

Επιστημονικός Τομέας: ΦΥΣΙΚΕΣ ΕΠΙΣΤΗΜΕΣ ΚΑΙ ΕΠΙΣΤΗΜΕΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ
Επιστημονικός Κλάδος: ΦΥΣΙΚΕΣ ΕΠΙΣΤΗΜΕΣ
Επιστημονικό Πεδίο / Εξειδίκευση: ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΕΠΙΣΤΗΜΕΣ
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ / ΥΔΑΤΙΝΟΙ ΠΟΡΟΙ

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ



Μεταδιδακτορικός Ερευνητής: Ηλίας Σιάρκος
Επιβλέπουσα Καθηγήτρια: Ουρανία Τζωράκη

Τίτλος Μεταδιδακτορικής Έρευνας:

Ανάπτυξη ολοκληρωμένου μοντέλου εφαρμογής τεχνητού εμπλουτισμού για την αντιμετώπιση της θαλάσσιας διείσδυσης σε παράκτιες περιοχές

Η παρούσα έρευνα συγχρηματοδοτείται από την Ελλάδα και την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) μέσω του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Ανάπτυξη Ανθρώπινου Δυναμικού, Εκπαίδευση και Διά Βίου Μάθηση», στο πλαίσιο της Πράξης «Ενίσχυση Μεταδιδακτόρων ερευνητών/ερευνητριών - Β΄ Κύκλος» (MIS-5033021), που υλοποιεί το Ίδρυμα Κρατικών Υποτροφιών (ΙΚΥ).

1. Εισαγωγή

Η θαλάσσια διείσδυση αποτελεί την πιο συχνά εμφανιζόμενη και την πλέον σοβαρή μορφή υπαλυμύρισης που πλήττει τις παράκτιες περιοχές επηρεάζοντας σε μεγάλο βαθμό το υπόγειο υδατικό δυναμικό τους. Ο αντίκτυπος της θαλάσσιας διείσδυσης είναι ιδιαίτερα δυσμενής, καθώς οδηγεί τόσο στην ποιοτική όσο και στην ποσοτική υποβάθμιση των υπόγειων νερών με έντονες αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον και στην οικονομία των παράκτιων περιοχών, συμπεριλαμβανομένης και της αρνητικής επίδρασής της στην αγροτική παραγωγή (Arslan and Demir, 2013, Datta et al., 2009, Siarkos and Latinopoulos, 2016a, b, Siarkos et al., 2017, 2021, Werner et al., 2013). Για τον λόγο αυτό, ιδιαίτερα σημαντική κρίνεται τόσο η πρόληψη μιας επαπειλούμενης θαλάσσιας διείσδυσης όσο και η ανάσχεση-αναστροφή μιας ήδη εκδηλωθείσας μέσω της εφαρμογής κατάλληλων μέτρων προστασίας, όπως είναι η μείωση των αντλήσεων, η τροποποίηση του γενικού σχεδίου άντλησης, η αύξηση της επαναπλήρωσης του υδροφορέα, η εφαρμογή τεχνητού εμπλουτισμού, η δημιουργία θετικών, αρνητικών και μεικτών υδραυλικών φραγμών, καθώς και η κατασκευή στεγανοποιητικών διαφραγμάτων (Kallioras et al., 2013, Papadopoulou, 2011, Pool and Carrera, 2010, Siarkos et al., 2017, Werner et al., 2013).

Από τις προαναφερθείσες μεθόδους, η εφαρμογή τεχνητού εμπλουτισμού μέσω υδρογεωτρήσεων (ή αλλιώς, η δημιουργία θετικού υδραυλικού φραγμού) έχει αποτελέσει το αντικείμενο μελέτης αρκετών ερευνητικών εργασιών (π.χ. Abarca et al., 2006, Assouline and Shavit, 2004, Bray and Yeh, 2008, Luyun et al., 2011, Siarkos et al., 2017, 2021, Yang et al.,

2021), ενώ γενικώς προτιμάται σε περιπτώσεις όπου οι υπόλοιπες μέθοδοι, όπως η μείωση των αντλήσεων και η τροποποίηση του γενικού σχεδίου άντλησης, θεωρούνται αναποτελεσματικές (ειδικότερα σε περιπτώσεις υδροφορέων που υφίστανται υπερεκμετάλλευση και η στάθμη του νερού βρίσκεται ιδιαίτερα χαμηλά σε σχέση με τη στάθμη της θάλασσας) (Pool and Carrera, 2010), καθώς και σε περιπτώσεις μη ύπαρξης διαπερατών εδαφών ή/και επαρκούς έκτασης για την εφαρμογή επιφανειακού εμπλουτισμού (Bouwer, 2002).

Προκειμένου, όμως, τα επιμέρους μέτρα προστασίας έναντι της θαλάσσιας διείσδυσης να διερευνηθούν και να αξιολογηθούν όσον το δυνατόν αρτιότερα αφενός ως προς την εφαρμογή τους και αφετέρου ως προς την αποτελεσματικότητά τους απαραίτητη προϋπόθεση αποτελεί η συνδυασμένη χρήση μοντέλων προσομοίωσης και μοντέλων βελτιστοποίησης (Ketabchi and Ataie-Ashtiani, 2015a, b, Michael et al., 2017, Singh, 2014, 2015). Η διεθνής βιβλιογραφία έχει να επιδείξει αρκετές περιπτώσεις συνδυασμού μοντέλων προσομοίωσης (είτε απλών είτε πολύπλοκων) και μοντέλων βελτιστοποίησης στην προσπάθεια αντιμετώπισης του προβλήματος της θαλάσσιας διείσδυσης σε παράκτιους υδροφορείς (π.χ. Bray and Yeh, 2008, Javadi et al., 2012, 2015, Katsifarakis and Petala, 2006, Mantoglou and Papantoniou, 2008, Qahman et al., 2005, Yang et al., 2018, 2021), μέσα από την επίτευξη ενός ή παραπάνω αντικειμενικών στόχων που έχουν να κάνουν με την ελαχιστοποίηση της πτώσης στάθμης στον υδροφορέα, την ελαχιστοποίηση της έκτασης του θαλάσσιου μετώπου, την ελαχιστοποίηση του κόστους άντλησης ή/και εμπλουτισμού, τη διατήρηση της ποιότητας του νερού σε επιθυμητά επίπεδα κ.ά. Παρόλα αυτά, όμως, εκείνο που απουσιάζει από τη σύγχρονη βιβλιογραφία και οφείλει να διερευνηθεί περαιτέρω είναι η ενσωμάτωση στη διαδικασία βελτιστοποίησης της κοινωνικο-οικονομικής διάστασης του προβλήματος της θαλάσσιας διείσδυσης μέσω της ποσοτικοποίησης των επιπτώσεων της στην οικονομία μιας περιοχής και κατ' επέκταση στην τοπική κοινωνία (Michael et al., 2017; Singh, 2015, Yang et al., 2021).

Μέρος του κενού αυτού καλείται να καλύψει η παρούσα μεταδιδακτορική έρευνα μέσω της θεώρησης/ενσωμάτωσης στη διαδικασία βελτιστοποίησης εκτός από την περιβαλλοντική συνιστώσα του προβλήματος (διατήρηση ποιότητας νερού), και της οικονομικής συνιστώσας, η οποία στην προκειμένη περίπτωση αναφέρεται στα οικονομικά οφέλη των αγροτών που προκύπτουν από τη διασφάλιση νερού επαρκούς ποιότητας και τα οποία, ως βασικό στοιχείο πρωτοτυπίας της παρούσας έρευνας, υπολογίζονται σε επίπεδο αγροτεμαχίου και με βάση το είδος των καλλιεργειών. Με άλλα λόγια, μέσω της διαδικασίας βελτιστοποίησης ουσιαστικά επιχειρείται, μέσα από τη μείωση της συγκέντρωσης των χλωριόντων (περιβαλλοντική συνιστώσα) λόγω τεχνητού εμπλουτισμού, η ελαχιστοποίηση των οικονομικών απωλειών των αγροτών (οικονομική συνιστώσα), απώλειες οι οποίες στην παρούσα φάση οφείλονται στη χρήση νερού υποβαθμισμένης ποιότητας (Kalbus et al., 2016, Siarkos et al., 2017, Zekri, 2008).

Υπό το πρίσμα αυτό, βασικό αντικείμενο της παρούσας μεταδιδακτορικής έρευνας αποτελεί η ανάπτυξη ενός γενικευμένου και συγχρόνως καινοτόμου μοντέλου εφαρμογής τεχνητού εμπλουτισμού σε παράκτιες περιοχές, το οποίο αποβλέπει: α) στη βελτιστοποίηση της εφαρμογής σεναρίων τεχνητού εμπλουτισμού μέσω υδρογεωτρήσεων λαμβάνοντας υπόψη τόσο περιβαλλοντικά όσο και οικονομικά κριτήρια, και β) στην αποτίμηση των εναλλακτικών αυτών σεναρίων, ώστε να προκύψει το πλέον κατάλληλο προς εφαρμογή, το οποίο θα είναι περιβαλλοντικά ορθό και συγχρόνως οικονομικά αποδοτικό. Για την υλοποίηση του πρώτου στόχου, έλαβε χώρα η σύνδεση μεταξύ ενός μη-μόνιμου μοντέλου ροής-μεταφοράς (μοντέλο θαλάσσιας διείσδυσης), το οποίο και διαμορφώθηκε με τη χρήση

των κωδίκων MODFLOW, MT3DMS και SEAWAT σε περιβάλλον γλώσσας προγραμματισμού Python (πακέτο FloPy), και ενός μοντέλου βελτιστοποίησης που διαμορφώθηκε μέσω της χρήσης γενετικών αλγορίθμων πάλι σε περιβάλλον γλώσσας προγραμματισμού Python (πακέτο DEAP). Τα δύο προαναφερθέντα μοντέλα συνδέονται με τέτοιο τρόπο, ώστε τα αποτελέσματα του πρώτου με τη μορφή τιμών ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC) να εισάγονται στο δεύτερο, το οποίο συσχετίζει τις τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας με την παραγωγικότητα/αποδοτικότητα των καλλιεργειών και κατ' επέκταση το αγροτικό εισόδημα. Αναφορικά με την αποτίμηση των επιμέρους εναλλακτικών σεναρίων, αυτή πραγματοποιήθηκε μέσω της διενέργειας ανάλυσης κόστους-οφέλους, στην οποία εισήχθησαν αφενός τα κόστη εφαρμογής των μέτρων εμπλουτισμού (κατασκευαστικά και λειτουργικά κόστη) και αφετέρου τα δυνητικά οφέλη (μη απώλεια αγροτικού εισοδήματος) που προκύπτουν από τη λήψη των συγκεκριμένων μέτρων και τα οποία λαμβάνονται από τη διαδικασία βελτιστοποίησης.

2. Περιοχή έρευνας

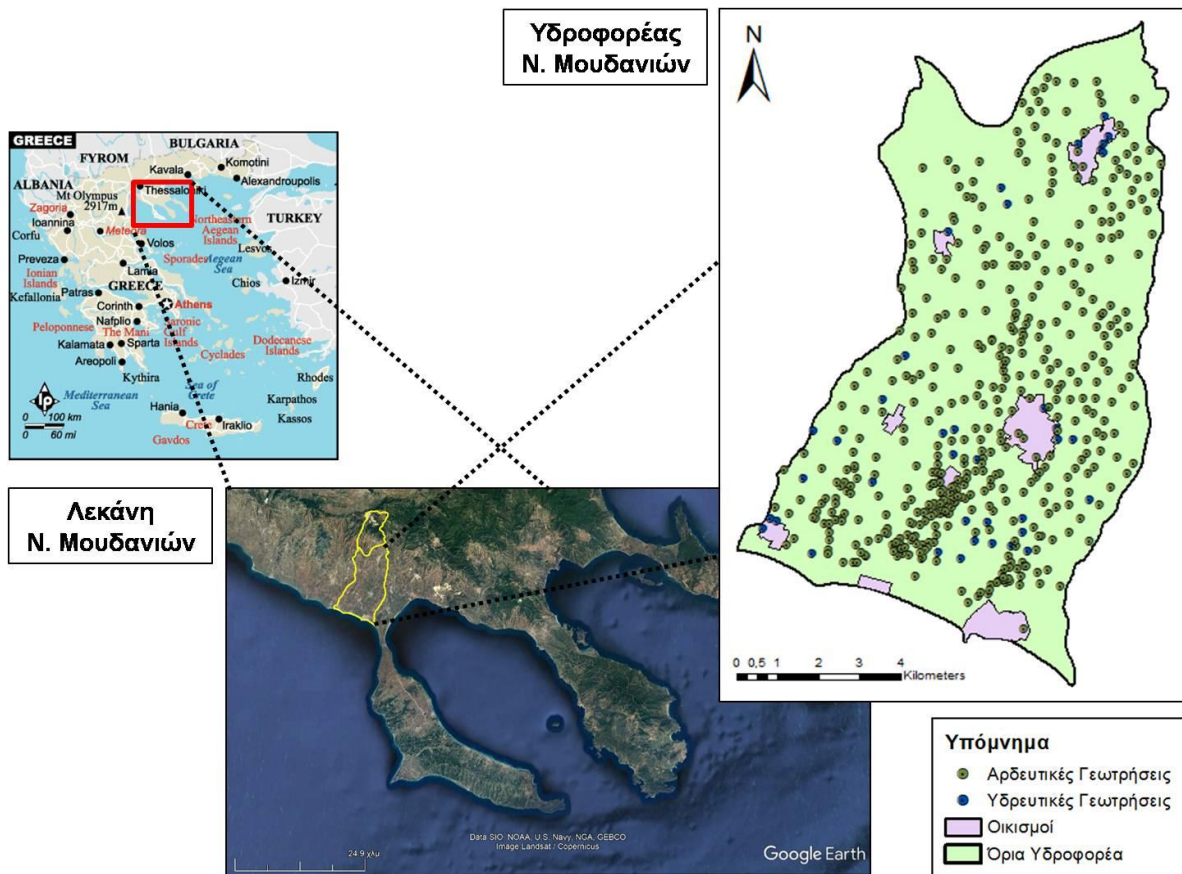
Η λεκάνη απορροής των Ν. Μουδανιών που χωροθετείται στα νοτιοδυτικά του νομού Χαλκιδικής, Βόρεια Ελλάδα επιλέχθηκε ως περιοχή μελέτης για τη διαμόρφωση του ολοκληρωμένου μοντέλου τεχνητού εμπλουτισμού (Σχήμα 1). Πρόκειται για μία παράκτια λεκάνη που στο νότιο τμήμα της βρέχεται από τον Θερμαϊκό κόλπο (μήκος ακτογραμμής 9,5 km), και η οποία καταλαμβάνει έκταση περίπου 127 km², έχει μέσο υψόμετρο εδάφους 176 m και μέση κλίση εδάφους 12%. Το κλίμα στη λεκάνη, η οποία χωρίζεται σε δύο υπο-περιοχές, την επίπεδη στα νότια (53,7%) και τη λοφώδη στα βόρεια (46,3%), χαρακτηρίζεται ως τυπικά Μεσογειακό, με μέση ετήσια βροχόπτωση της τάξης των 417 mm για την επίπεδη περιοχή και 504 mm για τη λοφώδη.

