

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**"ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΥΦΑΛΜΥΡΙΝΣΗΣ ΚΑΙ Η ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΤΟΥ.
ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΥΦΑΛΜΥΡΙΝΣΗΣ ΠΑΡΑΚΤΙΩΝ ΥΔΡΟΦΟΡΕΩΝ ΣΤΗΝ
ΕΛΛΑΔΑ"**

ΠΑΠΠΑ ΑΛΕΞΑΝΔΡΑ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΚΑΡΑΤΖΑΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΕΞΕΤΑΣΗΣ

ΚΑΡΑΤΖΑΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

ΝΙΚΟΛΑΙΔΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

ΠΑΡΑΝΥΧΙΑΝΑΚΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

ΧΑΝΙΑ, ΙΟΥΝΙΟΣ 2016

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<u>ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ</u>	2
<u>ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ</u>	4
<u>1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ</u>	7
1.1 Γενικά	7
1.2 Σκοπός	9
1.3 Δομή	9
<u>2. ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΥΦΑΛΜΥΡΙΝΣΗΣ</u>	11
2.1 Γενικά	11
2.2 Σχέσεις γλυκού – αλμυρού νερού	14
2.3 Είδη υφαλμύρινης	17
2.4 Επιπτώσεις της υφαλμύρινης	18
2.5 Πολυπλοκότητα της υφαλμύρινης των παράκτιων υδροφορέων	19
2.6 Οι φυσικοχημικές διαδικασίες ρύπανσης - απορρύπανσης παράκτιων υδροφόρων από την υφαλμύρινη	19
<u>3. ΑΙΤΙΕΣ ΥΦΑΛΜΥΡΙΝΣΗΣ ΠΑΡΑΚΤΙΩΝ ΥΔΡΟΦΟΡΩΝ</u>	22
3.1 Γενικά	22
3.2 Φυσικά αίτια	22
3.2.1 Μείωση των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων που προκύπτει από την κλιματική αλλαγή	22
3.2.2 Άνοδος της στάθμης της θάλασσας	23
3.2.3 Γεωλογικά αίτια	24
3.3 Ανθρωπογενείς αιτίες	25
3.3.1 Υπεράντληση	25
3.3.2 Παράνομες γεωτρήσεις	26
3.3.3 Οικιστική ανάπτυξη	27
3.3.4 Εγγειοβελτιωτικά έργα και αποστράγγιση	27
<u>4. ΤΡΟΠΟΙ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΤΗΣ ΥΦΑΛΜΥΡΙΝΣΗΣ</u>	29
4.1 Γενικά	29
4.2 Φραγμοί άντλησης	30
4.3 Φραγμοί εμπλουτισμού γλυκού νερού	31
4.4 Τεχνητοί υπόγειοι φραγμοί	34
4.5 Βιολογικοί φραγμοί	36
4.6 Έλεγχος αντλήσεων	37

<u>4.7</u>	<u>Ανακατανομή αντλήσεων</u>	38
<u>4.8</u>	<u>Τροποποιημένα σχέδια αντλήσεων</u>	39
<u>4.9</u>	<u>Τεχνικές αφαλάτωσης</u>	40
<u>4.10</u>	<u>Άμεση διάθεση επιφανειακού νερού σε αντικατάσταση χρήσης του υπόγειου νερού</u>	41
<u>4.11</u>	<u>Τεχνητός εμπλουτισμός</u>	42
<u>4.11.1</u>	<u>Μέθοδος πλημμυρισμού (κατάκλυσης) επιφανειών</u>	43
<u>4.11.2</u>	<u>Μέθοδος λεκανών κατάκλυσης</u>	44
<u>4.11.3</u>	<u>Πλημμυρισμός ξηρών κοιτών ποταμών ή χειμάρρων</u>	44
<u>4.11.4</u>	<u>Τεχνητός εμπλουτισμός από τάφρους</u>	45
<u>5.</u>	<u>ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΥΦΑΛΜΥΡΙΝΣΗΣ ΠΑΡΑΚΤΙΩΝ ΥΔΡΟΦΟΡΕΩΝ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ</u>	47
<u>5.1</u>	<u>Γενικά</u>	47
<u>5.2</u>	<u>Παραδείγματα υφαλμύρινης παράκτιων υδροφορέων στην Ελλάδα</u>	48
<u>5.3</u>	<u>Υφαλμύρινη στην Μακεδονία και τη Θράκη</u>	52
<u>5.3.1</u>	<u>Πεδίου κόλπου Ορφανού Καβάλας</u>	53
<u>5.3.2</u>	<u>Δέλτα του ποταμού Νέστου</u>	55
<u>5.3.3</u>	<u>Δέλτα του ποταμού Έβρου</u>	56
<u>4.2.4</u>	<u>Νέα Κεσσάνη</u>	59
<u>4.2.5</u>	<u>Δέλτα του ποταμού Λισσού - Παράκτια περιοχή Νομού Ροδόπης</u>	59
<u>4.3</u>	<u>Υφαλμύρινη το Αργολικό πεδίο</u>	60
<u>4.4</u>	<u>Υφαλμύρινη στην Αχαΐα</u>	62
<u>4.5</u>	<u>Υφαλμύρινη στο Μαραθώνα</u>	64
<u>4.6</u>	<u>Υφαλμύρινη στην υπόλοιπη Ελλάδα</u>	66
<u>6.</u>	<u>ΠΟΛΙΤΙΚΕΣ ΚΑΙ ΠΡΑΚΤΙΚΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΤΗΣ ΥΦΑΛΜΥΡΙΝΣΗΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ</u>	68
<u>6.1</u>	<u>Γενικά</u>	68
<u>6.2</u>	<u>Πειραματικές μέθοδοι στη λεκάνη Ελευθέρης</u>	69
<u>6.3</u>	<u>Υδραυλικά έργα στη Αττική</u>	70
<u>6.4</u>	<u>Τεχνητός εμπλουτισμός στο Αργολικό πεδίο</u>	71
<u>6.5</u>	<u>Τεχνητός εμπλουτισμός στη Βιομηχανική Περιοχή του Ηρακλείου Κρήτης</u>	78
	<u>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ</u>	82
	<u>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</u>	86

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

<u>Σχήμα 1: Ζώνη διεπιφάνειας α) σε ελεύθερο και β) σε υπό πίεση υδροφόρο στρώμα (Σούλιος, 2004)</u>	12
<u>Σχήμα 2: Κώνος άντλησης γύρω από την γεώτρηση (Σούλιος, 2004)</u>	14
<u>Σχήμα 3: Δημιουργία υδραυλικής τάφρου με άντληση υφάλμυρου νερού η οποία εμποδίζει τη θαλάσσια διείσδυση (Καλλέργης, 2000)</u>	31
<u>Σχήμα 4: Δημιουργία υδραυλικού φραγμού με τεχνητό εμπλουτισμό για την πρόληψη αλμύρινης παράκτιου υδροφόρου (Καλλέργης, 2000)</u>	33
<u>Σχήμα 5: Αντιμετώπιση θαλάσσιας διείσδυσης με την κατασκευή στεγανού υπόγειου διαφράγματος, παράλληλο στη ακτή (Καλλέργης, 2000)</u>	35
<u>Σχήμα 6: Σχηματικό διάγραμμα ενός υπόγειου διαφράγματος για την παρεμπόδιση ανάμιξης γλυκού και αλμυρού νερού (Καλλέργης, 2000)</u>	36
<u>Σχήμα 7: Τεχνητός εμπλουτισμός με τη μέθοδο του πλημμυρισμού επιφανειών (Σούλιος, 2004)</u>	43
<u>Σχήμα 8: Τεχνητός εμπλουτισμός με κατάκλυση λεκανών (Σούλιος, 2004)</u>	44
<u>Σχήμα 9: Δίκτυο τάφρων (αποστραγγιστικών) στην περιοχή της Σοφιάδας που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τεχνητό εμπλουτισμό</u>	45
<u>Σχήμα 10: Η εξέλιξη του εμπλουτισμού από μία τάφρο (Σούλιος, 2004)</u>	46
<u>Σχήμα 11: Περιοχές της Ανατ. Μακεδονίας και Θράκης όπου παρατηρήθηκε το φαινόμενο της θαλάσσιας διείσδυσης (Πεταλάς κ.ά., 2002)</u>	53
<u>Σχήμα 12: Κατανομή του Cl⁻ (mg/l) στα υπόγεια νερά της περιοχής του Δήμου Ορφανού-Ν.Καβάλας (Πεταλάς κ.ά., 2002)</u>	54
<u>Σχήμα 13: Κατανομή του Cl⁻ (mg/l) στα υπόγεια νερά του Δέλτα του ποταμού Νέστου</u>	56
<u>Σχήμα 14: Κατανομή του Cl⁻ (mg/l) στα υπόγεια νερά του Δέλτα του ποταμού Έβρου</u>	58
<u>Σχήμα 15: Ισοχλώριες καμπύλες (ppm) για (α) την Άνοιξη του 1965, (β) την Άνοιξη του 1975, (γ) την Άνοιξη του 1990 και (δ) την Άνοιξη του 2000</u>	62
<u>Σχήμα 16: Χάρτης κατανομής χλωριόντων (mg/l) στην περιοχή της Αχαΐας</u>	63

Σχήμα 17: Χάρτης κατανομής του συντελεστή Revelle στην περιοχή της Αχαΐας.....	64
Σχήμα 18: Ισοχλώριες καμπύλες (meq/l) για τον Οκτώβριο 2003 και το Μάιο 2004.	66
Σχήμα 19: Έκταση του μετώπου υφαλμύρινης στη λεκάνη Ελευθέρης στη Καβάλα (Ziegenbalg et al, 2002)	70
Σχήμα 20: Θέσεις γεωτρήσεων τεχνητού εμπλουτισμού στο Αργολικό πεδίο την περίοδο 1990 – 1998 (Γιαννουλόπουλος και Πουλοβασίλης, 1999)	73
Σχήμα 21: Συγκέντρωση χλωριόντων την άνοιξη του 1986 (ΕΤΥΜΠ)	73
Σχήμα 22: Συγκέντρωση χλωριόντων την άνοιξη του 1990 (ΕΤΥΜΠ)	74
Σχήμα 23: Συγκέντρωση χλωριόντων την άνοιξη του 1996 (ΕΤΥΜΠ)	75
Σχήμα 24: Μέση διακύμανση συγκέντρωση Cl⁻ στο Αργολικό πεδίο κατά τα έτη 1985 – 1996 (ΕΤΥΜΠ)	76
Σχήμα 25: Μέση διακύμανση στάθμης στο Αργολικό πεδίο κατά τα έτη 1985 – 1996 (ΕΤΥΜΠ)	77
Σχήμα 26: Μέση διακύμανση πιεζομετρικού φορτίου στο Αργολικό πεδίο κατά τα έτη 1985 – 1996 (ΕΤΥΜΠ)	78
Σχήμα 27: Συγκέντρωση NO₃⁻ στο Αργολικό πεδίο κατά τα έτη 1985 – 1996 (ΕΤΥΜΠ)	78
Σχήμα 28: Γεωηλεκτρική τομογραφία Ηρακλείου Κρήτης (Papadopoulou et al., 2005)	80
Σχήμα 29: Ηλεκτρική τομογραφία στη βιομηχανική περιοχή Ηρακλείου Κρήτης (Papadopoulou et al., 2005)	81

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικά

Η εισροή του θαλάσσιου νερού στους παράκτιους υδροφορείς αποτελεί, κατά τα τελευταία χρόνια, αντικείμενο μίας αξιόλογης ερευνητικής προσπάθειας. Η εισροή, αυτή, μπορεί να είναι είτε μόνιμη είτε συνηθέστερα μη μόνιμη και, έτσι, το αλμυρό νερό αντικαθιστά ίσες ποσότητες γλυκού νερού. Άμεσο αποτέλεσμα, αυτής της διαδικασίας της διείσδυσης της θάλασσας, είναι η εμφάνιση φαινομένων υφαλμύρινσης στους παράκτιους υδροφορείς και το ενδιαφέρον για την επίλυση του προβλήματος αυτού, προκλήθηκε, κυρίως, από την αυξημένη ζήτηση σε νερό για άρδευση αλλά και για την κάλυψη των αναγκών σε πόσιμο νερό των ποικίλων δραστηριοτήτων του ανθρώπου.

