήμα 2.7) και παράλληλα την πιεζομετρία της ίδιας περιόδου (Σχήμα 2.5) είναι εμφανές ότι ο αλλουβιακός υδροφορέας επαναφορτίζεται με υφάλμυρο νερό από τα Μάρμαρα Αγίας Μαρίνας, κάτι που επιβεβαιώνεται από τις υψηλές τιμές χλωρίου που καταγράφηκαν στην περιοχή ανατολικά του Κάτω Σουλίου.

Ως γεωργική περιοχή, το υπόγειο νερό στον Μαραθώνα εμφανίζει υψηλές συγκεντρώσεις νιτρικών ιόντων που συνδέονται κυρίως με την εκτεταμένη χρήση λιπασμάτων. Σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Επιτροπή, το μέγιστο επιτρεπόμενο όριο συγκέντρωσης νιτρικών ιόντων στο πόσιμο νερό είναι τα 50 mg/lit. Στον χάρτη του Σχήματος 2.8 φαίνεται ότι μερικά από τα δείγματα του καρστικού υδροφορέα ξεπερνούν το προβλεπόμενο όριο, ενώ γενικά παρατηρούνται χαμηλές τιμές στην πλειοψηφία των δειγμάτων. Αντίθετα, η πλειονότητα των δειγμάτων του αλλουβιακού υδροφορέα υπερβαίνει το όριο των 50 mg/lit, καθώς το πρόβλημα εντείνεται λόγω της άμεσης χρήσης φυτοφαρμάκων στον συγκεκριμένο σχηματισμό και πιθανώς λόγω απορροφητικών βόθρων που υφίστανται στην περιοχή. Ο καρστικός υδροφορέας επηρεάζεται λιγότερο από την ρύπανση από νιτρικά άλατα λόγω των διαφορετικών υδροδυναμικών συνθηκών του συστήματος, της μεγάλης έκτασης του αλλά κυρίως λόγω του ότι ο καρστικός σχηματισμός στην πεδιάδα του Μαραθώνα καλύπτεται στο μεγαλύτερο μέρος του από το επιφανειακό αλλουβιακό στρώμα.

Από τους χάρτες της πιεζομετρίας, των ιόντων χλωρίου και των νιτρικών ιόντων φαίνεται ότι οι πιο υποβαθμισμένες περιοχές τόσο ποιοτικά όσο και ποσοτικά είναι το κεντρικό τμήμα της πεδιάδας και το κεντρικό και ανατολικό τμήμα του Κάτω Σουλίου. Η υψηλή συγκέντρωση ιόντων χλωρίου σε αυτές τις εκτάσεις του αλλουβιακού υδροφορέα και οι χαμηλές πιεζομετρικές συνθήκες (έως και αρνητικά υδραυλικά φορτία), οφείλεται στην αυξημένη ένταση αγροτικής δραστηριότητας και της ανεξέλεγκτες αντλήσεις. Συνολικά, η τρωτότητα του αλλουβιακού στρώματος αυξάνεται λόγω της διείσδυσης θαλασσινού νερού και της περιορισμένης φυσικής τροφοδοσίας.

Για τον χαρακτηρισμό των υπογείων νερών του Μαραθώνα σχεδιάστηκαν τα διαγράμματα των Σχημάτων 2.9 και 2.1 με το εργαλείο υδρογεωλογικής-υδροχημικής

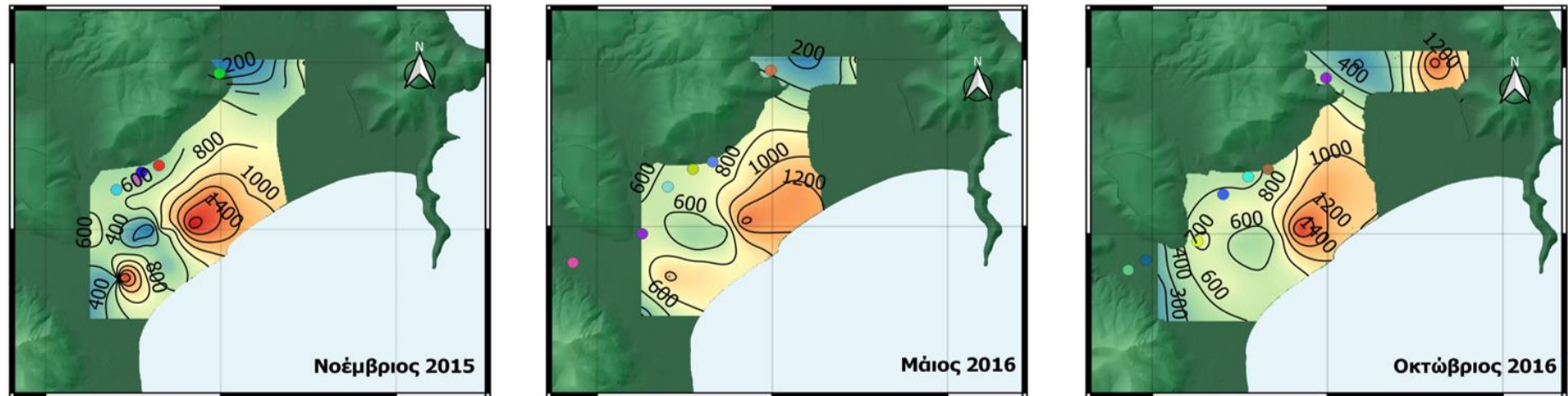
ανάλυσης AkvaGIS (Criollo et al. 2019, Perdikaki et al. 2020) το οποίο δημιουργήθηκε για να συμπληρώσει τις λειτουργίες της ελεύθερης και ανοιχτού λογισμικού πλατφόρμας «FREEWAT» (<http://www.freewat.eu/>) σε περιβάλλον QGIS. Το AkvaGIS αποτελείται από μια γεωχωρική βάση δεδομένων και περιλαμβάνει ένα σύνολο εργαλείων που έχουν σχεδιαστεί για τη βελτίωση της διαχείρισης, της οπτικοποίησης και της ερμηνείας των συλλεγόμενων υδρογεωλογικών και υδροχημικών δεδομένων.

Στο Σχήμα 2.9(α) και 2.9(γ) παρουσιάζεται το διάγραμμα Piper για τα δείγματα υπόγειων νερών του αλλουβιακού σχηματισμού που συλλέχθηκαν τον Μάιο και τον Οκτώβριο του 2016. Από το διάγραμμα φαίνεται ότι ο κυρίαρχος τύπος υπόγειου νερού είναι Na -Ca - Cl, καθώς οι υψηλές τιμές συγκέντρωσης χλωριόντων και νατρίου υποδεικνύουν την εισβολή αλμυρού νερού, ενώ τα ιόντα ασβεστίου ενδέχεται να σχετίζονται με την παρουσία ανθρακικών πετρωμάτων σε ολόκληρη την περιοχή της πεδιάδας του Μαραθώνα. Επιπλέον, σύμφωνα με τους Appelo και Postma (2005), η πλειονότητα των δειγμάτων υποδεικνύει διεργασίες ανταλλαγής ιόντων που λαμβάνουν χώρα ως αλληλεπίδραση νερού-πετρώματος (ή εδάφους) κατά τη διάρκεια του φαινομένου της διείσδυσης θαλασσινού νερού, καθώς όλα τα δείγματα σχεδιάζονται μεταξύ της ζώνης διείσδυσης και ανάμιξης θαλασσινού-γλυκού νερού, επιβεβαιώνοντας διεργασίες θαλάσσιας διείσδυσης.

Στα διαγράμματα Piper του σχήματος Σχήμα 2.9(β) και 2.9, απεικονίζονται τα δείγματα υπογείων νερού του καρστικού υδροφορέα για τον Μάιο και τον Οκτώβριο του 2016. Ο κυρίαρχος χημικός τύπος νερού που εντοπίστηκε είναι επίσης Na-Ca-Cl, γεγονός που συμβάλει στη θεώρηση της υδραυλικής σύνδεσης των δύο υδροφορέων. Τα περισσότερα δείγματα απεικονίζονται μεταξύ της ζώνης διείσδυσης και της ζώνης ανάμιξης, ενώ δύο από αυτά σχεδιάζονται μεταξύ της ανάμιξης και της ζώνης γλυκού νερού, κάτι που δείχνει ότι κάποια πηγάδια του καρστικού υδροφορέα έχουν καλύτερη ποιότητα νερού.

Ως προς την καταλληλότητα για άρδευση του υπογείου νερού, σχεδιάστηκαν τα διαγράμματα συντελεστή προσρόφησης Νατρίου ή κινδύνου Νατρίου (Sodium Adsorption Ratio - SAR). Το διάγραμμα SAR για τον αλλουβιακό υδροφορέα (Σχήμα 2.10(α) και 2.1(γ)) υποδηλώνει πολύ υψηλή αλατότητα και χαμηλό έως υψηλό εύρος κινδύνου νατρίου για τα φυτά, στα περισσότερα από τα δείγματα και για τις δύο περιόδους (Μαΐου και Οκτωβρίου). Από τα δείγματα καρστικού υδροφορέα, φαίνεται το νερό να είναι λιγότερο επικίνδυνο για τις καλλιέργειες καθώς το επίπεδο αλατότητας κυμαίνεται μεταξύ υψηλού έως πολύ υψηλού και η απορρόφηση νατρίου είναι χαμηλή έως μέτρια. Από τα διαγράμματα Piper και SAR φαίνεται και πάλι ότι δεν υπάρχει κάποια μεγάλη μεταβολή της ποιότητας μεταξύ των δύο περιόδων.



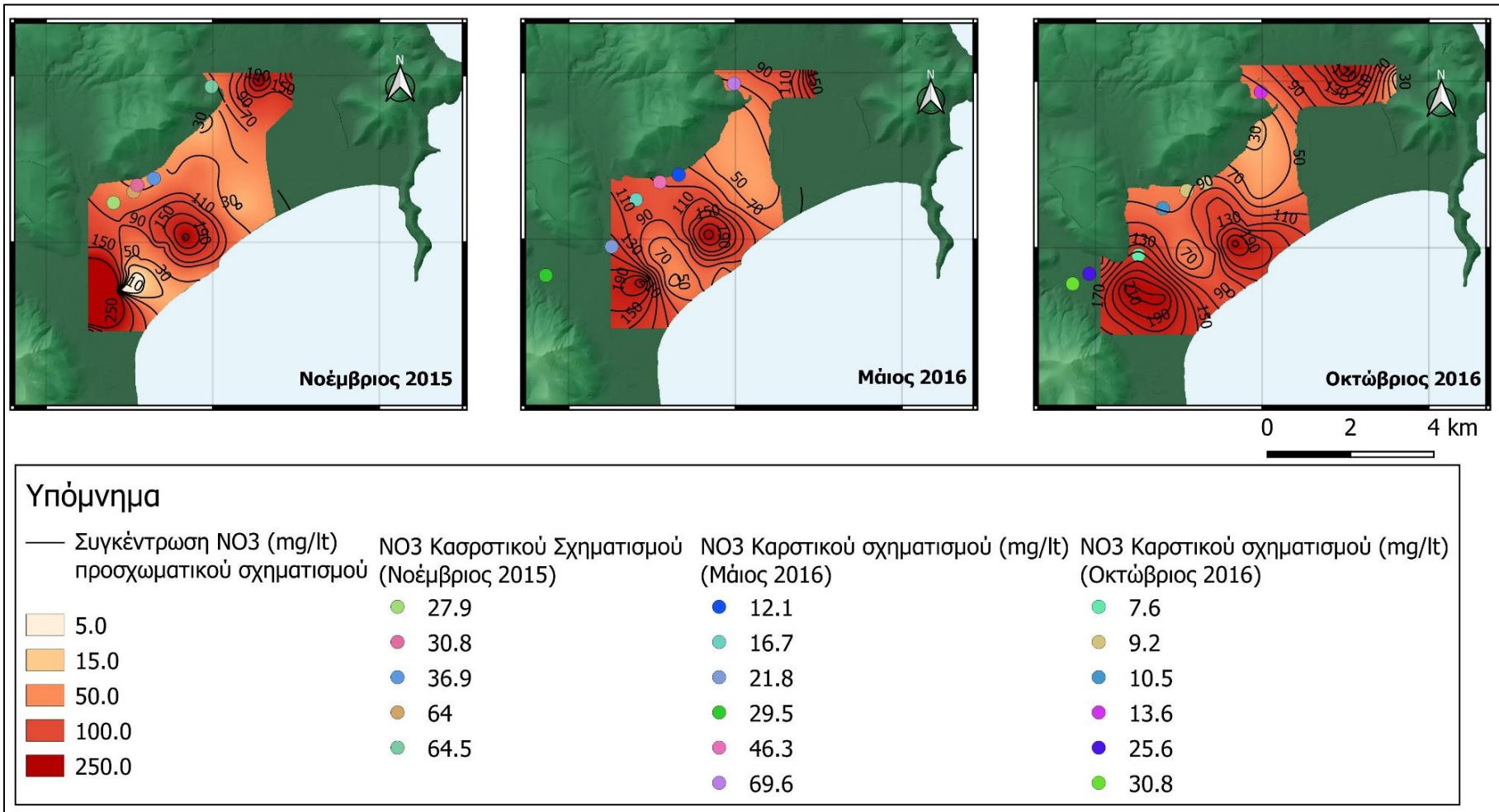


0 2 4 km

**Υπόμνημα**

— Συγκέντρωση Cl (mg/lit) προσχωματικού σχηματισμού	Cl Καρστικού σχηματισμού (mg/lit) (Νοέμβριος 2015)	Cl Καρστικού σχηματισμού (mg/lit) (Μάιος 2016)	Cl Καρστικού σχηματισμού (mg/lit) (Οκτώβριος 2016)
100	110	24	116
500	363	140	224
800	417	228	280
1200	464	370	380
1700	575	468	432
		528	460
			464

Σχήμα 2.7 Συγκέντρωση χλωριόντων καρστικού και προσχωματικού σχηματισμού



Σχήμα 2.8 Συγκέντρωση νιτρικών ιόντων καρστικού και προσχωματικού υδροφορέα

Κεφάλαιο 2

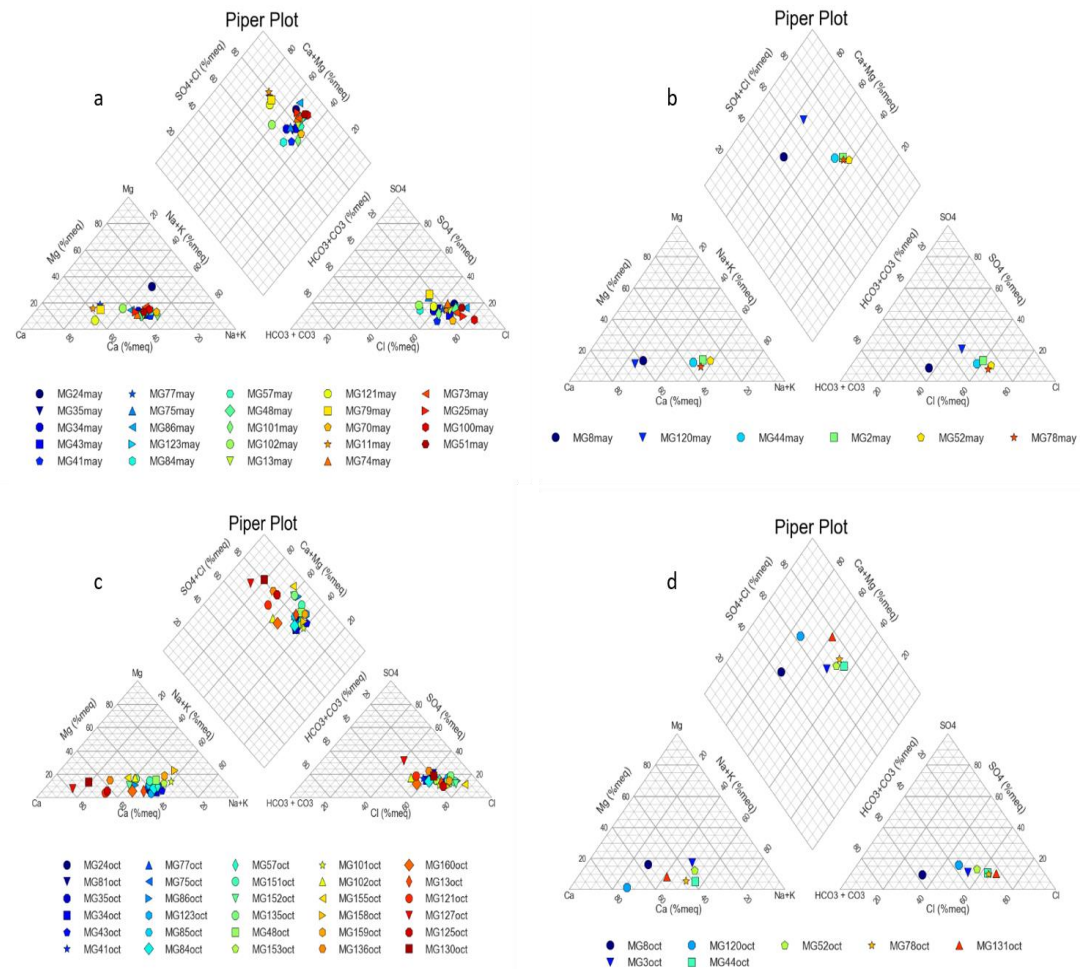
Πίνακας 2.1 Στατιστικά στοιχεία χημικών αναλύσεων για τον προσχωματικό υδροφορέα

	Νοέμβριος 2015				Μάιος 2016				Οκτώβριος 2016			
	Ελάχιστο	Μέγιστο	Μέση Τιμή	Τυπική απόκλιση	Ελάχιστο	Μέγιστο	Μέση Τιμή	Τυπική απόκλιση	Ελάχιστο	Μέγιστο	Μέση Τιμή	Τυπική απόκλιση
EC(μS/cm)	1295,00	6650,00	3191,82	1331,81	1291,00	5690,00	3123,84	1056,79	1361,00	6320,00	3096,97	1093,64
T(OC)	18,30	23,00	20,21	1,25	17,60	25,00	20,40	1,53	18,60	22,40	19,87	0,80
pH	6,82	7,76	7,14	0,23	6,90	7,60	7,14	0,17	7,00	7,70	7,23	0,16
DO(mg/l)	2,90	8,70	6,13	1,86	2,70	8,48	6,25	1,61	3,70	8,70	6,67	1,52
Cl(mg/l)	51,00	1780,00	686,88	411,78	120,00	1398,00	662,06	316,64	172,00	1624,00	702,67	344,86
NO3(mg/l)	6,10	288,00	94,89	72,94	16,70	295,00	96,82	67,73	2,80	168,50	32,19	30,08
SO4(mg/l)	128,15	530,00	191,06	113,16	116,94	420,00	207,84	104,85	104,12	480,00	209,69	89,86
HCO3(mg/l)	25,00	459,94	334,26	61,54	70,00	488,00	355,82	58,71	84,00	492,88	336,04	53,65
Ca (mg/l)	234,24	621,55	260,68	91,21	213,50	427,71	225,82	74,21	229,36	499,80	230,83	97,80
Mg (mg/l)	3,89	314,93	48,48	54,60	4,86	175,93	47,35	30,19	7,78	104,00	36,79	25,36
Na(mg/l)	104,00	583,8	442,11	122,80	60,40	517,00	309,43	134,35	68,80	538,00	291,28	124,15
K(mg/l)	1,20	18,40	8,58	3,93	0,40	18,00	6,91	3,62	0,70	22,00	7,82	4,60
NO2(mg/l)	0,01	1,33	0,15	0,31	-	-	-	-	-	-	-	-

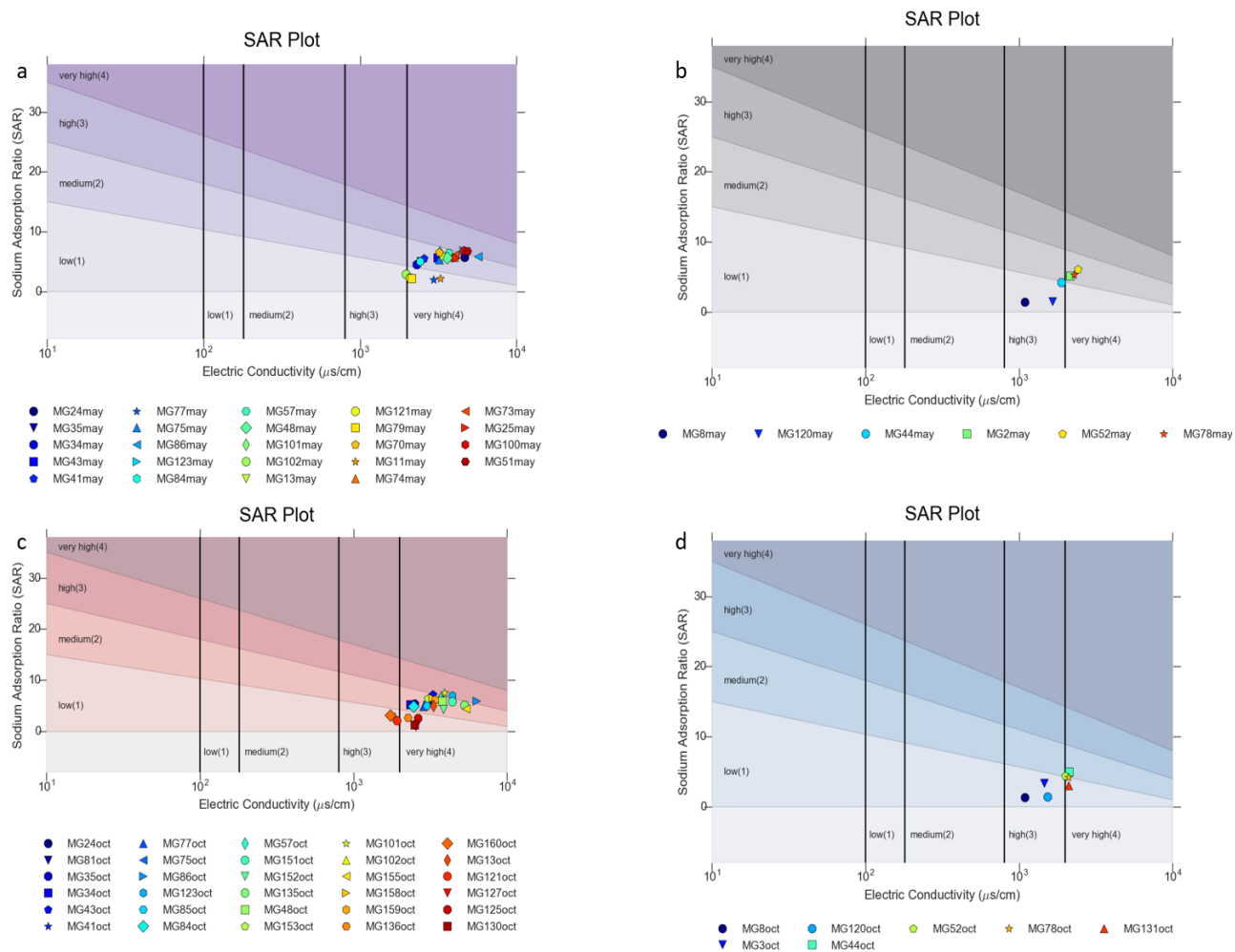
Κεφάλαιο 2

Πίνακας 2.2 Στατιστικά στοιχεία χημικών αναλύσεων για τον καρστικό υδροφορέα

	Νοέμβριος 2015				Μάιος 2016				Οκτώβριος 2016			
	Ελάχιστο	Μέγιστο	Μέση Τιμή	Τυπική απόκλιση	Ελάχιστο	Μέγιστο	Μέση Τιμή	Τυπική απόκλιση	Ελάχιστο	Μέγιστο	Μέση Τιμή	Τυπική απόκλιση
EC(μS/cm)	1120,00	2660,00	1976,67	784,50	1086,00	2410,00	1795,33	499,87	1089,00	2120,00	1769,00	408,98
T(OC)	19,70	20,50	20,00	0,44	18,60	21,80	20,38	1,17	19,50	21,30	20,33	0,62
pH	6,90	7,33	7,18	0,24	7,10	7,30	7,18	0,07	7,20	7,47	7,31	0,11
DO(mg/l)	4,45	7,70	6,61	1,87	4,50	8,10	7,10	1,34	4,50	8,50	7,46	1,55
Cl(mg/l)	110,00	575,00	367,33	236,45	24,00	528,00	293,00	195,84	116,00	464,00	336,57	133,54
NO3(mg/l)	27,90	64,50	41,07	20,35	12,10	69,60	32,67	21,71	7,60	30,80	15,21	9,18
SO4(mg/l)	55,00	500,00	228,33	238,24	46,00	142,00	94,17	32,94	45,00	120,00	91,29	24,14
HCO3(mg/l)	296,00	351,36	326,40	28,08	283,04	356,24	332,65	25,85	248,88	346,48	317,20	33,78
Ca (mg/l)	161,39	269,12	207,58	55,48	89,71	197,04	133,76	35,63	89,71	184,22	137,99	35,37
Mg (mg/l)	7,78	155,52	65,85	78,78	16,52	39,85	27,54	9,32	2,43	27,22	16,52	8,82
Na(mg/l)	68,40	310,40	162,80	129,47	62,20	308,00	175,30	98,58	55,40	237,50	153,59	69,22
K(mg/l)	2,00	14,00	9,87	6,82	1,40	9,00	5,23	2,83	1,70	8,50	5,24	2,99
NO2(mg/l)	0,01	0,21	0,08	0,11	-	-	-	-	-	-	-	-



Σχήμα 2.9 Διάγραμμα piper για τα δείγματα της περιόδου Μαΐου 2016 (α) του προσχωματικού υδροφορέα, (β) του καρστικού υδροφορέα και της περιόδου Οκτωβρίου 2016 (γ) του προσχωματικού υδροφορέα, (δ) του καρστικού υδροφορέα



Σχήμα 2.10 Διάγραμμα SAR για τα δείγματα της περιόδου Μαΐου 2016 (α) του προσχωματικού υδροφορέα, (β) του καρστικού υδροφορέα και της περιόδου Οκτωβρίου 2016 (γ) του προσχωματικού υδροφορέα, (δ) του καρστικού υδροφορέα

## 2.7 Στοιχεία επιφανειακής υδρολογίας

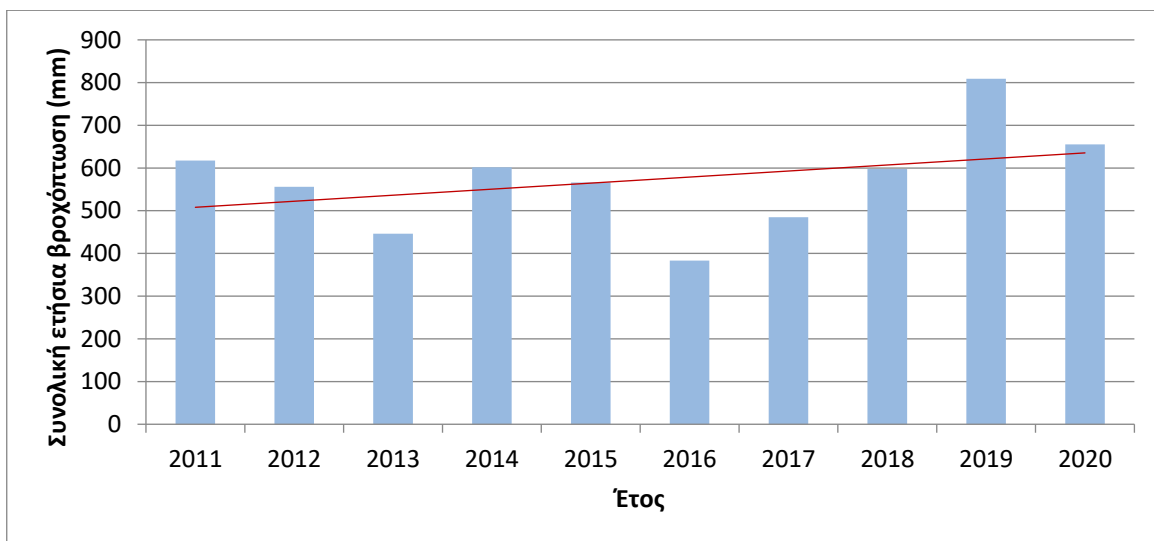
### 2.7.1 Υδρομετεωρολογικές συνθήκες

Τα μετεωρολογικά δεδομένα για τον Μαραθώνα λήφθηκαν από σταθμό που βρίσκεται στη Νέα Μάκρη σε υψόμετρο 25m. Ο σταθμός λειτουργεί από το Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών και υπάρχουν διαθέσιμα στοιχεία από τον Νοέμβριο του 2010 (<http://penteli.meteo.gr/stations/neamakri/>). Η μέση ετήσια θερμοκρασία είναι 18,3 ° C ενώ κατά τη διάρκεια του έτους έχει παρατηρηθεί ένα ευρύ φάσμα μεταβολών της θερμοκρασίας, από μερικούς βαθμούς υπό το μηδέν έως και θερμοκρασίες άνω των 40 ° C (από -1,8 ° C τον Ιανουάριο έως 43,3 ° C τον Αύγουστο).

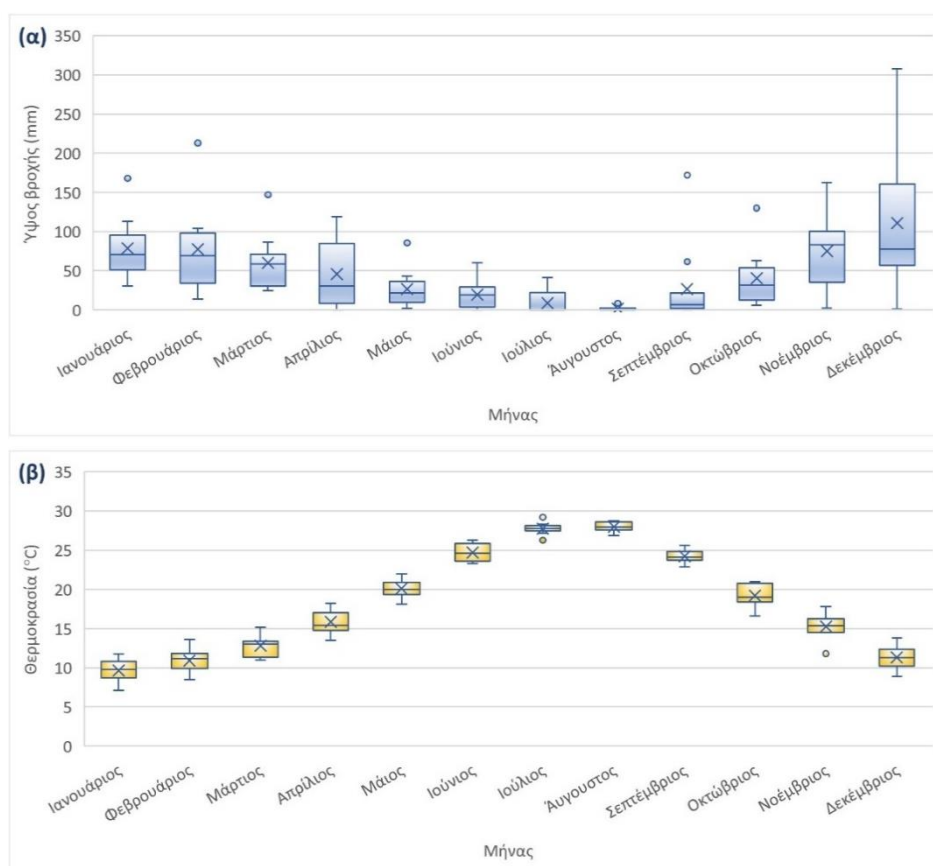
Η μέση ετήσια βροχόπτωση από την περίοδο των διαθέσιμων δεδομένων (Νοέμβριος 2011 έως Σεπτέμβριος 2020), υπολογίζεται στα 566 mm και κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου η ετήσια βροχόπτωση κυμάνθηκε από έτος σε έτος με ελάχιστο 380 mm και μέγιστο 809 mm (Σχήμα 2.11). Σύμφωνα με το διάγραμμα της εικόνας 1, την τελευταία δεκαετία παρατηρείται μία ανοδική τάση στο ετήσιο ύψος βροχόπτωσης αλλά προφανώς δεν μπορεί να διεξαχθεί κάποιο γενικότερο συμπέρασμα λόγω της μικρής χρονοσειράς που είναι διαθέσιμη από τον συγκεκριμένο σταθμό. Η κατανομή της μηνιαίας βροχόπτωσης (Σχήμα 2.12(α) Σχήμα 2.12) παρουσιάζει μεγάλο εύρος κατά τη διάρκεια της υγρής περιόδου με ακραίες και εξαιρετικά ακραίες τιμές, ιδιαίτερα τον Δεκέμβριο όπου και παρατηρούνται οι μέγιστες βροχοπτώσεις. Οι μήνες με τις μεγαλύτερες βροχοπτώσεις καταγράφονται μεταξύ Οκτωβρίου και Μαρτίου, ενώ οι μήνες με υψηλότερη θερμοκρασία υποδεικνύουν σαφώς έλλειψη βροχοπτώσεων, ειδικά τον Ιούλιο και τον Αύγουστο (Σχήμα 2.12(β)). Το εύρος διακύμανσης της μέσης θερμοκρασίας δεν ξεπερνάει τους 2.5° C. Μεγαλύτερο εύρος θερμοκρασίας παρατηρείται την υγρή περίοδο ενώ εξαιρετικά ακραίες θερμοκρασίες καταγράφηκαν τον Ιούλιο και τον Οκτώβριο.

Το κλίμα στον Μαραθώνα χαρακτηρίζεται ως τυπικό μεσογειακό, ζεστό και εύκρατο με ξηρό και ζεστό καλοκαίρι σύμφωνα με την ταξινόμηση του κλίματος κατά Köppen (Kotter et al. 2006). Όπως αναφέρουν και οι Lionello et al. (2006), στην περιοχή της Μεσογείου οι καιρικές συνθήκες μεταβάλλονται με υψηλή εποχικότητα, με ζεστά, ξηρά καλοκαίρια με μείωση βροχοπτώσεων, ενώ το μεγαλύτερο μέρος της ετήσιας κατακρήμνισης συμβαίνει κατά τη χειμερινή περίοδο.

Στην παρούσα διατριβή, τα μετεωρολογικά δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την υλοποίηση του μαθηματικού μοντέλου του υπόγειου υδροφορέα περιλαμβάνουν πέντε υδρολογικά έτη και αφορούν την περίοδο Οκτωβρίου 2015 έως Σεπτέμβριο 2020. Οι υπολογισμοί των στοιχείων του υδρολογικού ισοζυγίου που παρουσιάζονται παρακάτω αφορούν αυτήν την περίοδο. Βασικός στόχος για τον υπολογισμό του υδρολογικού ισοζυγίου ήταν η εύρεση του ποσοστού της βροχής που διηθείται στον υδροφόρο σε ημερήσια κλίμακα, για τη μετέπειτα εφαρμογή του στο μοντέλο υπόγειας ροής που αναπτύχθηκε στο Κεφάλαιο 5.



Σχήμα 2.11 Διακύμανση ετήσιας βροχόπτωσης στον μετεωρολογικό σταθμό Ν.Μάκρης



Σχήμα 2.12 Θηκόγραμμα για (α) την μηνιαία βροχόπτωση και (β) τη μέση μηνιαία θερμοκρασία. Η μέση τιμή των παρατηρήσεων επισημαίνεται με το σύμβολο x και οι εξαιρετικά ακραίες τιμές (outliers) με κουκίδα

### 2.7.2 Εξατμισοδιαπνοή

Μέσω των διαθέσιμων δεδομένων του μετεωρολογικού σταθμού Ν. Μάκρης, υπολογίστηκε η δυνητική εξατμισοδιαπνοή στην περιοχή, με τη μέθοδο Penman- Monteith. Η εξίσωση Penman – Monteith (PM) υπολογίζει το ρυθμό της συνολικής εξατμησης και διαπνοής από την επιφάνεια του εδάφους χρησιμοποιώντας δεδομένα καιρού. Υπάρχουν δύο θεμελιώδεις προσεγγίσεις για την πρόβλεψη της



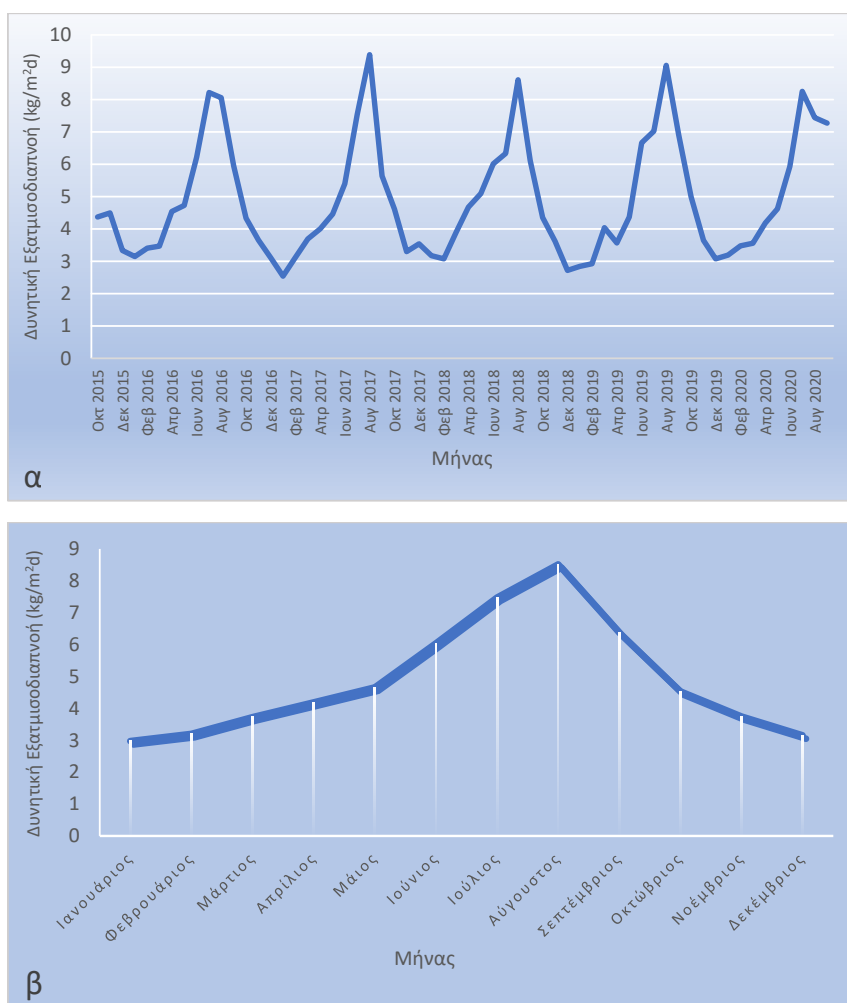
εξατμισοδιαπνοής: η εξίσωση επιφανειακού ισοζυγίου ενέργειας και η αεροδυναμική εξίσωση. Ο Penman συνδύασε αυτές τις δύο προσεγγίσεις σε μία εξίσωση που μπορεί να λυθεί χρησιμοποιώντας τυπικά δεδομένα καιρού ενώ αργότερα ο Monteith βελτίωσε την εξίσωση Penman συμπεριλαμβάνοντας έναν όρο αντίστασης επιφάνειας και έναν βελτιωμένο όρο για την αεροδυναμική μεταφορά, καταλήγοντας στην εξίσωση Penman – Monteith (Allen 2005). Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η εξίσωση όπως διατυπώνεται από τους Μιμίκου & Μπαλτάς (2012):

$$E' = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma'} \frac{R_n}{\lambda} + \frac{\gamma'}{\Delta + \gamma'} F(u) D \quad [\text{kg}/(\text{m}^2\text{d})]$$

Όπου:

- $\Delta$  η κλίση της καμπύλης κορεσμού των υδρατμών [hPa/°C]
  - $\Delta = \frac{4098e_s}{(T+237.3)^2}$  και  $e_s = 6.11e^{\frac{17.27T}{T+237.3}}$ , όπου  $T$  η θερμοκρασία [°C]
- $\gamma' = (1+0.33u)\gamma$ , όπου  $\gamma$  ο ψυχομετρικός συντελεστής [hPa/°C] και  $u$  η ταχύτητα του ανέμου [m/s]
- $R_n$  η ολική καθαρή ενέργεια ακτινοβολίας [kJ/(m<sup>2</sup>d)],
- $\lambda$  η λανθάνουσα θερμότητας εξατμησης [kJ/kg]
  - $\lambda = 2501 - 2.361 * T$
- $F(u)$  η συνάρτηση ταχύτητας του ανέμου [kg/( hPa m<sup>2</sup>d)]
  - $F(u) = 0.26 (1 + 0.54u)$
- $D = e_s - Ue_s$ , το έλλειμμα κορεσμού των υδρατμών [hPa]

Η εξατμισοδιαπνοή στον Μαραθώνα υπολογίστηκε σε ημερήσια κλίμακα από στοιχεία θερμοκρασίας, υγρασίας και ταχύτητας ανέμου του μετεωρολογικού σταθμού Νέας Μάκρης ενώ οι ημερήσιες ώρες ηλιοφάνειας ανά μήνα λήφθηκαν από τον ιστότοπο <https://www.weatheronline.gr/> από τον μετεωρολογικό σταθμό που διατηρεί η Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία (Ε.Μ.Υ.) στο παλιό αεροδρόμιο του Ελληνικού. Στα διαγράμματα του Σχήματος 2.13 παρουσιάζεται η μέση ημερήσια ανά μήνα εξατμισοδιαπνοή για την περίοδο των πέντε υδρολογικών ετών καθώς και η μέση μηνιαία τιμή. Βάσει των υπολογισμών, η δυνητική εξατμισοδιαπνοή δείχνει περιοδικότητα αφού οι μεγαλύτερες τιμές παρατηρούνται την ξηρή περίοδο με μέγιστο τον Αύγουστο ενώ μειώνεται τους χειμερινούς μήνες με ελάχιστο τον Ιανουάριο.



Σχήμα 2.13 (α) Διακύμανση μηνιαίας εξατμισοδιαπνοής (μέση τιμή ημερών μηνός) για τους μήνες Οκτώβριος 2015 έως Σεπτέμβριος 2020 και (β) μέση μηνιαία εξατμισοδιαπνοή για την ίδια περίοδο

### 2.7.3 Επιφανειακή απορροή

Οι χρήσεις γης, ο τύπος και ο βαθμός κορεσμού του εδάφους είναι σημαντικοί παράγοντες που καθορίζουν την επιφανειακή απορροή των κατακρημνισμάτων και τη διήθηση τους στο έδαφος. Κατά τη διάρκεια ενός επεισοδίου βροχόπτωσης, η επιφανειακή απορροή και η διήθηση του νερού στο έδαφος, σχετίζονται με παράγοντες που οφείλονται στα κλιματικά χαρακτηριστικά της περιοχής και τα χαρακτηριστικά της λεκάνης (Wanielista 1990). Η Αμερικάνικη Υπηρεσία Διατήρησης Εδαφών (Soil Conservation Service 1972) ανέπτυξε εμπειρική μέθοδος υπολογισμού για τον υπολογισμό του ύψους νερού βροχόπτωσης που γίνεται επιφανειακή απορροή (περίσσειμα βροχόπτωσης) που περιλαμβάνει την υδρολογική κατάταξη των εδαφών.

Οι βασικές παραδοχές του μοντέλου αυτού είναι οι ακόλουθες:

- Ο λόγος της πραγματικής αποθήκευσης νερού στη λεκάνη προς τη μέγιστη δυνατή αποθήκευση, είναι ίσος με το λόγο του πραγματικού όγκου νερού που απορρέει προς τον μέγιστο δυνατό όγκο απορροής.

- Οι αρχικές απώλειες σε όρους όγκου νερού που δεν διατίθεται στην απορροφή είναι ίσες με το 20% του μέγιστου δυνατού όγκου αποθήκευσης.

Με βάση τις παραδοχές αυτές, το περίσσειμα βροχόπτωσης δίνεται από τη σχέση:

$$P_e = \begin{cases} \frac{(P - 0.2S)^2}{(P + 0.8S)}, & P > 0.2S \\ 0, & P \leq 0.2S \end{cases} \quad (2.1)$$

όπου,  $P$  είναι η αθροιστική βροχόπτωση (του θεωρούμενου γεγονότος βροχόπτωσης),  $P_e$  το αθροιστικό περίσσειμα βροχόπτωσης και  $S$  η μέγιστη αποθήκευση νερού στο έδαφος που δίνεται ως συνάρτηση ενός συντελεστή που είναι γνωστός ως Αριθμός Καμπύλης (Curve Number, CN) από την εξίσωση:

$$S = \frac{24500}{CN} - 254 \quad (2.2)$$

Ο Αριθμός Καμπύλης εξαρτάται από τον εδαφικό τύπο, τις χρήσεις γης και την εδαφική υγρασία. Ως προς τον εδαφικό τύπο ή την εδαφική υφή, όπως ονομάζεται, τα εδάφη κατατάσσονται σε τέσσερις υδρολογικές κατηγορίες όπως έχουν διαμορφωθεί από την USDA (United States Department of Agriculture, 1951). Η εδαφική υφή καθορίζεται ανάλογα με την περιεκτικότητα τους σε άμμο, ιλύ και άργιλο και τα εδάφη κατατάσσονται σε τέσσερις κατηγορίες A,B,C και D (π.χ. Wanielista 1990, Μιμίκου & Μπαλτάς 2012, Τσακίρης 1995).

Η υπηρεσία SCS παραθέτει σε πινακοποιημένη μορφή αντιπροσωπευτικές τιμές της παραμέτρου CN ανάλογα με: το είδος της φυτοκάλυψης (ή, γενικά, της χρήσης γης) της υπό μελέτη λεκάνης, τον τύπο του εδάφους: τύποι A, B, C, D (με αυξανόμενη δυνατότητα παραγωγής απορροής), και την επεξεργασία της επιφάνειας του εδάφους (π.χ. όργωμα).

Οι πίνακες δίνουν τιμές για συνθήκες μέσης υγρασίας  $CN_{II}$  (κατηγορία II). Για συνθήκες αυξημένης υγρασίας, και για ξηρές συνθήκες (κατηγορία I), υπολογίζονται τα  $CN_{III}$  και  $CN_I$  αντίστοιχα, ως συνάρτηση του  $C_{II}$ , σύμφωνα με τους επόμενους τύπους (Κουτσογιάννης & Ξανθοπούλου 2016):

$$CN_I = \frac{0.42CN_{II}}{1 - 0.0058CN_{II}} \quad (2.3)$$

$$CN_{III} = \frac{2.3CN_{II}}{1 + 0.013CN_{II}} \quad (2.4)$$

Για την περίπτωση του Μαραθώνα, οι κατηγορίες εδαφών καθορίστηκαν μέσω εδαφικών δειγματοληψιών και αναλύσεων που πραγματοποιήθηκαν στην περιοχή από την Ευθυμία Ζαβρίδου, Υποψήφια Διδάκτορα της σχολής Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών. Σύμφωνα με την εν λόγω έρευνα (Zavridou et al. 2018, Zavridou et al. 2019), το 40% των εδαφικών δειγμάτων χαρακτηρίζονται ως λεπτή αμμώδης τύρφη (Silty Loam) και κατηγοριοποιούνται στην ομάδα C (κατά USDA), το 28% ως τύρφη (loam) και το 30% ως αμμώδης τύρφη (sandy loam) και κατηγοριοποιούνται στην ομάδα B (κατά USDA) ενώ ένα μικρό ποσοστό (2%) χαρακτηρίζεται ως λεπτή τυρφώδης άμμος και κατηγοριοποιείται στην ομάδα A της USDA.

Τα παραπάνω δεδομένα αναλύθηκαν χωρικά και βάσει των αποτελεσμάτων ο εδαφικός μανδύας της πεδιάδας του Μαραθώνα διαμορφώνεται κατά περίπου 50% από εδάφη που ανήκουν στην υδρολογική κατηγορία C και 50% από εκείνα που ανήκουν στην υδρολογική κατηγορία B. Με βάση δημοσιευμένους πίνακες για τον Αριθμό Καμπύλης του Wanielista (1978) οι οποίοι θεωρούνται πιο αντιπροσωπευτικοί για τις ελληνικές συνθήκες σε σύγκριση με άλλες μεθοδολογίες (Τσακίρης 1995), εκτιμήθηκε ο αριθμός CN. Ο αριθμός καμπύλης για συνθήκες μέσης υγρασίας (CN<sub>II</sub>) λήφθηκε για καλλιεργημένες εκτάσεις χωρίς έργα συντήρησης. Έτσι για τις δύο κατηγορίες εδαφών, οι τιμές CN παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 2.3 Αριθμός Καμπύλης (Curve Number, CN) ανά κατηγορία εδάφους

Κατηγορία εδάφους	CN <sub>II</sub>	CN <sub>I</sub>	CN <sub>III</sub>
B	81,00	64,16	90,5
C	88,00	75,49	94,40

Για την εκτίμηση του περισσεύματος βροχόπτωσης χρησιμοποιήθηκαν ημερήσια βροχομετρικά δεδομένα καθώς και η δυνητική εξατμισοδιαπνοή κατά Penman- Monteith που υπολογίστηκε όπως παρουσιάστηκε παραπάνω. Το ύψος του νερού που απορρέει επιφανειακά σε σχέση με το ύψος βροχόπτωσης σε ημερήσιο βήμα φαίνεται στο διάγραμμα του Σχήματος 2.14 όπως υπολογίστηκε για την πεδιάδα του Μαραθώνα με τη μέθοδο της SCS.

#### 2.7.4 Φυσική τροφοδοσία υδροφορέα από άμεση κατείσδυση

Για τον προσδιορισμό της αναπλήρωσης των υπόγειων νερών από τα κατακρημνίσματα χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος ισοζυγίου εδαφικής υγρασίας (Soil Moisture water Balance- SMB) των Thornthwaite και Mather (1957). Η μέθοδος SMB αποτελεί μια μέθοδο υπολογισμού του υδατικού ισοζυγίου στην ακόρεστη ζώνη. Με αυτόν τον τρόπο κατά τον υπολογισμό του τελικού ύψους νερού που διηθείται στον υδροφορέα, λαμβάνεται υπόψη η χρονική υστέρηση που μεσολαβεί μεταξύ του γεγονότος βροχόπτωσης και της διήθησης λόγω κατείσδυσης μέσω της ακόρεστης ζώνης.

Το μοντέλο SMB συνίσταται στην παρακολούθηση της δυνητικής αθροιστικής απώλειας νερού (Accumulated Potential Water Loss- APWL) και της αποθηκευμένης υγρασίας στο έδαφος ( $S_B$ ). Οι υπολογισμοί για τον προσδιορισμό του  $S_B$  και του APWL εκτελούνται για κάθε μήνα ή ημέρα έχοντας ως δεδομένα την μηνιαία ή ημερήσια κατακρήμνιση (P), την δυνητική εξατμισοδιαπνοή (PET) και το περίσσειμα βροχόπτωσης ( $P_e$ ).

Η αποθηκευμένη υγρασία του εδάφους ( $S_B$ ) αντιπροσωπεύει τη συνολική ποσότητα νερού που συγκρατείται στο ριζικό σύστημα των φυτών. Η υφή του εδάφους και το βάθος του ριζικού συστήματος των καλλιεργειών είναι καθοριστικοί παράγοντες για αυτήν την παράμετρο. Βάσει αυτών των παραγόντων, καθορίζεται και η μέγιστη δυνατότητα συγκράτησης νερού του εδάφους (soil capacity- CAP). Κατά τη

διαμόρφωση του ισοζυγίου, η πρότερη αποθηκευμένη υγρασία του εδάφους λαμβάνεται υπόψη, υπολογίζοντας την αλλαγή της εδαφικής υγρασίας ανά χρονικό βήμα ( $\Delta S_B$ ), καθώς υπό συνθήκες πλήρωσης της ακόρεστης ζώνης το μέγεθος αυτό συμβάλει στην τροφοδοσία του υδροφορέα.

Όταν η βροχή είναι μεγαλύτερη από την δυνητική εξατμισοδιαπνοή, τότε η πραγματική εξατμισοδιαπνοή (Actual Evapotranspiration- AET) ισούται με τη δυνητική. Αντιθέτως σε περιόδους που το ύψος βροχόπτωσης είναι μικρότερο από τη δυνητική εξατμισοδιαπνοή, τότε το έδαφος αρχίζει και χάνει την υγρασία του και η πραγματική εξατμισοδιαπνοή υπολογίζεται ως το άθροισμα της βροχόπτωσης και του νερού που είναι ήδη αποθηκευμένο στην ακόρεστη ζώνη. Η ποσότητα κατά την οποία η πραγματική και η πιθανή εξατμισοδιαπνοή διαφέρουν είναι θεωρείται ως έλλειμμα υγρασίας (moisture deficit-DEF).

Αφού η υγρασία του εδάφους φτάσει την μέγιστη ικανότητα συγκράτησης νερού (CAP), τυχόν πλεονάζουσα βροχόπτωση υπολογίζεται ως πλεόνασμα υγρασίας και συμμετέχει στην τροφοδοσία του υδροφορέα.

Οι βασικές αρχές και η μαθηματική διατύπωση του μοντέλου παρουσιάζεται στον Πίνακα 2.4, όπως διαμορφώθηκε από τους Bakundukize et al. (2011):

Πίνακας 2.4 Μαθηματικές σχέσεις για το μοντέλο SMB (Bakundukize et al. 2011, με τροποποιήσεις)

	$S_B = CAP$ ( $PET = P - R_o$ )	Ξηρή περίοδος $SUR = (P - R_o) - PET < 0$	Υγρή περίοδος $SUR = (P - R_o) - PET > 0$	
			$SUR \leq CAP$	$SUR > CAP$
$S_B$	CAP	$CAP * e^{-APWL/CAP}$		
AET	PET	$P - R_o + \Delta SM$	PET	PET
DEF	0	$PET - AET$	0	0
$R_N$	$(P - R_o) - PET = SUR$	0	0	$SUR + \Delta S_B$

Όπου:

$P$ = ύψος βροχόπτωσης (mm),  $R_o$ =περίσσευμα βροχόπτωσης ή απορροή (mm),  $PET$ = δυνητική εξατμισοδιαπνοή (mm),  $APWL$ = δυνητική αθροιστική απώλεια νερού (mm) ( $APWL_{t-1} + [PET - (P - R_o)]$ ),  $AET$ = πραγματική εξατμισοδιαπνοή (mm),  $S_B$  = αποθηκευμένο νερό στο έδαφος (mm),  $CAP$ = μέγιστο νερό κατακράτησης στο έδαφος (mm),  $DEF$ = έλλειμμα νερού (mm),  $SUR$ = περίσσευμα νερού (mm),  $R_N$  = διηθούμενο νερό (mm)

Για την περίπτωση του Μαραθώνα, η μέγιστη δυνατότητα κατακράτησης νερού του εδάφους (CAP) λήφθηκε ίση με 75mm βάσει των πινάκων που παρατίθενται από τους Thornthwaite και Mather (1957) για αμμώδη εδάφη και καλλιέργειες με ρηχό ριζικό σύστημα. Η τροφοδοσία από τη βροχή υπολογίστηκε σε ημερήσια κλίμακα, έχοντας διαθέσιμα τα δεδομένα που παρουσιάστηκαν και υπολογίστηκαν στα παραπάνω κεφάλαια (βροχόπτωση, εξατμισοδιαπνοή και περίσσευμα βροχόπτωσης).

Το ύψος νερού που τροφοδοτεί τον υδροφορέα ανά υδρολογικό έτος παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.14., συσχετιζόμενο με τα ύψη βροχόπτωσης, απορροής και εξατμισοδιαπνοής.

Από τα αποτελέσματα του μοντέλου SMB προκύπτει ότι ο υδροφορέας τροφοδοτείται κυρίως μετά από συνεχόμενα γεγονότα βροχόπτωσης αφού η ακόρεστη ζώνη φτάσει ή ξεπεράσει τη μέγιστη δυνατότητα κατακράτησης νερού (CAP). Η τροφοδοσία του υδροφορέα από τα κατακρημνίσματα συμβαίνει την υγρή περίοδο κυρίως μεταξύ Νοεμβρίου και Απριλίου όπου τα γεγονότα βροχόπτωσης είναι συχνότερα, ανεξαρτήτως έντασης. Την ξηρή περίοδο δεν παρατηρείται κάποια εισροή στον υδροφορέα αφού ακόμα και σε περίπτωση βροχόπτωσης το νερό είτε απορρέει είτε τροφοδοτεί την ακόρεστη ζώνη όπου λόγω των υψηλών θερμοκρασιών και υψηλής δυνητικής εξατμισοδιαπνοής, μέρος αυτού γίνεται εξατμισοδιαπνοή.