Από γεωλογικής άποψης, η λεκάνη απορροής των Ν. Μουδανιών, κατά το μεγαλύτερο μέρος της (με εξαίρεση το βόρειο-ανατολικό της τμήμα), χωροθετείται εντός της υποζώνης Παιονίας και συγκεκριμένα του γεωλογικού σχηματισμού Μουδανιών, ο οποίος περιλαμβάνει έναν μεγάλο όγκο ερυθροστρωμάτων, αποτελούμενων από εναλλαγές αμμοχάλικων, ψαμμιτών, κροκάλων και αμμούχων-ιλιούχων αργίλων (Λατινόπουλος, 2003). Εντός του σχηματισμού αυτού αναπτύσσεται μία ακανόνιστη μερικώς υπό πίεση/φρεάτια υδροφορία με βασικό χαρακτηριστικό γνώρισμα την εμφάνιση επάλληλων υδροφόρων στρωμάτων χωρίς κανονική γεωμετρική ανάπτυξη, διαμορφώνοντας τον βασικό εκμεταλλεύσιμο υδροφορέα της περιοχής (Σχήμα 1) (Siarkos and Latinopoulos, 2016a).

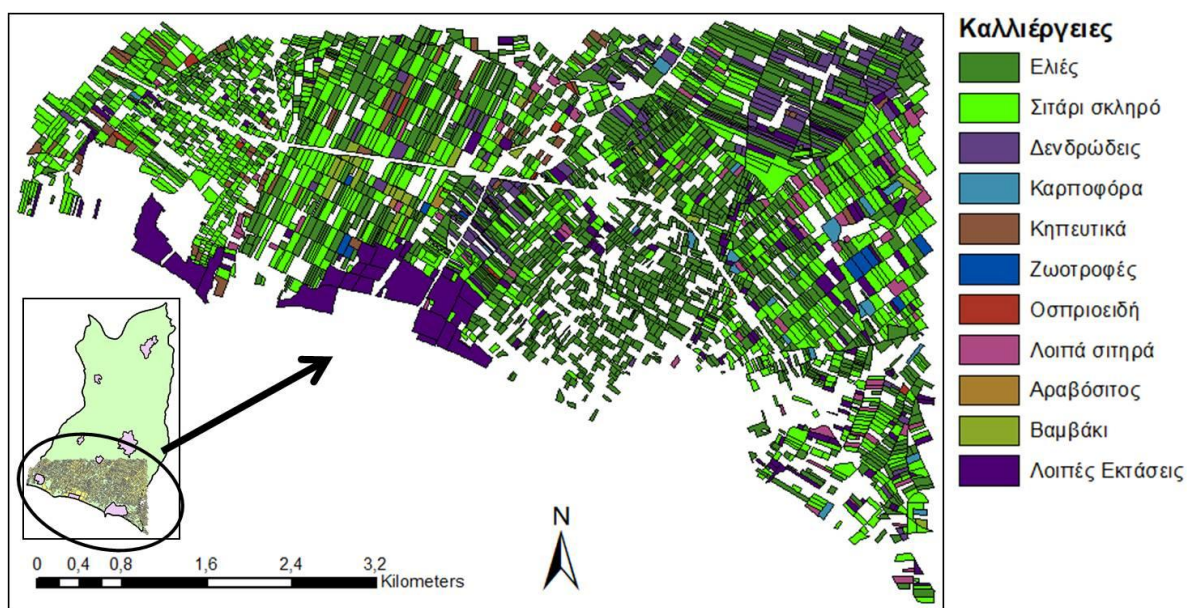
Η περιοχή μελέτης είναι μία τυπική αγροτική περιοχή, όπου οι γεωργικές δραστηριότητες κυριαρχούν τόσο στην τοπική οικονομία όσο και στις χρήσεις γης (76%), οδηγώντας με τον τρόπο αυτό σε αυξημένες αρδευτικές ανάγκες και κατ' επέκταση στη διάνοιξη ενός μεγάλου αριθμού γεωτρήσεων (Σχήμα 1). Οι ανάγκες αυτές καλύπτονται αποκλειστικά από τον υδροφορέα των Ν. Μουδανιών, ο οποίος χαρακτηρίζεται από έλλειμμα στο υδατικό του ισοζύγιο, καθώς η συνολική απόληψη νερού για την κάλυψη των υδατικών αναγκών υπερβαίνει την ποσότητα αναπλήρωσής του. Εξαιτίας του γεγονότος αυτού, παρατηρείται αφενός μεγάλη πτώση της στάθμης του υδροφορέα και αφετέρου διείδυση του θαλασσινού νερού προς το εσωτερικό του, απειλώντας σημαντικά την οικονομία της περιοχής και καθιστώντας την εφαρμογή κατάλληλων και αποτελεσματικών μέτρων αναγκαία.

Τέλος, καθώς, όπως προαναφέρθηκε, στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας λαμβάνει χώρα ο υπολογισμός του οικονομικού οφέλους που θα αποφέρει στους αγρότες η εφαρμογή του τεχνητού εμπλουτισμού σε επίπεδο αγροτεμαχίου και με βάση το είδος των καλλιεργειών, στο Σχήμα 2 απεικονίζεται η χωρική κατανομή των καλλιεργειών (ανά αγροτεμάχιο) στο

παράκτιο τμήμα του υπο μελέτη υδροφορέα που ουσιαστικά επηρεάζεται από το θαλάσσιο μέτωπο. Όπως προκύπτει, στο συγκεκριμένο τμήμα της περιοχής, εντοπίζονται συνολικά 10 είδη καλλιεργειών με τις ελιές και το σιτάρι να καταλαμβάνουν τη μεγαλύτερη έκταση.



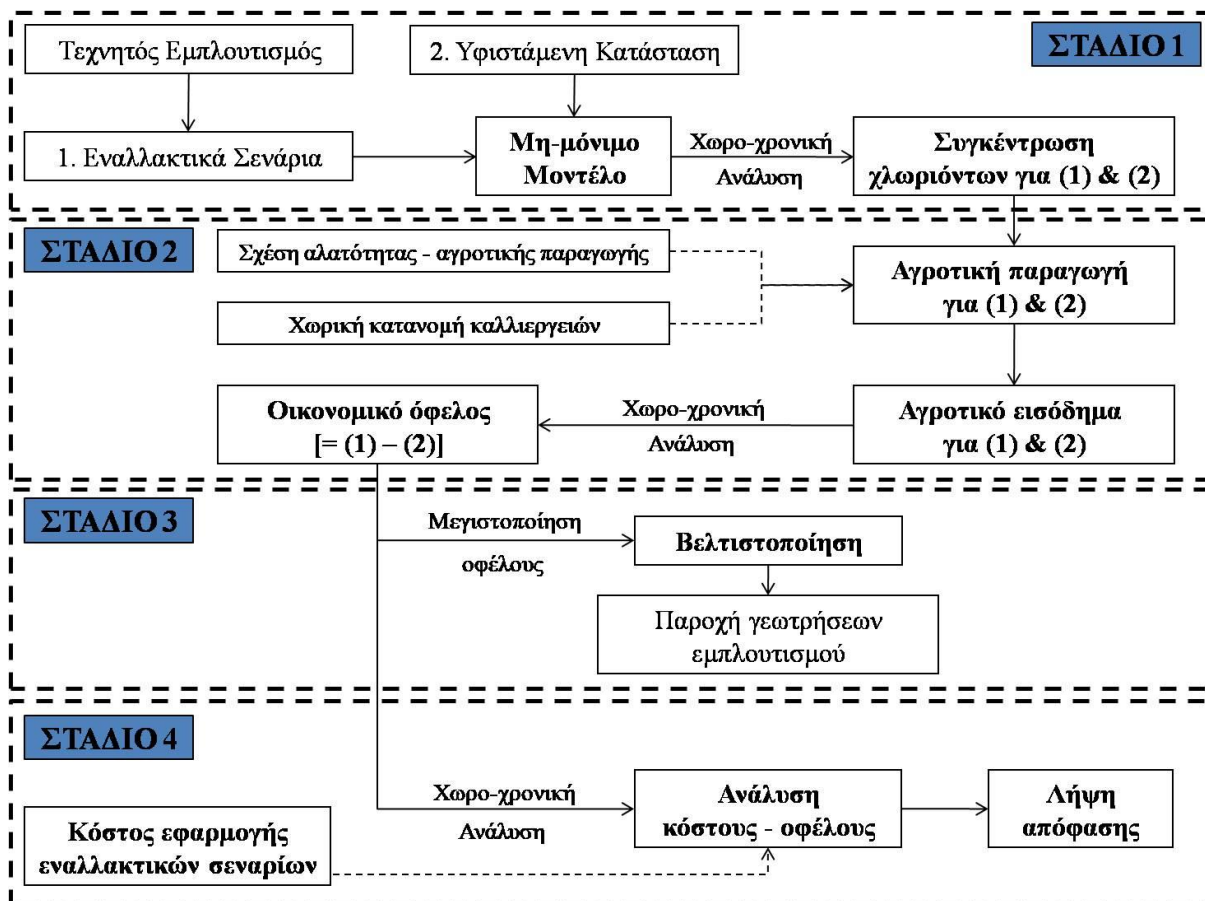
Σχήμα 1: Η λεκάνη απορροής και ο υδροφορέας των Ν. Μουδανιών σε συνδυασμό με τις γεωτρήσεις άντλησης (αρδευτικές & υδρευτικές) που λειτουργούν στην περιοχή



Σχήμα 2: Χωρική κατανομή των επιμέρους καλλιεργειών (10 διαφορετικά είδη) σε επίπεδο αγροτεμαχίου στο παράκτιο τμήμα του υπό μελέτη υδροφορέα

3. Μεθοδολογία

Η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της παρούσας μεταδιδακτορικής έρευνας για τη διαμόρφωση του ολοκληρωμένου μοντέλου τεχνητού εμπλουτισμού περιλαμβάνει τέσσερα (4) βασικά στάδια (Σχήμα 3), αναλυτικότερη περιγραφή των οποίων πραγματοποιείται ακολούθως:



Σχήμα 3: Βασικά στάδια (Διάγραμμα ροής) εφαρμοζόμενης μεθοδολογίας

ΣΤΑΔΙΟ 1: Το συγκεκριμένο στάδιο περιλαμβάνει: α) τον καθορισμό των εναλλακτικών σεναρίων τεχνητού εμπλουτισμού λαμβάνοντας υπόψη ως βασικό κριτήριο την πηγή προέλευσης του νερού εμπλουτισμού, καθώς και τη συνολική (ετήσια) ποσότητά του, β) τη διαμόρφωση του γενικού πλάνου εμπλουτισμού για όλα τα σενάρια, το οποίο ουσιαστικά μεταφράζεται στον καθορισμό του αριθμού και της θέσης των γεωτρήσεων εμπλουτισμού (επιλογή από υφιστάμενες γεωτρήσεις), και γ) τη διαμόρφωση του μοντέλου θαλάσσιας διεύθυνσης (μοντέλο προσομοίωσης) για τη διερεύνηση της χωρο-χρονικής εξέλιξης της συγκέντρωσης των χλωριόντων (Cl), και κατ' επέκταση των τιμών της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC), τόσο για την υφιστάμενη κατάσταση όσο και για τα επιμέρους εναλλακτικά σενάρια εμπλουτισμού.