Η διαχείριση των υδάτινων πόρων μίας περιοχής προϋποθέτει την ορθή πρόβλεψη τόσο των αλλαγών στην αλμυρότητα των υδροφορέων όσο και τις πηγές προέλευσής της. Έτσι η υπεράντληση των υδάτων στις παράκτιες περιοχές συνδέεται με τη διείσδυση της θάλασσας στους υπόγειους υδροφορείς, με αποτέλεσμα τη μετατροπή του γλυκού νερού σε υφάλμυρο. Το φυσικό αυτό φαινόμενο αποτελεί στην πραγματικότητα μία πολύ σοβαρή μορφή ρύπανσης των υπόγειων υδάτων καθώς το υφάλμυρο νερό δεν είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί από τον άνθρωπο. Ενώ, επιπλέον, η απορρύπανσή του είναι μία εξαιρετικά χρονοβόρα διαδικασία που μπορεί να διαρκέσει έως και εκατοντάδες χρόνια. Τέλος, το φαινόμενο της υφαλμύρινσης έχει πολύ σημαντικό αντίκτυπο στο επίπεδο ζωής των κατοίκων στις παραθαλάσσιες περιοχές.

Η αιτία της υφαλμύρινσης δεν είναι πάντα η θάλασσα. Οι παράκτιες περιοχές φιλοξενούν, συνήθως, ένα σημαντικό αριθμό πηγών ρύπανσης που η εκδήλωσή τους συνδέεται με διάφορες ανθρώπινες δραστηριότητες, κυρίως αγροτικές και αστικές, και με την παρουσία φυσικών πηγών ρύπανσης. Κύρια αιτία του φαινομένου της υφαλμύρινσης είναι η διείσδυση θαλάσσιου νερού στους παράκτιους υδροφορείς, ωστόσο, η εμφάνισή του μπορεί να οφείλεται και σε άλλες αιτίες όπως για παράδειγμα οι γεωλογικοί παράγοντες. Έτσι, η διείσδυση του αλμυρού νερού στους παράκτιους υδροφορείς μπορεί να οφείλεται σε φυσικούς παράγοντες όπως για

παράδειγμα η ανύψωση της στάθμης της θάλασσας, σε ανθρωπογενείς όπως για παράδειγμα υπεραντλήσεις ή/και σε συνδυασμό των δύο όπως συμβαίνει σε πολλές περιπτώσεις.

Το πρόβλημα της υφαλμύρινσης στις περισσότερες περιπτώσεις αναγνωρίζεται από τους αρμόδιους υδρογεωλόγους και μηχανικούς. Συνήθως, όμως, είναι άγνωστη η έκτασή του λόγω έλλειψης στοιχείων. Δηλαδή δεν είναι εύκολη η ποσοτικοποίηση του προβλήματος. Κατά την εισροή της θάλασσας σε έναν υδροφορέα, συνθήκες μόνιμης ροής, στην πραγματικότητα, δεν αποκαθίστανται εύκολα. Επιπλέον, τις περισσότερες φορές το πρόβλημα φθάνει σε μη επιτρεπτά όρια και τα κατάλληλα μέτρα δεν λαμβάνονται εγκαίρως. Η εφαρμογή των μέτρων, αυτών, συνδέεται, συνήθως, με οικονομικούς, νομικούς, πολιτικούς και κοινωνικούς παράγοντες γεγονός που δυσχεραίνει ακόμη περισσότερο το πρόβλημα.

Προβλήματα υφαλμύρινσης παρατηρούνται σε μεγάλη (περιφερειακή) ή/και μικρή (τοπική) κλίμακα. Στην πρώτη περίπτωση επηρεάζονται μεγαλύτερες εκτάσεις από διάφορες ανθρώπινες δραστηριότητες όπως για παράδειγμα από εγγειοβελτιωτικά έργα. Στην δεύτερη περίπτωση τα μικρής κλίμακας προβλήματα, που αναφέρονται στην επίδραση που παρατηρείται στην διεπιφάνεια αλμυρού - γλυκού νερού στην περιοχή γύρω και κάτω από ένα φρέαρ άντλησης, το πρόβλημα είναι ιδιαίτερα σύνθετο και δεν είναι εύκολος ο τρόπος προσέγγισής του.

Στην παρούσα εργασία γίνεται μία αποτίμηση του φαινομένου της υφαλμύρινσης στον ελλαδικό χώρο. Το πρόβλημα είναι ιδιαίτερα έντονο στις περισσότερες ηπειρωτικές και νησιωτικές ακτές της Ελλάδας, δεδομένου ότι πρόκειται για μία χώρα με συνολικό μήκος ακτών μεγαλύτερο από 15.000χλμ. Επίσης, παράγοντες που συντελούν στην αυξημένη εμφάνιση του φαινομένου είναι οι πυκνοκατοικημένες παράκτιες περιοχές οι οποίες κατά τους καλοκαιρινούς μήνες αποτελούν τουριστικό πόλο έλξης με αποτέλεσμα την αύξηση του τοπικού πληθυσμού και κατά επέκταση των αναγκών για νερό. Επιπλέον, οι λοιπές δραστηριότητες του ανθρώπου όπως η εντατικοποιημένη γεωργική καλλιέργεια και η ανάπτυξη των βιομηχανικών εγκαταστάσεων συνδέονται άμεσα τόσο με την υπεράντληση των υπόγειων υδάτων όσο και με την ρύπανση και την υποβάθμισή τους.

Όλα τα παραπάνω, σε συνδυασμό με την άναρχη διαχείριση των υδατικών πόρων που συμβαίνει στην Ελλάδα, καθιστούν επιτακτική την ανάγκη για τη

διαμόρφωση ενός σχεδίου δράσεις για ορθολογική διαχείριση των υδάτων υπό το πρίσμα της αειφόρου ανάπτυξης. Έτσι ώστε να διαφυλαχθεί το μέλλον των επόμενων γενεών.

1.2 Σκοπός

Όπως έχει αναφερθεί η παρούσα εργασία διερευνά το ζήτημα της υφαλμύρινης λόγω της διείσδυσης της θάλασσας στους παράκτιους υδροφορείς. Επομένως, σκοπός της εργασίας είναι να αποτυπώσει την υφιστάμενη κατάσταση στην Ελλάδα όσον αφορά την υφαλμύρινη των παράκτιων υδροφορέων, ένα πρόβλημα το οποίο, ίσως, στο μέλλον να αποτελέσει τον κυριότερο ανασταλτικό παράγοντα για την ανάπτυξη και την ευημερία των παράκτιων περιοχών της χώρας μας. Για το λόγο αυτό, γίνεται προσπάθεια ώστε να παρουσιαστεί το φαινόμενο της υφαλμύρινης και οι τρόποι αντιμετώπισής του.

1.3 Δομή

Προκειμένου να επιτευχθεί ο σκοπός εκπόνησης της παρούσας εργασίας όπως αυτός περιεγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο η δομή που ακολουθείται είναι η ακόλουθη:

- Στο 1^ο Κεφάλαιο γίνεται η εισαγωγή στο θέμα της εργασίας, δίνεται ο σκοπός εκπόνησής της, καθώς και η δομή της.
- Στο 2^ο Κεφάλαιο περιγράφεται το φαινόμενο της υφαλμύρινης και η σχέση γλυκού – αλμυρού νερού. Επιπλέον, δίνονται τα είδη της υφαλμύρινης και τα αίτια, οι επιπτώσεις και η πολυπλοκότητα του φαινομένου της υφαλμύρινης των παράκτιων υδροφορέων.
- Στο 3^ο Κεφάλαιο αναλύονται οι φυσικές και ανθρωπογενείς αιτίες που προκαλούν φαινόμενα υφαλμύρινης στους παράκτιους υδροφορείς

- Στο 4^ο Κεφάλαιο περιγράφονται οι διαθέσιμοι τρόποι αντιμετώπισης του φαινομένου της υφαλμύρινης.
- Στο 5^ο Κεφάλαιο αναφέρονται οι περιπτώσεις υφαλμύρινης παράκτιων υδροφορέων που εμφανίζονται στην Ελλάδα.
- Στο 6^ο Κεφάλαιο δίνονται οι πολιτικές και πρακτικές αντιμετώπισης του φαινομένου της υφαλμύρινης που εφαρμόζονται στην Ελλάδα.
- Τέλος, στο τελευταίο Κεφάλαιο διατυπώνονται τα κυριότερα συμπεράσματα που προέκυψαν από την εκπόνηση της παρούσας εργασίας.

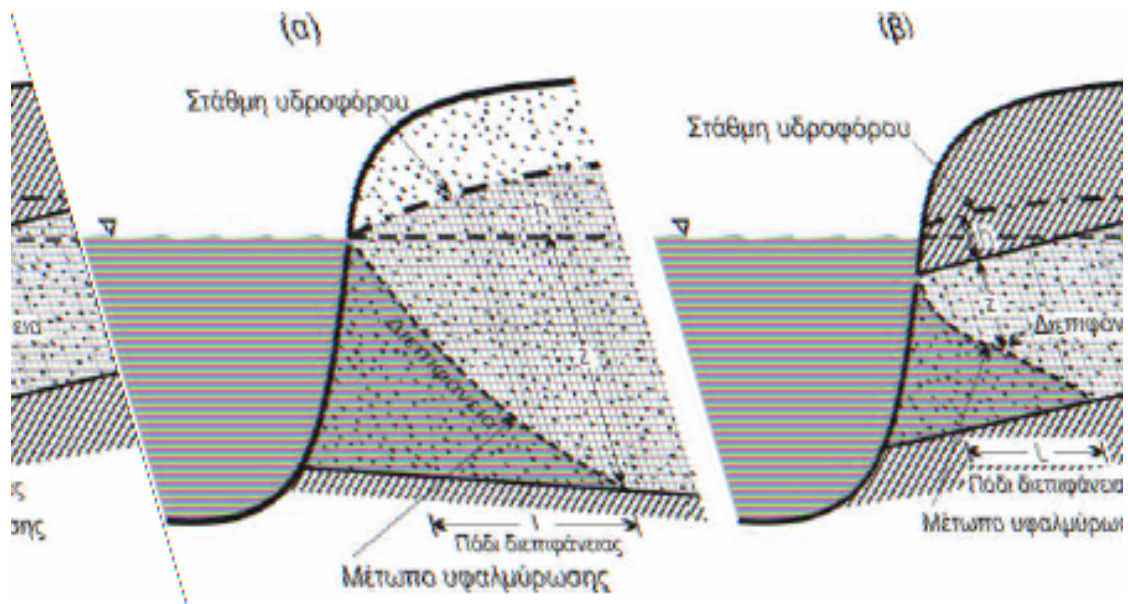
2. ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΥΦΑΛΜΥΡΙΝΣΗΣ

2.1 Γενικά

Οι ανάγκες για νερό στις παράκτιες περιοχές αυξάνονται συνεχώς, κυρίως, λόγω της ανόδου του βιοτικού επιπέδου αλλά και της μεγάλης αύξησης του πληθυσμού κυρίως κατά τους θερινούς μήνες λόγω του τουρισμού. Οι αντλήσεις των παράκτιων υδροφορέων κατά τους θερινούς μήνες είναι εντατικές με αποτέλεσμα την εμφάνιση φαινομένων υφαλμύρινσής τους. Η τροφοδοσία των υδροφορέων μεταβάλλεται ανάλογα με τις βροχοπτώσεις και σε περιόδους παρατεταμένης ξηρασίας δεν επαρκεί για την αναπλήρωσή τους.

Η αποκατάσταση των παράκτιων υδροφορέων πρέπει να αποτελεί σημαντικό μέρος μίας ολοκληρωμένης διαχείρισης των υδατικών πόρων της παράκτιας περιοχής που περιλαμβάνει τα υπόγεια και επιφανειακά νερά, λαμβάνοντας υπόψη τη διαρκή αύξηση των αναγκών, ειδικά κατά του μήνες του καλοκαιριού. Η διαχείριση, αυτή, απαιτεί επιστημονική έρευνα, ανάλυση, καλή πληροφόρηση και συνεργασία μεταξύ των εμπλεκόμενων φορέων αλλά και τοπικού πληθυσμού (Μαντόγλου και Γιαννουλόπουλος, 2001).

Στους παράκτιους υδροφορείς, το γλυκό νερό έρχεται σε επαφή με το θαλασσίνο το οποίο έχει μεγαλύτερη πυκνότητα λόγω των ιόντων χλωρίου. Το θαλασσίνο νερό διεισδύει κάτω από το γλυκό νερό σχηματίζοντας έτσι μία σφήνα. Λόγω της διαφοράς πυκνότητας του γλυκού νερού με το αλμυρό, δημιουργείται μεταβατική ζώνη μεταβαλλόμενης πυκνότητας που ονομάζεται διεπιφάνεια. Η διεπιφάνεια, αυτή, γλυκού - αλμυρού νερού (fresh - salt water interface) έχει τη μορφή μίας κυρτής καμπύλης η οποία σχηματίζεται εξαιτίας της σφήνας του αλμυρού νερού και της ροής του γλυκού. Στο Σχήμα 1 φαίνεται η ζώνη διεπιφάνειας σε ελεύθερο και σε υπό πίεση υδροφόρο στρώμα.