### **2.7.5 Παρατηρήσεις ως προς τη χρήση των μεθοδολογιών υπολογισμού του υδρολογικού ισοζυγίου**

Παρά τις μεγάλες απαιτήσεις δεδομένων, η μέθοδος Penman – Monteith (Allen 2005) προτιμήθηκε διότι υπολογίζει την δυνητική εξατμισοδιαπνοή τόσο σε μηνιαία κλίμακα όσο και σε ημερήσια, βάσει των ζητούμενων της εκάστοτε μελέτης και των διαθέσιμων δεδομένων. Στην παρούσα μελέτη το μοντέλο του παράκτιου υδροφορέα του Μαραθώνα προσομοιώθηκε με ημερήσιο βήμα. Αυτό το δεδομένο σε συνδυασμό με την ύπαρξη ημερήσιων καταγραφών από τον μετεωρολογικό σταθμό της Νέας Μάκρης κατέστησε λογική όσο και εφικτή την επιλογή της συγκεκριμένης μεθόδου έναντι άλλων μεθόδων (π.χ. Blaney Criddle). Ακόμη, φαίνεται ότι η συγκεκριμένη μέθοδος και οι παραλλαγές αυτής προτιμώνται σε σχέση με άλλες μεθόδους (π.χ. Er-Raki et al. 2010, López-Urrea et al. 2006) οι οποίες είτε υπερεκτιμούν είτε υποεκτιμούν την εξατμισοδιαπνοή στα παράκτια συστήματα (π.χ. Vangelis et al. 2012).

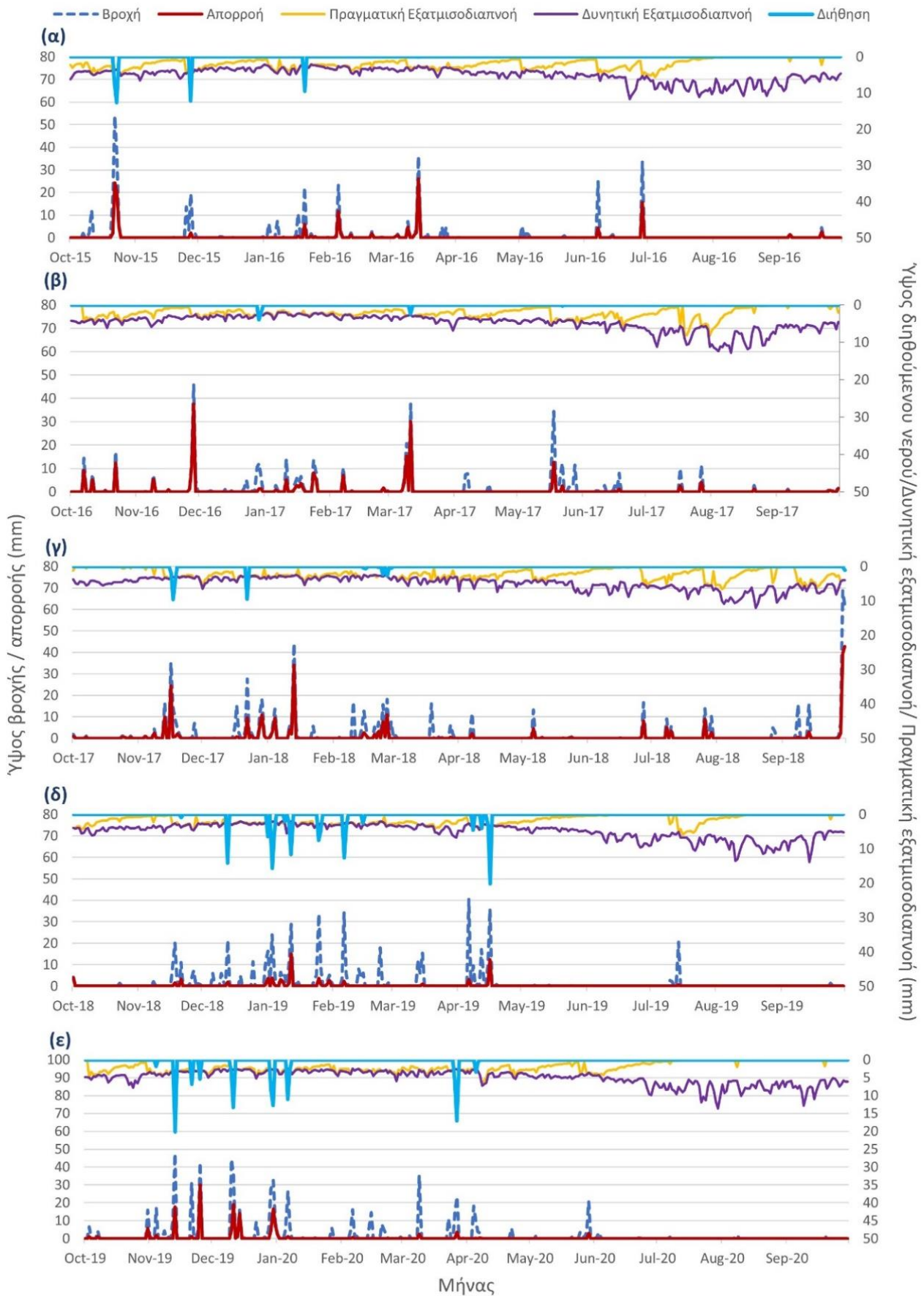
Η μέθοδος της SCS-CN έχει αναπτυχθεί για τον υπολογισμό της βροχής-απορροής σε επίπεδο μεμονωμένου γεγονότος βροχόπτωσης. Βέβαια αξιοποιείται σε διεθνώς χρησιμοποιούμενα λογισμικά για την εκτίμηση της βροχής-απορροής σε επίπεδο συνεχούς προσομοίωσης (π.χ., SWAT, Arnold & Fohrer 2005). Λόγω του μεγάλου υπολογιστικού κόστους που ενέχει η χρήση ενός επιφανειακού μοντέλου φυσικής βάσης, της αβεβαιότητας που αυτό συνεπάγεται και η ταυτόχρονη χρήση ενός μοντέλου μη μόνιμης υπόγειας ροής, επιλέχθηκε να δημιουργηθεί ένα σχετικά απλοποιημένο μοντέλο το οποίο βασίζεται σε εμπειρικές εξισώσεις (SCS, SMB). Για τους σκοπούς της παρούσας διδακτορικής διατριβής, θα ήταν δυνατό να χρησιμοποιηθεί ένα ποσοστό διήθησης της βροχόπτωσης βασιζόμενο σε βιβλιογραφικές πηγές, αλλά προτιμήθηκε η ανάπτυξη και χρήση του προαναφερθέντος μοντέλου.

Η μέθοδος αριθμού καμπύλης της SCS, υπολογίζει την επιφανειακή απορροή λαμβάνοντας υπόψη την αποθηκευτικότητα του εδαφικού καλύμματος. Η κατάσταση υγρασίας του εδάφους για ένα συγκεκριμένο χρονικό βήμα εκφράζεται μέσω της μεταβλητής CN (αριθμός καμπύλης). Η παράμετρος για την συνθήκη εδαφικής υγρασίας (κατηγορία CN) σε κάθε χρονικό βήμα μεταβάλλεται δυναμικά με το ύψος βροχής των

πέντε προηγούμενων ημερών (USDA 1972). Η επίδραση της μεθόδου SCS-CN σε συνδυασμό με τη μέθοδο SMB για τον υπολογισμό του ύψους διήθησης στα αποτελέσματα των μοντέλων υπογείων νερών και η σύγκριση με άλλες μεθόδους μπορεί να αποτελέσει αντικείμενο μελλοντικής έρευνας. Οι παραπάνω μεθοδολογίες περιγράφονται αναλυτικά στα Κεφάλια 2.7.3 και 2.7.4.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, για τις ανάγκες της παρούσας διατριβής, επιλέχθηκε η χρονική διακριτοποίηση του μοντέλου υπόγειας ροής σε ημερήσιο βήμα και κατ' επέκταση κρίθηκε αναγκαίο να υπολογιστεί και η διήθησης μέσω του μοντέλου SMB με το αντίστοιχο χρονικό βήμα. Ο υπολογισμός της διήθησης με τη μέθοδο SMB σε μηνιαία κλίμακα καταλήγει σε υποεκτίμηση της επαναφόρτισης του υδροφορέα αφού δεν λαμβάνονται υπόψη τα πραγματικά γεγονότα βροχόπτωσης αλλά το άθροισμα της μηνιαίας βροχόπτωσης (Yenehun et al. 2020, Steenhuis and Molen 1986, Bakundukize et al. 2011). Σε μοντέλα που χρησιμοποιούν μηνιαίο χρονικό βήμα η εν λόγω μέθοδος δεν προτείνεται αφού υποεκτιμά το ποσοστό διήθησης της βροχόπτωσης στον υδροφορέα. Σχεδιάζεται στο μέλλον να πραγματοποιηθεί σύγκριση της προτεινόμενης μεθόδου με τις άλλες μεθόδους υπολογισμού της διήθησης σε μοντέλα μηνιαίου χρονικού βήματος. Για παράδειγμα σχεδιάζεται η χρήση του πακέτου Unsaturated Zone Flow (UZF) του MODFLOW το οποίο προσομοιώνει τόσο τη ροή στην ακόρεστη ζώνη, όσο και την εξατμισοδιαπνοή και τη διήθηση στον υδροφορέα, αποκλείοντας τη χρήση των πακέτων Evapotranspiration (EVT) και Recharge (RCH) για τις αντίστοιχες διεργασίες.

Η χρήση ενός μοντέλου συνεχούς προσομοίωσης βροχής-απορροής για τον υπολογισμό της διήθησης και η σύγκριση του με την ανωτέρω μέθοδο μπορεί να αποτελέσει αντικείμενο μελλοντικής έρευνας. Η υλοποίηση ενός τέτοιου μοντέλου είναι εφικτή μέσω του κώδικα SWAT-MODFLOW (Bailey et al. 2016) ο οποίος ενσωματώνει μοντέλο βροχής-απορροής και προσομοίωσης της κίνησης υπογείου νερού σε επίπεδο λεκάνης απορροής.



Σχήμα 2.14 Διάγραμμα συσχέτισης ύψους νερού βροχόπτωσης, απορροής και διήθησης, δυνητικής και πραγματικής εξατμισοδιαπνοής για τα υδρολογικά έτη (α)2015-2016, (β)2016-2017, (γ)2017-2018, (δ)2018-2019, (ε)2019-2020



### **3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΑΞΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΣΕ ΠΙΛΟΤΙΚΗ ΚΛΙΜΑΚΑ**

#### **3.1 Εισαγωγή**

Το παράκτιο πεδινό τμήμα του Μαραθώνα είναι μια περιοχή που καλύπτεται σε μεγάλο βαθμό από γεωργικές εκτάσεις με υπαίθριες φυτικές καλλιέργειες αλλά και θερμοκήπια ενώ αποτελεί επίσης τουριστικό θέρετρο για την θερινή περίοδο. Τέτοιες δραστηριότητες σχετίζονται με τις υψηλές ανάγκες σε νερό καλής ποιότητας που καλύπτονται εξ ολοκλήρου από τον παράκτιο υδροφόρο. Η υπεράντληση του νερού και η έλλειψη ολοκληρωμένου σχεδίου διαχείρισης των υπόγειων νερών της περιοχής οδήγησε σε προβλήματα θαλάσσιας διείσδυσης, εποχιακή ανισορροπία μεταξύ προσφοράς και ζήτησης νερού και έλλειμμα στους διαθέσιμους υπόγειους υδατικούς πόρους. Η εφαρμογή του τεχνητού εμπλουτισμού στην περιοχή κρίνεται ως η βέλτιστη λύση για την αποκατάσταση του συστήματος υπόγειων νερών, ποιοτικά και ποσοτικά, καθώς και για τον περιορισμό του υφάλμυρου μετώπου στο υδροφόρο σύστημα.

Με γνώμονα τα παραπάνω κατασκευάστηκε πιλοτική εγκατάσταση MAR στο πεδινό παράκτιο τμήμα του Μαραθώνα προκειμένου να διερευνηθεί η δυνατότητα εφαρμογής νέων τεχνικών και τεχνολογιών τεχνητής αναπλήρωσης του υπογείου υδατικού δυναμικού στο ανώτερο αβαθές υδροφόρο στρώμα του προσχωματικού παράκτιου υδροφορέα της περιοχής μελέτης. Βασικός στόχος είναι η βέλτιστη διαχείριση της θαλάσσιας διείσδυσης που έχει προκύψει λόγω υπεράντλησης και η εξυγίανση του υδροφορέα ποιοτικά και ποσοτικά.

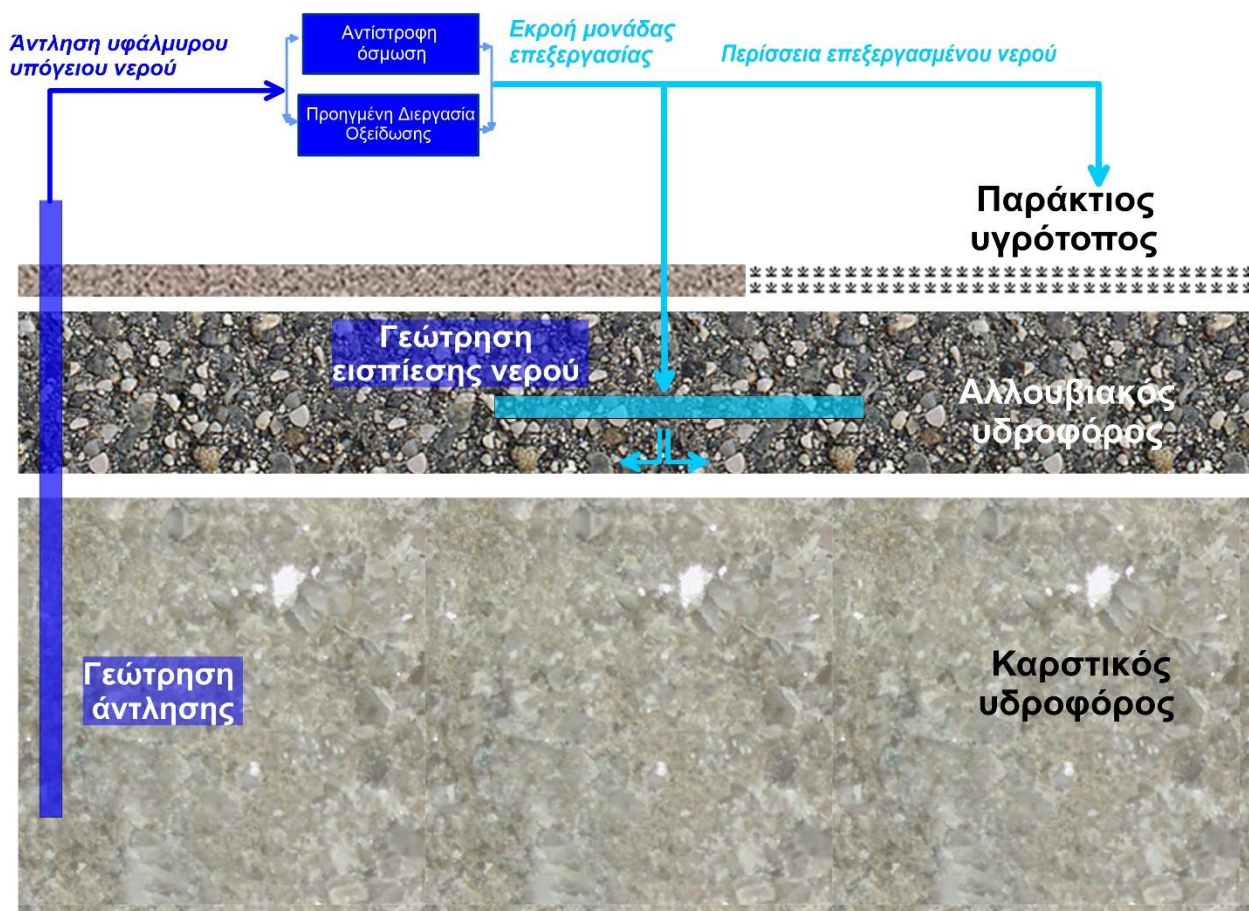
Κατά τον σχεδιασμό της πειραματικής διάταξης δόθηκε έμφαση στα υδρολογικά και γεωμετρικά χαρακτηριστικά του υπόγειου συστήματος και του διαθέσιμου εκμεταλλεύσιμου υπογείου και επιφανειακού νερού της ευρύτερης και στενότερης περιοχής μελέτης.

Η συγκεκριμένη πιλοτική εφαρμογή είναι σχεδιασμένη ώστε να ανταποκρίνεται σε τυπικές υδρογεωλογικές συνθήκες που συναντώνται σε Μεσογειακές παράκτιες περιοχές με καρστικούς υδροφορείς: ο αλλουβιακός υδροφορέας που εκμεταλλεύεται κυρίως για άρδευση, υπέρκειται του καρστικού υδροφορέα ο οποίος έχει νερό καλύτερης ποιότητας. Βασικός στόχος του πιλότου είναι η εκμετάλλευση του καρστικού νερού – το οποίο υπό φυσικές συνθήκες εκφορτίζεται στη θάλασσα ανεκμετάλλευτο- εγχέεται στο ανώτερο, πιο επιβαρυνόμενο ποιοτικά και ποσοτικά υδροφόρο στρώμα.

Δεδομένου ότι η ποιότητα του νερού αναπλήρωσης από τον υποκείμενο καρστικό υδροφόρο είναι υποβαθμισμένη εξαιτίας των αγροτικών δραστηριοτήτων της πεδιάδας και της αυξημένης αλατότητας λόγω θαλάσσιας διείσδυσης, η εγκατάσταση MAR περιλαμβάνει επίσης μια υβριδική κινητή μονάδα επεξεργασίας νερού. Οι τεχνικές επεξεργασίας νερού που χρησιμοποιούνται στην μονάδα είναι η Προηγμένη Διεργασία Οξειδωσης (Advanced Oxidation Process-AOP) για τη μείωση/απομάκρυνση

οργανικών ρύπων και η αυτή της αντίστροφης ώσμωσης (Reverse Osmosis-RO) για τη μείωση της αλατότητας (μείωση των συνολικών διαλυμένων στερεών -TDS). Οι δύο μονάδες (RO/AOP) ελέγχονται και διαχειρίζονται εξ αποστάσεως μέσω συστήματος τηλεμετρίας, ενώ ολόκληρη η μονάδα είναι κινητή για πιθανή χρήση σε διαφορετικές τοποθεσίες. Μετά την επεξεργασία, το νερό εισπιέζεται στο υπερκείμενο ρηχό υδροφορέα στρώμα μέσω οριζόντιας κατευθυνόμενης γεώτρησης (Horizontal Directional Drilling Well-HDDW) ενώ ταυτόχρονα αντλείται υπόγειο νερό σε μεγαλύτερο βάθος του ίδιου υδροφόρου στρώματος, χρησιμοποιώντας μία κάθετη γεώτρηση, προκειμένου να αυξηθεί η ικανότητα εμπλουτισμού του υδροφορέα. Η περίσσεια επεξεργασμένου νερού που δεν τροφοδοτεί τον κοκκώδη σχηματισμό, είναι δυνατό να διαχέεται στον γειτονικό υποβαθμισμένο υγρότοπο με σκοπό την μερική αποκατάσταση του.

Οι οριζόντιες γεωτρήσεις έχουν μεγάλο εύρος εφαρμογής στη βιομηχανία πετρελαίου και φυσικού αερίου (π.χ. Jamiolahmady και Danesh 2007, Chang et al. 1989, Lin and Zhu 2014). Στον τομέα των υπόγειων νερών, αυτά τα πηγάδια συνήθως λειτουργούν ως πηγάδια συλλογής για την απομάκρυνση νερού ορυχείων, την παροχή νερού ή την αποστράγγιση υδροφορέων (Hantush and Papadopoulos, 1962). Τα οριζόντια πηγάδια έχουν επίσης χρησιμοποιηθεί για την αποκατάσταση των υπόγειων νερών ως ένας αποτελεσματικός τρόπος πρόσβασης σε μεγαλύτερη ποιοτικά υποβαθμισμένη περιοχή (λόγω του μήκους του οριζόντιου φρεατίου) εφαρμόζοντας διαδικασίες εξυγίανσης όπως η άντληση ρύπων, η έγχυση και/ή η άντληση αέρα (Miller 1996; Weesner et al. 1998). Οι Mohamed and Rushton (2006) δημιούργησαν ένα πείραμα πεδίου σε έναν αβαθή υδροφορέα στη Loba, ένα παραθαλάσσιο χωριό στη Μαλαισία, για να δοκιμάσουν την απόδοση του πηγαδιού για την παροχή γλυκού νερού. Μια άλλη εφαρμογή της τεχνολογίας HDDW στον τομέα των υπόγειων νερών είναι η αποθήκευση θερμικής ενέργειας σε υδροφορείς, λαμβάνοντας υπόψη το μεγάλο πλεονέκτημα των οριζόντιων γεωτρήσεων να κατασκευάζονται κάτω από κτίρια και σε ρηχά στρώματα υδροφορέων, προσφέροντας ευρύτερο πεδίο εφαρμογής (Aquifer Thermal Energy Storage (ATES), n.d.). Αν και οι οριζόντιες γεωτρήσεις δεν χρησιμοποιούνται σε MAR πλήρους κλίμακας, πειραματικές εγκαταστάσεις έχουν ενσωματώσει την τεχνολογία HDDW σε παράκτιους υδροφορείς που επηρεάζονται από την εισροή θαλασσινού νερού και την εξάντληση των υπόγειων νερών (Zuurbier et al. 2015), καθιστώντας τις διατάξεις αυτές καινοτόμες στον τομέα της τεχνητής αναπλήρωσης υδροφορέων και αντιμετώπισης της θαλάσσιας διείσδυσης.



Σχήμα 3.1 Απλοποιημένο σχέδιο πειραματικής διάταξης διαχείρισης εμπουτισμού του υδροφορέα

Συνοψίζοντας, ο σχεδιασμός της ερευνητικής εγκατάστασης πιλοτικής κλίμακας χρησιμοποιώντας τα εξής εργαλεία για την επίτευξη MAR :

- Αξιοποίηση υπόγειων υδατικών πόρων από το βαθύτερο καρστικό στρώμα
- Επεξεργασία υφάλμυρου νερού μέσω προηγμένων τεχνολογιών
- Χρήση του επεξεργασμένου νερού για: α) αντιμετώπιση της θαλάσσιας διείσδυσης στον αβαθή κοκκώδη σχηματισμό β) αποκατάσταση υποβαθμισμένου υγροτόπου
- Ανόρυξη γεωτρήσεων με διαφορετικές διευθύνσεις (κάθεται και οριζόντια) για την δοκιμή και βελτιστοποίηση του MAR μέσω τροποποιήσεων στο μοτίβο άντλησης- εισπίεσης νερού στον υπό μελέτη υδροφόρα

### 3.2 Χωροθέτηση, εγκατάσταση και χαρακτηριστικά της πειραματικής διάταξης στον Μαραθώνα

Βασικό στοιχείο για τον σχεδιασμό του MAR στον Μαραθώνα ήταν η επιλογή της τοποθεσίας και ο καθορισμός των χαρακτηριστικών σε αυτήν. Η ιδέα που παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.1, προσαρμόστηκε και υλοποιήθηκε στην ευρύτερη περιοχή του Σχοινιά σε σημεία που παραχωρήθηκαν για την περίοδο κατασκευής και ανάπτυξης του πειράματος από τον Φορέα Διαχείρισης του πάρκου του Σχοινιά. Η

τοποθεσία επιλέχθηκε λαμβάνοντας υπόψη τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του υδροφορέα και την τοπογραφία καθώς και τις διαθέσιμες εγκαταστάσεις στην περιοχή, με γνώμονα την καλύτερη δυνατή τεχνοοικονομική λύση ως προς τον σχεδιασμό και τη λειτουργία του συστήματος. Σημαντικές παράμετροι στην επιλογή της συγκεκριμένης θέσης ήταν η άμεση πρόσβαση στον παράκτιο υδροβιότοπο του Σχινιά και η προσβασιμότητα στο κανάλι καρστικής πηγής «Μακαρίας».



Σχήμα 3.2 Χωροθέτηση των τμημάτων της πειραματικής διάταξης Τ.Ε. στην περιοχή του Σχινιά με γραφική αναπαράσταση της λειτουργίας της

Το σύστημα σχεδιάστηκε βάσει λειτουργικότητας και ευελιξίας και τοποθετείται σε τρεις επί μέρους περιοχές, σύμφωνα με την εργασία που εκτελείται στην κάθε μία:

- Άντληση νερού καρστ (τοποθεσία 2)
- Υβριδική μονάδα επεξεργασίας νερού (τοποθεσία 3)
- Σύστημα γεωτρήσεων τεχνητού εμπλουτισμού (τοποθεσία 4)

### 3.2.1 Άντληση νερού εμπλουτισμού

Ως σημείο άντλησης νερού εμπλουτισμού από τον βαθύτερο καρστικό υδροφορέα, επιλέχθηκε η επιφανειακή εμφάνιση του ως νερό της Μακαρίας πηγής και πιο συγκεκριμένα από το αποστραγγιστικό κανάλι της Μακαρίας, στο ύψος που συνδέεται με το Ολυμπιακό Κωπηλατοδρόμιο (Σχήμα 3.2, τοποθεσία 2). Η επιλογή αυτή βασίστηκε στην ιδέα εξοικονόμησης κόστους και υδατικών πόρων. Στην περιοχή το καρστικό στρώμα εντοπίζεται σε βάθος μεγαλύτερο των 40 m, βάσει της γεωφυσικής μελέτης των

Μελισσάρη και Σταυρόπουλου (1999). Η διάτρηση γεώτρησης σε αυτό το βάθος και η σκληρότητα του πετρώματος θα καθιστούσαν μη οικονομικά αποδοτική την κατασκευή της διάταξης. Σημαντικός παράγοντας για την επιλογή του νερού της Μακαρίας ήταν και η ποσότητα που εκρέει από την πηγή. Ο Περλέρος (2001), έχει υπολογίσει την μέση μηνιαία εκφόρτιση Μακαρίας πηγής σε 1440 m<sup>3</sup>/hr και 383 m<sup>3</sup>/hr για ιδιαίτερα υγρό και ιδιαίτερα ξηρό υδρολογικό έτος αντίστοιχα. Οι ποσότητες αυτές είναι πολλαπλάσιες του προς άντληση νερού και επομένως δεν διαταράσσεται το ισοζύγιο του καναλιού που τροφοδοτεί το κωπηλατοδρόμιο με το νερό της πηγής.

### **3.2.2 Υβριδική αποκεντρωμένη μονάδα επεξεργασίας νερού**

Η μονάδα επεξεργασίας νερού εγκαταστάθηκε στις εγκαταστάσεις του Ολυμπιακού Κωπηλατοδρομίου Σχοινιά. Η τοποθεσία επιλέχθηκε λόγω της άμεσης πρόσβασης σε δίκτυο ηλεκτρικού ρεύματος και της ασφάλειας που παρείχαν οι εγκαταστάσεις του κωπηλατοδρομίου.

Η μονάδα περιλαμβάνει μια σειρά από καινοτόμες τεχνικές επεξεργασίας του αντλούμενου νερού του καρστ πριν αυτό εισαχθεί στον ανώτερο προσχωματικό υδροφορέα.

Η χρήση της μονάδας AOP προηγείται της μονάδας RO, έτσι ώστε να διασφαλίσει την αποδόμηση και την απομάκρυνση των οργανικών ρύπων. Η απουσία μονάδας AOP πριν από τη μονάδα RO θα είχε ως αποτέλεσμα την παραμονή οργανικών ρύπων στο νερό της πηγής, και τελικά θα οδηγούνταν στον προσχωματικό υδροφορέα κατά τη διαδικασία τεχνητού εμπλουτισμού. Επιπλέον, το οργανικό φορτίο του καρστικού νερού θα προκαλούσε γρήγορη φθορά των μεμβρανών της μονάδας RO, μειώνοντας τη διάρκεια ζωής και την απόδοσή τους.

Η μονάδα RO σχεδιάστηκε για να επεξεργάζεται νερό υψηλής ηλεκτρικής αγωγιμότητας από το κανάλι της Μακαρίας πηγής που κυμαίνεται στα 4500 μS/cm. Για την μετέπειτα χρήση του επεξεργασμένου νερού, ως νερό T.E., η εκροή που παράγεται μέσω της αντίστροφης ώσμωσης είναι νερό υψηλής ποιότητας με χαμηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα που δεν ξεπερνά τα 600 μS/cm.

Η δυναμικότητα της υβριδικής μονάδας επεξεργασίας RO/AOP ανέρχεται στα 65 m<sup>3</sup>/ημέρα με δυνατότητα αναβάθμισης έως τα 100 m<sup>3</sup>/ημέρα.

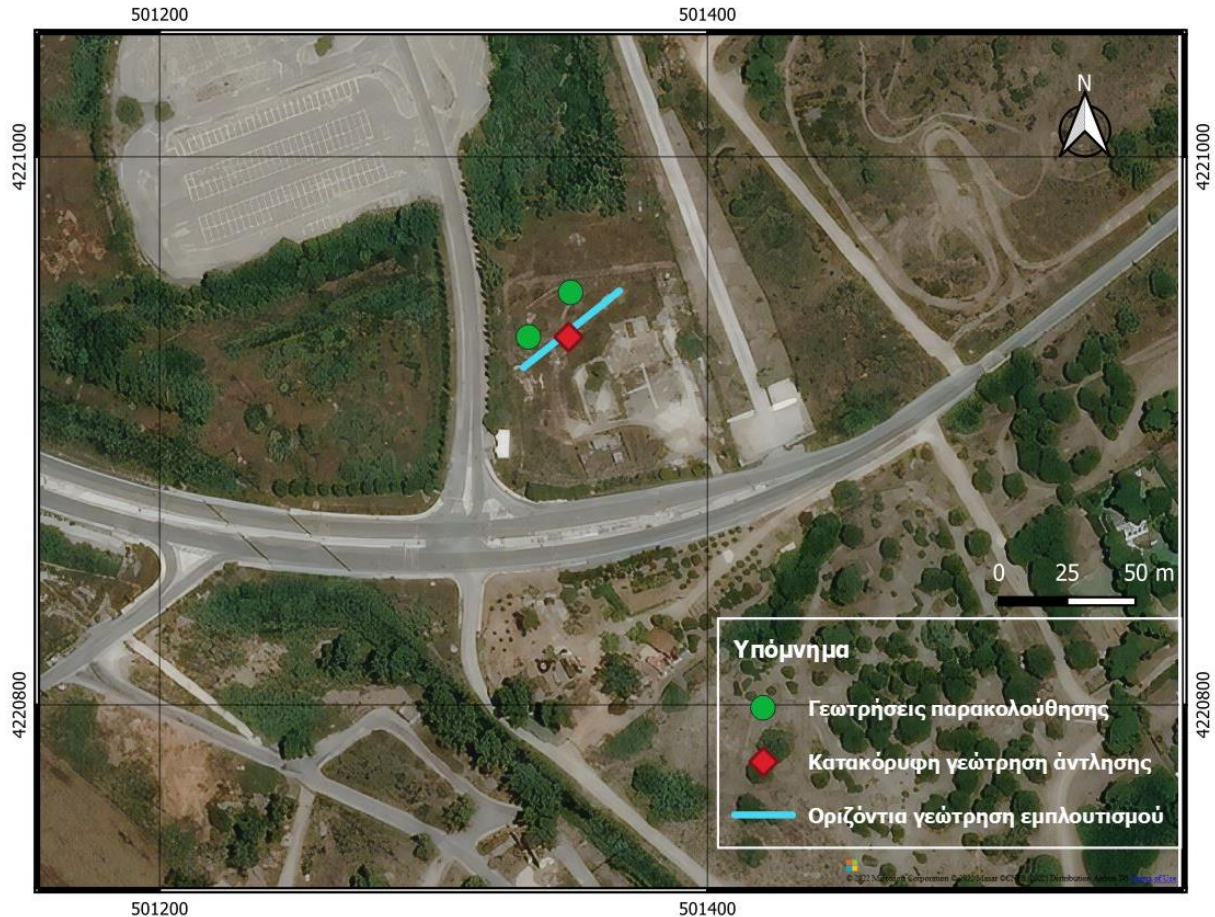
### **3.2.3 Σύστημα γεωτρήσεων εμπλουτισμού**

Η τοποθεσία για την κατασκευή των γεωτρήσεων MAR επιλέχθηκε βάσει έρευνας στην περιοχή. Ιδιαίτερα σημαντική παράμετρος ήταν ακόμη και η τοπογραφία έτσι ώστε το νερό να μεταφέρεται από τη μονάδα επεξεργασίας προς τις γεωτρήσεις εμπλουτισμού μέσω βαρύτητας. Η άμεση γεινίαση της περιοχής MAR με τον υδροβιότοπο ήταν εξίσου σημαντική. Γεωφυσική έρευνα που πραγματοποιήθηκε στην περιοχή των γεωτρήσεων θεωρήθηκε απαραίτητη για τον εντοπισμό τυχόν αρχαιολογικών καταλοίπων. Οι συγκεκριμένες μετρήσεις χρησιμοποιήθηκαν ακόμη για τον καθορισμό της στρωματογραφίας στον χώρο του MAR και τον χαρακτηρισμό του υπόγειου συστήματος.

Η πειραματική διάταξη MAR αποτελείται από ένα σύστημα τεσσάρων γεωτρήσεων:

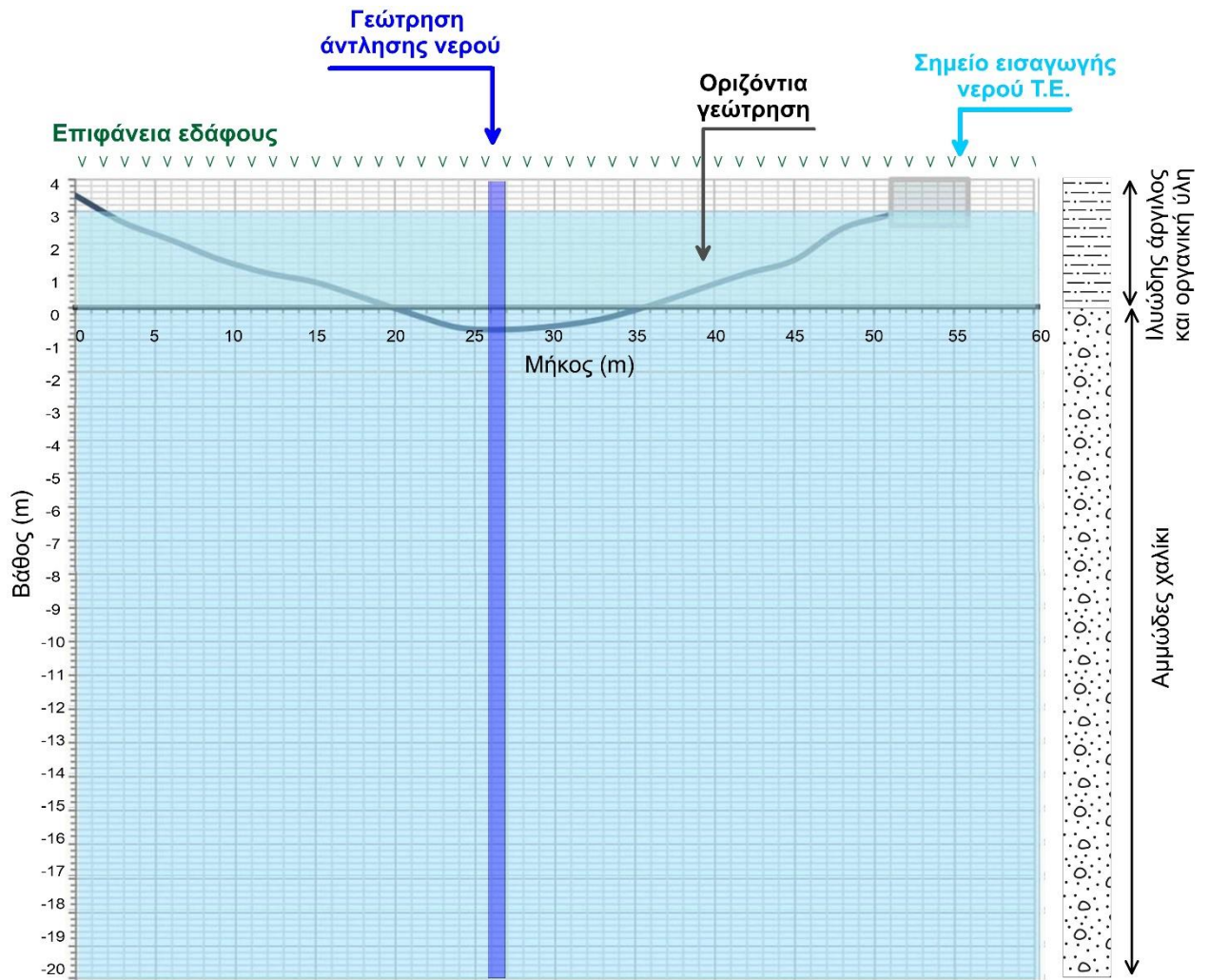
- Ένα κεντρικό κάθετο πηγάδι συνολικού βάθους 23 m, διαμέτρου 110 mm
- Δύο κάθετα πηγάδια συνολικού βάθους 12 m, διαμέτρου 60mm
- Ένα οριζόντιο πηγάδι διαμέτρου 75 mm με μέγιστο βάθος στα 4.3 m

Η χωροθέτηση των ανωτέρω πηγαδιών MAR φαίνεται στην κάτοψη του Σχήματος 3.3



Σχήμα 3.3 Χωροθέτηση των γεωτρήσεων MAR

Η συγκεκριμένη διάταξη σχεδιάστηκε έτσι ώστε μετά την επεξεργασία, το νερό να εγχέεται στον ρηχό υδροφορέα μέσω της οριζόντιας γεώτρησης (HDDW), ενώ ταυτόχρονα να αντλείται υπόγειο νερό από μεγαλύτερο βάθος του ίδιου στρώματος μέσω του κάθετου βαθύτερου φρεατίου. Με αυτόν τον τρόπο είναι δυνατό να αυξηθεί η ικανότητα επαναπλήρωσης του προσχωματικού υδροφορέα. Κατά τη διάρκεια του τεχνητού εμπλουτισμού, η στάθμη του υδροφορέα μετράται από τα δύο ρηχότερα πηγάδια έτσι ώστε να καταγράφεται η απόκριση του στην εφαρμογή MAR. Στο Σχήμα 3.4, παρουσιάζεται η τομή του υδροφορέα κατά μήκος του οριζόντιου πηγαδιού.



Σχήμα 3.4 Τομή του υδροφορέα κατά μήκος της οριζόντιας γεώτρησης

## 4 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΡΟΗΣ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΝΕΡΟΥ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑ ΟΡΙΖΟΝΤΙΩΝ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ ΤΕΧΝΗΤΟΥ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΥ

Η αριθμητική προσομοίωση έχει εφαρμογή σε πολλές περιπτώσεις για την αντιμετώπιση προβλημάτων που σχετίζονται με τα υπόγεια νερά. Για παράδειγμα, οι Zhou et al. (2017) διερεύνησαν τα αποτελέσματα των αντλήσεων στη στάθμη παράκτιων υδροφορέων υπό την επίδραση της παλίρροιας μέσω του μοντέλου μεταβαλλόμενης πυκνότητας SEAWAT (Langevin et al. 2007) στην Κίνα. Οι Sadeghi-Tabas et al. (2017) συνδύασαν τον κώδικα MODFLOW (Harbaugh 2005) με αλγόριθμους βελτιστοποίησης για να τη βελτιστοποίηση των αντλήσεων σε μια λεκάνη του Ιράν, ενώ οι Deng et al. (2018) προσομοίωσαν μέσω του κώδικα MODFLOW προβλήματα καθιζήσεων του εδάφους εξαιτίας της άντλησης υπόγειων υδροφόρων στρωμάτων.

Η χρήση μοντέλων υπογείων νερών είναι συνήθης και σε μελέτες έργων MAR ως εργαλείο για την πρόβλεψη της απόκρισης του υδροφορέα σε συνθήκες τεχνητής επαναπλήρωσης και τις μελλοντικές επιπτώσεις που μπορεί να προκύψουν (Ringleb et al. 2016). Για τη διερεύνηση έργων MAR έχει εφαρμοστεί ένα ευρύ φάσμα αριθμητικών μοντέλων. Οι Russo et al. (2015) προσομοίωσαν πιθανές λύσεις MAR σε μια παράκτια λεκάνη χρησιμοποιώντας το MODFLOW-2005 (Harbaugh 2005) σε συνδυασμό με το Farm Process (Schmid and Hanson 2009). Οι (Sallwey et al. 2018) χρησιμοποίησαν το HYDRUS 2D/3D για την προσομοίωση της ακόρεστης ζώνης έτσι ώστε να σχεδιάσουν μια λεκάνης διήθησης πιλοτικής κλίμακας και οι Tzoraiki κ.ά. (2018) προσομοίωσαν την ανταπόκριση ενός παράκτιου συστήματος στην εφαρμογή MAR στην Κύπρο χρησιμοποιώντας το γεωχημικό μοντέλο PHREEQC (Parkhurst and Appelo, 2013) και μοντέλο υπόγειας ροής πεπερασμένων στοιχείων FEFLOW (Trefry and Muffels 2007). Οι Maples et al. (2019) πρότειναν την χωροθέτηση συστημάτων MAR στην Central Valley (Καλιφόρνια) μέσω γεωστατιστικής ανάλυση και στη συνέχεια προσομοίωσαν την απόδοση λεκανών διήθησης με το ParFlow (Ashby and Falgout 1996) έναν τρισδιάστατο (3D), κώδικα μοντελοποίησης της ακόρεστης ζώνης που προσομοιώνει την επιφανειακή και υπόγεια ροή. Οι Clark et al. (2015) διερεύνησαν την αξιοπιστία της παροχής πόσιμου νερού από ένα σύστημα T.E. με όμβρια ύδατα κάνοντας χρήση του υδρολογικού μοντέλου «WaterCress» (WaterSelect, n.d.) προσομοιώνοντας την απορροή, την επαναπλήρωση του υδροφορέα και την ανάκτηση νερού για διαφορετικές συνθήκες βροχόπτωσης, λεκάνης απορροής και υδροχημικής κατάστασης του υπογείου νερού σε έναν υφάλμυρο παράκτιο υδροφορέα στο Σόλσμπερι (Αγγλία). Οι Wu et al. (2021) εξέτασαν το πως επηρεάζουν οι γεωλογικές ετερογένειες την απόδοση του MAR μέσω εργαστηριακών πειραμάτων σε συνδυασμό με τον κώδικα FEFLOW 7.2 (Diersch 2014). Οι ερευνητές κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η ύπαρξη αργιλικών φακών αυξάνουν τον χρόνο παραμονής του νερού εμπλουτισμού επιδρώντας σε μικρό βαθμό στην τοπική ροή, ενώ τα στρώματα υψηλής διαπερατότητας συμβάλλουν στην μείωση των φακών γλυκού νερού κατά το MAR



## 4.1 Κώδικας προσομοίωσης της οριζόντιας γεώτρησης

Η ικανότητα ενός μαθηματικού μοντέλου να αναπαραστήσει ένα πραγματικό σύστημα υπόγειας ροής εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από πολλούς παράγοντες όπως είναι η ποιότητα των δεδομένων, ανακρίβειες της θεωρητικής εξίσωσης, του κώδικα προσομοίωσης και των οριακών συνθηκών (Bloetcher et al. 2005). Ο Reilly (2001) τονίζοντας τη σημασία του εννοιολογικού μοντέλου ενός συστήματος και των ορίων του, υποστηρίζει ότι η αποτελεσματική μοντελοποίηση περιλαμβάνει την ερμηνεία των βασικών νόμων της φυσικής έτσι ώστε να «μεταφραστεί» με ακρίβεια ένα σύστημα ροής, στο ισοδύναμο μαθηματικό πρόβλημα. Αυτό σημαίνει την αναπαράσταση και την εννοιολογική προσέγγιση ενός φυσικού ορίου και άλλων τεχνητών εισροών και εκροών και πηγών με συγκεκριμένη οριακή συνθήκη. Ο Reilly (2001) τόνισε επίσης ότι η επιλογή μιας οριακής συνθήκης εξαρτάται από τους κύριους στόχους μιας μελέτης, αλλά μια ρεαλιστική αναπαράσταση οδηγεί σε ένα πιο ακριβές μοντέλο για μακροπρόθεσμη πρόβλεψη.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η χρήση οριζόντιων γεωτρήσεων ως πηγάδια τεχνητού εμπλουτισμού είναι περιορισμένη μέχρι σήμερα. Οι κώδικες και τα πακέτα που χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση τους προσδιορίζονται από τη χρήση τους. Σε πολλές έρευνες, οι οριζόντιες γεωτρήσεις προσομοιώνονται ως γεωτρήσεις-συλλέκτες (collector wells). Για παράδειγμα οι Ismail et al. (2012) και Kelson (2012) προσομοίωσαν οριζόντιες γεωτρήσεις συλλογής χρησιμοποιώντας το πακέτο DRN του MODFLOW. Οι Haitjema et al. (2010) αναφέρουν ότι σε ένα τρισδιάστατο μοντέλο η οριζόντια γεώτρηση μπορεί να προσομοιωθεί από μικρά κελιά σταθερού φορτίου. Το πακέτο MNW2 που ενσωματώνεται στο MODFLOW-2005 έχει σχεδιαστεί για την προσομοίωση γεωτρήσεων που διεισδύουν σε περισσότερα από ένα στρώματα ή εκτείνονται σε πολλαπλά κελιά σε σειρά, όπως τα οριζόντια φρεάτια (Konikow et al. 2009). Όσον αφορά τα οριζόντια φρεάτια εμπλουτισμού/αποστράγγισης, οι Wang et al. (2014) απέδωσαν το οριζόντιο πηγάδι ως όριο γνωστής παροχής (specified flux boundary) υπολογίζοντας με τη χρήση αναλυτικών λύσεων σε δισδιάστατο περιβάλλον (2-D) την απόδοση της οριζόντιας γεώτρησης προκειμένου να διερευνηθούν τα χαρακτηριστικά ροής των υπόγειων νερών, συμπεριλαμβανομένων των ζωνών απελευθέρωσης/σύλληψης από το οριζόντιο πηγάδι. Επίσης, οι Zuurbier et al. (2015) προσομοίωσαν ένα σύστημα οριζόντιων γεωτρήσεων T.E. με το πακέτο MODFLOW WEL.

Στο παρόν κεφάλαιο, περιγράφεται η προσομοίωση των υδρολογικών διεργασιών μεταξύ των τμημάτων σωλήνα ανοιχτού φίλτρου μίας οριζόντιας γεώτρησης και του περιβάλλοντος υδροφορέα, όπως περιγράφηκε στο κεφάλαιο 3. Στόχος της έρευνας είναι η μοντελοποίηση της απόδοσης των οριζόντιων πηγαδιών (HDDW) ως φρεάτια επαναπλήρωσης στους υδροφορείς. Η πιλοτική διάταξη MAR προσομοιώνεται χρησιμοποιώντας τον κώδικα MODFLOW 2005 (Harbaugh 2005) του USGS, εστιάζοντας κυρίως στην απόδοση της οριζόντιας γεώτρησης. Ο κώδικας λύνει την τρισδιάστατη εξίσωση της ροής των υπόγειων νερών σε ένα πορώδες μέσο, όπως περιγράφεται από τους McDonald και Harbaugh (1986) και παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 5 της παρούσας διατριβής. Πιο συγκεκριμένα, η οριζόντια γεώτρηση προσομοιώθηκε με το πακέτο ροής αγωγών (Conduit Flow Package-CFP) του κώδικα MODFLOW-2005

(Shoemaker et al., 2007) ενώ η ανάλυση ευαισθησίας πραγματοποιήθηκε με τον αυτοματοποιημένο κώδικα UCODE\_2014 (Poeter et al. 2014).

Ο κώδικας μοντελοποίησης MODFLOW CFP, αναπτύχθηκε για την προσομοίωση διεργασιών σε καρστικούς αγωγούς και την αλληλεπίδραση αυτών με το περιβάλλον υδροφόρο στρώμα. Το συγκεκριμένο πακέτο εκτελεί τρεις ξεχωριστές λειτουργίες στις οποίες ενσωματώνεται ο αριθμός Reynolds (Re) για την αντιμετώπιση των περιορισμών του νόμου του Darcy για τη ροή σε πορώδη μέσα: (α) CFP Mode 1 (CFPM1) που συνδέει τον κώδικα MODFLOW-2005 με τη ροή σε διακριτό δίκτυο σωλήνων- καρστικών αγωγών, (β) CFP Mode 2 (CFPM2) που προσομοιώνει την οριζόντια τυρβώδη ροή σε στρώματα επιλεκτικής ροής και, (γ) CFP Mode 3 (CFPM3) που συνδυάζει ταυτόχρονα τις δύο παραπάνω λειτουργίες.

Στη βιβλιογραφία ο κώδικας χρησιμοποιήθηκε για την μοντελοποίηση κατακερματισμένων σχηματισμών ή/και καρστικών υδροφορέων, δηλαδή για σχηματισμούς με δευτερογενές πορώδες. Για παράδειγμα, ο Rouliaris (2019) προσομοίωσε τον καρστικό υδροφορέα στην περιοχή του Λαυρίου (Ελλάδα) χρησιμοποιώντας τον κώδικα MODFLOW CFP για να προσομοιώσει ένα δίκτυο διακριτών αγωγών σε ασβεστόλιθο με ρωγματώσεις. Οι Hill et al. (2010) χρησιμοποίησαν ένα μοντέλο τοπικής κλίμακας στον κατακερματισμένο καρστικό υδροφορέα της Φλόριντα προκειμένου να συγκρίνουν την απόδοση του MODFLOW-CFP έναντι του MODFLOW-2005. Ως αποτέλεσμα της έρευνας, οι μελετητές συμπέραναν ότι το πακέτο CFPM1 βελτίωσε την αντιστοίχιση μεταξύ των παρατηρούμενων και των προσομοιωμένων τιμών εκφόρτισης σε καρστική πηγή. Οι Zheng et al. (2021) μέσω του κώδικα MODFLOW-CFP αξιολόγησαν την επίδραση της διάνοιξης σήραγγας στις υδρογεωλογικές συνθήκες καρστικών υδροφορέων. Στη μελέτη τους, τόσο η σήραγγα όσο και οι καρστικοί υπόγειοι αγωγοί προσομοιώθηκαν ως διακριτά στοιχεία αγωγών με το CFPM1. Οι Gholizadeh et al. (2020) προσομοίωσαν την αλληλεπίδραση μεταξύ μιας σήραγγας μεταφοράς νερού και του περιβάλλοντος υδροφορέα που σχηματίζεται σε κατακερματισμένα πετρώματα στην ηφαιστειακή ζώνη Urumieh-Dokhtar του Ιράν. Τα αποτελέσματά έδειξαν ότι ο κώδικας MODFLOW CFP προέβλεψε με υψηλή ακρίβεια τη διακύμανση της εισροής υπόγειων νερών και τη μεταβολή του υδραυλικού φορτίου στη σήραγγα.

Η εξίσωση ροής εντός του αγωγού επιλύεται με δύο διαφορετικές εξισώσεις για τη στρωτή και την τυρβώδη ροή και ενσωματώθηκαν στον κώδικα MODFLOW 2005. Για τη στρωτή ροή, η εξίσωση Hagen-Poiseuille είναι:

$$Q = -A \frac{\rho g d^2 \Delta h}{32 \mu \Delta l \tau} \quad (4.1)$$

όπου  $Q$  ο ογκομετρικός ρυθμός ροής στον αγωγό ( $L^3T^{-1}$ ),  $A$  η διατομή κάθετη στη ροή ( $L^2$ ),  $\rho$  η πυκνότητα του νερού [ $ML^{-3}$ ],  $g$  η επιτάχυνση της βαρύτητας ( $LT^{-2}$ ),  $\Delta h$  η απώλεια του υδραυλικού φορτίου κατά μήκος του αγωγού ( $L$ ) μήκους  $\Delta l$  ( $L$ ),  $\mu$  το δυναμικό ή απόλυτο ιξώδες του νερού ( $ML^{-1}T^{-1}$ ) and  $\tau$  η στρεβλότητα

(αδιάστατο μέγεθος) του αγωγού (Shoemaker et al., 2007). Για την τυρβώδη ροή, επιλύεται η εξίσωση Darcy-Weisbach:

$$Q = A \sqrt{\frac{\Delta h d 2g}{f \Delta l}} \quad (4.2)$$

όπου  $f$  ο συντελεστής τριβής (αδιάστατο μέγεθος) (Shoemaker et al. 2007).

## 4.2 Προσομοίωση της πειραματικής διάταξης MAR του Σχοινιά

Για την πειραματική διάταξη που κατασκευάστηκε στον Σχοινιά και παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 3, προσομοιώθηκαν οι υδροδυναμικές συνθήκες κατά την έγχυση νερού στον κοκκώδη σχηματισμό του Μαραθώνα με την εφαρμογή του CFP Mode 1 (CFPM1), που ενσωματώνει τη ροή εντός του υδροφόρου στρώματος (MODFLOW-2005), τη ροή σε κυλινδρικούς σωλήνες (HDDW) και την ανταλλαγή υπογείου νερού μεταξύ του υδροφορέα και του σωλήνα. Οι εξισώσεις ροής στο CFPM1, περιλαμβάνουν διορθώσεις για τη ροή σε αγωγούς που λειτουργούν υπό μερική πλήρωση και για την ανταλλαγή υπογείου νερού μεταξύ του υδροφορέα και αγωγών υπό μερική πλήρωση. Μία ακόμη δυνατότητα του CFPM1 είναι η ενσωμάτωση του πακέτου επαναφόρτισης (CRCH) που έχει τη δυνατότητα προσομοίωσης της έγχυσης νερού στην οριζόντια γεώτρηση.

Για να μελετηθεί περαιτέρω η καταλληλότητα του κώδικα MODFLOW CFP για την προσομοίωση οριζόντιων γεωτρήσεων εμπλουτισμού σε υδροφορείς, η γεώτρηση προσομοιώθηκε ακόμη με το πακέτο WEL. Τα αποτελέσματα των δύο μοντέλων συγκρίθηκαν ενώ η ακρίβεια των δύο προσεγγίσεων ελέγχθηκε περαιτέρω χρησιμοποιώντας πραγματικά δεδομένα διακύμανσης του υδραυλικού φορτίου στην πιλοτική τοποθεσία του Μαραθώνα που συλλέχθηκαν κατά τη διάρκεια πειραμάτων τον Φεβρουάριο του 2018. Τέλος, διερευνήθηκε η ευαισθησία των παραμέτρων του κάθε μοντέλου μέσω αυτοματοποιημένης ανάλυσης ευαισθησίας.