Συγκεκριμένα, όσον αφορά το μοντέλο θαλάσσιας διεύθυνσης, η διαμόρφωσή του έγινε σε περιβάλλον γλώσσας προγραμματισμού Python με τη χρήση του πακέτου FloPy που ενσωματώνει τους κώδικες MODFLOW, MT3DMS και SEAWAT, και χρησιμοποιώντας ως βάση ένα ήδη υπάρχον μοντέλο που αναπτύχθηκε για την περιοχή μελέτης στο πλαίσιο της διδακτορικής διατριβής του ερευνητή (Σιάρκος, 2015) με τη χρήση του λογισμικού GMS

(Groundwater Modeling System). Ουσιαστικά, στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας λαμβάνει χώρα επαναδιαμόρφωση του υπάρχοντος μοντέλου θαλάσσιας διείσδυσης (δημιουργία αρχείων εισόδου του μοντέλου, εκτέλεση του μοντέλου, ανάγνωση/απεικόνιση/επεξεργασία αποτελεσμάτων του μοντέλου) σε γλώσσα προγραμματισμού Python, διατηρώντας συγχρόνως τα βασικά χαρακτηριστικά του (εννοιολογικό μοντέλο υδροφορέα, τιμές παραμέτρων, οριακές και αρχικές συνθήκες, χωρική και χρονική διακριτοποίηση), προκειμένου να καταστεί εφικτή η σύζευξή του με το μοντέλο βελτιστοποίησης. Ακολούθως, αναφέρονται τα βασικά συστατικά στοιχεία του μοντέλου θαλάσσιας διείσδυσης, ενώ αναλυτική περιγραφή τόσο της διαδικασίας διαμόρφωσής του όσο και της διαδικασίας ρύθμισης/επαλήθευσης του υπάρχει στις εργασίες των Σιάρκος, 2015 και Siarkos and Latinopoulos, 2016a:

- i. το υπό μελέτη υδροφόρο σύστημα περιλαμβάνει το μεγαλύτερο μέρος των Νεογενών σχηματισμών που εντοπίζονται στην περιοχή (σχηματισμός Μουδανίων), ενώ τα περιμετρικά του όρια ταυτίζονται με τα αντίστοιχα της λεκάνης απορροής των Ν. Μουδανίων, εκτός από το βόρειο όριο, το οποίο και έχει οριστεί με βάση τις πιεζομετρικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή,
- ii. τα επιμέρους διαδοχικά διαπερατά γεωλογικά στρώματα της περιοχής θεωρείται ότι αποτελούν ένα ενιαίο ομογενές υδροφόρο σύστημα με ομοιόμορφο πάχος της τάξης των 250 m,
- iii. το ανατολικό και δυτικό όριο του υπό μελέτη υδροφορέα λαμβάνονται ως αδιαπέρατα όρια (όρια μηδενικής ροής), ενώ το νότιο και βόρειο όριο ορίζονται ως όριο σταθερού (CHB, $h = 0$ m), και όριο γενικευμένου φορτίου (GHB, $h = 150$ m), αντίστοιχα. Ειδικότερα, στην περίπτωση του βόρειου ορίου, οι τιμές του υδραυλικού φορτίου κατά μήκος του μειώνονται με την πάροδο του χρόνου, ακολουθώντας τη γενική πτώση στάθμης που παρατηρείται στην περιοχή,
- iv. το νότιο όριο του υδροφορέα προσομοιώνεται ως όριο σταθερής συγκέντρωσης (CCB, $C_{Cl} = 19.000$ mg/l) σε ό,τι αφορά το πρόβλημα της μεταφοράς,
- v. η περιοχή μελέτης, βάσει δοκιμαστικών αντλήσεων που πραγματοποιήθηκαν σε επιλεγμένες γεωτρήσεις, διαχωρίζεται σε έξι διακριτές ζώνες, σε κάθε μία από τις οποίες αποδίδονται διαφορετικές τιμές για τις επιμέρους υδραυλικές παραμέτρους του υδροφορέα (π.χ. υδραυλική αγωγιμότητα, αποθηκευτικότητα, ενεργό πορώδες),
- vi. ο υπό μελέτη υδροφορέας εμπλουτίζεται πρωτίστως από τις βροχοπτώσεις, τις επιστροφές των αρδεύσεων και τις διαρροές των δικτύων ύδρευσης και αποχέτευσης, και δευτερευόντως από το νότιο και βόρειο όριο του, ενώ εκφορτίζεται μέσω ενός μεγάλου αριθμού γεωτρήσεων που έχουν διανοιχθεί στην περιοχή (Σχήμα 1) για την κάλυψη των υδρευτικών, αρδευτικών και κτηνοτροφικών αναγκών της,
- vii. η χωρική διακριτοποίηση του μοντέλου περιλαμβάνει τη διαμόρφωση ενός τετραγωνικού κανάβου με ένα επίπεδο κατά την κατακόρυφη διεύθυνση και με κελιά ίσων διαστάσεων 100x100 m, και,
- viii. η χρονική διακριτοποίηση του μοντέλου περιλαμβάνει μία περίοδο προσομοίωσης 49 ετών (2001 - 2050), η οποία διαχωρίζεται σε 588 μηνιαίες περιόδους καταπόνησης (stress periods), θεωρώντας, συγχρόνως, μέσα σε ένα έτος μία περίοδο άντλησης και μία περίοδο μη-άντλησης, μεταξύ των οποίων τόσο ο εμπλουτισμός όσο και η εκφόρτιση του υδροφορέα διαφοροποιούνται.

• **ΣΤΑΔΙΟ 2:** Στο συγκεκριμένο στάδιο λαμβάνει χώρα: α) η κατάστρωση των εξισώσεων παραγωγικότητας των καλλιεργειών (για κάθε είδος καλλιέργειας ξεχωριστά), δηλαδή των

εξισώσεων που συνδέουν την απόδοση των καλλιεργειών με τις τιμές της ηλεκτρικής αγωγιμότητας στο νερό άρδευσης (EC_w), λαμβάνοντας υπόψη το όριο αντοχής κάθε καλλιέργειας, καθώς και την απώλεια απόδοσής της ανά μοναδιαία αύξηση της αλατότητας (Ayers and Wetscot, 1985), και β) η κατάστρωση των συναρτήσεων καθαρής προσόδου των καλλιεργειών (αγροτικού εισοδήματος) βάσει της παραγωγικότητάς τους και συγκεκριμένων οικονομικών δεικτών που σχετίζονται με τη μέση παραγωγή, την τιμή του προϊόντος και τις δαπάνες για κάθε είδος καλλιέργειας. Όλες οι προαναφερθείσες εξισώσεις που παρακάτω παρουσιάζονται στη γενική τους μορφή, στη συνέχεια, ενσωματώνονται στο μοντέλο βελτιστοποίησης με σκοπό την εξεύρεση της βέλτιστης λύσης, της λύσης δηλαδή που θα αποφέρει το μέγιστο εισόδημα (μέγιστη καθαρή πρόσοδος, Π) στους αγρότες.

$$Y_i = 100 - b_i * (EC_{wi} - a_i) \quad (1)$$

$$\Pi_i = A_i * Y_i - \Delta_i \quad (2)$$

όπου Y (%) είναι η παραγωγικότητα/απόδοση κάθε καλλιέργειας, a είναι το όριο αντοχής κάθε καλλιέργειας στην αλατότητα, b είναι η απώλεια απόδοσης κάθε καλλιέργειας ανά μοναδιαία αύξηση της αλατότητας, EC_w είναι η τιμή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (αλατότητα) στο νερό άρδευσης, Π είναι η καθαρή πρόσοδος (αγροτικό εισόδημα) για κάθε καλλιέργεια, A είναι η ακαθάριστη πρόσοδος βάσει της μέσης παραγωγής και της τιμής πώλησης του προϊόντος για κάθε καλλιέργεια, Δ είναι οι μεταβλητές δαπάνες για κάθε καλλιέργεια και i είναι δείκτης για τις καλλιέργειες. Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται οι τιμές των παραμέτρων a , b , A και Δ για κάθε είδος καλλιέργειας ξεχωριστά (10 καλλιέργειες). Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι σε περιπτώσεις που η απόδοση των καλλιεργειών προκύπτει αρνητική ($Y < 0\%$) λόγω μεγάλων τιμών αλατότητας (EC_w), τότε λαμβάνεται ως μηδενική ($Y = 0\%$), ενώ σε περιπτώσεις που προκύπτει μεγαλύτερη της μέγιστης δυνατής απόδοσης ($Y > 100\%$) λόγω μικρών τιμών αλατότητας (EC_w), τότε λαμβάνεται ως η μέγιστη δυνατή ($Y = 100\%$). Επίσης, σε περιπτώσεις που η καθαρή πρόσοδος των καλλιεργειών προκύπτει αρνητική ($\Pi < 0$) λόγω μεγάλης μείωσης της παραγωγικότητάς τους, τότε αυτή λαμβάνεται ως μηδενική ($\Pi = 0$).

Πίνακας 1: Τιμές παραμέτρων a , b , A και Δ για κάθε είδος καλλιέργειας

α/α	Καλλιέργεια	a	b	A - Ακαθάριστη Πρόσοδος (€/στρ)	Δ - Μεταβλητές Δαπάνες (€/στρ)
1	Ελιές	2,7	5,5	630,00	310,20
2	Σιτάρι	4,0	11,1	37,20	28,59
3	Δενδρώδεις (Βερικοκιές)	1,1	37,0	1.071,00	528,42
4	Καρποφόρα (Φιστικιές)	2,1	43,5	1.800,00	213,08
5	Κηπευτικά (Ντομάτα)	1,7	14,9	3.198,00	991,39
6	Ζωοτροφές (Μηδική)	1,3	11,5	262,50	82,26
7	Οσπριοειδή (Φασόλια)	0,7	28,6	598,50	146,24
8	Λοιπά σιτηρά (Κριθάρι)	5,3	7,3	51,60	24,52
9	Αραβόσιπος	1,1	17,9	203,00	136,82
10	Βαμβάκι	5,1	7,8	98,60	78,90

Γενικώς, η εκτίμηση του αγροτικού εισοδήματος, όπως πραγματοποιείται στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας, αποτελεί μία δυναμική διαδικασία, η οποία ουσιαστικά συνίσταται στον καθορισμό τόσο της χωρικής κατανομής του (με την ανάλυση να φθάνει σε επίπεδο αγροτεμαχίου) όσο και της χρονικής εξέλιξής του. Με άλλα λόγια, απώτερος στόχος της ανάλυσης που επιτελείται είναι η άμεση σύνδεση της χωρο-χρονικής μεταβολής της συγκέντρωσης των χλωριόντων (αλατότητα), όπως αυτή λαμβάνεται κατά το προηγούμενο στάδιο, με τη χωρο-χρονική μεταβολή του αγροτικού εισοδήματος για κάθε εναλλακτικό σενάριο εμπλουτισμού.

• **ΣΤΑΔΙΟ 3:** Στο εν λόγω στάδιο, σε πρώτη φάση, λαμβάνει χώρα η δόμηση του προβλήματος βελτιστοποίησης που μελετάται στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας, γεγονός που ουσιαστικά συνίσταται στην κατάστρωση της αντικειμενικής συνάρτησης βάσει του διαχειριστικού στόχου που έχει τεθεί, στον καθορισμό των μεταβλητών απόφασης, καθώς και στον ορισμό των περιορισμών του προβλήματος. Όσον αφορά αρχικά την αντικειμενική συνάρτηση, όπως ήδη προαναφέρθηκε, βασικός στόχος του προβλήματος βελτιστοποίησης είναι η μεγιστοποίηση του αγροτικού εισοδήματος (Π), όπως αυτό υπολογίζεται σε επίπεδο αγροτεμαχίου και με βάση το είδος των καλλιεργειών, λαμβάνοντας συγχρόνως υπόψη τη συσχέτιση μεταξύ της παραγωγικότητας των καλλιεργειών (Υ) και της ποιότητας του αρδευτικού νερού ως προς το επίπεδο αλατότητάς του (ΕC). Κατ' αυτόν τον τρόπο, ως αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος η οποία και χρήζει μεγιστοποίησης λαμβάνεται η εξίσωση (2) που συσχετίζει το αγροτικό εισόδημα (Π) με την παραγωγικότητα των καλλιεργειών (Υ), με τέτοιον τρόπο ώστε να ανταποκρίνεται πλήρως στις συνθήκες χωρικής ανάλυσης του προβλήματος (επίπεδο αγροτεμαχίου) και να ενσωματώνει το σύνολο των καλλιεργειών και των αγροτεμαχίων που εντοπίζονται στο υπό μελέτη τμήμα του υδροφορέα.

Αναφορικά με τις μεταβλητές απόφασης του προβλήματος βελτιστοποίησης, λαμβάνοντας υπόψη τη φύση του προβλήματος, δηλαδή τη διερεύνηση της επίδρασης του τεχνητού εμπλουτισμού στο αγροτικό εισόδημα, ως μεταβλητές απόφασης ορίζονται οι παροχές των γεωτρήσεων που χρησιμοποιούνται για τον εμπλουτισμό. Το γεγονός αυτό ουσιαστικά σημαίνει ότι μέσω της διαδικασίας βελτιστοποίησης επιχειρείται ο υπολογισμός των παροχών των γεωτρήσεων εμπλουτισμού ή, με άλλα λόγια, η εύρεση της βέλτιστης κατανομής της συνολικής ποσότητας νερού που χρησιμοποιείται για τον εμπλουτισμό στις γεωτρήσεις, ώστε να επιτευχθεί η μεγιστοποίηση του αγροτικού εισοδήματος.

