

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΥΠΡΟΥ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ  
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ



## Πτυχιακή εργασία

ΥΦΑΛΜΥΡΙΝΣΗ ΣΤΟΝ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΤΟΥ  
ΑΚΡΩΤΗΡΙΟΥ ΣΤΗΝ ΚΥΠΡΟ

Μελέτης Θεοχάρους

Σύμβουλος καθηγητής  
Δρ. Ευάγγελος Ακύλας

Λεμεσός 2016



ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΥΠΡΟΥ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ  
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΓΕΩΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

## **Πτυχιακή εργασία**

ΥΦΑΛΜΥΡΙΝΣΗ ΣΤΟΝ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΤΟΥ  
ΑΚΡΩΤΗΡΙΟΥ ΣΤΗΝ ΚΥΠΡΟ

Μελέτης Θεοχάρους

Σύμβουλος καθηγητής  
Δρ. Ευάγγελος Ακύλας

Λεμεσός 2016

**ΕΝΤΥΠΟ ΕΓΚΡΙΣΗΣ**

Μεταπτυχιακή διατριβή

**ΥΦΑΛΜΥΡΙΝΣΗ ΣΤΟΝ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΤΟΥ  
ΑΚΡΩΤΗΡΙΟΥ ΣΤΗΝ ΚΥΠΡΟ**

Παρουσιάστηκε από

**Μελέτης Θεοχάρους**

Επιβλέπων καθηγητής \_\_\_\_\_

Δρ. Ευάγγελος Ακύλας

Μέλος επιτροπής \_\_\_\_\_

Μέλος επιτροπής \_\_\_\_\_

Τεχνολογικό Πανεπιστήμιο Κύπρου

Σεπτέμβριος, 2016

Πνευματικά δικαιώματα

Copyright © Μελέτης Θεοχάρους, 2016

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Η έγκριση της πτυχιακής εργασίας από το Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών και Μηχανικών Γεωπληροφορικής του Τεχνολογικού Πανεπιστημίου Κύπρου δεν υποδηλώνει απαραίτητως και αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα εκ μέρους του Τμήματος.

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Τελειώνοντας αυτήν την εργασία δε θα μπορούσα να μην αναφερθώ στους ανθρώπους που βοήθησαν στην ολοκλήρωση της. Καταρχήν ένα μεγάλο ευχαριστώ στον επιβλέποντα μου Δρ. Ευάγγελο Ακύλα για τη συνεχή καθοδήγηση και την εμπιστοσύνη του. Ιδιαίτερες ευχαριστίες στους Δρ. Δημητρίου Χαράλαμπο, Ανώτερο Υδρολόγο και Προϊστάμενο Υπηρεσίας Υδρομετρίας στο Τμήμα Αναπτύξεως Υδάτων και Ιακώβου Κυριάκο και Τζιωνή Κώστα Λειτουργούς στον Κλάδο Υδρολογίας στο Τμήμα Αναπτύξεως Υδάτων Λεμεσού για τις πολύτιμες πληροφορίες, τα στοιχεία και την βοήθεια που προσέφεραν. Τέλος όλη μου η ευγνωμοσύνη στην οικογένεια μου για τη συμπαράσταση και την αγάπη τους.

# Περιεχόμενα

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ .....	6
Περιεχόμενα.....	7
Κατάλογος Σχημάτων .....	8
Κατάλογος Πινάκων .....	9
ΠΕΡΙΛΗΨΗ .....	10
Abstract .....	11
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	12
1.1 Το Νερό στους υπόγειους υδροφορείς .....	13
1.2 Υδραυλικά χαρακτηριστικά των υδροφορέων .....	15
<b>Υδραυλικό φορτίο</b> .....	15
<b>Διαπερατότητα</b> .....	15
<b>Μεταβιβαστικότητα</b> .....	15
<b>Αποθηκευτικότητα</b> .....	15
2. ΕΞΑΝΤΛΗΣΗ ΤΩΝ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΝΕΡΩΝ.....	16
2.1 Υφάλμυρο νερό .....	17
2.2 Πρόβλημα υπερβολικής άντλησης και υφαλμύρισης των υδάτων στην Κύπρο .....	18
<b>2.2.1 Διαδικασία Υφαλμύρισης</b> .....	20
<b>2.2.2 Νιτρορύπανση</b> .....	21
2.3 Διαχείριση των υπόγειων υδάτων στη Κύπρο – Εναρμόνιση με την Ευρωπαϊκή οδηγία υδάτων .....	21
<b>2.3.1 Υπόγεια υδατικά σώματα στην Κύπρο</b> .....	23
<b>2.3.2 Αξιολόγηση Συστημάτων Υπογείων Υδάτων της Κύπρου</b> .....	27
3. ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΥΦΑΛΜΥΡΙΣΗΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣ .....	29
4. ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ - WASSER.....	37
4.1 Το πρόγραμμα WASSER - Αξιοποίηση λυμάτων για εφαρμογές σε ημιάνυδρες περιοχές.....	39
4.2 Διαδικασία της βελτιστοποίησης στο WASSER.....	43
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ .....	48
Βιβλιογραφία.....	50

## Κατάλογος Σχημάτων

<b>Σχήμα 1.</b> Είδη υδροφορέων.....	σελ. 10
<b>Σχήμα 2.</b> Περιοχές υπερβολικής άντλησης υπογείων υδάτων στην Κύπρο.....	σελ.15
<b>Σχήμα 3.</b> Διαδικασία Υφαλμύρισης ( <i>Καλλέργη, Γ., 2001</i> ) .....	σελ. 16
<b>Σχήμα 4.</b> Δίκτυο Παρακολούθησης Υπογείων Υδάτων .....	σελ 20
<b>Σχήμα 5.</b> Χάρτης ισοϋψών καμπυλών της στάθμης του υπόγειου νερού (ισοπιεζομετρικός χάρτης) παράκτιου υδροφορέα Ακρωτηρίου .....	σελ 22
<b>Σχήμα 6.</b> Κατάσταση ΣΥΥ (19) που βρίσκονται εντός της υπό αποτελεσματικό Κυβερνητικό έλεγχο περιοχής.....	σελ 23
<b>Σχήμα 7.</b> Τοπογραφικός χάρτης με τις γεωτρήσεις στην ευρύτερη περιοχή του υδροφορέα του ακρωτηρίου και η περιοχή στην οποία εστίασαμε.....	σελ 27
<b>Σχήμα 8.</b> Τοπογραφικός χάρτης με τις 12 γεωτρήσεις που αναλύθηκαν στην περιοχή της Επισκοπής στην έξοδο της κοίτης του Κούρη. Με κόκκινες διακεκομμένες.....	σελ 28
<b>Σχήμα 9.</b> Υψόμετρο των γεωτρήσεων σε σχέση με την απόσταση από τη θάλασσα....	σελ.29
<b>Σχήμα 10.</b> Προφίλ της θερμοκρασίας του νερού συναρτήσει του βάθους κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας στις γεωτρήσεις που επελέγησαν.....	σελ 30
<b>Σχήμα 11.</b> Προφίλ της αλατότητας του νερού σε $\mu\text{S}$ συναρτήσει του βάθους κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας στις γεωτρήσεις 3, 8, 9, 11, 10.....	σελ 31
<b>Σχήμα 12.</b> Προφίλ της αλατότητας του νερού σε $\mu\text{S}$ συναρτήσει του βάθους κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας στις γεωτρήσεις 7, 6, 2, 5, 12.....	σελ 32
<b>Σχήμα 13.</b> Προφίλ της αλατότητας του νερού συναρτήσει του βάθους κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας στις γεωτρήσεις που επελέγησαν (1, 4).....	σελ 33
<b>Σχήμα 14.</b> Διαδικασία βελτιστοποίησης που προτάθηκε στο WASSER: έλεγχος και τελικό στάδιο σχεδιασμού (Πηγή: Koussis et al. 2005).....	σελ 37
<b>Σχήμα 15.</b> Χάρτης του υδροφορέα Ακρωτηρίου, τοποθεσίες διατρήσεων στην περιοχή Ζακακίου.....	σελ 40
<b>Σχήμα 16.</b> Δισδιάστατο μοντέλο του υδροφορέα Ακρωτηρίου που χρησιμοποιείται στις προσομοιώσεις μεταβλητής πυκνότητας των υπόγειων υδάτων. P (XP, ZP) και R (xR, Zr) είναι οι διατρήσεις άντλησης επαναφόρτισης, το x είναι η οριζόντια απόσταση από την ακτογραμμή και z η κατακόρυφη απόσταση από το επίπεδο της θάλασσας.....	σελ 42



## Κατάλογος Πινάκων

**Πίνακας I.** Στοιχεία των θέσεων των γεωτρήσεων και των σταθμών του νερού ..... σελ 26

**Πίνακας II.** Δεδομένα των επιφανειακών ταμιευτήρων που χρησιμοποιούνται για την παροχή νερού στη Λεμεσό..... σελ 42

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η Ευρωπαϊκή Ένωση έθεσε τους στόχους και τις βάσεις με την Οδηγία και τώρα αναμένεται από κάθε κράτος μέλος να αξιολογήσει την υπάρχουσα κατάσταση και τις ιδιαιτερότητες των υδατικών του πόρων και να διαμορφώσει τη δική του εθνική στρατηγική. Παρόλη τη σταδιακή εναρμόνιση της Κύπρου με την οδηγία Πλαίσιο η κατάσταση στα υπόγεια υδατικά στρώματα της είναι μάλλον απογοητευτική. Στη διάρκεια της τελευταίας δεκαετίας σχεδόν σε όλους τους υδροφορείς, παρατηρούνται τάσεις εξάντλησης. Μερικοί από τους παραθαλάσσιους υδροφορείς παρατηρούνται να έχουν την στάθμη των υδάτων τους κάτω από το επίπεδο των νερών της θάλασσας. Αυτό είναι το αποτέλεσμα των συχνών και μεγάλης διάρκειας ανομβριών και ξηρασίας των περασμένων δεκαετιών. Η κατασκευή φραγμάτων είχε ως αποτέλεσμα μεγάλες μειώσεις και σε πολλές περιπτώσεις μέχρι και ολοκληρωτική εξάλειψη του φυσικού εμπλουτισμού των υδροφορέων. Την ίδια στιγμή οι αγρότες στην προσπάθεια τους να διατηρήσουν την αγροτική τους παραγωγή στα ίδια επίπεδα, συνεχίζουν να εξάγουν τις ίδιες ποσότητες υπογείων υδάτων και σε ορισμένες περιπτώσεις αυξάνουν κατά πολύ την απόληψη. Όλες αυτές οι δυσμενείς συνθήκες είχαν σαν αποτέλεσμα την εισχώρηση αλμυρού νερού και ως εκ τούτου την αλλοίωση της ποιότητας των παραθαλάσσιων υδροφορέων και της εξάντλησης των υδροφορέων στην ενδοχώρα. Όπως δείξαμε και από την επεξεργασία πρόσφατων μετρήσεων η κατάσταση στον υδροφορέα του Ακρωτηρίου που είναι και ο μεγαλύτερος της Κύπρου είναι ιδιαίτερα επιβαρυνμένη με μεγάλο τμήμα του υδροφορέα να έχει ήδη υποστεί υφαλμύριση από την εισδοχή θαλασσινού νερού λόγω μειωμένων ροών και υπεράντλησης. Η κατάσταση είναι ιδιαίτερα δυσμενής καθώς πλησιάζουμε προς τη θάλασσα και κυρίως κοντά σε γεωργικές περιοχές.

Ένα πιλοτικό πρόγραμμα αντιμετώπισης συνολικά του προβλήματος της διαχείρισης των υδροφορέων είναι το πρόγραμμα WASSER που υπέδειξε την ορθή εφαρμογή μιας μεθοδολογίας για την αειφόρο ανάπτυξη του υδροφορέα της χερσονήσου του Ακρωτηρίου στην Λεμεσό. Η συγκεκριμένη μελέτη έδειξε ότι το προτεινόμενο σύστημα γενικής διαχείρισης του υδροφορέα δίνει μια λύση που είναι προτιμότερη από την ευρέως προωθούμενη αφαλάτωση θαλασσινού νερού, λαμβάνοντας επίσης υπόψη τη χρήση των επεξεργασμένων λυμάτων στην άρδευση. Με λίγα λόγια, η μελέτη του προγράμματος WASSER στη Κύπρο, αποδεικνύει ότι η ολοκληρωμένη διαχείριση των υδάτινων πόρων είναι σαφώς μια ανώτερη οικονομικά και περιβαλλοντικά λύση σε σχέση με την απλή αφαλάτωση θαλασσινού νερού, η οποία είναι ευάλωτη και εξαρτάται από τις μεγάλες διακυμάνσεις των τιμών της ενέργειας παγκοσμίως, με σαφώς ανοδική τάση.

## Abstract

The European Union has set the goals and bases with the Directive and is now expected from each Member State to assess the current situation and characteristics of water resources and to develop their own national strategy. Despite the gradual harmonization with the Framework Directive, the situation of Cyprus in the underground water layers is rather disappointing. During the last decade in almost all aquifers, trends of depletion observed. Some of the coastal aquifers observed to have the level of the water beneath the sea level. This is the result of the frequent and long droughts over the past decades. Dam construction has resulted in major reductions in many cases up to complete elimination of the natural recharge of aquifers. At the same time, farmers in their effort to maintain their agricultural production at the same level, they continue to extract the same amounts of groundwater and in some cases they increase the extraction. All these adverse conditions resulted in the intrusion of salt water and therefore the deterioration of the quality of coastal aquifers and the depletion of inland aquifers. As shown by recent measurements processing, condition in the aquifer of Akrotiri, which is the largest of Cyprus, are particularly burdened and a large area of the aquifer has already been salinate due to the intrusion of seawater caused by the reduced flows and over pumping. The situation is getting worse as we get closer to the sea, especially near agricultural areas.

A pilot program to tackle the whole problem of aquifer management is the WASSER project which indicates the proper implementation of a methodology for sustainable development of the aquifer of the Akrotiri peninsula in Limassol. This study showed that the proposed general management of the aquifer provides a solution that is better than the widely promoted desalination of seawater, and it is also taking into account the use of treated wastewater for irrigation. In general, the study of WASSER program in Cyprus demonstrates that the integrated management of water resources is clearly a superior economic and environmental friendly solution than the simple desalination of sea water, which is fragile and depends on the price large fluctuations energy worldwide, with clearly upward trend.

# 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

«Υπόγεια ύδατα» είναι το σύνολο των υδάτων που βρίσκονται κάτω από την επιφάνεια του εδάφους στη ζώνη κορεσμού και σε άμεση επαφή με το έδαφος ή το υπέδαφος, σύμφωνα με τον ορισμό που δίνει η οδηγία του Ευρωπαϊκού Συμβουλίου για την προστασία και διαχείριση των υδάτων. Τα υπόγεια ύδατα αποτελούν ένα πολύτιμο πόρο για όλες τις περιοχές του πλανήτη. Σε περιοχές όπου το επιφανειακό νερό που υπάρχει σε λίμνες και ποτάμια είναι περιορισμένο ή απρόσιτο, τα αποθέματα των υπογείων υδάτων μπορούν να ικανοποιήσουν πολλές από τις υδρολογικές ανάγκες του πληθυσμού. Η εξάντληση αυτών των υπογείων νερών είναι ένα βασικό πρόβλημα που σχετίζεται με την χρήση και την εκμετάλλευση αυτού του νερού. Στις μέρες μας, πολλές περιοχές σε όλο τον κόσμο αντιμετωπίζουν το πρόβλημα της εξάντλησης των υπογείων υδάτων (USGS, 2013).

Η άντληση του νερού από το έδαφος με ρυθμούς πιο γρήγορους από ότι μπορεί να αναπληρωθεί στη διάρκεια του χρόνου, αρχίζει να προκαλεί αρκετά προβλήματα στη στάθμη των αποθεμάτων των υπόγειων υδάτων. Η εξάντληση αυτών των υδάτων δημιουργείται κυρίως από την συνεχή και αδιάκοπη άντλησή τους. Μερικές από τις αρνητικές επιπτώσεις της εξάντλησης των υπογείων υδάτων είναι η αφυδάτωση των πηγών, η μείωση του νερού σε ρυάκια και λίμνες, η αλλοίωση της ποιότητας του νερού, η αύξηση του κόστους άντλησης και η καθίζηση των εδαφών (USGS, 2013).

Στην παρούσα εργασία αρχικά εξηγούνται λίγες βασικές έννοιες για τη φυσική λειτουργία των υπόγειων υδροφορέων. Στο 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο αναπτύσσεται το πρόβλημα της υφαλμύρινσης λόγω υπεράντλησης, και γίνεται ιδιαίτερη αναφορά στην κατάσταση που επικρατεί στην Κύπρο σε σχέση και με την εναρμόνιση με την Κοινοτική νομοθεσία για το νερό. Στο 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο παρατίθενται τα αποτελέσματα και η καινοτομία του επιστημονικού Προγράμματος WASSER σε σχέση με την ολοκληρωμένη δυνατότητα διαχείρισης του υδατικού προβλήματος με την επαναχρησιμοποίηση ανακυκλωμένου νερού για επανατροφοδότηση υδροφορέων. Στο 4<sup>ο</sup> κεφάλαιο παρατίθενται επεξεργασμένες σε αυτήν την εργασία μετρήσεις της αλατότητας στο μεγαλύτερο Κυπριακό υδροφόρο, στο Ακρωτήριο της Λεμεσού που αποδεικνύουν τη σημαντικότητα του προβλήματος και την αποτυχία της μέχρι τώρα πολιτικής. Τέλος στο 5<sup>ο</sup> κεφάλαιο συνοψίζονται τα κύρια σημεία αυτής της δουλειάς και παρατίθενται τα κυριότερα συμπεράσματα και οι προτάσεις μας.

## 1.1 Το Νερό στους υπόγειους υδροφορείς

**Ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα:** Στην ατμόσφαιρα, το νερό βρίσκεται σε μορφή υδρατμών και μετά από συμπύκνωση, πέφτει στην επιφάνεια της γης σε υγρή ή στερεή μορφή. Το νερό φτάνει στη γη σε όλες τις μορφές (βροχή, χαλάζι, χιόνι κ.λπ.) μέσω ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων.