Σχήμα 1: Ζώνη διεπιφάνειας α) σε ελεύθερο και β) σε υπό πίεση υδροφόρο στρώμα (Σούλιος, 2004)

Χαρακτηριστικά στοιχεία είναι το χείλος που ορίζεται ως το σημείο τομής της διεπιφάνειας με τον πυθμένα του υδροφορέα και το πόδι της αλάτινης σφήνας (Εικόνα 1).

Η παρουσία του γλυκού και υφάλμυρου νερού στους υδροφορείς οφείλεται σε κλιματικές αλλαγές και άνοδο της στάθμης της θάλασσας. Ο κυριότερος λόγος υπεράντλησης των παράκτιων υδροφορέων είναι οι αυξημένες ανάγκες σε πόσιμο νερό, που ο ρυθμός άντλησης υπερβαίνει το ρυθμό φυσικής επαναφόρτισης του υδροφορέα και παρατηρείται διείσδυση του θαλασσινού νερού. Η συνεχής διείσδυση οδηγεί στην υποβάθμιση της ποιότητας του γλυκού νερού και καθιστά το νερό ακατάλληλο για χρήση. Το φαινόμενο αυτό δεν είναι εύκολα αναστρέψιμο.

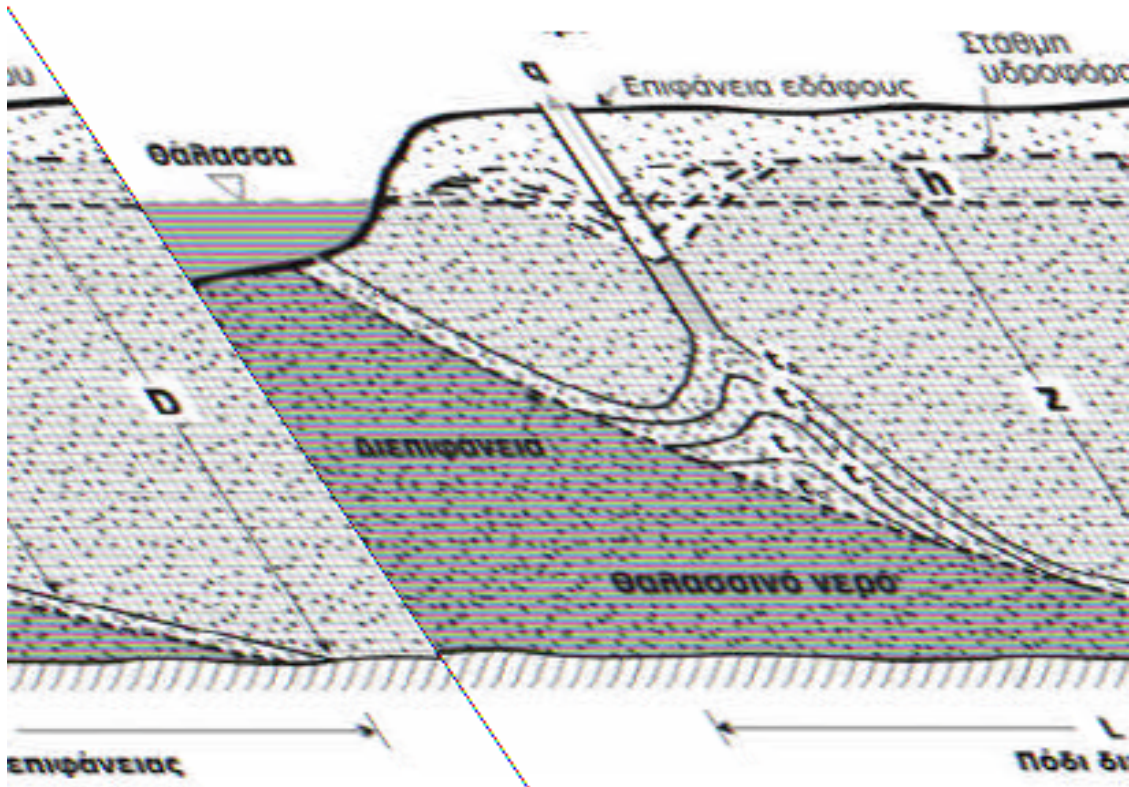
Τα μοντέλα προσομοίωσης του φαινομένου της υφαλμύρινης διακρίνονται σε δύο κατηγορίες (Σούλιος, 2004):

Η πρώτη είναι βασισμένη στη θεώρηση της διεπιφάνειας πεπερασμένου πάχους λόγω της ύπαρξης υδροδυναμικής διασποράς στην οποία υπάρχουν δύο αναμίξιμα υγρά, το αλμυρό νερό της θάλασσας και το γλυκό νερό του υδροφορέα. Οι διαφορικές εξισώσεις που χρησιμοποιούνται είναι πολύπλοκες και οι παράμετροι διασποράς του άλατος που απαιτούνται λόγω της πολυπλοκότητας των υδροφορέων είναι δύσκολο να επικυρωθούν.

Σε αντίθεση, η δεύτερη κατηγορία βασίζεται στη θεώρηση απότομης διεπιφάνειας στην οποία επικρατούν δύο μη αναμίξιμα υγρά και οι εξισώσεις γίνονται απλούστερες. Αξίζει να σημειωθεί ότι σε περιοχές στις οποίες το πραγματικό πάχος της διεπιφάνειας είναι μικρότερο σε σύγκριση με το πάχος του υδροφορέα, η προσέγγιση της απότομης διεπιφάνειας δίνει με πληρότητα τα αποτελέσματα.

Σε κατάσταση φυσικής ισορροπίας, όπου υπάρχει απουσία άντλησης, η διεπιφάνεια παραμένει ακίνητη. Η εντατικοποιημένη άντληση, σε τέτοιο βαθμό ώστε η φυσική επαναπλήρωση δεν οδηγεί στην αποκατάσταση του υδροφορέα, έχει ως αποτέλεσμα την πτώση του πιεζομετρικού φορτίου και την κίνηση της διεπιφάνειας προς το εσωτερικό, έτσι ώστε να επιτευχθεί νέα κατάσταση ισορροπίας.

Οι τιμές του πιεζομετρικού φορτίου καθορίζουν την ποσότητα του γλυκού νερού που εξέρχεται στη θάλασσα και του αλμυρού που εισέρχεται στον υδροφορέα. Σε περίπτωση που μία υδρογεώτρηση βρίσκεται πάνω από τη διεπιφάνεια, τότε διαμορφώνεται ένας κώνος άντλησης γύρω από αυτή όπως φαίνεται στο Σχήμα 2. Όταν ο ρυθμός και η παροχή άντλησης δεν ελέγχονται, το αλμυρό θαλασσινό νερό εισέρχεται σε αυτή θεωρώντας ότι είναι ρυπασμένη λόγω του ότι πλέον αντλείται υφάλμυρο νερό.



Σχήμα 2: Κώνος άντλησης γύρω από την γεώτρηση (Σούλιος, 2004)

2.2 Σχέσεις γλυκού – αλμυρού νερού

Λόγω της διαφορετικής περιεκτικότητας σε άλατα, το αλμυρό νερό παρουσιάζει σημαντικά μεγαλύτερη πυκνότητα από το γλυκό νερό. Στην επαφή του αλμυρού με το γλυκό νερό σχηματίζεται μία ζώνη ανάμιξης, στην οποία υπάρχει βαθμιαία μετάβαση από το γλυκό στο αλμυρό νερό. Αυτή η διεπιφάνεια, άλλοτε μπορεί να είναι λεπτή και άλλοτε πιο εκτεταμένη, όπως όταν το υδραυλικό φορτίο του υδροφόρου υπόκειται σε διακυμάνσεις λόγω της παλίρροιας. Ροή υπάρχει και στη

ζώνη του αλμυρού και στη ζώνη του γλυκού νερού. Η ροή του αλμυρού υπόγειου νερού εκτρέπεται παράλληλα προς τη διεπιφάνεια, για να εκφορτιστεί κοντά στην ακτή.

Η εξίσωση που περιγράφει το σχήμα και τη θέση της διεπιφάνειας είναι η εξίσωση των Ghyben – Herzberg (Fetter, 1994):

$$z_{(x,y)} = [\rho_w / (\rho_s - \rho_w)] * h_{(x,y)}$$

όπου:

- $z_{(x,y)}$: το βάθος της «διεπιφάνειας» κάτω από το επίπεδο της θάλασσας στη θέση (x,y)
- ρ_w : η πυκνότητα του γλυκού νερού
- ρ_s : η πυκνότητα του αλμυρού νερού
- $h_{(x,y)}$: το υψόμετρο της ελεύθερης επιφάνειας του υδροφόρου από το επίπεδο της θάλασσας στη θέση (x,y).

Η εφαρμογή, αυτής της εξίσωσης, περιορίζεται σε περιπτώσεις κατά τις οποίες τα ρευστά βρίσκονται σε στατικές συνθήκες.

Σύμφωνα με το νόμο Ghyben – Herzberg, η διεπιφάνεια θα πρέπει να τέμνει την υδροστατική στάθμη ακριβώς στην ακτή, κάτι το οποίο δεν είναι ακριβές. Η εμπειρία έχει αποδείξει ότι οι υδροφόροι είναι δυνατόν να εκφορτίζονται και μέσα στη θάλασσα από τον πυθμένα της, είτε μέσω ρωγμών είτε ως διάχυτη ροή.

Το 1940 ο Hubbert, διατύπωσε την άποψη ότι το $h_{(x,y)}$ θα έπρεπε να είναι το υδραυλικό φορτίο της διεπιφάνειας στη θέση (x,y). Όμως, επειδή οι ισοδυναμικές γραμμές είναι κυρτές, η κατακόρυφη που περνάει από την ελεύθερη επιφάνεια του υδροφόρου και έχει υδραυλικό φορτίο $h_{(x,y)}$, θα βρίσκεται σε απόσταση από την κατακόρυφη που περνάει από το σημείο της διεπιφάνειας με το ίδιο δυναμικό. Οπότε η πραγματική απόσταση ανάμεσα στην ελεύθερη επιφάνεια του υδροφόρου και στη διεπιφάνεια θα είναι μεγαλύτερη από εκείνη που υπολογίζεται με την εξίσωση Ghyben – Herzberg. Παρόλα αυτά, για υδροφόρους με μεγάλη κατακόρυφη εξάπλωση, η παραδοχή Dupuit (Fetter, 1994), ότι δηλαδή οι ισοδυναμικές γραμμές είναι κατακόρυφες μπορεί να γίνει, οπότε το υδραυλικό φορτίο σε ένα σημείο της

διεπιφάνειας μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι ίσο με το ύψος του υδροφόρου ορίζοντα σε εκείνο το σημείο.

Η υπόγεια ροή σε παράκτιους υδροφόρους μπορεί να περιγραφεί με συνδυασμό των εξισώσεων Ghyben – Herzberg και Dupuit. Το μοντέλο Dupuit – Ghyben – Herzberg (Fetter, 1994) για μονοδιάστατη ροή σε παράκτιους υδροφόρους δίνει την παρακάτω έκφραση για τις x και z συντεταγμένες της διεπιφάνειας:

$$z = (2 q' x G / k)^{1/2}$$

όπου:

- z : το βάθος της διεπιφάνειας κάτω από το επίπεδο της θάλασσας σε θέση που απέχει x από την ακτή προς το εσωτερικό
- x : η απόσταση της θέσης από την ακτή
- q' : η εκφόρτιση του υδροφόρου στην ακτογραμμή ανά μονάδα πλάτους
- k : η υδροπερατότητα
- G : ίσο με: $\rho_w / (\rho_s - \rho_w)$

Και σε αυτό όμως το μοντέλο η διεπιφάνεια τέμνει την επιφάνεια του υδροφόρου στην ακτή. Για να αρθεί η ανακρίβεια αυτή, προτάθηκε η παρακάτω σχέση (Glover, 1964):

$$z = (G^2 q'^2 / k^2 + 2 q' x G / k)^{1/2}$$

Οπότε παρατηρούμε, πως ακόμα κι αν $x = 0$, το z είναι $\neq 0$.

Το πλάτος του υποθαλάσσιου μετώπου εκφόρτισης x_0 δίνεται από τη σχέση:

$$x_0 = - G q' / 2k$$

Το ύψος της επιφάνειας του υδροφόρου σε απόσταση x από την ακτή δίνεται από τον τύπο:

$$h = (2 q' x / G k)^{1/2}$$

2.3 Είδη υφαλμύρινης

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η φυσική ισορροπία των παράκτιων υδροφορέων μπορεί να ανατραπεί, όταν η ροή του γλυκού νερού περιορίζεται λόγω της υπεράντλησής τους ή της μείωσης στην τροφοδοσία μέσω του φυσικού εμπλουτισμού των υδροφόρων.