Τέλος, σχετικά με τους περιορισμούς του προβλήματος βελτιστοποίησης, οι δύο βασικοί περιορισμοί που θέτονται αφορούν τις μεταβλητές απόφασης, δηλαδή την παροχή των γεωτρήσεων εμπλουτισμού, και συγκεκριμένα έχουν να κάνουν με: α) τη συνολική ποσότητα νερού που χρησιμοποιείται για τον εμπλουτισμό, δηλαδή το άθροισμα των παροχών εμπλουτισμού των γεωτρήσεων, το οποίο και λαμβάνει συγκεκριμένη τιμή βάσει των επιμέρους εναλλακτικών σεναρίων που διαμορφώνονται στο 1^ο στάδιο της έρευνας, και β) τα όρια τιμών της παροχής εμπλουτισμού σε κάθε γεώτρηση ($0 < Q < 1.500 \text{ m}^3/\text{d}$), και, κατά κύριο λόγο, την ανώτατη τιμή που μπορεί να λάβει, η οποία και υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη την κρίσιμη παροχή άντλησης των γεωτρήσεων. Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθεί ότι όσον αφορά συγκεκριμένα την περίπτωση του δεύτερου περιορισμού, προκειμένου αυτός να ενσωματωθεί στο πρόβλημα βελτιστοποίησης χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της ποινής, βάσει της οποίας προστέθηκε στην αντικειμενική συνάρτηση ένας συγκεκριμένος όρος, ο οποίος επηρεάζει αρνητικά τις λύσεις που παραβιάζουν τον παραπάνω περιορισμό, μειώνοντας κατ' αυτόν τον τρόπο την καταλληλότητά τους και καθιστώντας τες λιγότερο επιθυμητές σε σχέση με άλλες (Huang and Chiu, 2018, Wirsansky, 2020). Συμπερασματικά, σύμφωνα με την

παραπάνω ανάλυση, η μαθηματική διατύπωση του προβλήματος βελτιστοποίησης που εξετάζεται στο πλαίσιο της παρούσας έρευνας συνοψίζεται ως εξής:

$$\max f = \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^P \Pi_j^i = \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^P (A_i * Y_j^i - \Delta_i) \quad (3)$$

όπου $i = 1, 2, \dots, K$, $j = 1, 2, \dots, P$

$$Y_j^i = 100 - b_i * (EC_j^i - a_i) \quad (4)$$

$$EC_j^i = \xi(Q) \quad (5)$$

$$\sum_{k=1}^N Q_k = Q_{ολ} \quad (6)$$

όπου $k = 1, 2, \dots, N$

$$Q_k^{\min} < Q_k < Q_k^{\max} \quad (7)$$

όπου f είναι ο αντικειμενικός στόχος του προβλήματος βελτιστοποίησης που αναφέρεται στη μεγιστοποίηση του αγροτικού εισοδήματος, Π είναι η καθαρή πρόσδοδος (αγροτικό εισόδημα) για κάθε αγρόκτημα j της καλλιέργειας i , A είναι η ακαθάριστη πρόσδοδος βάσει της μέσης παραγωγής και της τιμής πώλησης του προϊόντος για κάθε καλλιέργεια i , Δ είναι οι μεταβλητές δαπάνες για κάθε καλλιέργεια i , Y είναι η παραγωγικότητα/απόδοση για κάθε αγρόκτημα j της καλλιέργειας i , a είναι το όριο αντοχής κάθε καλλιέργειας i στην αλατότητα, b είναι η απώλεια απόδοσης κάθε καλλιέργειας i ανά μοναδιαία αύξηση της αλατότητας, EC είναι η τιμή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (αλατότητα) του νερού άρδευσης για κάθε αγρόκτημα j της καλλιέργειας i , Q είναι η παροχή εμπλουτισμού για κάθε γεώτρηση k , και $Q_{ολ}$ είναι η συνολική ποσότητα νερού που χρησιμοποιείται για τον εμπλουτισμό. Επίσης, K είναι ο συνολικός αριθμός των καλλιεργειών που εντοπίζονται στην περιοχή, P είναι ο συνολικός αριθμός των αγροτεμαχίων που αντιστοιχούν σε κάθε καλλιέργεια i , και N είναι ο συνολικός αριθμός των γεωτρήσεων που χρησιμοποιούνται για τον εμπλουτισμό. Τέλος, η εξίσωση (5) εκφράζει τη σύνδεση μεταξύ του μοντέλου βελτιστοποίησης και του μοντέλου προσομοίωσης, η εξίσωση (6) αναφέρεται στον περιορισμό σχετικά με τη συνολική ποσότητα νερού που χρησιμοποιείται για τον εμπλουτισμό, και η εξίσωση (7) καθορίζει τα όρια σχετικά με την παροχή εμπλουτισμού σε κάθε γεώτρηση ($Q_k^{\min} = 0$, $Q_k^{\max} = 1,500 \text{ m}^3/\text{d}$).

Μετά τη δόμηση του προβλήματος βελτιστοποίησης επόμενο βήμα αποτελεί η επίλυσή του, η οποία και υλοποιείται με τη χρήση της μεθόδου των γενετικών αλγορίθμων συνδέοντας το μοντέλο βελτιστοποίησης με το μοντέλο θαλάσσιας διείσδυσης (μοντέλο προσομοίωσης). Συγκεκριμένα, η διαδικασία σύζευξης των δύο μοντέλων συνίσταται στα ακόλουθα βήματα, τα οποία και εκτελούνται μέσω μιας συνεχόμενης επαναληπτικής διαδικασίας: α) ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης επανειλημμένα παράγει έναν πληθυσμό λύσεων που έχει να κάνει με τις παροχές (Q) των γεωτρήσεων εμπλουτισμού (μεταβλητές απόφασης) ακολουθώντας τις βασικές διαδικασίες των γενετικών αλγορίθμων (επιλογή, διασταύρωση, μετάλλαξη), β) το μοντέλο προσομοίωσης υπολογίζει τις συγκεντρώσεις των χλωριόντων, και κατ' επέκταση τις τιμές της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (αλατότητα) για κάθε πληθυσμό λύσεων, δηλαδή παροχών των γεωτρήσεων εμπλουτισμού, που έχει διαμορφωθεί στο προηγούμενο βήμα, και, τέλος, γ) ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης μέσω της αντικειμενικής συνάρτησης που συνδέει το αγροτικό εισόδημα με την ποιότητα του αρδευτικού νερού ως προς το επίπεδο αλατότητάς του (τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας) και

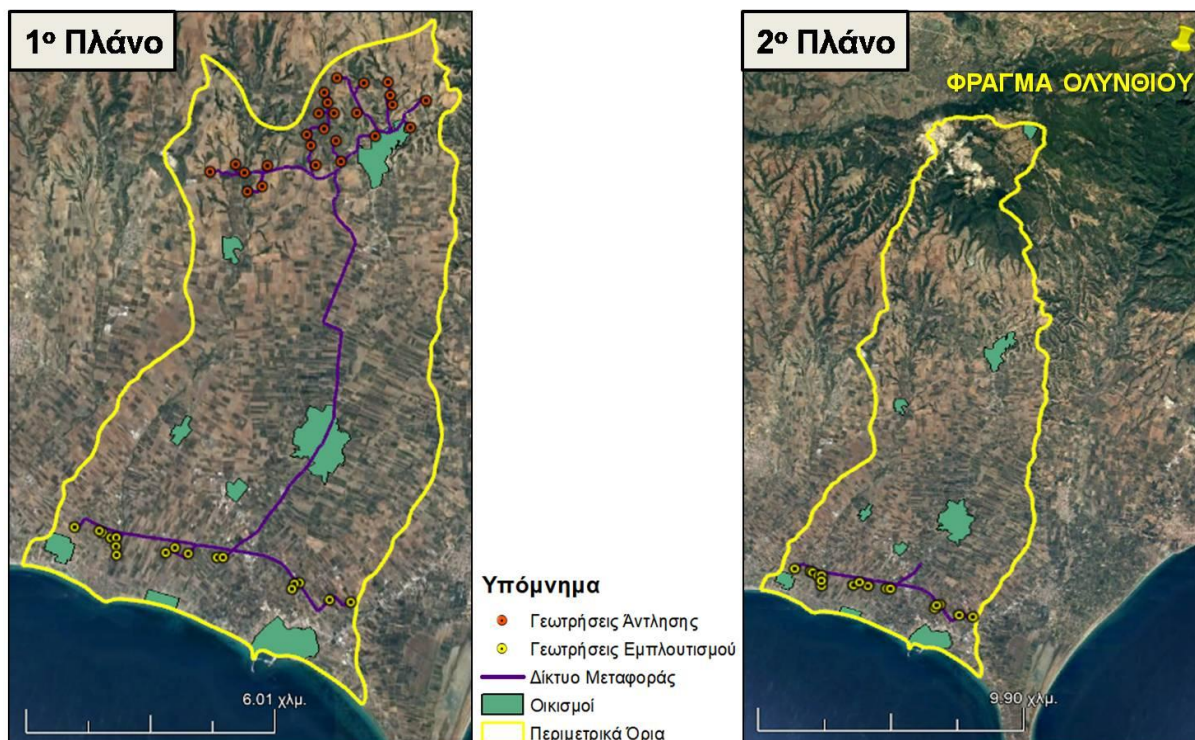
λαμβάνοντας συγχρόνως υπόψη τους περιορισμούς του προβλήματος (π.χ. συνολική ποσότητα νερού εμπλουτισμού, όρια παροχής εμπλουτισμού), αξιολογεί τις λύσεις, ώστε να διατηρηθούν οι πλέον κατάλληλες που προσεγγίζουν τη βέλτιστη. Η παραπάνω επαναληπτική διαδικασία συνεχίζεται μέχρι να εκπληρωθεί μία προκαθορισμένη συνθήκη τερματισμού, η οποία στην προκειμένη περίπτωση αφορά τον μέγιστο αριθμό επαναλήψεων.

Τέλος, αναφέρεται ότι στο πλαίσιο επίλυσης του προβλήματος βελτιστοποίησης έλαβε χώρα διενέργεια σειράς επαναληπτικών εκτελέσεων του παραπάνω αλγορίθμου (ανάλυση ευαισθησίας) για να καθοριστούν οι τιμές των επιμέρους παραμέτρων των γενετικών αλγορίθμων, όπως είναι το μέγεθος του αρχικού πληθυσμού, ο αριθμός των γενεών, καθώς και η πιθανότητα διασταύρωσης και μετάλλαξης. Οι τιμές που τελικά επιλέχθηκαν για τις προαναφερθείσες παραμέτρους είναι: μέγεθος αρχικού πληθυσμού = 100, αριθμός γενεών = 200, πιθανότητα διασταύρωσης = 0,9, και πιθανότητα μετάλλαξης = 0,1.

- **ΣΤΑΔΙΟ 4:** Το στάδιο αυτό αποτελεί το καταληκτικό τμήμα της μεθοδολογίας που ακολουθείται στο πλαίσιο της παρούσας μεταδιδακτορικής έρευνας και περιλαμβάνει: α) τον προσδιορισμό του οικονομικού οφέλους που επιφέρει στους αγρότες η εφαρμογή του τεχνητού εμπλουτισμού, υπολογίζοντας τη διαφορά στο εισόδημά τους πριν και μετά την εφαρμογή του εμπλουτισμού και λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης για κάθε εναλλακτικό σενάριο εμπλουτισμού, β) τον υπολογισμό του τεχνικού κόστους εφαρμογής των επιμέρους σεναρίων εμπλουτισμού, το οποίο ουσιαστικά μεταφράζεται στον προσδιορισμό του κατασκευαστικού και λειτουργικού κόστους καθενός από αυτά, και γ) τη διενέργεια ανάλυσης κόστους-οφέλους και την αξιολόγηση των εναλλακτικών σεναρίων εμπλουτισμού λαμβάνοντας υπόψη τη χωρο-χρονική μεταβολή των αποτελεσμάτων.

4. Γενικό πλάνο τεχνητού εμπλουτισμού

Στο πλαίσιο της παρούσας μεταδιδακτορικής έρευνας διερευνήθηκαν δύο γενικές λύσεις τεχνητού εμπλουτισμού για μία περίοδο εφαρμογής 30 ετών (2020 - 2050), οι οποίες και διαμορφώθηκαν λαμβάνοντας υπόψη ως βασικό κριτήριο την πηγή προέλευσης του νερού εμπλουτισμού. Η πρώτη λύση (1^ο πλάνο εμπλουτισμού, Π1) περιλαμβάνει τον εμπλουτισμό με νερό που προέρχεται από το ανώτερο τμήμα του υπό μελέτη υδροφορέα (Σχήμα 4, αριστερή εικόνα), όπου η στάθμη του υπόγειου νερού είναι σχετικά ψηλά, ενώ σημαντικές ποσότητες νερού εισέρχονται από το βόρειο όριο του (Siarkos and Latinopoulos, 2016a). Αναλυτικότερα, στην περίπτωση αυτή, νερό αντλείται από υφιστάμενες αρδευτικές γεωτρήσεις (25 γεωτρήσεις) που χωροθετούνται στο ανώτερο τμήμα του υδροφορέα, συγκεντρώνεται σε δεξαμενή και στη συνέχεια μεταφέρεται και διανέμεται στις γεωτρήσεις εμπλουτισμού στο παράκτιο τμήμα. Το συνολικό δίκτυο μεταφοράς του νερού, ο σχεδιασμός του οποίου βασίστηκε τόσο στη θέση των γεωτρήσεων άντλησης όσο και στην τοπογραφία της περιοχής, λαμβάνοντας συγχρόνως υπόψη και το όριο ταχύτητας στους αγωγούς (1,0 - 1,5 m/s), απεικονίζεται στο Σχήμα 4 (αριστερή εικόνα). Το δίκτυο στο μεγαλύτερο μέρος του λειτουργεί με βαρύτητα, εκτός από το σύστημα συλλογής του νερού (άνωτερο τμήμα δικτύου), όπου χρησιμοποιούνται αντλίες για την απόληψη του νερού από τον υδροφορέα και τη μεταφορά του στη δεξαμενή. Με βάση την παραπάνω ανάλυση, τα τεχνικά κόστη που υπεισέρχονται στην ανάλυση κόστους-οφέλους όσον αφορά το συγκεκριμένο πλάνο εμπλουτισμού περιλαμβάνουν τα λειτουργικά κόστη των γεωτρήσεων άντλησης και του δικτύου συλλογής του νερού (εφόσον το υπόλοιπο τμήμα του δικτύου και οι γεωτρήσεις εμπλουτισμού λειτουργούν με βαρύτητα), καθώς και τα κατασκευαστικά κόστη του συνολικού δικτύου μεταφοράς-διανομής του νερού.