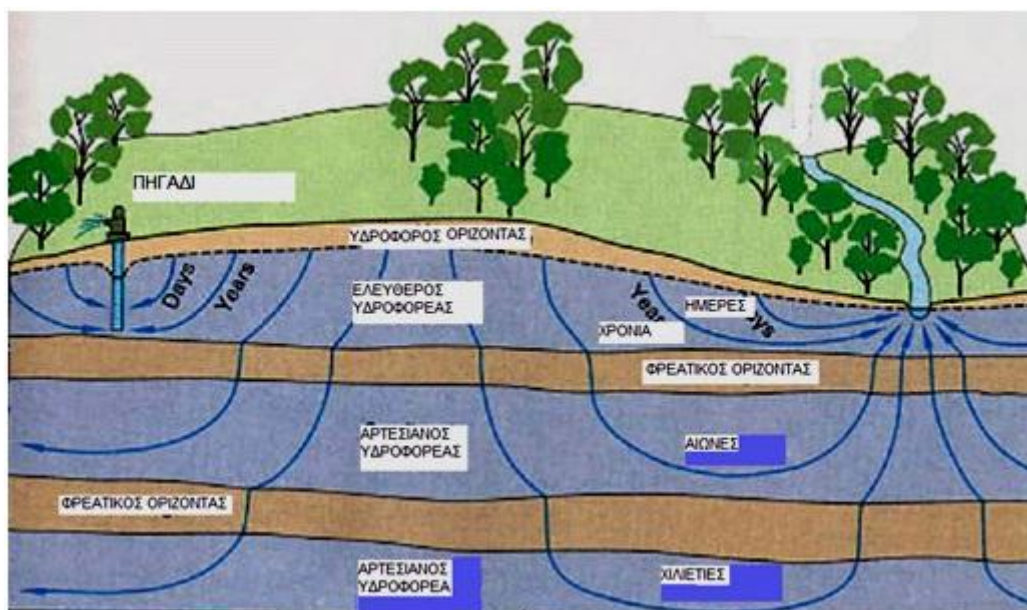
**Κατείσδυση:** Η διεργασία της κατείσδυσης αποτελεί τη σημαντικότερη για μια περιοχή, αφού συμβάλει στην ανανέωση των αποθεμάτων των υπόγειων υδροφορέων. Το νερό που κατακρατήθηκε, διαπερνά την επιφάνεια του εδάφους και φθάνει τους υπόγειους υδροφορείς. Η κατείσδυση εξαρτάται από την υγρασία του εδάφους, το είδος των πετρωμάτων, την κλίση και τον τύπο του εδάφους, τη βλάστηση, την ένταση των κατακρημνισμάτων κ.λπ. Γενικά, το υπόγειο νερό που προέρχεται από την κατείσδυση των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων διαχωρίζεται ως εξής:

- Βαρυτικό νερό: είναι το νερό που υπακούει στους νόμους της βαρύτητας και παίρνει μέρος στην υπόγεια κυκλοφορία. Το νερό αυτό μπορεί να ληφθεί άμεσα ή έμμεσα.
- Νερό κατακράτησης: είναι το νερό που δεν υπακούει στους νόμους της βαρύτητας και συνεπώς δεν παίρνει μέρος στην υπόγεια κυκλοφορία.

**Υδροφορείς:** είναι οι γεωλογικοί σχηματισμοί που περιέχουν κορεσμένο υλικό και τροφοδοτούν με σημαντικές ποσότητες νερού γεωτρήσεις ή πηγές, αποθηκεύοντας ή μεταβιβάζοντάς το. Ένα υδροφόρο στρώμα αποτελείται από το γεωλογικό σχηματισμό και το νερό στο υπέδαφος, που βρίσκεται σε βαρυτική μορφή και ως νερό συγκράτησης. Υδροφόρος ορίζοντας θεωρείται η άνω επιφάνεια ενός υδροφόρου στρώματος, βάση της φύσης της οποίας και ταξινομείται σε ελεύθερο υδροφόρο ορίζοντα ή σε υδροφόρο ορίζοντα υπό πίεση. Τα δύο είδη αναπαριστούνται και διευκρινίζονται στο Σχήμα 1. Ελεύθεροι (ή φρεάτιοι) υδροφορείς είναι οι υδροφορείς που έχουν ως δάπεδο ένα στεγανό στρώμα και στην άνω επιφάνειά τους δεν παρεμβάλλεται αδιαπέραστο γεωλογικό στρώμα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η υδροστατική πίεση στην ελεύθερη επιφάνεια (φρεάτια) των υπόγειων νερών να είναι ίση με την ατμοσφαιρική. Οι μεταβολές της στάθμης του νερού αντιστοιχούν σε

μεταβολές του όγκου του αποθηκευμένου νερού στον υδροφορέα. Ειδική περίπτωση ελεύθερων υδροφόρων είναι οι κρεμαστοί ή επικρεμάμενοι υδροφορείς (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλλος, 1999).

Αντίστοιχα, υπό πίεση υδροφορείς (ονομάζονται και περιορισμένοι ή αρτεσιανοί), είναι οι υδροφορείς που στα υδροφόρα στρώματά τους έχουν εγκλωβισμένο νερό ανάμεσα στα αδιαπέρατα στρώματα του δαπέδου και της οροφής. Οι υδροφορείς υπό πίεση είναι κορεσμένοι σε όλο το πάχος τους και η πίεση του νερού είναι μεγαλύτερη της ατμοσφαιρικής. Για τον λόγο αυτό η πιεζομετρική επιφάνεια, η οποία είναι μια εικονική επιφάνεια και συμπίπτει με το επίπεδο της υδροστατικής επιφάνειας στον υδροφορέα, βρίσκεται ψηλότερα από τη βάση της αδιαπέρατης οροφής. Όταν η πιεζομετρική επιφάνεια βρίσκεται πάνω από την επιφάνεια του εδάφους, τότε παρατηρείται αυτόματη ροή με τη μορφή αρτεσιανού πίδακα (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλλος, 1999).



Σχήμα 1. Είδη υδροφορέων (WikipediaFreeware)

Επιπρόσθετα, υπάρχουν και οι λεγόμενοι ‘Ημιαρτεσιανοί υδροφορείς’ (υπό μερική πίεση). Οι ημιαρτεσιανοί υδροφορείς είναι υπόγειοι υδροφορείς ανάλογοι με τους υπό πίεση με τη διαφορά ότι το υπερκείμενο στρώμα είναι ημιπερατό, παρουσιάζει δηλαδή μικρή υδροπερατότητα. Επίσης, ανάλογα με το είδος των πετρωμάτων του υδροφορέα, διακρίνονται άλλες δύο μεγάλες ομάδες υδροφορέων, οι καρστικοί (*karst aquifers*) που αναπτύσσονται στα ανθρακικά πετρώματα και οι πορώδεις (*porous aquifers*) που αναπτύσσονται σε κοκκώδεις σχηματισμούς.

## 1.2 Υδραυλικά χαρακτηριστικά των υδροφορέων

Οι υπόγειοι υδροφορείς μελετώνται καταγράφοντας συγκεκριμένες πληροφορίες ως προς τα χαρακτηριστικά που τους διέπουν. Τα χαρακτηριστικά αυτά είναι το υδραυλικό φορτίο, η διαπερατότητα, η μεταβιβαστικότητα και η αποθηκευτικότητα. Ακολούθως, γίνεται μια αναφορά στη σημασία τους σε διάφορες μελέτες.

### Υδραυλικό φορτίο

Τα υπόγεια νερά κινούνται λόγω της ενέργειας που φέρουν. Η ενέργεια αποτελεί το άθροισμα της κινητικής, της δυναμικής και της υδροστατικής ενέργειας, ανά μονάδα όγκου. Δηλαδή, η ενέργεια αυτή ανά μονάδα βάρους αντιπροσωπεύει το υδραυλικό φορτίο. Η μεταβολή του υδραυλικού φορτίου ανά μονάδα μήκους κατά τη διεύθυνση της υπόγειας ροής ονομάζεται υδραυλική κλίση. Το υδραυλικό φορτίο δεν μένει σταθερό, αντιθέτως μειώνεται κατά την κίνηση του υπόγειου νερού, λόγω απωλειών (τριβές).

### Διαπερατότητα

Διαπερατότητα ονομάζεται η σταθερά που επηρεάζεται από το σχήμα, το μέγεθος και τη διάταξη των κόκκων του πορώδους.

### Μεταβιβαστικότητα

Είναι ο όρος που εκφράζει τον όγκο του νερού που περνά από μια μοναδιαία διατομή του υδροφόρου στρώματος με υδραυλική κλίση ίση με τη μονάδα.

### Αποθηκευτικότητα

Ο συντελεστής αποθηκευτικότητας είναι ο όγκος του νερού που μπορεί να ληφθεί ή αποθηκευθεί από ένα κατακόρυφο πρίσμα ενός υδροφόρου στρώματος με μοναδιαία επιφάνεια ανά μονάδα μεταβολής φορτίου. Στους ελεύθερους υδροφορείς παίρνει τιμές που κυμαίνονται από 1%-30%, ενώ στους υπό πίεση από 0,0001%-0,5%. Η διαφορά αυτή οφείλεται στον διαφορετικό μηχανισμό απελευθέρωσης νερού από τα ανωτέρω είδη υδροφορέων.



## 2. ΕΞΑΝΤΛΗΣΗ ΤΩΝ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΝΕΡΩΝ

Η άντληση του νερού από το έδαφος με ρυθμούς πιο γρήγορους από ότι μπορεί να αναπληρωθεί στη διάρκεια του χρόνου , προκαλεί αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον και στους χρήστες του νερού. Κάποιες από τις επιπτώσεις επεξηγούνται πιο κάτω.

Η κυριότερη επίπτωση της υπερβολικής άντλησης υπόγειων υδάτων είναι η μείωση της στάθμης των υπόγειων νερών. Η ιδανική κατάσταση θα ήταν η άντληση του νερού από το έδαφος να γίνεται από πηγές η οποίες βρίσκονται κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα. Στην περίπτωση όπου τα επίπεδα των υπογείων νερών μειώνονται υπερβολικά τότε η πηγή θα πρέπει να σκαφθεί περισσότερο, ή να γίνει καινούρια βαθύτερη πηγή ή τουλάχιστο να πάει βαθύτερα η αντλία. Προφανώς, όσο το επίπεδο του νερού μειώνεται, το ποσοστό του νερού που μπορεί να αντληθεί, μειώνεται εξίσου. Επίσης, η μείωση του υδροφόρου ορίζοντα οδηγεί σε ένα ακόμα μεγαλύτερο πρόβλημα, την υποβάθμιση της ποιότητας του νερού λόγω της εισχώρησης θαλασσινού νερού η οποία θα επεξηγηθεί σε άλλο σημείο. Επιπλέον, η εξάντληση των υπογείων υδάτων δημιουργεί πρόβλημα στο ότι η αντλία πρέπει να τοποθετείται σε χαμηλότερο βάθος για να αντλήσει νερό και έτσι χρειάζεται περισσότερη ενέργεια και άρα περισσότερο κόστος για την τοποθέτηση και την λειτουργία της αντλίας (USGS, 2013).

Η εξάντληση των υπογείων υδάτων προκαλεί ακόμα μείωση των νερών σε ρυάκια και λίμνες. Υπάρχει μια σημαντική σχέση μεταξύ των νερών στις λίμνες και τους ποταμούς με τα υπόγεια ύδατα. Μια ουσιαστική ποσότητα των νερών που ρέουν στους ποταμούς προέρχεται από την διαρροή των υπογείων νερών στην κοίτη του ποταμού. Το ποσοστό αυτού του νερού που προέρχεται από τα υπόγεια ύδατα εξαρτάται στην γεωγραφία της περιοχής, στη γεωλογία και στο κλίμα. Η άντληση των υπογείων νερών έχει την ικανότητα να αλλάξει τον τρόπο που το νερό κινείται μεταξύ ενός υδροφόρου στρώματος και ενός ρεύματος νερού ή μιας λίμνης με το να αποτρέπει την ροή των υπόγειων νερών προς την λίμνη ή μέσω της αύξησης του ρυθμού μετακίνησης ενός υπέργειου σώματος νερού στους υπόγειους υδροφορείς. Επίσης μια ακόμα επίπτωση της άντλησης των υπογείων νερών είναι η μείωση του επιπέδου των υπογείων νερών κάτω από τη στάθμη που μπορεί να επιβιώσει η βλάστηση σε ένα υγρότοπο και αυτό επηρεάζει την ζωτικότητα της βλάστησης και την άγρια ζωή εκεί. (USGS, 2013)



Η ενδεχόμενη καθίζηση του εδάφους είναι μια άλλη επίπτωση που προκαλείται από την εξάντληση των υπογείων υδάτων. Ο σημαντικότερος λόγος της καθίζησης του εδάφους είναι η απώλεια στήριξης του υπεδάφους. Πιο συγκεκριμένα, όταν το νερό αντλείται από το έδαφος, το χώμα καταρρέει, συμπιέζεται και στο τέλος πέφτει. Αυτό εξαρτάται από το είδος του εδάφους και στο είδος του πετρώματος κάτω από την επιφάνεια. Η καθίζηση του εδάφους συνήθως οφείλεται στις ανθρώπινες δραστηριότητες ειδικά εξαιτίας της άντλησης των υπογείων υδάτων. (USGS, 2013)

Τέλος, η υποβάθμιση των της ποιότητας του νερού οφείλεται επίσης στην εξάντληση των υπογείων νερών. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα της εξάντλησης των υπογείων υδάτων είναι η μόλυνση των αποθεμάτων γλυκού νερού από την διείσδυση θαλασσινού νερού. Οι ποσότητες των υπογείων νερών δεν αποτελούνται μόνο από γλυκό νερό. Αποτελούνται επίσης από υφάλμυρο νερό σε μεγαλύτερα βάθη. Σε φυσιολογικές συνθήκες, η διαχωριστική γραμμή του γλυκού νερού και του αλμυρού νερού έχει την τάση να είναι σχετικά σταθερή, αλλά η συνεχής άντληση του γλυκού νερού μπορεί να προκαλέσει μετάβαση θαλασσινού νερού στο εσωτερικό του εδάφους και στην επιφάνειά του, με αποτέλεσμα τη μόλυνση του γλυκού νερού από το θαλασσινό. (USGS, 2013)

## 2.1 Υφάλμυρο νερό

Όπως είχε αναφερθεί πιο πάνω, η υποβάθμιση των της ποιότητας του νερού προκαλεί τη μόλυνση του γλυκού νερού από το θαλασσινό. Αυτό το μείγμα των υδάτων ονομάζεται «υφάλμυρο νερό». Με απλά λόγια, το υφάλμυρο νερό είναι το νερό που έχει υψηλότερη περιεκτικότητα σε αλάτι από το γλυκό νερό αλλά μικρότερη περιεκτικότητα σε αλάτι από το θαλασσινό νερό. Καθώς ο όρος καλύπτει ένα μεγάλο φάσμα αλατότητας, συνήθως διαιρείται σε μικρότερες κατηγορίες. (NSW, 2011). Σε πολλά μέρη του κόσμου, το υφάλμυρο νερό εμφανίζεται με φυσικό τρόπο, και αυτό διαμορφώνει ένα σημαντικό βιότοπο για κάποια μοναδικά είδη ζώων. Ωστόσο, μπορεί να προκαλέσει περιβαλλοντική ζημιά διότι είναι επιβλαβής για τους οργανισμούς οι οποίοι δεν έχουν προσαρμοστεί σε αυτό. Επίσης αυτό το είδος του νερού δεν είναι πόσιμο και μπορεί να προκαλέσει προβλήματα υγείας.

Ο όρος «υφαλμύριση» χρησιμοποιήθηκε αρχικά για να περιγράψει τις ποσότητες του πόσιμου νερού το οποίο μολύνθηκε με θαλασσινό γύρω στη

χρονολογία του 1500. Πολλοί άνθρωποι σημείωναν επίσης ότι εκείνο το νερό ήταν επιβλαβής λόγω κάποιων μικροοργανισμών που ευδοκιμούν σε αυτό και προκαλούν ασθένειες.

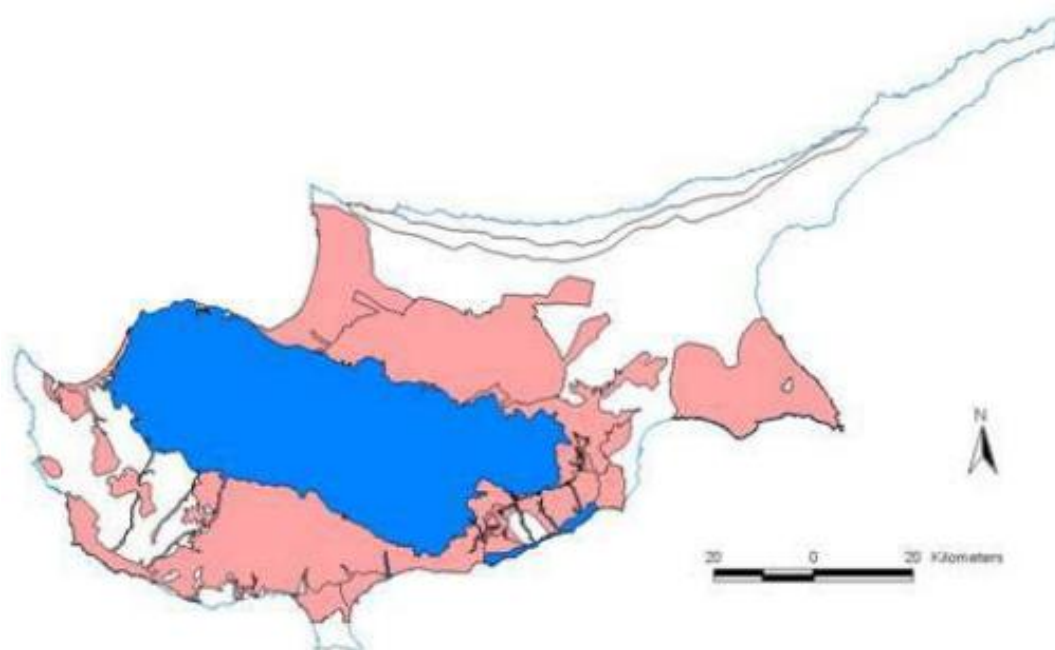
Στη φύση, το υφάλμυρο νερό εντοπίζεται συνήθως στις εκβολές των ποταμών. Η εκβολή ενός ποταμού είναι μια τοποθεσία όπου αλμυρό και γλυκό νερό αναμιγνύονται κατά κανόνα γύρω από το άνοιγμα ενός ποταμού. Το περιβάλλον στις εκβολές των ποταμών, είναι ιδιαίτερο καθώς ενώνει τους ωκεανούς με τα ποτάμια, φιλοξενεί μοναδικά είδη ψαριών, φυτών και ζώων. Όταν η ισορροπία μιας εκβολής διαταράσσεται, μπορεί να υπάρξουν σοβαρές συνέπειες για τα ζώα στο βίοτοπο. Πολλά ανάδρομα ψάρια, τα οποία γεννιούνται στο γλυκό νερό και ζουν στο αλμυρό, ευδοκιμούν στις εκβολές διότι η αργή αλλαγή στην αλατότητα του νερού επιτρέπει σε αυτά τα ψάρια να εξοικειώσουν τον εαυτό τους (WisegEEK, 2015).

## 2.2 Πρόβλημα υπερβολικής άντλησης και υφαλμύρισης των υδάτων στην Κύπρο

Στην Κύπρο 15 από τα 19 σώματα υπογείων υδάτων βρίσκονται σε κίνδυνο λόγω της υπεράντλησης. Οι συνέπειες της υπεράντλησης στην Κύπρο περιλαμβάνουν την ποσοτική υποβάθμιση των υδάτων, την εξάντληση των υπογείων υδάτων, την υφαλμύριση παράκτιων υδροφόρων στρωμάτων, την αύξηση νιτρικών συστατικών λόγω της μειωμένης φυσικής αναπλήρωσης από την αποκοπή εμπλουτισμού των υδροφορέων κατάντη των φραγμάτων. Επίσης άλλες συνέπειες μπορούν να χαρακτηριστούν η διάχυτη ρύπανση από την αυξημένη γεωργία, η μείωση της ροής των ποταμών και των πηγών, η υποβάθμιση εδαφών, οι έμμεσες επιπτώσεις στη βιοποικιλότητα, η αύξηση του κινδύνου του φαινομένου της απερίμωσης σε ορισμένες περιοχές και η αύξηση στην κατανάλωση ενέργειας. Το μπλε χρώμα στον παρακάτω χάρτη (Σχήμα 2) δείχνει τις περιοχές χωρίς προβλήματα υπερεκμετάλλευσης. Το κόκκινο χρώμα σημειώνει τις περιοχές που υφίστανται υπεράντληση και στις οποίες παρατηρείται συνεχής πτώση της στάθμης των υπογείων υδάτων. Το πρόβλημα της υφαλμύρισης παρατηρείται στις παράκτιες περιοχές με το κόκκινο χρώμα (Ιακωβίδης Α. 2007).