Επομένως, η διείδυση του θαλασσινού νερού μπορεί να χαρακτηριστεί ως παθητική όταν αλλάζουν, με οποιοδήποτε τρόπο, οι ποσότητες νερού που τροφοδοτούν φυσικά τα υπόγεια στρώματα. Αυτές, οι αλλαγές, επηρεάζουν άμεσα τη θέση της διεπιφάνειας γλυκού - αλμυρού νερού η οποία μετατοπίζεται προς το εσωτερικό. Θα πρέπει να σημειωθεί, ωστόσο, ότι μικρές αλλαγές της θέσης της διεπιφάνειας σημειώνονται με τις εποχικές και ετήσιες διακυμάνσεις των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων, όπως, επίσης, και μετά από μακροχρόνιες αλλαγές στα κλιματικά χαρακτηριστικά της περιοχής ή τη σχετική θέση της στάθμης της θάλασσας.

Και μπορεί να χαρακτηριστεί και ως ενεργή όταν προκύπτει μετά από τεχνητή παρέμβαση στις διακινούμενες ποσότητες όπως ισχύει στην περίπτωση υπεράντλησης. Αυτό οφείλεται, κυρίως, στη σημειακή εξαγωγή (άντληση) του υπόγειου νερού η οποία δημιουργεί ένα βαθύ κώνο κατάπτωσης και τότε, η ζώνη του ορίου, αντίθετα με την περίπτωση της παθητικής διείδυσης, μετακινείται πολύ πιο γρήγορα προς την ενδοχώρα και με αλλαγή της υδραυλικής κλίσης. Επιπλέον, αυτή η μετακίνηση, δεν θα σταματήσει παρά μόνο όταν φτάσει στο κέντρο της άντλησης, το χαμηλότερο σημείο της υδραυλικής κλίσης.

Δηλαδή οι εντατικές αντλήσεις των υπόγειων υδάτων στους παράκτιους υδροφορείς, σε πολλές περιοχές, προκαλούν μία ανάστροφη ροή των υπόγειων υδάτων με αποτέλεσμα μία αξιοσημείωτη θαλάσσια διείδυση στην αντλούμενη

περιοχή, όταν η στάθμη υποβιβάζεται κάτω από το επίπεδο της υποθαλάσσιας εμφάνισης της αντλούμενης ενότητας ή όταν η μεταβατική ζώνη μεταξύ του γλυκού και αλμυρού νερού αποτελεί μέρος του κώνου κατάπτωσης (Διαμαντής κ.α., 1998).

2.4 Επιπτώσεις της υφαλμύρινης

Οι επιπτώσεις της υφαλμύρινης έχουν μεγάλη σημασία αφού το υφάλμυρο νερό είναι ακατάλληλο για άρδευση και ύδρευση αλλά και για την υγεία των καταναλωτών. Στις περιοχές που καλύπτονται από υπόγεια νερά και οι υδρευτικές απαιτήσεις είναι αυξημένες, το φαινόμενο της ποιοτικής υποβάθμισης των υδροφορέων καθιστά προβληματική την ύδρευση. Αυτό οδηγεί στην αύξηση του κόστους ζωής λόγω δαπανηρών λύσεων πχ εμφιαλωμένο νερό.

Από αρδευτικής άποψης, τα προβλήματα είναι αρκετά λόγω έλλειψης επαρκούς ποσότητας νερού και υποδομής αρδευτικής ανάπτυξης. Αυτό οδηγεί στην ελλειμματική άρδευση και κάλυψη των αρδευτικών αναγκών με υφάλμυρο νερό και έτσι αυξάνεται η αλατότητα των εδαφών. Το γεγονός αυτό ευθύνεται για τη μείωση της δυναμικότητάς τους, την αύξηση του κόστους των παραγόμενων προϊόντων και τη μείωση αριθμού των πωλήσεων. Η μείωση της παραγωγικότητας των εδαφών οδηγεί τους καλλιεργητές να χρησιμοποιούν περισσότερο νερό και δραστικότερα λιπάσματα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των εξόδων και μείωση του εισοδήματός τους καθώς επίσης και μεγαλύτερη συρρίκνωση της καλλιεργούμενης γης, 15%. Επιπλέον οδηγεί στην επικράτηση εποχικού χαρακτήρα απασχόλησης. Τέλος, προβλήματα προκαλούνται στις περιπτώσεις όπου στα δίκτυα μεταφοράς το νερό είναι υφάλμυρο λόγω της μεγάλης διαβρωτικής ικανότητας. Αυτό έχει ως επακόλουθο τη μείωση του χρόνου ζωής τους, αύξηση των απωλειών λόγω διαρροής και αύξηση του λειτουργικού κόστους συντήρησης του δικτύου και βαθμού διαθεσιμότητάς του.

2.5 Πολυπλοκότητα της υφαλμύρινης των παράκτιων υδροφορέων

Υδρογεωλόγοι και μηχανικοί αναγνωρίζουν το πρόβλημα στις περισσότερες περιπτώσεις αλλά η ποσοτικοποίηση του είναι αρκετά δύσκολη, κυρίως, λόγω έλλειψης στοιχείων. Προβλήματα υφαλμύρινης παρατηρούνται σε περιφερειακή κλίμακα όπου επηρεάζονται μεγαλύτερες εκτάσεις από διάφορες ανθρώπινες δραστηριότητες ή/και σε τοπική κλίμακα όπου η επίδραση εστιάζεται στην διεπιφάνεια του αλμυρού - γλυκού νερού.

Τα προβλήματα υφαλμύρινης οφείλονται στην ύπαρξη δύο φάσεων ρευστών και μιας ευρείας ζώνης ανάμιξης μεταξύ των δύο υγρών φάσεων. Επίσης, οφείλονται σε ένα άλλο παράγοντα όπου η κίνηση και η διασπορά του ενός ρευστού στο άλλο εξαρτάται από την πυκνότητα των ρευστών στη ζώνη υφαλμύρινης η οποία εξαρτάται από τις συνθήκες ροής (Μαντόγλου και Γιαννουλόπουλος, 2004).

Τέλος, η περιγραφή του φυσικού φαινομένου περιπλέκεται λόγω της ανομοιογένειας των υδραυλικών παραμέτρων του υδροφορέα. Στους καρστικούς υδροφορείς η ανάμιξη του γλυκού και αλμυρού νερού είναι διαφορετικής φύσης από αυτή σε ομοιογενείς πορώδεις υδροφορείς. Η ροή σε αυτού του τύπου υδροφορείς δεν ακολουθεί το Νόμο του Darcy αφού γίνεται σε κοιλότητες και ανοίγματα που είναι μεγάλων διαστάσεων.

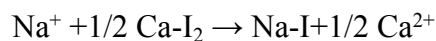
2.6 Οι φυσικοχημικές διαδικασίες ρύπανσης - απορρύπανσης παράκτιων υδροφόρων από την υφαλμύρινη

Η ανταλλαγή κατιόντων ανάμεσα στο νερό και στο υδροφόρο, δηλαδή ανάμεσα στην υγρή και στη στερεή φάση του, αποτελεί το βασικό μηχανισμό αποκατάστασης της ποιότητας του υφάλμυρου νερού, στους υδροφόρους των παράκτιων και νησιωτικών περιοχών.

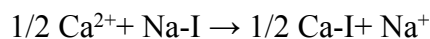
Όμως κατά τη διαδικασία της υφαλμύρινης λόγω διείσδυσης της θάλασσας η ιοντική ανταλλαγή δεν περιορίζεται ανάμεσα σε δύο μόνο ιόντα αλλά αποτελεί μία πολύ-συνιστώσα διαδικασία, κατά την οποία το πορώδες μέσο αποτελεί ένα ιοντοανταλλάκτη, το πορώδες του οποίου είναι γεμισμένο από το υφάλμυρο νερό.

Ορισμένα ιόντα που επιλεκτικά απορροφούνται από τον ιοντοανταλλάκτη μετατοπίζουν με μικρή ταχύτητα άλλα ιόντα του ανταλλάκτη. Οι Appelo και Postma παρατήρησαν ότι η ανταλλαγή ιόντων ενεργεί προσωρινά ως προστατευτικό σε μη σταθερές καταστάσεις που προκύπτουν από την μετατόπιση της διεπιφάνειας γλυκού και αλμυρού νερού.

Γενικά, στο γλυκό νερό των παράκτιων υδροφορέων, επικρατούν τα ιόντα Ca^+ και HCO_3^- λόγω διάλυσης του ασβεστίτη (CaCO_3). Έτσι οι ιοντοανταλλάκτες των παράκτιων υδροφορέων έχουν προσροφήσει, κυρίως, ιόντα Ca^+ . Αντίθετα στο θαλασσίνο νερό επικρατούν τα ιόντα Na^+ και Cl^- με αποτέλεσμα ο ιοντοανταλλάκτης να έχει προσροφήσει ιόντα Na^+ . Εάν παρασταθεί με «I» ο ιοντοανταλλάκτης, κατά τη διείσδυση του θαλασσινού νερού σε παράκτιο υδροφόρο για οποιοδήποτε λόγο, λαμβάνει χώρα η εξής ανταλλαγή ιόντων:



Όπου το πορώδες μέσο προσλαμβάνει ιόντα νατρίου (Na^+) και απελευθερώνει ιόντα ασβεστίου (Ca^{2+}). Δηλαδή παρατηρείται μείωση των Na^+ με ταυτόχρονη αύξηση των Ca^{2+} και του Mg^{2+} . Έτσι ο υδροχημικός τύπος του υπόγειου νερού μετατρέπεται από οξυανθρακικό ασβεστούχο ($\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$) σε χλωριοασβεστούχο ($\text{Ca} - \text{Cl}_2$) και τελικά σε χλωριονατριούχο (NaCl). Η αντίθετη διαδικασία λαμβάνει χώρα, όταν γλυκό νερό με το μηχανισμό της κατείσδυσης ή/και με τεχνητό εμπλουτισμό εισέρχεται στο ρυπασμένο, από τη θαλάσσια διείσδυση, υδροφόρα, δηλαδή:



Οπότε ο τύπος του νερού που προκύπτει είναι NaHCO_3 . Σε αυτό το στάδιο παρατηρείται αύξηση των ιόντων Na με ταυτόχρονη μείωση των Ca^{2+} και των Mg^{2+} . Ανάλογα με τον τύπο του νερού στους παράκτιους υδροφόρους, είναι δυνατή η διαπίστωση της μετατόπισης της διεπιφάνειας αλμυρού - γλυκού νερού, πέρα από την κρίσιμη ανύψωσή της (νερά τύπου Na-Cl , Ca-Cl_2) ή της έκπλυσης υφάλμυρου νερού από γλυκό νερό (νερό τύπου Na-HCO_3) (Καλλέργης, 1998, Capaccioni et al, 2005, Chen and Jiao, 2007).

3. ΑΙΤΙΕΣ ΥΦΑΛΜΥΡΙΝΣΗΣ ΠΑΡΑΚΤΙΩΝ ΥΔΡΟΦΟΡΩΝ

3.1 Γενικά

Κύρια αιτία για την υφαλμύρινη των υπόγειων νερών που στις περισσότερες περιπτώσεις των παράκτιων υπόγειων υδροφορέων είναι δεδομένη, αποτελεί η ύπαρξη χαμηλής πιεζομετρίας δηλαδή το μικρό υδραυλικό φορτίο το οποίο αποτελεί την κινητήρια δύναμη των υπόγειων νερών προς τη θάλασσα. Με αυτό το δεδομένο οποιαδήποτε φυσική ή ανθρωπογενής δράση που συνεπάγεται περαιτέρω μείωση του υδραυλικού φορτίου αποτελεί αφορμή για ανύψωση της διεπιφάνειας γλυκού-αλμυρού νερού (Κουμαντάκης, 1998)

3.2 Φυσικά αίτια

Κύρια φυσικά αίτια που αποτελούν αφορμές ελάττωσης των υδραυλικών φορτίων των υπόγειων νερών είναι:

3.2.1 Μείωση των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων που προκύπτει από την κλιματική αλλαγή

Είναι σαφές ότι σε συνθήκες αλλαγής του κλίματος, το νερό και οτιδήποτε σχετίζεται με αυτό θα εμφανίσει μεγάλες μεταβολές στο μέλλον. Έτσι, σε ορισμένες περιοχές το μέσο ύψος βροχής θα αυξηθεί σημαντικά, όπως αναμένεται να συμβεί στην κεντρική και βόρεια Ευρώπη ενώ σε άλλες όπως οι χώρες του τρίτου κόσμου η ανομβρία θα ενταθεί. Στη περιοχή της Μεσογείου αναμένεται ότι θα μεταβληθεί η χρονική κατανομή των βροχοπτώσεων με συχνότερη την εμφάνιση ακραίων φαινομένων. Γεγονός, αυτό, που για τη χώρα μας σημαίνει ότι ακόμη κι αν δεχόμαστε σε ετήσια βάση, συνολικά, τα ίδια ύψη βροχής σε σύγκριση με το παρελθόν, η κατανομή του νερού θα είναι τέτοια, ώστε να μην ευνοεί τον εμπλουτισμό των

φυσικών δεξαμενών του νερού όπως παλαιότερα. Είναι γνωστό ότι το έδαφος δεν προλαβαίνει να διηθήσει το νερό όταν αυτό έρχεται σε μεγάλες ποσότητες και μέσα σε σύντομα χρονικά διαστήματα, με αποτέλεσμα το μεγαλύτερο μέρος του νερού των κατακρημνισμάτων μεγάλης έντασης, να απορρέει αναξιοποίητο.