### 4.2.1 Εννοιολογικό μοντέλο

Το μοντέλο υπόγειας ροής υλοποιήθηκε στην πλατφόρμα ModelMuse της USGS (Winston 2009). Για την προσομοίωση του συστήματος T.E. δημιουργήθηκε ορθογωνικός κানাβος που αντιπροσωπεύει έκταση 112.000 m<sup>2</sup> της περιοχής μελέτης με πλέγμα υψηλής ευκρίνειας 2x2 m. Ως προς την κατακόρυφη διακριτοποίηση (στρωματογραφία), το μοντέλο περιλαμβάνει δύο διαφορετικά στρώματα: (α) το πρώτο στρώμα έχει πάχος 3 m και είναι χαμηλής υδραυλικής αγωγιμότητας, αντιπροσωπεύοντας το ρηχό στρώμα αργίλου, ενώ (β) το δεύτερο στρώμα αντιπροσωπεύει τον κύριο υδροφορέα πάχους 20 m και δομείται σε κοκκώδη υλικά με υψηλότερη υδραυλική αγωγιμότητα. Τα δύο στρώματα θεωρούνται ομοιογενή. Και τα δύο στρώματα προσομοιώθηκαν ως περιορισμένα στρώματα λόγω της ύπαρξης του λεπτόκοκκου υλικού

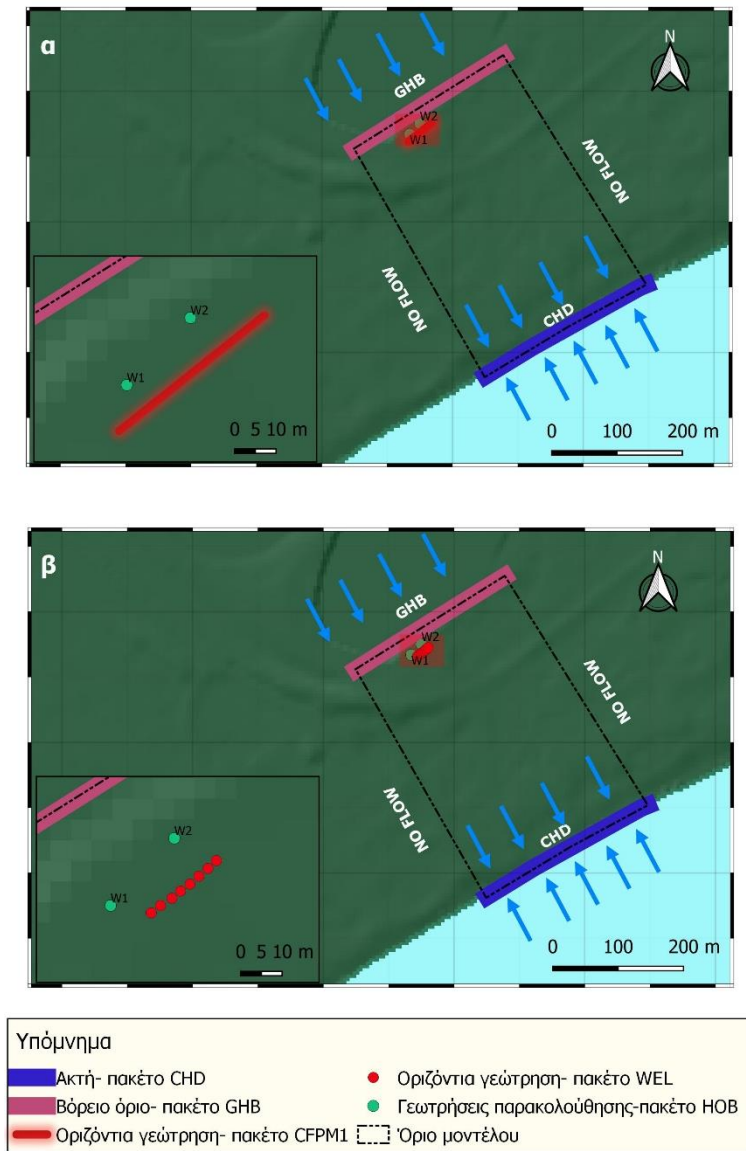
στο υπερκείμενο στρώμα (άργιλος, ιλύς και οργανική ύλη). Το βάθος του υπογείου νερού στην περιοχή είναι περίπου στα 2,4 m ενώ η πιεζομετρική επιφάνεια κυμαίνεται μεταξύ 0,1 και 0,7 m πάνω από τη μέση στάθμη της θάλασσας (AMSL). Η οριζόντια γεώτρηση έχει μήκος 50 m και φτάνει το βάθος των 4,1 m.

Οι οριακές συνθήκες που αντιπροσωπεύουν τις εκροές και εισροές για τον υδροφορέα παρουσιάζονται στον Πίνακα 4. Στο Σχήμα 4.1 φαίνεται η θέση κάθε οριακής συνθήκης για τα δύο μοντέλα. Η κύρια διαφορά είναι η χρήση των δύο διαφορετικών πακέτων για την αναπαράσταση της οριζόντιας γεώτρησης (πακέτο CFP και WEL). Στο σενάριο που η οριζόντια γεώτρηση προσομοιώθηκε με το πακέτο WEL, η γεώτρηση αναπαραστάθηκε με οχτώ διαφορετικά πηγάδια (Σχήμα 4.1(β)). Το βάθος κάθε πηγαδιού διαφέρει, προκειμένου να αποτυπωθεί η κατακόρυφη πορεία της οριζόντιας γεώτρησης στον υδροφορέα. Τα βάθη των πηγαδιών κυμαίνονται από 3,1 m έως 4,1 m (σύμφωνα με τα μετρημένα βάθη της οριζόντιας γεώτρησης) και τοποθετούνται στο κατώτερο υδροφόρο στρώμα. Η εισαγωγή νερού T.E. για την προτεινόμενη διάταξη, κατανεμήθηκε ισόποσα στα οκτώ πηγάδια.

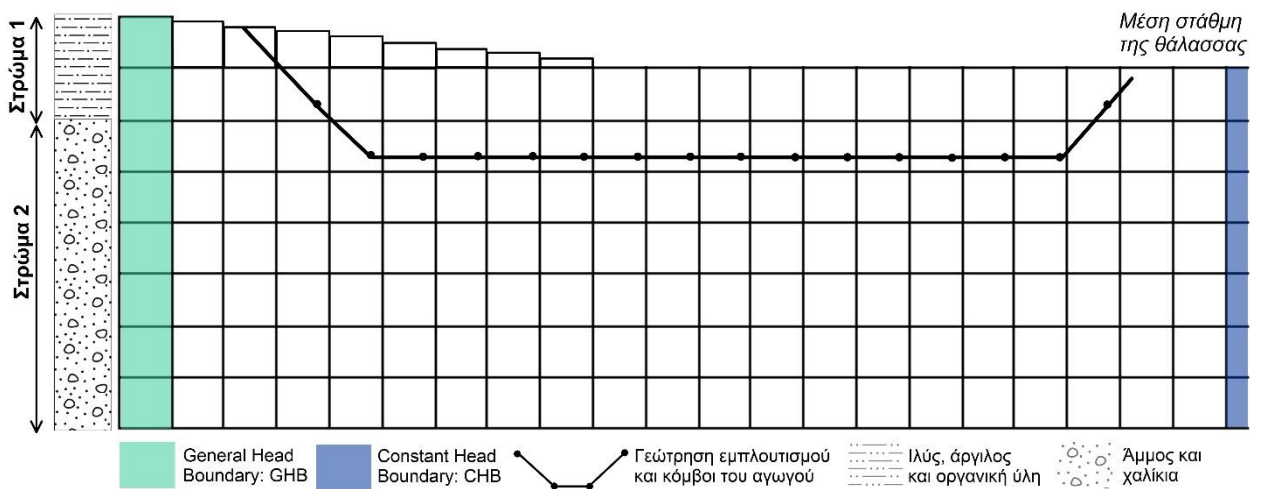
Πίνακας 4.1 Οριακές συνθήκες μοντέλων “CFP” και “WEL”

Φυσικό όριο	Οριακές συνθήκες μοντέλου “CFP”	Οριακές συνθήκες μοντέλου “WEL”
Βόρειο όριο (υδροφορέας)	GHB	GHB
Ακτή	CHD	CHD
Πλευρικά όρια	No Flow	No Flow
Οριζόντια γεώτρηση	CFP (mode 1)	WEL
Γεωτρήσεις παρακολούθησης	HOB	HOB

Τα κελιά του μοντέλου που βρίσκονται σε υδραυλική επαφή με τη θάλασσα προσομοιώθηκαν ως όριο σταθερού φορτίου (Constant Head Boundary-CHD), ενώ στα ανατολικά και δυτικά όρια του μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν συνθήκες μηδενικής ροής (No flow). Τέλος, για τις εισροές από το βόρειο ανάντη τμήμα του υδροφορέα χρησιμοποιήθηκε όριο μικτού τύπου (General Head Boundary-GHB), όπως φαίνεται στην εννοιολογική προσέγγιση του μοντέλου (Σχήμα 3.4). Για το πακέτο GHB, το υδραυλικό φορτίο του ορίου καθορίστηκε μετά από καταγραφή του φορτίου από πηγάδια της περιοχής. Η παρακολούθηση των προσομοιωμένων τιμών στον υδροφορέα έγινε μέσω του πακέτου παρακολούθησης φορτίου (Head Observation package- HOB) και τοποθετήθηκε στις θέσεις των δύο γεωτρήσεων παρακολούθησης που κατασκευάστηκαν στην περιοχή του πειράματος. Στο Σχήμα 4.2 φαίνεται η εννοιολογική προσέγγιση του μοντέλου της οριζόντιας γεώτρησης με το πακέτο CFP.



Σχήμα 4.1 Οριακές συνθήκες του μοντέλου T.E. με (α) το πακέτο CFP, (β) το πακέτο WEL



Σχήμα 4.2 Ενοιολογική προσέγγιση του μοντέλου MODFLOW CFP για την οριζόντια γεώτρηση εμπλουτισμού

Το μοντέλο προσομοιώθηκε για 10 περιόδους φόρτισης (stress periods-SP) με συνολική διάρκεια 300 λεπτά (Πίνακας 4.2) ενώ στη συνέχεια βαθμονομήθηκε χρησιμοποιώντας παρατηρημένες τιμές υδραυλικού φορτίου που μετρήθηκαν κατά τη διάρκεια πειραμάτων εμπλουτισμού του υδροφορέα με επεξεργασμένο νερό (από την υβριδική μονάδα RO/AOP) μέσω της οριζόντιας γεώτρησης. Ο ρυθμός εισαγωγής του επεξεργασμένου νερού στην οριζόντια γεώτρηση κυμάνθηκε από 0,94 έως 3,59 m<sup>3</sup>/h.

Πίνακας 4.2 Χρονική διακριτοποίηση και είδος ροής των μοντέλων

Περίοδος φόρτισης SP	Κατάσταση Ροής*	Έναρξη	Λήξη	Διάρκεια Δt (min)	Ρυθμός εμπλουτισμού Q (m <sup>3</sup> /hr)
1	SS	-1	0	0	0
2	TR	0	60	60	0,94
3	TR	60	90	30	0,94
4	TR	90	120	30	0,94
5	TR	120	150	30	0,94
6	TR	150	180	30	3,59
7	TR	180	210	30	3,59
8	TR	210	240	30	3,59
9	TR	240	270	30	3,59
10	TR	270	300	30	3,59

\*SS= μόνιμη ροή (Steady State), TR= μη μόνιμη ροή (Transient)

#### 4.2.2 Ανάλυση ευαισθησίας

Η ανάλυση ευαισθησίας και η εκτίμηση παραμέτρων των δύο μοντέλων διεξήχθησαν με τον κώδικα UCODE\_2014 της USGS (Poeter et al., 2014) χρησιμοποιώντας πειραματικές μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν στην πιλοτική εγκατάσταση MAR. Στο μοντέλο “CFP”, τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του αγωγού ήταν γνωστά (διάμετρος, στρεβλότητα), για τον συντελεστή τραχύτητας λήφθηκε μια μικρή τιμή για λείους σωλήνες (Moody, 1944) ενώ οι οριακές τιμές του αριθμού Reynolds συμπεριλήφθηκαν στην ανάλυση ευαισθησίας. Η διαπερατότητα του σωλήνα δεν είναι γνωστή επομένως στις παραμέτρους ρύθμισης συμπεριλήφθηκε η αγωγιμότητα του τοιχώματος του αγωγού (conduit wall conductance), ενώ το κατώτερο και το ανώτερο όριο του αριθμού Reynolds συμπεριλήφθηκαν επίσης ως παράμετροι για την βαθμονόμηση του μοντέλου. Οι παράμετροι του αγωγού προστέθηκαν χειροκίνητα στο UCODE\_2014, καθώς ο κώδικας Modflow-2005 δεν αναγνωρίζει κανέναν τύπο παραμέτρου για το πακέτο CFP. Όλες οι παράμετροι που εκχωρήθηκαν στο UCODE\_2014 μαζί με τις αρχικές τιμές, παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.3.

Οι παράμετροι Cond\_CFP, Low\_Re και High\_Re χρησιμοποιήθηκαν μόνο στην ανάλυση ευαισθησίας του μοντέλου “CFP” καθώς είναι αυτές που καθορίζουν την απόδοση του αγωγού.

Η ανάλυση ευαισθησίας και η εκτίμηση των παραμέτρων ενός μοντέλου στο UCODE\_2014 πραγματοποιούνται μέσω επαναληπτικής διαδικασίας, όπως περιγράφεται στο κεφάλαιο 5.

Πίνακας 4.3 Παράμετροι για την ανάλυση ευαισθησίας του μοντέλου

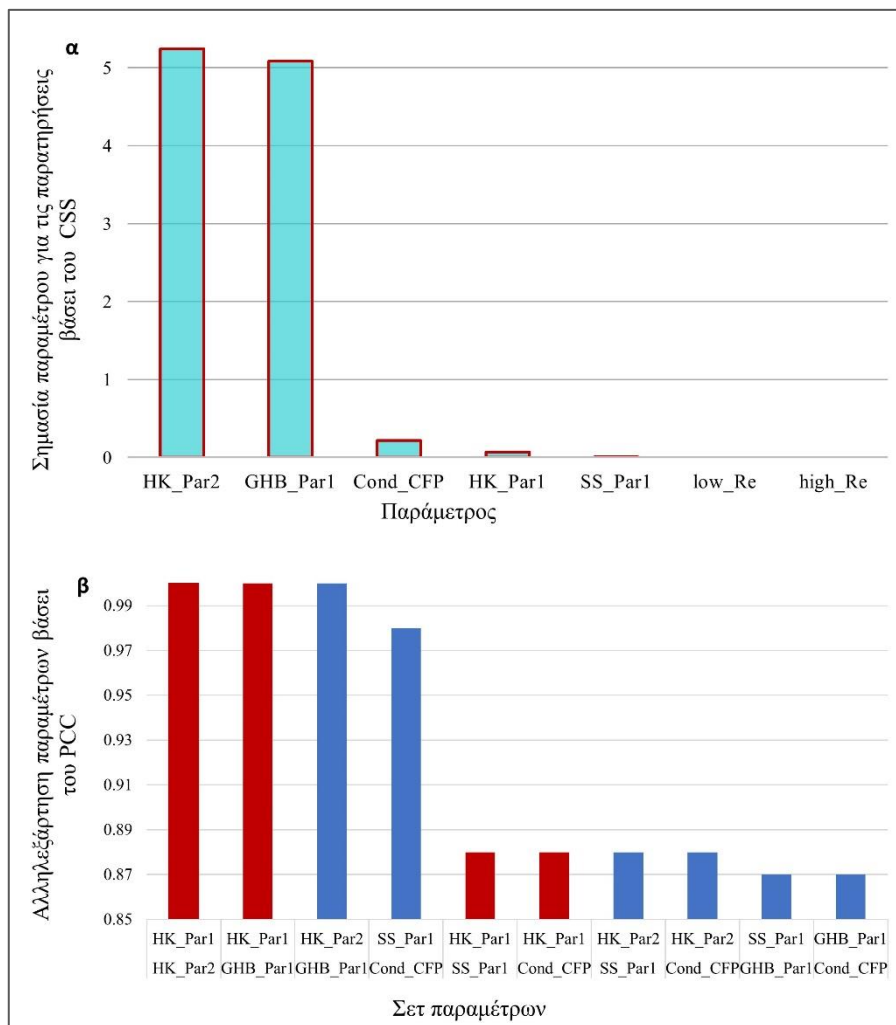
Παράμετρος	Συντομογραφία	Αρχική τιμή
Υδραυλική αγωγιμότητα του ανώτερου στρώματος στην οριζόντια διεύθυνση ροής	HK_Par1	4,284E-5 (m/min)
Υδραυλική αγωγιμότητα του κατώτερου στρώματος στην οριζόντια διεύθυνση ροής	HK_Par2	1,864E-4 (m/min)
Αγωγιμότητα (conductance) του ορίου σταθερής παροχής	GHB_Par	3E-6 (m <sup>2</sup> /min)
Ειδική αποθηκευτικότητα	SS_Par	2,6E-3 (m <sup>-1</sup> )
Διαπερατότητα του τοιχώματος του αγωγού	Cond_CFP	5E-5 (m <sup>2</sup> /min)
Κατώτερο όριο αριθμού Reynolds στον αγωγό	Low_Re	1500
Ανώτερο όριο αριθμού Reynolds στον αγωγό	High_Re	4000

Μέσω της ανάλυσης ευαισθησίας που πραγματοποιήθηκε υπολογίστηκε το επίπεδο ευαισθησίας για όλες τις παραμέτρους που παρουσιάζονται στον παραπάνω πίνακα και τη συσχέτιση μεταξύ τους, με βάση τις τιμές της στάθμης υπογείου νερού που μετρήθηκαν στη διάρκεια MAR του υδροφορέα μέσω της οριζόντιας γεώτρησης.

Για το μοντέλο “CFP”, τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας υποδηλώνουν ότι το μοντέλο επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τις παραμέτρους που σχετίζονται με το υποκείμενο στρώμα του υδροφορέα και την επαναφόρτιση της πιλοτικής περιοχής από τον περιβάλλοντα υδροφορέα (Σχήμα 4.3(α) Επίπεδο ευαισθησίας παραμέτρων με βάση το CSS, (β) Συσχέτιση παραμέτρων, για το μοντέλο CFP Σχήμα 4.3). Βάσει των υπολογισμών, οι παράμετροι HK\_Par2 και GHB\_Par έχουν τις μεγαλύτερες τιμές CSS υποδηλώνοντας την επίδραση που έχουν στα αποτελέσματα του μοντέλου, ενώ η παράμετρος cond\_CFP έχει πολύ χαμηλότερη τιμή CSS. Οι παράμετροι HK\_Par1, SS\_Par, low\_Re και high\_Re έχουν σχεδόν μηδενικό επίπεδο ευαισθησίας, σύμφωνα με την ανάλυση. Η επίδραση της παραμέτρου HK\_Par2 στα προσομοιωμένα αποτελέσματα ήταν αναμενόμενη καθώς είναι η παράμετρος που σχετίζεται με την κίνηση των υπόγειων νερών στο στρώμα του υδροφορέα που εφαρμόζεται ο MAR (κατώτερο στρώμα). Τέσσερις συνδυασμοί παραμέτρων συσχετίζονται σε μεγάλο βαθμό (Εικόνα 5(β)) καθώς η απόλυτη τιμή του PCC είναι ίση με 1. Η ακραία συσχέτιση μεταξύ των υδραυλικών αγωγιμοτήτων των δύο στρωμάτων οφείλεται στην υδραυλική τους επαφή. Η εξαιρετικά ευαίσθητη παράμετρος του βόρειου ορίου (GHB) σε συνδυασμό με

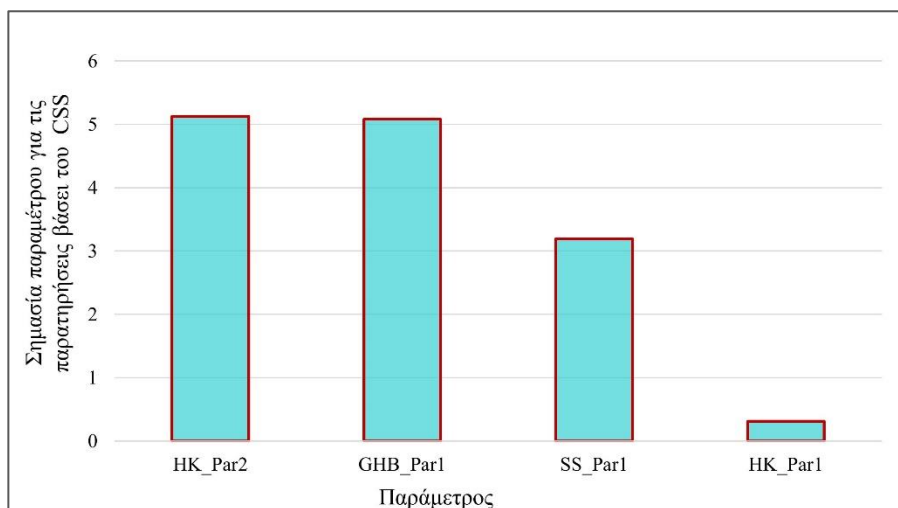
την ακραία συσχέτιση των παραμέτρων υδραυλικής αγωγιμότητας με την αγωγιμότητα (conductance) του GHB σχετίζεται με το γεγονός ότι αυτό το όριο είναι η κύρια πηγή φόρτισης των δύο στρωμάτων.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας του μοντέλου “WEL” παρουσιάζονται στο Σχήμα 4. Οι δύο σημαντικότερες παράμετροι είναι η υδραυλική αγωγιμότητα του κατώτερου στρώματος (HK\_Par2) και η αγωγιμότητα (conductance) του βόρειου ορίου (GHB\_Par1). Τα αποτελέσματα είναι σύμφωνα με την ανάλυση ευαισθησίας του μοντέλου που παρουσιάστηκε προηγουμένως (CFP). Σε αυτήν την ανάλυση, η ειδική αποθηκευτικότητα (SS\_Par1) είναι επίσης μια σημαντική παράμετρος για τα αποτελέσματα του μοντέλου, υποδεικνύοντας την μεταβολή της αποθηκευτικότητας του υδροφορέα. Βάσει των αποτελεσμάτων του συντελεστή PCC, δεν υπάρχει συσχέτιση μεταξύ των παραμέτρων που αξιολογήθηκαν.



Σχήμα 4.3(α) Επίπεδο ευαισθησίας παραμέτρων με βάση το CSS, (β) Συσχέτιση παραμέτρων, για το μοντέλο CFP





Σχήμα 4.4 Επίπεδο ευαισθησίας παραμέτρων με βάση το CSS, για το μοντέλο WEL

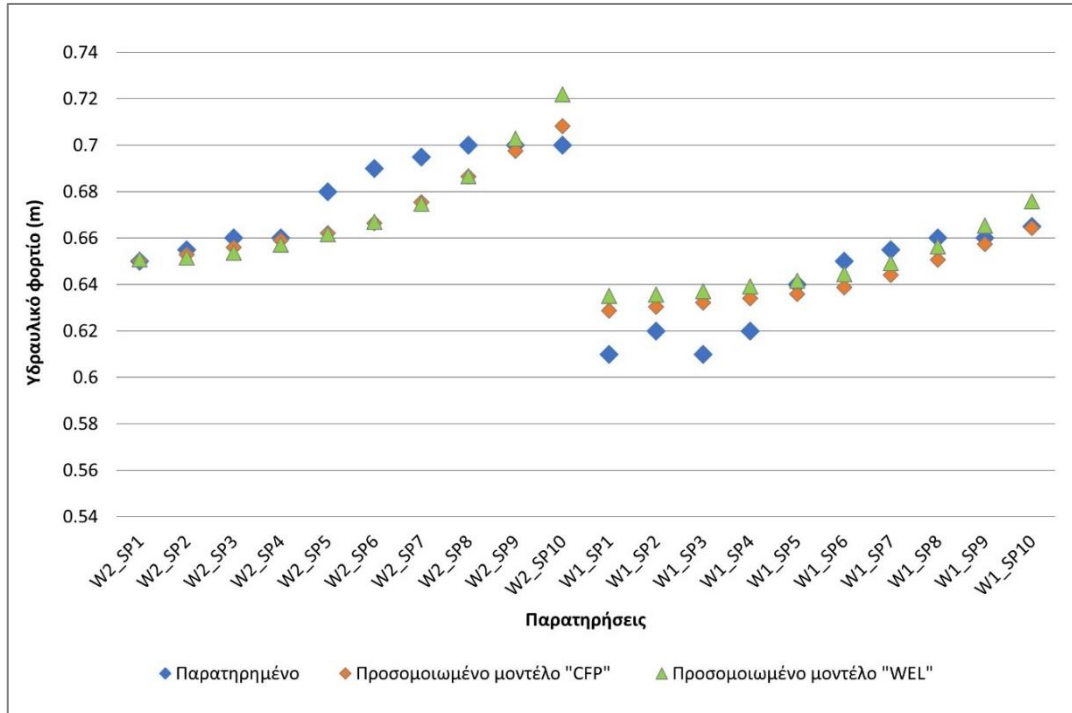
### 4.2.3 Εκτίμηση παραμέτρων και αποτελέσματα μοντέλου

Η εκτίμηση παραμέτρων πραγματοποιήθηκε για τα δύο μοντέλα βάσει των αποτελεσμάτων της ανάλυσης ευαισθησίας. Στο μοντέλο “CFP”, οι παράμετροι HK\_Par2, GHB\_Par1 και cond\_CFP χρησιμοποιήθηκαν στη διαδικασία και οι τελικές τιμές που εκτιμήθηκαν μέσω του UCODE2014 ήταν 0,00105 m/min, 1,87E-5 m<sup>2</sup>/min και 5,23E-6 m<sup>2</sup>/min αντίστοιχα. Το μοντέλο βαθμονομήθηκε με επιτυχία και έγινε σύγκριση των προσομοιωμένων- παρατηρημένων υδραυλικών φορτίων. Στο μοντέλο “WEL” εκτιμήθηκαν οι παράμετροι HK\_Par2, GHB\_Par και SS\_Par. Το καλύτερα προσαρμοσμένο σετ παραμέτρων στις παρατηρημένες τιμές ήταν 1,81E-04 m/min, 2,57E-6 m<sup>2</sup>/min και 0,001347 m<sup>-1</sup> αντίστοιχα. Τα διαγράμματα που παρουσιάζονται στις εικόνες 5 και 6 δείχνουν τις διαφορές μεταξύ των αποτελεσμάτων στις προσομοιωμένες τιμές σε σχέση με τις μετρήσεις του πεδίου στη διάρκεια των πειραμάτων. Στο Σχ. 5, φαίνεται η εξέλιξη των παρατηρούμενων και προσομοιωμένων υδραυλικών φορτίων για τα δύο φρεάτια παρατήρησης (W1, W2) για κάθε περίοδο φόρτισης κατά τη διάρκεια του MAR του υδροφορέα. Το διάγραμμα παρατηρημένων-προσομοιωμένων φορτίων (observed vs simulated)(Σχήμα 4.6) αποδεικνύει την προσαρμογή των αποτελεσμάτων στις παρατηρούμενες τιμές για τα μοντέλα CFP και WEL, καθώς οι διαφορές μεταξύ των δύο τιμών σε κάθε χρονικό βήμα δεν υπερβαίνουν τα 0,1 cm.

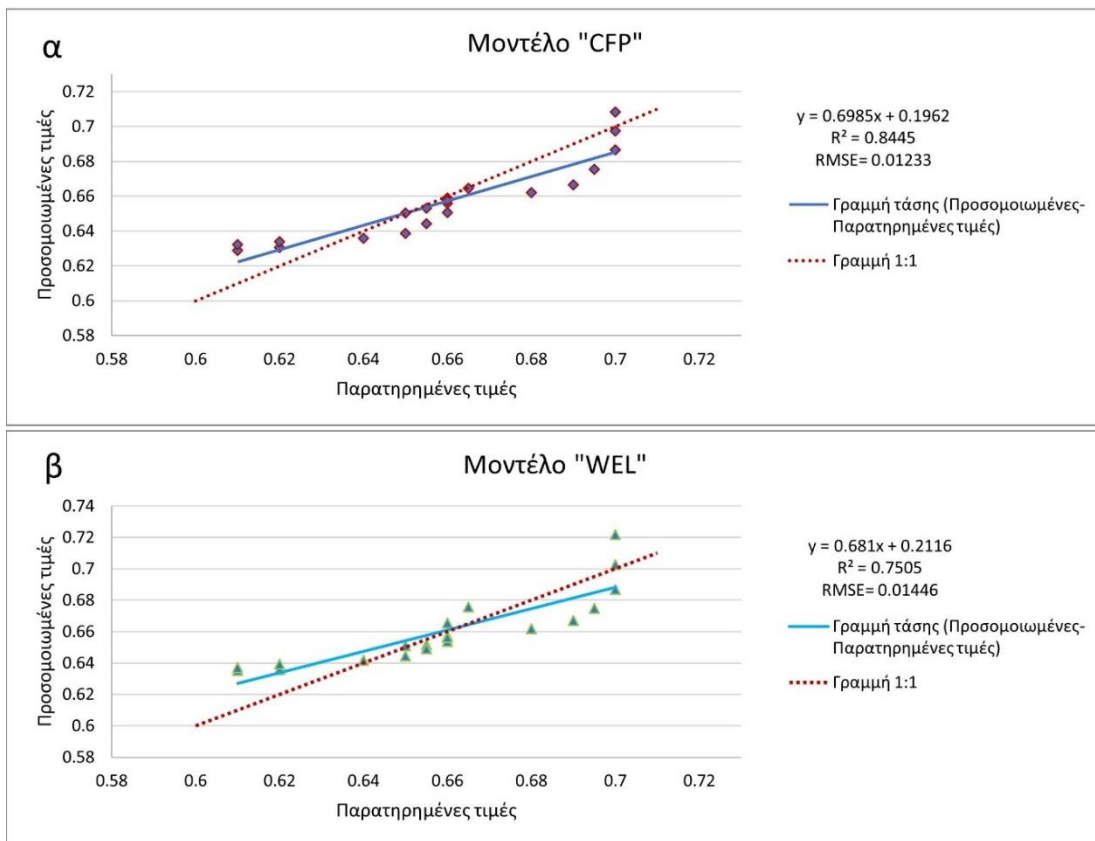
Βάσει του συντελεστή προσδιορισμού ( $R^2$ ), φαίνεται ότι το μοντέλο CFP παράγει καλύτερα αποτελέσματα από το μοντέλο WEL. Η διαφορά του συντελεστή έγκειται στην υπερεκτίμηση του υδραυλικού φορτίου από το μοντέλο WEL σε σχέση με τις παρατηρημένες τιμές και συγκεκριμένα στο τέλος της προσομοίωσης (παρατηρήσεις W1\_SP9, W1\_SP10, W2\_SP9, W2\_SP10) καθιστώντας το μοντέλο CFP καλύτερο για την πρόγνωση της απόκρισης του υδροφορέα στον τεχνητό εμπλουτισμό μέσω της οριζόντιας γεώτρησης.

Συγκρίνοντας τα δύο μοντέλα ως προς την επιχειρησιακή τους χρήση, το υπολογιστικό κόστος στη διαδικασία βαθμονόμησης δεν διαφέρει σημαντικά μεταξύ των δύο μοντέλων (18 λεπτά για το μοντέλο CFP έναντι 19 λεπτών για το μοντέλο WEL). Ο χρόνος της διαδικασίας επηρεάζεται από το μέγεθος του μοντέλου

(χωρική διακριτοποίηση), την κλίμακα (πιλοτική είτε μοντέλο πλήρους κλίμακας), τον αριθμό των παρατηρήσεων, τις αρχικές συνθήκες και τις αρχικές παραμέτρους. Για την περαιτέρω διερεύνηση του υπολογιστικού κόστους της βαθμονόμησης και της προσομοίωσης για τον κώδικα MODFLOW2005-CFP και τη χρήση του απλούστερου πακέτου WEL, προτείνεται η χρήση τους σε μοντέλα πλήρους κλίμακας.

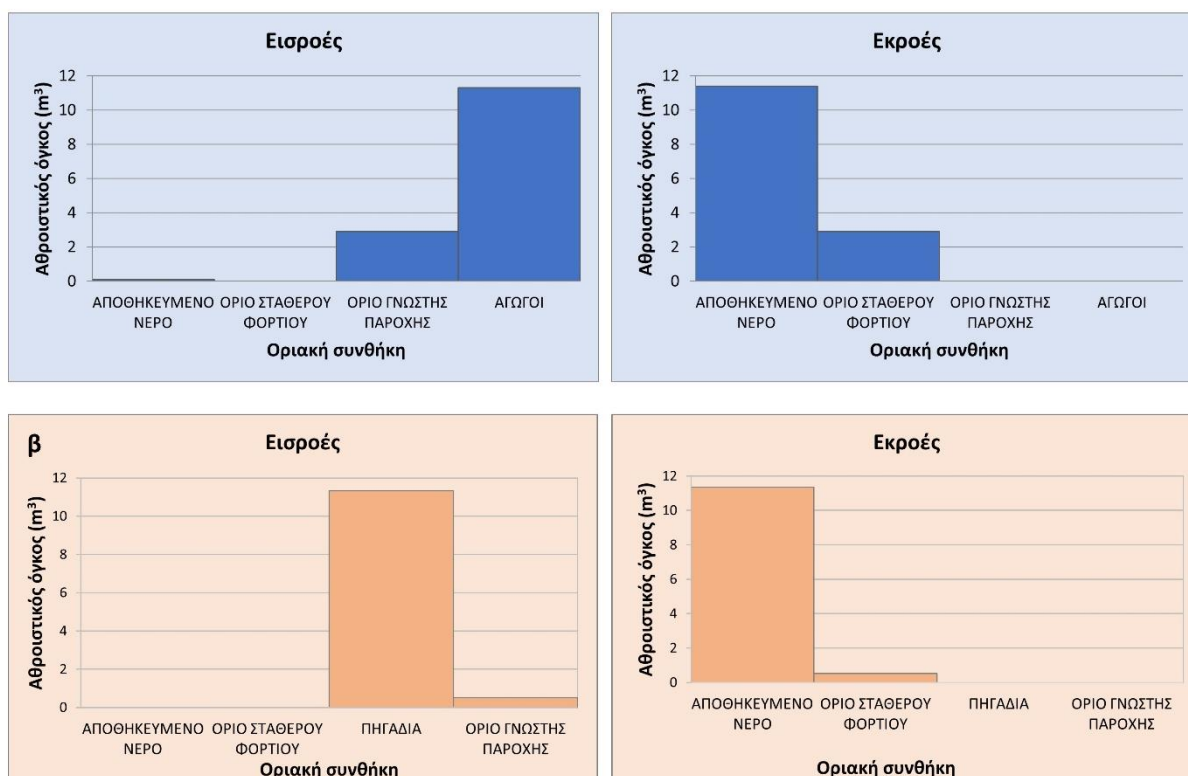


Σχήμα 4.5 Εξέλιξη Υδραυλικών φορτίων κατά τη διάρκεια Τ.Ε. για τις παρατηρημένες και προσομοιωμένες τιμές.



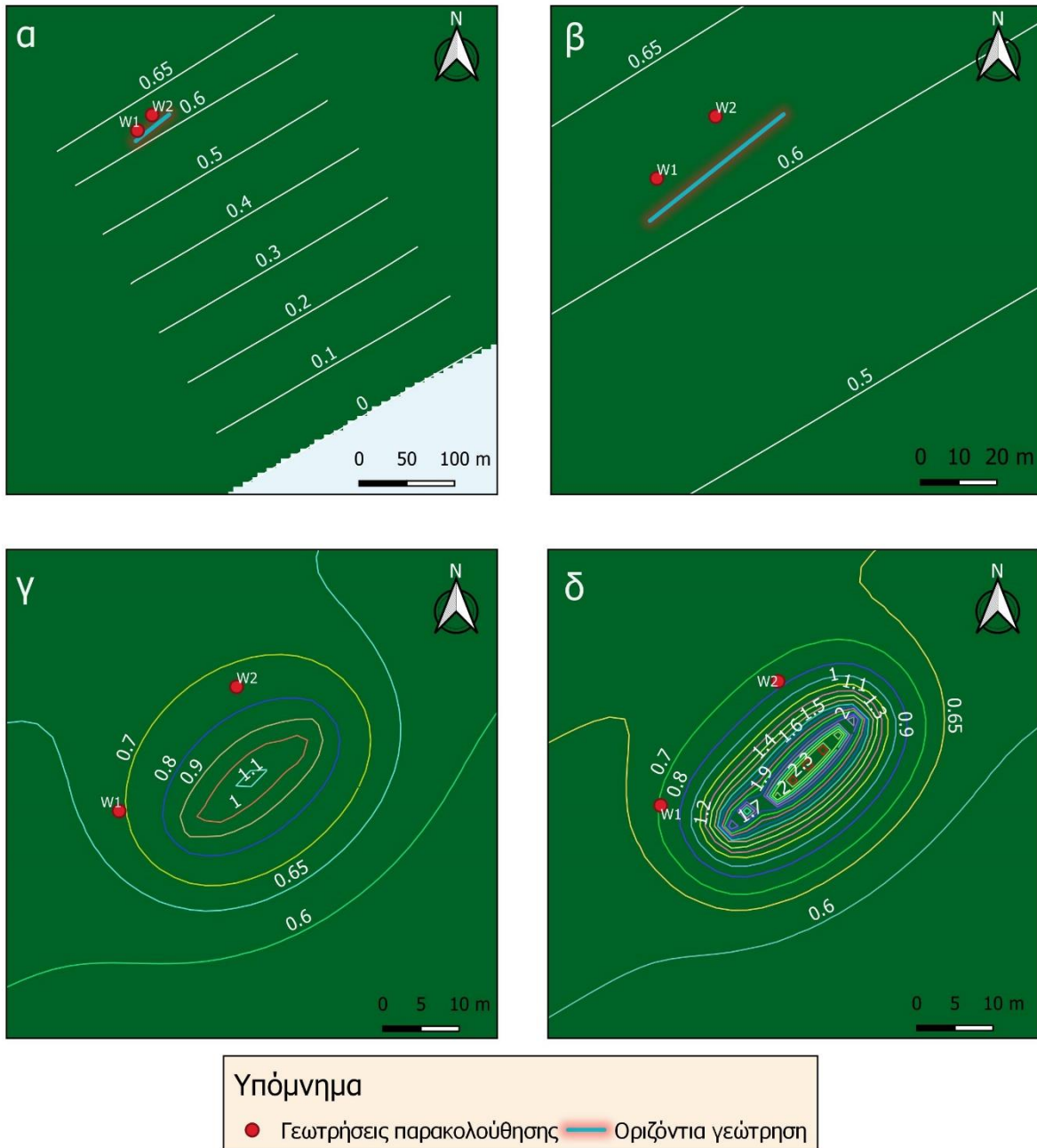
Σχήμα 4.6 Παρατηρημένες- Προσομοιωμένες τιμές υδραυλικού φορτίου για α) το μοντέλο “CFP”, β) το μοντέλο “WEL”

Στο επόμενο σχήμα (Σχήμα 4.7), παρουσιάζεται το αθροιστικό ισοζύγιο υπογείου νερού των δύο μοντέλων στο τέλος της προσομοίωσης (10<sup>η</sup> περίοδος φόρτισης). Μέσω του ισοζυγίου των μοντέλων είναι δυνατό να καθοριστούν οι ροές από και προς τον υδροφορέα και η αλληλεπίδραση μεταξύ του των διαφόρων οριακών συνθηκών του υδροσυστήματος. Για το παρόν μοντέλο, η κύρια εισροή του προέρχεται από το πακέτο CFP και WEL στο σχήμα 7α και 7β αντίστοιχα, δηλαδή από την οριζόντια γεώτρηση MAR. Οι εισροές από το όριο σταθερής παροχής (GHB) είναι επίσης αξιοσημείωτες για το μοντέλο “CFP”. Η αλλαγή στον όγκο του αποθηκευμένου νερού του υδροφορέα και των δύο μοντέλων (Σχήμα 4.7) συμβαίνει λόγω της απελευθέρωσης νερού μέσω από τον υδροφορέα όταν η στάθμη αυξάνεται ως αποτέλεσμα της έγχυσης νερού μέσω της οριζόντιας γεώτρησης. Σημαντική ποσότητα νερού εκρέει από τον υδροφορέα από το όριο σταθερού φορτίου (CHD) που αντιπροσωπεύει την διάχυση υπογείου νερού στη Μεσόγειο Θάλασσα, ως βασική εκροή του συστήματος.



Σχήμα 4.7 Ισοζύγιο όγκου υπογείου νερού για α) το μοντέλο "CFP", β) το μοντέλο "WEL"

Το Σχήμα 8 δείχνει τις πιεζομετρικές συνθήκες των δύο μοντέλων στην αρχή και στο τέλος της προσομοίωσης. Η πιεζομετρία πριν από την εισαγωγή του νερού MAR κατανέμεται ομοιόμορφα σε όλη την περιοχή και το πιεζομετρικό φορτίο μειώνεται σταδιακά από το ανώτερο όριο GHB προς την ακτή (Σχήμα 4.8(α)). Η πιεζομετρία στην περιοχή της οριζόντιας γεώτρησης κατά την πρώτη περίοδο φόρτισης παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.8(β) και είναι περίπου στα 0,6m AMSL (Πάνω από τη μέση στάθμη της θάλασσας). Στο τέλος της προσομοίωσης το υδραυλικό φορτίο αυξάνεται στην περιοχή της οριζόντιας γεώτρησης για τα δύο μοντέλα "CFP" (Σχήμα 4.8(γ)) και "WEL" (Σχήμα 4.8(δ)). Παρατηρώντας τους δύο τελευταίους χάρτες, γίνεται αντιληπτό ότι υπάρχει μεγάλη διαφορά μεταξύ των αποτελεσμάτων των δύο μοντέλων καθώς στο μοντέλο "CFP" η μέγιστη άνοδος στάθμης λόγω τεχνητής φόρτισης είναι στα 0,48 m ενώ στο μοντέλο "WEL" ο υδροφορέας αυξάνεται περισσότερο από 1,8 μέτρα σε σχέση με το αρχικό υδραυλικό φορτίο.



Σχήμα 4.8 Πιεζομετρική επιφάνεια του υδροφορέα (α) στην αρχή της προσομοίωσης σε όλο το μοντέλο (β) στην αρχή της προσομοίωσης στην περιοχή της οριζόντιας γεώτρησης, (γ) στο τέλος της προσομοίωσης για το μοντέλο “CFP” (δ) στο τέλος της προσομοίωσης για το μοντέλο “WEL”

#### 4.2.4 Ανάλυση της προσομοίωσης οριζοντίων γεωτρήσεων εμπλουτισμού

Αν και οι οριζόντια κατευθυνόμενες γεώτρησεις έχουν προσελκύσει το ενδιαφέρον στον τομέα των υπόγειων νερών λόγω της μείωσης του λειτουργικού κόστους και των τεχνικών πλεονεκτημάτων έναντι των κάθετων γεωτρήσεων (Wang and Zhan, 2017), υπάρχει περιορισμένη έρευνα στην απόδοσή τους ως γεωτρήσεις έγχυσης νερού σε έργα Τ.Ε. (π.χ. Zuurbier et al. 2015). Οι προηγούμενες έρευνες επικεντρώθηκαν κυρίως στη διερεύνηση οριζόντιων ή κεκλιμένων φρεατίων και στην απόδοσή τους ως φρεάτια άντλησης- συλλογής στους υδροφορείς (π.χ. Collins and Houben 2020). Έτσι, εντοπιστηκε ένα κενό

στη βιβλιογραφία για τη χρήση οριζόντιων φρεατίων σε συστήματα ASR καθώς και για την εφαρμογή οριζόντιων γεωτρήσεων εμπλουτισμού επαναφόρτισης σε εφαρμογές αριθμητικής προσομοίωσης.

Η χρήση του κώδικα MODFLOW-2005 CFP συντέλεσε στην κατανόηση σχετικά με τη ροή των υπόγειων νερών στον υδροφορέα, την απόδοση του οριζόντιου φρεατίου και την αλληλεπίδραση του υδροφορέα με την οριζόντια γεώτρηση. Η πειραματική διάταξη MAR που κατασκευάστηκε στον Μαραθώνα και η συλλογή δεδομένων υδραυλικού φορτίου κατά τη διάρκεια εμπλουτισμού του υδροφορέα βοήθησαν στην για την επικύρωση της εφαρμογής του κώδικα Modflow-2005 CFP για την επαναπλήρωση υπόγειων νερών με οριζόντια φρεάτια. Τόσο η πειραματική διάταξη όσο και η προσομοίωση αυτής με το πακέτο CFP αποτελούν ένα από τα καινοτόμα στοιχεία τα οποία θεραπεύει η παρούσα διδακτορική διατριβή για τον τομέα των υπόγειων νερών.

Μέσω της ανάλυσης ευαισθησίας που πραγματοποιήθηκε, ήταν δυνατό να αναδειχθούν οι παράμετροι που επηρεάζουν την προσομοίωση του συστήματος, οι οποίοι όπως αποδείχτηκε σχετίζονται με ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του υδροφορέα (π.χ. υδραυλική αγωγιμότητα) και τις εξωτερικές εισροές (π.χ. GHB), ενώ οι παράμετροι του αγωγού είχαν μικρότερη (δηλ. αγωγιμότητα αγωγού) ή και καθόλου (κατώτερο όριο Reynolds, ανώτερο όριο Reynolds) σημασία για τα αποτελέσματα του μοντέλου. Αυτό το αποτέλεσμα θα μπορούσε να είναι χρήσιμο σε άλλες μελέτες προσομοίωσης με οριζόντια φρεάτια εμπλουτισμού. Σε σύγκριση με άλλα πακέτα που έχουν χρησιμοποιηθεί από πολλούς ερευνητές στο παρελθόν (για παράδειγμα DRN, MNW2, WEL), αυτό το πρόγραμμα έχει σχετικά χαμηλές απαιτήσεις δεδομένων (εστιάζει στη γεωμετρία του αγωγού) χωρίς να αγνοεί την κίνηση των υπόγειων νερών εντός του αγωγού, την ανταλλαγή νερού μεταξύ του αγωγού και του υδροφορέα, τον συντελεστή τριβής και τις απώλειες υδραυλικού φορτίου κατά μήκος του σωλήνα. Σε αυτή την έρευνα, το πακέτο DRN απορρίφθηκε καθώς εξυπηρετεί τον αντίθετο σκοπό της μελέτης, δηλαδή την άντληση νερού από τον υδροφορέα αντί της έγχυσης νερού στο σύστημα. Σε σύγκριση με το MNW2, το πακέτο CFP απαιτεί να εκχωρηθούν λιγότερα δεδομένα από το χρήστη, ενώ οι συνθήκες τυρβώδους και στρωτής ροής υπολογίζονται χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις που περιγράφουν επαρκώς τη ροή στους σωλήνες δικτύου (π.χ. Eck και Mevissen 2015) σε σχέση με το υλικό του σωλήνα (ύψος τραχύτητας) προσφέροντας μια ρεαλιστική αναπαράσταση του οριζόντιου φρεατίου.

Η εφαρμογή του απλούστερου πακέτου WEL για την προσομοίωση της οριζόντιας γεώτρησης, χρησιμοποιήθηκε για τη διερεύνηση των βασικών διαφορών μεταξύ των δύο πακέτων. Η χρήση ενός μόνο κατακόρυφου φρεατίου (πακέτο WEL) θα προσομοίαζε μόνο την ποσότητα του νερού που εγχέεται σε ένα ορισμένο σημείο του υδροφορέα χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η εκτεταμένη περιοχή επίδρασης του οριζόντιου φρεατίου. Αυτό το πρόβλημα μπορεί να λυθεί με τη χρήση πολλαπλών μεμονωμένων πηγαδιών στην έκταση του σωλήνα (Perdikaki et al. 2019). Η χρήση πολλαπλών φρεατίων σε συγκεκριμένα βάθη κατά μήκος της κατασκευασμένης οριζόντιας γεώτρησης θεωρήθηκε κρίσιμη για την αποτύπωση της περιοχής επιρροής, αλλά και πάλι δεν είναι μια ρεαλιστική αναπαράσταση του ορίου, σε αντίθεση με το CFP. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας ήταν σύμφωνα με την ανάλυση ευαισθησίας του μοντέλου CFP

καθώς οι παράμετροι με τη μεγαλύτερη επιρροή ήταν η υδραυλική αγωγιμότητα του υδροφορέα και η αγωγιμότητα GHB. Και τα δύο μοντέλα είχαν υψηλό συντελεστή προσδιορισμού ( $R^2$ ) και χαμηλό Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα (Root Mean Square Error-RMSE) όπως παρουσιάζεται στην Εικ. 6, δείχνοντας ικανοποιητική συμφωνία μεταξύ των παρατηρούμενων και προσομοιωμένων τιμών υδραυλικού φορτίου στον υδροφορέα. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του μοντέλου CFP, το υδραυλικό φορτίο στο τέλος της προσομοίωσης κατανέμεται ομοιόμορφα κατά μήκος της οριζόντιας γεώτρησης και η ζώνη απελευθέρωσης απεικονίζεται καλά (Εικόνα 8γ). Αντίθετα, τα αποτελέσματα του πακέτου WEL (εικ. 8δ) σε σύγκριση με το CFP, παρουσίασαν μεγαλύτερη απόκλιση. Η διαφορά στην πιεζομετρία μεταξύ του CFP και του WEL φτάνει τα 1,3 m. Οι μεγαλύτερες διαφορές παρατηρούνται στις θέσεις των φρεατίων. Η αντιμετώπιση της οριζόντιας γεώτρησης ως όριο WEL οδηγεί σε τοπικά μέγιστα για το υδραυλικό φορτίο στην διάρκεια του T.E. ως αποτέλεσμα της σημειακής τροφοδοσίας νερού από πολλά φρεάτια αντί της διάχυτης τροφοδοσίας κατά μήκος του αγωγού. Αυτό δεν συμβαίνει κάτω από συνθήκες φυσικής ροής. Συνολικά, θεωρούμε ότι οι φυσικές υδρολογικές διεργασίες κατά το MAR με οριζόντια φρεάτια αντιπροσωπεύονται καλύτερα από Το πακέτο CFP, γεγονός που υποδηλώνεται από το σχήμα και την ανύψωση των πιεζομετρικών καμπυλών.

Η ροή μεταβαλλόμενης πυκνότητας δεν προσομοιώθηκε σε αυτή τη μελέτη, καθώς το MODFLOW CFP δεν υποστηρίζεται από το μοντέλο μεταβαλλόμενης πυκνότητας SEAWAT (Langvin et al. 2008) κάτι που θα βελτιώνει σημαντικά την εφαρμογή του πακέτου σε ένα ευρύτερο φάσμα υδρογεωλογικών προβλημάτων. Αν και ένα μοντέλο διαδικασίας ροής μεταβαλλόμενης πυκνότητας και ροής διαλυμένης ουσίας-αγωγού έχει αναπτυχθεί από τους Xu et al. (2019), δεν υπάρχει ακόμα ελεύθερο λογισμικό. Η ενσωμάτωση της ροής μεταβαλλόμενης πυκνότητας στον κώδικα MODFLOW CFP θα ωφελούσε τη διερεύνηση νέων τεχνικών, συμπεριλαμβανομένης της τεχνολογίας οριζόντιων φρεατίων ως τρόπος αντιμετώπισης της διείσδυση θαλασσινού νερού σε παράκτιους υδροφορείς. Για παράδειγμα, η απόδοση των οριζόντιων φρεατίων ως υδραυλικοί φραγμοί στην διείσδυση θαλασσινού νερού θα μπορούσε να διερευνηθεί σε μελέτες μοντελοποίησης ως εξέλιξη στις υπάρχουσες μελέτες υδραυλικών φραγμών (π.χ. Ebeling et al. 2019, Pool & Carrera 2010, Botero-Acosta & Donado 2015). Η κατασκευή της οριζόντιας γεώτρησης κατά μήκος της ακτογραμμής μπορεί να δημιουργήσει έναν εκτεταμένο υδραυλικό φραγμό προς τη θάλασσα μειώνοντας παράλληλα το κόστος ανόρυξης πολλαπλών κάθετων φρεατίων.

Η παρούσα έρευνα έχει κάποιους περιορισμούς, κυρίως όσον αφορά τα περιορισμένα πειραματικά δεδομένα. Ο κύριος στόχος της εργασίας ήταν να διερευνήσει την ικανότητα του Modflow2005-CFP για την αναπαράσταση των υδρολογικών διεργασιών μεταξύ μίας οριζόντιας γεώτρησης και του υδροφορέα και η σύγκριση του με ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο πακέτο για την εισαγωγή νερού στο υπόγειο σύστημα (πακέτο WEL). Ως αποτέλεσμα, η παρούσα έρευνα χρησιμεύει ως ένα μεθοδολογικό πλαίσιο για την προσομοίωση των οριζόντιων γεωτρήσεων ως γεωτρήσεις MAR για την αποκατάσταση υδροφορέων.

Στο μοντέλο που παρουσιάστηκε, επιλέχθηκε η χρήση πλέγματος υψηλής ευκρίνειας (δηλαδή 2x2 m) έτσι ώστε να αποφευχθούν τα φαινόμενα εξομάλυνσης τα οποία ενδέχεται να επηρέαζαν τα αποτελέσματα σε περίπτωση χρήσης πιο αδρομερούς πλέγματος. Αυτή η προσέγγιση μπορεί να θεωρηθεί λογική για τη

συγκεκριμένη μελέτη περίπτωσης, καθώς το μοντέλο πιλοτικής κλίμακας έχει χαμηλές υπολογιστικές απαιτήσεις. Η χωρική διακριτοποίηση του μοντέλου διαμορφώθηκε βάσει των διαθέσιμων παρατηρήσεων. Οι παρατηρήσεις αφορούν σε δύο γεωτρήσεις παρακολούθησης που ορύχθηκαν ανάντη της οριζόντιας γεώτρησης εμπλουτισμού σε αποστάσεις 8m και 10m. Η έντονη ανύψωση του υδραυλικού φορτίου στο μοντέλο WEL οφείλεται στο γεγονός μη ύπαρξης παρατηρήσεων στην περιοχή κατά μήκος της οριζόντιας γεώτρησης, κάτι που θα οδηγούσε σε καλύτερη εκτίμηση των παραμέτρων και ιδιαίτερα της ειδικής αποθηκευτικότητας (SS). Η χωροθέτηση των πηγαδιών για το μοντέλο WEL επιλέχθηκε βάσει των σημείων στα οποία ήταν γνωστό το βάθος της οριζόντιας γεώτρησης αλλά και βάσει της χωρικής διακριτοποίησης. Μειώνοντας ή αυξάνοντας την απόσταση μεταξύ των πηγαδιών σημαίνει διαφορετική διακριτοποίηση, διαφορετικό αριθμό πηγαδιών και διαφορετικό ρυθμό εισαγωγής νερού ανά πηγάδι που οδηγεί σε νέα θεώρηση του μοντέλου WEL.

Η χωρική διακριτοποίηση θεωρείται επαρκής για την συγκεκριμένη πειραματική διάταξη. Σε έλεγχο που πραγματοποιήθηκε με πιο λεπτομερή διακριτοποίηση στην περιοχή της οριζόντιας γεώτρησης (0.5x0.5m), ο υπολογιστικός χρόνος τετραπλασιάστηκε ενώ χωρίς περαιτέρω βαθμονόμηση του μοντέλου, η ανύψωση της στάθμης υποεκτιμήθηκε.

Για να προσομοιωθεί η απόκριση του υδροφορέα σε μία εγκατάσταση MAR σε ένα μοντέλο πλήρους κλίμακας (σε επίπεδο υδροφορέα), θα πρέπει να γίνει χρήση κατάλληλων εργαλείων για περαιτέρω διακριτοποίηση του πλέγματος (π.χ. ομοιόμορφο λεπτό πλέγμα- uniform fine grid, Telescopic Mesh Refinement “TMR”, MODFLOW-LGR).



## 5 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΩΝ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ ΤΟΥ ΠΑΡΑΚΤΙΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΕΡΕΥΝΑΣ

### 5.1 Μαθηματικοί Κώδικες

#### 5.1.1 Προσομοίωση ροής υπόγειου νερού: MODFLOW-2005

Ο κώδικας Modflow- MODular finite-difference ground-water FLOW model- (McDonald and Harbaugh 1988, Harbaugh et al. 2000) της USGS (United States Geological Survey) είναι ο πλέον χρησιμοποιούμενος κώδικας ο οποίος αναπτύχθηκε αρχικά για την προσομοίωση της υπόγειας ροής σε πορώδη μέσα ενώ στη συνέχεια ενσωματώθηκαν στην “οικογένεια Modflow” ή συγχρονίστηκαν με τον κώδικα και άλλα εργαλεία προσομοίωσης επιφανειακών/υπόγειων συστημάτων, ροής στην ακόρεστη ζώνη, μεταφοράς ρύπου (MT3DMS, ο Zheng&Wang 1999), ροής μεταβαλλόμενης πυκνότητας (SEAWAT, Langevin 2003), εκτίμησης παραμέτρων (UCODE\_2014) και διαχείρισης υπόγειων νερών. Η αυξημένη δημοτικότητα του λογισμικού οφείλεται στην ελεύθερη διάθεση, στους καλά τεκμηριωμένους οδηγούς και παραδείγματα για το χρήστη, στη συνεχή ανάπτυξη νέων πακέτων και εφαρμογών για την προσομοίωση διεργασιών και στον ανοιχτό κώδικα που επιδέχεται μορφοποιήσεις. Πρόκειται για ένα μαθηματικό μοντέλο που λύνει αριθμητικά την εξίσωση ροής των υπογείων νερών στις τρεις διαστάσεις ενός πορώδους μέσου, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών.