Οι συνήθεις διαδικασίες που ακολουθούνται στην Κύπρο σχετικά με τους όγκους των υπογείων υδάτων είναι ο έλεγχος στη κατανάλωση του νερού για άρδευση και για ύδρευση, η προσπάθεια δημιουργίας υδατικής συνείδησης με

εκστρατείες και πρόστιμα, επιχορηγήσεις για χρήση τεχνολογιών εξοικονόμησης του νερού και εφαρμογή βελτιωμένων μεθόδων άρδευσης. Επίσης εφαρμόστηκαν περικοπές στην παροχή νερού, μερική αλλαγή διάρθρωσης καλλιεργειών, μερική εισαγωγή μετρητών στις γεωτρήσεις και αύξηση παροχής νερού από άλλες πηγές (αφαλατώσεις, ανακυκλωμένο νερό) για άρδευση και εμπλουτισμό. Τέλος, μέσω του σχεδιασμού και της εφαρμογής παρακολούθησης της ποσοτικής όσο και της ποιοτικής κατάστασης υπογείων νερών.



**Σχήμα 2.** Περιοχές υπερβολικής άντλησης υπογείων υδάτων στην Κύπρο (Ιακωβίδης Α, 2007)

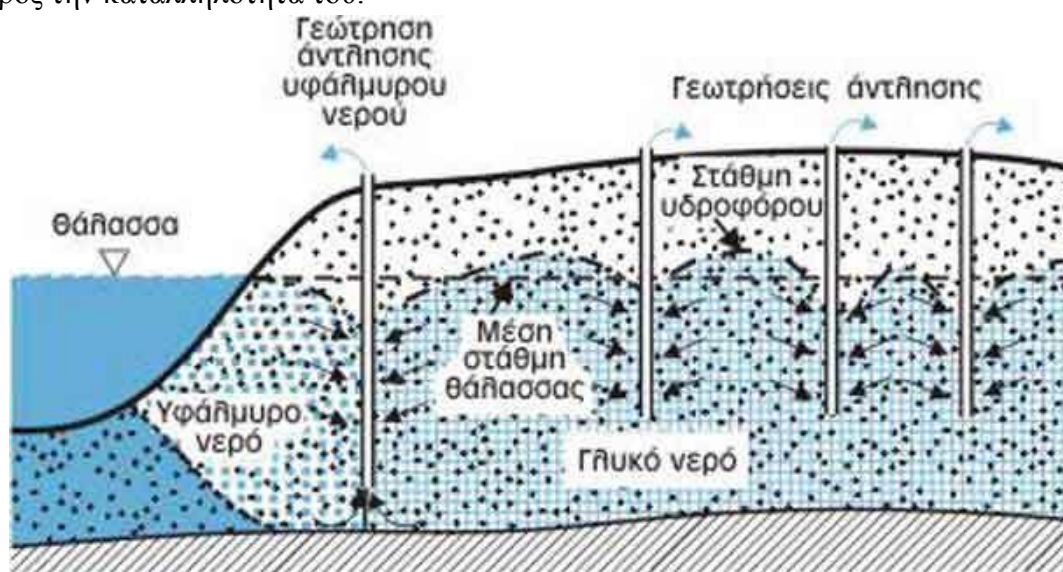
Για την αποτελεσματική επίλυση αυτού του προβλήματος, χρειάζεται μια κατάλληλη και σωστή διαχείριση των υφιστάμενων όγκων υπογείων νερών και η δημιουργία ενός ολοκληρωμένου προγράμματος με τη χρήση ανακυκλωμένου νερού. Περαιτέρω βελτιωτικές κινήσεις περιλαμβάνουν την μείωση της κατανάλωσης νερού για διάφορες δραστηριότητες, την αναδιάρθρωση της γεωργίας, την εφαρμογή βελτιωμένων συστημάτων άρδευσης και την συντήρηση των δικτύων μεταφοράς νερού για μείωση των απωλειών. Επιπλέον, η αύξηση της παροχής νερού από εναλλακτικές πηγές και η ανατροφοδότηση των υπογείων υδάτων με νερό από επεξεργασία λυμάτων (Ιακωβίδης Α, 2007). Αυτό είναι και το πιο σημαντικό σε αυτή τη κατεύθυνση διότι δεν έχει χρησιμοποιηθεί ξανά στη Κύπρο.

Ένα ολοκληρωμένο σχέδιο χρησιμοποίησης ανακυκλωμένου νερού (από επεξεργασμένα λύματα), όπως θα αναπτυχτεί στο επόμενο κεφάλαιο, θα είναι πιο

αποδοτικό εάν συνδυάζεται με την αφαλάτωση των υφιστάμενων υφάλμυρων υπόγειων υδάτων. Αυτό μπορεί να χαρακτηριστεί και ως ένας συνεχής «κύκλος του νερού» διότι το αφυδατωμένο νερό μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πόσιμο κάτω από προϋποθέσεις. Τα αποχετευτικά λύματα από τα σπίτια θα πηγαίνουν για επεξεργασία και το επεξεργασμένο νερό με την σειρά του θα διοχετεύεται στους υπόγειους υδροφορείς.

### 2.2.1 Διαδικασία Υφαλμύρισης

Σε περιοχές όπου οι κάτοικοι δραστηριοποιούνται με γεωργικές εργασίες, η αυξημένη ζήτηση για καθαρό νερό αποτελεί σοβαρό πρόβλημα ενώ το ίδιο πρόβλημα παρατηρείται έντονα και σε παράκτιες περιοχές με χαμηλό υψόμετρο. Με τον όρο «καθαρό νερό» εννοούμε το νερό που είναι κατάλληλο για ύδρευση και για άρδευση. Φυσικά, η ποιότητά του θα πρέπει να τηρεί κάποιες συγκεκριμένες προδιαγραφές ως προς την καταλληλότητά του.



Σχήμα 3. Διαδικασία Υφαλμύρισης (Καλλέργη, Γ., 2001)

Λόγω της έντονης και συνεχούς εκμετάλλευσης των υπόγειων υδροφορέων του γλυκού νερού, στα υδροφόρα στρώματα υπάρχει διείσδυση θαλασσινού νερού. Η φυσική αυτή διεργασία των υπογείων υδάτων ονομάζεται υφαλμύριση. Ο ρυθμός και η διαδρομή της μεταφοράς του νερού καθορίζονται από τις κλίσεις των στρωμάτων καθώς και από την υδραυλική αγωγιμότητά τους. Όταν το γλυκό και το αλμυρό νερό έρθουν σε επαφή, αναμιγνύονται, και δημιουργείται ανάμεσά τους μια

ενδιάμεση ζώνη με υφάλμυρο νερό (Σχήμα 3). Το ύψος της νέας ζώνης ποικίλει και εξαρτάται από το είδος, οι διαστάσεις και τα υδραυλικά και γεωλογικά χαρακτηριστικά του υδροφορέα.

### 2.2.2 Νιτρορύπανση

Το αποτέλεσμα της ρύπανσης στο υδάτινο περιβάλλον λόγω της άμεσης ή έμμεσης απόρριψης αζωτούχων ενώσεων, ονομάζεται νιτρορύπανση. Οι επιπτώσεις της νιτρορύπανσης είναι επιβλαβείς για την ανθρώπινη υγεία και υποβαθμίζουν την ποιότητα των υπόγειων υδάτων.

Οι κύριες πηγές νιτρορύπανσης προέρχονται κυρίως από τις ανθρώπινες δραστηριότητες. Σημαντικότερη πηγή νιτρορύπανσης είναι οι γεωργικές και οι κτηνοτροφικές δραστηριότητες. Η υπερβολική χρήση αζωτούχων λιπασμάτων για τη βελτίωση της παραγωγής έχει ως αποτέλεσμα την παρουσία υψηλών συγκεντρώσεων νιτρικών ενώσεων στο υπέδαφος. Υψηλές συγκεντρώσεις αζωτούχων ενώσεων έχουν παρατηρηθεί και σε περιοχές με μεγάλη συγκέντρωση ζωικών αποβλήτων.

Στα υπόγεια ύδατα, η νιτρορύπανση εμφανίζεται κυρίως ως συσσώρευση νιτρικών ουσιών, οι οποίες σε ορισμένες περιπτώσεις φθάνουν σε απαγορευτικά επίπεδα για χρήση του νερού για σκοπούς ύδρευσης.

## 2.3 Διαχείριση των υπόγειων υδάτων στη Κύπρο – Εναρμόνιση με την Ευρωπαϊκή οδηγία υδάτων

Μέχρι και το 1977, οι ανάγκες των κατοίκων της Κύπρου για νερό, καλύπτονταν με μοναδική πηγή τις βροχοπτώσεις. Μετά από συστηματικές μετρήσεις και με μακρά σειρά παρατηρήσεων, η μέση ετήσια βροχόπτωση περιλαμβανομένης και της χιονόπτωσης, είναι 503 χιλιοστόμετρα, ενώ από το 2000 μέχρι σήμερα έχει μειωθεί στα 463 χιλιοστόμετρα.

Η ποσότητα του νερού που αντιστοιχεί στην ολική επιφάνεια της ελεύθερης περιοχής της Κύπρου είναι περίπου 2750 εκατομμύρια m<sup>3</sup>, αλλά μόνο το 10% από αυτά προσφέρεται για εκμετάλλευση. Το υπόλοιπο 90% επιστρέφει στην ατμόσφαιρα, λόγω της εξάτμισης και της διαπνοής.

Δεδομένων των πολυάριθμων και αυξανόμενων πιέσεων στους υδάτινους πόρους, έχει ζωτική σημασία να υπάρξουν αποτελεσματικά θεσμικά όργανα και μέτρα που θα αντιμετωπίσουν αποτελεσματικά τα προβλήματα και θα βοηθήσουν στην εξασφάλιση αυτών των πόρων για τις επόμενες γενεές. Η Ευρωπαϊκή Ένωση, κατανοώντας τη σημασία της προστασίας και διατήρησης του υδάτινου περιβάλλοντος στην Κοινότητα προχώρησε με την εκπόνηση μιας νέας οδηγίας πλαισίου που θα θεσπίζει τις βασικές αρχές μιας βιώσιμης πολιτικής των υδάτων στην Ευρωπαϊκή Ένωση. Η νέα Οδηγία Πλαίσιο, μετά από μια μακρόχρονη περίοδο συζητήσεων και διαπραγματεύσεων μεταξύ των χωρών της Ευρωπαϊκής Ένωσης, τέθηκε σε ισχύ στις 22 Δεκεμβρίου 2000. Με την ένταξη της στην Ευρωπαϊκή Ένωση, η Κύπρος οφείλει να συμμορφωθεί πλήρως με τις απαιτήσεις και το χρονοδιάγραμμα της Οδηγίας αυτής. Η Οδηγία 2000/60/EK για τη θέσπιση πλαισίου κοινοτικής δράσης στον τομέα της πολιτικής των υδάτων ή αλλιώς Οδηγία-Πλαίσιο για τα Νερά αναμορφώνει την υφιστάμενη Ευρωπαϊκή Νομοθεσία και θέτει το νομοθετικό πλαίσιο για την ορθή διαχείριση και προστασία των υδατικών πόρων. Ο βασικός στόχος της Οδηγίας είναι η αποτροπή της περαιτέρω υποβάθμισης όλων των υδάτων και η επίτευξη μιας «καλής κατάστασης» μέχρι το 2015. Η νέα Οδηγία-Πλαίσιο, μεταξύ άλλων:

- Προστατεύει όλα τα ύδατα ποταμούς, λίμνες, παράκτια και υπόγεια.
- Θέτει φιλόδοξους στόχους για να εξασφαλιστεί ότι όλα τα ύδατα θα ανταποκρίνονται στην «καλή κατάσταση» μέχρι το 2015.
- Δημιουργεί σύστημα διαχείρισης σε επίπεδο λεκάνης απορροής ποταμού.
- Απαιτεί διασυνοριακή συνεργασία μεταξύ χωρών και όλων των εμπλεκόμενων μερών, (στην περίπτωση των διεθνών περιοχών λεκάνης απορροής ποταμού).
- Εξασφαλίζει ενεργό συμμετοχή όλων των φορέων, συμπεριλαμβανομένων των μη κυβερνητικών οργανισμών και των τοπικών αρχών, στις δραστηριότητες της διαχείρισης των υδάτων.
- Εξασφαλίζει μείωση και έλεγχο της ρύπανσης από όλες τις πηγές όπως η γεωργία, η βιομηχανική δραστηριότητα, οι αστικές περιοχές, κ.λπ.
- Απαιτεί πολιτικές τιμολόγησης του νερού και εξασφαλίζει ότι ο ρυπαίνων πληρώνει και τέλος,
- Εξισορροπεί τα συμφέροντα του περιβάλλοντος με τα συμφέροντα αυτών που εξαρτώνται από αυτό.



Η Οδηγία καθιερώνει ως μοντέλο διαχείρισης των υδατικών πόρων, την ολοκληρωμένη διαχείριση σε επίπεδο λεκάνης απορροής ποταμού. Για κάθε περιοχή λεκάνης απορροής ποταμού καθορίζει, μια σειρά από απαραίτητες ενέργειες που θα πρέπει να υλοποιηθούν εντός των καθορισμένων προθεσμιών, ώστε ο βασικός στόχος της Οδηγίας που είναι η αποτροπή της περαιτέρω υποβάθμισης όλων των υδάτων και η επίτευξη μιας «καλής κατάστασης» να επιτευχθεί μέχρι το 2015. Ωστόσο για συγκεκριμένα υδατικά συστήματα, εφόσον πληρούνται ορισμένες προϋποθέσεις, η Οδηγία προβλέπει παράταση της προθεσμίας αυτής ή και επιδίωξη περιβαλλοντικών στόχων λιγότερο αυστηρών από αυτούς που απαιτούνται κανονικά. Όσον αφορά τα επιφανειακά νερά «καλή κατάσταση» θεωρείται η «καλή οικολογική» και η «καλή χημική κατάσταση» ενώ όσον αφορά τα υπόγεια νερά «καλή κατάσταση» θεωρείται η «καλή ποσοτική» και η «καλή χημική κατάσταση» (ΤΑΥ, 2010).

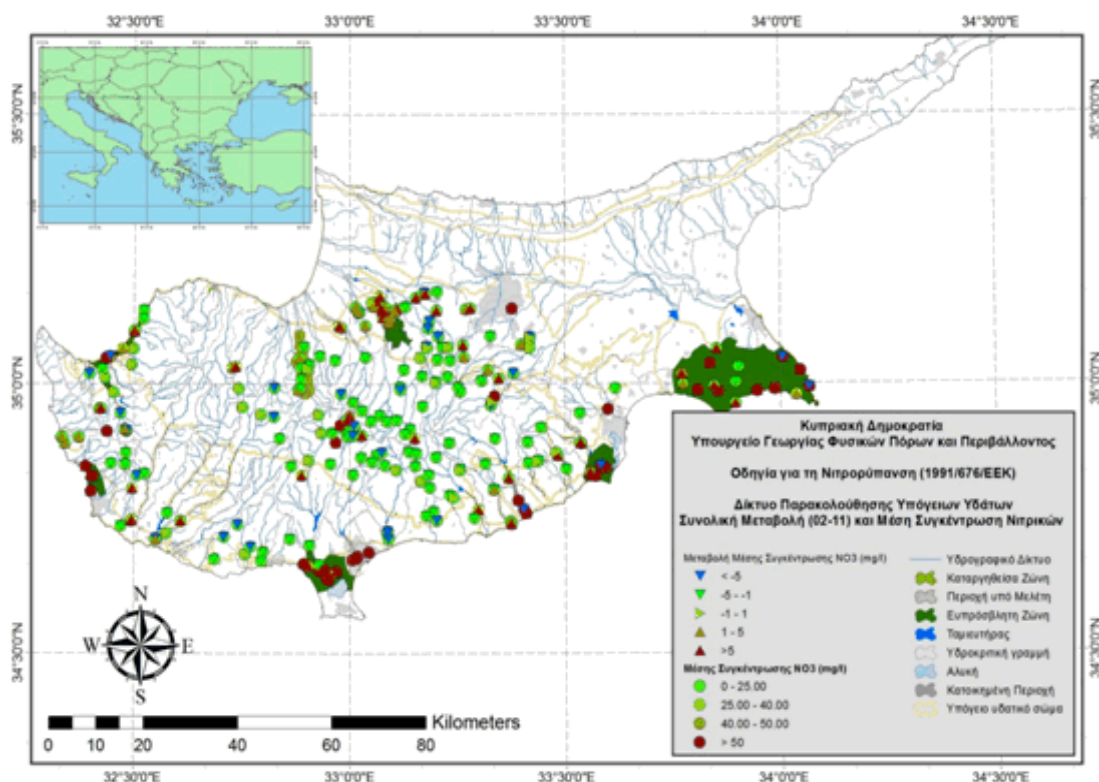
Η Οδηγία-Πλαίσιο για τα Νερά αποτελεί κατά γενική ομολογία μια τεράστια προσπάθεια, σε επίπεδο Ευρωπαϊκής Ένωσης, για την ορθή προστασία και χρήση όλων των υδάτων ώστε να εξασφαλιστεί η αειφόρος χρήση του νερού σε ολόκληρη την Ευρώπη. Η Ευρωπαϊκή Ένωση έθεσε τους στόχους και τις βάσεις με την Οδηγία και τώρα αναμένεται από κάθε κράτος μέλος να αξιολογήσει την υπάρχουσα κατάσταση και τις ιδιαιτερότητες των υδατικών του πόρων και να διαμορφώσει τη δική του εθνική στρατηγική. Οι επιπτώσεις από την εφαρμογή της Οδηγίας στην Κύπρο δεν μπορεί παρά να είναι θετικές. Η πλήρης εφαρμογή της Οδηγίας θα δημιουργήσει τις απαραίτητες συνθήκες για τη στήριξη μιας πολιτικής που θα οδηγήσει στην ικανοποιητική και αποτελεσματική προστασία καθώς και στην ορθολογική διαχείριση και αξιοποίηση των πολύτιμων υδατικών μας πόρων. Παρόλη τη σταδιακή εναρμόνιση της Κύπρου με την οδηγία Πλαίσιο όμως η κατάσταση στα υπόγεια υδατικά στρώματα της όπως θα δούμε είναι μάλλον απογοητευτική.