Συγκεκριμένα, στην Ελλάδα, τα συνολικά αποθέματα έχουν μειωθεί κατά 700 εκατομμύρια κυβικά μέτρα που αντιστοιχούν σε αποθέματα ενάμισι χρόνου. Η ετήσια κατανάλωση έχει ανέβει στα 450 εκατομμύρια κυβικά μέτρα, και ήδη αντλούνται 350.000 κυβικά μέτρα από την Υλίκη, και ενδεχομένως θα χρειαστεί να αντληθούν και οι γεωτρήσεις που έχουν γίνει κατά την περίοδο της λειψυδρίας το 1990 - 1991. Το πρόβλημα θα οξυνθεί, δεδομένου ότι και οι στάθμες των γεωτρήσεων εμφανίζουν μείωση έως και 20 μέτρα. Επίσης, στοιχεία του Νοεμβρίου 2009, δείχνουν ότι στη δυτική Ελλάδα και τη δυτική Πελοπόννησο, περιοχές που είχαν υψηλούς βροχομετρικούς δείκτες, εμφανίζουν ύψη βροχής της υγρής περιόδου, αντίστοιχες με τις βροχές της ξηρής περιόδου.

Στις γεωτρήσεις της Ηπείρου, η πτώση της στάθμης κυμαίνεται από 1 έως 20 μέτρα και η μείωση των παροχών των μεγάλων καρστικών πηγών, κυμαίνεται στο 30%. Στην Πελοπόννησο παρατηρείται αντίστοιχη μείωση των βροχοπτώσεων και μεγάλες καρστικές πηγές έχουν στερέψει. Από τη δυτική Μακεδονία έως τη Θράκη παρατηρείται αντίστοιχη μείωση των βροχοπτώσεων και η στάθμη των γεωτρήσεων που εκμεταλλεύονται υδροφόρους εμφανίζει πτώση από 20 έως 50 μέτρα. Στη Στερεά Ελλάδα, η πτώση της στάθμης των καρστικών υδροφόρων κυμαίνεται από 5 έως 8 μέτρα (ΤΕΕ, 2008).

3.2.2 Άνοδος της στάθμης της θάλασσας

Η άνοδος της στάθμης της θάλασσας μπορεί να προκαλέσει αλλαγή της ροής του αλμυρού νερού εισβάλλοντας στους υπόγειους υδροφορείς. Όπως παρατηρούμε και από το νόμο Ghyben - Herzberg το βάθος του γλυκού νερού (z) εξαρτάται από το h δηλαδή το ύψος του γλυκού νερού από το μέσο επίπεδο της θάλασσας. Αυτό σημαίνει ότι για κάθε αύξηση του επιπέδου της στάθμης της θάλασσας έχει ως συνέπεια την μείωση της χωρητικότητας του γλυκού νερού στον υδροφόρο και τη μετατόπιση της διεπιφάνειας γλυκού και αλμυρού νερού προς τα πάνω.

3.2.3 Γεωλογικά αίτια

Στους παράκτιους καρστικοποιημένους υδροφορείς οι συνθήκες για την εμφάνιση του φαινομένου της υφαλμύρινσης είναι ιδιαίτερα ευνοϊκές λόγω των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών τους. Η δημιουργία καρστικών φαινομένων συνδέεται με την παρουσία πετρωμάτων τα οποία είναι ευδιάλυτα και αφήνουν ελάχιστο υπόλειμμα με αποτέλεσμα να διευρύνονται τα διάκενα με τη διάλυσή τους οπότε είναι δυνατή η κίνηση του νερού μέσω αυτών στο υπέδαφος. Τέτοια πετρώματα είναι οι εβαπορίτες, τα ανθρακικά, οι ηφαιστίτες, οι χαλαζίτες και οι υπερβασίτες.

Τα καρστικά πετρώματα που έχουν μεγάλη υδρογεωλογική σημασία για το Μεσογειακό χώρο είναι κυρίως τα ανθρακικά πετρώματα (ασβεστόλιθοι και δολομίτες). Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, καρστικοποιημένος υδροφόρος ονομάζεται ένας όγκος διαλυτού πετρώματος στο οποίο η ροή γίνεται κυρίως μέσα στα κανάλια διάλυσης, των οποίων το μέγεθος και η κατεύθυνση είναι ακανόνιστη. Η ροή μπορεί να είναι γραμμική, τυρβώδης ή/και να έχει τα χαρακτηριστικά ροής σε ανοικτό αγωγό. Η κίνηση του υπόγειου νερού μπορεί να προκαλέσει διάλυση του ασβεστόλιθου γύρω από τα υπάρχοντα κενά, με αποτέλεσμα την αύξηση του ανοίγματός τους και της υδραυλικής αγωγιμότητας του υδροφόρου. Όσον αφορά τα ρήγματα, λόγω της καρστικοποίησης αρκετά από αυτά μεγεθύνονται και μετατρέπονται σε κανάλια. Μέσο της διαδικασίας της διάλυσης, η δομή του καρστικοποιημένου υδροφόρου και τα υδραυλικά χαρακτηριστικά του μεταβάλλονται τόσο χωρικά όσο και χρονικά, με συνέπεια οι υδροφόροι αυτοί να χαρακτηρίζονται από μεγάλη ετερογένεια και ανισοτροπία.

Το κύριο χαρακτηριστικό των παράκτιων καρστικοποιημένων υδροφορέων είναι η στενή υδραυλική τους σχέση με το αλμυρό νερό και η άμεση επαφή του γλυκού με το αλμυρό νερό. Η εμφάνιση του φαινομένου της υφαλμύρινσης είναι δυνατόν να προκληθεί από κανάλια που καταλήγουν στον πυθμένα της θάλασσας ακόμα και σε μεγάλη απόσταση από την ακτή. Η άμεση σύνδεση του καρστικού συστήματος και της θάλασσας, οδηγεί σε μεγάλη διακύμανση της περιεκτικότητας των χλωριόντων στην υφάλμυρη ζώνη.

3.3 Ανθρωπογενείς αιτίες

Κύρια ανθρωπογενή αίτια που αποτελούν αφορμές ελάττωσης των υδραυλικών φορτίων των υπόγειων νερών είναι:

3.3.1 Υπεράντληση

Σε πολλές περιοχές, η υπεράντληση των υπόγειων υδάτων για την κάλυψη των τοπικών αναγκών σε ύδρευση και άρδευση, έχει ως αποτέλεσμα την πτώση του υδροφόρου ορίζοντα, την αύξηση του κινδύνου υποβάθμισης της ποιότητας του υπόγειου νερού και την παραγωγικότητα του εδάφους με υφαλμύριση (Αγγελίδης και Οικονόμου, 2005).

Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η Θεσσαλία όπου η αρδευόμενη έκταση αυξήθηκε κατά 46% σε σχέση με το 1980. Σύμφωνα με έρευνα του γεωπονικού Πανεπιστημίου, όσον αφορά το βαμβάκι στη Θεσσαλία, το νερό που χρησιμοποιείται υπερβαίνει κατά 21 - 35% τις πραγματικές ανάγκες για άρδευση. Όσον αφορά την καλλιέργεια καλαμποκιού, οι ποσότητες του νερού που χρησιμοποιούνται υπερβαίνουν το 38-48% των αναγκών, ενώ η πατάτα αρδεύεται με 57 - 67% περισσότερο νερό απ' ότι χρειάζεται.

Στον Αργολικό κάμπο η εντατική καλλιέργεια η οποία αυξήθηκε 300 - 400% σε σχέση με το 1950 καθώς και η αντικατάσταση των πολυκαλλιεργειών με μονοκαλλιέργειες που απαιτούσαν αυξημένη ποσότητα νερού, έχει οδηγήσει σε πτώση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα κατά επτά μέτρα το χρόνο (Το Βήμα, 2000). Επιπλέον η έντονη τουριστική ανάπτυξη, η κατασκευή μεγάλων ξενοδοχειακών συγκροτημάτων, μαρινών και λοιπών υδροβόρων δραστηριοτήτων έχει οδηγήσει σε εξάντληση και υφαλμύριση πολλούς από τους υδροφορείς των παράκτιων περιοχών και ιδιαιτέρως των νησιών.

Στα περισσότερα νησιά του Αιγαίου τα δεδομένα είναι γνωστά: μικρές υδρολογικές λεκάνες, μικρό ύψος βροχοπτώσεων, απουσία φυτοκάλυψης και το έντονο ανάγλυφο που δεν συγκρατούν το νερό έχει σαν αποτέλεσμα ο εμπλουτισμός των υδροφόρων να είναι περιορισμένος. Η παντελής έλλειψη ορθολογικής διαχείρισης των υπόγειων νερών έχει προκαλέσει σε σύντομο χρονικό διάστημα

εκτεταμένη θαλάσσια διείσδυση με αποτέλεσμα την υποβάθμιση της ποιότητας του υπόγειου νερού. Το γεγονός αυτό έχει δημιουργήσει πολλά προβλήματα στα δίκτυα ύδρευσης, σε οικιακές συσκευές αλλά το κυριότερο είναι ότι η χρήση αυτού του νερού, γίνεται σχεδόν απαγορευτική για τους περισσότερους τομείς για τους οποίους προορίζεται. Οι γεωτρήσεις που έχουν γίνει σε ολόκληρη τη χώρα, υπερβαίνουν τις 170.000 κατά εκτίμηση. Οι περιοχές με τις περισσότερες γεωτρήσεις για αγροτική χρήση είναι η Αργολίδα με 24.000 γεωτρήσεις, η Κορινθία, η Βοιωτία, η Άρτα, η Καρδίτσα, η Λάρισα και η Μαγνησία. Αντίστοιχα οι νομοί με τις περισσότερες γεωτρήσεις για αστική χρήση είναι η Αττική, η Θεσσαλονίκη, η Σύρος, η Πάρος, το Λασιθί και η Νάξος (Χαρμανίδης, 1998).

Να σημειωθεί ότι τα περισσότερα νησιά έχουν γίνει «σουρωτήρια», αλλά ειδικά στις Κυκλάδες είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι οι ιδιωτικές γεωτρήσεις είναι πολλαπλάσιες των δημοτικών. Συγκεκριμένα στην Πάρο, έχουν καταμετρηθεί 50 δημοτικές και 250 ιδιωτικές. Στην Τήνο, 30 δημοτικές και 150 ιδιωτικές και στη Σύρο οι 40 ιδιωτικές και οι τρεις μονάδες αφαλάτωσης ανταγωνίζονται τις 300 και πλέον ιδιωτικές γεωτρήσεις (Καθημερινή, 2007).

3.3.2 Παράνομες γεωτρήσεις

Στο 40% ανέρχεται το ποσοστό των παράνομων γεωτρήσεων. Ενώ, οι υπάρχουσες γεωτρήσεις είναι 31% περισσότερες από αυτές που το δυναμικό του υπεδαφικού νερού επιτρέπει. Η παρανομία συνδέεται με τους συνεχώς αυξανόμενους περιορισμούς αλλά και με τις προϋποθέσεις έκδοσης αδειών (μελέτες και κόστος). Η αδειοδότηση κάθε μορφής παροχής νερού έχει δεσμεύσεις σε ότι αφορά την ποσότητα του νερού που πρέπει να αντλείται, καθώς και το υψόμετρο ασφαλείας κάτω από το οποίο δεν πρέπει να κατέβει η στάθμη του υπόγειου υδροφόρου. Η περίοδος 1980-2000 ήταν και η πλέον επώδυνη, αφού τα έργα υδρομάστευσης υπολείπονται της αύξησης των αναγκών σε νερό άρδευσης (www.geotriseis-adeies.gr).