Η γενική επικρατούσα μερική διαφορική εξίσωση που περιγράφει την υπόγεια ροή τις τρεις διαστάσεις πορώδους, ανισότροπου, ετερογενούς μέσου και σε κατάσταση μη μόνιμης ροής είναι (Anderson και Woessner 1994):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} - W \quad (5.1)$$

Όπου:

$K_{xx}$ ,  $K_{yy}$  και  $K_{zz}$  είναι οι υδραυλικές αγωγιμότητες κατά μήκος του άξονα  $x$ ,  $y$ , και  $z$  αντίστοιχα (L/T),  $h$  το πιεζομετρικό φορτίο (L),  $W$  είναι η ογκομετρική παροχή ανά μονάδα όγκου και αντιπροσωπεύει της πηγές εισροής και εκροής νερού (όρος sink & source) στο υδροφόρο σύστημα ( $T^{-1}$ ),  $S_s$  είναι η ειδική αποθηκευτικότητα του πορώδους μέσου ( $L^{-1}$ ) και  $t$  ο χρόνος (T). Η εξίσωση 5.1 σε συνδυασμό με τις οριακές συνθήκες ροής και φορτίων και τις αρχικές συνθήκες υδραυλικού φορτίου, αποτελούν την μαθηματική αναπαράσταση της υπόγειας ροής.

Εκτός των πολύ απλών συστημάτων, η αναλυτική λύση της εξίσωσης 5.1 είναι σπάνια δυνατή, επομένως χρησιμοποιούνται διάφορες αριθμητικές μέθοδοι για να επιτευχθούν λύσεις κατά προσέγγιση (Harbaugh 2005). Η ανάπτυξη της εξίσωσης ροής υπόγειων νερών σε μορφή πεπερασμένων διαφορών προκύπτει από την εφαρμογή της εξίσωσης συνέχειας και της εξίσωσης Darcy και επιλύεται στο ορθογωνικό δίκτυο

(κάναβο). Η εξίσωση λύνεται στο σύστημα των πεπερασμένων διαφορών χρησιμοποιώντας επαναληπτικές μεθόδους για κάθε χρονικό βήμα. Σε αυτές τις μεθόδους, το υδραυλικό φορτίο υπολογίζεται στο κέντρο κάθε κόμβου σε κάθε επαναληπτικό βήμα έως ότου επιτευχθεί αποδεκτή λύση που ικανοποιεί το σύνολο των εξισώσεων και αποφασίζεται μέσω των κριτηρίων σύγκλισης (convergence criteria). Το κριτήριο σύγκλισης της εξίσωσης αφορά σε μία συγκεκριμένη ποσότητα από την οποία πρέπει να είναι μικρότερη η αλλαγή του υδραυλικού φορτίου από την μία επανάληψη στην επόμενη.

Έχουν κυκλοφορήσει έξι σημαντικές εκδόσεις της βασικής έκδοσης MODFLOW: MODFLOW-84, MODFLOW-88, MODFLOW-96, MODFLOW-2000, MODFLOW-2005 και MODFLOW 6. Στην παρούσα διατριβή χρησιμοποιήθηκε η έκδοση MODFLOW-2005 καθώς υποστηρίζει τα περισσότερα πακέτα προσομοίωσης οριακών συνθηκών ενώ συνδέεται και με μοντέλα μεταφοράς ρύπου και μεταβαλλόμενης πυκνότητας. Η πιο πρόσφατη έκδοση του κώδικα (MODFLOW 6) δομείται τελείως διαφορετικά από τις προηγούμενες εκδόσεις. Είναι ένα αντικειμενοστραφές πρόγραμμα που αναπτύχθηκε για να παρέχει μια πλατφόρμα για την υποστήριξη πολλαπλών μοντέλων και πολλαπλών τύπων μοντέλων στην ίδια προσομοίωση ενώ μέχρι στιγμής υποστηρίζει την προσομοίωση της ροής και της διαλυμένης μάζας.

### 5.1.2 Προσομοίωση μεταφοράς μάζας: MT3DMS

Ο κώδικας MT3DMS -Modular Three-Dimensional Multispecies Transport Model- (Zheng & Wang 1999) είναι μοντέλο μεταφοράς για την προσομοίωση της διάχυσης, διασποράς και των χημικών αντιδράσεων ρύπων διαφορετικών ειδών μέσα σε συστήματα υπόγειων νερών. Ο κώδικας ενσωματώνει τρεις κύριες κατηγορίες λύσεων: την τυπική μέθοδο πεπερασμένων διαφορών, τη μέθοδο Euler-Lagrangian και τη μέθοδο πεπερασμένου όγκου (TVD). Το MT3DMS μπορεί να συνδεθεί με οποιοδήποτε άλλο μοντέλο ροής πεπερασμένων διαφορών που επιλύεται στο κέντρο του κελιού (block-centered flow) και κατά αυτόν τον τρόπο χρησιμοποιείται συχνά με τον κώδικα MODFLOW (π.χ. Gao et al. 2021, Liolios et al. 2012, Antelmi et al. 2020). Το υδραυλικό φορτίο και η ροή (flux) από κελί σε κελί υπολογίζονται από το MODFLOW κατά την προσομοίωση ροής και εγγράφονται σε ένα ειδικά διαμορφωμένο αρχείο. Αυτό το αρχείο διαβάζεται στη συνέχεια από το MT3DMS και χρησιμοποιείται το πεδίο ροής για την προσομοίωση της μεταφοράς του ρύπου.

Η μερική διαφορική εξίσωση που περιγράφει τη μεταφορά ενός ρύπου είδους  $k$  στις τρεις διαστάσεις, σε συστήματα ροής υπόγειων νερών μπορεί να γραφτεί ως εξής (Zheng & Wang 1999):

$$\frac{\partial(\theta C^k)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \theta D_{ij} \frac{\partial C^k}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_i} (\theta v_i C^k) + q_s C_s^k + \sum R_n \quad (5.1)$$

Όπου:

$\theta$  το πορώδες του μέσου (αδιάστατο),  $C^k$  η συγκέντρωση του ρύπου  $k$  [ $ML^{-1}$ ],  $t$  ο χρόνος [T],  $x_{i,j}$  η απόσταση κατά μήκος του αντίστοιχου καρτεσιανού άξονα συντεταγμένων [L],  $D_{ij}$  ο συντελεστής υδροδυναμικής

διασποράς  $[L^2T^{-1}]$ ,  $v_i$  η γραμμική ταχύτητα του νερού στους πόρους  $[L^2T^{-1}]$ ,  $q_s$  η ροή ανά μονάδα όγκου υδροφορέα που αντιπροσωπεύει τις εισροές και εκροές ρύπου στο σύστημα  $[T^{-1}]$ ,  $C_S^k$  η συγκέντρωση του ρύπου τύπου  $k$  που εισέρει ή εκρέει από το σύστημα και  $\Sigma R_n$  ο όρος της χημικής αντίδρασης  $[ML^{-3}T^{-1}]$ .

Ο όρος της υδραυλικής μεταφοράς (advection)  $\partial(\theta v_i C^k)/\partial x_i$  περιγράφει τη μεταφορά των ρύπων κατά την κίνηση του υπόγειου νερού. Η μηχανική διασπορά του ρύπου στο πορώδες μέσο ως αποτέλεσμα της διαφοροποίησης της ταχύτητας του ρύπου από την ταχύτητα του νερού σε μικροκλίμακα, ενσωματώνεται στην εξίσωση μέσω του ταυυστή υδροδυναμικής διασποράς  $D_{ij}$ . Η μοριακή διάχυση είναι γενικά αμελητέα, σε σύγκριση με τα αποτελέσματα της μηχανικής διασποράς, και η επιρροή της στην κίνηση του ρύπου είναι σημαντική όταν η ταχύτητα του υπόγειου νερού είναι πολύ χαμηλή.

### 5.1.3 Προσομοίωση υπόγειας ροής μεταβαλλόμενης πυκνότητας: SEAWAT

Η προσομοίωση ροής μεταβαλλόμενης πυκνότητας για προβλήματα θαλάσσιας διείσδυσης σε μοντέλα δομημένα για τον κώδικα MODFLOW πραγματοποιείται συνήθως με τους κώδικες SWI και SEAWAT. Ο κώδικας Sea Water Intrusion -SWI- (Bakker & Schaars 2005, Bakker et al. 2013) δημιουργήθηκε ως πακέτο του MODFLOW και βασίζεται στην υπόθεση Dupuit για την προσομοίωση της θαλάσσιας διείσδυσης ως μία διεπιφάνεια μεταξύ γλυκού και αλμυρού νερού. Η προσέγγιση αυτή είναι χαμηλού υπολογιστικού κόστους ακόμη και για τοπικής κλίμακας μοντέλα αλλά η μέθοδος εμπεριέχει περιορισμούς και παραδοχές στην μοντελοποίηση της θαλάσσιας διείσδυσης (Dausman et al. 2010). Ο κώδικας SEAWAT (Guo & Bennett 1998, Langevin et al. 2003) ενσωματώνει τον κώδικα MODFLOW και MT3DMS προσομοιώνοντας την κίνηση του υπογείου νερού και την μεταφορά του ρύπου με τροποποιήσεις για την αντιμετώπιση του προβλήματος της μεταβαλλόμενης πυκνότητας στους υδροφορείς. Η γενική επικρατούσα διαφορική εξίσωση της ροής υπογείων νερών μεταβαλλόμενης πυκνότητας, όπως διατυπώνεται από τους Guo και Langevin (2002):

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \alpha} \left[ \rho K_{f\alpha} \left( \frac{\partial h_f}{\partial \alpha} + \frac{\rho - \rho_f}{\rho_f} \frac{\partial Z}{\partial \alpha} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial \beta} \left[ \rho K_{f\beta} \left( \frac{\partial h_f}{\partial \beta} + \frac{\rho - \rho_f}{\rho_f} \frac{\partial Z}{\partial \beta} \right) \right] \\ + \frac{\partial}{\partial \gamma} \left[ \rho K_{f\gamma} \left( \frac{\partial h_f}{\partial \gamma} + \frac{\rho - \rho_f}{\rho_f} \frac{\partial Z}{\partial \gamma} \right) \right] = \rho S_f \frac{\partial h_f}{\partial t} + \theta \frac{\partial \rho}{\partial C} \frac{\partial C}{\partial t} - \rho_s q_s \end{aligned} \quad (5.2)$$

Όπου  $\alpha, \beta, \gamma$  οι τρεις άξονες των συντεταγμένων, ευθυγραμμισμένοι με τις κύριες κατευθύνσεις της διαπερατότητας,  $K_f$  η υδραυλική αγωγιμότητα ισοδύναμου γλυκού νερού ( $LT^{-1}$ ),  $S_f$  η ειδική αποθηκευτικότητα ισοδύναμου γλυκού νερού ( $L^{-1}$ ),  $t$  ο χρόνος (T),  $\theta$  το ενεργό πορώδες του σχηματισμού,  $C$  η συγκέντρωση του ρύπου ( $ML^{-3}$ ),  $\rho_s$  η πυκνότητα του εισερχόμενου ή εξερχόμενου ρύπου (sinks and sources)  $[ML^{-3}]$ ,  $q_s$  η ροή ανά μονάδα όγκου υδροφορέα που αντιπροσωπεύει τις εισροές και εκροές στο σύστημα  $[T^{-1}]$ .

Σημαντικό είναι να σημειωθεί ότι οι τιμές υδραυλικού φορτίου που υπολογίζονται από το πρόγραμμα SEAWAT κατά την προσομοίωση μεταβαλλόμενης πυκνότητας είναι τιμές που αντιστοιχούν στο ισοδύναμο ύψος γλυκού νερού. Κατά τη χρήση του μοντέλου είναι απαραίτητη η μετατροπή μεταξύ του υδραυλικού

φορτίου του υδροφορέα και του αντίστοιχου ισοδύναμου υδραυλικού φορτίου γλυκού νερού για την σωστή ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

Ο κώδικας SEAWAT χρησιμοποιεί ως μέθοδο επίλυσης της διαφορικής εξίσωσης 5.2 τις πεπερασμένες διαφορές σε ορθογωνικό κάναβο, όπως οι κώδικες MODFLOW και MT3DMS. Στην παρούσα διατριβή χρησιμοποιήθηκε η 4<sup>η</sup> και πιο πρόσφατη έκδοση του κώδικα (SEAWAT Version 4, Langevin et al. 2007). Η συγκεκριμένη έκδοση προσομοιώνει τη ροή μέσω του κώδικα MODFLOW-2000. Μοντέλα δομημένα στην έκδοση MODFLOW-2005 μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για την προσομοίωση της ροής μεταβαλλόμενης πυκνότητας με το SEAWAT Version 4, εφόσον τροποποιηθούν σε μικρό βαθμό, συγκεκριμένα αρχεία εισόδου.

#### 5.1.4 Ανάλυση ευαισθησίας και βαθμονόμηση του μοντέλου ροής: UCODE\_2014

Το UCODE (Poeter & Hill 1998) είναι ένας κώδικας αντίστροφης προσομοίωσης για την ανάλυση ευαισθησίας και την βαθμονόμηση μαθηματικών μοντέλων και χρησιμοποιείται συχνά κατά την μοντελοποίηση συστημάτων υπογείων νερών (π.χ. Shoemaker 2004, Müller & Sanford 2019, Sedghi & Zhan 2019, Grinevskiy et al. 2020). Η τελευταία έκδοση του λογισμικού είναι η UCODE\_2014 των Poeter et al. (2014). Στο UCODE η ανάλυση ευαισθησίας πραγματοποιείται για κάθε παράμετρο μέσω μιας επαναληπτικής διαδικασίας. Ο κώδικας χρησιμοποιεί έναν αριθμό στατιστικών δεικτών για να ποσοτικοποιήσει την ευαισθησία κάθε παραμέτρου ενός μοντέλου συγκρίνοντας τις αλλαγές στο υδραυλικό φορτίο και τις ογκομετρικές ροές που προσομοιώνονται με διαφορετικές παραμέτρους. Αυτά τα στατιστικά στοιχεία είναι χρήσιμα εργαλεία για τον προσδιορισμό της σημασίας των παρατηρήσεων για κάθε παράμετρο, της σημασίας μιας παραμέτρου για το αποτέλεσμα και της σημασίας κάθε παρατήρησης για το αποτέλεσμα του μοντέλου (Hill & Tiedeman 2007). Σε κάθε βήμα της επαναληπτικής διαδικασίας, το υδραυλικό φορτίο και οι ογκομετρικές ροές συγκρίνονται με τις σχετικές παρατηρούμενες τιμές που χρησιμοποιούνται στο μοντέλο. Τα αποτελέσματα κάθε επανάληψης χρησιμοποιούνται για να γίνει η επιλογή των παραμέτρων που είναι πιο σημαντικές και πρόκειται να χρησιμοποιηθούν στη διαδικασία εκτίμησης παραμέτρων.

Οι σημαντικότερες στατιστικές παράμετροι κατά την ανάλυση ευαισθησίας είναι:

- *dss- dimensionless scaled sensitivities*: Το *dss* μετρά πόσο η αλλαγή σε μια παράμετρο επηρεάζει το μοντέλο συγκρίνοντας την αρχική τιμή της παραμέτρου με μια «διαταραγμένη» (perturbed) σε μια συγκεκριμένη επανάληψη. Χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό των παρατηρήσεων και τοποθεσιών που είναι πιθανό να είναι πιο αποτελεσματικές για την εκτίμηση μιας δεδομένης τιμής παραμέτρου. Το *dss* υπολογίζεται από τον τύπο:

$$dss = \left( \frac{\partial y'_i}{\partial b_j} \right) |_{b_i} | b_i | \omega_{ii}^{\frac{1}{2}} \quad (5.3)$$

Όπου  $y'_i$  η προσομοιωμένη τιμή,  $b_j$  η παράμετρος με τον αριθμό  $j$ ,  $\partial y'_i / \partial b_j$  η παράγωγος που μετράει την «ευαισθησία» της παρατήρησης  $i$  στην παράμετρο  $y$ ,  $b$  είναι το διάνυσμα που έχει την τιμή των παραμέτρων και  $\omega_{ii}$  είναι το βάρος που δίδεται στην παρατήρηση  $i$  (Hill and Tiedman, 2007).

Το βάρος της εκάστοτε παρατήρησης υπολογίζεται από τον τύπο:

$$\omega_{ii} = \frac{1}{\sigma^2} \quad (5.4)$$

Όπου  $\omega_{ii}$  το βάρος και  $\sigma$  η τυπική απόκλιση της μέτρησης

- *css-composite scaled sensitivities*: Το *css* χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της σημασίας διαφόρων παραμέτρων για την αναπαραγωγή των παρατηρούμενων τιμών και ως μέτρο της πληροφορίας που παρέχεται από το σύνολο των παρατηρήσεων για την εκτίμηση μιας τιμής παραμέτρου. Ουσιαστικά, το *css* παρέχει σύγκριση μεταξύ παραμέτρων, προκειμένου να προσδιοριστούν αυτές για τις οποίες οι παρατηρήσεις παρέχουν περισσότερες πληροφορίες. Προσδιορίζεται ως συνάρτηση του *dss* έτσι ώστε για μία παράμετρο  $j$  και αριθμό παρατηρήσεων  $ND$ , το *css<sub>j</sub>* ισούται με:

$$css = \sum_{i=1}^{ND} \left[ \frac{(dss_{ij})^2}{ND} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5.5)$$

- *rcc- parameter correlation coefficient*: Το *rcc* υποδεικνύει τις παραμέτρους που συσχετίζονται σε μεγάλο βαθμό. Σε περίπτωση μεγάλης συσχέτισης ( $|rcc| > 0.95$ ), αυτές οι παράμετροι ενδέχεται να μην μπορούν να εκτιμηθούν ανεξάρτητα (Hill and Tiedman, 2007).. Το *rcc* υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την ακόλουθη εξίσωση:

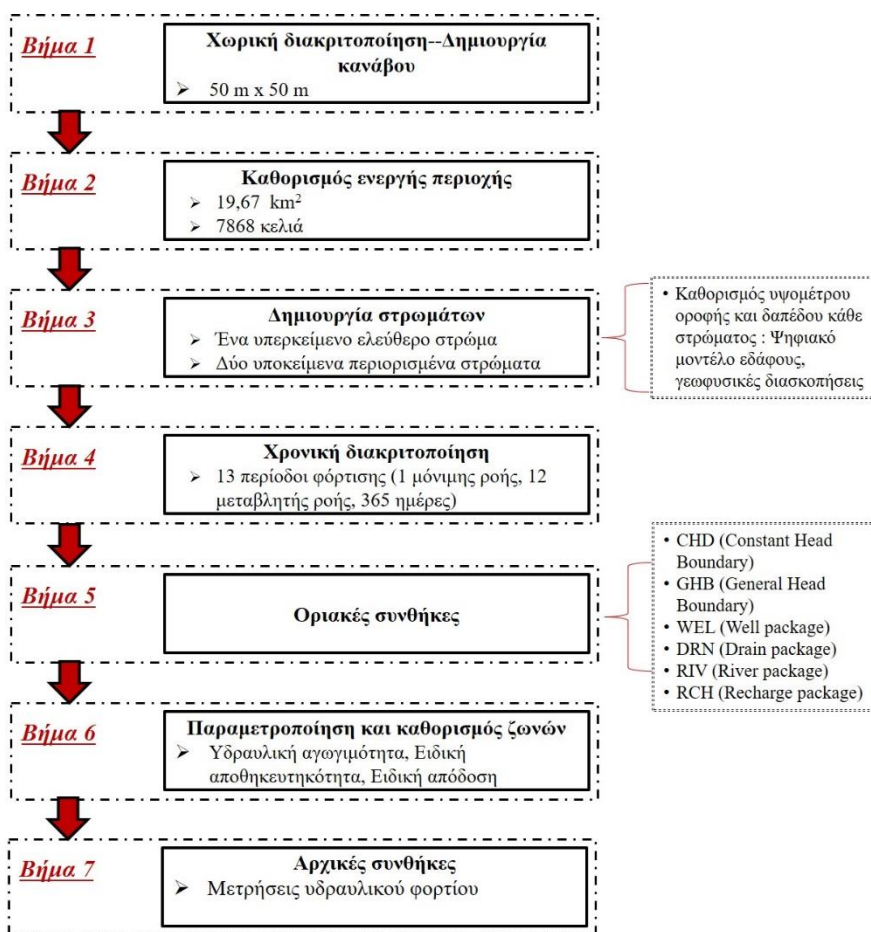
$$rcc = \frac{Cov\{b\}_{jk}}{[Var\{b\}_{jj} Var\{b\}_{kk}]} \quad (5.6)$$

Όπου  $Cov\{b\}_{jk}$  είναι η συνδιακύμανση μεταξύ των παραμέτρων  $j$  και  $k$  και  $Var\{b\}_{jj}, Var\{b\}_{kk}$  είναι οι διακυμάνσεις κάθε παραμέτρου.

Κατά την βαθμονόμηση ενός μοντέλου, δηλαδή την εκτίμηση των παραμέτρων του μοντέλου μέσω του UCODE, διενεργείται επίσης μια επαναληπτική διαδικασία. Αυτή η διαδικασία περιλαμβάνει μία αντικειμενική συνάρτηση που ορίζεται ως το άθροισμα των τετραγωνισμένων και σταθμισμένων διαφορών της παρατήρησης από την αντίστοιχη προσομοιωμένη τιμή. Ο κύριος σκοπός της διαδικασίας βαθμονόμησης, είναι να βρεθεί ένα σύνολο παραμέτρων που παράγει τη μικρότερη τιμή για την αντικειμενική συνάρτηση (Poeter et al. 2005).

## 5.2 Ανάπτυξη και κατασκευή μαθηματικού μοντέλου υπόγειας ροής

Το εννοιολογικό μοντέλο του προσχωματικού σχηματισμού διαμορφώθηκε ύστερα από εκτενή έρευνα, με δεδομένα που συλλέχθηκαν από την υπάρχουσα βιβλιογραφία, από παρατηρήσεις κατά την έρευνα πεδίου και από στοιχεία που συλλέχθηκαν από υπόγειο και επιφανειακό νερό στην περιοχή έρευνας, όπως παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 2 της παρούσης. Η ανάπτυξη του εννοιολογικού μοντέλου ήταν απαραίτητη προϋπόθεση για την μετέπειτα κατασκευή του μαθηματικού μοντέλου, τον καθορισμό των στρωμάτων, των παραμέτρων και των οριακών συνθηκών. Στο διάγραμμα ροής του σχήματος 5.1 Συνοψίζεται η διαδικασία και τα στοιχεία κατασκευής του μοντέλου.



Σχήμα 5.1 Κατασκευή μοντέλου

### 5.2.1 Πλατφόρμα Προσομοίωσης

Για την κατασκευή, την προσομοίωση του μοντέλου και την οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήθηκε η πλατφόρμα ModelMuse της USGS (Winston 2009). Το πρόγραμμα παρέχεται ελεύθερο από την υπηρεσία μαζί με εγχειρίδιο χρήσης και λεπτομερή ξεχωριστά εγχειρίδια για τα πακέτα και τις διεργασίες που προσομοιώνονται από την πλατφόρμα. Το ModelMuse ενσωματώνει πολλούς διαφορετικούς κώδικες της USGS (π.χ. MODFLOW-2005, MODFLOW-6, MODFLOW-CFP, MODFLOW-LGR, PHAST, SUTRA) ενώ για την προσομοίωση μεταφοράς ρύπου έχει ενσωματωθεί και ο κώδικας MT3DMS με

τα αντίστοιχα πακέτα. Το πρόγραμμα χρησιμοποιεί «αντικείμενα» (objects) στα οποία αποδίδονται ιδιότητες και ενεργοποιούνται πακέτα και οριακές συνθήκες ενώ εισάγει και χρησιμοποιεί διανυσματικά αρχεία (.shp) και αρχεία κειμένου (.ASCII) και πίνακα (.grd) με χαρακτηριστικά και χωρική πληροφορία. Τα αρχεία αυτά παράγονται από προγράμματα που χρησιμοποιούνται στο στάδιο επεξεργασίας δεδομένων (π.χ. πλατφόρμες γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών όπως QGIS, ArcGIS). Πρόκειται για μία πλατφόρμα που είναι αρκετά φιλική προς τον χρήστη και είναι γρήγορη ως προς την λειτουργία. Σημαντικό μειονέκτημα είναι η έλλειψη του κώδικα SEAWAT ο οποίος δεν έχει ενσωματωθεί στο ModelMuse έως σήμερα, περιορίζοντας έτσι τη δυνατότητα προσομοίωσης προβλημάτων μεταβαλλόμενης ροής. Παρ' όλα αυτά τα παραγόμενα αρχεία τόσο του MODFLOW2005 όσο και του MT3DMS μπορούν να χρησιμοποιηθούν με μικρές τροποποιήσεις και προσθήκες έτσι ώστε να χρησιμοποιηθεί ο κώδικας SEAWAT εκτός πλατφόρμας, όπως και έγινε για την διεξαγωγή της παρούσας διατριβής.

### **5.2.2 Ενεργή περιοχή και χωρική διακριτοποίηση**

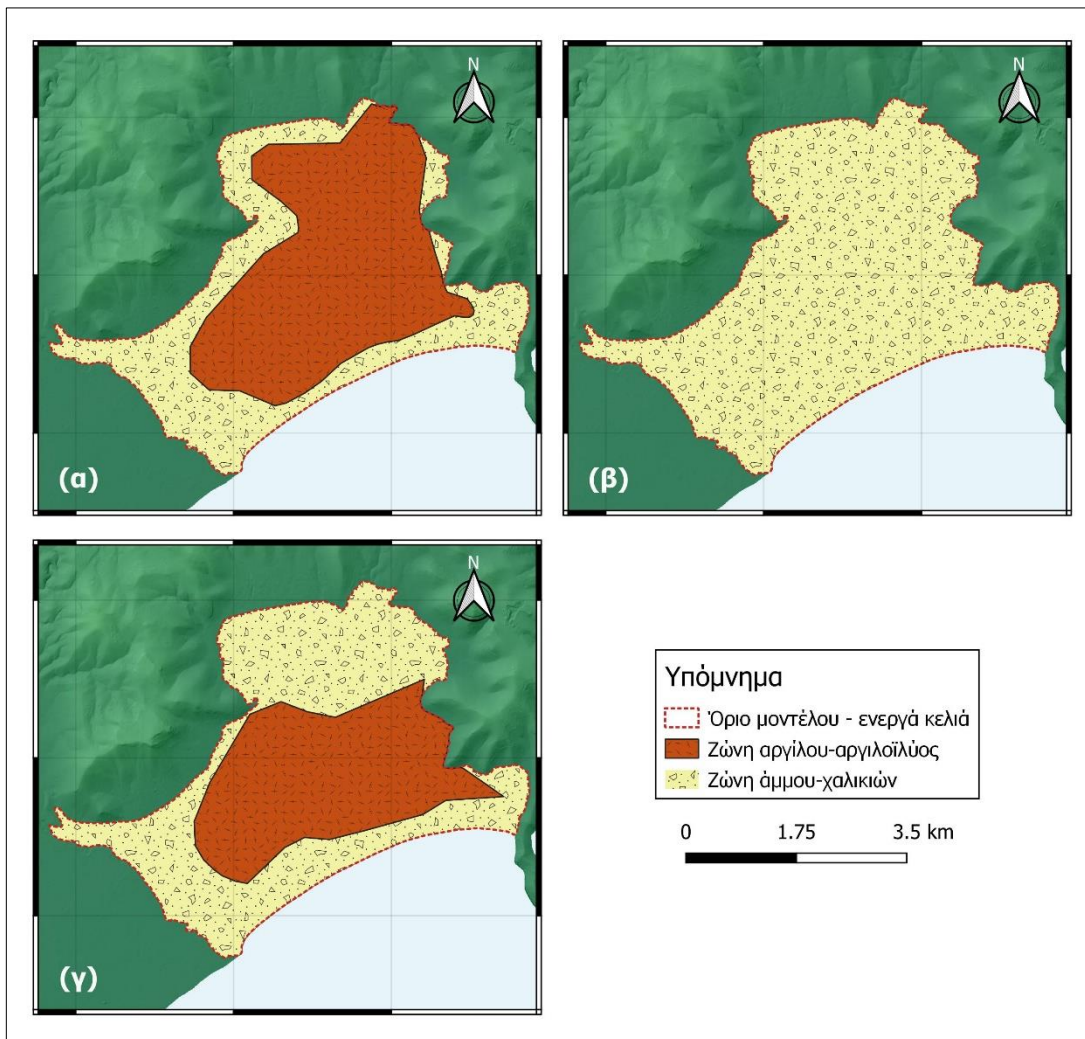
Η ενεργή περιοχή του μοντέλου περιλαμβάνει έκταση 19,67 km<sup>2</sup>, χωρισμένη σε πλέγμα 50 m × 50 m. Αυτό καταλήγει σε 7868 ενεργά κελιά ανά στρώμα. Ως μονάδα μέτρησης μήκους χρησιμοποιήθηκε το μέτρο (m). Το μέγεθος των κελιών του κανάβου θεωρείται επαρκές έτσι ώστε να απεικονίζονται οι αλλαγές που συμβαίνουν χωρικά κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης του προσχωματικού υδροφορέα του Μαραθώνα.

### **5.2.3 Καθορισμός στρωμάτων – Έκταση και κατακόρυφη διακριτοποίηση**

Η έκταση και τα όρια του μοντέλου του κοκκώδους σχηματισμού του Μαραθώνα ταυτίζονται με τα όρια των προσχωματικών αποθέσεων της πεδιάδας, όπως ορίστηκαν στον γεωλογικό χάρτη (Σχήμα 2.2). Ως οροφή του μοντέλου χρησιμοποιήθηκε το ψηφιακό μοντέλο εδάφους (Digital Elevation Model-DEM) του Εθνικού Κτηματολογίου με ανάλυση 5m×5m. Το πάχος των αποθέσεων προσδιορίστηκε από τις γεωφυσικές διασκοπήσεις των Μελισσάρη και Σταυρόπουλου (1999) ενώ τα αποτελέσματα επικυρώθηκαν με δεδομένα υφιστάμενων γεωτρήσεων από την Ειδική Γραμματεία Υδάτων της περιφέρειας Αττικής.

Τα δεδομένα γεωφυσικών διασκοπήσεων καταχωρήθηκαν σε ψηφιακή βάση δεδομένων και στη συνέχεια αναλύθηκαν μέσω συστημάτων GIS και λογισμικού χαρτογράφησης/γεωστατιστικής ανάλυσης (QGIS και Surfer v. 11 αντίστοιχα). Βάσει των δεδομένων, επιλέχθηκε να γίνει διαχωρισμός του προσχωματικού υδροφορέα σε τρία στρώματα, με το ανώτερο και κατώτερο στρώμα να αντιστοιχεί σε δύο διαφορετικές ζώνες αργίλου-αργιλοϊλύος και άμμου-χαλικιών και το μεσαίο στρώμα αποκλειστικά σε αδρομερές υλικό άμμου-χαλικιών. Η έκταση της κάθε ζώνης φαίνεται στο Σχήμα 5.2, όπως υπολογίστηκε για το κάθε στρώμα. Η οροφή, το δάπεδο και το πάχος των τριών στρωμάτων καθορίστηκαν επίσης βάσει των γεωφυσικών διασκοπήσεων. Το πάχος κάθε στρώματος είναι διάφορο ενώ το συνολικό πάχος των προσχώσεων δεν ξεπερνά τα 50-60 μέτρα. Το υπερκείμενο επιφανειακό στρώμα προσομοιώνεται ως ελεύθερο ενώ τα δύο υποκείμενα ως περιορισμένα. Ο καρστικός υδροφορέας που υπάρχει στην περιοχή

μελέτης, βρίσκεται στο υπόβαθρο του προσχωματικού υδροφορέα. Ωστόσο, η προσομοίωση αυτής της ενότητας δεν είναι στο αντικείμενο της παρούσας διατριβής.



Σχήμα 5.2 Καθορισμός ζωνών για (α) το 1ο υπερκείμενο στρώμα, (β) το 2ο ενδιάμεσο στρώμα και (γ) το 3ο υποκείμενο στρώμα

#### 5.2.4 Χρονική διακριτοποίηση

Για τις ανάγκες της ανάλυσης ευαισθησίας, ρύθμισης και τελικά της προσομοίωσης του παράκτιου υδροφορέα, δημιουργήθηκαν 13 περίοδοι φόρτισης. Ως μονάδα μέτρησης χρόνου καταχωρήθηκε η ημέρα (day). Η πρώτη περίοδος φόρτισης διεξήχθη σε συνθήκες μόνιμης ροής και ισούται με 1 ημέρα ενώ οι υπόλοιπες 12 περίοδοι φόρτισης αντιπροσωπεύουν 1 μήνα και προσομοιώνονται υπό συνθήκες μη μόνιμης ροής. Ο αριθμός των χρονικών βημάτων σε κάθε περίοδο φόρτισης αντιστοιχεί στον αριθμό των ημερών κάθε μήνα. Οι περίοδοι φόρτισης αντιστοιχούν σε ένα υδρολογικό έτος με δεδομένα που συλλέχθηκαν και υπολογίστηκαν από τον Οκτώβριο του 2018 έως τον Σεπτέμβριο του 2019.



### 5.2.5 Οριακές συνθήκες, εισροές και εκροές

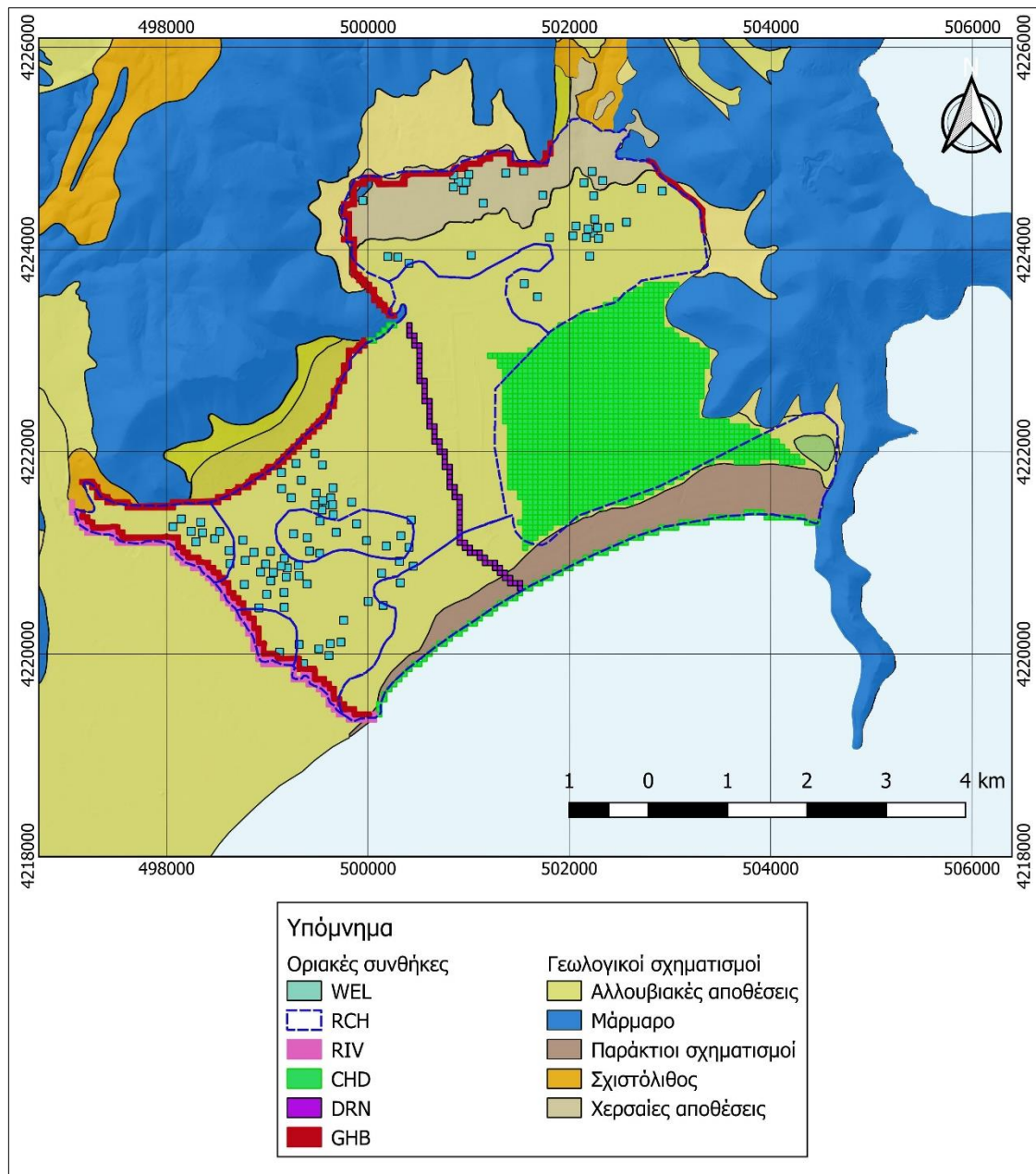
Παρακάτω αναλύονται οι υδρολογικές οριακές συνθήκες που χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο (Σχήμα 5.3) βάσει των διαθέσιμων πακέτων προσομοίωσης του MODFLOW 2005. Ακόμη περιγράφεται η υδρολογική διεργασία που αντιπροσωπεύει η κάθε συνθήκη:

#### 1. Όριο καθορισμένου φορτίου (συνθήκες Dirichlet)

- Time-Variant Specified-Head package- CHD. Το πακέτο χρησιμοποιήθηκε για να αναπαραστήσει την ακτογραμμή. Το αρχικό και τελικό φορτίο διατηρούνται στο 0 m καθ' όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης και η οριακή συνθήκη εκχωρείται και στα τρία στρώματα. Ακόμη, το όριο CHD ορίστηκε στο μέτωπο που εκφορτίζει η καρστική πηγή μακαρία Μακαρίας με μέσο υψόμετρο τα 2 m (AMSL). Για τις εισροές του υδροφορέα από τον υγρότοπο του Σχοινιά ορίστηκαν επίσης συνθήκες σταθερού φορτίου και το ύψος του υδραυλικού φορτίου προσδιορίστηκε από μετρήσεις στάθμης από γεωτρήσεις του ΙΓΜΕ ανάντι και κατάντι της περιοχής του υγροτόπου.

#### 2. Όριο καθορισμένης παροχής (συνθήκες Neumann)

- Well package (WEL). Το πακέτο χρησιμοποιήθηκε ως εκροή του υδροφόρου συστήματος για τις αντλήσεις από τα αρδευτικά πηγάδια και γεωτρήσεις της περιοχής. Η χωρική κατανομή των πηγαδιών στην πεδιάδα έγινε μέσα από παρατηρήσεις κατά την έρευνα πεδίου αλλά και από στοιχεία της Ειδικής Γραμματείας Υδάτων Αττικής. Η ποσότητα άντλησης προσδιορίστηκε βάσει στοιχείων από τη μελέτη του Υπουργείου Γεωργίας (Μελισσάρης και Σταυρόπουλος, 1999) ενώ το ετήσιο ποσό των αντλήσεων κατανεμήθηκε σε όλη τη διάρκεια του χρόνου, βάσει παρατηρήσεων από τις εκστρατείες μέτρησης στάθμης στην πεδιάδα του Μαραθώνα. Σημαντικό είναι να αναφερθεί ότι στην συγκεκριμένη περιοχή ος υδροφορέα αντλείται όλο τον χρόνο λόγω θερμοκηπιακών εγκαταστάσεων που υφίστανται σε όλη την πεδιάδα.
- Recharge package (RCH). Το πακέτο χρησιμοποιείται συνήθως για την προσομοίωση της επαναφόρτισης στον υδροφορέα. Σε αυτή την περίπτωση, το πακέτο χρησιμοποιήθηκε για την εισροή των κατακρημνισμάτων στον υδροφορέα. Η διηθούμενη βροχόπτωση που καταχωρήθηκε στο μοντέλο παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 2.7.4 Κατά την κατασκευή του μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν 2 ζώνες διήθησης βάσει της κοκκομετρικής διαβάθμισης του επιφανειακού στρώματος και τον διαχωρισμό και κατάταξη του στις ομάδες Β και C κατά USDA όπως επίσης παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 2.7.3.



Σχήμα 5.3 Οριακές συνθήκες για το μοντέλο του προσχωματικού υδροφορέα του Μαραθώνα

### 3. Όριο ροής εξαρτώμενης από το υδραυλικό φορτίο ή όριο μικτού τύπου (συνθήκες Cauchy)

- General Head Boundary- GHB. Το πακέτο GHB του MODFLOW2005 εκχωρήθηκε στο βόρειο άκρο του μοντέλου, όπου ο κοκκώδης σχηματισμός της πεδιάδας είναι σε επαφή με τα καρστικά μάρμαρα του Μαραθώνα, στην επαφή του σχηματισμού με τα Μάρμαρα της Αγίας Μαρίνας (βορειοανατολικά) καθώς και στο δυτικό άκρο των ενεργών κελιών, αντιπροσωπεύοντας τις εισροές από το παρακείμενο στρώμα του υδροφορέα της πεδιάδας. Το αρχικό και τελικό φορτίο κάθε περιόδου φόρτισης καταχωρήθηκαν βάσει υδραυλικών φορτίων του καρστικού στρώματος και της παρακείμενης μονάδας που μετρήθηκαν κατά την έρευνα πεδίου.
- Drain package (DRN). Το πακέτο χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση του αποστραγγιστικού καναλιού της Μακαρίας που παράλληλα αποστραγγίζει ποσότητα υπογείων νερών προς τη Μεσόγειο Θάλασσα, αναπαριστώντας εκροή του συστήματος υπογείων νερών

- River package (RIV). Το πακέτο χρησιμοποιείται για την προσομοίωση του νερού που είτε εκρέει είτε εισέρχεται στο σύστημα σύμφωνα με το υψόμετρο του ορίου σε σχέση με τη στάθμη του υδροφορέα. Στην περιοχή μελέτης, το ρέμα του Χαράδρου προσομοιώθηκε με το συγκεκριμένο πακέτο. Το ρέμα χρησιμοποιείται επίσης ως οριακή συνθήκη στο δυτικό τμήμα της πεδιάδας.

### 5.2.6 Αρχικές συνθήκες

Για την έναρξη της προσομοίωσης, ως αρχικές συνθήκες χρησιμοποιήθηκε η κατανομή του υδραυλικού φορτίου στην περιοχή, βάσει μετρήσεων στάθμης τον Οκτώβριο του 2018.

### 5.2.7 Παραμετροποίηση και καθορισμός ζωνών

Σημαντική εργασία για την εννοιολογική αποτύπωση ενός μοντέλου ροής είναι ο καθορισμός του είδους και της τιμής των παραμέτρων και η χωρική καταχώρηση αυτών. Η παραμετροποίηση γίνεται αφενός για την σωστή διαχείριση και χωροθέτηση των χαρακτηριστικών του υδροφορέα βάσει των δεδομένων που συλλέχθηκαν, αφετέρου για την μετέπειτα διαδικασία της ανάλυσης ευαισθησίας και εκτίμησης ορισμένων εκ των παραμέτρων.

Για το μοντέλο του Μαραθώνα, αρχικά παραμετροποιήθηκαν τα υδραυλικά χαρακτηριστικά του υδροφορέα (Πίνακας 5.1). Για την υδραυλική αγωγιμότητα ορίστηκαν δύο παράμετροι HK\_Par1 και HK\_Par2 για τα στρώματα αργίλου-αργιλοϊλύος και άμμου-χαλικιών αντίστοιχα και οι ζώνες της κάθε παραμέτρου ορίστηκαν σύμφωνα με τις ζώνες που καθορίστηκαν μέσω των γεωφυσικών διασκοπήσεων στην περιοχή (Σχήμα 5.2). Για την ειδική αποθηκευτικότητα δημιουργήθηκαν επίσης δύο παράμετροι SS\_Par1 και SS\_Par2 για κάθε μία από τις ζώνες ενώ επιλέχθηκε αρχική ενιαία τιμή και για τις δύο παραμέτρους. Τέλος ορίστηκε η παράμετρος Sy της ειδικής απόδοσης για το πρώτο ελεύθερο στρώμα του υδροφορέα. Για την αρχική προσομοίωση, πραγματοποιήθηκε χειροκίνητη βαθμονόμηση. Οι αρχικές τιμές των υδραυλικών παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν, επιλέχθηκαν βάσει βιβλιογραφικής έρευνας (Σιέμος 2010, Appelo & Postma 1993, Batu 1998, Heath 1983).

Πίνακας 5.1 Παράμετροι μοντέλου

Παράμετρος	Συνομογραφία	Αρχική τιμή
Υδραυλική αγωγιμότητα αργίλου-αργιλοϊλύος στην οριζόντια διεύθυνση ροής	HK_Par1	0,2 (m/day)
Υδραυλική αγωγιμότητα άμμου-χαλικιών στην οριζόντια διεύθυνση ροής	HK_Par2	3,312 (m/day)
Ειδική απόδοση ανώτερου στρώματος	Sy	0,02
Αγωγιμότητα (conductance) της οριακής συνθήκης GHB στην περιοχή των μαρμάρων	Cond_North	32210 (m <sup>2</sup> /day)

Αγωγιμότητα (conductance) της οριακής συνθήκης GHB στην στο δυτικό όριο της πεδιάδας	Cond_West	7395,8 (m <sup>2</sup> /day)
Αγωγιμότητα (conductance) της οριακής συνθήκης DRN του αποστραγγιστικού καναλιού	Cind_drn	8,64 (m <sup>2</sup> /day)
Ειδική αποθηκευτικότητα αργίλου-αργιλοϊλύος	SS_Par1	8,24E-3 (m <sup>-1</sup> )
Ειδική αποθηκευτικότητα άμμου-χαλικιών	SS_Par2	8,24E-3 (m <sup>-1</sup> )
Ρυθμός άντλησης στα πηγάδια (πακέτο WEL) του Μαραθώνα	Q_M	-60 (m <sup>3</sup> /day)
Ρυθμός άντλησης στα πηγάδια (πακέτο WEL) του Κάτω Σουλίου	Q_KS	-170 (m <sup>3</sup> /day)

Για τις οριακές συνθήκες ορίστηκαν επίσης παράμετροι. Στο πακέτο GHB θεωρήθηκε παράμετρος για την αγωγιμότητα (conductance) του κάθε ορίου. Έτσι δημιουργήθηκαν οι παράμετροι Cond\_North και Cond\_West για τα όρια των μαρμάρων και του δυτικού ορίου της πεδιάδας αντίστοιχα. Η παράμετρος Cond\_drn δημιουργήθηκε για την αγωγιμότητα (conductance) στο όριο του αποστραγγιστικού καναλιού. Τέλος, για την καλύτερη διαχείριση των αντλήσεων χρησιμοποιήθηκαν οι παράμετροι Q\_KS και Q\_M για το πακέτο WEL που ανταποπροσωπεύει τις γεωτρήσεις άντλησης στην περιοχή του Κάτω Σουλίου και της πεδιάδας του Μαραθώνα αντίστοιχα. Ακόμη, για το συγκεκριμένο πακέτο χρησιμοποιήθηκαν πολλαπλασιαστές της παραμέτρου για την κατανομή των αντλήσεων στο χρόνο. Ο ρυθμός άντλησης από κάθε πηγάδι (-60 m<sup>3</sup>/day και -170 m<sup>3</sup>/day για τις παραμέτρους Q\_KS και Q\_M αντίστοιχα), επιλέχθηκε έτσι από την περιοχή να αντλούνται γύρω στα 2 hm<sup>3</sup>. Το ύψος των αντλήσεων καθορίστηκε βάσει δεδομένων της «Γεωργοτεχνικής και Γεωργοοικονομικής μελέτης» των Δ.Κωνσταντινίδης και Σια Ε.Ε (1990) και εφόσον οι χρήσεις γης και το είδος των καλλιεργειών δεν έχει αλλάξει στην περιοχή μελέτης. Οι αντλήσεις καταχωρήθηκαν στο 2<sup>ο</sup> στρώμα, που αποτελείται εξ' ολοκλήρου από υλικά υψηλότερης αγωγιμότητας (άμμου-χαλίκια). Η συγκεκριμένη επιλογή προέκυψε μετά από τη έρευνα πεδίου και βάσει δεδομένων για τα βάθη των γεωτρήσεων σύμφωνα με τομές τις Ειδικής Γραμματείας Υδάτων, περιφέρειας Αττικής. Στον πίνακα 5.1 συνοψίζονται οι παράμετροι του μοντέλου καθώς και οι τιμές που καταχωρήθηκαν για την αρχική προσομοίωση.

### 5.3 Ανάλυση ευαισθησίας και υπολογισμός παραμέτρων

Η ανάλυση ευαισθησίας των παραμέτρων του μοντέλου επιτεύχθηκε μέσω του κώδικα UCODE\_2014 ο οποίος εκτελεί διαδικασίες ανάλυσης ευαισθησίας, βαθμονόμησης και την αξιολόγησης αβεβαιότητας, όπως αναλύθηκε παραπάνω.

Για την διεξαγωγή της ανάλυσης, ενεργοποιήθηκε το πακέτο παρακολούθησης υδραυλικού φορτίου (Head Observation Package-HOB) του MODFLOW2005 στο οποίο καταχωρήθηκαν τιμές υδραυλικού φορτίου. Οι τιμές αυτές προέκυψαν από μηνιαίες μετρήσεις στάθμης που πραγματοποιήθηκαν σε γεωτρήσεις και πηγάδια της πεδιάδας του Μαραθώνα για το υδρολογικό έτος 2018-2019 τα οποία κατανέμονται ομοιόμορφα στην υπό μελέτη περιοχή.

Μέσω της ανάλυσης ευαισθησίας υπολογίστηκε το επίπεδο ευαισθησίας για τις παραμέτρους του υδροφορέα που παρουσιάστηκαν στον πίνακα 5.1 και τη συσχέτιση μεταξύ τους, βάσει των μετρήσεων. Πιο συγκεκριμένα, στην ανάλυση συμπεριλήφθηκαν οι παράμετροι HK\_Par1, HK\_Par2, SS\_Par1, SS\_Par2 και Sy που αφορούν τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του υδροφορέα ενώ πραγματοποιήθηκε ανάλυση και στις παραμέτρους Cond\_North, Cond\_West του πακέτου GHB και Cond\_drn του πακέτου DRN προκειμένου να ελεγχθεί η ευαισθησία του μοντέλου στα όρια που καθορίζουν μέρος των εισροών και εκροών του συστήματος.

#### 5.3.1 Ποιότητα δεδομένων

Οι παρατηρήσεις εισήχθησαν στο μοντέλο χρησιμοποιώντας το πακέτο HOB, όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Επιλέχθηκαν τα χρονικά βήματα που αντιστοιχούν στις ημέρες που έγιναν οι μετρήσεις και καταχωρήθηκαν δεδομένα υδραυλικού φορτίου.

Μία από τις κύριες απαιτήσεις για την επιτυχημένη προσομοίωση, ανάλυση ευαισθησία και βαθμονόμηση μοντέλων υπογείων νερών είναι ένα σύνολο αξιόπιστων παρατηρήσεων υδραυλικού φορτίου. Σε πολλές περιπτώσεις, τα δεδομένα που προέρχονται από εξωτερικές πηγές μπορεί να καταλήξουν να είναι ανακριβή αφού οι συνθήκες υπό τις οποίες αποκτήθηκαν σπάνια καταγράφονται, δημιουργώντας αβεβαιότητα από την αρχή στην διαδικασία κατασκευής του μοντέλου έως και το στάδιο της βαθμονόμησης.

Στην περίπτωση του Μαραθώνα, τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν συλλέχθηκαν με ίδια μέσα και υπό γνωστές συνθήκες. Για το λόγο αυτό, οι πληροφορίες που χρησιμοποιούνται ως δεδομένα εισόδου στο μοντέλο ροής του αλλουβιακού υδροφορέα του Μαραθώνα θεωρούνται αξιόπιστες. Επιπρόσθετα, το υψόμετρο κάθε γεώτρησης λήφθηκε με τοπογραφικό όργανο, μειώνοντας έτσι το σφάλμα που μπορεί να προκύψει κατά τη χρήση του ψηφιακού μοντέλου εδάφους (DEM). Βάσει των ανωτέρω, το αθροιστικό σφάλμα μέτρησης θεωρείται ότι δεν υπερβαίνει το 0,1 m. Τα στατιστικά στοιχεία που χρησιμοποιούνται στην ανάλυση ευαισθησίας και στην εκτίμηση των παραμέτρων είναι η τυπική απόκλιση ( $\sigma$ ), και το βάρος κάθε παρατήρησης υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση 5.4, για τυπική απόκλιση 0,1 m.

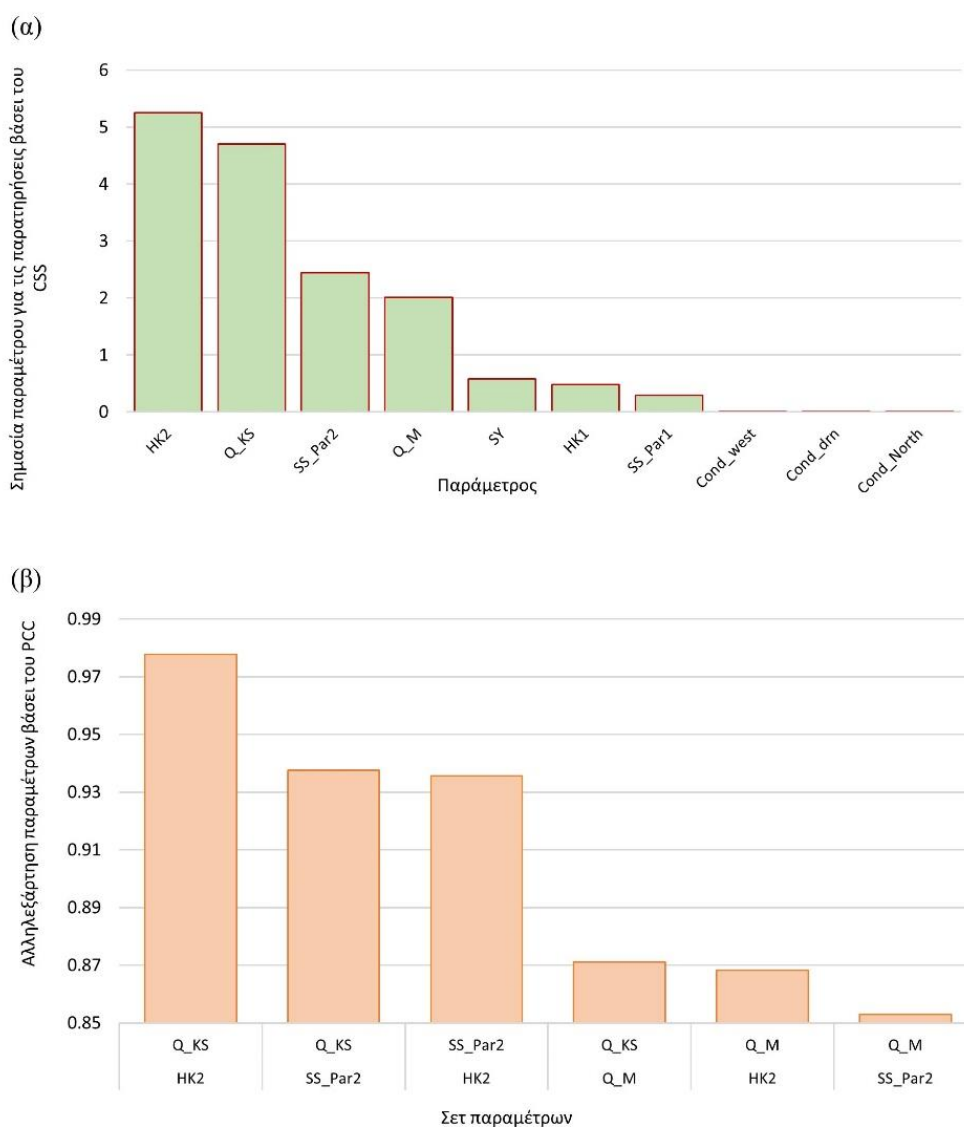
### 5.3.2 Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας αναλύθηκαν βάσει των δεικτών CSS και PCC, που υπολογίστηκαν αυτόματα από το UCODE2014, σύμφωνα με τις εξισώσεις 5.5 και 5.6.