### **2.3.1 Υπόγεια υδατικά σώματα στην Κύπρο**

Οι υπόγειοι υδροφορείς της Κύπρου διαθέτουν ένα σημαντικό ποσοστό αποθεμάτων νερού. Οι περισσότεροι από αυτούς είναι υδροφορείς φρεατίου και βρίσκονται σε ποταμούς ή παράκτιες αποθέσεις. Οι υδροφορείς φρεατίου είναι οι πιο δυναμικοί και οι μεγαλύτεροι αφού τροφοδοτούνται κυρίως από τους ποταμούς και μέσω των

βροχοπτώσεων. Οι υπόγειοι υδροφορείς ανέρχονται στους 66 και έχουν ομαδοποιηθεί σε 22 συστήματα υπόγειων υδάτων σύμφωνα με τα εξής: τη λιθολογία, τα υδραυλικά χαρακτηριστικά τους, τις πιέσεις και τη χρήση του κάθε υδροφορέα.

Από το 2001, το Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης (ΤΓΕ) διατηρεί δίκτυο συνεχούς παρακολούθησης της στάθμης, της θερμοκρασίας και της ηλεκτρικής αγωγιμότητας των υπογείων υδάτων. Το δίκτυο αυτό καλύπτει τους πιο σημαντικούς υδροφορείς και αποτελείται από 89 σταθμούς, εκ των οποίων 81 είναι τηλεμετρικοί (σχήμα 4).



Σχήμα 4. Δίκτυο Παρακολούθησης Υπογείων Υδάτων ([www.moa.gov.cy](http://www.moa.gov.cy))

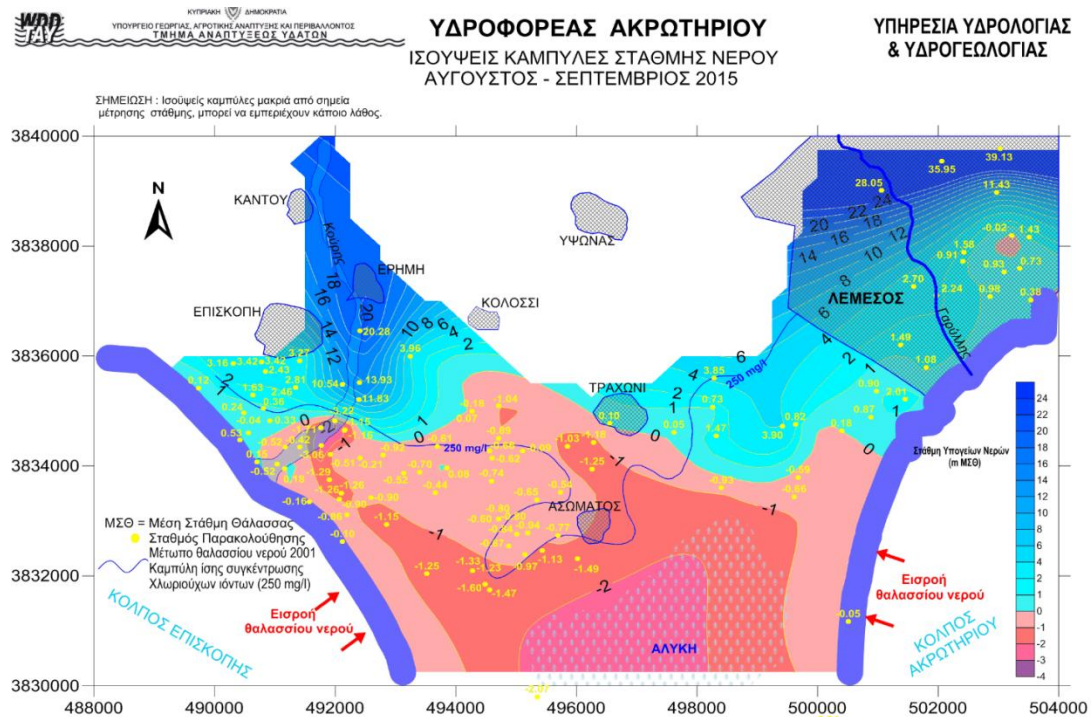
Στην Κύπρο τα περισσότερα συστήματα υπογείων υδάτων είναι φρεάτια με ημιπερατά τμήματα ή τμήματα υπό πίεση. Στη δυσκολότερη κατάσταση βρίσκονται οι γύφοι Μαρώνη οι οποίοι είναι οι μόνοι υδροφορείς που βρίσκονται εντελώς υπό πίεση. Επιπλέον, δέκα από τα συστήματα υπογείων υδάτων είναι άμεσα συνδεδεμένα με τη θάλασσα. Παράδειγμα, είναι το σύστημα υπογείων υδάτων της Λεμεσού. Τα πιο πάνω στοιχεία είναι στοιχεία του Τμήματος Αναπτύξεως Υδάτων. Το τμήμα διατηρεί επίσης δίκτυο παρακολούθησης της ποιότητας του νερού της βροχής αποτελούμενο από 10 σταθμούς. Το δίκτυο συλλέγει δείγματα για κάθε κύρια βροχόπτωση (μεγαλύτερη από 20 χιλ.). Οι παράμετροι που παρακολουθούνται σε



τακτά χρονικά διαστήματα είναι τα χλωριόντα, τα θειικά άλατα, η ηλεκτρική αγωγιμότητα και το pH. Τα δεδομένα που αναφέρονται πιο πάνω, αρχειοθετούνται στη βάση δεδομένων EnIS. Το Τμήμα Αναπτύξεως Υδάτων διεξάγει έλεγχο ποιότητας όλων των δεδομένων πριν να τα εισάγει στο EnIS. Αυτά τα δεδομένα χρησιμοποιούνται για έρευνα, αξιοποίηση και διαχείριση των υπόγειων υδάτων της Κύπρου. Χρησιμοποιούνται επίσης για την εφαρμογή της Εθνικής νομοθεσίας και των Ευρωπαϊκών Οδηγιών.

Οι πόροι των υπογείων υδάτων στη Κύπρο υφίστανται υπερεκμετάλλευσης κατά 40% περίπου της βιώσιμης εξόρυξης. Στη διάρκεια των τελευταίων 10-15 χρόνων πολλές από τις ισορροπίες των υδροφορέων έχουν ανατραπεί μόνιμα. Οι περισσότεροι υδροφορείς στο νησί είναι τύπου φρεατίου τα οποία αναπτύχθηκαν σε ποταμούς ή σε παραθαλάσσια αργιλώδη χώματα. Αυτοί είναι και οι μεγαλύτεροι και πιο δυναμικοί υδροφορείς οι οποίοι αναπληρώνονται κυρίως από τη ροή των ποταμών και από την βροχόπτωση. Στη διάρκεια της τελευταίας δεκαετίας σχεδόν σε όλους τους υδροφορείς, παρατηρούνται τάσεις εξάντλησης. Μερικοί από τους παραθαλάσσιους υδροφορείς παρατηρούνται να έχουν την στάθμη των υδάτων τους κάτω από το επίπεδο των νερών της θάλασσας. Αυτό είναι το αποτέλεσμα των συχνών και μεγάλης διάρκειας ανομβριών και ξηρασίας των περασμένων δεκαετιών. Οι ανομβρίες ελάττωσαν την άμεση και έμμεση ανατροφοδότηση των υπογείων υδάτων. Το πρόβλημα του μειωμένου εμπλουτισμού των υδροφορέων επιδεινώθηκε με την κατασκευή μεγάλου αριθμού φραγμάτων στους κυριότερους ποταμούς της χώρας, οι οποίοι προηγουμένως εμπλούτιζαν τους κατώτερους υδροφορείς. Η κατασκευή φραγμάτων είχε ως αποτέλεσμα μεγάλες μειώσεις και σε πολλές περιπτώσεις μέχρι και ολοκληρωτική εξάλειψη του φυσικού εμπλουτισμού των υδροφορέων κατάντη αυτών των φραγμάτων απλό τις κοίτες των ποταμών. Την ίδια στιγμή οι αγρότες στην προσπάθεια τους να διατηρήσουν την αγροτική τους παραγωγή στα ίδια επίπεδα, συνεχίζουν να εξάγουν τις ίδιες ποσότητες υπογείων υδάτων και σε ορισμένες περιπτώσεις αυξάνουν κατά πολύ την εξόρυξη. Όλες αυτές οι δυσμενής συνθήκες είχαν σαν αποτέλεσμα την εισχώρηση αλμυρού νερού και ως εκ τούτου την αλλοίωση της ποιότητας των παραθαλάσσιων υδροφορέων και της εξάντλησης των υδροφορέων στην ενδοχώρα.

Η υπεράντληση των παραθαλάσσιων υδροφορέων και η πτώση της στάθμης των υπογείων νερών κάτω από το κρίσιμο επίπεδο, οδήγησε στην εισχώρηση του θαλασσινού νερού, όπως φαίνεται ξεκάθαρα στο σχήμα 5, για τον Υδροφορέα του Ακρωτηρίου (Demetriou C., Georgiou A., 2004).



**Σχήμα 5.** Χάρτης ισοΨών καμπυλών της στάθμης του υπογείου νερού (ισοπιεζομετρικός χάρτης) παράκτιου υδροφορέα Ακρωτηρίου (Πηγή ΤΑΥ, 2014)

Για να αποκατασταθούν αυτοί οι υδροφορείς και να επανακτηθεί η καλή τους κατάσταση τόσο σε ποιότητα όσο και σε ποσότητα, χρειάζονται πολλά χρόνια προσεκτικής διαχείρισης. Στη διάρκεια αυτής της περιόδου θα αναμένεται η μείωση της άντλησης και ο εμπλουτισμός των υδροφορέων με καλής ποιότητας νερό για να εμπλουτιστεί και να απομακρυνθεί το αλμυρό νερό. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι για να καθαριστεί ένας υδροφορέας από το νερό της θάλασσας, χρειάζονται πολλά περισσότερα χρόνια από την αναπλήρωσή του. Υπάρχουν πολλά παραδείγματα υπεράντλησης και εισχώρησης θαλασσινού νερού στις παραθαλάσσιες περιοχές όπως στους υδροφορείς της Μόρφου, των Κοκκινοχωριών, στο Κίτι – Περβόλια και στο Ακρωτήρι.

## 2.3.2 Αξιολόγηση Συστημάτων Υπογείων Υδάτων της Κύπρου

Το Τμήμα Αναπτύξεως Υδάτων, μέσα από την αξιολόγηση των ποσοτικών και ποιοτικών δεδομένων παρακολούθησης, κατέληξε στον χαρακτηρισμό των Σωμάτων Υπόγειων Υδάτων (ΣΥΥ) που βρίσκονται εντός της ελεγχόμενης περιοχής και αναθεωρήθηκε η εικόνα που αφορούσε ανάλυση δεδομένων παρακολούθησης μέχρι το 2008 (Τμήμα Αναπτύξεως Υδάτων, 2014), όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.

Κωδικός Υπογείου Σώματος	Όνομασία Υπογείου Υδατικού Σώματος	Ποσοτική κατάσταση	Διείσδυση Θαλασσιού Μετώπου	Ποιοτική Κατάσταση	Κατάσταση
CY-1	Κοκκινοχώρια	Κακή Κατάσταση	Κακή Κατάσταση	Κακή Κατάσταση	Κακή Κατάσταση
CY-2	Αραδίππου	Καλή Κατάσταση	Καλή Κατάσταση	Καλή Κατάσταση	Καλή Κατάσταση
CY-3	Κίτι-Περβόλια	Κακή Κατάσταση	Κακή Κατάσταση	Κακή Κατάσταση	Κακή Κατάσταση
CY-4	Σοφτάδες-Βασιλικός	Κακή Κατάσταση	Κακή Κατάσταση	Κακή Κατάσταση	Κακή Κατάσταση
CY-5	Μαρώνι	Κακή Κατάσταση	Καλή Κατάσταση	Καλή Κατάσταση	Κακή Κατάσταση
CY-6	Μαρί-Καλό Χωριό	Κακή Κατάσταση	Κακή Κατάσταση	Καλή Κατάσταση	Κακή Κατάσταση
CY-7	Γερμασόγεια	Καλή Κατάσταση	Καλή Κατάσταση	Καλή Κατάσταση	Καλή Κατάσταση
CY-8	Λεμεσός	Κακή Κατάσταση	Κακή Κατάσταση	Κακή Κατάσταση	Κακή Κατάσταση
CY-9	Ακρωτήρι	Κακή Κατάσταση	Κακή Κατάσταση	Κακή Κατάσταση	Κακή Κατάσταση
CY-10	Παραμάλι-Αυδήμου	Κακή Κατάσταση	Καλή Κατάσταση	Καλή Κατάσταση	Κακή Κατάσταση
CY-11	Πάφος	Καλή Κατάσταση	Καλή Κατάσταση	Καλή Κατάσταση	Καλή Κατάσταση
CY-12	Λετύμβου-Γόλου	Κακή Κατάσταση	Κακή Κατάσταση	Κακή Κατάσταση	Κακή Κατάσταση
CY-13	Πέγεια	Κακή Κατάσταση	Καλή Κατάσταση	Καλή Κατάσταση	Κακή Κατάσταση
CY-14	Ανδρολικού	Καλή Κατάσταση	Καλή Κατάσταση	Καλή Κατάσταση	Καλή Κατάσταση
CY-15	Χρυσοχού-Γιαλιά	Κακή Κατάσταση	Κακή Κατάσταση	Κακή Κατάσταση	Κακή Κατάσταση
CY-16	Πύργος	Κακή Κατάσταση	Κακή Κατάσταση	Κακή Κατάσταση	Κακή Κατάσταση
CY-17	Κεντρική & Δυτική Μεσαορία	Κακή Κατάσταση	Κακή Κατάσταση	Καλή Κατάσταση	Κακή Κατάσταση
CY-18	Λεύκαρα-Πάχνα	Κακή Κατάσταση	Κακή Κατάσταση	Καλή Κατάσταση	Κακή Κατάσταση
CY-19	Τρόδος	Κακή Κατάσταση	Κακή Κατάσταση	Καλή Κατάσταση	Κακή Κατάσταση

	Κακή Κατάσταση
	Καλή Κατάσταση

**Σχήμα 6.** Κατάσταση ΣΥΥ (19) που βρίσκονται εντός της υπό αποτελεσματικό Κυβερνητικό έλεγχο περιοχής (ΤΑΥ, 2014)

Τα παραπάνω αποτελέσματα αφορούν την περίοδο 2008 μέχρι 2013. Η έκθεση επεκτείνεται με λεπτομερή ανάλυση της κατάστασης του κάθε Σώματος Υπόγειων Υδάτων. Τα αποτελέσματα της αξιολόγησης καταδεικνύουν την ποιοτική και

ποσοτική κατάσταση των υδροφορέων. Από την ανάλυση καταδεικνύεται ότι πολλά από τα ΣΥΥ βρίσκονται σε κακή κατάσταση τόσο ποσοτικά όσο και ποιοτικά. Αυτό παρατηρείται έντονα στην περιοχή των Κοκκινοχωρίων και οφείλεται στην υπεράντληση για αρδευτικούς σκοπούς, αφού στην περιοχή αναπτύσσεται η γεωργική παραγωγή. Η ποιότητα του νερού κάτω από αυτές τις καταστάσεις έχει αλλοιωθεί, ως συνέπεια της υφαλμύρισης. Σε επίσης κακή κατάσταση βρίσκεται το σύστημα στην περιοχή Σοφτάδες – Ζύγι όχι μόνο λόγω της υφαλμύρισης αλλά και λόγω της νιτρορύπανσης που οφείλεται κυρίως σε γεωργικές δραστηριότητες.

Το Σύστημα Υπόγειου Ύδατος (CY-9) στο Ακρωτήρι θα μας απασχολήσει στη συνέχεια λόγω του προγράμματος WASSER. Η ποσοτική κατάσταση του ΣΥΥ CY-9 παραμένει «κακή», με αρνητικές τιμές στάθμης σε κάποια σημεία, παρά την ανοδική τάση της στάθμης που παρατηρείται από το 2009 και που αποδίδεται κυρίως στις ψηλότερες βροχοπτώσεις. Η ποιοτική κατάσταση παραμένει και αυτή «κακή» με την υποβάθμιση να οφείλεται στην υφαλμύριση λόγω διείσδυσης θαλάσσιου νερού αλλά και στη νιτρορύπανση που προέρχεται από γεωργικές κυρίως δραστηριότητες.

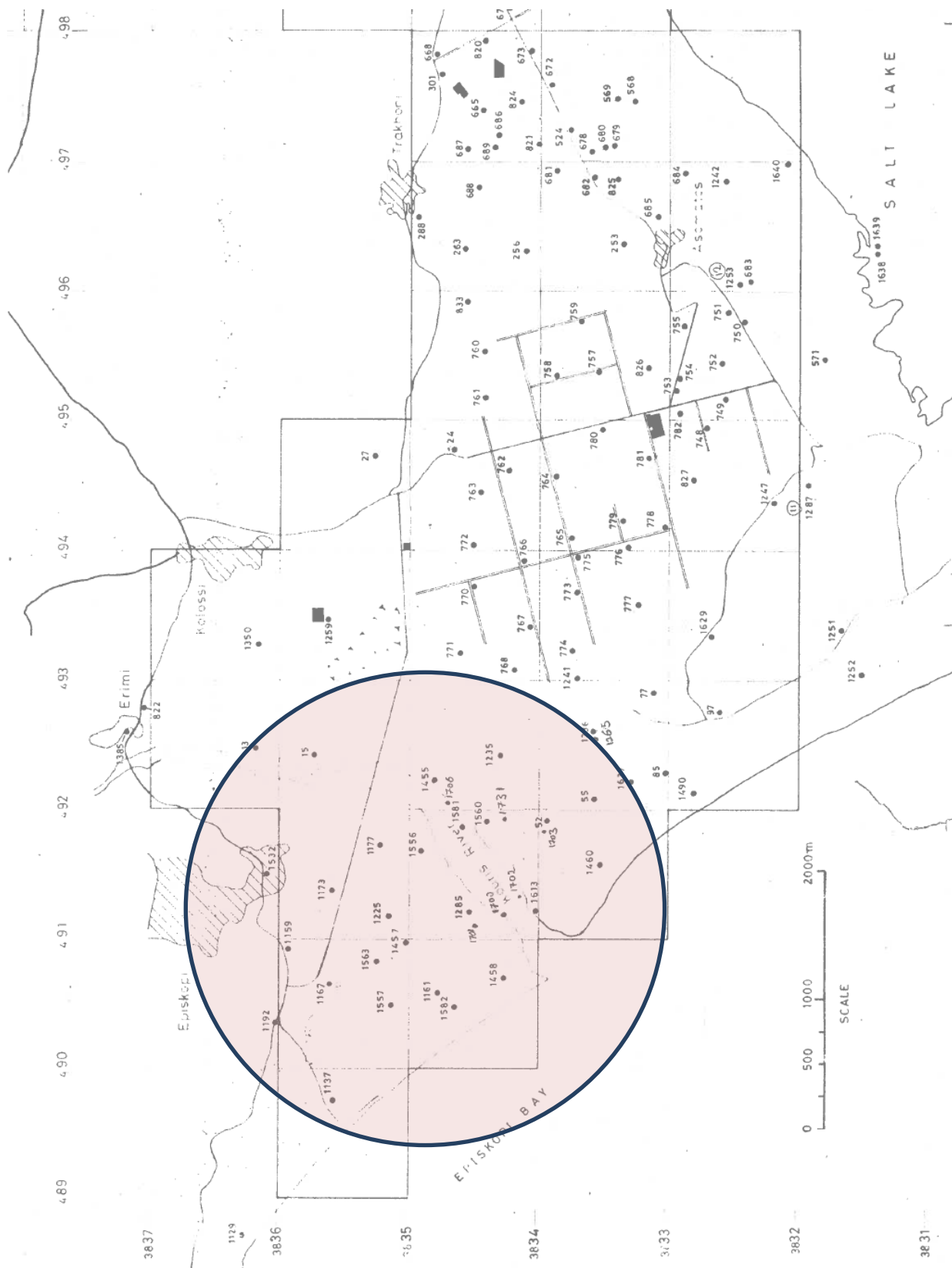
### 3. ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΥΦΑΛΜΥΡΙΝΣΗΣ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ ΤΗΣ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣ

Στο κεφάλαιο αυτό, μελετάται η εικόνα της υφαλμύρινης του υδροφορέα του Ακρωτηρίου στην περιοχή της Επισκοπής γύρω από τις εκβολές του Κούρη ποταμού. Η περιοχή μελέτης παρουσιάζεται στο σχήμα 7, όπου φαίνεται το τμήμα του συνολικού υδροφορέα που μελετήθηκε, και στο σχήμα 8 που εστιάζει στη συγκεκριμένη περιοχή και στις γεωτρήσεις που αναλύθηκαν. Τα στοιχεία για αυτή τη μελέτη προέρχονται από μετρήσεις σε γεωτρήσεις του Τμήματος Υδάτων που έγιναν τον Απρίλιο του 2016, στο τέλος της περιόδου των βροχοπτώσεων και όταν οι απολήψεις για άρδευση ήταν σχετικά μειωμένες.