Αναφέρθηκε πιο πάνω ότι οι υπάρχουσες γεωτρήσεις είναι 31% περισσότερες από όσο αντέχει το υπόγειο νερό. Αυτό σημαίνει ότι κάθε τρία χρόνια περίπου αφαιρείται και ένας χρόνος, δηλαδή μετά από 10 χρόνια άντλησης ο υπόγειος

υδροφόρος για να επανέλθει θα χρειαστεί 3 τουλάχιστον συνεχή χρόνια χωρίς καμία άντληση. Στο σύνολο αυτών των γεωτρήσεων, θα πρέπει να προστεθεί και ένας μεγάλος αριθμός από 50.000 γεωτρήσεις, οι οποίες έχουν πολύ μικρή παροχή και ενίοτε περιοδική άντληση.

Μεγάλες υπερβάσεις σε αριθμό γεωτρήσεων σε σχέση με αυτές που μπορεί να αντέξει η περιοχή, έχουν γίνει στη Θεσσαλία με 320% περισσότερες γεωτρήσεις, στην Αττική με 260%, στην Πελοπόννησο και τα νησιά του Αιγαίου με 200%. Μικρότερες υπερβάσεις έχουν γίνει στην Κεντρική και Δυτική Μακεδονία με ποσοστό 20% και 30% αντίστοιχα (www.geotriseis-adeies.gr).

3.3.3 Οικιστική ανάπτυξη

Ο υδροφόρος ορίζοντας σε πολλές περιοχές (κυρίως αστικές) δεν εμπλουτίζεται πλέον. Η τσιμεντοποίηση και η ασφαλοποίηση των πολεοδομικών συγκροτημάτων, η στεγανοποίηση των ρεμάτων και των κοιτών των χειμάρρων αποτελούν ορισμένα χαρακτηριστικά παραδείγματα. Υπολογίζεται ότι στα μεγάλα πολεοδομικά συγκροτήματα η τροφοδοσία του υδροφόρου ορίζοντα από επιφανειακά νερά έχει μειωθεί σημαντικά και σε κάποιες περιπτώσεις φτάνει ακόμη και το 80% (Το Βήμα, 1997).

3.3.4 Εγγειοβελτιωτικά έργα και αποστράγγιση

Η ταπείνωση της υδροστατικής στάθμης εφαρμόζεται σε περιοχές με λίμνες, λιμνοθάλασσες ή έλη κατά μήκος της ακτής με στόχο τη δημιουργία νέας γης για διάφορους σκοπούς όπως γεωργία, βιομηχανία ή κατασκευή κατοικιών. Τα εγγειοβελτιωτικά έργα και η αποστράγγιση συχνά περιλαμβάνουν την ταπείνωση και τον έλεγχο της υδροστατικής στάθμης του υπόγειου νερού σε μεγάλες περιοχές. Οι δραστηριότητες αυτές προκαλούν μεγάλες αλλαγές στο υπόγειο υδατικό καθεστώς, καθώς το υπόγειο νερό (γλυκό, αλμυρό αλλά και υφάλμυρο) ρέει προς τις δημιουργούμενες ταπεινώσεις της υδροστατικής στάθμης με τους μηχανισμούς

διήθησης και με πολύ αργούς ρυθμούς, έτσι ώστε απαιτείται περίοδος πολλών ετών, μέχρι να αρχίσει το πρόβλημα να παίρνει σοβαρές διαστάσεις.

Η διήθηση αυτή μπορεί αργά ή γρήγορα να γίνει αλμυρή διαδικασία που εξαρτάται από το επίπεδο της ελεγχόμενης υδροστατικής στάθμης του υπόγειου νερού, τις υδρολογικές σταθερές, τις οριζόντιες διαστάσεις της περιοχής με την ελεγχόμενη υδροστατική στάθμη και την απόστασή της από την ακτογραμμή. Οι επιπτώσεις από τις αλλαγές αυτές, όσον αφορά στην κατανομή του γλυκού και αλμυρού υπόγειου νερού, μπορεί να είναι λιγότερο ή περισσότερο ισοδύναμες με εκείνες από τις απολήψεις από μεγάλα πεδία γεωτρήσεων (Πεταλάς κ.ά., 2002).

4. ΤΡΟΠΟΙ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΤΗΣ ΥΦΑΛΜΥΡΙΝΣΗΣ

4.1 Γενικά

Ο έλεγχος της θαλάσσιας διείσδυσης απαιτεί ικανοποιητική γνώση των υδραυλικών συνθηκών του υδροφόρου και της πηγής του αλμυρού νερού. Η γνώση της έκτασης ενός προβλήματος υφαλμύρινης και η εκτίμηση της συμπεριφοράς του αλμυρού νερού κάτω από διαφορετικές συνθήκες εμπλουτισμού και εκφόρτισης είναι αναγκαία έτσι ώστε να είναι αποτελεσματική η διαχείριση του προβλήματος.

Η βέλτιστη λύση στο πρόβλημα της θαλάσσιας διείσδυσης είναι η παρεμπόδισή της με τη ρύθμιση του υδροφόρου, ώστε η σφήνα του θαλάσσιου νερού (πόδι της διεπιφάνειας) να ελέγχεται σε έναν αποδεκτό βαθμό. Όμως, σε πολλές περιπτώσεις το πρόβλημα αποτελεί "κληρονόμημα" του παρελθόντος και η προσπάθεια δεν μπορεί παρά να επικεντρωθεί στην ελαχιστοποίηση της περαιτέρω θαλάσσιας διείσδυσης ή/και στη μείωση της έκτασης του υφιστάμενου αλμυρού νερού. Σε ορισμένες περιπτώσεις ο υδροφόρος μπορεί να είναι ρυπασμένος σε τέτοιο βαθμό, ώστε η ανάκτησή του να μην μπορεί να είναι εφικτή κάτω από συνθήκες τεχνητού εμπλουτισμού. Στις περιπτώσεις αυτές η εγκατάλειψη της χρήσης του υδατικού πόρου για ύδρευση είναι η μόνη λύση, παρά το γεγονός ότι το νερό μπορεί να χρησιμοποιείται ακόμη σε ορισμένες βιομηχανικές και γεωργικές εφαρμογές.

Στην περίπτωση που πολλά βαθιά υδροφόρα συστήματα αποτελούνται από επάλληλους υδροφόρους σε εναλλαγές με βραδυυδροφόρα, τότε οι βαθύτεροι αυτοί υπό πίεση υδροφόροι αξιοποιούνται συχνά όταν οι ανώτεροι υδροφόροι έχουν ρυπανθεί από θαλάσσια διείσδυση. Όμως εγκυμονεί ο κίνδυνος διαρροής από τον υπερκείμενο υδροφόρο, καθώς αυξάνουν οι διαφορές στο υδραυλικό φορτίο. Μια δυναμική απειλή για την ποιότητα του νερού στον υποκείμενο υδροφόρο εμφανίζεται στις περιπτώσεις εκείνες που οι γεωτρήσεις χαρακτηρίζονται από κακοτεχνίες. Οι γεωτρήσεις αυτές μπορεί να παρέχουν μια διαδρομή μεταβίβασης αλμυρού νερού από τον υπερκείμενο προς τον υποκείμενο υδροφόρο.

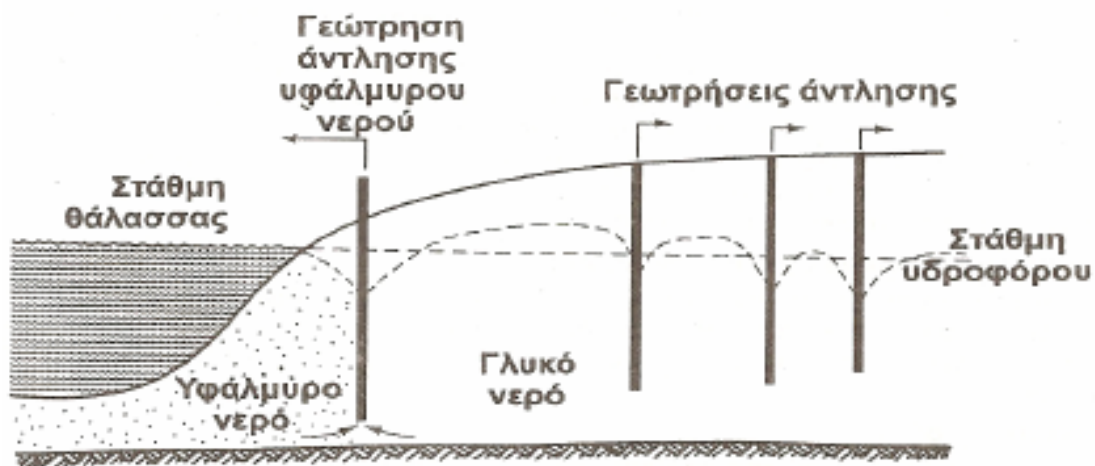
Οι μέθοδοι ελέγχου της θαλάσσιας διείσδυσης συνήθως έχουν εφαρμοστεί ή μελετηθεί σοβαρά μόνο σε περιοχές όπου οι υπεραντλήσεις του νερού προκάλεσαν

την πτώση της στάθμης των υδροφόρων κάτω από το μέσο επίπεδο της θάλασσας. Σε πολλές περιοχές με σοβαρές υπεραντλήσεις, οι υδροφόροι δεν έχουν ακόμα απολέσει την ιδιότητά τους ως πηγές νερού και αυτό οφείλεται στην πολύ μικρή ταχύτητα κίνησης του αλμυρού νερού. Οι υπεύθυνοι φορείς των περιοχών αυτών βέβαια πρέπει να λύσουν το πρόβλημα, γιατί αν το αλμυρό νερό εισβάλλει στον υδροφόρο τότε απαιτούνται εκατοντάδες χρόνια για την επαναφορά του υδροφόρου στα επίπεδα εκείνα πριν την εκμετάλλευσή του.

Διάφοροι φραγμοί ελέγχου μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παρεμπόδιση ή την επιβράδυνση της θαλάσσιας διείσδυσης μέσα στον υδροφόρο, όπως:

4.2 Φραγμοί άντλησης

Οι φραγμοί ή κοιλώματα άντλησης δημιουργούνται από συνεχείς αντλήσεις κατά μήκος μιας γραμμής γεωτρήσεων πολύ κοντά στη ακτογραμμή, με αποτέλεσμα το γλυκό νερό να ρέει προς τη θάλασσα. Το αντλούμενο νερό είναι υφάλμυρο και ρίχνεται στη θάλασσα όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.



Σχήμα 3: Δημιουργία υδραυλικής τάφρου με άντληση υφάλμυρου νερού η οποία εμποδίζει τη θαλάσσια διείσδυση (Καλλέργης, 2000)

Φραγμοί άντλησης έχουν χρησιμοποιηθεί σε διάφορες περιοχές για να παρεμποδίσουν ή να μειώσουν τη θαλάσσια διείσδυση. Το 1965 ένας φραγμός άντλησης μήκους 0,8 Km στον υδροφόρο Oxnard, στην Oxnard Plain της Ventura Country των ΗΠΑ, από το California Department of Water Resources. Ο πειραματικός αυτός φραγμός αποτελούμενος από πέντε γεωτρήσεις σταμάτησε να λειτουργεί το 1968 εξαιτίας της διάβρωσης και επειδή αποδείχθηκε αναποτελεσματικός στην παρεμπόδιση της θαλάσσιας διείσδυσης. Οι φραγμοί αυτού του τύπου μπορεί να αντλήσουν και γλυκό νερό για αυτό θα πρέπει να αποφεύγεται σε περιοχές που το γλυκό νερό σπανίζει (Πεταλάς κ.ά., 2002).

Ο Kashef (1977) και ο Stone (1978) θεωρούν ότι η διείσδυση της θάλασσας μπορεί τεχνικά να ελεγχθεί με τη μέθοδο αυτή, αλλά γενικά είναι πιο δαπανηρή από τους φραγμούς εμπλουτισμού (έγχυσης). Στις περισσότερες περιοχές όπου μελετήθηκε η δυνατότητα εφαρμογής των μεθόδων αυτών, φάνηκε ότι οι φραγμοί άντλησης δεν είναι εφαρμόσιμοι από οικονομικής πλευράς. Παρόλα αυτά σε ορισμένες περιπτώσεις, μπορεί η εφαρμογή τους να είναι οικονομικά συμφέρουσα, όπως σε χώρους απόθεσης επικίνδυνων αποβλήτων ή σε παράκτιο υδροφόρο με σχετικά περιορισμένη επικοινωνία με τη θάλασσα. Το κύριο πρόβλημα είναι ότι οι αντλήσεις προκαλούν σημαντική πτώση της στάθμης του υπόγειου νερού σε όλη την υδρογεωλογική λεκάνη, με αποτέλεσμα το κόστος άντλησης να αυξάνεται συνεχώς ή κάποιες γεωτρήσεις να στερεύουν ή την ενεργοποίηση της κατακόρυφης κίνησης αλμυρού νερού προς το γλυκό νερό (Πεταλάς κ.ά., 2002).