Για το μοντέλο του προσχωματικού υδροφορέα του Μαραθώνα, τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας υποδηλώνουν ότι το μοντέλο επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τις παραμέτρους που σχετίζονται με τα χαρακτηριστικά του μεσαίου στρώματος και των ζωνών άμμου-χαλικιών καθώς και από τις παραμέτρους των αντλήσεων. Οι υψηλές τιμές του δείκτη CSS για τις παραμέτρους HK2, SS\_Par2, Q\_KS και Q\_M όπως φαίνεται στο σχήμα 5.4(α) οφείλονται εν μέρει στην επίδραση των αντλήσεων οι οποίες λαμβάνουν χώρα κυρίως στο μεσαίο στρώμα το οποίο διαμορφώνεται εξολοκλήρου από άμμο-χαλίκια. Η ειδική απόδοση ( $S_y$ ) του ανώτερου ελεύθερου στρώματος έχει μικρότερη σημασία για την προσομοίωση ενώ οι παράμετροι που αφορούν τις ζώνες αργίλου-αργιλοϊλύος καθορίζουν σε ακόμη μικρότερο βαθμό το αποτέλεσμα. Ακόμη, οι παράμετροι που αφορούν τις οριακές συνθήκες και τις εκροές του μοντέλου (Cond\_North, Cond\_West και Cond\_drn) δεν έχουν σημαντική ευαισθησία.

Μεγάλη συσχέτιση παρατηρείται μεταξύ των αντλήσεων του Κάτω Σουλίου (Q\_KS) και των υδραυλικών ιδιοτήτων της άμμου-χαλικιών (HK2, SS\_Par2) και μικρότερη με τις αντλήσεις του Μαραθώνα (Q\_M) που σχετίζεται με την επίδραση των αντλήσεων στο μεσαίο στρώμα, όπως περιγράφηκε παραπάνω.

Εν κατακλείδι, τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας υποδεικνύουν ότι οι παράμετροι που σχετίζονται με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του υδροφορέα και τη συνολική χρήση νερού (αντλήσεις) στη λεκάνη απορροής, έχουν τη μεγαλύτερη επίδραση στην προσομοίωση του υδροφορέα.



Σχήμα 5.4 (α) Επίπεδο ευαισθησίας παραμέτρων με βάση το CSS, (β) Συσχέτιση παραμέτρων

### 5.3.3 Βαθμονόμηση μοντέλου και αποτελέσματα προσομοίωσης

Για την ρύθμιση των παραμέτρων του μοντέλου, χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας, λαμβάνοντας υπόψη την σημασία των παραμέτρων βάσει του CSS και την αλληλεξάρτηση μεταξύ τους (Σχήμα 5.4). Για την επιτυχημένη βαθμονόμηση είναι σημαντικό οι παράμετροι που θα επιλεγθούν να έχουν υψηλή τιμή δείκτη CSS και η αλληλεξάρτηση τους με άλλες παραμέτρους που συμπεριλαμβάνονται στη διαδικασία να είναι μικρή (χαμηλή τιμή του δείκτη PSS). Οι παράμετροι που επιλέχθηκαν για την διαδικασία εκτίμησης παραμέτρων του UCODE2014 αφορούν τα χαρακτηριστικά του υδροφορέα: HK2, SS\_Par2, Sy, HK1 και SS\_Par1. Οι παράμετροι Q\_M και Q\_KS δεν συμπεριλήφθηκαν στην βαθμονόμηση του μοντέλου και οι αρχικές τιμές που δόθηκαν θεωρούνται δεδομένες και χρησιμοποιούνται για όλη την προσομοίωση. Σύμφωνα με τους Hill και Tideman (2007), ακραία συσχέτιση μεταξύ δύο

παραμέτρων ( $PCC = \pm 1,00$ ) ή μεγάλη συσχέτιση μεταξύ παραμέτρων ( $PCC \geq \pm 0,95$ ) υποδηλώνει ότι οι παράμετροι που εμπλέκονται δεν μπορούν να εκτιμηθούν ξεχωριστά. Παρ' όλα αυτά, υπογραμμίζουν ότι κάτι τέτοιο δεν είναι κανόνας καθώς μπορούν να ληφθούν μοναδικές εκτιμήσεις ακόμη και με απόλυτες τιμές PCC που είναι πολύ κοντά στο 1,00.

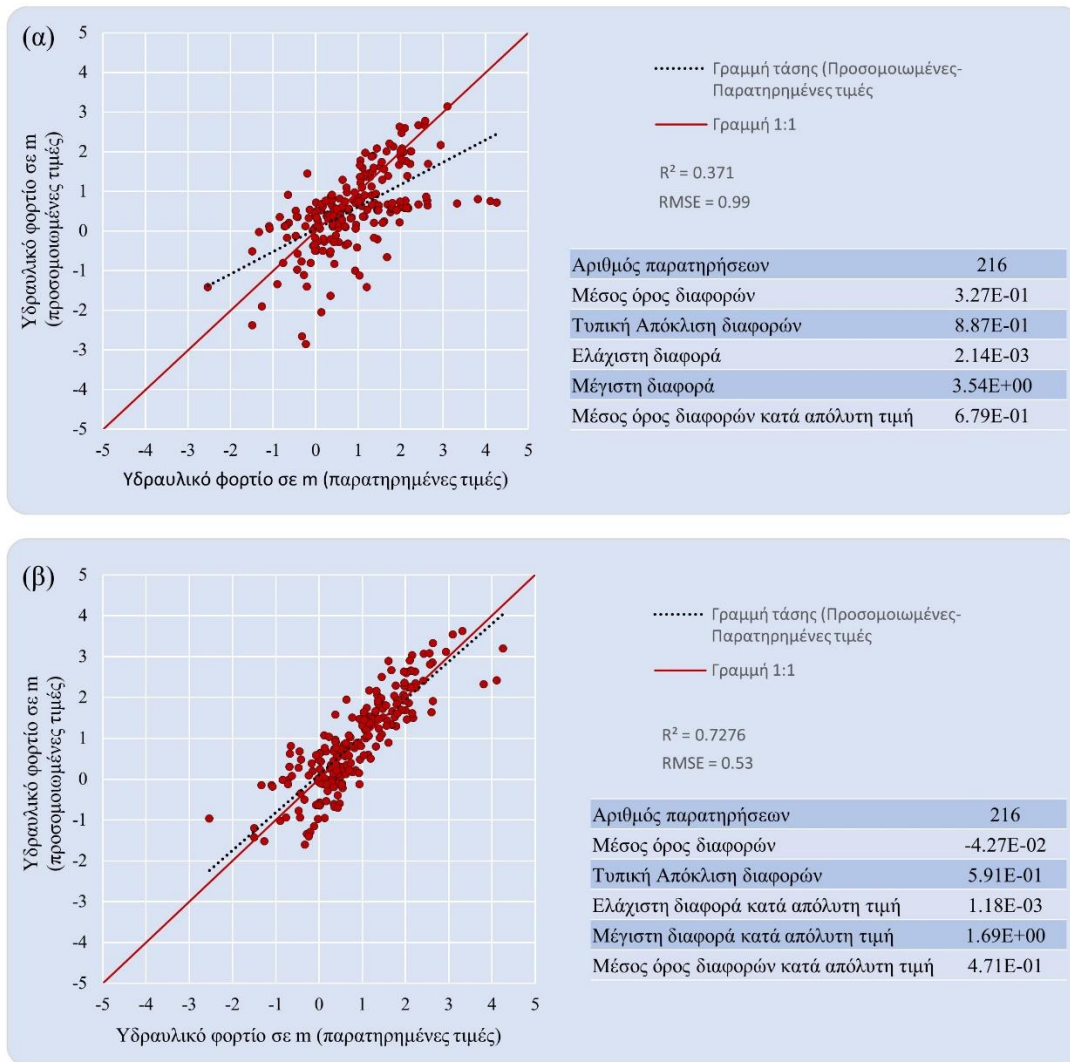
Το καλύτερα προσαρμοσμένο σετ παραμέτρων στις παρατηρημένες τιμές, όπως προέκυψε από τη βαθμονόμηση παρουσιάζεται στον πίνακα 5.2.

Πίνακας 5.2 Τιμές παραμέτρων μετά τη βαθμονόμηση

Παράμετρος	Βαθμονομημένη τιμή
HK2	12,92 (m/day)
SS_Par2	7,79E-05 ( $m^{-1}$ )
SY	0,03927
HK1	0,8061 (m/day)
SS_Par1	0,000542 ( $m^{-1}$ )

Τα διαγράμματα που παρουσιάζονται στα σχήματα 5.6(α) και 5.6(β) δείχνουν τις διαφορές μεταξύ των αποτελεσμάτων στις προσομοιωμένες τιμές σε σχέση με τις μετρήσεις του πεδίου για τις αρχικές τιμές των παραμέτρων του μοντέλου και τις τιμές που προέκυψαν μετά τη βαθμονόμηση αντίστοιχα. Ακόμη, στο εν λόγω σχήμα παρουσιάζονται και τα στατιστικά στοιχεία των διαφορών προσομοιωμένων-παρατηρημένων τιμών υδραυλικού φορτίου. Βάσει των αποτελεσμάτων, φαίνεται ότι οι διαφορές μεταξύ προσομοιωμένων-παρατηρημένων τιμών έχουν μειωθεί σημαντικά σε σχέση με την αρχική προσομοίωση. Οι χάρτες κατανομής υδραυλικού φορτίου του σχήματος 5.6 παρουσιάζουν την πιεζομετρική κατάσταση στην περιοχή ενδιαφέροντος σε επιλεγμένες περιόδους για τις παρατηρημένες και τις αντίστοιχες προσομοιωμένες τιμές μετά τη βαθμονόμηση. Η κατανομή των προσομοιωμένων υδραυλικών φορτίων χρονικά και χωρικά παρουσιάζει αποδεκτή προσαρμογή των αποτελεσμάτων στις παρατηρούμενες τιμές. Το μοντέλο μπορεί να προβλέψει με ακρίβεια την ανύψωση του υδροφορέα κατά την χειμερινή περίοδο (Ιανουάριος 2019) καθώς και την απόκριση του συστήματος στην επιβολή αντλήσεων κατά τις περιόδους μείωσης της φυσικής τροφοδοσίας και σταδιακής αύξησης των αρδεύσεων (Απρίλιος 2019) καθώς και κατά την περίοδο έντονων αρδεύσεων (Ιούλιος 2019).





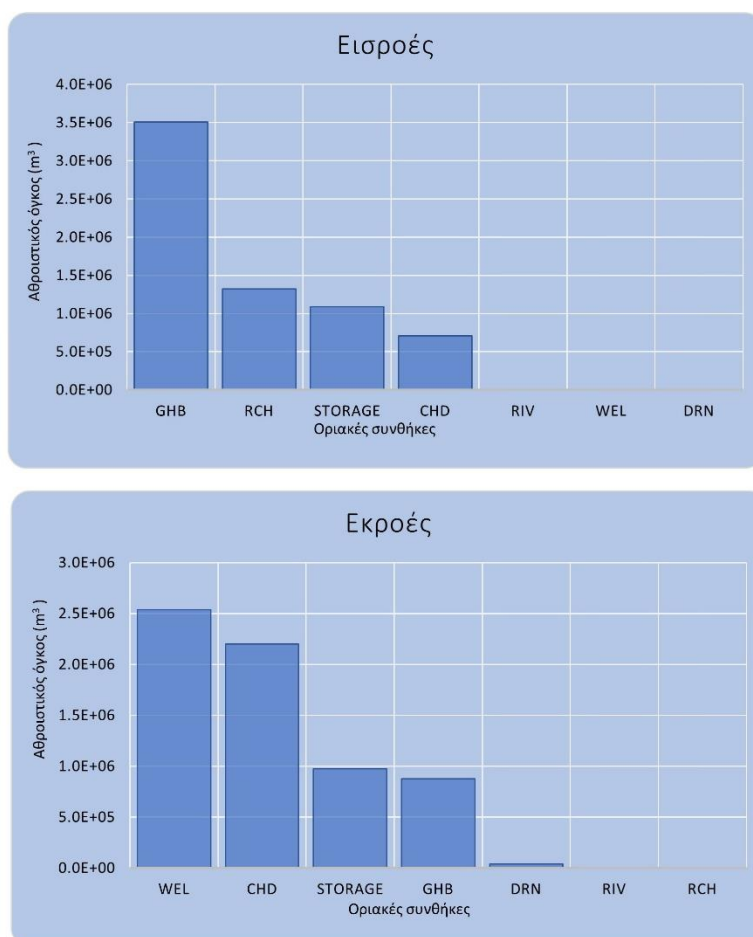
Σχήμα 5.5 Διάγραμμα προσομοιωμένων-παρατηρημένων τιμών υδραυλικού φορτίου με τον κώδικα MODFLOW 2005 (α) για την αρχή της προσομοίωσης, (β) μετά τη βαθμονόμηση των παραμέτρων



Σχήμα 5.6 Κατανομή παρατηρημένου και προσομοιωμένου υδραυλικού φορτίου στον κοκκώδη σχηματισμό του Μαραθώνα

### 5.3.4 Αθροιστικό ισοζύγιο υπογείου νερού

Σημαντικές πληροφορίες για την διαίτα των υδροφορέων μπορούν να προκύψουν από την ανάλυση του αθροιστικού ισοζυγίου εισροών και εκροών κατά την προσομοίωση. Η βασική πληροφορία που μπορεί να εξαχθεί είναι οι βασικές πηγές εισροής νερού στο σύστημα και η διαδικασία εκφόρτισης αυτού, συμβάλλοντας στην καλύτερη κατανόηση για τη μετέπειτα διαχείριση του. Στο Σχήμα 5.7, παρουσιάζεται το αθροιστικό ισοζύγιο του υδροφορέα στο τέλος της προσομοίωσης, βάσει των οριακών συνθηκών (πακέτων του MODFLOW) που χρησιμοποιήθηκαν. Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα εισροών, η βασική τροφοδοσία του υδροφορέα προέρχεται από το περιβάλλον καρστικό σύστημα (πακέτο GHB), κάτι που αποτυπώνεται και από τις πιεζομετρικές συνθήκες τις περιοχής, ενώ μέρος των εισροών προέρχεται και από το δυτικό όριο του υδροφορέα.



Σχήμα 5.7 Αθροιστικό ισοζύγιο μαθηματικού μοντέλου (Οκτώβριος 2018-Σεπτέμβριος 2019)

Σημαντική εισροή φαίνεται να προέρχεται και από τη βροχόπτωση (RCH) ενώ μικρότερη εισροή παρατηρείται από το αποθηκευμένο νερό του υδροφορέα (STORAGE) και το πακέτο CHD που αφορά κυρίως εισροές από τη Μακαρία πηγή. Η βασική εκφόρτιση του υδροφορέα προκύπτει από τις αντλήσεις (WEL) και την οριακή συνθήκη που αντιπροσωπεύει την ακτογραμμή (CHD) ενώ απελευθερώνεται και σημαντική

ποσότητα από το αποθηκευμένο νερό (STORAGE). Τέλος, η ποσότητα που εκρέει από το πακέτο GHB προέρχεται από το δυτικό όριο που αντιπροσωπεύει το παρακείμενο στρώμα του υδροφορέα της πεδιάδας.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, είναι εμφανές ότι οι μεγάλες ποσότητες νερού που αντλούνται για άρδευση παίζουν σημαντικό ρόλο στο ισοζύγιο του νερού και είναι απαραίτητο να αποτελέσουν διαχειριστικό στόχο προκειμένου να μην υπάρξει περαιτέρω ποιοτική και ποσοτική υποβάθμιση του συστήματος.

#### **5.4 Ανάπτυξη και εφαρμογή μαθηματικού μοντέλου μεταβαλλόμενης πυκνότητας**

Στην παρούσα διατριβή χρησιμοποιήθηκε μία ολοκληρωμένη προσέγγιση της προσομοίωσης ροής σε παράκτια συστήματα με τη χρήση του κώδικα μεταβαλλόμενης πυκνότητας SEAWAT, προκειμένου να εξεταστεί η επίδραση της υφαλμύρισης στο υδραυλικό φορτίο και την συγκέντρωση αλάτων του υδροφορέα.

Στο μοντέλο ροής και μεταβαλλόμενης πυκνότητας, η στάθμη της θάλασσας θεωρήθηκε σταθερή μέσω της οριακής συνθήκης CHD του MODFLOW. Περιοδικά φαινόμενα παλίρροιας αλλά και φαινόμενα καταιγίδας που μεταβάλλουν τη στάθμη δεν λήφθηκαν υπόψη. Βάσει καταγραφής της περιοδικής μεταβολής από τους διαθέσιμους παλιρροιογράφους στον Ελλαδικό χώρο και ιδίως από παλαιότερες καταγραφές σε παλιρροιογράφο στο λιμάνι της Ραφήνας (<http://www.ioc-sealevelmonitoring.org/>) φαίνεται ότι η απόσταση μεταξύ μέγιστης και ελάχιστης στάθμης δεν ξεπερνά τα 25 cm σε ημερήσια κλίμακα και τα 30 cm σε μηνιαία κλίμακα. Βάσει υφιστάμενων μελετών (π.χ. Ataie-Ashtiani et al. 1998, Inouchi et al. 1990, Cartwright et al. 2004) φαίνεται πως όταν η στάθμη της θάλασσας διατηρείται στα όρια της παλιρροιακής ζώνης, η επίδραση που έχει στην ζώνη ανάμιξης γλυκού- αλμυρού νερού είναι μικρή. Αντίθετα, από πολλούς ερευνητές ως κύρια αιτία της θαλάσσιας διείσδυσης θεωρείται η υπερεκμετάλλευση των παράκτιων υδροφορέων (π.χ. Goma et al. 2021, Camp et al. 2014). Για τους παραπάνω λόγους επιλέχθηκε να μην ληφθεί υπόψη στην παρούσα διδακτορική διατριβή αφού θεωρήθηκε πως δεν θα επηρέαζε σημαντικά το τελικό αποτέλεσμα.

Υφιστάμενες μελέτες για την επίδραση της μετεωρολογικής παλίρροιας στην θαλάσσια διείσδυση, έχουν προσομοιώσει το φαινόμενο με συνδυασμό των πακέτων River (RIV) και Drain (DRN) (Elsayed & Oumeraci 2018), ενώ σε μία γενικότερη έρευνα για την επίδραση των κυμάτων της παλιρροιακής ζώνης, οι Mulligan et al. (2011) προσομοίωσαν την οριακή συνθήκη της θάλασσας μέσω (i) μίας ζώνης υψηλής υδραυλικής αγωγιμότητας, (ii) του πακέτου General Head Boundary (GHB) και (iii) του πακέτου Periodic Boundary Condition (PBC).

Για την ανάπτυξη του μοντέλου μεταβαλλόμενης πυκνότητας και την προσομοίωση της θαλάσσιας διείσδυσης, αρχικά καθορίστηκε το μοντέλο μεταφοράς ρύπου και προσομοιώθηκε με τον κώδικα MT3DMS εκτελώντας τις διαδικασίες που περιγράφηκαν στην ενότητα 5.1.2. Βασικός σκοπός της χρήσης του

MT3DMS ήταν η παραγωγή των απαραίτητων αρχείων έτσι ώστε στη συνέχεια χρησιμοποιηθούν για την προσομοίωση μεταβαλλόμενης πυκνότητας με τον κώδικα SEAWAT. Το μοντέλο μεταφοράς ρύπου ενσωματώθηκε στο μοντέλο ροής που περιγράφηκε παραπάνω έχοντας κοινή χωρική και χρονική διακριτοποίηση, ενεργοποιώντας το πακέτο Sink & Source Mixing Package (SSM). Για την προσομοίωση, καθορίστηκε ένα είδος ρύπου στην ακτογραμμή, ως όριο σταθερής συγκέντρωσης αντιπροσωπεύοντας τη Μεσόγειο θάλασσα.

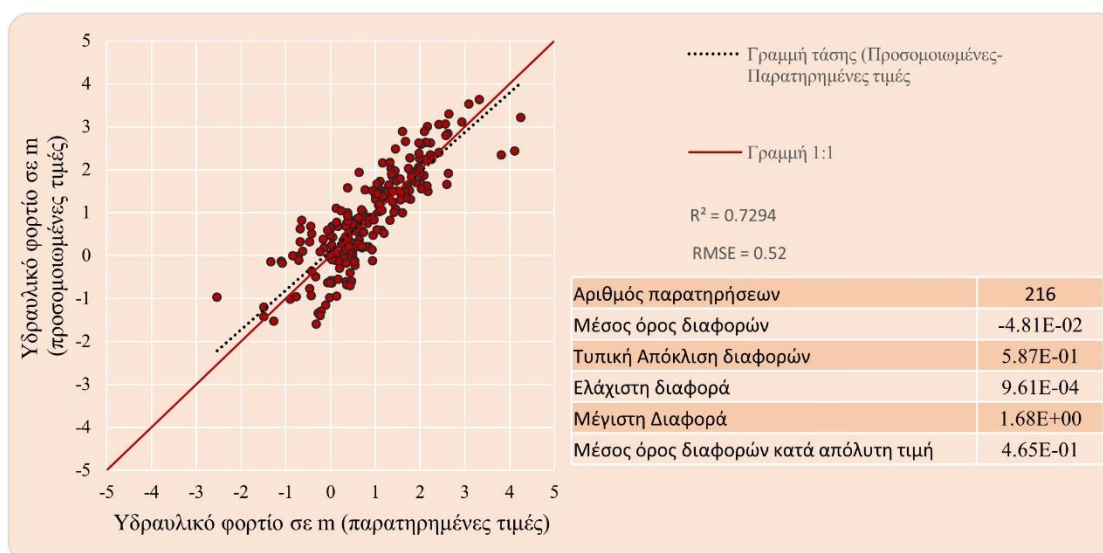
Για την εφαρμογή του μοντέλου μεταβαλλόμενης πυκνότητας, σύμφωνα με τους Mabrouk et al (2019), χρησιμοποιούνται συνήθως δύο προσεγγίσεις για τον προσδιορισμό της κατανομής της αλατότητας: α) η χωρική απόδοση της αλατότητας μέσω γεωστατιστικής ανάλυσης από υφιστάμενα δεδομένα σημείων παρακολούθησης της περιοχή μελέτης ή β) ξεκινώντας την προσομοίωση με πλήρως αλμυρισμένο ή πλήρως γλυκό νερό στον υδροφορέα και προσομοιώνοντας για εκτεταμένη χρονική περίοδο έως ότου το υπόγειο σύστημα φτάσει σε δυναμική ισορροπία. Κατά τον έλεγχο των δύο προσεγγίσεων στην έρευνα τους σε παράκτιο κοκκώδη υδροφορέα της Αιγύπτου, οι Gomaa et al. (2021) κατέληξαν στο ότι στην δεύτερη περίπτωση η υπό εξέταση περιοχή καταλαμβάνεται από γλυκό νερό σε όλη την έκταση. Κάτι τέτοιο δεν συμφωνεί με τις πραγματικές συνθήκες καθώς ο υδροφορέας καταλαμβάνεται από υφάλμυρο νερό με αλατότητα άνω των 1000 mg/lit. Αντιθέτως, τα αποτελέσματα της δεύτερης προσέγγισης ήταν σε συμφωνία με τις παρατηρημένες τιμές των ερευνητών. Σύμφωνα με αυτό το συμπέρασμα και σε συνδυασμό με την ύπαρξη μετρήσεων ηλεκτρικής αγωγιμότητας για την έναρξη της προσομοίωσης (Οκτώβριος 2018), χρησιμοποιήθηκε η δεύτερη προσέγγιση για την περίπτωση του Μαραθώνα. Τα δεδομένα αναλύθηκαν χωρικά μέσω της γεωστατιστικής μεθόδου krigging και στη συνέχεια, για την μετατροπή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας σε ολικά διαλυμένα στερεά χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω εμπειρική γραμμική σχέση (Malcolm et al. 2018):

$$TDS (mg/lit) = k_e \times EC (\mu S/cm) \quad (5.7)$$

Όπου  $TDS$  τα ολικά διαλυμένα στερεά,  $k_e$  μία σταθερά αναλογικότητας κυμαινόμενη από 0,55 έως 0,85 (Walton 1989) και  $EC$  η ηλεκτρική αγωγιμότητα. Για την παρούσα μελέτη λήφθηκε  $k_e = 0,64$ .

#### 5.4.1 Έλεγχος παραμέτρων

Οι παράμετροι που προέκυψαν από τη βαθμονόμηση του μοντέλου ροής με τον κώδικα MODFLOW2005 (5.1.4), χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο μεταβαλλόμενης πυκνότητας. Για τον έλεγχο της προσαρμογής των παραμέτρων στο μοντέλο μεταβαλλόμενης πυκνότητας ενεργοποιήθηκε το πακέτο HOB του κώδικα MODFLOW2000, ο οποίος είναι ενσωματωμένος στο SEAWAT. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, σε σχέση με τις παρατηρημένες τιμές υδραυλικού φορτίου, παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.8.



Σχήμα 5.8 Διάγραμμα προσομοιωμένων-παρατηρημένων τιμών υδραυλικού φορτίου με τον κώδικα SEAWAT

Βάσει των αποτελεσμάτων παρατηρείται μικρή διαφορά παρατηρημένων-προσομοιωμένων τιμών υδραυλικού φορτίου η οποία κρίνεται αποδεκτή. Επιπλέον για την πραγματοποίηση αυτοματοποιημένης βαθμονόμησης το υπολογιστικό κόστος είναι σχετικά αυξημένο και επομένως δεν κρίνεται απαραίτητη η πραγματοποίηση περαιτέρω βαθμονόμησης.

Ως προς τις παραμέτρους του μοντέλου μεταφοράς ρύπου, σημειώνεται ότι δεν έγινε αυτόματη βαθμονόμηση λόγω περιορισμένων δεδομένων. Παρ' όλα αυτά έγινε προσπάθεια χειροκίνητης βαθμονόμησης της κατά μήκος διασποράς (Longitudinal Dispersivity) και του πορώδους με δεδομένα ηλεκτρικής αγωγιμότητας για τον Μάιο του 2018. Οι τιμές εκχωρήθηκαν ως αποδεκτές εκτιμήσεις για την διασπορά από τη διεθνή βιβλιογραφία (Gelhar et al. 1992, Schulze-Makuch 2005) καθώς και από περιπτώσεις παράκτιων υδροφορέων που έχουν προσομοιωθεί σε υπάρχουσες έρευνες (Essink et al. 2010, Abd-Elaty & Zelenakova 2022, Tran et al. 2022, Σιάρκος 2015). Κατά την εφαρμογή διαφορετικών βιβλιογραφικών τιμών της διασποράς με κατώτατο όριο τα 0,05 m και ανώτερο τα 60 m, δεν προέκυψε κάποια σημαντική βελτίωση στις διαφορές προσομοιωμένων-παρατηρημένων τιμών TDS. Συμπερασματικά, φαίνεται ότι η παράμετρος δεν είναι ευαίσθητη για την προσομοίωση. Ως προς το πορώδες, κατά την εφαρμογή διαφορετικών τιμών με κατώτερη τιμή το 0,05 και ανώτερη το 0,3, φαίνεται ότι η συγκεκριμένη παράμετρος είχε μεγαλύτερη ευαισθησία για τα αποτελέσματα της προσομοίωσης στο μοντέλο του ρύπου, σε σχέση με την παράμετρο της διασποράς. Παρόλα αυτά, τα αποτελέσματα του μοντέλου φαίνεται να επηρεάζονται στις πολύ μικρές τιμές πορώδους με τη δυσμενέστερη τιμή για τη διαφορά παρατηρημένων-προσομοιωμένων συγκεντρώσεων TDS να λαμβάνεται για πορώδες ίσο με 0,05 ενώ για τιμές μεγαλύτερες του 0,15, τα αποτελέσματα δεν επηρεάζονται σημαντικά.

Ως προς τα ποιοτικά χαρακτηριστικά, στο όριο σταθερής συγκέντρωσης εκχωρήθηκε συγκέντρωση 35000 ppm ή 35 g/m<sup>3</sup> για τα ολικά διαλυμένα στερεά (TDS) κατά μήκος της ακτογραμμής. Για τη ροή

μεταβαλλόμενης πυκνότητας, εκχωρήθηκε τιμή  $1000 \text{ g/m}^3$  ως πυκνότητα αναφοράς, η οποία αντιστοιχεί στην πυκνότητα του γλυκού νερού και ο συντελεστής  $(\partial\rho/\partial C)$  λήφθηκε ίσος με 0,7.

Αναλυτικά, στην διαμήκη διασπορά (Longitudinal Dispersivity) αποδόθηκε η τιμή των 11 m, για τον λόγο της οριζόντιας (TRPT) και της κάθετης εγκάρσιας διασποράς (TRVT) ορίστηκε η τιμή 0,1 και 0,01 αντίστοιχα. Το πορώδες λήφθηκε ίσο με 0,15 και ο συντελεστής μοριακής διάχυσης θεωρήθηκε ίσος με  $10^{-5} \text{ m}^2/\text{ημέρα}$ . Οι παράμετροι εισόδου που χρησιμοποιήθηκαν για τη προσομοίωση της θαλάσσιας διείδυσης συνοψίζονται στον 5.3.

Πίνακας 5.3 Παράμετροι προσομοίωσης για το μοντέλο μεταφοράς ρύπου

Παράμετρος	Συντομογραφία	Αρχική τιμή
Διαμήκης διασπορά	$\alpha_L$	11 m
Λόγος οριζόντιας εγκάρσιας διασποράς	TRPT	0,1
Λόγος κάθετης εγκάρσιας διασποράς	TRPV	0,01
Πορώδες	n	0,15
Συντελεστής μοριακής διασποράς	$D^*$	$10^{-5} \text{ m}^2/\text{day}$
Συγκέντρωση TDS θαλασσινού νερού	C	35 g/l
Πυκνότητα αναφοράς	$\rho_0$	$1000 \text{ g/m}^3$
Σταθερά	$(\partial\rho/\partial C)$	0,7

#### 5.4.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης

Κατά την προσομοίωση του μοντέλου ροής μεταβαλλόμενης πυκνότητας για τον κοκκώδη υδροφορέα του Μαραθώνα, παρουσιάστηκαν διαφορές στην κατανομή των πιεζομετρικών καμπυλών σε σχέση με το μοντέλο ροής, όπως ήταν αναμενόμενο. Οι χάρτες ισοπιεζομετρικών καμπυλών για τα δύο μοντέλα παρουσιάζονται στα σχήματα 5.9 και 5.10 για το υδρολογικό έτος προσομοίωσης (2018-2019). Όπως είναι εμφανές, η βασική διαφορά μεταξύ των φορτίων έγκειται στην μετατόπιση των πιεζομετρικών καμπυλών κοντά στην ακτογραμμή (κυρίως της πιεζομετρικής καμπύλης του 0) προς την ενδοχώρα, κατά την προσομοίωση της μεταβαλλόμενης πυκνότητας. Η μετατόπιση οφείλεται στην επίδραση της ζώνης υφαλμύρισης (η οποία παρουσιάζεται παρακάτω) ενώ η διαφορά μεταξύ των δύο προσομοιώσεων είναι εντονότερη κατά την περίοδο έντονων αντλήσεων, δηλαδή μεταξύ Ιουλίου 2019 και Σεπτεμβρίου 2019.

Το μοντέλο προσομοιώθηκε για μεγάλο χρονικό διάστημα, προκειμένου να επιτευχθεί η φυσική ανάμειξη μεταξύ της συγκέντρωσης TDS του υδροφορέα και του θαλασσινού νερού κατά μήκος της ακτογραμμής και να σταθεροποιηθεί η ζώνη ανάμειξης αλμυρού-γλυκού νερού. Η προσομοίωση της μεταβαλλόμενης ροής πραγματοποιήθηκε για 3.000 βήματα (ημέρες) υπό συνθήκες μόνιμης ροής, ενώ στη συνέχεια η προσομοίωση συνεχίστηκε για 1.827 χρονικά βήματα (ημέρες) υπό συνθήκες μη μόνιμης ροής,

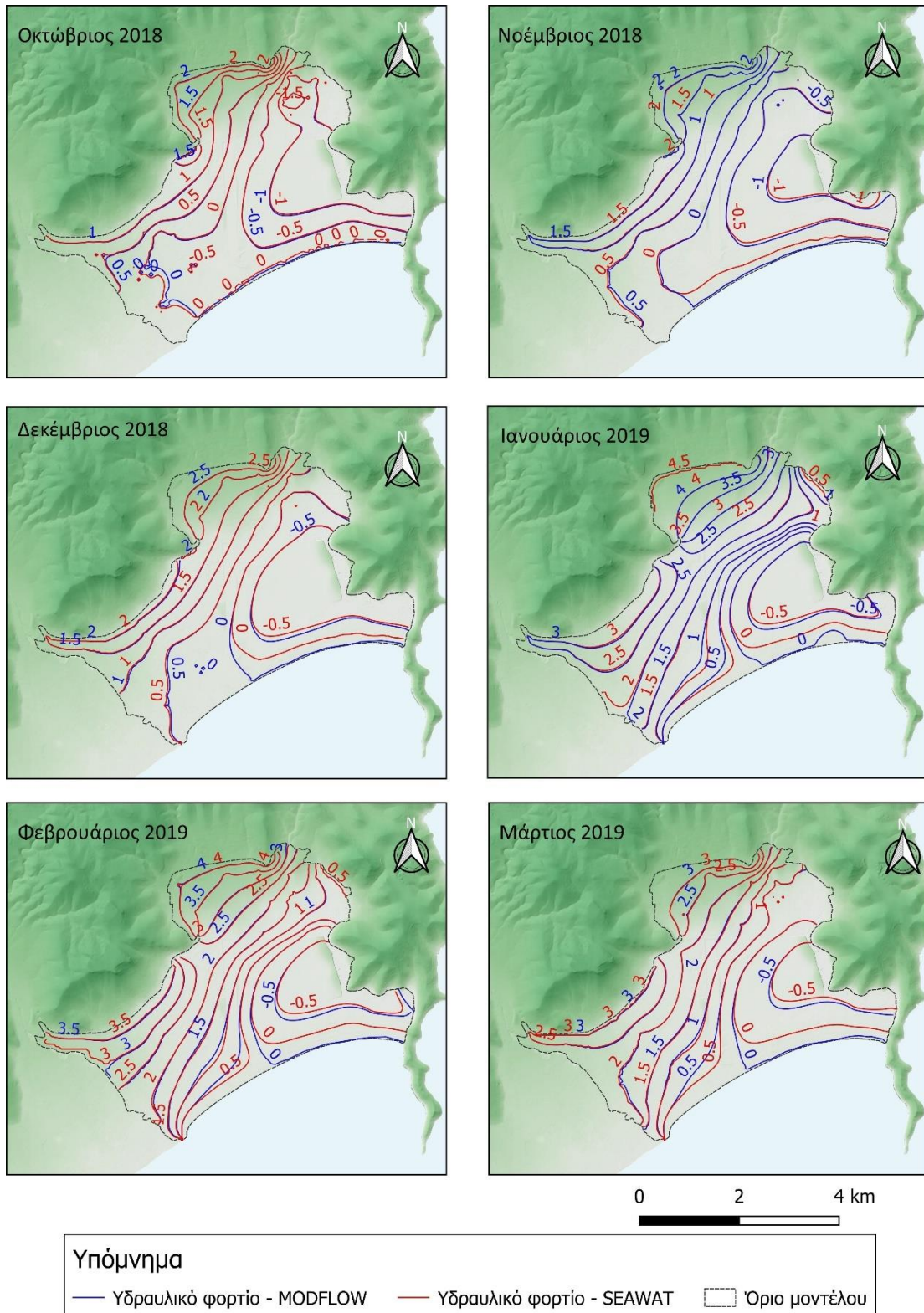
χρησιμοποιώντας δεδομένα εισαγωγής για 5 υδρολογικά έτη, από το 2015 έως το 2020. Βασικός στόχος της προσομοίωσης ήταν ο προσδιορισμός της έκτασης του μετώπου της υφαλμύρισης.

Τα αποτελέσματα του μοντέλου παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.9, ως ποσοστιαία συγκέντρωση θαλασσινού νερού για τα τρία στρώματα του υδροφορέα. Από την κατανομή των ισοϋψών, είναι εμφανές ότι το μέτωπο της θαλάσσιας διείσδυσης εκτείνεται σε μεγαλύτερη απόσταση από την ακτή στην περιοχή του υγροτόπου του Σχινιά απ' ότι στα δυτικά τις περιοχής μελέτης. Πιο συγκεκριμένα, στον πίνακα 5.4 καταγράφεται το μήκος του μετώπου σε κάθε στρώμα για την περιοχή του έλους και το δυτικό κομμάτι της πεδιάδας. Σημειώνεται ότι σε όλη την έκταση του υδροφορέα το νερό θεωρείται υφάλμυρο με αγωγιμότητες μεγαλύτερες των 1000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (ισοδύναμο TDS 0,64  $\text{g}/\text{m}^3$ ). Παρ' όλα αυτά για να προσδιοριστεί το μέτωπο της υφαλμύρισης και το πόδι της ζώνης γλυκού- αλμυρού νερού, θεωρείται ελάχιστη συγκέντρωση TDS ίση 3  $\text{g}/\text{m}^3$ . Το μήκος της ζώνης υφαλμύρισης για κάθε στρώμα φαίνεται στον παρακάτω πίνακα.

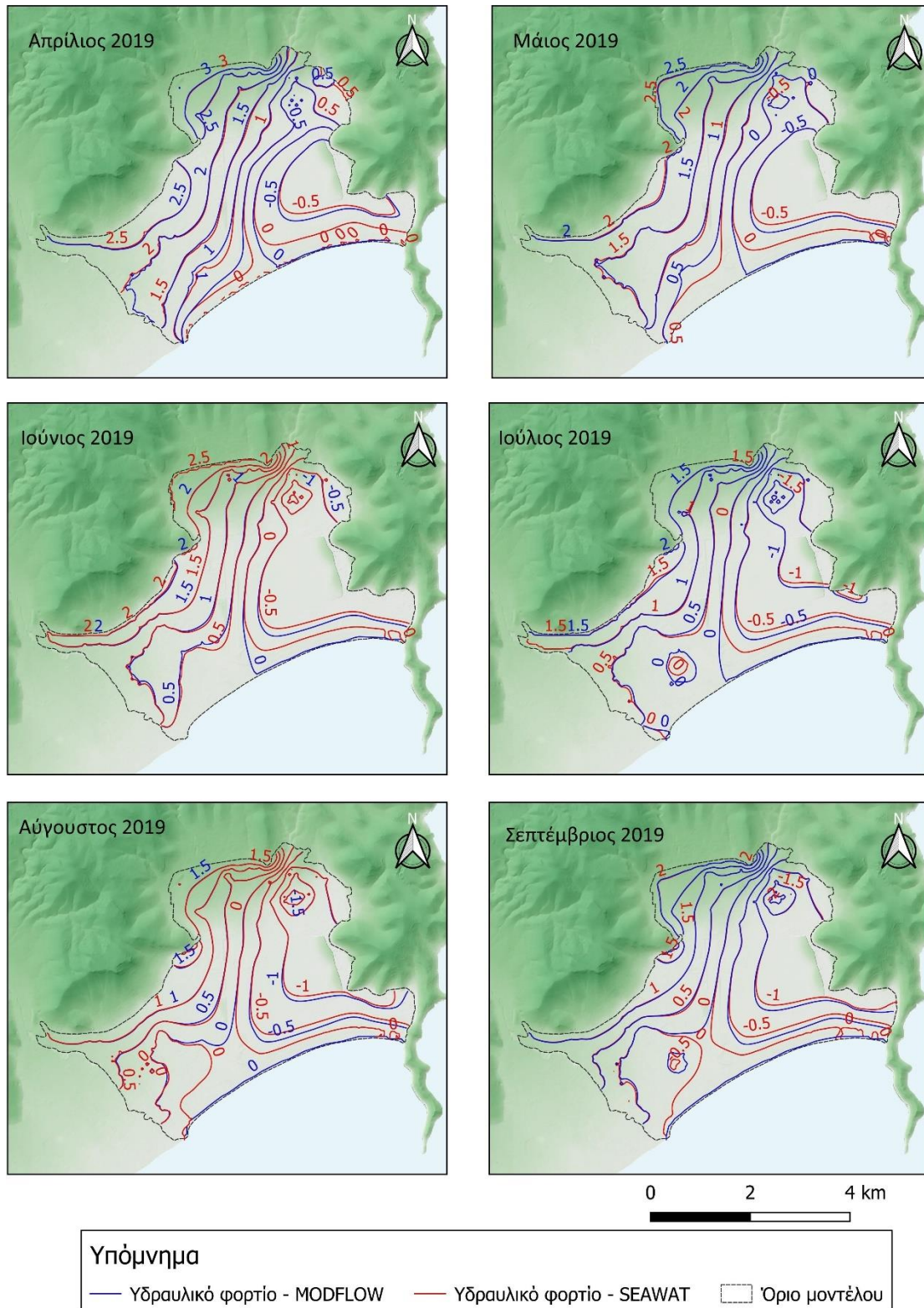
Πίνακας 5.4 Μήκος μετώπου υφαλμύρισης

Στρώμα	Μήκος ζώνης υφαλμύρισης (m) – Δυτική περιοχή	Μήκος ζώνης υφαλμύρισης (m)- Περιοχή έλους
1 <sup>ο</sup> - Υπερκείμενο	230	670
2 <sup>ο</sup> - Ενδιάμεσο	360	750
3 <sup>ο</sup> - Υποκείμενο	460	620

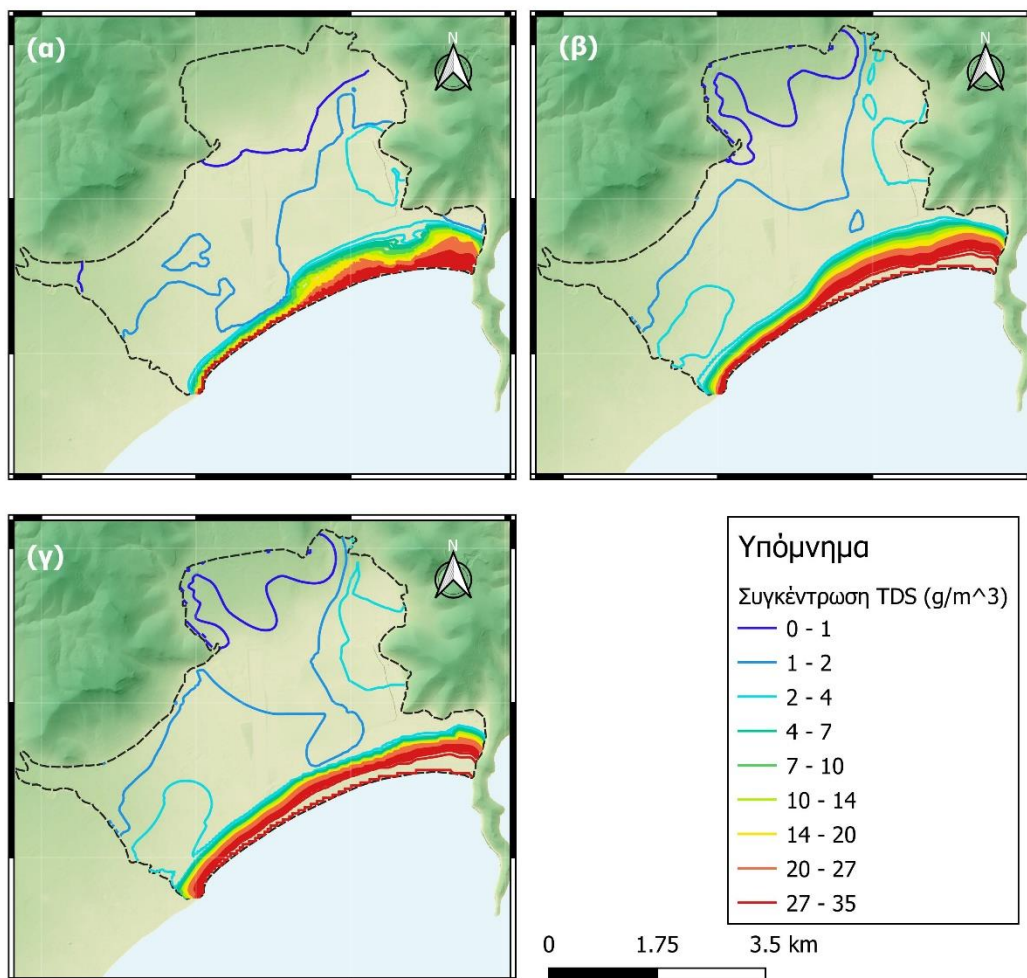




Σχήμα 5.9 Κατανομή υδραυλικού φορτίου για τα μοντέλα ροής (MODFLOW) και μεταβαλλόμενης πυκνότητας (SEAWAT) στην πεδιάδα του Μαραθώνα για την περίοδο Οκτώβριος 2018-Μάρτιος 2019



Σχήμα 5.10 Κατανομή υδραυλικού φορτίου για τα μοντέλα ροής (MODFLOW) και μεταβαλλόμενης πυκνότητας (SEAWAT) στην πεδιάδα του Μαραθώνα για την περίοδο Απρίλιος 2019-Σεπτέμβριος 2019



Σχήμα 5.11 Κατανομή συγκέντρωσης ολικών διαλυμένων στερεών για (α) το 1<sup>ο</sup> υπερκείμενο στρώμα, (β) το 2<sup>ο</sup> ενδιάμεσο στρώμα και (γ) το 3<sup>ο</sup> υποκείμενο στρώμα του προσχωματικού υδροφορέα του Μαραθώνα, βάσει του μοντέλου SEAWAT

Στο Σχήμα 5.12 σχεδιάστηκαν τομές σε χαρακτηριστικές περιοχές του υδοφόρου, στις οποίες φαίνεται η κατανομή των ολικών διαλυμένων στερεών (TDS), όπως προέκυψαν κατά την προσομοίωση της ροής μεταβαλλόμενης πυκνότητας και μεταφοράς ρύπου με τον κώδικα SEAWAT.

Στην τομή A-A' σχηματίζεται η χαρακτηριστική μορφή της θαλάσσιας διείσδυσης καθώς η έκταση της διεπιφάνειας γλυκού- αλμυρού νερού αυξάνεται προς την ενδοχώρα κατά βάθος. Στο κεντρικό τμήμα της τομής, η περιοχή φαίνεται να παρουσιάζει αρκετά υψηλότερη συγκέντρωση ( $3,5-4 \text{ g/m}^3$ ) σε σχέση με την ανάντι περιοχή, η οποία γίνεται εντονότερη κατά βάθος. Η αυξημένη συγκέντρωση στην συγκεκριμένη περιοχή οφείλεται στην δημιουργία κώνου κατά τη διάρκεια και το πέρας της περιόδου των αντλήσεων, όπως φαίνεται άλλωστε και στα αποτελέσματα των μετρήσεων και των μοντέλων ροής και μεταφοράς ρύπου (Σχήμα 5.6, Σχήμα 5.9, Σχήμα 5.10). Οι έντονες αντλήσεις στην συγκεκριμένη περιοχή έχουν οδηγήσει στην ανύψωση της διεπιφάνειας γλυκού- αλμυρού νερού με αποτέλεσμα την αυξημένη συγκέντρωση

ιόντων χλωρίου (Σχήμα 2.7) καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Η ανύψωση της διεπιφάνειας αντικατοπτρίζεται και στην τομή A-A' του μοντέλου, καθώς η συγκέντρωση είναι μεγαλύτερη στο 3<sup>ο</sup> κατώτερο στρώμα ( $\approx 4 \text{ g/m}^3$ ) ενώ εξασθενεί σταδιακά προς το 1<sup>ο</sup> ανώτερο στρώμα ( $\approx 2,5 \text{ g/m}^3$ ), κάτι που φαίνεται και από τις καμπύλες κατανομής TDS (Σχήμα 5.11). Η αλατότητα μειώνεται προς τα ανάντι όπου ο υδροφορέας τροφοδοτείται με νερό χαμηλότερων συγκεντρώσεων από τα Μάρμαρα Μαραθώνα.

Ανατολικότερα της πεδιάδας, στην τομή B-B', η υφάλμυρη ζώνη έχει προχωρήσει προς την ενδοχώρα, ενώ παρουσιάζονται μικρότερες συγκεντρώσεις προς τα ανάντι, σε σχέση με την προηγούμενη τομή. Αυτή η μείωση ενδεχομένως οφείλεται στην παύση των αντλήσεων στην εν λόγω περιοχή καθώς δεν υφίστανται πλέον καλλιέργειες και η περιοχή δομείται με κατοικίες στο μεγαλύτερο της μέρος.

Η τομή Γ-Γ' αποτυπώνει την κατάσταση στην περιοχή του έλους, όπου η θαλάσσια διείσδυση έχει επεκταθεί προς την ενδοχώρα σε πολύ μεγαλύτερη έκταση από το δυτικό τμήμα της πεδιάδας (Πίνακας 5.4). Η εκτεταμένη ζώνη ανάμιξης οφείλεται στην χαμηλή τοπογραφία της περιοχής, η χαμηλή ζώνη του έλους όπως αναφέρει και η Μαργώνη (2006), που σε συνδυασμό με το αρνητικό υδραυλικό φορτίο μειώνεται η υδροστατική πίεση στον υδροφορέα, οδηγώντας στην εισχώρηση της θάλασσας. Κατά μήκος του έλους, η ζώνη ανάμιξης αλμυρού-γλυκού νερού δεν ακολουθεί την τυπική μορφή που παρατηρείται σε παράκτιες περιοχές- αύξηση έκτασης ποδιού κατά βάθος- αφού στο κατώτερο στρώμα η ζώνη ανάμιξης εκτείνεται σε μικρότερο μήκος από την ακτή σε σχέση με το ενδιάμεσο στρώμα στο οποίο η ζώνη έχει επεκταθεί προς την ενδοχώρα κάτι που καταγράφεται και στον πίνακα 5.4. Η ζώνη ανάμιξης κινείται με μικρότερο ρυθμό προς την ενδοχώρα αφού στο κατώτερο στρώμα υφίσταται ζώνη χαμηλότερης υδραυλικής αγωγιμότητας κοντά στην ακτή, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.2, παρεμποδίζοντας την γρήγορη ανάπτυξη του μετώπου θαλάσσιας διείσδυσης στην εν λόγω περιοχή. Ως προς την ποιότητα του νερού στα ανάντι του έλους, στην τομή Γ-Γ' παρουσιάζεται καλύτερη ποιότητα υπόγειου νερού σε σχέση με τις άλλες δύο περιοχές (τομή A-A' και B-B') προς την επαφή του υδροφορέα με τα μάρμαρα. Η μείωση στην συγκέντρωση TDS οφείλεται στις χαμηλές συγκεντρώσεις TDS του καρστικού νερού το οποίο τροφοδοτεί τον αλλουβιακό υδροφορέα στο βόρειο και δυτικό τμήμα του Κάτω Σουλίου, όπως αποδεικνύεται και από την κατανομή των ιόντων χλωρίου στην πεδιάδα και στην καρστική ενότητα (Σχήμα 2.7).



## 6 ΣΥΜΜΕΤΟΧΙΚΕΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΕΧΝΗΤΟΥ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΩΝ ΩΣ ΕΡΓΑΛΕΙΟ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ ΣΕ ΠΑΡΑΚΤΙΟΥΣ ΥΔΡΟΦΟΡΕΙΣ

### 6.1 Η χρήση της συμμετοχικής διαδικασίας στη διαχείριση υδατικών πόρων

Η προσομοίωση υπογείων νερών θεωρείται βασικό εργαλείο για τη διαχείριση υπόγειων υδροφορέων συστημάτων. Ωστόσο, τα κοινωνικά οφέλη που μπορεί να προκύψουν από τη χρήση αυτών των εργαλείων δεν έχουν αξιοποιηθεί πλήρως μέχρι στιγμής. Μία από τις σημαντικότερες εξελίξεις στην προσομοίωση υπόγειων νερών είναι η εφαρμογή τους για την πρόβλεψη των επιπτώσεων των ανθρώπινων δραστηριοτήτων στα τοπικά συστήματα υπόγειων νερών και το παρακείμενο περιβάλλον. Εκτός από την ανάλυση συστημάτων υπόγειας ροής και την προσομοίωση αλλαγών στο υδατικό ισοζύγιο των υδροφορέων, τα μοντέλα υπόγειας ροής χρησιμοποιούνται ευρέως για τη βελτιστοποίηση των σεναρίων διαχείρισης των υδατικών πόρων μίας περιοχής. Σχετικά με το τελευταίο, έχουν αναπτυχθεί και εφαρμοστεί διάφορες μέθοδοι που προωθούν τη συμμετοχή των ενδιαφερόμενων μερών στη διαδικασία μοντελοποίησης των υπόγειων νερών προκειμένου να συμμετάσχουν όλοι οι φορείς που εμπλέκονται στη χρήση ή διαχείριση νερού στη διαδικασία λήψης αποφάσεων. Οι όροι που χρησιμοποιούνται συχνότερα για την εν λόγω μέθοδο είναι η συμμετοχική προσομοίωση/μοντελοποίηση (participatory modelling) ή συνεργατική προσομοίωση/ μοντελοποίηση (collaborative modeling). Οι Basco-Carrera et al. (2017) διαπίστωσαν ότι και οι δύο όροι χρησιμοποιούνται εναλλακτικά λόγω ασαφούς διάκρισης μεταξύ τους στη βιβλιογραφία. Στην έρευνά τους προσπάθησαν να ορίσουν τη διαχωριστική γραμμή μεταξύ της συμμετοχικής και της συνεργατικής μοντελοποίησης χρησιμοποιώντας τη συμμετοχή και τη συνεργασία ως διαφορετικά επίπεδα εμπλοκής των ενδιαφερόμενων. Οι Garduno et al. (2010) στην έρευνά τους σχετικά με τη συμμετοχή των ενδιαφερομένων μερών στη διαχείριση των υπόγειων νερών, υποστήριξαν ότι οι αποφάσεις που λαμβάνονται με αυτή τη διαδικασία μπορούν να έχουν τα παρακάτω οφέλη:

Κοινωνικά οφέλη, αφού προάγουν την ισότητα μεταξύ των χρηστών και αποτρέπουν την πρόσβαση από λίγους στο υπόγειο νερό

Οικονομικά οφέλη, αφού προάγουν την ισορροπία στη χρήση έχοντας ως στόχο τις μακροπρόθεσμες δυνατότητες χρήσης του πόρου, αποφεύγοντας την υπερεκμετάλλευση του και βελτιστοποιώντας το κόστος άντλησης

Τεχνικά οφέλη, καθώς οδηγούν σε καλύτερη εκτίμηση του όγκου αντλήσεων και του ισοζυγίου των υπόγειων νερών.

Διαχειριστικά οφέλη επειδή ενθαρρύνουν τις πρωτοβουλίες των άμεσα ενδιαφερομένων για την εφαρμογή μέτρων ζήτησης και προσφοράς και τη μείωση του συνολικού λειτουργικού κόστους.