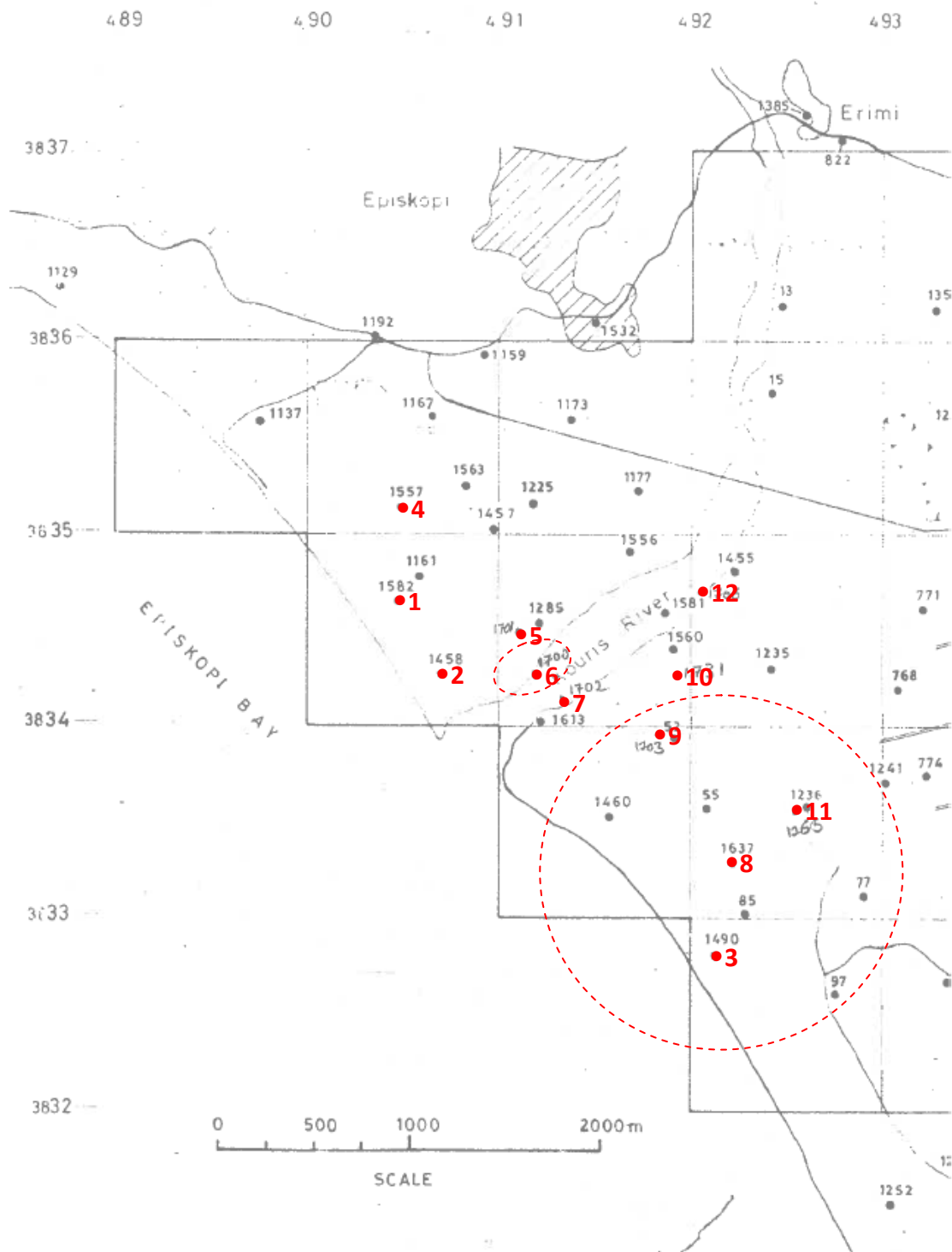
**Πίνακας I.** Στοιχεία των θέσεων των γεωτρήσεων και των σταθμών του νερού σε αυτές.

αριθμός	κωδικός	Απόσταση από τη θάλασσα (m)	υψόμετρο (m ASL)	Στάθμη (m ASL)
1	1582	225	4.03	0.53
2	1458	225	4.58	0.58
3	1490	150	2.87	<b>-0.93</b>
4	1557	500	4.08	0.8
5	1701	650	9	0.08
6	1700	625	7.45	<b>-0.1</b>
7	1702	450	8	0.44
8	1637	500	4.84	<b>-1.01</b>
9	1703	700	12.27	<b>-1.03</b>
10	1731	1050	18	0.68
11	1265	900	6.85	<b>-0.85</b>
12	1706	1400	24	3

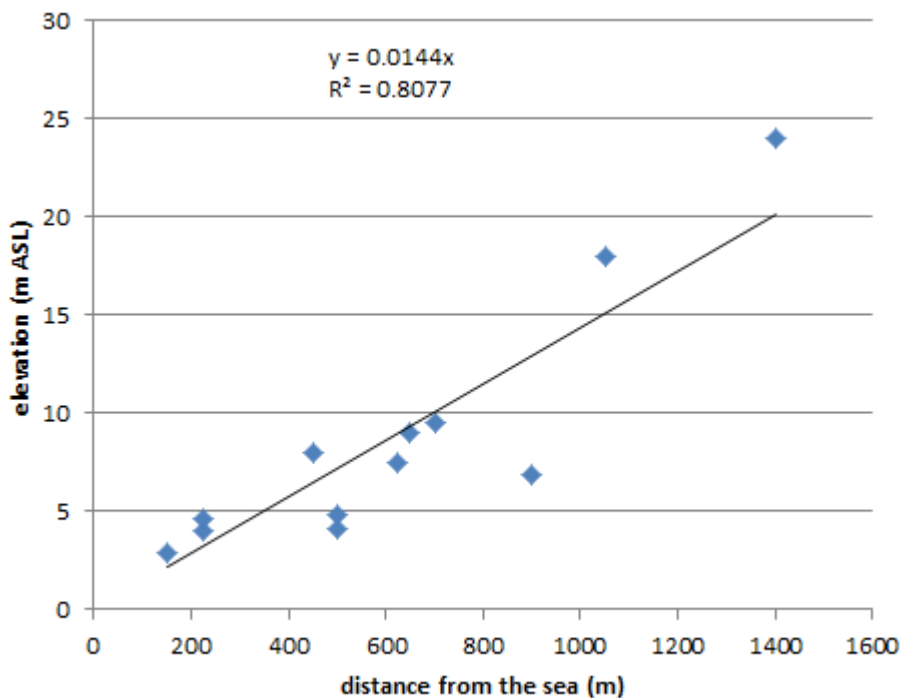
Στον Πίνακα I, παρατίθενται οι κωδικοί των 12 γεωτρήσεων που χρησιμοποιήθηκαν και οι αριθμοί που τους αποδόθηκαν καθώς και τα υψόμετρα και η απόσταση από την ακτογραμμή της κάθε γεώτρησης. Φαίνεται να υπάρχει μία ήπια ανοδική κλίση περίπου 1 με 2 cm ανά μέτρο, όπως κινούμαστε από τη θάλασσα προς τα ενδότερα, όπως παρουσιάζεται και στο σχήμα 9. Οι κλίσεις είναι λίγο μεγαλύτερες στην κοίτη του ποταμού Κούρη, ενώ ηπιότερες καθώς κινούμαστε προς το Ακρωτήρι. Οι στάθμες στους περισσότερους σταθμούς βρίσκονται σε υψόμετρα πάνω από το επίπεδο της θάλασσας που φτάνουν και τα 3 m στην περίπτωση της γεώτρησης 12 που



Σχήμα 7. Τοπογραφικός χάρτης με τις γεωτρήσεις στην ευρύτερη περιοχή του υδροφορέα του ακρωτηρίου και η περιοχή στην οποία εστίασαμε.



**Σχήμα 8.** Τοπογραφικός χάρτης με τις 12 γεωτρήσεις που αναλύθηκαν στην περιοχή της Επισκοπής στην έξοδο της κοίτης του Κούρη. Με κόκκινες διακεκομμένες

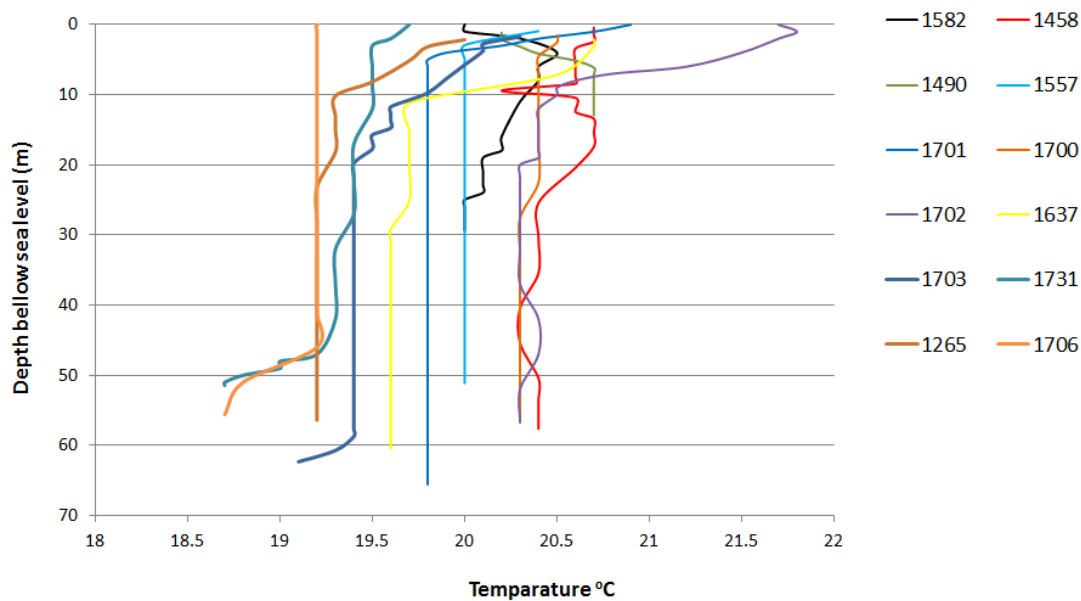


**Σχήμα 9.** Το υψόμετρο των γεωτρήσεων σε σχέση με την απόσταση από τη θάλασσα.

βρίσκεται σχετικά προς το εσωτερικό. Πάντως προς το κέντρο της περιοχής της μελέτης και συγκεκριμένα στις γεωτρήσεις 3, 6, 8, 9 και 11 οριοθετούνται οι περιοχές όπου η στάθμη βρίσκεται κάτω από το επίπεδο της θάλασσας πιθανώς λόγω απολήψεων.

Τα προφίλ της θερμοκρασίας του νερού με το βάθος κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας παρουσιάζονται στο σχήμα 10, όπου παρατηρείται μικρή διαφοροποίηση της τάξης του 1 °C μεταξύ των διαφορετικών γεωτρήσεων με θερμοκρασίες περίπου σταθερές μεταξύ 19 και 21 °C. Στις περισσότερες περιπτώσεις στα πρώτα 10 m υπάρχει μία σταδιακή αύξηση της θερμοκρασίας κατά περίπου 1 °C προς την επιφάνεια. Πολύ διαφορετική όμως παρουσιάζεται η εικόνα της αλατότητας οι οποία μετρήθηκε ως αγωγιμότητα σε  $\mu\text{S}$ . Να αναφέρουμε ότι το πόσιμο νερό έχει τιμές αγωγιμότητας κάτω από 1000  $\mu\text{S}$  με όριο περίπου τα 1500  $\mu\text{S}$ , το υφάλμυρο νερό αντιστοιχεί σε περίπου 10000 – 20000  $\mu\text{S}$  ενώ οι 50000  $\mu\text{S}$  αντιστοιχούν πρακτικά σε θαλασσινό νερό.

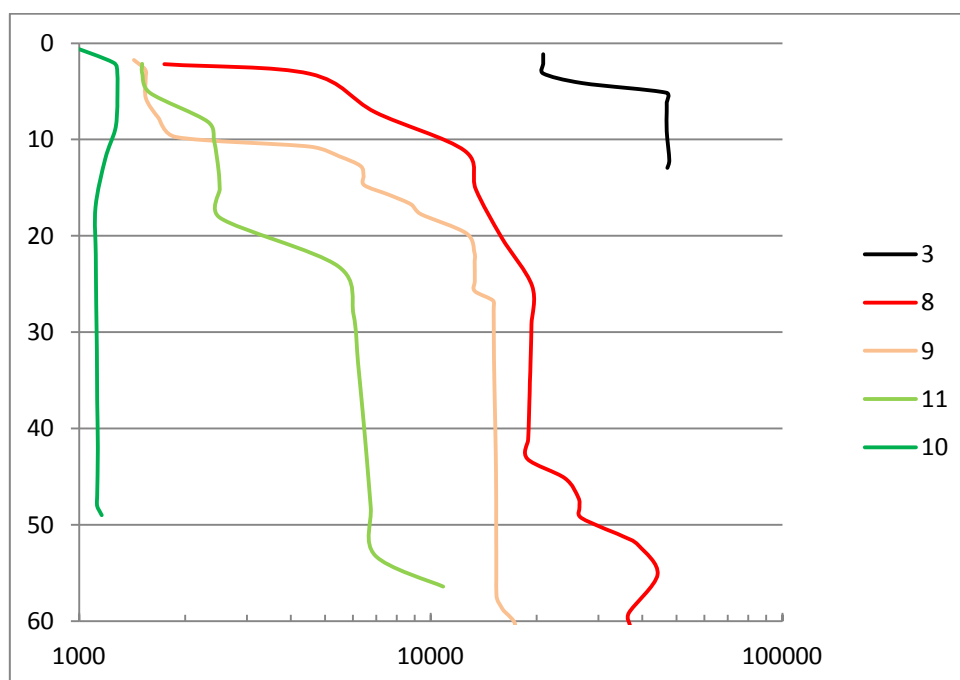




**Σχήμα 10.** Προφίλ της θερμοκρασίας του νερού συναρτήσει του βάθους κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας στις γεωτρήσεις που επελέγησαν.

Το σχήμα 11 παρουσιάζει τα επίπεδα αλατότητας του νερού στις γεωτρήσεις 3, 8, 9, 10 και 11 στην ανατολική περιοχή των εκβολών του Κούρη. Η ομάδα αυτή των γεωτρήσεων, χαρακτηρίζεται από το γεγονός ότι κυριαρχεί η υφαλμύριση ή ακόμα και η σχεδόν πλήρης αλμύριση σε κάποιο βάθος από την επιφάνεια του εδάφους. Η ομάδα αυτή παρουσιάζει μία σταδιακή αύξηση της αλμυρότητας προς τη θάλασσα με το μέτωπο της εισχώρησης του θαλασσινού νερού να φθίνει προς το εσωτερικό.. Στη γεώτρηση 3 που βρίσκεται σε ελάχιστη απόσταση 150 m από τη θάλασσα, η αλατότητα του νερού από τα 5 m και κάτω αντιστοιχεί σε σχεδόν θαλασσινό νερό και είναι υφάλμυρο προς την επιφάνεια λόγω της ροής φρέσκου νερού. Η κατάσταση βελτιώνεται προς την ενδοχώρα με τις γεωτρήσεις 8 και 9 να έχουν μέτριας συγκέντρωσης υφάλμυρο νερό στην επιφάνεια που μετά τα 10 έως 25 m σταδιακά γίνεται βαρύ υφάλμυρο. Στη γεώτρηση 11 που βρίσκεται σε περίπου 1Km από την ακτογραμμή η κατάσταση είναι βελτιωμένη με μέτρια υφαλμύριση που αυξάνεται με το βάθος σε ένα σταθερό υπόβαθρο περίπου 8000  $\mu\text{S}$ . Τελικά στην πιο απομακρυσμένη γεώτρηση με αριθμό 10, στα 1100 m από την ακτογραμμή και εγγύτερα στην κοίτη του Κούρη το νερό παρουσιάζεται σχετικά καλής ποιότητας με τιμές αγωγιμότητας κοντά στις αποδεκτές. Να σημειώσουμε σε αυτό το σημείο ότι στις περισσότερες από αυτές τις γεωτρήσεις η στάθμη του νερού είναι υποβιβασμένη κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας (με εξαίρεση την υγιή γεώτρηση 10) γεγονός

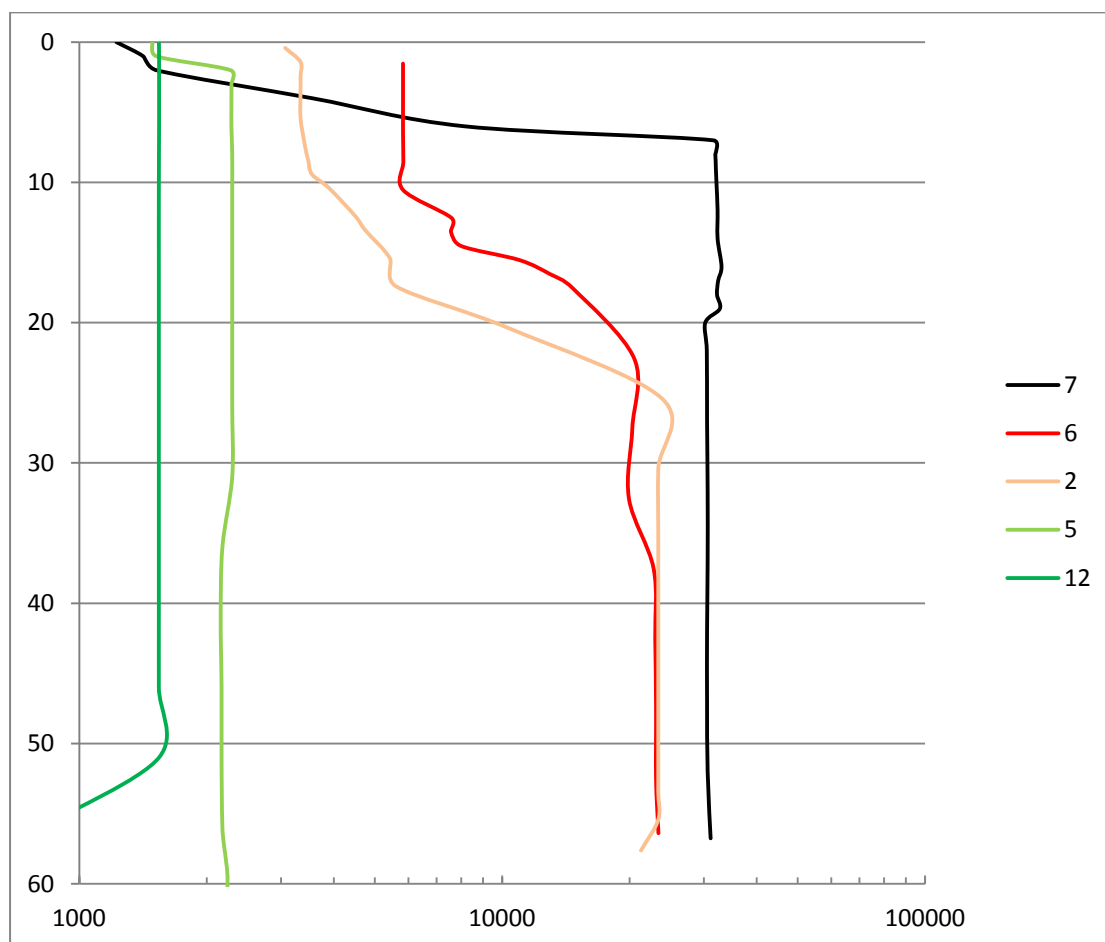
που μπορεί να δικαιολογήσει την παρουσία γεωργικών περιοχών πλησίον και η πιθανή αυξημένη απόληψη νερού από τον υδροφορέα.