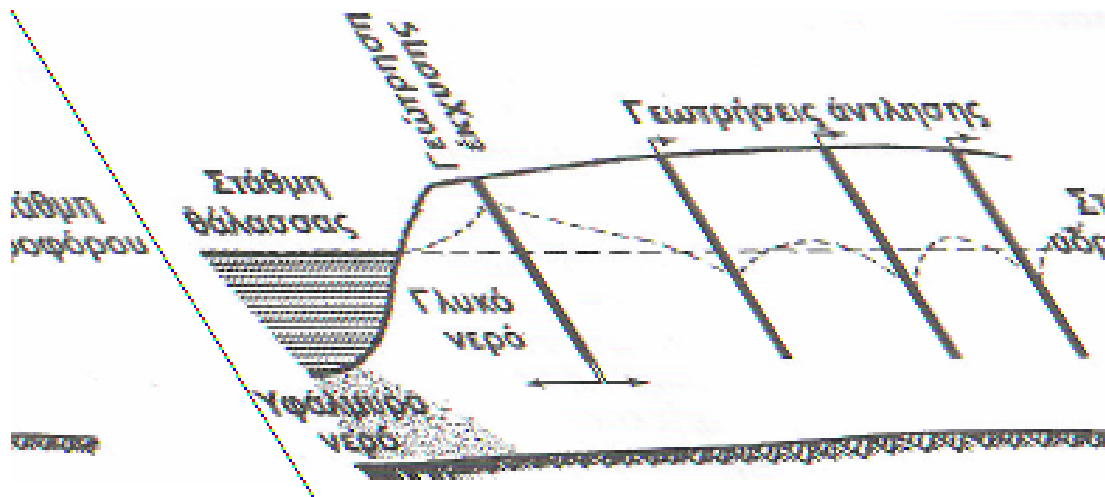
4.3 Φραγμοί εμπλουτισμού γλυκού νερού

Φραγμοί εμπλουτισμού (έγχυσης) σχηματίζονται από γεωτρήσεις εμπλουτισμού ή έγχυσης (injection well) με σκοπό τη διατήρηση ενός υβώματος

πίεσης κατά μήκος της ακτογραμμής. Εδώ γλυκό νερό εγχέεται μέσα στον υδροφόρο με τη βοήθεια μιας γραμμής γεωτρήσεων παράλληλα προς την ακτή, αφού το νερό εμπλουτισμού ρέει τόσο προς την ενδοχώρα όσο και προς τη θάλασσα όπως φαίνεται στο Σχήμα 4. Το δημιουργούμενο ύβωμα προστατεύει τον υδροφόρο από τη θάλασσα διείσδυση. Ο κατάλληλος σχεδιασμός των αποστάσεων μεταξύ των γεωτρήσεων και η επιλογή των θέσεων θα διασφαλίσει ότι το νερό της θάλασσας δεν θα βρει διέξοδο μεταξύ των φραγμών για να διεισδύσει ή να κινηθεί κατακόρυφα. Γενικά απαιτείται μεγάλος αριθμός γεωτρήσεων, που έχουν υψηλό κόστος συντήρησης και το πιο σημαντικό μια πηγή γλυκού νερού υψηλής ποιότητας.

Ο σχεδιασμός και ο τρόπος κατασκευής των γεωτρήσεων εμπλουτισμού εξαρτώνται από τις ιδιαίτερες συνθήκες της θέσης της γεώτρησης, το χαλικόφιλτρο, την πάκτωση με υδαρές τσιμέντο γύρω από τον περιφραγματικό και την αντλία. Το νερό που θα χρησιμοποιηθεί πρέπει να είναι υψηλής ποιότητας για να μειώνει τη συχνότητα απόφραξης, να αυξάνει την περίοδο λειτουργίας της γεώτρησης και να μειώνει το κόστος καθαρισμού. Επιπροσθέτως η χλωρίωση του νερού εμπλουτισμού προστατεύει τους σωλήνες εμποδίζοντας τις δυναμικές διαρροές και μειώνει τη βιορύπανση (βιοαπόφραξη) των σχηματισμών.

Η γεώτρηση εμπλουτισμού, όταν υπάρχει απόφραξη και η στάθμη του νερού εμπλουτισμού υπερβαίνει τα αποδεκτά επίπεδα, πρέπει να υποβάλλεται στη διαδικασία της επανανάπτυξης ανά τριετία. Έτσι αποκαθίσταται η αποτελεσματικότητα της γεώτρησης και αυξάνεται η ειδική της ικανότητα. Επίσης η πίεση έγχυσης του νερού εμπλουτισμού στο σωλήνα πρέπει να παρακολουθείται και να ελέγχεται προσεκτικά για να εμποδίζονται οι διακυμάνσεις της στάθμης που θα μπορούσαν να διακόψουν τη συνέχεια του χαλικόφιλτρου ή ακόμη και προκαλέσουν βλάβες στην ίδια τη γεώτρηση (Πεταλάς κ.α., 2002).



Σχήμα 4: Δημιουργία υδραυλικού φραγμού με τεχνητό εμπλουτισμό για την πρόληψη αλμύρινης παράκτιου υδροφόρου (Καλλέργης, 2000)

Το νερό εμπλουτισμού εγχέεται στις γεωτρήσεις με πίεση μεμονωμένα ή και σε μικρές ομάδες γεωτρήσεων ταυτόχρονα, έτσι ώστε να εμποδίζεται η πλήρης υποχώρηση του φορτίου του υβώματος παρεμπόδισης σε περιπτώσεις αιφνίδιας διακοπής της λειτουργίας μιας γεώτρησης, που μπορεί να οφείλεται σε ατύχημα, κακή λειτουργία ή σε απεργίες. Θα πρέπει να κατασκευάζονται γεωτρήσεις ελέγχου πλησίον της γραμμής του φραγμού εμπλουτισμού για να παρακολουθούνται τα επίπεδα της στάθμης του υπόγειου νερού. Αυτό θα επέτρεπε τον ακριβή προσδιορισμό των ποσοτήτων του νερού εμπλουτισμού για να παρεμποδιστεί η θαλάσσια διείσδυση.

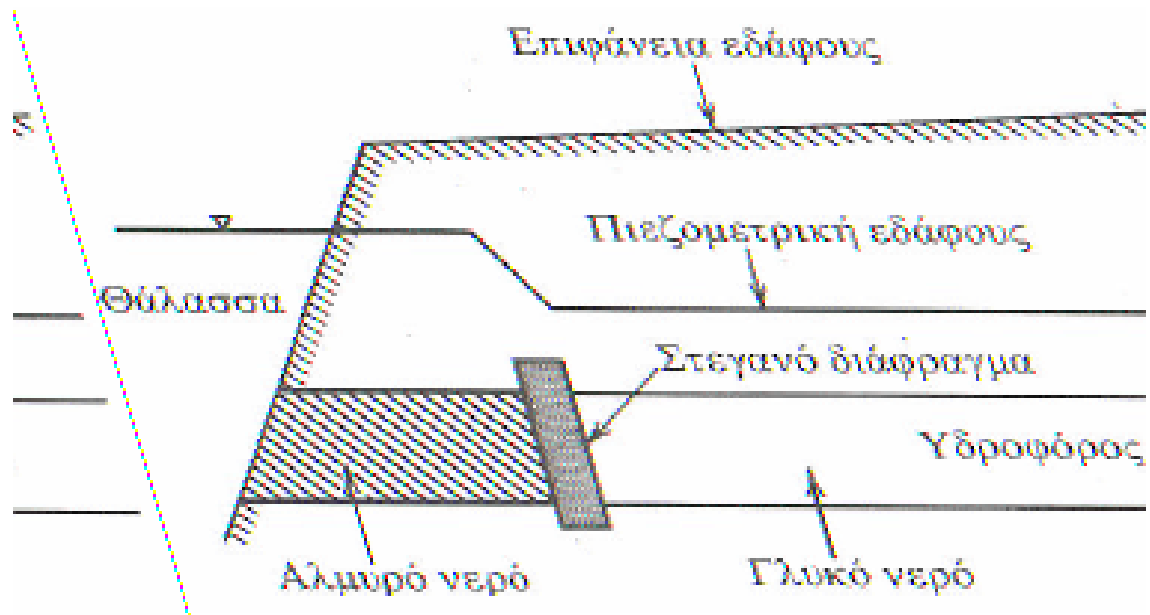
Όταν χρησιμοποιούνται γεωτρήσεις εμπλουτισμού για τον έλεγχο της θαλάσσιας διείσδυσης, η θέση σχηματισμού του υδραυλικού φραγμού θα πρέπει να προσδιορίζεται κοντά στο άκρο της αλμυρής σφήνας. Τα κριτήρια ποιότητας του νερού εμπλουτισμού θα πρέπει να τίθενται με βάση τα κύρια και δευτερεύοντα σταθερότυπα του πόσιμου νερού, όπως γίνεται στις ΗΠΑ. Οι παράμετροι που εξετάζονται στο νερό εμπλουτισμού στις ΗΠΑ είναι οι ακόλουθες : οι πτητικές

οργανικές ενώσεις, όπως βρωμοφόρμιο, χλωροφόρμιο, διβρωμοχλωρομεθάνιο, οι χημικές παράμετροι Cl, PH, Ca, Mg, TDS, Na, K, θειϊκά κ.α.

Η κατασκευή του φραγμού εμπλουτισμού της Los Angeles Flood District κόστισε 20 εκατ. \$, από το 1953 έως το 1973, μη συμπεριλαμβανομένου του κόστους αγοράς του νερού εμπλουτισμού και της τιμαριθμικής αναπροσαρμογής. Το ετήσιο κόστος συντήρησης και λειτουργίας του φραγμού, μήκους 32 Km ήταν κατά προσέγγιση 1,5 εκατ. \$ την περίοδο 1978 - 1980, ενώ το ετήσιο κόστος του φιλτραρισμένου νερού ήταν 0,086 \$ / m³ νερού. Το μέσο λειτουργικό κόστος για την περίοδο 1978-1980 ήταν 44.000 \$ ανά Km (έξι γεωτρήσεις ανά Km), δηλαδή 7.000 \$ ανά γεώτρηση για μια υπολογισμένη έγχυση ανά ημέρα ίση με $3,8 \times 10^5$ m³ νερού. Το λειτουργικό κόστος εξαρτάται από το μήκος του φραγμού, τη γεωμετρία και τις φυσικές ιδιότητες του υδροφόρου, τις διαφορές στα επίπεδα της στάθμης του υδροφόρου σχετικά με το μέσο επίπεδο της θάλασσας και τους όγκους του εγχεόμενου νερού (Πεταλάς κ.α., 2002).

4.4 Τεχνητοί υπόγειοι φραγμοί

Η δημιουργία τεχνητών υπόγειων φραγμών, σε όλη την έκταση του υδροφόρου και παράλληλα προς την ακτογραμμή, περιλαμβάνει την κατασκευή κουρτίνας από πασσαλοσανίδες ή την κατασκευή τάφρων από άργιλο ή την έγχυση αδιαπέρατων υλικών μέσω γεωτρήσεων όπως μπετονίτη, υδατοστεγανή άργιλο και ρευστοκονίαμα από τσιμέντο (Σχήμα 5 και 6).



Σχήμα 5: Αντιμετώπιση θαλάσσιας διείσδυσης με την κατασκευή στεγανού υπόγειου διαφράγματος, παράλληλο στη ακτή (Καλλέργης, 2000)



Σχήμα 6: Σχηματικό διάγραμμα ενός υπόγειου διαφράγματος για την παρεμπόδιση ανάμιξης γλυκού και αλμυρού νερού (Καλλέργης, 2000)

Ο Kashef δηλώνει ότι, παρά τη τεχνική αρτιότητα των μεθόδων κατασκευής τους το κόστος είναι συνήθως πάρα πολύ υψηλό, επειδή το απαιτούμενο βάθος είναι μεγάλο. Ακόμα και στις περιπτώσεις των ανώτερων στρωμάτων όπου το κόστος μπορεί να μην είναι απαγορευτικό, μπορεί να έχουμε πλημμύρισμα παράκτιων χαμηλών περιοχών πίσω από το φραγμό. Το μοναδιαίο κόστος του για τοιχία από υδαρό κονίαμα κυμαίνεται μεταξύ 20 και 40 \$ ανά m³. Το κόστος σε μεγάλο βαθμό εξαρτάται από το βάθος της εκσκαφής, το μήκος του τοιχίου και το κόστος των διαθέσιμων υλικών. Φραγμοί τέτοιου είδους απαιτούν εκσκαφή μέχρι το στεγανό υπόβαθρο για να είναι αποτελεσματικοί. Τα αδιαπέρατα τοιχία μπορεί να είναι 100% αποτελεσματικά αλλά στην πράξη πάντα υπάρχουν κενά στην κατασκευή τους επίσης είναι ευπαθή στους σεισμούς και τη χημική διάβρωση (Πεταλάς κ.α., 2002).