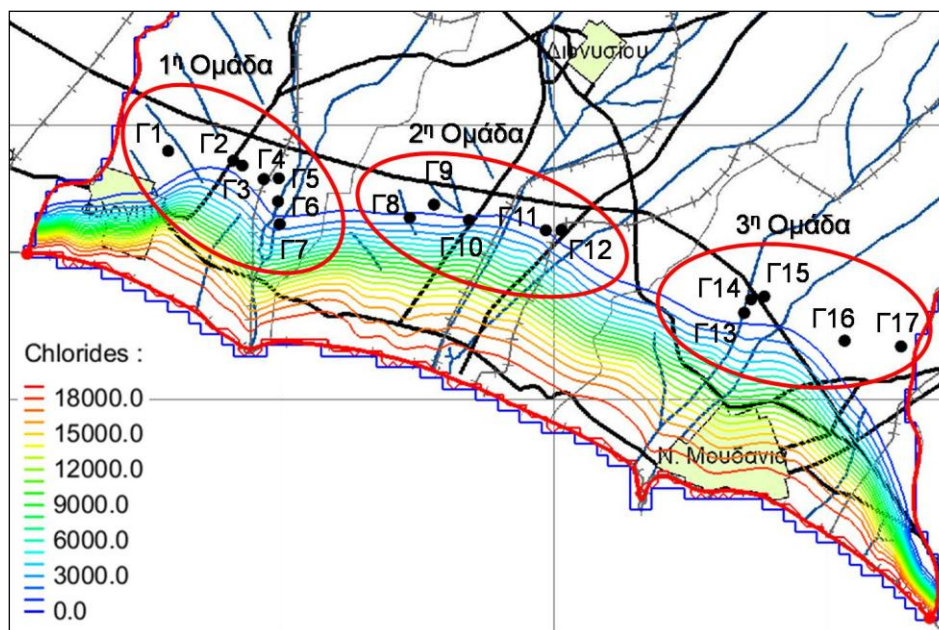
Σχήμα 4: Τα δύο εναλλακτικά πλάνα εμπλουτισμού με βάση την πηγή του νερού τροφοδοσίας των γεωτρήσεων (1^ο πλάνο: νερό από το ανώτερο τμήμα του υδροφορέα, 2^ο πλάνο: νερό από όμορο ταμειυτήρα)

Από την άλλη, η δεύτερη λύση (2^ο πλάνο εμπλουτισμού, Π2) περιλαμβάνει τον εμπλουτισμό με νερό που προέρχεται από ταμειυτήρα που σχεδιάζεται να κατασκευαστεί σε γειτονική λεκάνη απορροής (λεκάνη απορροής Ολύθνθιου), και ο οποίος θα χρησιμοποιηθεί συγχρόνως για την πλήρη κάλυψη των υδρευτικών αναγκών στην περιοχή και τη μερική κάλυψη των αρδευτικών αναγκών, επιφέροντας έτσι ταυτόχρονη μείωση των αντλήσεων (Σχήμα 4, δεξιά εικόνα). Στην περίπτωση αυτή, καθώς βασικός λόγος κατασκευής του ταμειυτήρα είναι η κάλυψη των υδρευτικών και αρδευτικών αναγκών, το δίκτυο μεταφοράς του νερού όσον αφορά το κομμάτι του τεχνητού εμπλουτισμού περιλαμβάνει μόνο το τμήμα εκείνο που έχει να κάνει με τη διανομή του νερού στις γεωτρήσεις εμπλουτισμού (Σχήμα 4, δεξιά εικόνα), καθώς το υπόλοιπο τμήμα θεωρείται ότι έχει ήδη κατασκευαστεί. Επομένως, όσον αφορά τα κόστη εφαρμογής στην περίπτωση αυτή, σε αντίθεση με την πρώτη λύση, περιλαμβάνουν μόνο τα κατασκευαστικά κόστη του δικτύου διανομής του νερού στις γεωτρήσεις εμπλουτισμού, καθώς το υπόλοιπο δίκτυο και ο ταμειυτήρας υποτίθεται ότι έχουν ήδη κατασκευαστεί και λειτουργούν.

Για τη διερεύνηση και αξιολόγηση των δύο διαφορετικών πλάνων εμπλουτισμού διαμορφώθηκαν σε κάθε περίπτωση δύο εναλλακτικά σενάρια με βάση την (ετήσια) ποσότητα νερού που χρησιμοποιείται για τον εμπλουτισμό, οδηγώντας έτσι στη διαμόρφωση τεσσάρων συνολικά σεναρίων (Π1/Σ1, Π1/Σ2, Π2/Σ1 και Π2/Σ2). Συγκεκριμένα, στην πρώτη κατηγορία σεναρίων (Π1/Σ1, Π2/Σ1), $2 \cdot 10^6$ m³/ετος νερού εισάγονται στις γεωτρήσεις εμπλουτισμού, ενώ στη δεύτερη κατηγορία σεναρίων (Π1/Σ2, Π2/Σ2), η ποσότητα του νερού που χρησιμοποιείται για τον εμπλουτισμό ισούται με $3 \cdot 10^6$ m³/ετος. Επιπλέον, στην περίπτωση του 2^{ου} πλάνου εμπλουτισμού, οι αντλήσεις για την κάλυψη των αρδευτικών αναγκών στην περιοχή μειώνονται κατά $8.0 \cdot 10^6$ m³/ετος όσον αφορά το 1^ο σενάριο και κατά $7.0 \cdot 10^6$ m³/ετος όσον αφορά το 2^ο σενάριο (οι αντλήσεις για την κάλυψη των υδρευτικών

αναγκών διακόπτονται εξολοκλήρου στην περίπτωση και των δύο σεναρίων εμπλουτισμού). Άξιο αναφοράς κρίνεται το γεγονός ότι οι παραπάνω τιμές σχετικά με τη μείωση των αντλήσεων υπολογίστηκαν με βάση το ότι ο συνολικός όγκος νερού που προέρχεται από τον ταμιευτήρα τόσο για τον τεχνητό εμπλουτισμό όσο και για την μερική κάλυψη των αρδευτικών αναγκών στην περιοχή ισούται με $10 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{ετος}$. Η συγκεκριμένη τιμή υπολογίστηκε μετά από προσομοίωση της λειτουργίας του ταμιευτήρα με εφαρμογή του λογισμικού WEAP (Water and Evaluation Planning), θεωρώντας ισότιμη κατανομή των αποθεμάτων του ταμιευτήρα στην ευρύτερη περιοχή και θέτοντας συγκεκριμένες προτεραιότητες ως προς τη χρήση του νερού (δηλ. πρώτη προτεραιότητα δόθηκε στην αστική ζήτηση ώστε να καλυφθεί πλήρως από τον ταμιευτήρα και δεύτερη προτεραιότητα στην αγροτική ζήτηση) (Siarkos et al., 2021). Τέλος, στο σημείο αυτό θα πρέπει να αναφερθεί ότι στην περίπτωση του 1^{ου} πλάνου εμπλουτισμού, όπου το νερό που χρησιμοποιείται για τον εμπλουτισμό αντλείται από υφιστάμενες γεωτρήσεις, η παροχή άντλησης των γεωτρήσεων αυτών ισούται με $377 \text{ m}^3/\text{d}$ όσον αφορά το 1^ο σενάριο και $566 \text{ m}^3/\text{d}$ όσον αφορά το 2^ο σενάριο. Οι τιμές αυτές υπολογίστηκαν λαμβάνοντας υπόψη τη συνολική (ετήσια) ποσότητα του αντλούμενου νερού και τον συνολικό αριθμό γεωτρήσεων άντλησης (25 γεωτρήσεις), θεωρώντας συγχρόνως ίση παροχή άντλησης σε όλες τις γεωτρήσεις.

Αναφορικά τώρα με τις γεωτρήσεις που χρησιμοποιούνται για τον τεχνητό εμπλουτισμό, επιλέχθηκαν συνολικά 17 από τις υφιστάμενες αρδευτικές γεωτρήσεις που λειτουργούν στην περιοχή (Σχήμα 5), αφενός για να αποφευχθούν τα κόστη κατασκευής νέων γεωτρήσεων και αφετέρου προκειμένου να περιοριστεί ο κίνδυνος έμφραξής τους, καθώς οι συγκεκριμένες γεωτρήσεις λειτουργούν και για την άντληση νερού. Συγκεκριμένα, κατά τη διάρκεια της αρδευτικής περιόδου (1^η Μαΐου - 30 Σεπτεμβρίου, 153 ημέρες) λειτουργούν ως γεωτρήσεις άντλησης, ενώ τον υπόλοιπο χρόνο (1^η Οκτωβρίου - 30 Απριλίου, 212 ημέρες) ως γεωτρήσεις εμπλουτισμού. Η επιλογή του αριθμού των γεωτρήσεων έγινε τόσο με βάση τη συνολική (ετήσια) ποσότητα νερού που χρησιμοποιείται για τον εμπλουτισμό, όπως αυτή καθορίστηκε για τα επιμέρους σενάρια εμπλουτισμού, όσο και την κρίσιμη παροχή άντλησης των γεωτρήσεων (Siarkos et al., 2021).



Σχήμα 5: Η θέση των γεωτρήσεων εμπλουτισμού (17 γεωτρήσεις) σε σχέση με τη θέση του θαλάσσιου μετώπου (κατά την περίοδο έναρξης του τεχνητού εμπλουτισμού)

Σχετικά με τον καθορισμό της θέσης των γεωτρήσεων εμπλουτισμού, επισημαίνεται ότι πραγματοποιήθηκε λαμβάνοντας υπόψη αφενός τη θέση του θαλάσσιου μετώπου όπως προκύπτει από το μοντέλο θαλάσσιας διείσδυσης (Σχήμα 5), και αφετέρου τις αρδευτικές γεωτρήσεις που επηρεάζονται από τον τεχνητό εμπλουτισμό και κατ' επέκταση τα αγροτεμάχια που επωφελούνται από τη χρήση για άρδευση λιγότερο υποβαθμισμένου νερού. Με άλλα λόγια, επιλέχθηκαν για εμπλουτισμό εκείνες οι γεωτρήσεις μέσω των οποίων προστατεύονται από μελλοντική ρύπανση όσο το δυνατόν περισσότερες αρδευτικές γεωτρήσεις και μάλιστα γεωτρήσεις από τις οποίες λαμβάνεται νερό για όσο το δυνατόν μεγαλύτερο αριθμό αγροτεμαχίων (ουσιαστικά μεγαλύτερο οικονομικό όφελος). Σύμφωνα με την παραπάνω ανάλυση και όπως διακρίνεται στο Σχήμα 5, οι 17 γεωτρήσεις που εν τέλει επιλέχθηκαν για τον εμπλουτισμό μπορούν να ταξινομηθούν με βάση τη θέση τους σε τρεις ομάδες: α) η 1^η ομάδα περιλαμβάνει τις γεωτρήσεις που εντοπίζονται στο αριστερό τμήμα του υδροφορέα (7 γεωτρήσεις, Γ1-Γ7), β) η 2^η ομάδα αυτές που βρίσκονται στο κεντρικό τμήμα (5 γεωτρήσεις, Γ8-Γ12), και, τέλος, γ) η 3^η ομάδα αυτές που χωροθετούνται στο δεξιό τμήμα (5 γεωτρήσεις, Γ13-Γ17).

Στον Πίνακα 2 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα βασικά στοιχεία των δύο εναλλακτικών πλάνων εμπλουτισμού, καθώς και των σεναρίων που διαμορφώθηκαν σε κάθε πλάνο.