Πολλές μελέτες απέδειξαν τη σημασία και την αποτελεσματικότητα της συμμετοχικής προσέγγισης σε δραστηριότητες παρακολούθησης, συλλογής δεδομένων και μοντελοποίησης. Οι Højberg et al. (2013)

χρησιμοποίησαν μια συμμετοχική προσέγγιση σε επίπεδο εθνικής κλίμακας προκειμένου να επικαιροποιήσουν και να βελτιώσουν το μοντέλο διαχείρισης υδατικών πόρων της Δανίας, στο οποίο πραγματοποιήθηκαν βελτιώσεις σε τρία επίπεδα: (1) ενημέρωση βασικών δεδομένων, διατηρώντας το μοντέλο επικαιροποιημένο ως προς τα δεδομένα εισόδου, (2) βελτίωση της κλίμακας του μοντέλου συμπεριλαμβάνοντας νέα ή πιο λεπτομερή δεδομένα και (3) ανακατασκευή του εννοιολογικού. Οι Venkata et al. (2013), στη μελέτη τους για το Συμμετοχικό Πρόγραμμα Διαχείρισης Υπόγειων Νερών στην Ινδία, αναφέρουν ότι η συμμετοχική υδρολογική παρακολούθηση (Participatory hydrological monitoring- PHM) είναι ένα βασικό μέρος του προγράμματος. Το πρόγραμμα περιλαμβάνει το δίκτυο υδρολογικής παρακολούθησης (Hydrological Monitoring Network- HMN), την εκπαίδευση στις τεχνικές παρακολούθησης (PHM training), την καθοδήγηση των συμμετεχόντων, και τέλος την παράδοση του προγράμματος παρακολούθησης. Οι Gaddis και Voiron (2008) κατάφεραν να εμπλέξου πλήρως τα ενδιαφερόμενα μέρη στη διαδικασία μοντελοποίησης, δηλαδή στην ανάπτυξη και τη βαθμονόμηση μοντέλων, τη δοκιμή σεναρίων και την εφαρμογή των αποτελεσμάτων στην λήψη διαχειριστικών αποφάσεων. Οι Voiron και Bousquet (2010) βρήκαν ότι η συμμετοχή των ενδιαφερομένων μερών καθιστά τη διαδικασία μοντελοποίησης πιο αποδοτική, αφού μπορούν να ενσωματωθούν στη μοντελοποίηση νέες πληροφορίες σχετικά με τα συστήματα έτσι ώστε να προσαρμόζονται σε νέους στόχους που καθοδηγούνται από τις ανάγκες λήψης αποφάσεων και διαχείρισης. Ο van Steenberg (2006), στην έρευνά του για την προώθηση της τοπικής διαχείρισης των υπόγειων νερών στη Νότια Ινδία, περιγράφει ένα συμμετοχικό πρόγραμμα υδρολογικής παρακολούθησης και μοντελοποίησης στο οποίο η ανταπόκριση των ενδιαφερομένων μερών ήταν πολύ θετική. Η Re (2015) ανέπτυξε την αποκαλούμενη προσέγγιση «Bir Al-Nas» (Bottom-up Integrated Approach for sustainable groundwater management in rural areas) για τη βιώσιμη διαχείριση υπόγειων νερών σε αγροτικές περιοχές, ως μέθοδο για την ενσωμάτωση της κοινωνικής διάστασης σε υδροχημικές έρευνες και στην μοντελοποίηση για την αγροτική ανάπτυξη.

Η συμμετοχή της τοπικής κοινότητας στην διαχείριση των νερών μίας περιοχής μπορεί να αποτελέσει την λύση σε περιπτώσεις όπου τα κεντρικά σχεδιασμένα προγράμματα αποτυγχάνουν στην επίτευξη των διαχειριστικών στόχων. Ο Sandoval (2004) στη μελέτη του για την ολοκληρωμένη διαχείριση υδροφορέων στην Πολιτεία Guanajuato του Μεξικό, υποστήριξε ότι εφόσον τα κεντρικά ελεγχόμενα συστήματα διαχείρισης έχουν σαφώς αποτύχει να αντιμετωπίσουν το πολύπλοκο ζήτημα της διαχείρισης νερών, μια συμμετοχική προσέγγιση είναι το κλειδί για τη βιώσιμη διαχείριση των υπόγειων νερών. Οι Dungumaro και Madulu (2003) στην έρευνά τους στην Τανζανία, κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η συμμετοχή της κοινότητας θα πρέπει να θεωρείται υποχρεωτική σε οποιαδήποτε αναπτυξιακό έργο. Παράλληλα, οι τοπικές κοινότητες πρέπει να αντιμετωπίζονται ως ισότιμοι εταίροι και να συμμετέχουν πλήρως στο σχεδιασμό, την υλοποίηση και την κατανομή των οφελών για οποιοδήποτε αναπτυξιακό έργο σχετικό με το νερό. Η Rangan (2016) περιγράφει το πρόγραμμα Συμμετοχικής Διαχείρισης Υπόγειων Νερών (Participatory Groundwater Management-PGWM) στην Ινδία, ως ένα μέτρο για την αντιμετώπιση της ανεξέλεγκτης άντλησης υπόγειων νερών. Το πρόγραμμα περιελάμβανε την ενεργό συμμετοχή των τοπικών κοινωνιών στη διαχείριση των

υπόγειων νερών της περιοχής. Το πρόγραμμα PGWM, χρησιμοποιώντας σύγχρονες τεχνικές συμμετοχικής μοντελοποίησης, οδήγησε στην αύξηση της στάθμης των υπόγειων νερών και στην αύξηση της παραγωγής των καλλιεργειών μέσω καθοδήγησης για αποδοτικότερη χρήση του νερού.

Οι συμμετοχικές προσεγγίσεις υποδεικνύονται επίσης ως ένας τρόπος για την επίλυση διαφορών μεταξύ των επιστημόνων και των υπευθύνων λήψης αποφάσεων, επιδιώκοντας κοινή κατανόηση μεταξύ των ενδιαφερομένων και καθορισμό κοινών στόχων διαχείρισης. Οι Baldwin et al. (2012) υποστήριξαν ότι η συμμετοχική μοντελοποίηση μπορεί να οδηγήσει σε: κοινή κατανόηση μεταξύ διαφορετικών συμμετεχόντων (κοινωνική μάθηση), εδραίωση εμπιστοσύνης μεταξύ των διαφορετικών μερών, επιστημονική θεώρηση στον προγραμματισμό και καλύτερη υιοθέτηση των σχεδίων στην πράξη. Οι Jackson et al. (2012) ανέπτυξαν ένα τρισδιάστατο (3D) μοντέλο οπτικοποίησης, μέσω μιας διαδικασίας που περιγράφεται ως Συμμετοχικό Εργαλείο Οπτικοποίησης Υπόγειων Νερών (GVT), που βοήθησε την υπηρεσία διαχείρισης υδάτων να κατανοήσει καλύτερα τις ανάγκες των άμεσα ενδιαφερομένων, συνέβαλε στην μελέτη των υδρογεωλογικών συνθηκών και διεργασιών από τους ειδικούς, και αποτύπωσε τις τοπικές γνώσεις και αξίες στο πλαίσιο της προετοιμασίας για μια ανοιχτή και αποτελεσματική διαδικασία σχεδιασμού για τη διαχείριση. Οι Rouillard et al. (2022), υποστήριξαν ότι μέσω της συμμετοχικής ανάλυσης σεναρίων είναι δυνατό να επιτευχθεί κοινή κατανόηση μεταξύ των υπεύθυνων λήψης αποφάσεων και των διαφορετικών χρηστών για τις προκλήσεις διαχείρισης των υπόγειων νερών σε έναν περιορισμένου υδροφορέα στη Νοτιοδυτική Γαλλία. Σημαντικό επίτευγμα μέσω της συμμετοχικής διαδικασίας ήταν η κατανόηση της αλληλεξάρτησης στη διαχείρισή του πόρου μεταξύ των διαφορετικών χρηστών, ενώ κατέληξαν στο ότι η αφύπνιση των ενδιαφερομένων για τη μελλοντική κατάσταση του υδροφορέα δημιουργεί δέσμευση για συλλογική δράση στα υπόγεια ύδατα.

Η συμμετοχική διαδικασία έχει εφαρμοστεί και στην ανάπτυξη εργαλείων λήψης αποφάσεων με στόχο τη δημιουργία αποτελεσματικών σχεδίων περιβαλλοντικής διαχείρισης και σχεδιασμού. Οι Carmona et al. (2011) κάλεσαν τα ενδιαφερόμενα μέρη να συμμετάσχουν ενεργά στην ανάπτυξη ενός συστήματος υποστήριξης αποφάσεων (DSS) που βασίζεται στον συνδυασμό ενός αγρο-οικονομικού μοντέλου και ενός αντικειμενοστρεφούς μοντέλου δικτύου Bayes. Ο στόχος αυτής της μελέτης ήταν να αξιολογήσει την αντιστάθμιση μεταξύ γεωργίας και προστασίας του περιβάλλοντος για διαφορετικές επιλογές διαχείρισης σε διαφορετικές κλίμακες. Οι Henriksen et al. (2007) χρησιμοποίησαν τα δίκτυα Bayes προκειμένου να εμπλέξουν ενεργά διαχειριστές νερού, τους ειδικούς και τα ενδιαφερόμενα μέρη σε εργαλεία υποστήριξης αποφάσεων (Environmental Decision Support Systems, EDSS) και στη μοντελοποίηση. Οι Jensen και Uddameri (2009) περιγράφουν την περίπτωση της κομητείας Refugio στο Νότιο Τέξας όπου διαφορετικές ομάδες χρηστών νερού στην περιοχή συνεργάστηκαν με ερευνητές του πανεπιστημίου Texas A&M University-Kingsville (TAMUK) για την ανάπτυξη μοντέλων υποστήριξης αποφάσεων που υποστηρίζουν τις ανάγκες των ενδιαφερομένων μερών. Οι Mackenzie et al. (2012) περιγράφουν τη μεθοδολογία «Ερευνα Συμμετοχικής Δράσης (Participatory Action Research-PAR)» που ανέπτυξαν για τη δοκιμή και την αξιολόγηση μιας σειράς εργαλείων. Στόχος των εργαλείων ήταν ενίσχυση της ενεργούς συμμετοχής μελών



της κοινότητας στην διαδικασία σχεδιασμού διαχειριστικού πλάνου για το νερό, αξιολογώντας παράλληλα τους περιορισμούς που υπάρχουν από το Αυστραλιανό πλαίσιο.

Συμπερασματικά, γίνεται αντιληπτό ότι κατά τον σχεδιασμό και την υλοποίηση διαχειριστικών πλάνων για τα υπόγεια νερά, οι συμμετοχικές διαδικασίες μπορεί να θεωρηθούν απαραίτητο εργαλείο, ιδιαίτερα σε περιοχές με πολλαπλές χρήσεις και αντικρουόμενα συμφέροντα σχετικά με το υπόγειο νερό. Οι παράκτιες περιοχές αποτελούν τυπικό παράδειγμα τέτοιων περιπτώσεων, καθώς τα υπόγεια νερά υπόκεινται σε διάφορες χρήσεις όπως οικιακές, γεωργικές ή τουριστικές, ενώ η ζήτηση νερού παρουσιάζει μεγάλη εποχιακή διακύμανση. Η κακή διαχείριση, η αναποτελεσματική και αλόγιστη άντληση υπόγειου νερού σε παράκτιες γεωργικές πεδιάδες έχει οδηγήσει σε φαινόμενα υποβάθμισης του υδροφορέα λόγω εκτεταμένης χρήσης φυτοφαρμάκων σε συνδυασμό με ανεξέλεγκτες αντλήσεις, οδηγώντας πολλές φορές σε διείσδυση θαλασσινού νερού στο υπόγειο υδάτινο στρώμα (Motevalli et al. 2018, Shi and Jiao 2014, Kallioras et al. 2006). Η ενσωμάτωση των συμμετοχικών εργασιών ως μέρος ενός ολοκληρωμένου συστήματος παρακολούθησης και διαχείρισης μπορεί να αποδειχθεί αποτελεσματική διαχειριστική πρακτική για την αποκατάσταση ποσοτικά και ποιοτικά υποβαθμισμένων υδροφορέων. Βασικός γνώμονας τέτοιων πρακτικών θα πρέπει να είναι η εμπλοκή των ενδιαφερόμενων μερών στον προγραμματισμό και την εκτέλεση ενός διαχειριστικού πλαισίου που θα βρίσκεται σε ισορροπία η προστασία και βιωσιμότητα των συστημάτων και η κάλυψη των αναγκών των χρηστών.

Οι ανάγκες των ενδιαφερομένων μερών, όσον αφορά την ποιότητα και την ποσότητα των υπόγειων νερών, δεν μπορούν πάντα να καλυφθούν από τα διαθέσιμα αποθέματα υπόγειων νερών. Η εξασφάλιση των απαιτήσεων νερού καθώς και η μεταξύ προσφοράς και ζήτησης μπορεί να ρυθμιστεί μέσω του Τεχνητού Εμπλουτισμού (T.E.) των υδροφορέων (Managed Aquifer Recharge-MAR), ως λύση για την άνιση εποχιακή κατανομή μεταξύ προσφοράς και ζήτησης και ως μέτρο για την εξυγίανση του υδροφορέα. Ο T.E. είναι η ανθρωπογενής διαδικασία ελεγχόμενης αναπλήρωσης γλυκού νερού σε ένα ποιοτικά ή/ και ποσοτικά υποβαθμισμένο σύστημα υδροφορέα που μπορεί να στοχεύει: (1) στην αποκατάσταση του συστήματος, όσον αφορά τα ποιοτικά και ποσοτικά του χαρακτηριστικά, (2) στην αποθήκευση γλυκού νερού για μελλοντική χρήση. Ο κύριος σκοπός των τεχνολογιών T.E. στις παράκτιες περιοχές είναι η αποκατάσταση του συστήματος υδροφορέων (μερικώς ή πλήρως) ή/και η αναχαίτιση διείσδυσης θαλασσινού νερού στην ηπειρωτική χώρα. Ο T.E. έχει εφαρμοστεί σε διαφορετικές τοποθεσίες σε όλο τον κόσμο όπως και στην περιοχή της Μεσογείου, χρησιμοποιώντας διάφορες τεχνολογίες όπως λίμνες διήθησης, λεκάνες εμπλουτισμού ή εισαγωγή επεξεργασμένου ή γλυκού νερού στον υδροφορέα μέσω γεωτρήσεων (π.χ. Missimer et al. 2012; Casanova et al. 2016; Sprenger et al. 2017· Masciopinto 2013).

## 6.2 Μεθοδολογική προσέγγιση της συμμετοχικής διαδικασίας στην περιοχή του Μαραθώνα

Στην παρούσα έρευνα παρουσιάζεται η συμμετοχική διαδικασία μοντελοποίησης υπόγειας ροής, προκειμένου να προσομοιωθεί η απόκριση του υδροφορέα μετά την εφαρμογή μιας σειράς εναλλακτικών σχημάτων Τ.Ε., όπως ζητήθηκαν από διαφορετικές ομάδες εμπλεκόμενων μερών. Το κύριο πλαίσιο περιλαμβάνει την εφαρμογή Τ.Ε. στο σύστημα του παράκτιου κοκκώδη υδροφορέα του Μαραθώνα προκειμένου να διασφαλιστεί η παροχή νερού άρδευσης για τις ανάγκες της γεωργικής περιοχής. Τα σενάρια μοντελοποίησης σχεδιάστηκαν σύμφωνα με τις συστάσεις και τις απαιτήσεις των τοπικών φορέων της περιοχής, μετά από τη συνάντηση και τη δημιουργία ομάδας εστιασμένης συζήτησης (focus group) στα πλαίσια του ευρωπαϊκού προγράμματος HORIZON 2020 SUBSOL: bringing coastal SUBsurface water SOLutions to the market (<http://www.subsol.org/>). Βασικός στόχος της συνάντησης ήταν η διερεύνηση της απόκρισης των ενδιαφερόμενων μερών στην εφαρμογή καινοτόμων τεχνολογιών Τ.Ε. για αποτελεσματική διαχείριση του υπόγειου νερού στην πεδιάδα του Μαραθώνα και η ενεργός συμμετοχή τους στη διαδικασία λήψης αποφάσεων. Η τεχνολογία Τ.Ε. που παρουσιάστηκε στους ενδιαφερόμενους παρουσιάστηκε αναλυτικά στα κεφάλαια 3 και 4 της παρούσας διατριβής.

Μετά την εφαρμογή των σεναρίων μοντελοποίησης, εισήχθη ένας νέος δείκτης για τη μέτρηση της απόδοσης των σεναρίων διαχείρισης των υπόγειων νερών σε σχέση με τις απόψεις και τις ανάγκες των ενδιαφερομένων. Ο δείκτης συστήνεται να χρησιμοποιηθεί ως υποστηρικτικό εργαλείο σε συμμετοχικές διαδικασίες μοντελοποίησης, προκειμένου να βοηθηθούν τα ενδιαφερόμενα μέρη στη διαδικασία λήψης αποφάσεων μεταξύ διαφορετικών σεναρίων διαχείρισης.

### 6.2.1 Διαδικασία προσομοίωσης

Η προσομοίωση του μοντέλου υπόγειων νερών για το αλλουβιακό σύστημα του Μαραθώνα υλοποιήθηκε χρησιμοποιώντας την πλατφόρμα FREEWAT. Το FREEWAT είναι ένα περιβάλλον μοντελοποίησης ελεύθρου και ανοιχτού κώδικα και ελεύθερης χρήσης ενσωματωμένο σε περιβάλλον GIS για την προσομοίωση της ροής και της ποιότητας στα υπόγεια νερά, παρέχοντας ακόμη εργαλεία για την ολοκληρωμένη διαχείριση και τον σχεδιασμό υδατικών πόρων. Το FREEWAT παρέχεται ως πρόσθετο (plugin) στο δημοφιλές λογισμικό ανοιχτού κώδικα Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών «QGIS». Έως σήμερα έχει χρησιμοποιηθεί σε πολλές μελέτες για την ανάλυση, ερμηνεία και οπτικοποίηση υδρογεωλογικών και υδροχημικών δεδομένων, τη μοντελοποίηση και βαθμονόμηση μοντέλων υπογείου νερού, την επεξεργασία των αποτελεσμάτων και άλλες διαδικασίες που αφορούν την αποτελεσματική διαχείριση των υδάτινων πόρων (π.χ. De Filippis et al. 2020; Criollo et al. 2019· Perdikaki et al. 2020· Koltsida and Kallioras 2019· Rossetto et al. 2019).

Το περιβάλλον προσομοίωσης της πλατφόρμας FREEWAT βασίζεται στους γνωστούς κώδικες της οικογένειας MODFLOW (Harbaugh 2005) – της USGS - που αναλύθηκαν παραπάνω (κεφ. 5) και χρησιμοποιούνται για την ανάλυση συστημάτων υπόγειων νερών. Επιπλέον, η προσομοίωση της μεταφοράς διαλυμένων ουσιών σε υδροφορείς μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω του κώδικα MT3DMS (Zheng 2010), ενώ έως σήμερα είναι η μοναδική ελεύθερη πλατφόρμα που ενσωματώνει τον κώδικα προσομοίωσης ροής μεταβαλλόμενης πυκνότητας SEAWAT (Langevin et al. 2007). Η πλατφόρμα προσομοίωσης ολοκληρώνεται με τη συμπερίληψη γραφικών διεπαφών χρήστη (GUI) για την εκτέλεση αυτοματοποιημένου κώδικα (Poeter et al. 2014) ανάλυσης ευαισθησίας, βαθμονόμησης και αξιολόγησης αβεβαιότητας υδρολογικών μοντέλων.

Για τις ανάγκες της συγκεκριμένης έρευνας, χρησιμοποιήθηκε ένα μερικώς βαθμονομημένο μοντέλο ( $R^2 = 0.67$ ), με στοιχεία που συλλέχθηκαν από τον υδροφορέα του Μαραθώνα για τις περιόδους Οκτώβριος 2015, Μάιος 2016 και Οκτώβριος 2016. Οι οριακές συνθήκες που χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο παρουσιάστηκαν αναλυτικά στο κεφάλαιο 5, ενώ η προσομοίωση εκτελέστηκε με το μοντέλο ροής μεταβαλλόμενης πυκνότητας SEAWAT.

## **6.2.2 Κύριοι στόχοι της συμμετοχικής μοντελοποίησης**

### 6.2.2.1 Εφαρμογή της πειραματικής διάταξης T.E. στη συμμετοχική μοντελοποίηση

Η πιλοτική εγκατάσταση T.E. νότια του κωπηλατοδρομίου κατασκευάστηκε προκειμένου να δοκιμαστεί η δυνατότητα εφαρμογής διαφορετικών μοτίβων επαναπλήρωσης του υφάλμυρου υπόγειου νερού στο ανώτερο προσχωσιγενές στρώμα του παράκτιου υδροφορέα της περιοχής μελέτης. Η πιλοτική εγκατάσταση -κατασκευάστηκε στα πλαίσια του ευρωπαϊκού προγράμματος SUBSOL- αναπτύχθηκε αναλυτικά στα κεφάλαια 3 και 4 της παρούσης. Η βασική ιδέα του T.E. στην περιοχή μελέτης στοχεύει στη χρήση των υφάλμυρων νερών του βαθύτερου καρστικού στρώματος ως πηγή νερού εμπλουτισμού. Κατόπιν κατάλληλης επεξεργασίας, το καρστικό νερό μπορεί να εμπλουτίσει με γλυκό νερό τον ανώτερο προσχωματικό υδροφορέα προκειμένου να ανασταλεί η επίδραση της θαλάσσιας διείσδυσης στην παράκτια ζώνη. Η εγκατάσταση T.E. ενσωματώθηκε στις δραστηριότητες προσομοίωσης μέσω της συμμετοχικής διαδικασίας έτσι ώστε να δοκιμαστεί η εφαρμογή της στις τοποθεσίες που επηρεάζονται περισσότερο από την εισροή θαλασσινού νερού στην πεδιάδα του Μαραθώνα (βλ. ενότητα «Δημιουργία σεναρίων»).

### 6.2.2.2 Συμμετοχή των ενδιαφερόμενων μερών

Το παράκτιο τμήμα του Μαραθώνα είναι ένα τυπικό μεσογειακό σύστημα παράκτιων υδροφορέων, αποτελούμενο από το αλλουβιακό και το καρστικό σύστημα, ενώ η άρδευση καλύπτεται από τοπικούς υπόγειους υδατικούς πόρους. Η ευρύτερη περιοχή περιλαμβάνει ένα ευρύ φάσμα χρήσεων γης και οικονομικών δραστηριοτήτων όπως: (1) γεωργία, με διαφορετικούς τύπους προϊόντων και πρακτικών. (2)

τουριστικές δραστηριότητες. (3) τοποθεσίες αρχαιολογικού ενδιαφέροντος (περιοχή μάχης του Μαραθώνα, Τύμβος Μαραθώνα). (4) φυσικά πάρκα (υγρότοπος του Σχοινιά). (5) τεχνητή λίμνη Μαραθώνα. (6) Ολυμπιακό Κωπηλατοδρόμιο Σχοινιά. (7) χώρος και μουσείο για τον Μαραθώνιο Δρόμο. Λόγω αυτών των δραστηριοτήτων, στην περιοχή δραστηριοποιούνται εννέα ενδιαφερόμενοι φορείς που είτε άμεσα είτε έμμεσα συνδέονται με τη διαχείριση των υπόγειων νερών στην υπό μελέτη περιοχή.

Τα ενδιαφερόμενα μέρη κατηγοριοποιούνται σε πέντε γενικές ομάδες σχετικά με τη συμμετοχή τους στη διαχείριση των υπόγειων νερών, τη χρήση των υπόγειων νερών και τα γενικά οφέλη που θα έχει κάθε ενδιαφερόμενος από τη διατήρηση της καλής κατάστασης των υπόγειων νερών.

*1. Περιβαλλοντικές οργανώσεις:*

Διοικητικό Συμβούλιο Εθνικού Πάρκου Σχοινιά Μαραθώνα: το Δ.Σ. είναι υπεύθυνο για τη διαχείριση και προστασία του Εθνικού Πάρκου του Σχοινιά στο οποίο συμπεριλαμβάνεται και ο υγρότοπος (έλος) και για την εκτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων εντός ή στην περιοχή του Εθνικού Πάρκου, σε σχέση με τυχόν ανθρωπογενείς δραστηριότητες. Κύριο μέλημά τους είναι η διατήρηση της πανίδας και της χλωρίδας στην περιοχή του Εθνικού Πάρκου το οποίο είναι μέρος του δικτύου Natura 2000, ενώ επηρεάζεται άμεσα από την ποσότητα και την ποιότητα των υπόγειων νερών. Η πιλοτική εγκατάσταση Τ.Ε. έχει εγκατασταθεί και λειτουργεί σε τοποθεσία εντός της περιοχής του Εθνικού Πάρκου (τοποθεσίες 1,2 και 3, Σχήμα 6.1).

Δίκτυο Μεσόγειος SOS: περιβαλλοντική μη κυβερνητική οργάνωση (ΜΚΟ) που ασχολείται με ζητήματα που σχετίζονται με το νερό σε εθνικό επίπεδο και είναι ο κύριος εκπρόσωπος εκ μέρους των ΜΚΟ του Εθνικού Συμβουλίου για τα ύδατα. Ασχολούνται άμεσα με την περιοχή μελέτης, αφού είναι μέλος του Δ.Σ. του Εθνικού Πάρκου Σχοινιά Μαραθώνα

*2. Δημόσιες αρχές/υπεύθυνοι λήψης αποφάσεων:*

Αποκεντρωμένη Διοίκηση Αττικής – Διεύθυνση Υδάτων: αρμόδια για την εφαρμογή των σχεδίων διαχείρισης νερών καθώς και την εφαρμογή της περιβαλλοντικής νομοθεσίας και κανονισμών σχετικά με τη διαχείριση των υδατικών πόρων στην περιοχή (Ν. 3199/2003). Είναι φορείς λήψης αποφάσεων και πολιτικής. Συμμετέχουν άμεσα στη διαχείριση των υπόγειων νερών, καθώς ο κύριος στόχος τους για το σύστημα υδροφορέων του Μαραθώνα είναι η εφαρμογή (1) της Οδηγίας 2000/60/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, της 23ης Οκτωβρίου 2000, για τη θέσπιση πλαισίου κοινοτικής δράσης στην τομέας της πολιτικής των υδάτων· και (2) Οδηγία 2006/118/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, της 12ης Δεκεμβρίου 2006, για την προστασία των υπόγειων νερών από τη ρύπανση και την υποβάθμιση (τοποθεσία 4, Σχήμα 6.1).

Τμήμα Διαχείρισης Υδάτινων Πόρων Περιφέρειας Αττικής: η περιφερειακή αρχή αρμόδια για την αδειοδότηση γεωτρήσεων υπόγειων νερών για γεωργούς και οικιακούς χρήστες. Εργάζονται σε συνεργασία με την Αποκεντρωμένη Διοίκηση Αττικής – Διεύθυνση Υδάτων. Ασχολούνται άμεσα με τη διαχείριση των υπόγειων νερών, καθώς ο ρόλος τους είναι να ελέγχουν τα έγγραφα που υποβάλλονται για τη διαδικασία αδειοδότησης (τοποθεσία 4, Σχήμα 6.1).

- Δήμος Μαραθώνα – Τμήμα Ύδρευσης: αρμόδιο για την ύδρευση της ευρύτερης περοχής του Δήμου Μαραθώνα. Το Τμήμα Ύδρευσης διευκολύνει κυρίως την επεξεργασία του νερού που παρέχεται από την Ύδρευση Αθηνών (Εταιρεία Ύδρευσης και Επεξεργασίας Λυμάτων Αθηνών, ΕΥΔΑΠ) και το διανέμει στους ντόπιους χρήστες. Κύριο μέλημά τους είναι η διατήρηση των υπόγειων υδατικών πόρων, καθώς συνδέεται άμεσα με την οικονομική ευημερία της κοινότητας του Μαραθώνα, ως αγροτικής περιοχή. Επιπλέον, ο Δήμος είναι υπεύθυνος για τη μελέτη και κατασκευή δημοσίων έργων στην περιοχή (π.χ. κατασκευή εγκατάστασης Τ.Ε.)
3. Τελικοί χρήστες υπογείου νερού:
- Αγροτικός Συνεταιρισμός Μαραθώνα: αφορά την πλειοψηφία των ντόπιων αγροτών. ως εκ τούτου, οι κύριοι τελικοί χρήστες των υπόγειων νερού της υπό μελέτης περιοχής. Αποτελούν μια σημαντική ομάδα ενδιαφερομένων, καθώς η φυτική παραγωγή εξαρτάται πλήρως από τη διαθεσιμότητα υπόγειων νερών επαρκούς ποσότητας και καλής ποιότητας (τοποθεσία 4, Σχήμα 6.1).
4. Τοπική κοινωνία:
- Εμπορικός Σύλλογος Δήμου Μαραθώνα: αυτός ο τοπικός σύλλογος που εκπροσωπεί τις μικρομεσαίες επιχειρήσεις της περιοχής που ασχολούνται με διάφορες δραστηριότητες, κυρίως εμπορικές και υπηρεσίες (όχι τουριστικές). Ενδιαφέρονται για την οικονομική ανάπτυξη και την περιβαλλοντική κατάσταση της περιοχής, αλλά δεν συμμετέχουν άμεσα στη διαχείριση των υδατικών πόρων. Η εμπλοκή τους είναι ως επί το πλείστον απλοί χρήστες (στο ίδιο επίπεδο με τα νοικοκυριά), αλλά ενδιαφέρονται για την αποτελεσματική διαχείριση των υπόγειων νερών για το περιβαλλοντικό και οικονομικό όφελος της κοινότητας
5. Άλλες δημόσιες υπηρεσίες/οργανισμοί:
- i. Εφορία Αρχαιοτήτων Ανατολικής Αττικής (Υπουργείο Πολιτισμού): πρόκειται για σημαντικό οργανισμό που δραστηριοποιείται στην περιοχή, αφού η παράκτια πεδιάδα ήταν το κύριο πεδίο της Μάχης του Μαραθώνα το 490 π.Χ., κατά την πρώτη περσική εισβολή στην Ελλάδα. Εμπλέκονται άμεσα στην περιοχή, αφού τυχόν γεωτρητικές δραστηριότητες ή/και γεωφυσικές έρευνες υπόκεινται στην άδεια της Εφορείας. Κύριο ενδιαφέρον τους είναι η διατήρηση της αλατότητας των υπόγειων νερών σε χαμηλά επίπεδα, ώστε να μην επηρεαστεί αρνητικά το υπέδαφος του αρχαιολογικού χώρου (θέσεις 1, 3, 4, Σχήμα 6.1).
  - ii. Εταιρεία Υδρεύσεως και Αποχετεύσεως Πρωτευούσης Α.Ε. (ΕΥΔΑΠ): υπεύθυνη για την ύδρευση και το αποχετευτικό σύστημα της Αθήνας. Η ΕΥΔΑΠ σχετίζεται άμεσα και με τη διαχείριση υδατικών πόρων της περιοχής μελέτης, αφού στην περιοχή ενδιαφέροντος βρίσκεται ένας από τους ταμειυτήρες ύδρευσης της εταιρείας (φράγμα Μαραθώνα). Εκτός από αυτό, ενδιαφέρονται να διατηρήσουν μια καλή κατάσταση ποιότητας των υπόγειων νερών, ώστε να ελαχιστοποιηθεί η χρήση του γλυκού νερού από το σύστημα ύδρευσης για ορισμένες χρήσεις όπως το πότισμα κήπων (τοποθεσίες 5 και 6, Σχήμα 6.1).



Σχήμα 6.1 Θέματα διαχείρισης υπογείων νερών των εμπλεκόμενων φορέων στην περιοχή του Μαραθώνα

Κατά τη διάρκεια του συμμετοχικού εργαστηρίου προσήλθαν συνολικά 28 συμμετέχοντες και 5 συντονιστές προκειμένου να συντονίσουν το εργαστήριο και τις ομαδικές συνομιλίες. Οι συμμετέχοντες χωρίστηκαν σε τρεις διαφορετικές μικτές ομάδες με στόχο ο κάθε ενδιαφερόμενος να μπορεί να συζητήσει την άποψη του. Τρεις κύριοι θεματικοί τομείς συζητήθηκαν σε κάθε ομάδα εστιασμένης συζήτησης:

**Θέμα 1. Προκλήσεις στη διαχείριση των υπόγειων νερών του Μαραθώνα.** Το κύριο θέμα που σχετίζεται με τη διαχείριση των υπόγειων νερών, σε κάθε τραπέζι συζήτησης, βρέθηκε ότι είναι η τρέχουσα πρακτική χρήσης του υπογείου νερού από την πλειονότητα των αγροτών, αφού δεν υπάρχει σχεδιασμός πλάνου αρδεύσεων για την βιώσιμη και αποτελεσματική αξιοποίηση των αποθεμάτων υπόγειου νερού. Όλοι οι συμμετέχοντες συμφώνησαν ότι υπάρχει πρόβλημα με την ποιότητα των υπόγειων νερών λόγω των υψηλών επιπέδων αλατότητας. Ορισμένοι αγρότες τόνισαν ότι στο τέλος της ξηρής περιόδου (Αύγουστος-Σεπτέμβριος) υπάρχει μείωση της στάθμης των υπόγειων νερών, έτσι ώστε ορισμένα ρηχά πηγάδια κοντά στην ακτή να στερεύσουν, αλλά κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι το μεγαλύτερο πρόβλημα είναι η υψηλή αλατότητα σε όλη την πεδιάδα. Τα παράνομα πηγάδια που είναι εγκατεστημένα σε όλη την πεδιάδα ήταν επίσης ένα αμφιλεγόμενο θέμα μεταξύ των αγροτών και των δημοσίων αρχών, καθώς μια ομάδα αγροτών στον Αγροτικό Συνεταιρισμό πιστεύει ότι μετά τη νομιμοποίηση ενός πηγαδιού ενδέχεται να χρεωθούν για το αντλούμενο νερό. Όλοι οι συμμετέχοντες συμφώνησαν ότι υπάρχει ανάγκη για ευαισθητοποίηση των αγροτών στο θέμα της υπεράντλησης του υπόγειου νερού και αποφάσισαν επίσης ότι είναι ζωτικής σημασίας για τις αρχές να λάβουν μέτρα κατά της περαιτέρω υποβάθμισης του υδατικού πόρου. Ο

εκπρόσωπος του Διοικητικού Συμβουλίου του Εθνικού Πάρκου Σχινιά επεσήμανε ότι αυτή ήταν η πρώτη προσπάθεια να έρθουν κοντά όλοι οι εμπλεκόμενοι στον τομέα της διαχείρισης των υπόγειων νερών και πρόσθεσε ότι αυτή θα πρέπει να είναι η αρχή μιας παραγωγικής συζήτησης για την κατανόηση των αναγκών και των προβλημάτων σχετικά με τη διαχείριση υδατικών πόρων στην περιοχή.

*Θέμα 2. Λύσεις διαχείρισης υπόγειων νερών.* Κατά τη διάρκεια αυτού του μέρους του συμμετοχικού εργαστηρίου, συζητήθηκαν τέσσερις διαφορετικές λύσεις προκειμένου να αντιμετωπιστούν τα ζητήματα ποιότητας και ποσότητας των υπόγειων νερών. Οι λύσεις που πρότειναν οι συντονιστές του συνεργείου ήταν «δημιουργία υδραυλικού φράγματος», «κατασκευή στεγανού τοίχου», «τεχνητός εμπλουτισμός υδροφορέα» και «προσαρμογή του καθεστώτος άντλησης». Μια σύντομη παρουσίαση κάθε μεθόδου έγινε στους συμμετέχοντες. Οι δύο πρώτες επιλογές έλαβαν περισσότερα αρνητικά σχόλια παρά θετικά λόγω του υψηλού κόστους κατασκευής και της πολυπλοκότητας. Οι δύο τελευταίες επιλογές έλαβαν περισσότερα θετικά παρά αρνητικά σχόλια. Στη συνέχεια, η εφαρμογή της πιλοτικής εγκατάστασης Τ.Ε. (κεφ. 3) παρουσιάστηκε στους συμμετέχοντες του συμμετοχικού εργαστηρίου. Γενικά, η πλειονότητα των συμμετεχόντων θεώρησε ότι είναι μια εφικτή μέθοδος για την πεδιάδα του Μαραθώνα ενώ οι αγρότες συμφώνησαν με την ιδέα της αξιοποίησης του καρστικού νερού καθώς θεωρείται «νερό υψηλής ποιότητας» στην περιοχή.

*Θέμα 3. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του Τ.Ε. και πιθανή εφαρμογή της προτεινόμενης εγκατάστασης Τ.Ε. για αποτελεσματική διαχείριση των υπόγειων νερών.* Στη συνέχεια του εργαστηρίου ζητήθηκε από τους συμμετέχοντες να ψηφίσουν για τα υπέρ και τα κατά μιας εγκατάστασης Τ.Ε. στην περιοχή. Τα μειονεκτήματα που ψηφίστηκαν με απόλυτη πλειοψηφία ήταν, πρώτον, το κόστος και η χρηματοδότηση μιας τέτοιας κατασκευής και, δεύτερον, η κοινωνική αποδοχή του Τ.Ε.. Για τις θετικές επιπτώσεις της εγκατάστασης Τ.Ε. στον Μαραθώνα, οι ενδιαφερόμενοι ψήφισαν ως μεγάλα πλεονεκτήματα την περιβαλλοντική αναβάθμιση και τη βελτίωση της ποιότητας των υπόγειων νερών. Παρόλο που υπήρχε σημαντική ανησυχία για το κόστος και τη χρηματοδότηση μιας τέτοιας εγκατάστασης, όλοι οι συμμετέχοντες συμφώνησαν ότι είναι πιο σημαντικό να καταρτιστεί ένα σχέδιο διαχείρισης υπογείων νερών για να διασφαλιστεί η προσβασιμότητα του υπογείου νερού στο μέλλον ενώ παράλληλα να ελαχιστοποιηθούν οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Οι διαχειριστές του Εθνικού Πάρκου Σχινιά Μαραθώνα πίστευαν ότι η εγκατάσταση Τ.Ε. στην περιοχή θα ήταν πολύ επωφελής για τον Εθνικό Δρυμό καθώς ο υποβαθμισμένος σήμερα υγρότοπος θα μπορούσε σταδιακά να βελτιωθεί. Στα βόρεια του υγροτόπου, η περιοχή του Κάτω Σουλίου έχει σοβαρά προβλήματα λόγω των εκτεταμένων αντλήσεων και, ως εκ τούτου, τα υπόγεια ύδατα που διαφορετικά θα κατέληγαν στον υγρότοπο αντλούνται πλέον για αρδευτικούς σκοπούς. Εξήγησαν ότι το υπόγειο νερό είναι πολύ σημαντικό για τη διατήρηση της φυτικής ζωής σε όλο τον υγρότοπο κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού. Ορισμένοι συμμετέχοντες από τον Δήμο Μαραθώνα και το Τμήμα Διαχείρισης Υδατικών Πόρων της Περιφέρειας Αττικής ανταποκρίθηκαν πολύ θετικά στην ιδέα

μιας ενδεχόμενης αναβάθμισης της εγκατάστασης Τ.Ε. προκειμένου να αυξηθεί η ακτίνα επιρροής. Οι συμμετέχοντες από πλευράς Δήμου Μαραθώνα πρόσθεσαν ότι αρκετές εγκαταστάσεις Τ.Ε. μικρής κλίμακας σε χωράφια σε όλη την πεδιάδα θα ήταν πολύ χρήσιμες για την περίπτωση του Μαραθώνα, καθώς για η χωροθέτηση μιας εγκατάστασης πλήρους κλίμακας θα ήταν ένα ζήτημα λόγω του ιδιοκτησιακού καθεστώτος στην πεδιάδα. Όσοι ήταν ειδικοί στον τομέα των υπόγειων νερών υποστήριξαν ότι η έγχυση νερού μέσω ενός οριζόντιου φρεατίου θα μπορούσε να είναι πιο αποτελεσματική από μια κάθετη γεώτρηση, ειδικά στα ρηχότερα μέρη της ανώτερης μονάδας υδροφορέα. Ο εκπρόσωπος της «Αποκεντρωμένης Διοίκησης Αττικής» υποστήριξε ότι η μονάδα επεξεργασίας νερού (RO/AO) πρέπει να αναβαθμιστεί στη μέγιστη δυνατότητα λειτουργίας (100 m<sup>3</sup>/ημέρα) προκειμένου να επιτελιτευχθεί βραχυπρόθεσμα καλύτερη ποιότητα υπόγειων νερών και θεώρησε επίσης σημαντικό να προβλεφθεί η ακτίνα επιρροής σε διαφορετικά σχήματα Τ.Ε., έτσι ώστε περισσότεροι παραγωγοί να επωφελούνται από την κάθε . Οι συμμετέχοντες των δημοσίων αρχών πρόσθεσαν επίσης ότι η κινητικότητα της μονάδας επεξεργασίας νερού είναι σημαντικό πλεονέκτημα όλης της υποδομής, καθώς υπάρχει δυνατότητα παροχής επεξεργασμένου νερού σε διαφορετικά σημεία της πεδιάδας, γεγονός που μειώνει το κόστος κατασκευής, συντήρησης και λειτουργίας σε περίπτωση εγκατάστασης πολλαπλών διατάξεων Τ.Ε. μικρής κλίμακας. Όσον αφορά το φρεάτιο άντλησης που χρησιμοποιήθηκε στην πιλοτική εγκατάσταση, ένας αγρότης ανέφερε ότι στην πράξη ένα πηγάδι άντλησης (για την άντληση υφάλμυρου νερού κατά την τεχνητή φόρτιση) δεν είναι απαραίτητο εάν οι εγκαταστάσεις κατασκευάζονται εντός της αρδευόμενης περιοχής. Αντίθετα, το οριζόντιο πηγάδι θα μπορούσε να τοποθετηθεί κοντά σε υφιστάμενες αρδευτικές γεωτρήσεις, ενώ η τεχνητή φόρτιση θα γινόταν κατά την άρδευση. Η πρόταση κέρδισε το ενδιαφέρον των συμμετεχόντων, ενώ οι αγρότες έδειξαν θετική στάση για τον ρόλο τους στη διάδοση της ιδέας του Τ.Ε. μεταξύ άλλων παραγωγών.

#### 6.2.2.3 Δημιουργία διαχειριστικών σεναρίων

Με βάση το συμμετοχικό εργαστήριο που διεξήχθη, τα σεναρία μοντελοποίησης που πρότειναν οι ενδιαφερόμενοι χωρίστηκαν σε δύο διακριτές κατηγορίες—αυτές που περιλαμβάνουν μικρές προσαρμογές της πιλοτικής εγκατάστασης Τ.Ε. (όπως περιγράφεται στο Κεφάλαιο 3) και εκείνων που δεν περιλαμβάνουν την εφαρμογή Τ.Ε.. Για την πρώτη κατηγορία, οι προσαρμογές αφορούσαν κυρίως την διάταξη της γεώτρησης (οριζόντια, κάθετη ή συνδυασμό και των δύο) κατά την κατασκευή των έργων και οι περιορισμοί προήλθαν είτε από ζητήματα ιδιοκτησιακού καθεστώτος είτε από την ύπαρξη αρχαιολογικών αντικειμένων στο υπέδαφος. Το σενάριο της μη εφαρμογής MAR αναπτύχθηκε ως βασικό σενάριο που στόχευε την αποκατάσταση του υδροφορέα μέσω της τροποποίησης στο καθεστώς άντλησης υπόγειων νερών από τις υφιστάμενες γεωτρήσεις και πηγάδια.

Η ανάπτυξη των σεναρίων διαχείρισης υπογείου νερού σε σχέση με τις λύσεις που σχεδιάστηκαν μετά από τη σύνθεση των συζητήσεων με τους τοπικούς ενδιαφερόμενους, συνοψίζονται ως εξής:

Σενάριο 1: Εφαρμογή της πιλοτικής διάταξης με τα τυπικά χαρακτηριστικά της μονάδας επεξεργασίας και της λειτουργίας Τ.Ε. με το οριζόντιο φρεάτιο επαναφόρτισης και το κάθετο φρεάτιο άντλησης, όπως



εφαρμόστηκε στον πιλοτικό χώρο του Σχινιά (κεφ. 3). Αυτό το σενάριο δημιουργήθηκε για να διερευνηθεί η απόδοση πολλών εγκαταστάσεων Τ.Ε. μικρής κλίμακας με τα ακριβή χαρακτηριστικά της πιλοτικής εγκατάστασης.

Σενάριο 2: Εφαρμογή της πιλοτικής εγκατάστασης με τα τυπικά χαρακτηριστικά της μονάδας επεξεργασίας νερού και εφαρμογή Τ.Ε. χωρίς παράλληλη άντληση από το κάθετο φρεάτιο. Το σενάριο δημιουργήθηκε σε σχέση με την πρόταση των αγροτών να κατασκευαστούν τα οριζόντια φρεάτια δίπλα σε αρδευτικά φρεάτια προκειμένου να αντικατασταθεί το αντλούμενο νερό.

Σενάριο 3: Εφαρμογή της πιλοτικής εγκατάστασης με αναβάθμιση της μονάδας επεξεργασίας νερού λαμβάνοντας υπόψη την πρόταση του εκπροσώπου της «Αποκεντρωμένης Διοίκησης Αττικής» και διατηρώντας τα ίδια χαρακτηριστικά για τη μονάδα Τ.Ε. χωρίς το κάθετο φρεάτιο. Το κάθετο φρεάτιο δεν συμπεριλήφθηκε στις εγκαταστάσεις ΜΑΡ, αφού λήφθηκαν υπόψη τα αποτελέσματα των δύο προηγούμενων σεναρίων.

Σενάριο 4: Εφαρμογή της πιλοτικής εγκατάστασης με αναβάθμιση της μονάδας επεξεργασίας νερού και της εφαρμογής Τ.Ε. χωρίς το κάθετο φρεάτιο, βάσει της άποψης της ομάδας ενδιαφερόμενων «Δημόσιες αρχές/υπεύθυνοι λήψης αποφάσεων» για αύξηση της ζώνης επιρροής Τ.Ε..

Σενάριο 5: Τροποποίηση του υφιστάμενου καθεστώτος άντλησης στην περιοχή, χωρίς την εφαρμογή Τ.Ε.. Το σενάριο δημιουργήθηκε βάσει των θετικών σχολίων όλων των συμμετεχόντων σχετικά με την προσαρμογή του καθεστώτος άντλησης ως μία πρακτική διαχείρισης «χαμηλού κόστους» για την εξυγίανση του υπόγειου νερού.

Λεπτομερής ανάλυση των σχεδιασμένων σεναρίων δίνεται στην ενότητα 6.3.1.

#### 6.2.2.4 Ανάπτυξη μεθοδολογίας για τη λήψη αποφάσεων

Το καλύτερο διαχειριστικό σενάριο σε μια μελέτη μπορεί να είναι ένα αμφιλεγόμενο ζήτημα μεταξύ ειδικών και ενδιαφερομένων μερών, ενώ κάθε λύση συνήθως παρουσιάζει ταυτοχρόνως πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα τα οποία είναι δύσκολο να αξιολογηθούν. Η πλειοψηφία των ενδιαφερομένων στη συμμετοχική προσέγγιση του Μαραθώνα δεν είχαν επιστημονικό υπόβαθρο σε σχέση με τη διαχείριση νερών για να αξιολογήσουν τα αποτελέσματα ενώ πολλές φορές το καλύτερο διαχειριστικό σενάριο δεν είναι εμφανές για τους επιστήμονες και τους ειδικούς. Για αυτόν τον λόγο δημιουργήθηκε ένα εργαλείο το οποίο μπορεί να λειτουργήσει υποστηρικτικά στη διαδικασία λήψης διαχειριστικών αποφάσεων, αξιολογώντας τις προγνώσεις των μοντέλων. Τα αποτελέσματα του μοντέλου παρουσιάστηκαν στα ενδιαφερόμενα μέρη μαζί με το υποστηρικτικό εργαλείο λήψης αποφάσεων, σε μια δεύτερη σύντομη συνάντηση. Κατά τη διάρκεια αυτής της συνάντησης, τα ενδιαφερόμενα μέρη συνεργάστηκαν με τους συντονιστές και συζήτησαν τα κριτήρια για την επιλογή των καταλληλότερων σεναρίων.

Για την αξιολόγηση των παραγόμενων σεναρίων στον Μαραθώνα, λήφθηκαν υπόψη τρία κριτήρια για τον προσδιορισμό της καλύτερης λύσης, σύμφωνα με τις απόψεις και τις ανάγκες των ενδιαφερομένων που καταγράφηκαν στη διάρκεια της συμμετοχικής διαδικασίας: όγκος νερού εμπλουτισμού, μέγιστη μείωση ρύπων και ακτίνα επιρροής διαχειριστικών μέτρων. Η σημαντικότητα του κάθε κριτηρίου προσδιορίστηκε

μέσω της μεθόδου Αναλυτικής Ιεραρχικής Διαδικασίας (Analytic Hierarchy Process-AHP), όπως εισήχθη από τον Saaty (1987). Πρόκειται για μια διαδικασία ιεράρχησης του προβλήματος εκφράζοντας την βαρύτητα των επιμέρους παραμέτρων, μέσω διμερών συγκρίσεων (Saaty & Kearns, 1991). Συγκεκριμένα, χρησιμοποιείται μια κλίμακα 9 επιπέδων, όπου το 1 αντιστοιχεί σε «ίση σπουδαιότητα» μεταξύ των δύο στοιχείων υπό σύγκριση, και το 9 υποδεικνύει «εξαιρετικά ισχυρή σπουδαιότητα» του ενός στοιχείου έναντι του άλλου, δημιουργώντας έναν πίνακα κριτηρίων ανά ζεύγη. Όσο μεγαλύτερη είναι η ένταση, τόσο μεγαλύτερη είναι η σημασία του κριτηρίου. Για αυτή την συγκεκριμένη έρευνα, η σύγκριση μεταξύ των κριτηρίων φαίνεται στον 6.1.

Πίνακας 6.1 Διμερής σύγκριση για τα τρία κριτήρια

	<b>Όγκος νερού εμπλουτισμού</b>	<b>Μέγιστη μείωση ρύπων</b>	<b>Ακτίνα επιρροής</b>
<b>Όγκος νερού εμπλουτισμού</b>	<b>1</b>	4	3
<b>Μέγιστη μείωση ρύπων</b>	1/4	<b>1</b>	1/2
<b>Ακτίνα επιρροής</b>	1/3	2	<b>1</b>

Ο «Όγκος νερού εμπλουτισμού» είναι η ποσότητα του αντλούμενου νερού προς εξεργασία στη μονάδα RO/AO και αντανakλά την ενέργεια που θα καταναλωθεί κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας καθώς και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Με άλλα λόγια, όσο περισσότερος όγκος νερού αντλείται για επαναπλήρωση στο ανώτερο στρώμα, προστίθεται επιπλέον κόστος κατά τη διαδικασία T.E. και περισσότερο νερό απομακρύνεται από τον καρστικό υδροφορέα. Κατά συνέπεια, αυτό το κριτήριο είχε μεγάλη σημασία για τα ενδιαφερόμενα μέρη. Η ακτίνα επίδρασης της εγκατάστασης T.E. θεωρήθηκε πιο σημαντικό κριτήριο από τη μέγιστη μείωση της αλατότητας, έτσι ώστε περισσότεροι αγρότες να μπορούν να επωφεληθούν βραχυπρόθεσμα από κάθε εγκατάσταση T.E..

Στη συνέχεια της αναλυτικής ιεραρχικής διαδικασίας, αποδίδεται βάρος σε κάθε κριτήριο, βάσει του παρακάτω τύπου:

$$w_i = \frac{(\prod_{i=1}^3 a_{ij})^{\frac{1}{3}}}{\sum_{i=1}^3 (\prod_{i=1}^3 a_{ij})^{\frac{1}{3}}} \quad (6.1)$$

Όπου  $w_i$  είναι το βάρος του κριτηρίου  $i$  και  $a_{ij}$  είναι η προτίμηση της μεταβλητής  $i$  σε σχέση με τη μεταβλητή  $j$  με βάση την κλίμακα που προτείνει ο Saaty (1987) και παρουσιάστηκε στον πίνακα 1.

Πριν από την εφαρμογή των συντελεστών βαρύτητας για τον υπολογισμό του προτεινόμενου δείκτη, πρέπει να προσδιοριστεί η συνέπεια της μεθόδου AHP με βάση τον «λόγο συνέπειας» (Consistency Ratio-CR). Το CR δεν πρέπει να υπερβαίνει το 10% και υπολογίζεται με βάση τις επόμενες εξισώσεις:

$$CI = \frac{\bar{\mu} - n}{n - 1} \quad (6.2)$$

Όπου όπου  $CI$  είναι ο δείκτης συνέπειας,  $\bar{\mu}$  είναι το μέσο διάνυσμα συνέπειας και  $n$  είναι ο αριθμός των μεταβλητών (δηλαδή, 3).

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (6.3)$$

Όπου  $RI$  είναι ο δείκτης τυχαίας συνέπειας και όπως προτείνεται από τον Saaty (1987) για τρεις μεταβλητές/κριτήρια είναι ίσος με 0,58. Για την περίπτωση υπολογίστηκε  $CR = 1,9\%$ .

Το βάρος που υπολογίστηκε για το κάθε κριτήριο φαίνεται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 6.2 Βαρύτητα κριτηρίων

Κριτήριο	Βάρος
Όγκος νερού εμπλουτισμού	0,62
Μέγιστη μείωση ρύπων	0,14
Ακτίνα επιρροής	0,24

Προκειμένου να γίνει αδιαστατοποίηση στις μεταβλητές διαφορετικών μονάδων μέτρησης (όγκος νερού σε  $m^3/ημέρα$ , αλατότητα σε TDS, δηλ.  $g/m^3$  και ακτίνα επιρροής σε  $m$ ), χρησιμοποιήθηκε η παρακάτω εξίσωση για κάθε μεταβλητή/κριτήριο:

$$y_i = \frac{(x_i - \bar{x}_i)}{\sigma_{x_i}} \quad (6.4)$$

Όπου  $x_i$  είναι η τιμή της μεταβλητής/κριτηρίου  $i$  σε κάθε σενάριο,  $\bar{x}_i$  είναι η μέση τιμή όλων των σεναρίων για το συγκεκριμένο κριτήριο και  $\sigma_{x_i}$  είναι η τυπική απόκλιση όλων των σεναρίων για το συγκεκριμένο κριτήριο.

Τέλος, ο δείκτης του κάθε σεναρίου υπολογίζεται με την ακόλουθη εξίσωση:

$$Index = \sum_{i=1}^3 E_i * W_i * y_i \quad (6.5)$$

όπου  $E_i$  είναι η θετική ή αρνητική επίδραση κάθε κριτηρίου/μεταβλητής με τιμές 1 ή -1 αντίστοιχα. Ο υψηλότερος δείκτης αντιστοιχεί στο βέλτιστο σενάριο διαχείρισης για τον κοκκώδη υδροφόρα του Μαραθώνα.

## 6.3 Αποτελέσματα

### 6.3.1 Διαχειριστικά σενάρια

Τα χαρακτηριστικά των σεναρίων που προέκυψαν από τη συμμετοχική διαδικασία παρουσιάζονται παρακάτω:

#### Σενάριο 1

Το σενάριο περιλαμβάνει την εφαρμογή πολλαπλών εγκαταστάσεων της πιλοτικής διάταξης Τ.Ε. στα δύο πιο υποβαθμισμένα τμήματα του υδροφορέα του Μαραθώνα που επισημαίνονται στο κεφάλαιο 2 και 5 (πεδιάδα Μαραθώνας και Κάτω Σούλι) για την αντιμετώπιση του προβλήματος της υπεράντλησης και της διείσδυσης του θαλασσινού νερού. Η εφαρμογή του συγκεκριμένου σεναρίου στο μοντέλο έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- Χρονική διακριτοποίηση: 13 περίοδοι φόρτισης, τα χρονικά βήματα είναι σύμφωνα με τον αριθμό των ημερών για κάθε μήνα
- Ρυθμός εμπλουτισμού στην οριζόντια γεώτρηση:  $60 \text{ m}^3/\text{ημέρα}$  ( $2,5 \text{ m}^3/\text{h}$ ) για κάθε διάταξη Τ.Ε.
- Ρυθμός άντλησης (κάθετο φρεάτιο):  $24 \text{ m}^3/\text{ημέρα}$  ( $1 \text{ m}^3/\text{h}$ ) για κάθε εγκατάσταση
- Αριθμός εγκαταστάσεων Τ.Ε.: 12

#### Σενάριο 2

Το 2<sup>ο</sup> σενάριο περιλαμβάνει την εφαρμογή πολλών εγκαταστάσεων Τ.Ε. μικρής κλίμακας (στα πρότυπα της πιλοτικής εγκατάστασης) στις δύο πληγείσες περιοχές του υδροφορέα Μαραθώνα (ΝΑ και ΒΔ τμήματα) για την αντιμετώπιση του προβλήματος της υπεράντλησης και της διείσδυσης θαλασσινού νερού. Η εφαρμογή του σεναρίου στην προσομοίωση έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- Χρονική διακριτοποίηση: 13 περίοδοι φόρτισης, τα χρονικά βήματα είναι σύμφωνα με τον αριθμό των ημερών για κάθε μήνα
- Ρυθμός εμπλουτισμού στην οριζόντια γεώτρηση:  $60 \text{ m}^3/\text{ημέρα}$  ( $2,5 \text{ m}^3/\text{h}$ ) για κάθε διάταξη Τ.Ε.
- Αριθμός εγκαταστάσεων Τ.Ε.: 12

#### Σενάριο 3

Το 3<sup>ο</sup> σενάριο περιλαμβάνει την εφαρμογή πολλών εγκαταστάσεων Τ.Ε. μικρής κλίμακας (στα πρότυπα της πιλοτικής εγκατάστασης) στις περισσότερο υποβαθμισμένες περιοχές της πεδιάδας του Μαραθώνα (Μαραθώνα και Κάτω Σούλι) για την αντιμετώπιση του προβλήματος της υπεράντλησης και της διείσδυσης θαλασσινού νερού. Το σενάριο περιλαμβάνει αναβάθμιση της μονάδας επεξεργασίας νερού, μέσω της παραγωγής μεγαλύτερου όγκου αφαλατωμένου νερού για επαναφόρτιση.