**Σχήμα 11.** Προφίλ της αλατότητας του νερού σε  $\mu\text{S}$  συναρτήσει του βάθους κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας στις γεωτρήσεις 3, 8, 9, 11, 10.

Στο σχήμα 12 παρουσιάζονται τα επίπεδα αλατότητας του νερού στις γεωτρήσεις 2, 5, 6, 7 και 12 κατά μήκος της όχθης του ποταμού Κούρη. Σε αυτή την ομάδα των γεωτρήσεων, παρατηρούμε έντονη υφαλμύριση του υδροφορέα στις γεωτρήσεις 2, 6 και 7 μετά τα 10 – 20 m κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας. Η ένταση της υφαλμύρισης σε γενικές γραμμές ακολουθεί τη λογική της αύξησης καθώς πλησιάζουμε προς την ακτογραμμή. Η γεώτρηση 2 παρατηρούμε ότι είναι κοντά στη θάλασσα από το σχήμα 11. Για τις γεωτρήσεις 6 και 7 πιθανολογούμε ότι επειδή βρίσκονται ακριβώς στις εκβολές του Κούρη, το νερό της θάλασσας είναι σε κοντινότερη απόσταση από ότι μπορούμε να διακρίνουμε από τον χάρτη. Αντίθετη κατάσταση παρατηρούμε στη γεώτρηση 5 κάτι το οποίο δεν είναι λογικό εκ πρώτης όψεως αλλά μπορεί να εξηγηθεί συσχετιζόμενο με άλλους παράγοντες. Η αλμυρότητα του νερού στη γεώτρηση 5 είναι σχετικά χαμηλή, γεγονός που μπορεί να σηματοδοτεί μειωμένες απολήψεις από τη γύρω περιοχή, ροή φρέσκου νερού κατά τη διάρκεια του χειμώνα μέσω του Κούρη και ενδεχομένως υπέδαφος μειωμένης υδραυλικής αγωγιμότητας. Η πρόσφατη παροχή φρέσκου νερού από την επιφανειακή

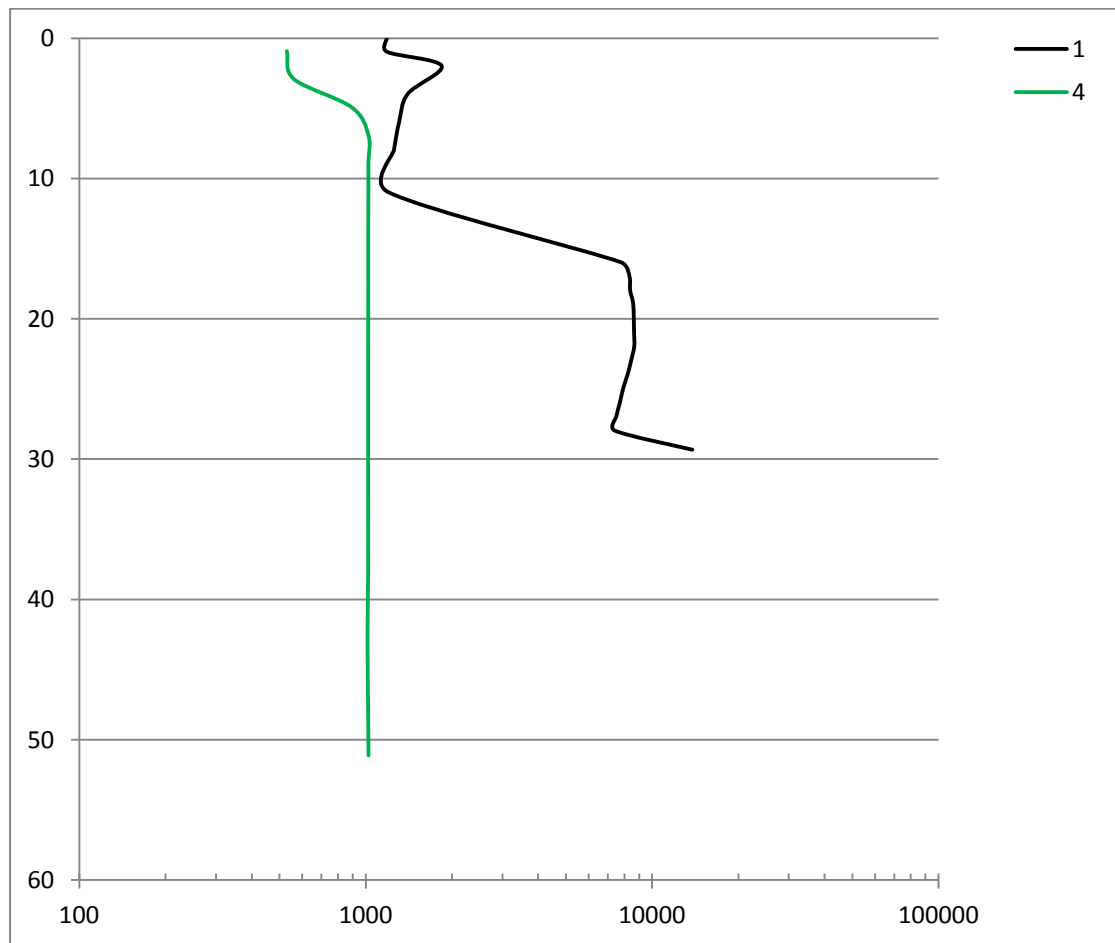
απορροή μπορεί να φανεί και από την εντονότερη μείωση της αλατότητας προς την επιφάνεια της γεώτρησης 7, όπου βαριά υφάλμυρο νερό κάτω από τα 10 m παρουσιάζεται νερό σχεδόν υγιές στα πρώτα 2 – 3 μέτρα κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας. Τέλος, η γεώτρηση 12 παρουσιάζεται σχεδόν υγιής όντας σε σχετικά μεγαλύτερη απόσταση από την ακτογραμμή με το μέτωπο της υφαλμύρινσης να είναι εξασθενημένο.



**Σχήμα 12.** Προφίλ της αλατότητας του νερού σε  $\mu\text{S}$  συναρτήσει του βάθους κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας στις γεωτρήσεις 7, 6, 2, 5, 12.

Στο τελευταίο σχήμα 13 παρουσιάζεται το προφίλ της αλατότητας σε σχέση με τη στάθμη της θάλασσας στις γεωτρήσεις 1 και 4 στα δυτικά των εκβολών του Κούρη. Οι γεωτρήσεις αυτές βρίσκονται σε μια περιοχή διαφορετική από τις υπόλοιπες. Οι περιοχές αυτές χαρακτηρίζονται από μειωμένη γεωργική δραστηριότητα στην ευρύτερη περιοχή. Η γεώτρηση 4 που βρίσκεται σε απόσταση περίπου 500 m από την ακτογραμμή είναι ιδιαίτερα υγιής ενώ η γεώτρηση 1 που βρίσκεται σε απόσταση

μόλις 200m, από την ακτογραμμή παρουσιάζει υφαλμύριση μετά τα 10 – 15 m κάτω από τη στάθμη της θάλασσας.



**Σχήμα 13.** Προφίλ της αλατότητας του νερού συναρτήσει του βάθους κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας στις γεωτρήσεις που επελέγησαν (1, 4).

Και σε αυτή την περίπτωση ο επιφανειακός εμπλουτισμός από τη χειμερινή απορροή είναι εμφανής και η συνολική εικόνα των δύο γεωτρήσεων καλύτερη από τη γενική εικόνα των προηγούμενων περιπτώσεων.

## 4. ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ - WASSER

Υπολογίζεται ότι, τις προηγούμενες τρεις δεκαετίες, οι αντλήσεις νερού αυξήθηκαν 35 φορές ενώ ο παγκόσμιος πληθυσμός αυξήθηκε οχτώ φορές. Οι αυξημένες πιέσεις στα αποθέματα νερού ήταν αποτέλεσμα των προσδοκιών ενός αυξανόμενου πληθυσμού για υψηλότερο βιοτικό επίπεδο ειδικά στις ανεπτυγμένες χώρες. Αυτές οι πιέσεις είναι συνήθως πιο έντονες στις παραθαλάσσιες περιοχές, όπου ο αριθμός του πληθυσμού είναι μεγαλύτερος και οι οικονομικές δραστηριότητες εντονότερες. Φυσικά όμως, το κλίμα που επικρατεί, η γεωλογία, το χώμα και οι υδρολογικές συνθήκες διαφοροποιούν τα προβλήματα στους υδάτινους πόρους. Στην Ευρώπη, οι ελλείψεις νερού εντάθηκαν στις νότιες περιοχές και ειδικότερα στο άκρο της Μεσογείου και στα νησιά. Οι αιτίες μπορούν να βρεθούν εάν συνυπολογίσουμε τις αιτίες από την αύξηση του πληθυσμού, την διεύρυνση της οικονομίας και το υψηλότερο βιοτικό επίπεδο όπου η ζήτηση αύξησε την παροχή νερού. Πρέπει επίσης να συνυπολογίσουμε τον περιορισμό ή την εξάντληση υδάτινων πόρων και την χειροτέρευση της ποιότητας.

Οι πιέσεις των υδάτων δεν συμβαίνουν μόνο στη διάρκεια κύκλων ξηρασίας, αλλά επίσης τακτικά όπου ο τουρισμός είναι αυξημένος. Οι τουρίστες επισκέπτονται τις μεσογειακές περιοχές κατά προτίμηση το καλοκαίρι, προκαλώντας πολλαπλάσια αύξηση στον πληθυσμό και καταναλώνοντας σχεδόν διπλάσια ποσότητα νερού από τον τοπικό πληθυσμό. Επιπρόσθετα, οι ήπιες θερμοκρασίες και το καλό έδαφος των μεσογειακών περιοχών οδήγησε στην εντατικοποίηση της αρδευτικής γεωργίας, με την μεγαλύτερη ζήτηση σε νερό να καταγράφεται την ξηρή περίοδο Μαΐου με Σεπτέμβρη όπου καταγράφεται μόλις το 10 % της μέσης χρονιαίας βροχόπτωσης. Οι υδάτινοι πόροι του νησιού πιέζονται ακόμα περισσότερο από το γεγονός ότι η γεωγραφική απομόνωση του νησιού απαγορεύει επιλογές όπως μεταφορά νερού από άλλες χώρες απευθείας, εκτός μέσω της ακριβής λύσης της μεταφοράς νερού με δεξαμενόπλοια (Koussis et al. 2002).

Με τους πόρους που προέρχονται από την βροχή να είναι περίπου σταθεροί, θα πρέπει να εξασφαλίσουμε εναλλακτικές πηγές νερού για να ικανοποιούν τις ανάγκες. Δύο ενδεχομένως κοστοβόρες πηγές νερού είναι (WorldBank1995): (1) η αφαλάτωση θαλασσινού νερού και (2) η επεξεργασία υγρών αποβλήτων που μπορούν να ανακυκλωθούν έτσι ώστε να εξυπηρετούν συγκεκριμένες ανάγκες. Αυτές οι

εναλλακτικές πηγές μπορούν να συνδυαστούν με ένα σχέδιο για τη διαχείριση των υδάτινων πόρων στις παραθαλάσσιες περιοχές όπου η έντονη εκμετάλλευση των υδροφορέων οδηγεί σε εισχώρηση των θαλάσσιων νερών. Η πιθανότητα να χρησιμοποιηθούν τα επεξεργασμένα απόβλητα για εμπλουτισμό των υδρολογικών αποθεμάτων και την προστασία των υδροφορέων από εισχώρηση νερών της θάλασσας, έχει αναγνωριστεί. Δηλαδή ο φυσικός εμπλουτισμός για την δημιουργία ενός υδραυλικού εμπόδιου για την προέλαση του αλμυρού νερού της θάλασσας χρησιμοποιείται ήδη. Για παράδειγμα, στην Ολλανδία ο εμπλουτισμός γίνεται με επεξεργασμένα επιφανειακά ύδατα, στο Ισραήλ με επεξεργασμένα υγρά απόβλητα και στην Κύπρο και στην Καλιφόρνια με συνδυασμό γλυκού νερού με επεξεργασμένα υγρά απόβλητα (Koussis et al. 2002).. Η αφαλάτωση των υφάλμυρων νερών απαιτεί σχεδόν την μισή ενέργεια από ότι η αφαλάτωση αλμυρού νερού της θάλασσας και έχει οικονομικά οφέλη (Georgoroulou et al. 2001).

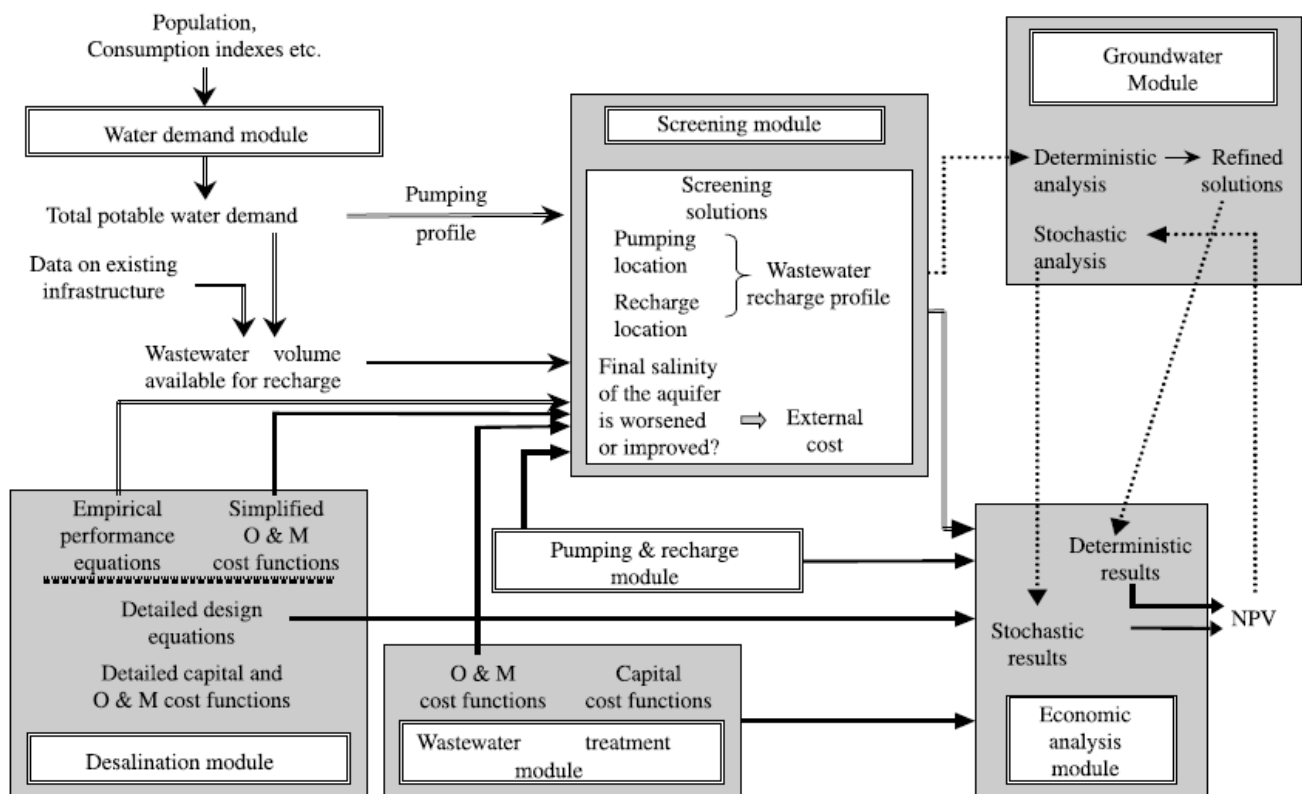
Αυτές οι συνθήκες ανοίγουν ευκαιρίες για αποδοτική διαχείριση των πιεζόμενων πόρων των παραθαλάσσιων υδροφορέων. Αυτό θα επιτευχθεί με την ενίσχυση της υδρολογικής ισορροπίας μέσω του εμπλουτισμού των υδροφορέων με επεξεργασμένα υγρά απόβλητα και τον περιορισμό της εισχώρησης θαλάσσιου νερού το οποίο θα μειώσει και το κόστος της οποιασ αφαλάτωσης των υπογείων υδάτων.

Για να διευκολυνθεί η εκτίμηση των επιλογών διαχείρισης, αναπτύχθηκε ένα εργαλείο λήψης απόφασης στο σχέδιο WASSER. Το εργαλείο αυτό βοηθά στη λήψη αποφάσεων σε σχέση με τη χρησιμοποίηση της αφαλάτωσης των υπόγειων υδάτων και της επαναχρησιμοποίησης υγρών αποβλήτων στα αποθέματα νερού περιοχών που υφίστανται εποχιακές πιέσεις. Μέσω αυτού του εργαλείου αξιολογούνται αντικειμενικά οι εναλλακτικές λύσεις διαμέσου ενός μοντέλου που καλύπτει τη φυσική, την μηχανική και την οικονομία των φυσικών και μηχανικών υποσυστημάτων. Το φυσικό υποσύστημα περιλαμβάνει την αφαλάτωση, την επεξεργασία υγρών αποβλήτων και των υποδομών για άντληση και αποθήκευση. Το εργαλείο απόφασης περιλαμβάνει εφαρμογή για την βελτιστοποίηση της προβολής των εναλλακτικών σεναρίων για εμπλουτισμό ή εξαγωγή όπως επίσης περιλαμβάνει και ένα πακέτο για εις βάθος αξιολόγηση των πιο υποσχόμενων σεναρίων, βασισμένο σε οικονομικά και περιβαλλοντικά κριτήρια.