Πίνακας 2: Βασικά στοιχεία εναλλακτικών πλάνων και επιμέρους σεναρίων εμπλουτισμού

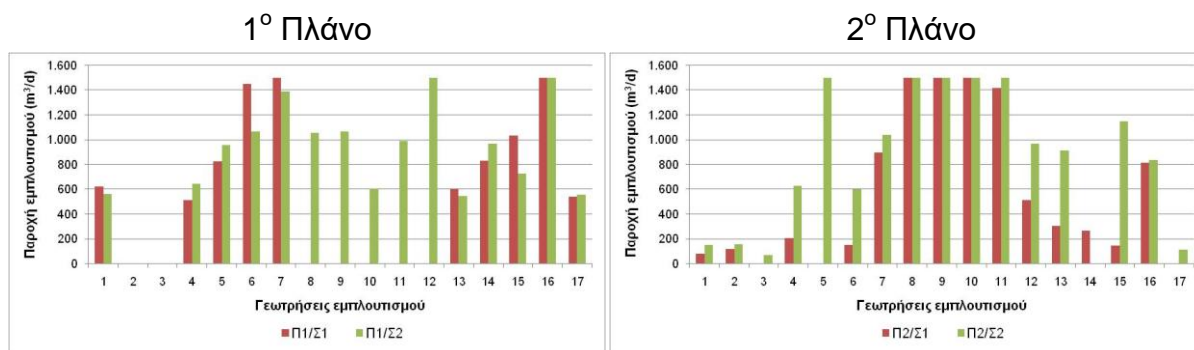
ΛΥΣΕΙΣ/ΠΛΑΝΑ ΕΜΠΛ.	ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΗ 1 - Π1		ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΗ 2 - Π2	
	Σεν. 1 - Σ1	Σεν. 2 - Σ2	Σεν. 1 - Σ1	Σεν. 2 - Σ2
ΠΟΣΟΤΗΤΑ ΝΕΡΟΥ (m ³ /έτος)	2*10 ⁶	3*10 ⁶	2*10 ⁶ (+ 8*10 ⁶ για άρδευση)	3*10 ⁶ (+ 7*10 ⁶ για άρδευση)
ΑΡΙΘΜΟΣ ΓΕΩΤΡ. ΑΝΤΛ.	25 γεωτρήσεις		-	
ΠΑΡΟΧΗ ΓΕΩΤΡ. ΑΝΤΛ. (m ³ /d)	377	566	-	
ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΕΜΠΛ.	Οκτώβριος 2020 - Οκτώβριος 2050			
ΑΡΙΘΜΟΣ ΓΕΩΤΡ. ΕΜΠΛ.	17 γεωτρήσεις (καθορισμένες θέσεις)			
ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΓΕΩΤΡ. ΕΜΠΛ.	212 ημέρες (κατά τη ΜΗ αρδευτική περίοδο)			

5. Αποτελέσματα

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται και αναλύονται τα αποτελέσματα της διαδικασίας βελτιστοποίησης για όλα τα εναλλακτικά σενάρια εμπλουτισμού (Π1/Σ1, Π1/Σ2, Π2/Σ1 και Π2/Σ2) όσον αφορά τις παροχές των γεωτρήσεων εμπλουτισμού, τις συγκεντρώσεις των χλωριόντων στον υδροφορέα, τα οικονομικά οφέλη των αγροτών, καθώς και την ανάλυση κόστους-οφέλους για την τελική αποτίμηση των σεναρίων εμπλουτισμού.

Αρχικά, στο Σχήμα 6 παρουσιάζονται οι παροχές των 17 γεωτρήσεων εμπλουτισμού, έτσι όπως υπολογίστηκαν στην περίπτωση της βέλτιστης λύσης για κάθε εναλλακτικό πλάνο εμπλουτισμού (Π) και για κάθε σενάριο (Σ). Σε γενικές γραμμές, όπως παρατηρείται, υπάρχει έντονη διαφοροποίηση στην κατανομή των παροχών στις γεωτρήσεις μεταξύ των δύο διαφορετικών πλάνων εμπλουτισμού, με τις υψηλότερες παροχές στην περίπτωση του 2^{ου} πλάνου να εντοπίζονται κυρίως στη 2^η ομάδα γεωτρήσεων (Γ8-Γ11) και για τα δύο εναλλακτικά σενάρια, ενώ στην περίπτωση του 1^{ου} πλάνου να εντοπίζονται στην 1^η και στην 3^η ομάδα γεωτρήσεων για το σενάριο Σ1 (Γ6, Γ7, Γ16), και στο σύνολο των ομάδων για το σενάριο Σ2 (Γ7, Γ12, Γ16) (Σχήμα 5). Επιπρόσθετα, όπως προκύπτει από το ίδιο σχήμα, χαρακτηριστικό είναι το γεγονός ότι σε κάθε περίπτωση υπάρχουν γεωτρήσεις που

εμφανίζονται ανενεργές, δηλαδή με μηδενική παροχή, και επομένως δεν συμμετέχουν στη διαδικασία του εμπλουτισμού. Αυτό γίνεται ιδιαίτερα εμφανές στην περίπτωση του 1^{ου} πλάνου εμπλουτισμού και συγκεκριμένα στο σενάριο Σ1, όπου, στο πλαίσιο της βέλτιστης λύσης, μόλις 10 από τις 17 γεωτρήσεις, οι οποίες και περιλαμβάνονται αποκλειστικά στην 1^η και στην 3^η ομάδα γεωτρήσεων, βρέθηκε να λειτουργούν. Αναφορικά με το 2^ο πλάνο εμπλουτισμού γενικώς λειτουργούν περισσότερες γεωτρήσεις και για τα δύο εναλλακτικά σενάρια, παρόλα αυτά, όμως, αρκετές από αυτές, οι οποίες ανήκουν κυρίως στην 1^η και στην 3^η ομάδα γεωτρήσεων, εμφανίζουν σχετικά μικρές παροχές, ιδιαίτερα στην περίπτωση του σεναρίου Σ1, όπου η ποσότητα του νερού εμπλουτισμού είναι μικρότερη.

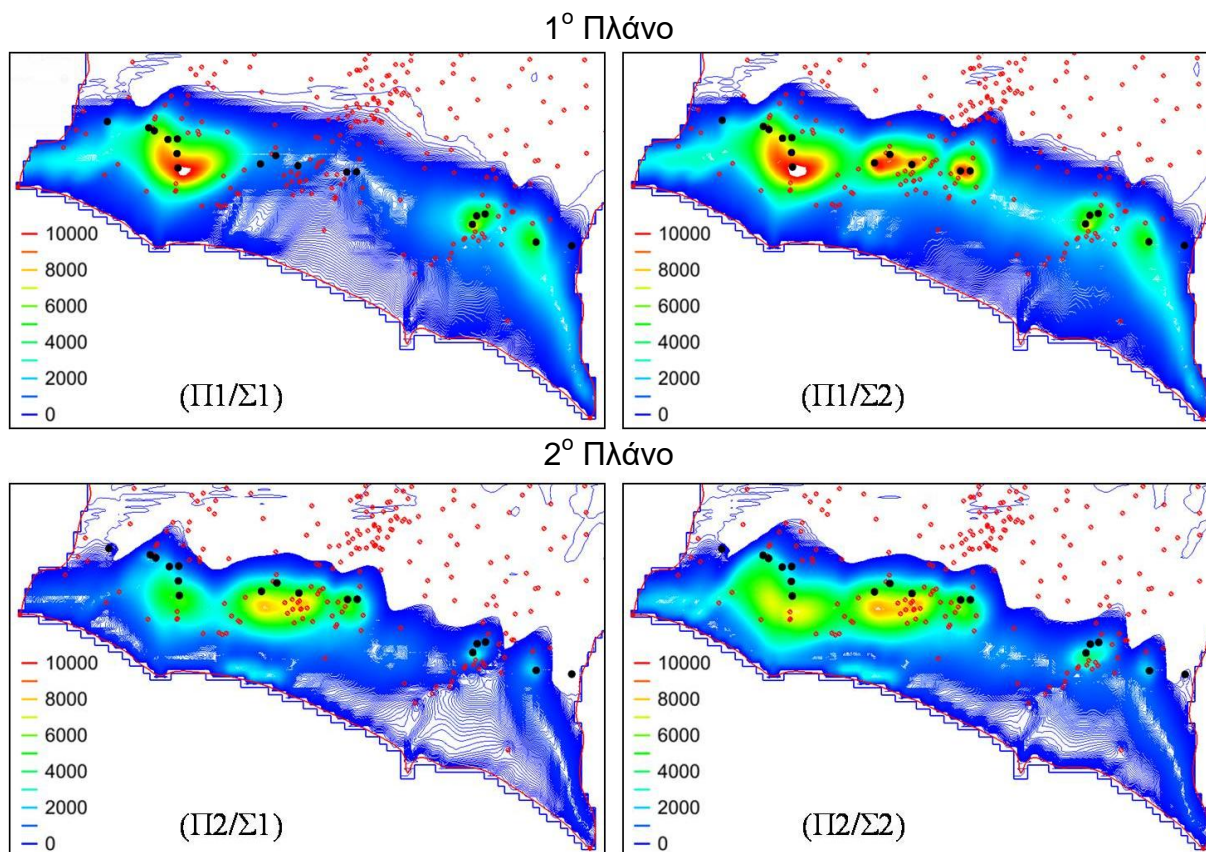


Σχήμα 6: Οι παροχές των γεωτρήσεων εμπλουτισμού στην περίπτωση της βέλτιστης λύσης για κάθε εναλλακτικό πλάνο εμπλουτισμού (Π) και για κάθε σενάριο (Σ)

Στη συνέχεια, στο Σχήμα 7 απεικονίζεται η διαφοροποίηση στις συγκεντρώσεις των χλωριόντων μεταξύ της υπάρχουσας κατάστασης (χωρίς εφαρμογή τεχνητού εμπλουτισμού) και των επιμέρους σεναρίων εμπλουτισμού στο τέλος της περιόδου εφαρμογής του εμπλουτισμού (έτος 2050). Στο σημείο αυτό θα πρέπει να αναφερθεί ότι η “υπάρχουσα κατάσταση” διαφοροποιείται μεταξύ των δύο διαφορετικών πλάνων εμπλουτισμού, καθώς στην περίπτωση του 2^{ου} πλάνου, σε αντίθεση με το 1^ο πλάνο, λαμβάνει χώρα ταυτόχρονη μείωση των αντλήσεων στην περιοχή λόγω της χρήσης του νερού του ταμιευτήρα από τη γειτονική λεκάνη απορροής (Σχήμα 4).

Όπως είναι εμφανές, σε όλες τις περιπτώσεις παρατηρείται μείωση στις συγκεντρώσεις των χλωριόντων, η οποία εντοπίζεται, ως επί το πλείστον, στην περιοχή γύρω από τις γεωτρήσεις εμπλουτισμού, και μάλιστα σε εκείνες τις γεωτρήσεις που είναι ενεργές και συμμετέχουν στη διαδικασία εμπλουτισμού. Αναλυτικότερα, όσον αφορά το 1^ο πλάνο εμπλουτισμού, στην περίπτωση του σεναρίου Σ1, η μείωση των χλωριόντων παρατηρείται σχεδόν εξολοκλήρου στο ανατολικό και δυτικό τμήμα του υδροφορέα όπου οι γεωτρήσεις εμπλουτισμού είναι ενεργές, ενώ στην περίπτωση του σεναρίου Σ2, η μείωση επεκτείνεται και στο κεντρικό τμήμα του υδροφορέα, καθώς συμμετέχουν πλέον στη διαδικασία εμπλουτισμού και οι γεωτρήσεις της 2^{ης} ομάδας (Σχήμα 5) εξαιτίας της μεγαλύτερης ποσότητας νερού που χρησιμοποιείται για τον εμπλουτισμό. Από τη άλλη, όσον αφορά το 2^ο πλάνο εμπλουτισμού, η μείωση των χλωριόντων εντοπίζεται, κατά κύριο λόγο, στο κεντρικό τμήμα του υδροφορέα όπου χωροθετούνται και οι γεωτρήσεις με τις υψηλότερες παροχές εμπλουτισμού, και, κατά δεύτερο λόγο, στο αριστερό τμήμα του, κάτι που διαφαίνεται περισσότερο έντονα στην περίπτωση του σεναρίου Σ2, όπου χρησιμοποιείται και μεγαλύτερη ποσότητα νερού για εμπλουτισμό. Αρκετά μικρότερη μείωση των χλωριόντων όσον αφορά το 2^ο πλάνο εμπλουτισμού παρατηρείται στο δεξιό τμήμα του υδροφορέα.

Τέλος, άξιο επισήμανσης κρίνεται το γεγονός ότι η μείωση των χλωριόντων σε σχέση με την υπάρχουσα κατάσταση γενικώς εμφανίζεται μεγαλύτερη στην περίπτωση του 1^{ου} πλάνου εμπλουτισμού, όπου η “υπάρχουσα κατάσταση” δεν περιλαμβάνει μεταβολή του καθεστώτος των αντλήσεων στην περιοχή και ο τεχνητός εμπλουτισμός αποτελεί το μοναδικό εφαρμοζόμενο μέτρο. Αντιθέτως, στην περίπτωση του 2^{ου} πλάνου εμπλουτισμού, όπου ο τεχνητός εμπλουτισμός συνοδεύεται από ταυτόχρονη μείωση των αντλήσεων στην περιοχή, το οποίο και λογίζεται ως “υπάρχουσα κατάσταση”, η μείωση των χλωριόντων εμφανίζεται γενικώς μικρότερη.