- Χρονική διακριτοποίηση: 13 περίοδοι φόρτισης, τα χρονικά βήματα είναι σύμφωνα με τον αριθμό των ημερών για κάθε μήνα

- Ρυθμός εμπλουτισμού στην οριζόντια γεώτρηση:  $96 \text{ m}^3/\text{ημέρα}$  ( $4 \text{ m}^3/\text{h}$ ) για κάθε διάταξη Τ.Ε.
- Αριθμός εγκαταστάσεων Τ.Ε.: 12

#### Σενάριο 4

Το σενάριο 4 περιλαμβάνει την εφαρμογή δύο εγκαταστάσεων Τ.Ε. στις δύο περιοχές με την μεγαλύτερη ποιοτική και ποσοτική υποβάθμιση (Μαραθώνα και Κάτω Σούλιου) για την αντιμετώπιση του προβλήματος της υπεράντλησης και της διείσδυσης θαλασσινού νερού. Το σενάριο περιλαμβάνει αναβάθμιση της μονάδας Τ.Ε. με ανάπτυξη του οριζόντιου πηγαδιού στα 100 m.

- Χρονική διακριτοποίηση: 13 περίοδοι φόρτισης, τα χρονικά βήματα είναι σύμφωνα με τον αριθμό των ημερών για κάθε μήνα
- Ρυθμός εμπλουτισμού στην οριζόντια γεώτρηση:  $420 \text{ m}^3/\text{ημέρα}$  ( $17,5 \text{ m}^3/\text{h}$ ) για κάθε διάταξη Τ.Ε.
- Αριθμός εγκαταστάσεων Τ.Ε.: 2

#### Σενάριο 5

Το σενάριο 5 περιλαμβάνει τον τροποποίηση συστήματος άντλησης για όλη την έκταση του αλλουβιακού υδροφορέα του Μαραθώνα, χωρίς την κατασκευή και εγκατάσταση Τ.Ε.. Πιο συγκεκριμένα, αφορά: (1) την μείωση της άντλησης στην παράκτια ζώνη του υδροφορέα κατά 75%, ενώ οι ανάγκες άρδευσης θα ικανοποιούνταν από γεωτρήσεις που τοποθετούνται ανάντη της παράκτιας περιοχής και εντός της ζώνης επαναπλήρωσης του υδροφορέα από το καρστικό σύστημα. και (2) μείωση άντλησης στο ΒΔ τμήμα του υδροφορέα κατά 50%, ενώ οι ανάγκες άρδευσης θα ικανοποιούνταν από τα ανάντη φρεάτια που βρίσκονται εντός της ζώνης επαναπλήρωσης του υδροφορέα (καρστικό σύστημα).

### 6.3.2 Αποτελέσματα σεναρίων

Τα αποτελέσματα των διαφορετικών σεναρίων παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.3 Αποτελέσματα μοντέλου μετά την εφαρμογή των 5 σεναρίων διαχείρισης. Ο χάρτης του σχήματος 6.3α παρουσιάζει την ποιότητα (TDS σε  $\text{g}/\text{m}^3$ ) και την ποσοτική κατάσταση (πιεζομετρικές καμπύλες) του κοκκώδη σχηματισμού στο τέλος της προσομοίωσης, χωρίς την εφαρμογή διαχειριστικής πρακτικής. Οι περιοχές που έχουν πληγεί περισσότερο εντοπίζονται στο κεντρικό τμήμα της πεδιάδας του Μαραθώνα (τη δυτική πλευρά της περιοχής του μοντέλου) και στο ανατολικό τμήμα της περιοχής του Κάτω Σουλίου με μέση συγκέντρωση TDS  $2,5 \text{ g}/\text{m}^3$ . Για κάθε σενάριο, παρουσιάζονται οι πιεζομετρικές καμπύλες του υδροφορέα καθώς και η μείωση του TDS (σε  $\text{g}/\text{m}^3$ ) συγκρίνοντας τα αποτελέσματα κατάσταση του υδροφορέα χωρίς την εφαρμογή διαχειριστικής πρακτικής (σενάριο 0) με καθένα από τα πέντε σενάρια.

Τα αποτελέσματα του μοντέλου έδειξαν σημαντική μείωση της αλατότητας βάσει της μείωσης του TDS στα τέσσερα σενάρια που περιλαμβάνουν Τ.Ε. του υπογείου νερού, ενώ δεν παρατηρείται κάποια ουσιαστική ποιοτική αναβάθμιση στο σενάριο που περιλαμβάνει διαμόρφωση του καθεστώτος άντλησης

(σενάριο 5). Για όλα τα σενάρια που προσομοιώθηκαν, παρατηρείται μεγαλύτερη βελτίωση στο ανατολικό τμήμα της περιοχής Κάτω Σουλίου, τόσο ποιοτικά όσο και ποσοτικά.

Ο Πίνακας 6.3 παρουσιάζει τα αποτελέσματα κάθε σεναρίου. Η ακτίνα επιρροής υπολογίστηκε για ελάχιστη μείωση TDS  $0,2 \text{ g/m}^3$ .

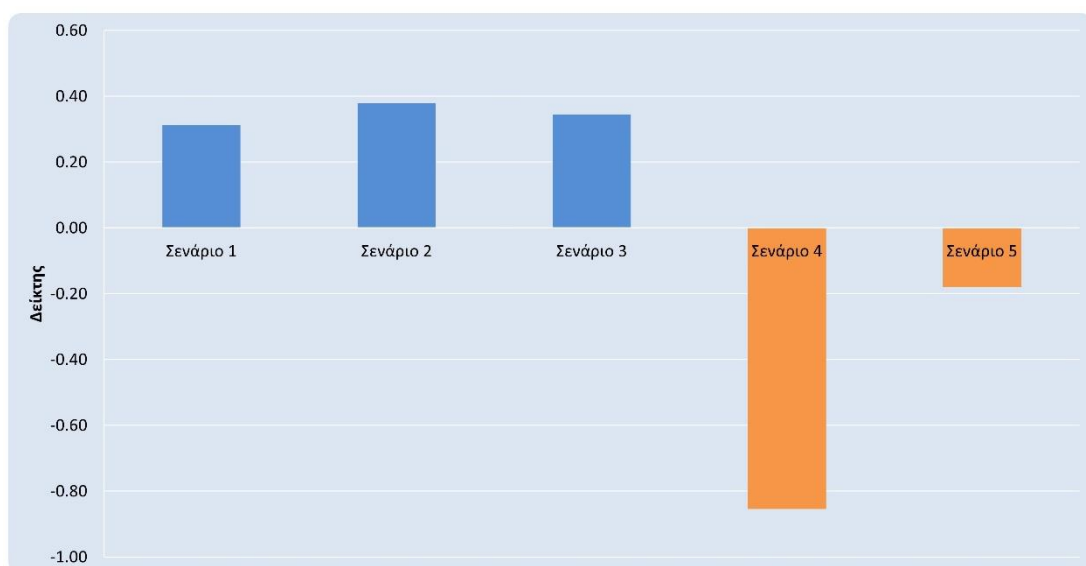
Πίνακας 6.3 Αποτελέσματα σεναρίων

Σενάριο	Μέγιστη μείωση TDS ( $\text{g/m}^3$ )	Ακτίνα επίδρασης (m)	Ανύψωση στάθμης (m)
1	2,1	50-125	0,02-0,15
2	2,1	60-140	0,03-0,25
3	2,4	80-160	0,07-0,44
4	2,5	130-210	0,08-0,61
5	-	-	0,02-0,42

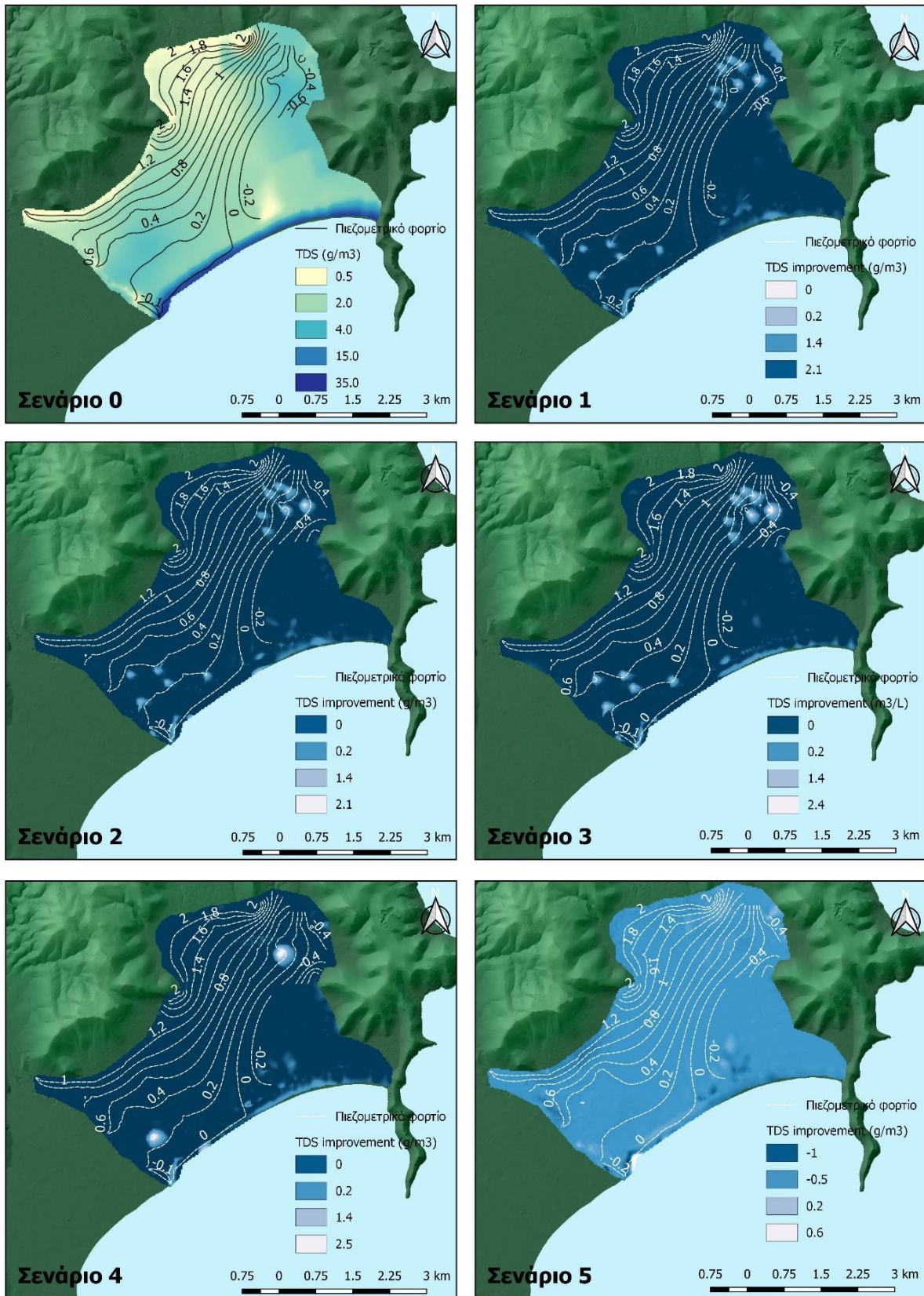
Η αξιολόγηση του κάθε σεναρίου πραγματοποιήθηκε μέσω του δείκτη που αναπτύχθηκε ως μέρος αυτής της μελέτης και παρουσιάστηκε στην ενότητα «Ανάπτυξη μεθοδολογίας για τη λήψη αποφάσεων». Εκχωρώντας τα βάρη τη θετική ή αρνητική επίδραση κάθε κριτηρίου/μεταβλητής στην εξ. 6, ο δείκτης για κάθε σενάριο μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$Index = -0,62 Q_i + 0,14 C_i + 0,24 R_i \quad (6.6)$$

Όπου  $Q_i$  είναι το νερό εμπλουτισμού,  $C_i$  είναι η μέγιστη μείωση TDS και  $R_i$  είναι η μέγιστη ακτίνα επιρροής για το σενάριο  $i$ . Ο δείκτης όπως υπολογίστηκε για τα πέντε σενάρια παρουσιάζεται στο διάγραμμα του Σχήματος 6.2. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το μοντέλο παράγει τα καλύτερα αποτελέσματα με το Σενάριο 2.



Σχήμα 6.2 Δείκτης καταλληλότητας σεναρίου



Σχήμα 6.3 Αποτελέσματα μοντέλου μετά την εφαρμογή των 5 σεναρίων διαχείρισης

## 6.4 Αξιολόγηση αποτελεσμάτων διαχειριστικών σεναρίων

Λαμβάνοντας υπόψη την προσομοίωση με τον κώδικα SEAWAT και τα αποτελέσματα των παραχθέντων σεναρίων 1 έως 4 ( Σχήμα 6.3 και Πίνακας 6.3) είναι εμφανές ότι στην περίπτωση του Μαραθώνα, η κατασκευή εγκαταστάσεων Τ.Ε. μικρής κλίμακας θα μπορούσε να μειώσει σημαντικά την αλατότητα του προσχωματικού υδροφορέα κατά τη διάρκεια ενός έτους λειτουργίας. Η βελτίωση της ποιότητας μπορεί να επιτευχθεί χωρίς παύση ή αλλαγή του καθεστώτος αντλήσεων. Το σενάριο 1 δημιουργήθηκε για την προώθηση και την διερεύνηση της απόδοσης της πρωτότυπης μονάδας Τ.Ε. που είναι εγκατεστημένη στην πιλοτική περιοχή. Σε αυτό το σενάριο, τα αποτελέσματα έδειξαν μέγιστη μείωση TDS κατά  $2,1 \text{ g/m}^3$  (ανατολικά του Κάτω Σουλίου) και η στάθμη του υδροφορέα αυξήθηκε κατά  $0,04 \text{ m}$  στην περιοχή του Μαραθώνα και  $0,15 \text{ m}$  στην περιοχή του Κάτω Σουλίου. Μέσω της συμμετοχικής διαδικασίας και από τη μεριά των ενδιαφερόμενων (αγρότες) προτάθηκε η αντικατάσταση της κάθετης γεώτρησης άντλησης της πρότυπης εγκατάστασης με τις υπάρχουσες αρδευτικές γεωτρήσεις της περιοχής. Τόσο από τη μεριά των ενδιαφερόμενων όσο και των συντονιστών φάνηκε να είναι λογική λύση, ενώ ταυτόχρονα η εφαρμογή της οδηγεί στη μείωση του κόστους κατασκευής και λειτουργίας της εγκατάστασης. Αυτό οδήγησε στο σενάριο 2, στο οποίο ο ίδιος όγκος γλυκού νερού εγχέεται στην οριζόντια γεώτρηση εμπλουτισμού, ενώ αντλώντας ταυτόχρονα νερό από τις περιβάλλουσες αρδευτικές γεωτρήσεις, αυξάνεται η ικανότητα επαναφόρτισης του υδροφορέα. Στα αποτελέσματα του σεναρίου 2 (Σχήμα 6.3, Πίνακας 6.3) φαίνεται ότι η μέγιστη πτώση στην συγκέντρωση TDS είναι επίσης στα  $2,1 \text{ g/m}^3$  ενώ η μέγιστη άνοδος της στάθμης υπογείου νερού φτάνει τα  $0,6$  και  $0,25 \text{ m}$  στον Μαραθώνα και στο Κάτω Σούλι αντίστοιχα. Τα δύο σενάρια (σενάρια 1 και 2) δεν διαφέρουν στην μείωση της συγκέντρωσης TDS αλλά η ακτίνα επιρροής στο σενάριο 2 είναι μεγαλύτερη ενώ παρατηρείται μεγαλύτερη άνοδος της πιεζομετρίας. Λαμβάνοντας υπόψη την βελτίωση της απόδοσης στο σενάριο 2, τα ακόλουθα σενάρια δημιουργήθηκαν χωρίς την κάθετη γεώτρηση άντλησης στην διάταξη του Τ.Ε..

Στο σενάριο 3, ο όγκος του νερού Τ.Ε. αυξήθηκε στα  $96 \text{ m}^3$  ώστε να χρησιμοποιηθεί η μονάδα επεξεργασίας νερού της πιλοτικής εγκατάστασης σε πλήρη ισχύ. Σε αυτή την περίπτωση, το πιεζομετρικό φορτίο στις τοποθεσίες εμπλουτισμού αυξήθηκε έως και  $0,1 \text{ m}$  στο Μαραθώνα και  $0,44 \text{ m}$  στο Κάτω Σούλι, και η μέγιστη μείωση TDS ήταν  $1,5$  και  $2,4 \text{ g/l}$ , αντίστοιχα. Αν και αυτό το σενάριο παράγει καλύτερα ποιοτικά και ποσοτικά αποτελέσματα από τα προηγούμενα σενάρια, η ποσότητα του νερού εμπλουτισμού θα αύξανε το κόστος λόγω της άντλησης και λειτουργίας της μονάδας επεξεργασίας νερού. Αυτό αντικατοπτρίζεται στην τιμή του δείκτη για το σενάριο 3, καθώς είναι ελαφρώς χαμηλότερο σε σύγκριση με τον δείκτη του σεναρίου 2.

Το τέταρτο σενάριο διαχείρισης αφορούσε την αναβάθμιση του οριζόντιου φρεατίου, διπλασιάζοντας το μήκος του και την παραγωγή διπλάσιας ποσότητας νερού Τ.Ε. από τη μονάδα επεξεργασίας. Αν και στο τέλος της προσομοίωσης υπάρχει μείωση TDS κατά  $2,5 \text{ g/m}^3$  τόσο για την περιοχή του Μαραθώνα όσο και για το Κάτω Σούλι, ο όγκος του νερού που αντλείται και επεξεργάζεται καθιστά τη συγκεκριμένη



εγκατάσταση αναποτελεσματική. Το οικονομικό και περιβαλλοντικό κόστος αυξάνεται άμεσα σε σχέση με τα οφέλη που προσφέρει ο Τ.Ε.. Η ανισορροπία μεταξύ κόστους-οφέλους εκφράζεται ακόμη και από τη χαμηλή τιμή δείκτη του σεναρίου 4 που αντιστοιχεί στο χειρότερο διαχειριστικό σενάριο και δεν προτείνεται για τη συγκεκριμένη μελέτη περίπτωσης (Σχήμα 6.3).

Στο διαχειριστικό σενάριο 5, το καθεστώς άντλησης τροποποιείται περιορίζοντας την άντληση νερού στην περιοχή χαμηλότερου υψομέτρου (κοντά στην ακτή) και αυξάνοντας εξίσου τον ρυθμό άντλησης στα ανάντη όπου ο κοκκώδης σχηματισμός τροφοδοτείται με νερό καλύτερης ποιότητας από τα μάρμαρα. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν στο τέλος της προσομοίωσης δεν δείχνουν καμία ποιοτική αναβάθμιση του νερού, ενώ η μέγιστη άνοδος της στάθμης των υπόγειων νερών δεν ξεπερνά τα 0,42 m και εντοπίζεται στο ανατολικό τμήμα του Κάτω Σουλίου. Στο κεντρικό τμήμα της πεδιάδας, κοντά στην ακτή της περιοχής του Μαραθώνα, δεν παρατηρείται σημαντική άνοδος του πιεζομετρικού φορτίου. Όσον αφορά τις αρνητικές επιπτώσεις της μεθόδου, παρατηρείται πτώση της στάθμης του υδροφορέα (περίπου 0,25 m) στα βόρεια της περιοχής του Μαραθώνα λόγω της αύξησης των αντλήσεων κατά 75%. Το σενάριο αυτό δεν πληρεί το κριτήριο της μείωσης της αλατότητας, που τέθηκε ως κύριος στόχος στη συμμετοχική διαδικασία. Η αδυναμία αυτού του σεναρίου διαχείρισης να επιτύχει τους ζητούμενους στόχους υποδηλώνεται και από τη χαμηλή τιμή του δείκτη καταλληλότητας σεναρίου.

## **6.5 Ανάλυση συμμετοχικής μοντελοποίησης στην έρευνα του Μαραθώνα**

Η συμμετοχική προσέγγιση εφαρμόστηκε στην περίπτωση του Μαραθώνα ήταν μια πρώτη προσπάθεια να έρθουν σε επαφή τα ενδιαφερόμενα μέρη που εμπλέκονται στη διαχείριση και χρήση των υπόγειων νερών της περιοχής. Μια μεγάλη ομάδα συμμετεχόντων – κυρίως πολίτες και άμεσοι χρήστες- δεν είχαν εμπλακεί ποτέ στο παρελθόν σε παρόμοια δραστηριότητα με αποτέλεσμα κάποιοι από αυτούς να είναι αρχικά διστακτικοί. Παρ' όλα αυτά έως το τέλος της συνάντησης η πλειοψηφία των πολιτών ήταν πρόθυμοι να συζητήσουν πιθανές λύσεις για τη διαχείριση υπογείου νερού με ειδικούς και υπεύθυνους λήψης αποφάσεων.

Ο ρόλος των συντονιστών ήταν καθοριστικός σε κάθε τραπέζι συζήτησης, καθώς ενθάρρυναν όλα τα μέλη να συμμετάσχουν στην διαδικασία και διαμόρφωναν τη θεματολογία. Η εντύπωση από τους συντονιστές ήταν ότι ο διάλογος κινητοποίησε και επαγρύπνησε τους συμμετέχοντες σε θέματα διαχείρισης νερών. Θεώρησαν ότι το εργαστήριο ήταν επικοινωνιακό, ως προς την ευαισθητοποίηση της κοινότητας για τη θέσπιση ενός αποτελεσματικού σχεδίου διαχείρισης για τα υπόγεια νερά στην περιοχή και ως προς την διαμόρφωση θετικής άποψης για τις εφαρμογές Τ.Ε.. Όσον αφορά την εφαρμογή της προτεινόμενης λύσης Τ.Ε., η κύρια ανησυχία που εκφράστηκε μεταξύ των ενδιαφερομένων, συμπεριλαμβανομένων των δημόσιων αρχών, δεν ήταν η αποτελεσματικότητα του προτεινόμενου σχεδίου αλλά το κόστος κατασκευής και εγκατάστασης της διάταξης και πιο συγκεκριμένα «ποιος θα πληρώσει».

Η ανησυχία για το κόστος και τη χρηματοδότηση είναι δικαιολογημένη, ειδικά σε μια περίοδο που η Ελλάδα βρίσκεται σε βαθιά οικονομική κρίση και η χρηματοδότηση για την μελέτη και κατασκευή έργων

είναι περιορισμένη. Πέρα από αυτό το πρόβλημα, η πλειονότητα των ενδιαφερόμενων μερών ανησυχεί για τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της κακής διαχείρισης των υπόγειων νερών στους υδάτινους πόρους και για τις επιπτώσεις στο Εθνικό Πάρκο Σχοινιά NATURA 2000. Όλα τα μέρη συμφώνησαν ότι χωρίς να ληφθούν μέτρα κατά της υπεράντλησης του υδροφορέα, η κατάσταση θα μπορούσε να οδηγήσει σε σοβαρή κοινωνικοοικονομική κρίση στο μέλλον λόγω πιθανής μείωσης γεωργικών και τουριστικών δραστηριοτήτων στην περιοχή του Μαραθώνα. Τέτοιες δραστηριότητες εξαρτώνται άμεσα από τα υπόγεια αποθέματα νερού. Παρά την ανησυχία του κόστους, οι συμμετέχοντες ήταν θετικοί στην ιδέα κατασκευής μικρών μονάδων Τ.Ε., με κύριο στόχο τη μείωση των επιπέδων αλατότητας στις περιοχές που έχουν πληγεί περισσότερο από τη θαλάσσια διείσδυση.

Η συμμετοχική προσέγγιση για την αποτελεσματική διαχείριση των υπόγειων νερών σε αυτή τη μελέτη άνοιξε το δρόμο για τον εντοπισμό και την ιεράρχηση των προβλημάτων των υπόγειων νερών που παρεμβαίνουν σε πολιτικά και κοινωνικοοικονομικά ζητήματα. Η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πολλές μελέτες διαχείρισης υπογείων νερών ως τρόπος επίλυσης διαφορών μεταξύ διαφορετικών ενδιαφερόμενων μερών και ως υποστηρικτικό εργαλείο στην διαδικασία λήψης αποφάσεων. Η παρούσα έρευνα εντόπισε ότι η συμμετοχική μοντελοποίηση είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε περιπτώσεις όπου οι διαχειριστικές επιλογές εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την αποδοχή και την ευαισθητοποίηση του κοινού σε θέματα υπογείου νερού. Για παράδειγμα, σε ένα σχέδιο διαχείρισης άρδευσης που προβλέπει αλλαγή καλλιεργειών για την βιώσιμη χρήση των υπόγειων νερών (π.χ. Ni et al. 2020, Niswonger 2020, Szymkiewicz et al. 2020), η συμμετοχική προσέγγιση θα ήταν κατάλληλη ώστε οι τοπικοί ενδιαφερόμενοι φορείς να είναι πρόθυμοι να υιοθετήσουν το σχέδιο.

Στη διάρκεια του συμμετοχικού εργαστηρίου που πραγματοποιήθηκε στον Μαραθώνα, οι διαφορετικές απόψεις των ενδιαφερόμενων μερών οδήγησαν στη δημιουργία σεναρίων προσομοίωσης για πρακτικές διαχείρισης των υπόγειων νερών. Η επιλογή του καταλληλότερου σεναρίου, λαμβάνοντας υπόψη τις απόψεις των ενδιαφερομένων, ήταν μια πολύπλοκη διαδικασία. Η απεικόνιση των αποτελεσμάτων των διαφορετικών σεναρίων με μη τεχνικούς όρους επιτεύχθηκε μέσω της ανάπτυξης και πρότασης ενός νέου δείκτη ο οποίος έχει ως βασικό στόχο την επικοινωνία των αποτελεσμάτων περίπλοκων προσεγγίσεων για την κατανόηση τους από ανθρώπους με μη τεχνικό υπόβαθρο.

Για την επιλογή του καταλληλότερου σεναρίου για την περίπτωση του Μαραθώνα, παραμετροποιήθηκαν τα οφέλη και τα μειονεκτήματα των αποτελεσμάτων, βάσει των συμπερασμάτων που εξήχθησαν από τη συμμετοχική διαδικασία και στη συνέχεια εντάχθηκαν σε έναν ενιαίο δείκτη αξιολόγησης. Η μέθοδος AHP (Saaty 1986) ενσωματώθηκε στον δείκτη προκειμένου να εκχωρηθούν βάρη και να δοθεί προτεραιότητα στα προβλήματα που συζητήθηκαν. Ο δείκτης ενσωματώθηκε ως υποστηρικτικό εργαλείο για την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων του κάθε σεναρίου και την τελική πρόταση σχεδίου διαχείρισης των υπογείων νερών για την πεδιάδα του Μαραθώνα. Μέσω της εμπειρίας που προέκυψε από τη συμμετοχική προσέγγιση του Μαραθώνα, φαίνεται ότι η εφαρμογή του προτεινόμενου δείκτη στη διαδικασία αξιολόγησης σεναρίων μπορεί να επιλύσει προβλήματα αξιολόγησης πολύπλοκων

αποτελεσμάτων που προκύπτουν από τα μοντέλα από μη επιστημονικά καταρτισμένους συμμετέχοντες. Στον προτεινόμενο δείκτη θα μπορούσε ενδεχομένως να συμπεριληφθεί το κόστος του κάθε σεναρίου, το οποίο σχεδιάζεται να πραγματοποιηθεί σε μελλοντική έρευνα. Η απεικόνιση των αποτελεσμάτων σε διαγράμματα Pareto μπορεί να αποδειχτεί αποτελεσματική και χρήσιμη σε συμμετοχικές διαδικασίες στις οποίες τα ενδιαφερόμενα μέρη είναι τεχνικά ή επιστημονικά καταρτισμένα. Η χρήση τέτοιων διαγραμμάτων σε συμμετοχικές διαδικασίες που εμπλέκονται μη καταρτισμένοι συμμετέχοντες μπορεί να αποδειχτεί μη αποτελεσματική. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτής της κατάστασης αναφέρεται από την Jafary (2016) κατά τη διάρκεια της έρευνάς της στη συμμετοχική μοντελοποίηση για τη διαχείριση της άρδευσης από υπόγειους υδατικούς πόρους με ντόπιους αγρότες στο Ιράν. Η ερευνήτρια παρατήρησε ότι όταν παρουσίαζε περίπλοκα γραφήματα των αποτελεσμάτων του μοντέλου, η συζήτηση δεν μπορούσε να συνεχιστεί και οι αγρότες άλλαζαν θέμα. Στη μελέτη περίπτωσης του Μαραθώνα, οι συντονιστές έλαβαν θετικά σχόλια σχετικά με τη χρήση του δείκτη, καθώς οι προσκεκλημένοι συμμετείχαν ενεργά στη διαδικασία αξιολόγησης, ενώ φάνηκαν να κατανοούν τα αποτελέσματα των διαφορετικών σεναρίων. Η μέθοδος που προτείνεται στην παρούσα έρευνα μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο τελικό στάδιο της συμμετοχικής διαδικασίας μοντελοποίησης. Η προτεινόμενη προσέγγιση μπορεί να υποστηρίξει αποτελεσματικά τη διαδικασία λήψης αποφάσεων καλύπτοντας το κενό επικοινωνίας μεταξύ εμπειρογνομόνων και ενδιαφερόμενων μερών όσον αφορά την ερμηνεία και την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων του μοντέλου. Μέσω αυτής της διαδικασίας, οι ενδιαφερόμενοι θα είναι υπεύθυνοι για τον εντοπισμό των αρνητικών και θετικών επιπτώσεων των διαφόρων σεναρίων διαχείρισης και θα κατανέμουν το βάρος της σημασίας για κάθε αποτέλεσμα. Με αυτόν τον τρόπο, τα ενδιαφερόμενα μέρη μπορούν να συμφωνήσουν σε μια απόφαση σχετικά με την κατάλληλη τεχνική διαχείρισης των υπόγειων νερών. Αυτή η διαδικασία θα πρέπει πάντα να καθοδηγείται από τους δημιουργούς των μοντέλων, τους ειδικούς και τους διοργανωτές της «συμμετοχικής προσέγγισης».

## 7 ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

**1.** Η διαχείριση των παράκτιων υδροφόρων συστημάτων, αποτελεί ένα αντικείμενο πρόκλησης για τις σύγχρονες ειδικότητες του μηχανικού καθώς αφορά ιδιαίτερες υδροδυναμικές συνθήκες αναφορικά με τη ροή του υπόγειου νερού και την υδραυλική επικοινωνία του υδροφορέα με τη θάλασσα. Ιδιαίτερα σε υδρολογικά ευαίσθητες περιοχές όπως αυτή της Μεσογειακής λεκάνης, όπου τα παράκτια πεδία συνήθως υπόκεινται σε εντατική εκμετάλλευση του υπόγειου υδατικού δυναμικού, η διαχείριση των υπόγειων υδατικών πόρων απαιτεί σύγχρονες τεχνολογικές λύσεις. Στο *Κεφάλαιο 1* παρατίθενται τα αποτελέσματα της βιβλιογραφικής έρευνας της παρούσας διδακτορικής διατριβής που αφορούν στα εν λόγω θέματα, επικεντρώνοντας στα παρακάτω βασικά ζητήματα: (α) στην υδρολογία των υπόγειων νερών στους παράκτιους υδροφορείς, (β) στην εφαρμογή μεθόδων και τεχνολογιών διαχείρισης εμπλουτισμού των υδροφορέων και (γ) στα διαθέσιμα εργαλεία υδροπληροφορικής για την προσομοίωση των υδρολογικών διεργασιών παράκτιων υδροφορέων.

**2.** Στο *Κεφάλαιο 2* παρουσιάζονται εκτενώς οι γεωλογικές, υδρογεωλογικές και υδρολογικές συνθήκες της περιοχής έρευνας βάσει των επεξεργασμένων αποτελεσμάτων δεδομένων που έχουν συλλεχθεί από εργασίες πεδίου στο πλαίσιο της παρούσας διδακτορικής διατριβής αλλά και βιβλιογραφικών δεδομένων της περιοχής. Η επεξεργασία πραγματοποιήθηκε με ελεύθερο λογισμικό ανοιχτού κώδικα τόσο ως προς το κομμάτι των Γεωγραφικών Πληροφοριακών Συστημάτων (QGIS platform) όσο και ως προς το κομμάτι της υπόγειας υδρολογίας (AkvnaGIS μέσω της πλατφόρμας FREEWAT). Τα βασικά συμπεράσματα ως προς τις υδροδυναμικές συνθήκες του υδροφόρου συστήματος της περιοχής είναι ότι πρόκειται για παράκτιο υδροφορέα ο οποίος παρουσιάζει συνθήκες θαλάσσιας διείσδυσης στο μεγαλύτερο τμήμα του, με σχεδόν αμελητέες υδραυλικές κλίσεις προς την ενδοχώρα και όχι καθόλη τη διάρκεια του υδρολογικού έτους. Πρόκειται δηλαδή για συνθήκες τόσο παθητικής όσο και ενεργητικής θαλάσσιας διείσδυσης, οι οποίες καθορίζονται από τις συνθήκες τροφοδοσίας κατά την υγρή περίοδο και τις συνθήκες άντλησης κατά την αντίστοιχη ξηρή. Η ποιότητα των υπόγειων νερών παρουσιάζεται υποβαθμισμένη, με βασικότερο πρόβλημα να αποτελούν οι αυξημένες συγκεντρώσεις χλωριόντων -ως αποτέλεσμα της θαλάσσιας διείσδυσης- αλλά και των νιτρικών ιόντων -λόγω του μικρού βάθους στάθμης του υπόγειου νερού-. Τα αποτελέσματα του εν λόγω κεφαλαίου αποτελούν τη βάση για το σχεδιασμό και την ανάπτυξη του εννοιολογικού μοντέλου για την προσομοίωση των υδρολογικών διεργασιών και της συμμετοχικής προσομοίωσης των Κεφαλαίων 5 και 6.

**3.** Το *Κεφάλαιο 3* αφορά στην περιγραφή της πειραματικής διάταξης του συστήματος διαχείρισης εμπλουτισμού του υδροφόρου συστήματος. Πρόκειται για ένα ολοκληρωμένο σύστημα που αποτελείται από: (α) το σημείο άντλησης του υπόγειου καρστικού υφάλμυρου νερού (νερό εμπλουτισμού), (β) την υβριδική αποκεντρωμένη μονάδα επεξεργασίας του νερού εμπλουτισμού με τεχνολογία αντίστροφης όσμωσης για την αφαλάτωση και προχωρημένων διεργασιών οξείδωσης για την απορρύπανση του νερού

εμπλουτισμού από αγροχημικό ρυπαντικό φορτίο, (γ) το σημείο άντλησης υπόγειου νερού και έγχυσης νερού εμπλουτισμού μέσω κατακόρυφων γετρήσεων πολλαπλού βάθους και οριζόντιας κατευθυνόμενης γεώτρησης. Η πειραματική διάταξη αφορά σε συνθετικό σύστημα διαχείρισης εμπλουτισμού παράκτιων υδροφορέων σχεδιασμένο και προσαρμοσμένο στις τυπικές μεσογειακές υδρογεωλογικές συνθήκες όπου εμφανίζονται διαφορετικοί τύποι υδροφορέων (αλλουβιακοί και καρστικοί). Η βασική αρχή σχεδιασμού αποτελεί η αξιοποίηση του υφάλμυρου υπόγειου νερού που προέρχεται από βαθύτερα υδροφόρα στρώματα (π.χ. καρστικοί υδροφορείς). Το νερό αυτό μπορεί να υποστεί επεξεργασία με κατάλληλη τεχνολογία ώστε να επανεισαχθεί στον ανώτερο υδροφορέα ως νερό εμπλουτισμού με στόχο να δημιουργηθεί τεχνητός υδραυλικός φραγμός για την παρεμπόδιση της θαλάσσιας διείσδυσης και να επιτευχθεί βέλτιστη διαχείριση του παράκτιου υδροσυστήματος.

**4.** Το *Κεφάλαιο 4* πραγματεύεται την προσομοίωση τεχνητού εμπλουτισμού σε παράκτιο υδροφορέα με οριζόντια κατευθυνόμενη γεώτρηση μέσω δυο διαφορετικών μοντέλων, με τη χρήση διαφορετικών κωδικών προσομοίωσης: (α) τον κώδικα MODFLOW-2005 (Harbaugh 2005) και το πακέτο WEL («μοντέλο WEL»), και (β) τον κώδικα MODFLOW-CFP (Shoemaker et al. 2007) και το πακέτο CFPM1 («μοντέλο CFP»). Ο πρώτος χρησιμοποιείται για την προσομοίωση ροής υπόγειου νερού σε πορώδες μέσο (ροή Darcy), ενώ ο δεύτερος αφορά στην προσομοίωση ροής σε καρστικό αγωγό (στρωτή ροή σε κλειστό αγωγό) επιπλέον της δυνατότητας προσομοίωσης της ροής υπόγειου νερού σε πορώδες μέσο (ροή Darcy). Και στις δυο προαναφερθείσες περιπτώσεις, η ρύθμιση των μοντέλων πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του κώδικα UCODE\_2014 (Poeter et al. 2014) από όπου προέκυψε ότι:

(α) σύμφωνα με τη διαδικασία ανάλυσης ευαισθησίας και για τα δυο μοντέλα, οι πιο ευαίσθητες παράμετροι είναι η υδραυλική αγωγιμότητα (HK) του στρώματος του μοντέλου, όπου εκτελείται η διαδικασία εμπλουτισμού μέσω της γεώτρησης και η αγωγιμότητα-conductance της οριακής συνθήκης GHB (όριο τύπου 3, μικτού τύπου, Cauchy),

(β) ειδικά για το μοντέλο CFP, οι παράμετροι που αφορούν στα χαρακτηριστικά της γεώτρησης εμπλουτισμού (εύρος αριθμού Reynolds, αγωγιμότητα-conductance του τοιχώματος της γεώτρησης) έχουν μικρότερη βαρύτητα για τα αποτελέσματα,

(γ) ενώ και τα δυο μοντέλα αποδίδουν εξίσου καλά την ακτίνα επίδρασης της γεώτρησης εμπλουτισμού, το μοντέλο CFP υπερτερεί ως προς την προσομοίωση των υδροδυναμικών συνθηκών, που επικρατούν στη στενή περιοχή της οριζόντιας γεώτρησης σε αντίθεση με το μοντέλο WEL, όπου προκύπτουν υπερκτιμημένα υδραυλικά φορτία στην ίδια περιοχή (εξάρσεις ως προς τις τοπικές ανυψώσεις).

**5.** Το *Κεφάλαιο 5* παρουσιάζει τον σχεδιασμό και την κατασκευή τριών διαφορετικών μοντέλων για την προσομοίωση: (α) της ροής των υπόγειων νερών με τη χρήση του κώδικα MODFLOW-2005 (Harbaugh 2005), (β) των φαινομένων μεταφοράς μάζας με τη χρήση του κώδικα MT3DMS (Zheng & Wang 1999), και (γ) της ροής μεταβαλλόμενης πυκνότητας για την προσομοίωση της θαλάσσιας διείσδυσης με τη χρήση του κώδικα SEAWAT (Langvin et al. 2003). Τα βασικότερα συμπεράσματα που προέκυψαν από τα παραπάνω είναι:

(α) η ανάλυση ευαισθησίας που πραγματοποιήθηκε κατά τη ρύθμιση του μοντέλου ροής με τον κώδικα UCODE\_2014 (Poeter et al. 2014), υπέδειξε ότι οι πιο ευαίσθητες παράμετροι είναι η υδραυλική αγωγιμότητα (HK) του κυρίως υπόγειου υδροφόρου στρώματος (ενδιάμεσο εκ των τριών συνολικά στρωμάτων του μοντέλου), καθώς και η παράμετρος των αντλήσεων (Q), και

(β) η χρήση του κώδικα SEAWAT για την προσομοίωση της ροής σε συνθήκες μεταβαλλόμενης πυκνότητας παρήγαγε μεγαλύτερη ταύτιση προσομοιωμένων και μετρημένων τιμών υδραυλικών φορτίων και υπό αυτή την έννοια βελτίωσε περαιτέρω τα αποτελέσματα του ήδη ρυθμισμένου μοντέλου ροής (MODFLOW-2005).

**6.** Το Κεφάλαιο 6 πραγματεύεται την εφαρμογή μεθόδων συμμετοχικής υδρολογικής προσομοίωσης για τη βέλτιστη διαχείριση των υπόγειων υδατικών πόρων παράκτιου υδροφορέα μέσω της υλοποίησης συμμετοχικών εργαστηρίων και της ανάπτυξης πολυκριτηριακού εργαλείου με τη μέθοδο της Αναλυτικής Ιεραρχικής Διαδικασίας. Τα βασικότερα συμπεράσματα που προέκυψαν από την εν λόγω έρευνα είναι:

(α) η συμμετοχική διαδικασία συνεισφέρει στην αναγνώριση των κύριων υδατικών προβλημάτων ενός παράκτιου υδροφορέα -από την πλευρά των ενδιαφερόμενων μερών και της τοπικής κοινωνίας- και αποτελεί τη βάση για τη σύνθεση ρεαλιστικών και πρακτικών μελλοντικών σεναρίων προσομοίωσης των υπόγειων νερών,

(β) η εφαρμογή μεθόδων πολυκριτηριακής ανάλυσης για την αξιολόγηση και οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων των εναλλακτικών σεναρίων που προέκυψαν από την εφαρμογή των μοντέλων υπόγειων νερών, βελτιώνει την κατανόησή τους από τους συμμετέχοντες και υπό αυτή την έννοια ενισχύει τη συμμετοχική διαδικασία,

(γ) η μέθοδος της συμμετοχικής υδρολογικής προσομοίωσης ουσιαστικά μετατρέπει τα υδρολογικά μοντέλα υπόγειων νερών, από διαχειριστικά σε κοινωνικά εργαλεία, εντάσσοντας την τοπική κοινωνία στη διαδικασία λήψης αποφάσεων για τη διαχείριση των υδατικών πόρων της περιοχής.

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ**

### **Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία**

- Abarca E, Vázquez-Suñé E, Carrera J, Capino B, Gámez D, Batlle F (2006) Optimal design of measures to correct seawater intrusion. *Water Resour Res* 42: <https://doi.org/10.1029/2005WR004524>
- Abd-Elaty I, Abd-Elhamid HF, Nezhad MM (2019) Numerical analysis of physical barriers systems efficiency in controlling saltwater intrusion in coastal aquifers. *Environ Sci Pollut Res* 26:35882–35899. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06725-3>
- Abd-Elaty I, Zelenakova M (2022) Saltwater intrusion management in shallow and deep coastal aquifers for high aridity regions. *J Hydrol Reg Stud* 40:101026. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101026>
- Abd-Elhamid HF, Javadi AA (2011) A Cost-Effective Method to Control Seawater Intrusion in Coastal Aquifers. *Water Resour Manag* 25:2755–2780. <https://doi.org/10.1007/s11269-011-9837-7>
- Abdoulhalik A, Ahmed A, Hamill GA (2017) A new physical barrier system for seawater intrusion control. *J Hydrol* 549:416–427. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.04.005>
- Abiye TA, Sulieman H, Ayalew M (2009) Use of treated wastewater for managed aquifer recharge in highly populated urban centers: a case study in Addis Ababa, Ethiopia. *Environ Geol* 58:55–59. <https://doi.org/10.1007/s00254-008-1490-y>
- Allen R (2005) Penman–Monteith equation. In: *Encyclopedia of Soils in the Environment*. Elsevier, pp 180–188
- Allen RG, Pereira LS, Raes D, Smith M (1998) *Crop Evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements*. Rome
- Amiri H, Azadi S, Javadpour S, et al (2022) Selecting wells for an optimal design of groundwater monitoring network based on monitoring priority map: A Kish Island case study. *Water Resour Ind* 27:100172. <https://doi.org/10.1016/j.wri.2022.100172>
- Anderson MP, Woessner WW, Hunt R (2015) *Applied Groundwater Modeling- simulation of flow and advective transport*. Elsevier
- Antelmi M, Alberti L, Angelotti A, Curnis S, Zille A, Colombo L (2020) Thermal and hydrogeological aquifers characterization by coupling depth-resolved thermal response test with moving line source analysis. *Energy Convers Manag* 225:113400. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113400>
- Appelo CAJ, Postma D (1993) *Geochemistry, groundwater and pollution*. *Geochemistry, Groundw Pollut*. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(94\)90585-1](https://doi.org/10.1016/0016-7037(94)90585-1)
- Arlai P, Koch M (2017) Density-dependent numerical simulations of the impact of underground dams on groundwater storage on Samui island, Thailand. *J Appl Water Eng Res* 5:114–128. <https://doi.org/10.1080/23249676.2016.1171734>

- Arnold JG, Fohrer N (2005) SWAT2000: current capabilities and research opportunities in applied watershed modelling. *Hydrol Process* 19:563–572. <https://doi.org/10.1002/hyp.5611>
- Ashby SF, Falgout RD (1996) A Parallel Multigrid Preconditioned Conjugate Gradient Algorithm for Groundwater Flow Simulations. *Nucl Sci Eng* 124:145–159. <https://doi.org/10.13182/NSE96-A24230>
- Ashraf M, Sheikh AA (2017) Sustainable Groundwater Management in Balochistan. Pakistan Council of Research in Water Resources, Islamabad - Pakistan
- Ataie-Ashtiani B, Volker RE, Lockington DA (1999) Tidal effects on sea water intrusion in unconfined aquifers. *J Hydrol* 216:17–31. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(98\)00275-3](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(98)00275-3)
- Ayers, R.S. and Westcot, D.W. (1985). Water quality for agriculture (Vol. 29, p. 174). Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Azadi S, Amiri H, Ataei P, Javadpour S (2020) Optimal design of groundwater monitoring networks using gamma test theory. *Hydrogeol J* 28:1389–1402. <https://doi.org/10.1007/s10040-020-02115-z>
- Babad A, Burg A, Adar EM (2020) Conceptual hydrological approach to a geologically complex basin with scarce data: the Hula Valley, Middle East. *Hydrogeol J* 28:703–722. <https://doi.org/10.1007/s10040-019-02031-x>
- Babiker IS, Mohamed MAA, Hiyama T, Kato K (2005) A GIS-based DRASTIC model for assessing aquifer vulnerability in Kakamigahara Heights, Gifu Prefecture, central Japan. *Sci Total Environ* 345:127–140. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2004.11.005>
- Bailey RT, Wible TC, Arabi M, et al (2016) Assessing regional-scale spatio-temporal patterns of groundwater-surface water interactions using a coupled SWAT-MODFLOW model. *Hydrol Process*. <https://doi.org/10.1002/hyp.10933>
- Bakundukize C, van Camp M, Walraevens K (2011) Estimation of Groundwater Recharge in Bugesera Region (Burundi) using Soil Moisture Budget Approach. *Geol Belgica* 14:85–102
- Baldwin C, Tan PL, White I, et al (2012) How scientific knowledge informs community understanding of groundwater. *J Hydrol* 474:74–83. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2012.06.006>
- Barlow PM (2003) Ground water in freshwater-saltwater environments of the Atlantic Coast. *US Geol Surv Circ* 1–113. <https://doi.org/10.3133/cir1262>
- Barrett B, Heinson G, Hatch M, Telfer A (2002) Geophysical Methods in Saline Groundwater Studies: Locating Perched Water Tables and Fresh-Water Lenses. *Explor Geophys* 33:115–121. <https://doi.org/10.1071/EG02115>
- Basco-Carrera L, Warren A, van Beek E, et al (2017) Collaborative modelling or participatory modelling? A framework for water resources management. *Environ Model Softw* 91:. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.01.014>
- Batu V (1998) Aquifer hydraulics : a comprehensive guide to hydrogeologic data analysis. John Wiley & Sons



- Bayanzul B, Nakamura K, Machida I, et al (2019) Construction of a conceptual model for confined groundwater flow in the Gunii Khooloi Basin, Southern Gobi Region, Mongolia. *Hydrogeol J* 27:1581–1596. <https://doi.org/10.1007/s10040-019-01955-8>
- Bear J, Cheng AH-D (2010) *Modeling Groundwater Flow and Contaminant Transport*. Springer Netherlands, Dordrecht
- Bear J, Cheng, AH.-D . Sorek S, Ouazar D, Herrera I (1999) *Seawater intrusion in coastal aquifers: concepts, methods and practices* (Vol. 14). Springer Science & Business Media.
- Befus KM, Barnard PL, Hoover DJ, Finzi Hart JA, Voss CI (2020) Increasing threat of coastal groundwater hazards from sea-level rise in California. *Nat Clim Chang* 10:946–952. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0874-1>
- Bekele E, Toze S, Patterson B, Fegg W, Shackleton M, Higginson S (2013) Evaluating two infiltration gallery designs for managed aquifer recharge using secondary treated wastewater. *J Environ Manage* 117:115–120. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.12.018>
- Bloetscher F, Muniz A, Witt GM (2005) *Groundwater injection : modeling, risks, and regulations*. McGraw-Hill
- Botero-Acosta A, Donado LD (2015) Laboratory Scale Simulation of Hydraulic Barriers to Seawater Intrusion in Confined Coastal Aquifers Considering the Effects of Stratification. *Procedia Environ Sci* 25:36–43. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2015.04.006>
- Boutt DF, Allen M, Settembrino M, Bonarigo A, Ingari J, Demars R, Munk LA (2021) Groundwater recharge to a structurally complex aquifer system on the island of Tobago (Republic of Trinidad and Tobago). *Hydrogeol J* 29:799–818. <https://doi.org/10.1007/s10040-020-02289-6>
- Briggs MA, Johnson ZC, Snyder CD, Hitt NP, Kurylyk BL, Lautz L, Irvine DJ, Hurley ST, Lane JW (2018) Inferring watershed hydraulics and cold-water habitat persistence using multi-year air and stream temperature signals. *Sci Total Environ* 636:1117–1127. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.344>
- Bruington AE (1972) Saltwater Intrusion Into Aquifers. *JAWRA J Am Water Resour Assoc* 8:150–160. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1972.tb05104.x>
- Brunn JH (1956) Contribution à l'étude géologique du Pinde septentrional et d'une partie de la Macédoine occidentale. Laboratoire de geologie de l'Université de Paris
- Carmona G, Varela-Ortega C, Bromley J (2011) The Use of Participatory Object-Oriented Bayesian Networks and Agro-Economic Models for Groundwater Management in Spain. *Water Resour Manag* 2011 255 25:1509–1524. <https://doi.org/10.1007/S11269-010-9757-Y>
- Cartwright N, Li L, Nielsen P (2004) Response of the salt–freshwater interface in a coastal aquifer to a wave-induced groundwater pulse: field observations and modelling. *Adv Water Resour* 27:297–303. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2003.12.005>
- Casanova J, Devau N, Pettenati M (2016) Managed aquifer recharge: An overview of issues and options. In: *Integrated Groundwater Management: Concepts, Approaches and Challenges*. Springer International Publishing, pp 413–434

- 
- Cattaneo A, Steel RJ (2003) Transgressive deposits: a review of their variability. *Earth-Science Rev* 62:187–228. [https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(02\)00134-4](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(02)00134-4)
- Cetina M, Taupin J-D, Gómez S, Patris N (2020) Hydrodynamic conceptual model of groundwater in the headwater of the Rio de Oro, Santander (Colombia) by geochemical and isotope tools. *Water Supply* 20:1567–1579. <https://doi.org/10.2166/aqua.2020.114>
- Chang M-M, Tomutsa L, Tham MK (1989) Predicting Horizontal/Slanted Well Production by Mathematical Modeling. In: *SPE Production Operations Symposium*. OnePetro
- Cheng AH-D, Ouazar D (2003) *Coastal Aquifer Management-Monitoring, Modeling, and Case Studies*. CRC Press
- Christy RM, Lakshmanan E (2017) Percolation pond as a method of managed aquifer recharge in a coastal saline aquifer: A case study on the criteria for site selection and its impacts. *J Earth Syst Sci* 126:1–16. <https://doi.org/10.1007/s12040-017-0845-8>
- Chun JA, Lim C, Kim D, Kim JS (2018) Assessing impacts of climate change and sea-level rise on seawater intrusion in a coastal aquifer. *Water (Switzerland)* 10:1–11. <https://doi.org/10.3390/w10040357>
- Clark R, Gonzalez D, Dillon P, Charles S, Cresswell D, Naumann B (2015) Reliability of water supply from stormwater harvesting and managed aquifer recharge with a brackish aquifer in an urbanising catchment and changing climate. *Environ Model Softw* 72:117–125. <https://doi.org/10.1016/J.ENVSOF.2015.07.009>
- Coelho CD, Faria ACS, Marques EAG (2017) Comparative analysis of different boundary conditions and their influence on numerical hydrogeological modeling of Palmital watershed, southeast Brazil. *J Hydrol Reg Stud* 12:210–219. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2017.05.006>
- Collins RE (1961) *Fluid Flow through Porous Media*. PennWell Books, Tulsa, Oklahoma
- Collins SL, Houben GJ (2020) Horizontal and radial collector wells: simple tools for a complex problem. *Hydrogeol J* 2020 285 28:1925–1935. <https://doi.org/10.1007/S10040-020-02120-2>
- Cooper HH (1959) A hypothesis concerning the dynamic balance of fresh water and salt water in a coastal aquifer. *J Geophys Res* 64:461–467. <https://doi.org/10.1029/jz064i004p00461>
- Cooper HH, Kohout FA, Henry HR, Glover RE (1964) *Sea Water in Coastal Aquifers RELATION OF SALT WATER TO FRESH GROUND WATER*. U.S. Geological Survey, Washington, DC
- Costa L, Monteiro J, Geraldés P, Hugman RT (2020) Assessing the use of harvested greenhouse runoff for managed aquifer recharge to improve groundwater status in South Portugal. *Environ Earth Sci* 79:1–15. <https://doi.org/10.1007/s12665-020-09003-5>
- Costall AR, Harris BD, Teo B, Schaa R, Wagner FM, Pigois JP (2020) *Groundwater Throughflow and Seawater Intrusion in High Quality Coastal Aquifers*. Springer US
- Criollo R, Velasco V, Nardi A, Manuel de Vries L, Riera C, Scheiber L, Jurado A, Brouyère S, Pujades E Rossetto R, Vázquez-Suñé E (2019) AkvaGIS: An open source tool for water quantity and quality management. *Comput Geosci* 127:123–132. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2018.10.012>
-

- Custodio E, Bruggeman GA (1987) Groundwater problems in coastal areas. Unesco, Belgium
- Dausman AM, Langevin C, Bakker M, Schaars F (2010) A comparison between SWI and SEAWAT – the importance of dispersion , inversion and vertical anisotropy. In: 21st Salt Water Intrusion Meeting. pp 271–274
- De Biase M, Chidichimo F, Micallef A, Maiolo M (2021) The Impact of Predicted Climate Change on Groundwater Resources in a Mediterranean Archipelago: A Modelling Study of the Maltese Islands. 13:3046. <https://doi.org/10.3390/w13213046>
- De Filippis G, Pouliaris C, Kahuda D, Vasile TA, Manea VA, Zaun F, Panteleit B, Dadaser-Celik F, Positano P, Nannucci M, Grodzynski M, Marandi A, Sapiano M, Kopač I, Kallioras A, Cannata M, Filiali-Meknassi Y, Foglia L, Borsi I, Rossetto R (2019) Spatial Data Management and Numerical Modelling: Demonstrating the Application of the QGIS-Integrated FREEWAT Platform at 13 Case Studies for Tackling Groundwater Resource Management. *Water* 2020, Vol 12, Page 41 12:41. <https://doi.org/10.3390/W12010041>
- Deng X, Li F, Zhao Y, Li S (2018) Regulation of deep groundwater based on MODFLOW in the water intake area of the South-to-North Water Transfer Project in Tianjin, China. *J Hydroinformatics* 20:989–1007. <https://doi.org/10.2166/hydro.2018.126>
- Dentoni M, Deidda R, Paniconi C, et al (2015) A simulation/optimization study to assess seawater intrusion management strategies for the Gaza Strip coastal aquifer (Palestine). *Hydrogeol J* 23:249–264. <https://doi.org/10.1007/s10040-014-1214-1>
- Dibaj M, Javadi AA, Akrami M, Ke K, Farmani R, Tan Y, Chen AS (2020) Modelling seawater intrusion in the Pingtung coastal aquifer in Taiwan, under the influence of sea-level rise and changing abstraction regime. *Hydrogeol J* 28:2085–2103. <https://doi.org/10.1007/s10040-020-02172-4>
- Diersch HJG (2014) FEFLOW: Finite element modeling of flow, mass and heat transport in porous and fractured media. Springer Science & Business Media
- Dillon P (2009) Water recycling via managed aquifer recharge in Australia. In: *Boletín Geológico y Minero*. pp 121–130
- Dillon P, Stuyfzand P, Grischek T, Lluria, M, Pyne RDG, Jain RC, Bear J, Schwarz J, Wang W, Fernandez E, Stefan C, Pettenati M, van der Gun J, Sprenger C, Massmann G, Scanlon BR, Xanke J, Jokela P, Zheng Y, Rossetto R, Shamruk M, Pavelic P, Murray E, Ross A, Bonilla Valverde JP, Palma Nava A, Ansems N, Posavec K, Ha K, Martin R, Sapiano M (2019) Sixty years of global progress in managed aquifer recharge. *Hydrogeol J* 27:1–30. <https://doi.org/10.1007/s10040-018-1841-z>
- Dokou Z, Karatzas GP (2012) Estimation de l'intrusion d'eau salée dans un système karstique côtier à l'aide d'une modélisation dépendant de la densité et comparaison avec l'approche d'interface abrupte. *Hydro Sci J* 57:985–999. <https://doi.org/10.1080/02626667.2012.690070>
- Dungumaro EW, Madulu NF (2003) Public participation in integrated water resources management: the case of Tanzania. *Phys Chem Earth, Parts A/B/C* 28:1009–1014. <https://doi.org/10.1016/J.PCE.2003.08.042>