## 4.1 Το πρόγραμμα WASSER - Αξιοποίηση λυμάτων για εφαρμογές σε ημιάνυδρες περιοχές

Στο πρόγραμμα WASSER αξιολογήθηκαν και εκτιμήθηκαν η αποτελεσματικότητα και το κόστος διαφόρων διαδικασιών και λειτουργιών επεξεργασίας υγρών αποβλήτων οι οποίες είναι κατάλληλες για διάφορες χρήσεις αποκατάστασης του νερού σε περιοχές που υφίστανται εποχιακές πιέσεις. Τα δεδομένα που πάρθηκαν είναι για χρήση σε Μεσογειακές περιοχές και νησιά.

Γενικά, στο πρόγραμμα WASSER έχει αξιολογηθεί η αποτελεσματικότητα και το κόστος των στρατηγικών επεξεργασίας λυμάτων οι οποίες είναι κατάλληλες για διάφορες χρήσεις επαναχρησιμοποιημένου νερού, συμπεριλαμβανομένης της άρδευσης, την ανατροφοδότηση του υδροφορέα μέσω διήθησης και με άμεση έκχυση, σε περιόδους πίεσης των υδάτων. Οι επιλογές επεξεργασίας λυμάτων που μελετήθηκαν είναι αποδεκτές για ημιάνυδρες περιοχές στις ακτές της Μεσογείου και για νησιά με αυξημένη ζήτηση νερού κυρίως λόγω έντονου εποχιακού τουρισμού και τη γεωργίας. Η διαδικασία λήψης αποφάσεων και ο καταρτισμός κατάλληλων κριτηρίων για τα λύματα στις περιοχές με μεγάλο παροδικό πληθυσμό και εποχιακά ακραίες συνθήκες νερού (ταχύτητα ροής, η σκληρότητα των λυμάτων και η τοξικότητα), ο προορισμός του επεξεργασμένου νερού, με τα αντίστοιχα πρότυπα εκκένωσης και τις σχετικές οικονομικές συνθήκες, έχουν ληφθεί υπόψη για τον προσδιορισμό των εγκαταστάσεων της επεξεργασίας λυμάτων. Έχει προταθεί μέσω αυτού του προγράμματος, ένα σύνολο κόστους για τις επενδύσεις, τη λειτουργία και τη συντήρηση, με βάση τον τεχνικό σχεδιασμό και την εκτίμηση του κόστους των μονάδων διεργασιών και λειτουργιών των υπό μελέτη εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων (Koussis et al. 2005).



**Σχήμα 14.** Διαδικασία βελτιστοποίησης που προτάθηκε στο WASSER: έλεγχος και τελικό στάδιο σχεδιασμού (Πηγή: Koussis et al. 2005)

Πιο συγκεκριμένα, διερευνήθηκε η γενική μεθοδολογία για μια εντατική ανάπτυξη των παράκτιων υδροφορέων, μέσω της εφαρμογής της στη διαχείριση του υδροφορέα Ακρωτηρίου στην Κύπρο. Η περιοχή Ζακακίου η οποία είναι μέρος του υδροφορέα Ακρωτηρίου, διαχειρίζεται έτσι ώστε να καλύπτει μια σταθερή ετήσια ζήτηση γεωργικού νερού που θα πρέπει να αναπληρώνεται, καθώς και να καλύπτει ένα μέρος της ζήτησης του νερού της Λεμεσού, το οποίο θα διαφέρει ανάλογα με τα διαθέσιμα επιφανειακά ύδατα. Τα λύματα που θα προέρχονται από την μονάδα επεξεργασίας λυμάτων Λεμεσού θα εγχέονται στον υδροφορέα για να εξουδετερώσουν την εισβολή θαλασσινού νερού η οποία προέρχεται ως αποτέλεσμα της αυξημένης άντλησης. Οι θέσεις των φρεατίων άντλησης και έγχυσης βελτιστοποιούνται με βάση το ελάχιστο κόστος, με την προϋπόθεση να καλυφθεί η ζήτηση. Η στρατηγική αυτή θα ελέγχει τη διείσδυση του νερού της θάλασσας τόσο αποτελεσματικά, ώστε αφάλατωση υφάλμυρου νερού θα απαιτείται μόνο για μικρές ποσότητες ελαφρώς υφάλμυρων υπόγειων υδάτων για σύντομα χρονικά διαστήματα,



την ίδια στιγμή που 2.3 m<sup>3</sup> υπόγειων υδάτων θα παράγονται για κάθε 1 m<sup>3</sup> νερού από έκχυση επεξεργασμένων λυμάτων. Το κόστος για περίοδο 20 ετών λειτουργίας (από το 2000 μέχρι το 2020) θα είναι 40 εκατομμύρια ευρώ και το κόστος παραγωγής ανά μονάδα πόσιμου νερού θα είναι κάτω από 0.2 € / m<sup>3</sup>. Η σύγκριση μεταξύ των πραγματικών δεδομένων και της θεωρητικής ανάλυσης της δυναμικής των υπόγειων υδάτων, υποδεικνύει την επίσημη ανάλυση ως συντηρητική, δηλαδή αποδίδεται υψηλότερη αλατότητα των υπογείων υδάτων στο πηγάδι. Η περιπτώσιολογική μελέτη στο Ακρωτήρι δείχνει ότι το προτεινόμενο σύστημα διαχείρισης του υδροφορέα δίνει λύσεις που είναι προτιμότερες από τις ευρέως διαδεδομένες λύσεις αφαλάτωσης θαλασσινού νερού, λαμβάνοντας φυσικά υπόψη τα έσοδα από τη χρήση των επεξεργασμένων λυμάτων για άρδευση.

Όπως αναφέρθηκε, το πρόγραμμα WASSER ερεύνησε την εφαρμογή μιας γενικής μεθοδολογίας για μια εντατική βιώσιμη ανάπτυξη και διαχείριση των παράκτιων υδροφορέων του Ακρωτηρίου στην Κύπρο. Ο υδροφορέας Ακρωτηρίου βρίσκεται στη νοτιότερη χερσόνησο της Κύπρου, δυτικά της πόλης της Λεμεσού (Εικόνα 4), και είναι σημαντικό για ολόκληρη την Κύπρο. Προμηθεύει την πόλη της Λεμεσού, πολλές μικρές κοινότητες και τις βάσεις του Ηνωμένου Βασιλείου με πόσιμο νερό, και επίσης παρέχει λίγο νερό για άρδευση. Για την κάλυψη της ζήτησης του νερού, ο υδροφορέας έχει αξιοποιηθεί σε μεγάλο βαθμό και συνέβη το φαινόμενο της υφαλμύρισης. Ο υδροφόρος ορίζοντας διαφοροποιείται ανάλογα με τα στοιχεία και τα δεδομένα της αλατότητας των υπόγειων υδάτων και χωρίζεται σε τρεις ζώνες:

**Δυτική ζώνη:** Στο τμήμα του υδροφορέα στα ανατολικά του ποταμού Κούρη, η αλατότητα φτάνει τα 10 000 parts per million (ppm) Total Dissolved Solids (TDS) 500 μέτρα από την ακτή και 2500 ppm TDS 2 χιλιόμετρα μέσα στην ενδοχώρα. Οι διατρήσεις σε αυτή την ζώνη παρείχαν νερό άρδευσης κατά το παρελθόν, αλλά τώρα έχουν εγκαταλειφθεί.

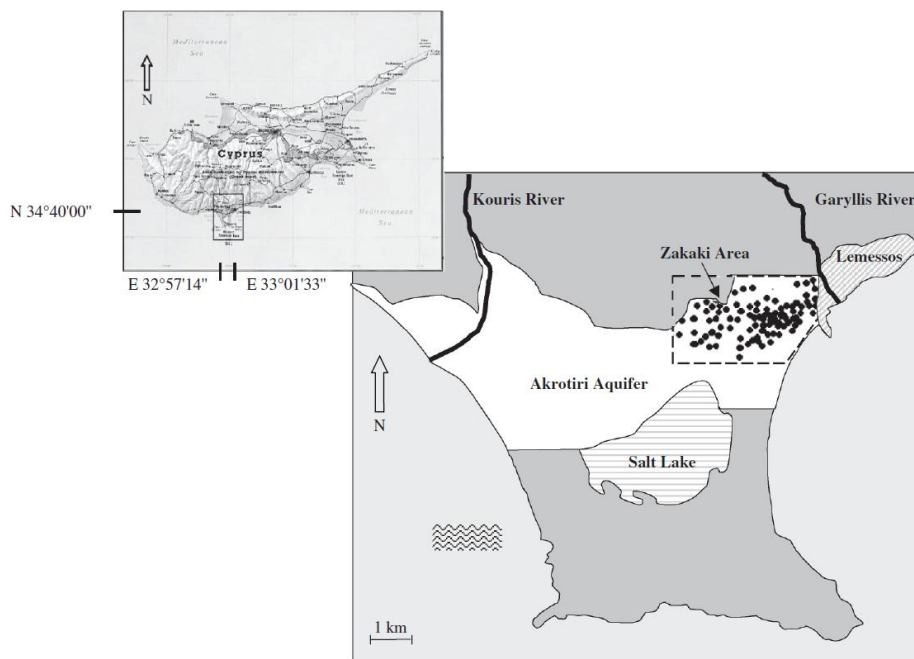
**Κεντρική ζώνη:** Αυτή η ζώνη παραμένει σχεδόν ανεπηρέαστη από τη διείσδυση των νερών της θάλασσας. Ο υδροφόρος ορίζοντας νότια του χωριού Κολοσσίου – όπου τροφοδοτείται με νερό η περιοχή των Βρετανικών βάσεων – δεν προβλέπεται να αντιμετωπίσει προβλήματα αλατότητας στο μέλλον, διότι ο πυκνός σχηματισμός του διαμορφώνει ένα εμπόδιο για την υφαλμύριση.

**Ανατολική ζώνη:** Ο υδροφορέας σε αυτή την περιοχή έχει χρησιμοποιηθεί ως πηγή νερού για την προμήθεια της Λεμεσού και για σκοπούς άρδευσης. Στις αρχές της δεκαετίας του 1990, η αλατότητα των παράκτιων διατρήσεων έφτανε τις αρκετές χιλιάδες TDS ppm. Από τότε οι αναλήψεις νερού μειώθηκαν και ο υδροφορέας έχει ανακτηθεί.

Η ύδρευση της Λεμεσού βασίζεται κυρίως στους δυο ταμιευτήρες των ποταμών Γαρούλλη και Γερμασόγειας, που βρίσκονται έξω από τη λεκάνη Ακρωτηρίου (Εικόνα 4). Η χωρητικότητα αυτών των ταμιευτήρων, αρκεί για την κάλυψη της μέγιστης ζήτησης νερού της Λεμεσού, που εκτιμάται σε 17106 m<sup>3</sup> / έτος το 2020 (Koussis, 2001), υπό μέσες υδρολογικές συνθήκες. Ωστόσο, κατά τη διάρκεια των ξηρών περιόδων, οι πηγές αυτές δεν μπορούν να ικανοποιούν τη ζήτηση νερού. Στο παρελθόν, τα υπόγεια ύδατα από το ανατολικό τμήμα του υδροφορέα δίπλα στην Λεμεσό (περιοχή Ζακακίου) αύξησαν την προσφορά νερού, αλλά η αλατότητα έφτασε σε πολλές χιλιάδες ppm TDS σε απόσταση 500 μέτρων από την ακτή στις αρχές της δεκαετίας του 1990. Μετά το 1997, οι αναλήψεις από αυτόν τον υδροφορέα μειώθηκαν κατά 25%, για να αντιμετωπιστεί η υποβάθμιση της ποιότητας των υπόγειων υδάτων, και η αλατότητα σταθεροποιήθηκε στα 1000 TDS ppm στις γεωτρήσεις σε απόσταση 1000 μέτρα από την ακτή (Σχήμα 15).

Η ανατολική ζώνη του υδροφορέα Ακρωτηρίου, κοντά στο Ζακάκι, είναι κατάλληλη για δοκιμή του προτεινόμενου σχεδιασμού διαχείρισης για τους εξής λόγους:

- (α) χρησιμεύει ως πηγή για ύδρευση και άρδευση
- (β) η γεωλογία της περιοχής είναι γνωστή
- (γ) η αλατότητα στις παράκτιες διατρήσεις είναι υψηλή (2000 ppm TDS), αλλά η κατάσταση είναι αναστρέψιμη σε μερικά χρόνια κάτω από συνθήκες φυσικής αναπλήρωσης και μειωμένης άντλησης και
- (δ) τα λύματα της μονάδας επεξεργασίας λυμάτων της Λεμεσού μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την τροφοδότηση του υδροφόρου ορίζοντα, μαζί με το πλεόνασμα νερού από τους επιφανειακούς ταμιευτήρες νερού.



**Σχήμα 15.** Χάρτης του υδροφορέα Ακρωτηρίου, τοποθεσίες διατρήσεων στην περιοχή Ζακακίου

Πιο κάτω, ερευνήθηκαν οι επιπτώσεις της εφαρμογής της μεθοδολογίας που περιγράφονται στο Koussis et al. (2010) στο πρόβλημα παροχής νερού.

## 4.2 Διαδικασία της βελτιστοποίησης στο WASSER

Στο πρόγραμμα WASSER έχει μελετηθεί το ακόλουθο πρόβλημα ύδρευσης και η στρατηγική λύση για την πόλη της Λεμεσού και για τη γεωργική έκταση της λεκάνης απορροής του Ακρωτηρίου:

- (A) Ο υδροφορέας να ικανοποιεί την πάγια ζήτηση νερού, ανεξαρτήτως της φυσικής αναπλήρωσης για κάθε έτος. Το αντίστοιχο ποσοστό άντλησης είναι η καταγεγραμμένη άντληση για το έτος 1999 και είναι περίπου  $1,5 \times 10^6 \text{ m}^3$  ανά έτος. Το ποσοστό αυτό αντιπροσωπεύει το ελάχιστο για τη δεκαετία του 1990 και καλύπτει κυρίως τις τοπικές ανάγκες άρδευσης και μερικές οικιακές και βιομηχανικές χρήσεις.
- (B) Να αυξηθεί η άντληση από τον υδροφορέα στην περιοχή Ζακακίου, για να καλύψει μέρος της ζήτησης νερού της Λεμεσού. Η επίτευξη αυτού του μέρους της ζήτησης εξαρτάται από τα διαθέσιμα επιφανειακά ύδατα και στην υδραυλική ικανότητα παραγωγικού μέρους του υδροφορέα (Σχήμα 15), υπό την προϋπόθεση ότι

η αλατότητα των αντλούμενων υπόγειων υδάτων να είναι μικρότερη από 10 000 ppm TDS στο τέλος της περιόδου του προγράμματος των 20 ετών.

(Γ) Η αφαλάτωση να εφαρμόζεται εάν η υφαλμύριση των αντλούμενων υπογείων υδάτων είναι:  $S \geq 1000$  ppm TDS.

(Δ) Ο υδροφορέας να ανατροφοδοτείται με επεξεργασμένα λύματα από την μονάδα επεξεργασίας λυμάτων Λεμεσού. Ο όγκος ανατροφοδότησης θα πρέπει να είναι ένα μέρος του συνόλου των λυμάτων ή ακόμα και το σύνολο των λυμάτων από την μονάδα επεξεργασίας.

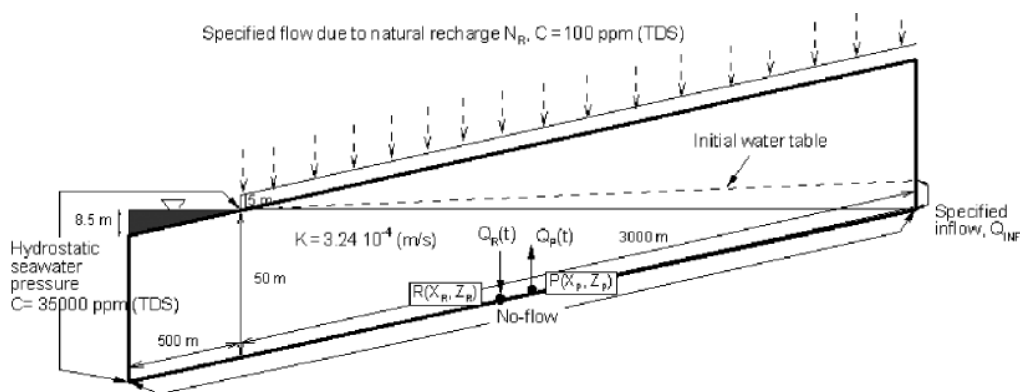
(Ε) Η άντληση από τον υδροφορέα να μειώνεται κατά τη διάρκεια της ετών με αυξημένη βροχόπτωση, δεδομένου ότι οι επιφανειακές πηγές θα παρέχουν επαρκή ποσότητα νερού (βλέπε Πίνακα II). Περικοπή στην άντληση, σε συνδυασμό με ανατροφοδότηση όταν χρειάζεται, μπορεί να οδηγήσει σε τουλάχιστον μερική αναπλήρωση του υδροφορέα.

**Πίνακας II.** Δεδομένα των επιφανειακών ταμιευτήρων που χρησιμοποιούνται για την παροχή νερού στη Λεμεσό

Reservoir	Storage capacity ( $10^6$ m <sup>3</sup> )	Catchment area (km <sup>2</sup> )	Annual inflow (1970-1992) ( $10^6$ m <sup>3</sup> )	% yearly inflow > reservoir capacity
Garyllis	3.864	70.6	0.33-7.15 (mean = 2.8)	35
Yermasogya	13.600	141	1.55-36.5 (mean = 15.1)	45

Ο προσδιορισμός των βέλτιστων από πλευράς κόστους θέσεων των πηγαδιών άντλησης και ανατροφοδότησης (βλ μοντέλο προφίλ υδροφόρου ορίζοντα, Σχήμα 15) και των προγραμμάτων τους, συνεπώς εξαρτάται από τα διαθέσιμα επιφανειακά ύδατα, τις ιδιότητες του υδροφορέα, τη διαθέσιμη ποσότητα επεξεργασμένων λυμάτων, τη βροχόπτωση και το περιορισμό της αλατότητας του νερού που αντλείται στο τέλος της περιόδου των 20 ετών.

Ο (πίνακας II) δίνει τα βασικά δεδομένα για τις δύο επιφανειακές πηγές του νερού. Οι ετήσιες εισροές δείχνουν ότι, κατά μέσο όρο, ο ταμιευτήρας του Γαρύλλη θα πρέπει να γεμίζει το 35% των ετών (περίπου κάθε τρίτο έτος) και ο ταμιευτήρας της Γερμασόγειας, το 45% των ετών (περίπου κάθε δύο χρόνια).



**Σχήμα 16.** Δισδιάστατο μοντέλο του υδροφορέα Ακρωτηρίου που χρησιμοποιείται στις προσομοιώσεις μεταβλητής πυκνότητας των υπόγειων υδάτων.  $P(X_P, Z_P)$  και  $R(x_R, Z_r)$  είναι οι διατρήσεις άντλησης επαναφόρτισης, το  $x$  είναι η οριζόντια απόσταση από την ακτογραμμή και  $z$  η κατακόρυφη απόσταση από το επίπεδο της θάλασσας.