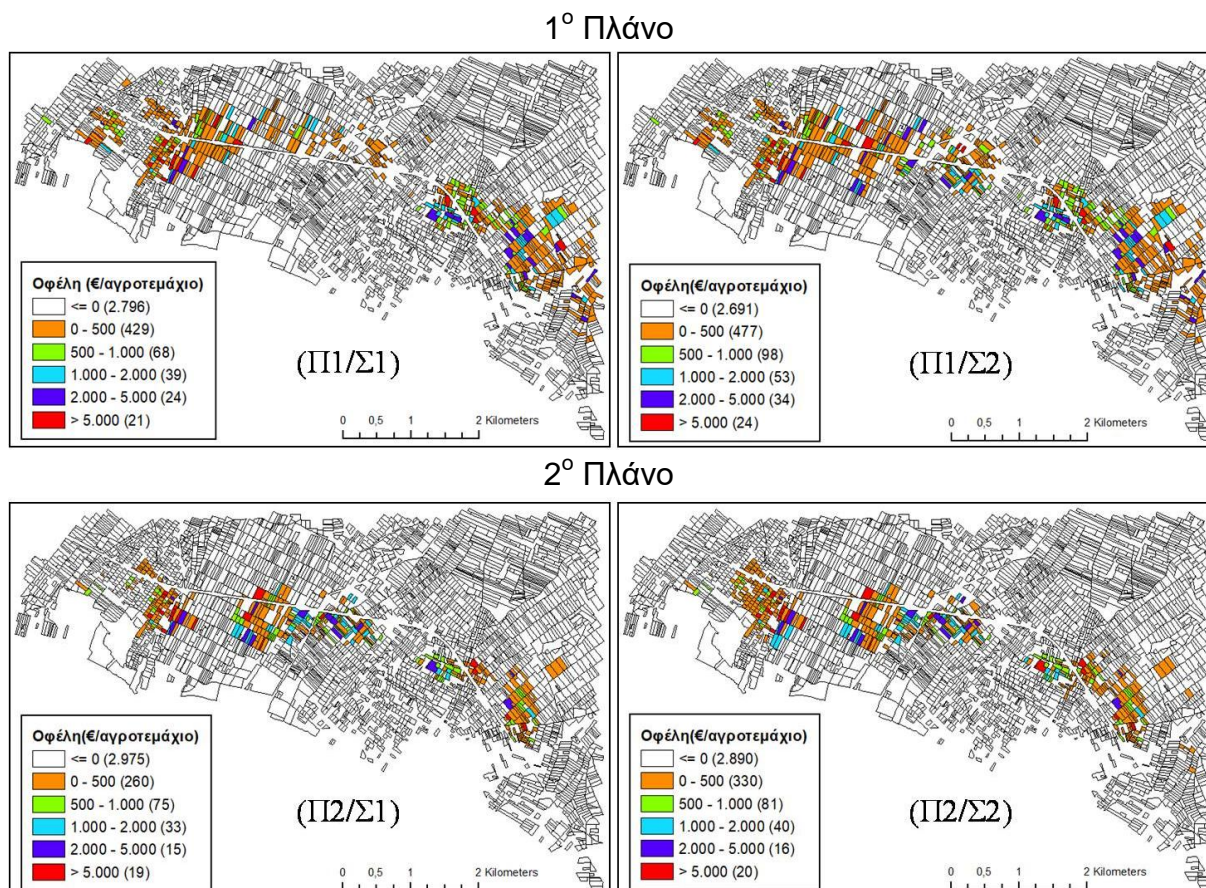


Σχήμα 7: Διαφοροποίηση στη συγκέντρωση των χλωριόντων (σε mg/l) μεταξύ της υπάρχουσας κατάστασης (χωρίς εφαρμογή τεχνητού εμπλουτισμού) και των επιμέρους σεναρίων εμπλουτισμού στο τέλος της περιόδου εφαρμογής του εμπλουτισμού (έτος 2050)

Ακολούθως, στο Σχήμα 8 απεικονίζεται η χωρική κατανομή του οικονομικού οφέλους των αγροτών (ανά αγροτεμάχιο) για κάθε εναλλακτικό πλάνο εμπλουτισμού (Π) και για κάθε σενάριο (Σ) στο τέλος της περιόδου εφαρμογής του εμπλουτισμού (έτος 2050). Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ως οικονομικό όφελος ουσιαστικά μεταφράζεται η διαφοροποίηση στο αγροτικό εισόδημα μεταξύ της υπάρχουσας κατάστασης και των επιμέρους σεναρίων εμπλουτισμού.

Όπως γίνεται άμεσα εμφανές, τα αποτελέσματα συμβαδίζουν πλήρως με αυτά της συγκέντρωσης των χλωριόντων, και επομένως στις περιοχές όπου παρατηρείται μεγαλύτερη μείωση των χλωριόντων, το οικονομικό όφελος των αγροτών προκύπτει αυξημένο. Αναλυτικότερα, στην περίπτωση του 1^{ου} πλάνου εμπλουτισμού, τα οφέλη εντοπίζονται κυρίως στο ανατολικό και δυτικό τμήμα της υπό μελέτη περιοχής όσον αφορά το σενάριο Σ1, ενώ επεκτείνονται και στο κεντρικό της τμήμα όσον αφορά το σενάριο Σ2, καθώς

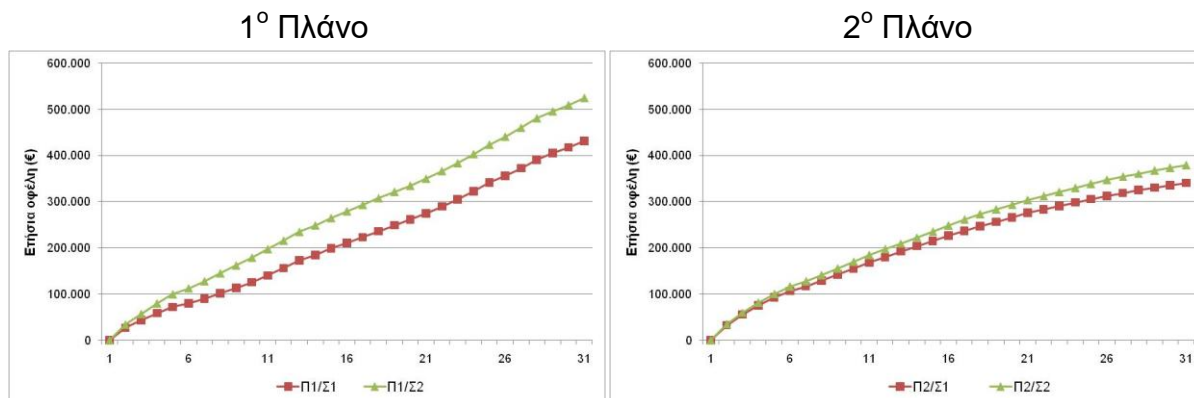
αυξάνεται η ποσότητα νερού που χρησιμοποιείται για εμπλουτισμό. Στην περίπτωση του 2^{ου} πλάνου εμπλουτισμού, τα οφέλη εντοπίζονται περισσότερο στο κεντρικό και δυτικό τμήμα της υπό μελέτη περιοχής, και λιγότερο στο ανατολικό. Τέλος, όπως διαπιστώνεται και από τον αριθμό των αγροτεμαχίων στα οποία καταγράφεται κάποιο όφελος, στην περίπτωση του 1^{ου} πλάνου εμπλουτισμού ο συνολικός αριθμός τους εμφανίζεται μεγαλύτερος σε σχέση με τον αντίστοιχο του 2^{ου} πλάνου και για τα δύο εναλλακτικά σενάρια, γεγονός που αποδίδεται εξολοκλήρου στη μεγαλύτερη μείωση χλωριόντων που παρατηρείται στην περίπτωση του 1^{ου} πλάνου εμπλουτισμού (Σχήμα 7).



Σχήμα 8: Χωρική κατανομή του οικονομικού οφέλους των αγροτών (ανά αγροτεμάχιο) για κάθε εναλλακτικό πλάνο εμπλουτισμού (Π) και για κάθε σενάριο (Σ) στο τέλος της περιόδου εφαρμογής του εμπλουτισμού (έτος 2050) (εντός των παρενθέσεων αναγράφεται ο αριθμός των αγροτεμαχίων που αντιστοιχεί σε κάθε κατηγορία οφέλους)

Επιπρόσθετα, όσον αφορά πάλι τα οικονομικά οφέλη των αγροτών, στο Σχήμα 9 παρουσιάζονται για κάθε εναλλακτικό πλάνο εμπλουτισμού (Π) και για κάθε σενάριο (Σ) τα ετήσια οφέλη για το σύνολο των αγροτεμαχίων και για το σύνολο της περιόδου εφαρμογής του τεχνητού εμπλουτισμού (30 χρόνια). Για τον υπολογισμό τους, η βέλτιστη λύση που υπολογίστηκε και η οποία επιφέρει μεγιστοποίηση του αγροτικού εισοδήματος στο τέλος της περιόδου εφαρμογής του εμπλουτισμού, εφαρμόστηκε σε κάθε ένα από τα προηγούμενα έτη. Όπως προκύπτει από το σχήμα, σε όλες τις περιπτώσεις το ετήσιο όφελος των αγροτών λόγω εφαρμογής του τεχνητού εμπλουτισμού βαθμιαία αυξάνεται, με την αύξηση να είναι μεγαλύτερη στην περίπτωση του 1^{ου} πλάνου εμπλουτισμού και για τα δύο εναλλακτικά σενάρια, εξαιτίας της μεγαλύτερης μείωσης στη συγκέντρωση των χλωριόντων που

χαρακτηρίζει το συγκεκριμένο πλάνο εμπλουτισμού. Επίσης, όπως είναι εμφανές, και για τα δύο πλάνα εμπλουτισμού, τα οικονομικά οφέλη εμφανίζονται υψηλότερα στις περιπτώσεις των σεναρίων Σ2, λόγω της μεγαλύτερης ποσότητας νερού που χρησιμοποιείται για εμπλουτισμό σε σχέση με το σενάριο Σ1.



Σχήμα 9: Ετήσια οφέλη (για 30 χρόνια) στην περίπτωση της βέλτιστης λύσης για κάθε εναλλακτικό πλάνο εμπλουτισμού (Π) και για κάθε σενάριο (Σ)

Τέλος, στον Πίνακα 3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης κόστους-οφέλους για κάθε εναλλακτικό πλάνο εμπλουτισμού (Π) και για κάθε σενάριο (Σ). Όσον αφορά τα οφέλη, αυτά υπολογίζονται ως το άθροισμα των ετήσιων οικονομικών οφελών και των 30 ετών της περιόδου εφαρμογής του τεχνητού εμπλουτισμού (για όλα τα εναλλακτικά σεναρία), μετά την αναγωγή τους σε παρούσα αξία (ΠΑ) θεωρώντας επιτόκιο ανατοκισμού της τάξης του 4%. Σύμφωνα με τις τιμές του Πίνακα, όπως ήταν αναμενόμενο, τα συνολικά οφέλη στην περίπτωση των σεναρίων Σ2 εμφανίζονται μεγαλύτερα από τα αντίστοιχα των σεναρίων Σ1 και για τα δύο διαφορετικά πλάνα εμπλουτισμού (μεγαλύτερη διαφορά στην περίπτωση του 1^{ου} πλάνου εμπλουτισμού), καθώς στο σενάριο Σ2 χρησιμοποιείται μεγαλύτερη ποσότητα νερού με αποτέλεσμα τη μεγαλύτερη μείωση της συγκέντρωσης των χλωριόντων και κατ'επέκταση την αύξηση του οικονομικού οφέλους. Προκειμένου, όμως, σε κάθε εναλλακτικό πλάνο εμπλουτισμού να αξιολογηθούν καλύτερα τα επιμέρους σεναρία, θα πρέπει να υπολογιστούν, σε κάθε περίπτωση, και τα κόστη εφαρμογής τους.

Πίνακας 3: Ανάλυση κόστους-οφέλους για κάθε εναλλακτικό πλάνο εμπλουτισμού (Π) και για κάθε σενάριο (Σ)

Πλάνο	Σενάρια	Οφέλη (B)	Κόστη (C)	(B) - (C)
Π1	Π1/Σ1	3,035,211 €	2,817,546 €	217,666 €
	Π1/Σ2	3,944,736 €	3,801,099 €	143,637 €
Π2	Π2/Σ1	3,111,358 €	845,089 €	2,266,269 €
	Π2/Σ2	3,420,662 €	1,178,932 €	2,241,730 €

Αναφορικά, λοιπόν, με τα κόστη εφαρμογής, όπως έχει ήδη αναφερθεί, διαφοροποιούνται μεταξύ των δύο πλάνων εμπλουτισμού, καθώς στην περίπτωση του 1^{ου} πλάνου περιλαμβάνονται τόσο τα λειτουργικά κόστη του συστήματος συλλογής του νερού (στο ανώτερο τμήμα του υδροφορέα) όσο και τα κατασκευαστικά κόστη του συνολικού δικτύου μεταφοράς-διανομής του νερού, ενώ στην περίπτωση του 2^{ου} πλάνου εμπλουτισμού

λαμβάνονται υπόψη μόνο τα κατασκευαστικά κόστη του δικτύου διανομής. Σχετικά με τις προαναφερθείσες κατηγορίες κόστους αναφέρεται ότι για τον υπολογισμό του λειτουργικού κόστους λαμβάνεται υπόψη το ετήσιο κόστος άντλησης των γεωτρήσεων (25 γεωτρήσεις) βάσει της ενέργειας που καταναλώνεται για το διάστημα που λειτουργούν, καθώς και το ετήσιο κόστος εργασίας, ενώ για τον υπολογισμό του κατασκευαστικού κόστους λαμβάνεται υπόψη το κόστος των αγωγών καθώς και το κόστος των εκσκαφών, τα οποία είναι άμεσα συνυφασμένα με τη διάμετρο και το μήκος των αγωγών, όπως αυτά καθορίζονται κατά τον σχεδιασμό του δικτύου. Όπως και στην περίπτωση του οφέλους, για τον υπολογισμό των τελικών τιμών του κόστους που περιλαμβάνονται στην ανάλυση κόστους-οφέλους έγινε για όλα τα εναλλακτικά σενάρια εμπλουτισμού αναγωγή των υπολογιζόμενων τιμών σε παρούσα αξία (ΠΑ), θεωρώντας πάλι επιτόκιο ανατοκισμού της τάξης του 4%.