- Dunlop G, Palanichamy J, Kokkat A, EJ J, Palani S (2019) Simulation of saltwater intrusion into coastal aquifer of Nagapattinam in the lower cauvery basin using SEAWAT. *Groundw Sustain Dev* 8:294–301. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2018.11.014>
- Ebeling P, Händel F, Walther M (2019) Potential of mixed hydraulic barriers to remediate seawater intrusion. *Sci Total Environ* 693:133478. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.284>
- Ebeling P, Händel F, Walther M (2019) Potential of mixed hydraulic barriers to remediate seawater intrusion. *Sci Total Environ* 693:. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.284>
- Eck BJ, Mevissen M (2015) Quadratic approximations for pipe friction. *J Hydroinformatics* 17:462–472. <https://doi.org/10.2166/hydro.2014.170>
- El-Rawy M, Al-Maktoumi A, Zekri S, Abdalla O, Al-Abri R (2019) Hydrological and economic feasibility of mitigating a stressed coastal aquifer using managed aquifer recharge: a case study of Jamma aquifer, Oman. *J Arid Land* 11:148–159. <https://doi.org/10.1007/s40333-019-0093-7>
- Elsayed SM, Oumeraci H (2018) Modelling and mitigation of storm-induced saltwater intrusion: Improvement of the resilience of coastal aquifers against marine floods by subsurface drainage. *Environ Model Softw* 100:252–277. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.11.030>
- Enemark T, Peeters LJM, Mallants D, Batelaan O (2019) Hydrogeological conceptual model building and testing: A review. *J Hydrol* 569:310–329. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.12.007>
- Er-Raki S, Chehbouni A, Khabba S, et al (2010) Assessment of reference evapotranspiration methods in semi-arid regions: Can weather forecast data be used as alternate of ground meteorological parameters? *J Arid Environ* 74:1587–1596. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2010.07.002>
- Esquivel JM, Morales GP, Esteller M V. (2015) Groundwater Monitoring Network Design Using GIS and Multicriteria Analysis. *Water Resour Manag* 29:3175–3194. <https://doi.org/10.1007/s11269-015-0989-8>
- European Commission, Directorate-General for Environment (2007) Technical report on groundwater management in the Mediterranean and the Water Framework Directive
- Faneca Sánchez M, Bashar K, Janssen GMCM, Vogels M, Snel J, Zhou Y, Stuurman RJ, Oude Essink GHPI (2015) SWIBANGLA : Managing salt water intrusion impacts in coastal groundwater systems of Bangladesh. *Deltares-rapport 1207671-000-BGS-0016* 153
- Fernandes AJ, Maldaner CH, Negri FR, Alain W, Ingo D. (2016) Aspects of a conceptual groundwater flow model of the Serra Geral basalt aquifer (Sao Paulo, Brazil) from physical and structural geology data. *Hydrogeol J* 24:1199–1212. <https://doi.org/10.1007/s10040-016-1370-6>
- Fetter CW (2001) *Applied Hydrogeology*, 4th edn. Pearson Education, Upper Saddle River, NJ
- Fleury P, Bakalowicz M, de Marsily G (2007) Submarine springs and coastal karst aquifers: A review. *J Hydrol* 339:79–92. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.03.009>
- Gaddis EJB, Voinov A (2008) Participatory Modeling. *Enycl Ecol Five-Volume Set* 2651–2655. <https://doi.org/10.1016/B978-008045405-4.00228-7>

- Gale I (2005) Strategies for Managed Aquifer Recharge (MAR) in semi-arid areas. Paris. UNESCO.
- Gallegos JJ, Hu BX, Davis H (2013) Simulating flow in karst aquifers at laboratory and sub-regional scales using MODFLOW-CFP. *Hydrogeol J* 21:1749–1760. <https://doi.org/10.1007/s10040-013-1046-4>
- Ganot Y, Holtzman R, Weisbrod N, Bernstein A, Siebner H, Katz Y, Kurtzman D (2018) Managed aquifer recharge with reverse-osmosis desalinated seawater: modeling the spreading in groundwater using stable water isotopes. *Hydrol Earth Syst Sci* 22:6323–6333. <https://doi.org/10.5194/hess-22-6323-2018>
- Ganot Y, Holtzman R, Weisbrod N, Nitzan I, Katz Y, Kurtzman D (2017) Monitoring and modeling infiltration-recharge dynamics of managed aquifer recharge with desalinated seawater. *Hydrol Earth Syst Sci* 21:4479–4493. <https://doi.org/10.5194/hess-21-4479-2017>
- Gao C, Guo X, Shao S, Wu J (2021) Using MODFLOW/MT3DMS and electrical resistivity tomography to characterize organic pollutant migration in clay soil layer with a shallow water table. *Environ Technol* 42:4490–4499. <https://doi.org/10.1080/09593330.2020.1767699>
- García-Menéndez O, Renau-Pruñonosa A, Morell I, Ballesteros BJ, Esteller MV (2021) Hydrogeochemical changes during managed aquifer recharge (MAR) in a salinised coastal aquifer. *Appl Geochemistry* 126:. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2020.104866>
- Garduno H, van Steenberg F, Foster S (2010) Stakeholder Participation in Groundwater Management mobilizing and sustaining aquifer management organizations. Washington, DC
- Gelhar LW, Welty C, Rehfeldt KR (1992) A critical review of data on field-scale dispersion in aquifers. *Water Resour Res* 28:1955–1974. <https://doi.org/10.1029/92WR00607>
- Gholizadeh H, Behrouj Peely A, Karney BW, Malekpour A (2020) Assessment of groundwater ingress to a partially pressurized water-conveyance tunnel using a conduit-flow process model: a case study in Iran. *Hydrogeol J* 28:2573–2585. <https://doi.org/10.1007/s10040-020-02213-y>
- Gomaa SM, Hassan TM, Helal E (2021) Assessment of seawater intrusion under different pumping scenarios in Moghra aquifer, Egypt. *Sci Total Environ* 781:146710. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146710>
- Gondwe BRN, Merediz-Alonso G, Bauer-Gottwein P (2011) The influence of conceptual model uncertainty on management decisions for a groundwater-dependent ecosystem in karst. *J Hydrol* 400:24–40. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.01.023>
- Grinevskiy S, Filimonova E, Sporyshev V, Samartsev V, Pozdniakov S (2018) Evapotranspiration capture and stream depletion due to groundwater pumping under variable boreal climate conditions: Sudogda River Basin, Russia. *Hydrogeol J* 26:2753–2767. <https://doi.org/10.1007/s10040-018-1831-1>
- Grinshpan M, Furman A, Dahlke HE, Raveh E, Weisbrod N (2021) From managed aquifer recharge to soil aquifer treatment on agricultural soils: Concepts and challenges. *Agric Water Manag* 255:106991. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2021.106991>

- Guo Q, Huang J, Zhou Z, Wang J (2019) Experiment and Numerical Simulation of Seawater Intrusion under the Influences of Tidal Fluctuation and Groundwater Exploitation in Coastal Multilayered Aquifers. *Geofluids* 2019:1–17. <https://doi.org/10.1155/2019/2316271>
- Guo W, Bennett GD (1998) Simulation of saline/fresh water flows using MODFLOW. In: Proc. of the MODFLOW'98 Conf., Oct. 4-8, 1998, Golden, Colorado, USA. pp 267–274
- Guo W, Langevin CD (2002) User ' s Guide to SEAWAT : A Computer Program For Simulation of Ground-Water Flow Techniques of Water-Resources Investigations of the U. S. Geological Survey
- Haitjema H, Kuzin S, Kelson V, Abrams D (2010) Modeling Flow into Horizontal Wells in a Dupuit-Forchheimer Model. *Ground Water* 48:878–883. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2010.00694.x>
- Hamzaoui-Azaza F, Zammouri M, Ameer M, et al (2020) Hydrogeochemical modeling for groundwater management in arid and semiarid regions using MODFLOW and MT3DMS: A case study of the Jeffara of Medenine coastal aquifer, South-Eastern Tunisia. *Nat Resour Model* 33:. <https://doi.org/10.1111/nrm.12282>
- Han D, Post VEA, Song X (2015) Groundwater salinization processes and reversibility of seawater intrusion in coastal carbonate aquifers. *J Hydrol* 531:1067–1080. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.11.013>
- Hantush MS, Papadopoulos IS (1962) Flow of Ground Water to Collector Wells. *J Hydraul Div* 88:221–244
- Harbaugh AW (2005) The U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model — the Ground-Water Flow Process. *US Geol Surv Tech Methods* 6-A16 253
- Harbaugh AW, Banta ER, Hill MC, McDonald MG (2000) MODFLOW-2000 , The U .S . Geological Survey modular ground-water model — User guide to modularization concepts and the ground-water flow process. US Geological Survey
- Harbaugh, Arlen W (2005) MODFLOW-2005 , The U.S . Geological Survey Modular Ground-Water Model — the Ground-Water Flow Process. In: U.S. Geological Survey Techniques and Methods. p 253
- Hasan MM, Ahmed KM, Sultana S, Rahman MS, Ghosh SK, Ravenscroft P (2018) Investigations on Groundwater Buffering in Khulna-Satkhira Coastal Belt Using Managed Aquifer Recharge. In: *In Groundwater of South Asia* (pp. 453-462). Springer, Singapor, pp 453–462
- Headworth HG, Fox GB (1985) The South Downs chalk aquifer: its development and management. *J Inst Water Eng Sci* 40:345–361
- Heath R (1983) Basic Ground-Water Hydrology. US Department of the Interior, US Geological Survey
- Henriksen HJ, Rasmussen P, Brandt G, von Bülow D, Jensen FV (2007) Public participation modelling using Bayesian networks in management of groundwater contamination. *Environ Model Softw* 22:1101–1113. <https://doi.org/10.1016/J.ENVSOF.2006.01.008>
- Hill M, Tiedeman C (2007) Effective Groundwater Model Calibration: With Analysis of Data, Sensitivities, Predictions, and Uncertainty. John Wiley & Sons
- Hill ME, Stewart MT, Martin A (2010) Evaluation of the MODFLOW-2005 conduit flow process. *Ground Water* 48:549–559. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2009.00673.x>

- Højberg AL, Trolborg L, Stisen S, Christensen, Britt BS, Henriksen HJ (2013) Stakeholder driven update and improvement of a national water resources model. *Environ Model Softw* 40:202–213. <https://doi.org/10.1016/J.ENVSOFT.2012.09.010>
- Illangasekare T, Tyler SW, Clement TP, Villholth KG, Perera AP, Obeysekera J, Gunatilaka A, Panabokke CR, Hyndman DW, Cunningham, KJ, Kaluarachchi JJ, Yeh, William WG, van Genuchten MT, Jensen K (2006) Impacts of the 2004 tsunami on groundwater resources in Sri Lanka. *Water Resour Res* 42:. <https://doi.org/10.1029/2006WR004876>
- Inouchi K, Kishi Y, Kakinuma T (1990) The motion of coastal groundwater in response to the tide. *J Hydrol* 115:165–191. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(90\)90203-A](https://doi.org/10.1016/0022-1694(90)90203-A)
- Isaacs L., Hunt B (1986) A simple approximation for a moving interface in a coastal aquifer. *J Hydrol* 83:29–43. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(86\)90181-2](https://doi.org/10.1016/0022-1694(86)90181-2)
- Ismail WMZW, Yusoff I, Rahim B, eldin EA (2012) Simulation of horizontal well performance using Visual MODFLOW. *Environ Earth Sci* 2012 684 68:1119–1126. <https://doi.org/10.1007/S12665-012-1813-X>
- Ismail WMZW, Yusoff I, Rahim BEA (2012) Simulation of horizontal well performance using Visual MODFLOW. *Environ Earth Sci* 2012 684 68:1119–1126. <https://doi.org/10.1007/S12665-012-1813-X>
- Jackson S, Tan PL, Nolan S (2012) Tools to enhance public participation and confidence in the development of the Howard East aquifer water plan, Northern Territory. *J Hydrol* 474:22–28. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2012.02.007>
- Jafary F (2016) Participatory modelling platform for groundwater irrigation management with local farmers in Iran (Kashan). University of Birmingham
- Jamiolahmady M, Danesh A (2007) Comparison of Vertical, Slanted, and Horizontal Wells Productivity in Layered Gas-Condensate Reservoirs. In: EUROPEC/EAGE Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers
- Janardhana Raju N, Reddy TVK, Muniratnam P, Gossel W, Wycisk P (2013) Managed aquifer recharge (MAR) by the construction of subsurface dams in the semi-arid regions: A case study of the Kalangi river basin, Andhra Pradesh. *J Geol Soc India* 82:657–665. <https://doi.org/10.1007/s12594-013-0204-6>
- Jensen R, Uddameri V (2009) Using communication research to gather stakeholder preferences to improve groundwater management models: a South Texas case study. *J Sci Commun* 8:A02. <https://doi.org/10.22323/2.08010202>
- Jiao J, Post V (2019) Coastal Hydrogeology. Cambridge University Press
- Kaleris VK, Ziogas AI (2013) The effect of cutoff walls on saltwater intrusion and groundwater extraction in coastal aquifers. *J Hydrol* 476:370–383. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.11.007>
- Kallioras A, Pliakas F, Diamantis I, Emmanouil M (2007) Application of Geographical Information Systems (GIS) for the Management of Coastal Aquifers Subjected to Seawater Intrusion. 41:2027–2044. <https://doi.org/10.1080/10934520600780669>

- Kallioras A, Pliakas F-K, Schuth C, Rausch R (2013) Methods to Countermeasure the Intrusion of Seawater into Coastal Aquifer Systems. In: Sharma SK, Sanghi R (eds) Wastewater Reuse and Management. pp 1–500
- Karatzas GP, Dokou Z (2015) Optimal management of saltwater intrusion in the coastal aquifer of Malia , Crete ( Greece ), using particle swarm optimization. 1181–1194. <https://doi.org/10.1007/s10040-015-1286-6>
- Kelson V (2012) Predicting Collector Well Yields with MODFLOW. *Groundwater* 50:918–926. <https://doi.org/10.1111/J.1745-6584.2012.00910.X>
- Kerr R (1985) DRASTIC: A Standardized System for Evaluating Ground Water Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings. U.S. Environmental Protection Agency
- Kerrou J, Renard P (2010) Analyse numérique des effets dimensionnels et des hétérogénéités sur les intrusions d’eau marine en milieu dispersif. *Hydrogeol J* 18:55–72. <https://doi.org/10.1007/S10040-009-0533-0/FIGURES/13>
- Ketabchi H, Mahmoodzadeh D, Ataie-Ashtiani B, Simmons CT (2016) Sea-level rise impacts on seawater intrusion in coastal aquifers: Review and integration. *J Hydrol* 535:235–255. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.01.083>
- Ketata M, Gueddari M, Bouhlila R (2014) Journal of African Earth Sciences Hydrodynamic and salinity evolution of groundwaters during artificial recharge within semi-arid coastal aquifers : A case study of El Khairat aquifer system in Enfidha (Tunisian Sahel). *J AFRICAN EARTH Sci* 97:224–229. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2014.05.002>
- Khadra WM, Stuyfzand PJ (2018) Simulation of saltwater intrusion in a poorly karstified coastal aquifer in Lebanon (Eastern Mediterranean). *Hydrogeol J* 2018 266 26:1839–1856. <https://doi.org/10.1007/S10040-018-1752-Z>
- Koltermann CE, Gorelick SM (1996) Heterogeneity in sedimentary deposits: A review of structure-imitating, process-imitating, and descriptive approaches. *Water Resour Res* 32:2617–2658. <https://doi.org/10.1029/96WR00025>
- Koltsida E, Kallioras A (2019) Groundwater flow simulation through the application of the FREEWAT modeling platform. *J Hydroinformatics* 21:812–833. <https://doi.org/10.2166/hydro.2019.040>
- Konikow LF, Hornberger GZ, Halford KJ, Hanson RT (2009) Revised Multi-Node Well (MNW2) Package for MODFLOW Ground-Water Flow Model. US Geological Survey Techniques and Methods
- Kontos YN, Katsifarakis KL (2018) Genetic Algorithms in Polluted Coastal Aquifers ’ Management. *WSEAS Transactions on Information Science and Applications*, 14, 190-200
- Kottek M, Grieser J, Beck C, Rudolf B, Rubel F (2006) World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. 15:259–263. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0130>
- Kuang X, Jiao JJ, Zheng C, et al (2020) A review of specific storage in aquifers. *J Hydrol* 581:. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2019.124383>



- Lal A, Datta B (2018) Modelling saltwater intrusion processes and development of a multi-objective strategy for management of coastal aquifers utilizing planned artificial freshwater recharge. *Model Earth Syst Environ* 4:111–126. <https://doi.org/10.1007/s40808-017-0405-x>
- Lancia M, Petitta M, Zheng C, Saroli M (2020) Hydrogeological insights and modelling for sustainable use of a stressed carbonate aquifer in the Mediterranean area: From passive withdrawals to active management. *J Hydrol Reg Stud* 32:100749. <https://doi.org/10.1016/J.EJRH.2020.100749>
- Langevin CD, Hughes J.D., Banta ER, Niswonger RG, Panday S, Provost AM (2017). Documentation for the MODFLOW 6 groundwater flow model. US Geological Survey
- Langevin CD, Shoemaker WB, Guo W (2003) MODFLOW-2000, the U.S. Geological Survey Modular Groundwater Model-Documentation of the SEAWAT-2000 version with the Variable-Density Flow Process (VDF) and the Integrated MT3DMS Transport Process (IMT). US Geological Survey
- Langevin CD, Thorne Jr. DT, Dausman AM, et al (2007) SEAWAT Version 4: A Computer Program for Simulation of Multi-Species Solute and Heat Transport. US Geological Survey
- Lee H, Koo M-H, Oh S (2019) Modeling Stream-Aquifer Interactions Under Seasonal Groundwater Pumping and Managed Aquifer Recharge. *Groundwater* 57:216–225. <https://doi.org/10.1111/gwat.12799>
- Lin J, Zhu D (2014) Modeling well performance for fractured horizontal gas wells. *J Nat Gas Sci Eng* 18:180–193. <https://doi.org/10.1016/J.JNGSE.2014.02.011>
- Liolios KA, Moutsopoulos KN, Tsihrintzis VA (2012) Modeling of flow and BOD fate in horizontal subsurface flow constructed wetlands. *Chem Eng J* 200–202:681–693. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.06.101>
- Lionello P, Malanotte-Rizzoli P, Boscolo R, et al (2006) The Mediterranean climate: An overview of the main characteristics and issues. *Dev Earth Environ Sci* 4:1–26. [https://doi.org/10.1016/S1571-9197\(06\)80003-0](https://doi.org/10.1016/S1571-9197(06)80003-0)
- Logan WS (2020) Managed Aquifer Recharge and the U. S. Army Corps of Engineers: Water Security through Resilience. Alexandria, Virginia
- López-Urrea R, Olalla FM de S, Fabeiro C, Moratalla A (2006) An evaluation of two hourly reference evapotranspiration equations for semiarid conditions. *Agric Water Manag* 86:277–282. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2006.05.017>
- Lu C, Chen Y, Zhang C, Luo J (2013) Steady-state freshwater – seawater mixing zone in stratified coastal aquifers. *J Hydrol* 505:24–34. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.09.017>
- Lu C, Werner AD, Simmons CT, et al (2012) Maximizing Net Extraction Using an Injection-Extraction Well Pair in a Coastal Aquifer. *Ground Water* no-no. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2012.00973.x>
- Luyun R, Momii K, Nakagawa K (2011) Effects of Recharge Wells and Flow Barriers on Seawater Intrusion. *Ground Water* 49:239–249. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2010.00719.x>
- Ma J, Jiang Q, Zhang Q, et al (2021) Effect of groundwater forced seepage on heat transfer characteristics of borehole heat exchangers. *Geotherm Energy* 9:11. <https://doi.org/10.1186/s40517-021-00192-1>

- Mackenzie J, Tan PL, Hoverman S, Baldwin C (2012) The value and limitations of Participatory Action Research methodology. *J Hydrol* 474:11–21. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2012.09.008>
- Mahesha A (2001) An overview of control of salt water intrusion in coastal aquifers. *ISH J Hydraul Eng* 7:58–71. <https://doi.org/10.1080/09715010.2001.10514690>
- Maliva RG (2020) *Anthropogenic Aquifer Recharge WSP Methods in Water Resources*. Springer Nature Switzerland AG
- Maliva RG, Missimer TM, Winslow FP, Herrmann R (2011) Aquifer storage and recovery of treated sewage effluent in the middle east. *Arab J Sci Eng* 36:63–74. <https://doi.org/10.1007/s13369-010-0011-y>
- Maples SR, Fogg GE, Maxwell RM (2019) Modeling managed aquifer recharge processes in a highly heterogeneous, semi-confined aquifer system. *Hydrogeol J* 2019 278 27:2869–2888. <https://doi.org/10.1007/S10040-019-02033-9>
- Masciopinto C (2013) Management of aquifer recharge in Lebanon by removing seawater intrusion from coastal aquifers. *J Environ Manage* 130:306–312. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.08.021>
- Mcdonald MG, Harbaugh AW (1988) A MODULAR THREE-DIMENSIONAL FINITE-DIFFERENCE GROUND-WATER FLOW MODEL
- Mckeever V, Owen W, Rallison R, Engineers H (1972) NATIONAL ENGINEERING HANDBOOK SECTION 4-HYDROLOGY. Soil Conservation Service
- Melloul A, Collin M (2006) Hydrogeological changes in coastal aquifers due to sea level rise. *Ocean Coast Manag* 49:281–297. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2006.03.009>
- Meyer R, Engesgaard P, Sonnenborg TO (2019) Origin and Dynamics of Saltwater Intrusion in a Regional Aquifer: Combining 3-D Saltwater Modeling With Geophysical and Geochemical Data. *Water Resour Res* 55:1792–1813. <https://doi.org/10.1029/2018WR023624>
- Michael HA, Post VEA, Wilson AM, Werner AD (2017) Science, society, and the coastal groundwater squeeze. *Water Resour Res* 53:2610–2617. <https://doi.org/10.1002/2017WR020851>
- Michael HA, Russoniello CJ, Byron LA (2013) Global assessment of vulnerability to sea-level rise in topography-limited and recharge-limited coastal groundwater systems. *Water Resour Res* 49:2228–2240. <https://doi.org/10.1002/wrcr.20213>
- Michael HA, Scott KC, Koneshloo M, Yu X, Khan MR, Li K (2016) Geologic influence on groundwater salinity drives large seawater circulation through the continental shelf. *Geophys Res Lett* 43:10,782-10,791. <https://doi.org/10.1002/2016GL070863>
- Miller RR (1996) *Horizontal Wells: Technology Overview Report*. Ground-Water Remediation Technologies Analysis Center. Pittsburgh
- Missimer TM, Drewes JE, Amy G, Maliva RG, Keller S (2012) Restoration of Wadi Aquifers by Artificial Recharge with Treated Waste Water. *Groundwater* 50:514–527. <https://doi.org/10.1111/J.1745-6584.2012.00941.X>

- Missimer TM, Guo W, Wooschlager J, Maliva RG (2017) Long-term managed aquifer recharge in a saline-water aquifer as a critical component of an integrated water scheme in Southwestern Florida, USA. *Water (Switzerland)* 9:1–14. <https://doi.org/10.3390/w9100774>
- Moghaddam HK, Kivi ZR, Bahreinimotlagh M, Moghddam HK (2020) Evaluation of the groundwater resources vulnerability index using nitrate concentration prediction approach. *Geocarto Int* 1–15. <https://doi.org/10.1080/10106049.2020.1797184>
- Mohamed A, Rushton K (2006) Horizontal wells in shallow aquifers: Field experiment and numerical model. *J Hydrol* 329:98–109. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.02.006>
- Moody L (1944) Friction Factors for Pipe flow. *Trans Am Soc Mech Eng* 66:671–681
- Motevalli A, Moradi HR, Javadi S (2018) A Comprehensive evaluation of groundwater vulnerability to saltwater up-coning and sea water intrusion in a coastal aquifer (case study: Ghaemshahr-juybar aquifer). *J Hydrol* 557:753–773. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2017.12.047>
- Müller T, Sanford W (2019) Calibration of regional hydraulic and transport properties of an arid-region aquifer under modern and paleorecharge conditions using water levels and environmental tracers. *Hydrogeol J* 27:685–701. <https://doi.org/10.1007/s10040-018-1894-z>
- Mulligan AE, Langevin C, Post VEA (2011) Tidal Boundary Conditions in SEAWAT. *Ground Water* 49:866–879. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2010.00788.x>
- Mustafa SMT, Nossent J, Ghysels G, Huysmans M (2020) Integrated Bayesian Multi-model approach to quantify input, parameter and conceptual model structure uncertainty in groundwater modeling. *Environ Model Softw* 126:104654. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2020.104654>
- Nassery HR, Zeydalinejad N, Alijani F, Shakiba A (2021) A proposed modelling towards the potential impacts of climate change on a semi-arid, small-scaled aquifer: a case study of Iran. *Environ Monit Assess* 193:182. <https://doi.org/10.1007/s10661-021-08955-w>
- Nelms DL, Harlow GE, Plummer LN, Busenberg E (2003) Aquifer susceptibility in Virginia, 1998-2000. *U S Geol Surv Water-Resources Investig Rep* 03-4278 03–4278:58
- Ni W, Dang P, Ding K (2020) Institutional reform and irrigation water pricing in China. *Irrig Drain* 69:19–24. <https://doi.org/10.1002/IRD.2521>
- Nishigaki M, Kankam-Yeboah K, Komatsu M (2004) Underground dam technology in some parts of the world. *J Groundw Hydrol* 46:113–130. <https://doi.org/10.5917/jagh1987.46.113>
- Niswonger RG (2020) An Agricultural Water Use Package for MODFLOW and GSFLOW. *Environ Model Softw* 125:104617. <https://doi.org/10.1016/J.ENVSOFT.2019.104617>
- Oude Essink GHP, van Baaren ES, de Louw PGB (2010) Effects of climate change on coastal groundwater systems: A modeling study in the Netherlands. *Water Resour Res* 46:2009WR008719. <https://doi.org/10.1029/2009WR008719>

- Papanikolaou D, Papanikolaou I (2007) Geological, Geomorphological and Tectonic Structure of Ne Attica and Seismic Hazard Implications for the Northern Edge of the Athens Plain. *Bull Geol Soc Greece* 40:425. <https://doi.org/10.12681/bgsg.16634>
- Parimalarenganayaki S (2021) Managed Aquifer Recharge in the Gulf Countries: A Review and Selection Criteria. *Arab J Sci Eng* 46:1–15. <https://doi.org/10.1007/s13369-020-05060-x>
- Parkhurst DL, Appelo C a. J (2013) Description of Input and Examples for PHREEQC Version 3 — A Computer Program for Speciation, Batch-Reaction, One-Dimensional Transport, and Inverse Geochemical Calculations. U.S. Geological Survey Techniques and Methods, book 6, chapter A43, 497 p. US Geol Surv Tech Methods, B 6, chapter A43 6-43A
- Peng M, Lu Z, Zhao C, et al (2022) Mapping land subsidence and aquifer system properties of the Willcox Basin, Arizona, from InSAR observations and independent component analysis. *Remote Sens Environ* 271:112894. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.112894>
- Perdikaki M, Manjarrez RC, Pouliaris C, et al (2020) Free and open-source GIS-integrated hydrogeological analysis tool: an application for coastal aquifer systems. *Environ Earth Sci* 79:348. <https://doi.org/10.1007/s12665-020-09092-2>
- Perleros V (2001) Geological-Hydrogeological Assessment. In Technical Report on Integrated Assessment for Planning and Development Including Supporting Research Activities for the Construction of Schinias Olympic Rowing and Canoeing Centre. Athens, Greece
- Pirnie M, Jackson S (2011) An Assessment of Aquifer Storage and Recovery in Texas. Texas Water Development Board. Austin, Texas
- Pisinaras V, Paraskevas C, Panagopoulos A (2021) Investigating the Effects of Agricultural Water Management in a Mediterranean Coastal Aquifer under Current and Projected Climate Conditions. *Water*, Vol 13, Page 108 13:108. <https://doi.org/10.3390/W13010108>
- Pliakas F, Petalas C, Diamantis I, Kallioras A (2005) Modeling of Groundwater Artificial Recharge by Reactivating an Old Stream Bed. *Water Resour Manag* 19:279–294. <https://doi.org/10.1007/s11269-005-3472-0>
- Poeter E, Hill M, Banta E, et al (2005) UCODE 2005 and Six Other Computer Codes for Universal Sensitivity Analysis , Calibration , and Uncertainty Evaluation. US Geological Survey
- Poeter EP, Hill MC (1999) UCODE, a computer code for universal inverse modeling. *Computers & Geosciences* 25: 457-462. [https://doi.org/10.1016/S0098-3004\(98\)00149-6](https://doi.org/10.1016/S0098-3004(98)00149-6)
- Poeter EP, Hill MC, Lu D, et al (2014) UCODE\_2014, with new capabilities to define parameters unique to predictions, calculate weights using simulated values, estimate parameters with SVD, evaluate uncertainty with MCMC, and more. *Integr Groundw Model Cent Rep Number GWMI 2014-02* 172
- Pool M, Carrera J (2010) Dynamics of negative hydraulic barriers to prevent seawater intrusion. *Hydrogeol J* 18:. <https://doi.org/10.1007/s10040-009-0516-1>

- Pool M, Post VEA, Simmons CT (2015) Effects of tidal fluctuations and spatial heterogeneity on mixing and spreading in spatially heterogeneous coastal aquifers. *Water Resour Res* 51:1570–1585. <https://doi.org/10.1002/2014WR016068>
- Post VEA (2005) Fresh and saline groundwater interaction in coastal aquifers: Is our technology ready for the problems ahead? *Hydrogeol J* 13:120–123. <https://doi.org/10.1007/s10040-004-0417-2>
- Pouliaris C (2019) Groundwater modelling of a coastal semi-arid hydrogeological system. Technische Universität Darmstadt
- Pouliaris C, Perdikaki M, Foglia L, Schüth C, Kallioras A (2018) Hydrodynamic analysis of a Mediterranean aquifer system with the use of hydrochemical and isotopical analysis as supporting tools. *Environ Earth Sci* 77:. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7418-2>
- Psychoyou M, Mimides T, Rizos S, Sgoubopoulou A (2007) Groundwater hydrochemistry at Balkan coastal plains - the case of Marathon of Attica, Greece. *Desalination* 213:230–237. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2006.04.088>
- Pulido-Bosch A (2021) Principles of Karst Hydrogeology: Conceptual Models, Time Series Analysis, Hydrogeochemistry and Groundwater Exploitation. Springer Nature
- Pyne RDG (2015) Aquifer storage recovery: an ASR solution to saltwater intrusion at Hilton Head Island, South Carolina, USA. *Environ Earth Sci* 73:7851–7859. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3985-z>
- Ranjbar A, Cherubini C, Saber A (2020) Investigation of transient sea level rise impacts on water quality of unconfined shallow coastal aquifers. *Int J Environ Sci Technol* 17:2607–2622. <https://doi.org/10.1007/s13762-020-02684-2>
- Reilly T (2001) System and Boundary Conceptualization in Ground-Water Flow Simulation Techniques of Water. In: Book 3 Applications of Hydraulics. U.S. Geological Survey
- Ringleb J, Sallwey J, Stefan C (2016) Assessment of managed aquifer recharge through modeling-A review. *Water (Switzerland)* 8:1–31. <https://doi.org/10.3390/w8120579>
- Robins NS, Jones HK, Ellis J (1999) An Aquifer Management Case Study – The Chalk of the English South Downs. *Water Resour Manag* 13:205–218. <https://doi.org/https://doi.org/10.1023/A:1008101727356>
- Robinson C, Gibbes B, Li L (2006) Driving mechanisms for groundwater flow and salt transport in a subterranean estuary. *Geophys Res Lett* 33:L03402. <https://doi.org/10.1029/2005GL025247>
- Rossetto R, De Filippis G, Triana F, Ghetta M, Borsi I, Schmid W (2019) Software tools for management of conjunctive use of surface- and ground-water in the rural environment: integration of the Farm Process and the Crop Growth Module in the FREEWAT platform. *Agric Water Manag* 223:105717. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2019.105717>
- Rouillard J, Neverre N, Rinaudo JD (2022) Initiating collective action for the management of deep confined aquifer systems: application of a participatory scenario approach in France. *Hydrogeol J* 30:21–36. <https://doi.org/10.1007/S10040-021-02420-1/FIGURES/7>

- Ruiz E, Huamaní L, Paucar J, Larota J, Jiménez C, Gallo Y (2021) Planning the Dewatering of a Tailings Storage Facility. *Mine Water Environ* 40:270–284. <https://doi.org/10.1007/s10230-020-00745-z>
- Russo TA, Fisher AT, Lockwood BS (2015) Assessment of Managed Aquifer Recharge Site Suitability Using a GIS and Modeling. *Groundwater* 53:389–400. <https://doi.org/10.1111/gwat.12213>
- Ryan C, Elsner P (2016) The potential for sand dams to increase the adaptive capacity of East African drylands to climate change. *Reg Environ Chang* 16:2087–2096. <https://doi.org/10.1007/s10113-016-0938-y>
- Saaty RW (1987) The analytic hierarchy process—what it is and how it is used. *Math Model* 9:161–176. [https://doi.org/10.1016/0270-0255\(87\)90473-8](https://doi.org/10.1016/0270-0255(87)90473-8)
- Saaty TL, Kearns KP (1991) Analytical planning : the organization of systems. RWS Publications
- Sadeghi-Tabas S, Samadi SZ, Akbarpour A, Pourreza-Bilondi M (2017) Sustainable groundwater modeling using single- and multi-objective optimization algorithms. *J Hydroinformatics* 19:97–114. <https://doi.org/10.2166/hydro.2016.006>
- Saeed MM, Bruen M, Asghar MN (2002) A Review of Modeling Approaches to Simulate Saline-Upconing under Skimming Wells. *Hydrol Res* 33:165–188. <https://doi.org/10.2166/nh.2002.0021>
- Sallwey J, Glass J, Stefan C (2018) Utilizing unsaturated soil zone models for assessing managed aquifer recharge. *Sustain Water Resour Manag* 4:383–397. <https://doi.org/10.1007/s40899-018-0214-z>
- Sandoval R (2004) A participatory approach to integrated aquifer management: The case of Guanajuato State, Mexico. *Hydrogeol J* 2004 121 12:6–13. <https://doi.org/10.1007/S10040-003-0311-3>
- Schulze-Makuch D (2005) Longitudinal dispersivity data and implications for scaling behavior. *Ground Water* 43:443–456. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2005.0051.x>
- Sedghi MM, Zhan H (2019) Groundwater dynamics due to general stream fluctuations in an unconfined single or dual-porosity aquifer subjected to general areal recharge. *J Hydrol* 574:436–449. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.04.052>
- Shavit U, Furman A (2001) The location of deep salinity sources in the Israeli Coastal aquifer. *J Hydrol* 250:63–77. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(01\)00406-1](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00406-1)
- Shi L, Jiao JJ (2014) Seawater intrusion and coastal aquifer management in China: a review. *Environ Earth Sci* 72:2811–2819. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3186-9>
- Shoemaker WB (2004) Important Observations and Parameters. *Ground Water* 42:829–840
- Shoemaker WB, Kuniatsky EL, Birk S, Bauer S, Swain ED (2007) Documentation of a Conduit Flow Process (CFP) for MODFLOW-2005. US Geological Survey
- Sotiropoulos P, Tzanis A, Sideris G (2007) WatertoolTM: an Automated System for Hydrological Investigations With Application At the Area of Kato Souli (Ne Attica, Greece). *Bull Geol Soc Greece* 40:548. <https://doi.org/10.12681/bgsg.16322>
- Sprenger C, Hartog N, Hernández M, Vilanova E, Grützmacher G, Scheibler F, Hannappel S (2017) Inventory of managed aquifer recharge sites in Europe: historical development, current situation and perspectives. 1909–1922. <https://doi.org/10.1007/s10040-017-1554-8>

- Steenbergen F (2006) Promoting local management in groundwater. *Hydrogeol J* 2005 143 14:380–391. <https://doi.org/10.1007/S10040-005-0015-Y>
- Steenhuis T, Molen W (1986) The TM procedure as a simple engineering method to predict recharge. *J Hydrol* 84:221–229
- Stefan C, Ansems N (2018) Web-based global inventory of managed aquifer recharge applications. *Sustain Water Resour Manag* 4:153–162. <https://doi.org/10.1007/s40899-017-0212-6>
- Strack ODL, Stoeckl L, Damm K, Houben G, Ausk BK, de Lange WJ (2016) Reduction of saltwater intrusion by modifying hydraulic conductivity. *Water Resour Res* 52:6978–6988. <https://doi.org/10.1002/2016WR019037>
- Sukhija BS, Reddy DV, Nandakumar MV, Rama (1997) A Method for Evaluation of Artificial Recharge Through Percolation Tanks Using Environmental Chloride. *Groundwater* 35:161–165. <https://doi.org/10.1111/J.1745-6584.1997.TB00071.X>
- Sultana S, Ahmed KM, Mahtab-Ul-Alam SM, Hasan M, Tuinhof A, Ghosh SK, Rahman M, Ravenscroft P, Zheng Y (2015) Low-Cost Aquifer Storage and Recovery: Implications for Improving Drinking Water Access for Rural Communities in Coastal Bangladesh. *J Hydrol Eng* 20:. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001100](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001100)
- Szymkiewicz A, Potrykus D, Jaworska-Szulc B, Gumuła-Kawecka A, Pruszkowska-Caceres M, Dzierzbicka-Głowacka L (2020) Evaluation of the Influence of Farming Practices and Land Use on Groundwater Resources in a Coastal Multi-Aquifer System in Puck Region (Northern Poland). *Water* 2020, Vol 12, Page 1042 12:1042. <https://doi.org/10.3390/W12041042>
- Taylor M, Elliott HA, Navitsky LO (2018) Relationship between total dissolved solids and electrical conductivity in Marcellus hydraulic fracturing fluids. *Water Sci Technol* 77:1998–2004. <https://doi.org/10.2166/wst.2018.092>
- Thi Nhung T, Le Vo P, Van Nghi V, Quoc Bang H (2019) Salt intrusion adaptation measures for sustainable agricultural development under climate change effects: A case of Ca Mau Peninsula, Vietnam. *Clim Risk Manag* 23:88–100. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2018.12.002>
- Thornthwaite CW, Mather JR (1957) Instructions and Tables for Computing Potential Evapotranspiration and the Water Balance. Drexel Institute of Technology. Laboratory of Climatology. *Publ Climatol* 10:181–289
- Timani B, Peralta R (2015) Multi-model groundwater-management optimization: reconciling disparate conceptual models. *Hydrogeol J* 23:1067–1087. <https://doi.org/10.1007/s10040-015-1259-9>
- Todd DK (1974) Salt-Water Intrusion and Its Control. *J Am Water Works Assoc* 66:180–187. <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.1974.tb01999.x>
- Todd DK, Mays LW (2005) *Groundwater hydrology*, 3rd edn. John Wiley & Sons, Ltd, Hoboken, NJ
- Tran DA, Tsujimura M, Pham H V, Nguyen T, Ho L, Le Vo P, Ha K, Dang T, Van Binh D, Doan Q (2022) Intensified salinity intrusion in coastal aquifers due to groundwater overextraction: a case study in the Mekong Delta, Vietnam. *Environ Sci Pollut Res* 29:8996–9010. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16282-3>

- Trefry MG, Muffels C (2007) FEFLOW: A Finite-Element Ground Water Flow and Transport Modeling Tool. *Groundwater* 45:525–528. <https://doi.org/10.1111/J.1745-6584.2007.00358.X>
- Tzani A, Chailas S, Sotiropoulos P, Kranis C, Karmis P (2009) Geophysical Investigation of Hydrogeological Conditions and Salination Processes at the Marathon - Kao Souli Basin (NE Attica, Greece). In: 5th Congress of Balkan Geophysical Society. European Association of Geoscientists & Engineers
- Tzoraki O, Dokou Z, Christodoulou G, Gaganis P, Karatzas G (2018) Assessing the efficiency of a coastal Managed Aquifer Recharge (MAR) system in Cyprus. *Sci Total Environ* 626:875–886. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.160>
- USDA (1972) National engineering handbook, section 4: hydrology. Washington, DC 127
- van Camp M, Mtoni Y, Mjemah IC, Bakundukize C, Walraevens K (2014) Investigating seawater intrusion due to groundwater pumping with schematic model simulations: The example of the Dar es Salaam coastal aquifer in Tanzania. *J African Earth Sci* 96:71–78. <https://doi.org/10.1016/J.JAFREARSCI.2014.02.012>
- van Ginkel M, Olsthoorn TN, Bakker M (2014) A New Operational Paradigm for Small-Scale ASR in Saline Aquifers. *Groundwater* 52:685–693. <https://doi.org/10.1111/gwat.12113>
- Vandenbohede A, Lebbe L (2006) Occurrence of salt water above fresh water in dynamic equilibrium in a coastal groundwater flow system near De Panne, Belgium. *Hydrogeol J* 14:462–472. <https://doi.org/10.1007/s10040-005-0446-5>
- Vanderzalm JL, Page DW, Dillon PJ (2011) Application of a risk management framework to a drinking water supply augmented by stormwater recharge. *Water Sci Technol* 63:719–726. <https://doi.org/10.2166/wst.2011.294>
- Vangelis H, Tigkas D, Tsakiris G (2013) The effect of PET method on Reconnaissance Drought Index (RDI) calculation. *J Arid Environ* 88:130–140. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2012.07.020>
- Vengadesan M, Lakshmanan E (2018) Management of coastal groundwater resources. *Coast Manag Glob Challenges Innov* 2006:383–397. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-810473-6.00018-2>
- Venkata S, Das G, Burke J (2013) Smallholders and sustainable wells A Retrospect: Participatory Groundwater Management in Andhra Pradesh (India) A Retrospect: Participatory Groundwater Management in Andhra Pradesh (India). Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome
- Venkatramanan S, Viswanathan M, Chung SY (2019) GIS and Geostatistical Techniques for Groundwater Science. Elsevier
- Voinov A, Bousquet F (2010) Modelling with stakeholders. *Environ Model Softw* 25:1268–1281. <https://doi.org/10.1016/J.ENVSFT.2010.03.007>
- Voisin J, Cournoyer B, Vienney A, Mermillod-Blondin F (2018) Aquifer recharge with stormwater runoff in urban areas: Influence of vadose zone thickness on nutrient and bacterial transfers from the surface of infiltration basins to groundwater. *Sci Total Environ* 637–638:1496–1507. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.094>



- Voss CI, Provost A (2010) SUTRA, A model for saturated-unsaturated variable-density ground-water flow with solute or energy transport, U.S. Geological Survey
- Walton NRG (1989) Electrical Conductivity and Total Dissolved Solids—What is Their Precise Relationship? *Desalination* 72:275–292. [https://doi.org/10.1016/0011-9164\(89\)80012-8](https://doi.org/10.1016/0011-9164(89)80012-8)
- Wang H, Anderson MP (1995) *Introduction to Groundwater Modeling: Finite Difference and Finite Element Methods*. Academic Press Inc., Madison, Wisconsin
- Wang J-Z, Jiang X-W, Wan L, et al (2014) An analytical study on groundwater flow in drainage basins with horizontal wells. *Hydrogeol J* 2014 227 22:1625–1638. <https://doi.org/10.1007/S10040-014-1146-9>
- Wang Q, Zhan H (2017) Intrawellbore kinematic and frictional losses in a horizontal well in a bounded confined aquifer. *Water Resour Res* 53:127–141. <https://doi.org/10.1002/2015WR018252>
- Wanielista MP (1990) *Hydrology and water quantity control*. Wiley
- Ward JD, Simmons CT, Dillon PJ (2007) A theoretical analysis of mixed convection in aquifer storage and recovery: How important are density effects? *J Hydrol* 343:169–186. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.06.011>
- Ward JD, Simmons CT, Dillon PJ, Pavelic P (2009) Integrated assessment of lateral flow, density effects and dispersion in aquifer storage and recovery. *J Hydrol* 370:83–99. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.02.055>
- Weesner B, Acree S, McAlary T, Salvo JJ (1998) DESIGN AND OPERATION OF A HORIZONTAL WELL, IN SITU BIOREMEDIATION SYSTEM. In: *First International Conference of Chlorinated and Recalcitrant Compounds*. Monterey, CA
- Werner AD, Alcoe DW, Ordens CM, Hutson J, Ward J, Simmons C (2011) Current Practice and Future Challenges in Coastal Aquifer Management: Flux-Based and Trigger-Level Approaches with Application to an Australian Case Study. *Water Resour Manag* 25:1831–1853. <https://doi.org/10.1007/s11269-011-9777-2>
- Werner AD, Bakker M, Post V, Vandenbohede A, Lu C, Ataie-Ashtiani B, Simmons C, Barry D (2013) Seawater intrusion processes, investigation and management: Recent advances and future challenges. *Adv Water Resour* 51:3–26. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2012.03.004>
- Werner AD, Simmons CT (2009) Impact of sea-level rise on sea water intrusion in coastal aquifers. *Ground Water* 47:197–204. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2008.00535.x>
- Wetzelhuetter C (2013) *Groundwater in the Coastal Zones of Asia-Pacific*. Springer Netherlands, Dordrecht
- Winston RB (2009) ModelMuse: A Graphical User Interface for MODFLOW-2005 and PHAST. *U.S. Geological Survey Tech Methods* 6–A29. 52
- Wolfgang S, Hanson RT (2005) The Farm Process Version 2 (FMP2) for MODFLOW-2005— Modifications and Upgrades to FMP1. *U.S. Geological Survey Tech Methods* 6-A-32:116

- Wu P, Shu L, Comte JC, Wang M, Li F, Chen H (2021) The effect of typical geological heterogeneities on the performance of managed aquifer recharge: physical experiments and numerical simulations. *Hydrogeol J* 2021 296 29:2107–2125. <https://doi.org/10.1007/S10040-021-02375-3>
- Xiao K, Wilson AM, Li H, Ryan C (2019) Crab burrows as preferential flow conduits for groundwater flow and transport in salt marshes: A modeling study. *Adv Water Resour* 132:103408. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2019.103408>
- Xin P, Robinson C, Li L, Barry D, Bakhtyar R (2010) Effects of wave forcing on a subterranean estuary. *Water Resour Res* 46:. <https://doi.org/10.1029/2010WR009632>
- Xu Z, Hu BX, Xu Z, Wu X (2019) Simulating seawater intrusion in a complex coastal karst aquifer using an improved variable-density flow and solute transport–conduit flow process model. *Hydrogeol J* 27:1277–1289. <https://doi.org/10.1007/s10040-018-1903-2>
- Xun Z, Ying W (2009) Brief review on methods of estimation of the location of a fresh water-salt water interface with hydraulic heads or pressures in coastal zones. *Gr Water Monit Remediat* 29:77–84. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6592.2009.01259.x>
- Yager RM, Heywood CE (2014) Simulation of the Effects of Seasonally Varying Pumping on Intraborehole Flow and the Vulnerability of Public-Supply Wells to Contamination. *Groundwater* 52:40–52. <https://doi.org/10.1111/gwat.12150>
- Yang C-H, Tong L-T, Huang CF (1999) Combined application of dc and TEM to sea-water intrusion mapping. *GEOPHYSICS* 64:417–425. <https://doi.org/10.1190/1.1444546>
- Yenehun A, Nigate F, Belay AS, Desta M, Van Camp M, Walraevens K (2020) Groundwater recharge and water table response to changing conditions for aquifers at different physiography: The case of a semi-humid river catchment, northwestern highlands of Ethiopia. *Sci Total Environ* 748:142243. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.142243>
- Zamrsky D, Karssenberg ME, Cohen KM, Bierkens M, Oude Essink G (2020) Geological Heterogeneity of Coastal Unconsolidated Groundwater Systems Worldwide and Its Influence on Offshore Fresh Groundwater Occurrence. *Front Earth Sci* 7:1–23. <https://doi.org/10.3389/feart.2019.00339>
- Zavridou E, Markantonis K, Argyrokastritis I, Voudouris K, Kallioras A (2018) Preliminary Results from Unsaturated Zone Studies in Unconfined Unconsolidated Coastal Aquifers. *Proc 2018, Vol 2, Page 642* 2:642. <https://doi.org/10.3390/PROCEEDINGS2110642>
- Zghibi A, Mirchi A, Zouhri L, Taupin J, Chekirbane A, Tarhouni J (2019) Implications of groundwater development and seawater intrusion for sustainability of a Mediterranean coastal aquifer in Tunisia. *Environ Monit Assess* 191:1–23. <https://doi.org/10.1007/S10661-019-7866-5/FIGURES/17>
- Zhang J, Lu C, Werner AD (2021) Analytical and Experimental Investigation of the Impact of Land Reclamation on Steady-State Seawater Extent in Coastal Aquifers. *Water Resour Res* 57:e2020WR029028. <https://doi.org/10.1029/2020WR029028>

- Zheng C, Wang P (1999) MT3DMS: A Modular Three-Dimensional Multispecies Transport Model for Simulation of Advection, Dispersion, and Chemical Reactions of Contaminants in Groundwater Systems Documentation and User's Guide. US Army Corps of Engineers-Engineer Research and Development Center
- Zheng X, Yang Z, Wang S, Chen Y, Hu R, Zhao X, Wu X, Yang X (2021) Evaluation of hydrogeological impact of tunnel engineering in a karst aquifer by coupled discrete-continuum numerical simulations. *J Hydrol* 597:125765. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125765>
- Zhou P, Qiao X, Li X (2017) Numerical modeling of the effects of pumping on tide-induced groundwater level fluctuation and on the accuracy of the aquifer's hydraulic parameters estimated via tidal method: a case study in Donghai Island, China. *J Hydroinformatics* 19:607–619. <https://doi.org/10.2166/hydro.2017.089>
- Zhou Y, Herath HMPSD (2017) Evaluation of alternative conceptual models for groundwater modelling. *Geosci Front* 8:437–443. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2016.02.002>
- Zuurbier K, Smeets P, Roest K, van Vierssen W (2018) Use of Wastewater in Managed Aquifer Recharge for Agricultural and Drinking Purposes: The Dutch Experience. In: *Safe Use of Wastewater in Agriculture*. Springer International Publishing, Cham, pp 159–175
- Zuurbier KG, Kooiman JW, Groen MMA, Maas B, Stuyfzand P (2015) Enabling Successful Aquifer Storage and Recovery of Freshwater Using Horizontal Directional Drilled Wells in Coastal Aquifers. *J Hydrol Eng* 20:. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000990](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000990)
- Zuurbier KG, Raat KJ, Paalman M, Oosterhof A, Stuyfzand P (2017) How Subsurface Water Technologies (SWT) can Provide Robust, Effective, and Cost-Efficient Solutions for Freshwater Management in Coastal Zones. *Water Resour Manag* 31:671–687. <https://doi.org/10.1007/s11269-016-1294-x>

## Ελληνική βιβλιογραφία

- Επαμεινώνδας Φ (2016) Χρήση Ισοτοπικών και Υδροχημικών Χαρακτηριστικών Υπόγειων Νερών Για Τη Διερεύνηση Της Υπόγειας Υδρολογίας Του Παράκτιου Συστήματος Του Μαραθώνα. Διπλωματική εργασία, Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών ΕΜΠ
- Κατσικάτσος Γ (1991) Γεωλογικός χάρτης, Φύλλο Κηφισιά, Κλίμακα 1:50000, Ι.Γ.Μ.Ε.
- Κατσικάτσος Γ (2002) Γεωλογικός χάρτης, Φύλλο Κηφισιά, Κλίμακα 1:50000, Ι.Γ.Μ.Ε.
- Λόζιος Σ (1993) Τεκτονική ανάλυση μεταμορφωμένων σχηματισμών βορειοανατολικής Αττικής. Διδακτορική διατριβή. Τμήμα Γεωλογίας, ΕΚΠΑ
- Μαργώνη Σ (2006) Έρευνα των περιβαλλοντικών διεργασιών εξέλιξης των υγροτόπων και της πεδιάδας του Μαραθώνα κατά το ολόκαινο με τη χρήση Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (G.I.S.). Τμήμα Γεωλογίας, ΑΠΘ
- Μαρίνος Γ, Petrascheck WE (1956) Λαύριον. Γεωλογικά και γεωφυσικά μελέται. Ι.Γ.Μ.Ε.

- Ματιάτος Ι (2010) Υδρογεωλογικές και Ισοτοπικές Έρευνες σε Περιοχές της Χερσονήσου της Αργολίδας. Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος, ΕΚΠΑ, Αθήνα
- Μελισσάρης Π, Σταυρόπουλος Ξ (1999) Υδρογεωλογική Μελέτη Κάμπου Μαραθώνα Ν.Αττικής. Υπουργείο Γεωργίας, Αθήνα
- Μιμίκου Μ, Μπαλτάς Ε (2012) Τεχνική Υδρολογία, 5<sup>η</sup> έκδοση. Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα
- Πλιάκας, Φ. (1998). Έρευνα επί των κατάλληλων μεθόδων τεχνητού εμπλουτισμού σε ετερογενείς υδροφορείς αλλουβιακών σχηματισμών. Εφαρμογή σε υδροφορείς του πεδινού τμήματος Ξάνθης. Διδακτορική διατριβή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών ΔΠΘ, Ξάνθη.
- Σιάρκος Η (2015) Ανάπτυξη μεθοδολογικού πλαισίου με χρήση μαθηματικών μοντέλων προσομοίωσης για τη διερεύνηση της λειτουργίας παράκτιων υδροφόρων συστημάτων: εφαρμογή στον υδροφόρα των Ν. Μουδανιών. Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη
- Σιέμος Ν (2010) Αξιολόγηση Υδατικών Πόρων Αττικής και νήσων Αργοσαρωνικού. Στρατηγικά αποθέματα (υ.δ. 06, τμ. 03). Γ' ΚΠΣ Επιχειρησιακό Πρόγραμμα Ανταγωνιστικότητα. ΙΓΜΕ
- Σπανός Δ (2012) Γεωδυναμική εξέλιξη της Αττικής. Διδακτορική διατριβή. Τμήμα Γεωλογίας Πανεπιστήμιο Πατρών
- Τσακίρης Γ (1995) Υδατικοί πόροι Ι. Τεχνική Υδρολογία. Εκδόσεις Συμμετρία, Αθήνα

## Σύνδεσμοι

MAR Methods – INOWAS. <https://inowas.com/category/mar-methods/>. Accessed 27 May 2022

WaterSelect. <http://www.waterselect.com.au/watercress/watercress.html>. Accessed 2 Oct 2021

SUBSOL. <http://www.subsol.org/>. Accessed 20 Apr 2022

FREEWAT|Free Open Source Software Tools for Water Resource Management. <http://www.freewat.eu/>. Accessed 27 May 2022