Οι αποθηκευτικές ικανότητες ενός ταμιευτήρα σε ένα δεδομένο έτος, υπολογίζονται με την εφαρμογή ενός απλού κανόνα με βάση την ετήσια εισροή, αντί μιας λεπτομερούς υδρολογικής ανάλυσης με βάση τις κατανομές των μηνιαίων βροχοπτώσεων, της εξάτμισης, τη ροή και τη ζήτηση. Οι απώλειες από την εξάτμιση υπολογίζονται μέσω ενός συντελεστή απώλειας, χρησιμοποιώντας την ικανότητα αποθήκευσης του ταμιευτήρα ως οριακή τιμή: ο συντελεστής απώλειας του 20% σημαίνει ότι η δεξαμενή θα γεμίσει αν η ετήσια ροή υπερβαίνει τη χωρητικότητα της δεξαμενής κατά 20%. Εάν οι ετήσιες εισροές είναι κάτω από το όριο, το μέρος της ζήτησης του νερού που θα πρέπει να τροφοδοτείται από τον ταμιευτήρα υπολογίζεται από το λόγο της ετήσιας εισροής του ανά την οριακή τιμή του. Στις περιόδους ικανοποιητικής βροχόπτωσης, οι ανάγκες της Λεμεσού σε νερό θα καλυφθούν πλήρως από τα επιφανειακά ύδατα. Σε περιόδους ξηρασίας, το μέρος της ζήτησης νερού που δεν ικανοποιείται από τα επιφανειακά ύδατα, θα καλυφτεί από τον υδροφόρο ορίζοντα. Για να εφαρμοστεί αυτή η διαδικασία, θα πρέπει κανείς να συσχετίσει τις εισροές νερού στον ταμιευτήρα με τη χρονική σειρά βροχόπτωσης και να κάνει προβλέψεις για τις εισροές με βάση τις δημιουργηθείσες βροχοπτώσεις. Στο πρόγραμμα WASSER, υποθέτεται, για λόγους απλότητας, ότι οι χρονικές σειρές των βροχοπτώσεων και η εισροή υδάτων, για την περίοδο ενδιαφέροντος (2001-2020) είναι η ίδια με την χρονική σειρά της περιόδου 1970-1989. Αυτή η πληροφορία και η προβλεπόμενη ζήτηση νερού, επέτρεψε την εκτίμηση του νερού που πρέπει να

αντληθεί από τον υδροφόρο ορίζοντα (σε 11 από τα 20 έτη) όπως φαίνεται στο (Σχήμα 15). Αυτή η ποσότητα νερού είναι επιπρόσθετη του  $1,5 \times 10^6 \text{ m}^3 / \text{έτος}$  που προορίζεται για τις τοπικές εγχώριες, γεωργικές και βιομηχανικές ανάγκες. Η απαιτούμενη άντληση κυμαίνεται από  $4,6 \times 10^6$  έως  $12,2 \times 10^6 \text{ m}^3 / \text{έτος}$ , δηλαδή τρεις έως οκτώ φορές αύξηση από το  $1,5 \times 10^6 \text{ m}^3 / \text{έτος}$ . Η εφαρμογή της παραπάνω διαδικασίας δίνει μια εκτίμηση της παροχής νερού για την Λεμεσό κατά τα έτη 2001-2020, με βάση την προβλεπόμενη ζήτηση νερού για την περίοδο 2001-2020, τις ροές νερού κατά την 20ετή περίοδο 1973-1992, καθώς και βάση ενός συντελεστή απώλειας εξάτμισης 20%. Αυτή είναι μία από τις πολλές πιθανές εκτιμήσεις. Χρησιμοποιείται εδώ μόνο για να αποδείξει την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας διαχείρισης των υδάτων. Μια πρώτη εκτίμηση των λυμάτων που απαιτούνται για την ανατροφοδότηση, προέκυψε από προσομοιώσεις στον υδροφορέα, η οποία έδειξε ότι ο υδροφορέας δεν θα μπορούσε να προμηθεύσει το μερίδιο της προβλεπόμενης ζήτησης, χωρίς η αλατότητα του να υπερβαίνει τα 10 000 TDS ppm, εκτός εάν το σύνολο των λυμάτων από τον σταθμό επεξεργασίας διατεθεί για την ανατροφοδότηση.

Το πρόγραμμα WASSER κατέδειξε την εφαρμογή της μεθοδολογίας για την αιφόρο ανάπτυξη του υδροφορέα της χερσονήσου του Ακρωτηρίου στην Λεμεσό. Το συγκεκριμένο πρόγραμμα αφορούσε την περιοχή Ζακάκι, που βρίσκεται δυτικά της πόλης της Λεμεσού. Ο χρόνος του προγράμματος ήταν 20 έτη (2000-2020). Βάση του προγράμματος, ο υδροφορέας θα διαχειρίζεται ούτως ώστε να επιτρέπει μια ετήσια ζήτηση νερού  $1,5 \times 10^6 \text{ m}^3$  που πρέπει να ικανοποιεί τη γεωργική περιοχή Ζακακίου, καθώς και ένα μέρος της ζήτησης του νερού της Λεμεσού, το οποίο θα εξαρτάται ανάλογα με το διαθέσιμο επιφανειακό νερό. Η άντληση που θα αναλάβει να αυξήσει την ύδρευση της Λεμεσού, θα έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της υφαλμύρισης. Για αυτό τον λόγο, ο υδροφορέας θα εμπλουτίζεται με επεξεργασμένα λύματα από την μονάδα επεξεργασίας λυμάτων της Λεμεσού. Οι θέσεις των φρεατίων άντλησης και έγχυσης θα βελτιστοποιηθούν με βάση το ελάχιστο κόστος, και με την προϋπόθεση της κάλυψης της ζήτησης. Ως αποτέλεσμα αυτής της στρατηγικής, η υφαλμύριση θα ελέγχεται αποτελεσματικά, ούτως ώστε η αφαλάτωση μικρών όγκων υφάλμυρων υπόγειων υδάτων να απαιτείται πάνω όχι τόσο συχνά. Στις τέσσερις καλύτερες λύσεις που καθορίστηκαν στη φάση του ελέγχου, η άντληση προτείνεται στα 1400 m με έγχυση στα 1050 - 1250 m, ή άντληση στα 1300 m με έγχυση στα 1150 m. Σε όλες τις περιπτώσεις η αλατότητα θα υπερβεί τα 1000

TDS ppm μόνο τα τελευταία 1 ή 2 χρόνια του χρονικού ορίζοντα. Αυτές οι λύσεις θα πετύχουν την παραγωγή περίπου  $2.3 \text{ m}^3$  υπόγειου ύδατος για κάθε  $1 \text{ m}^3$  εγχεόμενων επεξεργασμένων λυμάτων, προκαλώντας μόνο μια πολύ μικρή υφαλμύριση του υδροφορέα. Το συνολικό κόστος για την περίοδο 20 ετών λειτουργίας του προγράμματος θα είναι περίπου € 40 εκατομμύρια, ενώ το συνολικό κόστος παραγωγής ανά μονάδα του πόσιμου νερού θα είναι κάτω από  $0.2 \text{ €} / \text{m}^3$ . Η συγκεκριμένη μελέτη έδειξε ότι το προτεινόμενο σύστημα γενικής διαχείρισης του υδροφορέα δίνει μια λύση που είναι προτιμότερη από την ευρέως προωθούμενη αφαλάτωση θαλασσινού νερού, λαμβάνοντας επίσης υπόψη τη χρήση των επεξεργασμένων λυμάτων στην άρδευση. Με λίγα λόγια, η μελέτη του προγράμματος WASSER στη Κύπρο, αποδεικνύει ότι η ολοκληρωμένη διαχείριση των υδάτινων πόρων είναι σαφώς μια ανώτερη λύση εν συγκρίσει μιας λύσης που βασίζονται στην τεχνολογία, όπως η αφαλάτωση θαλασσινού νερού, η οποία είναι ευάλωτη και εξαρτάται από τις μεγάλες διακυμάνσεις των τιμών της ενέργειας παγκοσμίως, με σαφώς ανοδική τάση (Koussis et al. 2010).

## 5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία παρουσιάστηκαν οι βασικές φυσικές έννοιες για τη λειτουργία των υπόγειων υδροφορέων. Κυρίως αναπτύχθηκε το πρόβλημα της υπαλμύρινσης λόγω υπεράντλησης, και έγινε ιδιαίτερη αναφορά στην κατάσταση που επικρατεί στην Κύπρο σε σχέση και με την εναρμόνιση με την Κοινοτική νομοθεσία για το νερό. Η Ευρωπαϊκή Ένωση έθεσε τους στόχους και τις βάσεις με την Οδηγία και τώρα αναμένεται από κάθε κράτος μέλος να αξιολογήσει την υπάρχουσα κατάσταση και τις ιδιαιτερότητες των υδατικών του πόρων και να διαμορφώσει τη δική του εθνική στρατηγική. Οι επιπτώσεις από την εφαρμογή της Οδηγίας στην Κύπρο δεν μπορεί παρά να είναι θετικές. Η πλήρης εφαρμογή της Οδηγίας θα δημιουργήσει τις απαραίτητες συνθήκες για τη στήριξη μιας πολιτικής που θα οδηγήσει στην ικανοποιητική και αποτελεσματική προστασία καθώς και στην ορθολογική διαχείριση και αξιοποίηση των πολύτιμων υδατικών μας πόρων. Παρόλη τη σταδιακή εναρμόνιση της Κύπρου με την οδηγία Πλαίσιο όμως η κατάσταση στα υπόγεια υδατικά στρώματα της όπως θα δούμε είναι μάλλον απογοητευτική. Συμπερασματικά, οι πόροι των υπογείων υδάτων στη Κύπρο υφίστανται υπερεκμετάλλευσης κατά 40% περίπου της βιώσιμης εξόρυξης. Στη διάρκεια των τελευταίων 10-15 χρόνων πολλές από τις ισορροπίες των υδροφορέων έχουν ανατραπεί μόνιμα. Οι περισσότεροι υδροφορείς στο νησί είναι τύπου φρεατίου τα οποία αναπτύχθηκαν σε ποταμούς ή σε παραθαλάσσια αργιλώδη χώματα. Αυτοί είναι και οι μεγαλύτεροι και πιο δυναμικοί υδροφορείς οι οποίοι αναπληρώνονται κυρίως από τη ροή των ποταμών και από την βροχόπτωση. Στη διάρκεια της τελευταίας δεκαετίας σχεδόν σε όλους τους υδροφορείς, παρατηρούνται τάσεις εξάντλησης. Μερικοί από τους παραθαλάσσιους υδροφορείς παρατηρούνται να έχουν την στάθμη των υδάτων τους κάτω από το επίπεδο των νερών της θάλασσας. Αυτό είναι το αποτέλεσμα των συχνών και μεγάλης διάρκειας ανομβριών και ξηρασίας των περασμένων δεκαετιών. Οι ανομβρίες ελάττωσαν την άμεση και έμμεση ανατροφοδότηση των υπογείων υδάτων. Το πρόβλημα του μειωμένου εμπλουτισμού των υδροφορέων επιδεινώθηκε με την κατασκευή μεγάλου αριθμού φραγμάτων στους κυριότερους ποταμούς της χώρας, οι οποίοι προηγουμένως εμπλούτιζαν τους κατώτερους υδροφορείς. Η κατασκευή φραγμάτων είχε ως αποτέλεσμα μεγάλες μειώσεις και σε πολλές περιπτώσεις μέχρι και ολοκληρωτική εξάλειψη του φυσικού



εμπλουτισμού των υδροφορέων κατάντη αυτών των φραγμάτων απλό τις κοίτες των ποταμών. Την ίδια στιγμή οι αγρότες στην προσπάθεια τους να διατηρήσουν την αγροτική τους παραγωγή στα ίδια επίπεδα, συνεχίζουν να εξάγουν τις ίδιες ποσότητες υπογείων υδάτων και σε ορισμένες περιπτώσεις αυξάνουν κατά πολύ την εξόρυξη. Όλες αυτές οι δυσμενείς συνθήκες είχαν σαν αποτέλεσμα την εισχώρηση αλμυρού νερού και ως εκ τούτου την αλλοίωση της ποιότητας των παραθαλάσσιων υδροφορέων και της εξάντλησης των υδροφορέων στην ενδοχώρα. Όπως δείξαμε και από την επεξεργασία πρόσφατων μετρήσεων η κατάσταση στον υδροφορέα του Ακρωτηρίου που είναι και ο μεγαλύτερος της Κύπρου είναι ιδιαίτερα επιβαρυνμένη με μεγάλο τμήμα του υδροφορέα να έχει ήδη υποστεί υφαλμύριση από την εισδοχή θαλασσινού νερού λόγω μειωμένων ροών και υπεράντλησης. Η κατάσταση είναι ιδιαίτερα δυσμενής καθώς πλησιάζουμε προς τη θάλασσα και κυρίως κοντά σε γεωργικές περιοχές.

Ένα πιλοτικό πρόγραμμα αντιμετώπισης συνολικά του προβλήματος της διαχείρισης των υδροφορέων είναι το πρόγραμμα WASSER που υπέδειξε την ορθή εφαρμογή μιας μεθοδολογίας για την αειφόρο ανάπτυξη του υδροφορέα της χερσονήσου του Ακρωτηρίου στην Λεμεσό. Το συγκεκριμένο πρόγραμμα αφορούσε την περιοχή Ζακάκι, που βρίσκεται δυτικά της πόλης της Λεμεσού. Ο χρόνος του προγράμματος προβλέπονταν σε 20 έτη (2000-2020). Βάση του προγράμματος, ο υδροφορέας θα διαχειρίζεται ούτως ώστε να επιτρέπει μια ετήσια ζήτηση νερού  $1.5 \times 10^6 \text{ m}^3$  που πρέπει να ικανοποιεί τη γεωργική περιοχή Ζακακίου, καθώς και ένα μέρος της ζήτησης του νερού της Λεμεσού, το οποίο θα εξαρτάται ανάλογα και με το διαθέσιμο επιφανειακό νερό. Η συγκεκριμένη μελέτη έδειξε ότι το προτεινόμενο σύστημα γενικής διαχείρισης του υδροφορέα δίνει μια λύση που είναι προτιμότερη από την ευρέως προωθούμενη αφαλάτωση θαλασσινού νερού, λαμβάνοντας επίσης υπόψη τη χρήση των επεξεργασμένων λυμάτων στην άρδευση. Με λίγα λόγια, η μελέτη του προγράμματος WASSER στη Κύπρο, αποδεικνύει ότι η ολοκληρωμένη διαχείριση των υδάτινων πόρων είναι σαφώς μια ανώτερη οικονομικά και περιβαλλοντικά λύση σε σχέση με την απλή αφαλάτωση θαλασσινού νερού, η οποία είναι ευάλωτη και εξαρτάται από τις μεγάλες διακυμάνσεις των τιμών της ενέργειας παγκοσμίως, με σαφώς ανοδική τάση.

## Βιβλιογραφία

Demetriou C., Georgiou A., 2004. (2004). Management of Groundwater Resources in Cyprus - harmonisation with the EU water framework directive. (1), 1.

Georgopoulou, E., Kotronarou, A., Koussis, A., Restrepo, P. J., Gomez-Gotor, A. & Rodriguez Jimenez, J. J. (2001) A methodology to investigate brackish groundwater desalination coupled with aquifer recharge by treated wastewater as an alternative strategy for water supply in Mediterranean areas. *Desalination Journal* 136, 307–315.

Ιακωβίδης, Α. (2007). Υπεράντληση υπόγειου νερού και διείσδυση θαλάσσιου νερού. *Οδηγία Πλαίσιο Περί Υδάτων (2000/60/ (2000/60/EK) & Δημόσια Διαβούλευση (Άρθρο 14.1.β)*, page 12.

Koussis, A. D. (ed.) (2001) WASSER: Utilisation of Groundwater Desalination and Wastewater Reuse in the Water Supply of Seasonally-Stressed Regions, Final Report, with Appendices, to the European Commission DGXII-D, Environment and Climate Programme, Contract no. ENV4-CT97-0459, National Observatory of Athens, Greece.

Koussis, A. D., Kotronarou, A., Destouni, G. & Prieto, C. (2002) Intensive groundwater development in coastal zones and small islands. In: Llamas, R. & Custodio, E. (eds) *Intensive Use of Groundwater: Challenges and Opportunities*, Balkema, The Netherlands, Chapter 6, pp. 133–155.

Koussis, A. D., E. Gonzalez-Serrano, J. Rodriguez-Mirasol, T. Cordero and J. J. Rodriguez. (2005). Cost of reclaimed municipal wastewater for applications in seasonally stressed semi-arid regions. *Journal of Water Supply: Research and Technology—AQUA*. (1), 1-3.

Koussis, A. D., Georgopoulou, E., Kotronarou, A., Lalas, D. P., Restrepo, P., Estouni, G., Prieto, C., Rodriguez, J. J., Rodriguez-Mirasol, J., Cordero, T. & Gomez-Gotor, A. (2010) Cost-efficient management of coastal aquifers via recharge with treated wastewater and desalination of brackish groundwater: general framework. *Hydrol. Sci. J.* 55(7), 1217–1223.

Κουτσογιάννης, Δ., και Θ. Ξανθόπουλος, *Τεχνική Υδρολογία*, Έκδοση 3“Εισαγωγή στην υπόγεια υδρολογία.” (n.d.). Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 1999.

K. Mazi, A.D. Koussis, P.J. Restrepo, D. Koutsoyiannis. (2004). *Journal of Hydrology. A groundwater-based, objective-heuristic parameter optimisation method for a precipitation-runoff model and its application to a semi-arid basin.* (1), p1, 2.

NSW Public Works, 2011, *Brackish groundwater: a viable community water supply option?*, Waterlines report, National Water Commission, Canberra

U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey, *Groundwater Depletion in the United States (1900-2008)*, USGS Scientific Investigations Report 2013-5079, Retrieved from: <http://water.usgs.gov/edu/qa-usage-gw.html>

WisegEEK. (2015). *What is Brackish Water?*. Available: <http://www.wisegEEK.org/what-is-brackish-water.htm>. Last accessed 22nd Dec 2015.

World Bank 1995. Middle East and North Africa environmental strategy towards sustainable development. Report No. 13601-MNA. Washington, D.C.

Τμήμα Αναπτύξεως Υδάτων, (2014) “*Ekthesi\_Epanaxetasis\_Epanax\_2014.pdf*.”

Τμήμα Αναπτύξεως Υδάτων (ΤΑΥ). (2010). *ΕΚΘΕΣΗ ΚΟΣΤΟΛΟΓΗΣΗΣ ΚΑΙ ΤΙΜΟΛΟΓΗΣΗΣ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ ΥΔΑΤΟΣ*. Available: [http://www.moa.gov.cy/moa/wdd/Wdd.nsf/all/82D260F5DEAC3827C2257A29002AED9F/\\$file/Enimerotiki\\_Timologisi.pdf?openelement](http://www.moa.gov.cy/moa/wdd/Wdd.nsf/all/82D260F5DEAC3827C2257A29002AED9F/$file/Enimerotiki_Timologisi.pdf?openelement). Last accessed 1st Sept 2016.