Σύμφωνα με τις τιμές του Πίνακα 3, τα συνολικά κόστη στην περίπτωση των σεναρίων Σ2 εμφανίζονται μεγαλύτερα και για τα δύο εναλλακτικά πλάνα εμπλουτισμού, καθώς η χρήση μεγαλύτερης ποσότητας νερού έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση τόσο του λειτουργικού (μεγαλύτερη απαιτούμενη ισχύς για τις αντλίες λόγω μεγαλύτερης παροχής άντλησης) όσο και του κατασκευαστικού κόστους (μεγαλύτερη διάμετρος αγωγών) των σεναρίων. Για την εξαγωγή, όμως, αρτιότερων συμπερασμάτων ως προς την εφαρμογή των επιμέρους σεναρίων εμπλουτισμού, πρέπει να ληφθούν υπόψη και να αξιολογηθούν τα τελικά αποτελέσματα της ανάλυσης κόστους-οφέλους, όπως αυτά προκύπτουν από τον υπολογισμό της διαφοράς μεταξύ του συνολικού οικονομικού οφέλους και του συνολικού κόστους εφαρμογής τους. Βάσει, λοιπόν, των αποτελεσμάτων αυτών και για τα δύο εναλλακτικά πλάνα εμπλουτισμού, τα πρώτα σενάρια (Σ1), στα οποία και χρησιμοποιείται μικρότερη ποσότητα νερού για εμπλουτισμό ($= 2 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{ετος}$), εμφανίζονται ελαφρώς καλύτερα από τα δεύτερα (Σ2), παρόλο που τα τελευταία υπερτερούν από άποψη μόνο οικονομικού οφέλους. Συμπερασματικά, λοιπόν, η χρήση για εμπλουτισμό ποσότητας νερού ίση με $2 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{ετος}$ φαίνεται να αποτελεί καλύτερη επιλογή για την υπο μελέτη περιοχή, όποια και από τις δύο εναλλακτικές λύσεις εμπλουτισμού εφαρμοστεί (είτε χρησιμοποιηθεί νερό από το ανώτερο τμήμα του υδροφορέα είτε από τον ταμειυτήρα της γειτονικής λεκάνης απορροής).

6. Συμπεράσματα

Στο πλαίσιο της παρούσας μεταδιδακτορικής έρευνας έλαβε χώρα η ανάπτυξη ενός γενικευμένου και συγχρόνως καινοτόμου μοντέλου εφαρμογής τεχνητού εμπλουτισμού μέσω υδρογεωτρήσεων για την αντιμετώπιση της θαλάσσιας διείσδυσης σε παράκτιες περιοχές. Βασικό στόχο του γενικευμένου αυτού μοντέλου αποτελεί η βελτιστοποίηση της εφαρμογής τεχνητού εμπλουτισμού ενσωματώνοντας στη διαδικασία βελτιστοποίησης εκτός από την περιβαλλοντική συνιστώσα του προβλήματος (διατήρηση ποιότητας νερού), και την οικονομική συνιστώσα, η οποία στην προκειμένη περίπτωση αναφέρεται στα οικονομικά οφέλη των αγροτών που προκύπτουν από τη διασφάλιση νερού επαρκούς ποιότητας. Για τη διαμόρφωση του μοντέλου εμπλουτισμού έλαβε χώρα η σύζευξη μεταξύ ενός μοντέλου προσομοίωσης και ενός μοντέλου βελτιστοποίησης, ενώ για την αξιολόγηση της εφαρμογής του διερευνήθηκαν διάφορα εναλλακτικά σενάρια εμπλουτισμού, τα οποία και διαφοροποιούνται μεταξύ τους αφενός ως προς την πηγή προέλευσης του νερού εμπλουτισμού και αφετέρου ως προς τη συνολική ποσότητά του.

Βάσει των αποτελεσμάτων, όλα τα εφαρμοζόμενα σενάρια εμπλουτισμού κρίνονται ως αποτελεσματικά τόσο από περιβαλλοντική σκοπιά, καθώς επιτυγχάνεται μείωση της συγκέντρωσης των χλωριόντων, όσο και από οικονομική σκοπιά, καθώς αποφέρουν

σημαντικά οικονομικά οφέλη στους αγρότες σε βάθος χρόνου. Μάλιστα, τα σενάρια που περιλαμβάνουν εμπλουτισμό με μεγαλύτερη ποσότητα νερού παρουσιάζουν μεγαλύτερα γενικώς οφέλη. Παρόλα αυτά, όμως, η εφαρμογή των επιμέρους σεναρίων εμπλουτισμού περιλαμβάνει και σημαντικά τεχνικά κόστη (λειτουργικά και κατασκευαστικά). Λαμβάνοντας υπόψη, λοιπόν, στην οικονομική ανάλυση και τα προαναφερθέντα κόστη, τα αποτελέσματα κατέδειξαν ότι τα σενάρια που χρησιμοποιούν μικρότερη ποσότητα νερού για εμπλουτισμό κρίνονται τελικά καταλληλότερα για την περιοχή έρευνας, καθώς εμφανίζονται οικονομικά αποδοτικότερα.

Συμπερασματικά, η παρούσα μεταδιδακτορική έρευνα παρέχει χρήσιμες πληροφορίες όσον αφορά το πρόβλημα της θαλάσσιας διείσδυσης στις παράκτιες περιοχές, ενώ μπορεί να αποδειχθεί πολύτιμο εργαλείο για τους ενασχολούμενους με τους υδατικούς πόρους φορείς και επιστήμονες όσον αφορά την προσπάθεια ορθολογικής διαχείρισης των παράκτιων υδροφόρων συστημάτων και διαμόρφωσης αποτελεσματικών στρατηγικών ελέγχου της θαλάσσιας διείσδυσης. Σε μελλοντικό στάδιο, στο μοντέλο εμπλουτισμού μπορεί να ενσωματωθούν και οι γεωτρήσεις άντλησης, διαμορφώνοντας με αυτόν τον τρόπο ένα ολοκληρωμένο μοντέλο διαχείρισης των παράκτιων περιοχών, μέσω του οποίου θα πραγματοποιείται η επίτευξη ποικίλων διαχειριστικών στόχων.

7. Βιβλιογραφία

- Λατινόπουλος Π. (2003) *Εκπόνηση σχεδίου διαχείρισης υδατικού δυναμικού για ύδρευση - άρδευση*, Τεχνική έκθεση ερευνητικού έργου, Φορέας ανάθεσης: Δήμος Μουδανίων.
- Σιάρκος Η. (2015) *Ανάπτυξη μεθοδολογικού πλαισίου με χρήση μαθηματικών μοντέλων προσομοίωσης για τη διερεύνηση της λειτουργίας παράκτιων υδροφόρων συστημάτων: εφαρμογή στον υδροφορέα των Ν. Μουδανίων*, Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Α.Π.Θ., Θεσσαλονίκη.
- Abarca E., Vázquez-Suñé E., Carrera J., Capino B., Gamez D., Batlle F. (2006) Optimal design of measures to correct seawater intrusion, *Water Resources Research*, 42: W09415.
- Arslan H., Demir Y. (2013) Impacts of seawater intrusion on soil salinity and alkalinity in Bafra Plain, Turkey, *Environmental Monitoring & Assessment*, 185: 1027-1040.
- Assouline S., Shavit U. (2004) Effects of management policies, including artificial recharge, on salinization in a sloping aquifer: The Israeli Coastal Aquifer case, *Water Resources Research*, 40: W04101.
- Ayers R.S., Westcot D.W. (1985) *Water quality for agriculture*, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Irrigation and Drainage Paper 29.
- Bouwer H. (2002) Artificial recharge of groundwater: hydrogeology and engineering, *Hydrogeology Journal*, 10(1): 121-142.
- Bray B., Yeh W. (2008) Improving seawater barrier operation with simulation optimization in southern California, *Journal of Water Resources Planning & Management*, 134(2): 171-180.
- Datta B., Vennalakanti H., Dhar A. (2009) Modeling and control of saltwater intrusion in a coastal aquifer of Andhra Pradesh, India, *Journal of Hydro-environment Research*, 3: 148-159.
- Huang P.-S., Chiu Y.-C. (2018) A simulation-optimization model for seawater intrusion management at Pingtung coastal area, Taiwan, *Water*, 10: 251.
- Javadi A.A., Abd-Elhamid H.F., Farmani R. (2012) A simulation-optimization model to control seawater intrusion in coastal aquifers using abstraction/recharge wells, *Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 36(16): 1757-1779.
- Javadi A., Hussain M., Sherif M., Farmani R. (2015) Multi-objective optimization of different management scenarios to control seawater intrusion in coastal aquifers, *Water Resources Management*, 29(6): 1843-1857.
- Kalbus E., Zekri S., Karimi A. (2016) Intervention scenarios to manage seawater intrusion in a coastal agricultural area in Oman, *Arabian Journal of Geosciences*, 9: 472.

- Kallioras A., Pliakas F., Schuth C., Rausch R. (2013) Methods to countermeasure the intrusion of seawater into coastal aquifer systems, In: Sharma S.K., Sanghi R. (eds) *Wastewater reuse and management*, Springer Science & Business Media, Dordrecht, pp. 479-490.
- Katsifarakis K.L., Petala Z. (2006) Combining genetic algorithm and boundary elements to optimize coastal aquifers' management, *Journal of Hydrology*, 327: 200-207.
- Ketabchi H., Ataie-Ashtiani B. (2015a) Evolutionary algorithms for the optimal management of coastal groundwater: a comparative study toward future challenges, *Journal of Hydrology*, 520: 193-213.
- Ketabchi H., Ataie-Ashtiani B. (2015b) Review: coastal groundwater optimization advances, challenges, and practical solutions, *Hydrogeology Journal*, 23: 1129-1154.
- Luyun R.Jr., Momii K., Nakagawa K. (2011) Effects of recharge wells and flow barriers on seawater intrusion, *Ground Water*, 49(2): 239-249.
- Mantoglou A., Papantoniou M. (2008) Optimal design of pumping networks in coastal aquifers using sharp interface models, *Journal of Hydrology*, 361: 52-63.
- Michael H.A., Post V.E.A., Wilson A.M., Werner A.D. (2017) Science, society, and the coastal groundwater squeeze, *Water Resources Research*, 53: 2610-2617.
- Papadopoulou M.P. (2011) Optimization approaches for the control of seawater intrusion and its environmental impacts in coastal environment, *Pacific Journal of Optimization*, 7(3): 479-502.
- Pool M., Carrera J. (2010) Dynamics of negative hydraulic barriers to prevent seawater intrusion, *Hydrogeology Journal*, 18(1): 95-105.
- Qahman K., Larabi A., Ouazar D., Naji A., Cheng A.H.-D. (2005) Optimal and sustainable extraction of groundwater in coastal aquifers, *Stochastic Environmental Research & Risk Assessment*, 19: 99-110.
- Siarkos I., Katirtzidou M., Sevastas S., Tzoraki O. (2021) Evaluation of potential preventive measures against seawater intrusion in Nea Moudania aquifer, Greece, *Proceedings of the 4th International Congress on Applied Ichthyology, Oceanography & Aquatic Environment*, 4-6 November, Virtual.
- Siarkos I., Latinopoulos D., Mallios Z., Latinopoulos P. (2017) A methodological framework to assess the environmental and economic effects of injection barriers against seawater intrusion, *Journal of Environmental Management*, 193: 532-540.
- Siarkos I., Latinopoulos P. (2016a) Modeling seawater intrusion in overexploited aquifers in the absence of sufficient data: application to the aquifer of Nea Moudania, northern Greece, *Hydrogeology Journal*, 24(8): 2123-2141.
- Siarkos I., Latinopoulos P. (2016b) Development of constant and variable density models to study groundwater flow and seawater intrusion in the aquifer of Nea Moudania, Greece, *European Water*, 55: 53-66.
- Singh A. (2014) Optimization modelling for seawater intrusion management, *Journal of Hydrology*, 508: 43-52.
- Singh A. (2015) Managing the environmental problem of seawater intrusion in coastal aquifers through simulation-optimization modeling, *Ecological Indicators*, 48: 498-504.
- Werner A.D., Bakker M., Post V.E.A., Vandenbohede A., Lu C., Ataie-Ashtiani B., Simmons C.T., Barry D.A. (2013) Seawater intrusion processes, investigation and management: Recent advances and future challenges, *Advances in Water Resources*, 51: 3-26.
- Wirsansky E. (2020) *Hands-on Genetic Algorithms with Python*, Packt Publishing Ltd., Birmingham, UK.
- Yang Y., Song J., Simmons C.T., Ataie-Ashtiani B., Wu J., Wang J., Wu J. (2021) A conjunctive management framework for the optimal design of pumping and injection strategies to mitigate seawater intrusion, *Journal of Environmental Management*, 282: 111964.
- Yang Y., Wu J.F., Lin J., Wang J.G., Zhou Z.F., Wu J.C. (2018) An efficient simulation-optimization approach for controlling seawater intrusion, *Journal of Coastal Research*, 84: 10-18.
- Zekri S. (2008) Using economic incentives and regulations to reduce seawater intrusion in the Batinah coastal area of Oman, *Agricultural Water Management*, 95(3): 243-252.



Επιχειρησιακό Πρόγραμμα
Ανάπτυξη Ανθρώπινου Δυναμικού,
Εκπαίδευση και Διά Βίου Μάθηση

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



Ηλίας Σιάρκος
Ερευνητής / Υπότροφος

Ουρανία Τζωράκη
Αναπληρώτρια Καθηγήτρια