4.5 Βιολογικοί φραγμοί

Καινοτόμες τεχνολογίες χρειάζονται για την παρεμπόδιση του μετώπου της θαλάσσιας διείσδυσης η οποία απειλεί τις παροχές πόσιμου νερού των παράκτιων κοινοτήτων. Εργαστηριακές μέθοδοι έχουν αποδείξει την αποτελεσματικότητα της μεθόδου στα πορώδη μέσα (James, 2000). Η μέθοδος αυτή αποτελεί μια διαδικασία επιλεκτικής απόφραξης των πόρων μιας διαπερατής στρώσης με μικροβιακά μικροφίλμ. Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει την ανάπτυξη βακτηριακών μικροφίλμς, που μέσω της παραγωγής υπερκυτταρικών πολυμεροειδών ουσιών, φράζουν τις οπές της πορώδους μάζας. Αυτοί οι μικροβιακοί φραγμοί μπορούν να οδηγήσουν στην παρεμπόδιση της θαλάσσιας διείσδυσης μέσω της μείωσης της υποεπιφανειακής υδραυλικής αγωγιμότητας και να αναβαθμίσουν για το λόγο αυτό τις στρατηγικές ελέγχου με εμπλουτισμό. Για τον έλεγχο της αποτελεσματικότητας της μεθόδου χρησιμοποιήθηκε ένα δοκιμαστικό στρώμα εύρους 39,62 m, μήκους 54,86 m και βάθους 6,1 m, το οποίο αποτέλεσε έναν τεχνητό υδροφόρο. Ο σχηματισμός του φραγμού από μικροφίλμ άρχισε με την εισαγωγή βακτηρίων και διαλυμάτων με

θρεπτικές ουσίες με γεωτρήσεις έγχυσης και ακολουθήθηκε ένα πρωτόκολλο που αυξάνει τη μεταφορά και την επιβίωση των βακτηρίων στο υπέδαφος. Η μέση υδραυλική αγωγιμότητα μειώθηκε πλησίον του βιοφίλμ από $2,1 \cdot 10^{-2}$ σε $1,3 \cdot 10^{-4}$ cm/sec, μια μείωση της τάξης του 99,4%.

Μία λεπτομερής οικονομική ανάλυση πραγματοποιήθηκε για την εγκατάσταση ενός φραγμού από βιοφίλμ σε έναν παράκτιο υδροφόρο των δυτικών ΗΠΑ. Σήμερα η διείσδυση της θάλασσας ελέγχεται με γεωτρήσεις εμπλουτισμού, όπου αφού εξετάστηκαν όλα τα δεδομένα, προέκυψε το συμπέρασμα ότι οι τρέχουσες απαιτήσεις άντλησης γλυκού νερού θα μπορούσαν να μειωθούν κατά τουλάχιστον 50 % χωρίς να διακοπεί η συνεχής παροχή νερού. Η εγκατάσταση και η συντήρηση του φραγμού θα κόστιζε 5,3 εκατ. \$ και θα επέφερε μειωμένο κόστος απόληψης νερού περισσότερο από 1,3 εκατ. \$ ετησίως. Αντίθετα, η απόδοση της επένδυσης με τη χρήση γεωτρήσεων εμπλουτισμού είναι της τάξης του 24% για μια περίοδο 30 ετών, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη το πρόσθετο κόστος νερού και άντλησης. Όλα αυτά δείχνουν ότι η εφαρμογή των φραγμών με την τεχνολογία των βιοφίλμ μπορεί να είναι οικονομικά πολύ ελκυστική. Ένας αποτελεσματικός φραγμός από βιοφίλμ μπορεί να εγκατασταθεί σε πραγματικές συνθήκες, με σοβαρά πλεονεκτήματα, αφού δεν χρειάζεται εκσκαφές και επομένως έχουν χαμηλό κόστος εγκατάστασης, δεν υπάρχουν περιορισμοί στο βάθος, ενώ οι παραδοσιακοί υπόγειοι φραγμοί δεν είναι οικονομικά εφαρμόσιμοι σε βάθος μεγαλύτερο των 6m (Πεταλάς κ.α., 2002).

4.6 Έλεγχος αντλήσεων

Στην περίπτωση που ο υδροφόρος υπέρκειται ενός αλμυρού ρευστού, η άνοδος του αλμυρού ρευστού μπορεί να περιοριστεί με τον κατάλληλο σχεδιασμό και λειτουργία των γεωτρήσεων. Οι γεωτρήσεις θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν αβαθείς και να αντλούνται με μικρές ομοιόμορφες παροχές. Ένα σύστημα πολλαπλών γεωτρήσεων με μικρές επί μέρους παροχές θα ήταν προτιμότερο από μια γεώτρηση υψηλής παροχής. Μία εναλλακτική μέθοδο αποτελεί η κατασκευή μίας στοάς διήθησης, δηλαδή μιας οριζόντιας γεώτρησης, η οποία βοηθά στη μείωση της ανοδικής κίνησης του αλμυρού νερού που είναι αποτέλεσμα υπεράντλησης από μια κατακόρυφη γεώτρηση. Οι ρυθμοί των απολήψεων μπορούν να μειωθούν όταν η

ζήτηση σε νερό μειώνεται. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με τη λήψη μέτρων όπως (Πεταλάς κ.α., 2002):

- Πληροφόρηση του ευρύτερου κοινού και του τομέα της βιομηχανίας για την ανάγκη οικονομίας στο νερό και αν είναι αναγκαίο απαγόρευση ορισμένων χρήσεων.
- Μείωση των απωλειών από συστήματα μεταφοράς και διάθεσης του νερού οι οποίες μπορεί να είναι σημαντικές
- Ανακύκλωση του νερού βιομηχανικών διαδικασιών μετά από κατάλληλη επεξεργασία πριν από τις διαδοχικές χρήσεις.
- Επαναχρησιμοποίηση υποβαθμισμένων σε ποιότητα νερών, μετά από κάποια επεξεργασία, για άλλες χρήσεις όπως ψύξη, άρδευση και έγχυση στο υπέδαφος για τη διατήρηση ενός φραγμού παρεμπόδισης της θαλάσσιας διείσδυσης.
- Μείωση των απαιτήσεων σε νερό άρδευσης μέσω της επιλογής μη υδροβόρων καλλιεργειών και εφαρμογή τεχνικών άρδευσης, με μικρή κατανάλωση σε νερό, όπως η στάγδην άρδευση και η επένδυση των καναλιών.

4.7 Ανακατανομή αντλήσεων

Η επανατοποθέτηση των γεωτρήσεων άντλησης στην ενδοχώρα μπορεί να βοηθήσει στην αποκατάσταση της εκροής του γλυκού υπόγειου νερού. Σύμφωνα με τους Headworth και Fox (1986), μερικά σχέδια μείωσης των επιπτώσεων της θαλάσσιας διείσδυσης χρησιμοποιούν δύο ομάδες γεωτρήσεων, η μία στην ενδοχώρα και η άλλη πλησίον της ακτής. Οι παράκτιες γεωτρήσεις αντλούνται σε περιόδους με υψηλές στάθμες υπόγειου νερού ενώ οι γεωτρήσεις της ενδοχώρας χρησιμοποιούνται σε περιόδους με χαμηλές στάθμες υπόγειου νερού (Πεταλάς κ.α., 2002).

4.8 Τροποποιημένα σχέδια αντλήσεων

Είναι φανερό ότι ιδιαίτερα στους υπό πίεση υδροφόρους, η θέση μιας γεώτρησης πιο κοντά στην ενδοχώρα είναι πιο επιθυμητή από μια θέση κοντά στην ακτή και αυτό επειδή το πάχος του γλυκού φακού είναι σημαντικά μεγαλύτερο και ο κίνδυνος της ανοδικής κίνησης αλμυρού νερού είναι μικρότερος. Η τοποθέτηση των υδρομαστευτικών έργων στην ενδοχώρα επιτρέπει περαιτέρω προώθηση της αλμυρής σφήνας μέχρι την τελική σταθερή θέση της. Έτσι που να επιτρέπει μικρότερο μεν ρυθμό συνεχομένων αντλήσεων, αλλά και ελαχιστοποίηση του κινδύνου περαιτέρω διείσδυσης της αλμυρής σφήνας. Σε φρεάτιους υδροφόρους νησιών, τα υδρομαστευτικά έργα πρέπει να τοποθετούνται σε τόσο μικρή απόσταση από την ακτογραμμή, ώστε να γίνεται απόληψη της μέγιστης δυνατής ποσότητας από τον εμπλουτισμό του υδροφόρου πριν την εκροή της ποσότητας αυτής στην ακτογραμμή.

Επίσης δεν θα πρέπει η απόσταση αυτή να είναι τόσο μικρή ώστε το πάχος του υδροφόρου να είναι πολύ μικρό δημιουργώντας έτσι κινδύνους για ανοδική κίνηση του αλμυρού νερού. Η τοποθέτηση των υδρομαστευτικών έργων πιο μακριά από την ακτή, προς την ενδοχώρα, θα οδηγούσε μικρότερο διαθέσιμο όγκο γλυκού νερού, που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί σαν απόθεμα για περιόδους ξηρασίας.

Για ελεύθερους ή υπό πίεση υδροφόρους με καθεστώς μέτριων αντλήσεων, μπορεί να σχεδιαστεί συντονισμένη παύση των αντλήσεων σε ορισμένες γεωτρήσεις. Συγκεκριμένα θα μπορούσε να εφαρμοστεί λογική έκδοση αδειών ανόρυξης νέων γεωτρήσεων ή νέα σχήματα επιφανειακής κατανομής των αντλήσεων. Το κόστος μιας τέτοιας ενέργειας θα μπορούσε να είναι μεγάλο επειδή εγκαταλείπονται παλιές γεωτρήσεις, που όμως ακόμη λειτουργούν. Σύμφωνα με τον Stone το κόστος εξαρτάται από την ιδιαίτερη περίπτωση και στην Oxnard Plain για ένα δεδομένο σχέδιο το κόστος κεφαλαίου ανέρχεται στα 10 εκατ. \$, με ετήσιο λειτουργικό κόστος το 1980 ίσο με 180.000\$. Ένα τροποποιημένο σχέδιο άντλησης θα επέτρεπε την επαναφορά της στάθμης του υπόγειο νερού σε φυσικά επίπεδα σε επικίνδυνες περιοχές, κάτι που θα επιβράδυνε την προώθηση του αλμυρού μετώπου. Η προώθηση θα συνεχιζόταν μέχρι την επίτευξη νέας ισορροπίας.

Η αποτελεσματικότητα του τροποποιημένου σχεδίου άντλησης ποικίλλει, ανάλογα με το ρυθμό εμπλουτισμού, τον ρυθμό των αντλήσεων, την καθαρή υπεράντληση, τη στάθμη του υπόγειου νερού, τη γεωμετρία του υδροφόρου και του

υφιστάμενο βαθμό της θαλάσσιας διείσδυσης. Το μέτρο αυτό οδηγεί και στη μείωση των απωλειών του γλυκού νερού μέσω μη ελεγχόμενων εκροών (Πεταλάς κ.α., 2002).

4.9 Τεχνικές αφαλάτωσης

Οι διάφορες τεχνικές που εφαρμόζονται σήμερα, ουσιαστικά βοηθούν στη διατήρηση των υπάρχοντων διαθέσιμων υδατικών πόρων, ενώ οι τεχνικές αφαλάτωσης μπορούν να παράγουν ανανεωμένο νερό από μη χρησιμοποιημένο νερό. Σύμφωνα με τη Διεθνή Ένωση Αφαλάτωσης, σήμερα λειτουργούν περίπου 13.600 μονάδες αφαλάτωσης σε παγκόσμια κλίμακα, οι οποίες παράγουν περίπου $25,744 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ γλυκού νερού σε ημερήσια βάση. Οι ΗΠΑ θεωρούνται η δεύτερη χώρα στον κόσμο, με το μεγαλύτερο αριθμό μονάδων αφαλάτωσης οι οποίες επεξεργάζονται επιφανειακά και υπόγεια υφάλμυρα νερά. Στην πολιτεία του Τέξας λειτουργούν σήμερα περισσότερες από εκατό μονάδες αφαλάτωσης, οι οποίες παράγουν μέχρι και $151,436 \text{ m}^3$ νερού ημερησίως, χρησιμοποιώντας επιφανειακό και υπόγειο υφάλμυρο νερό.

Χαρακτηριστικότερες των παραπάνω μονάδων είναι οι Sherman (Λίμνη Texoma), Robinson (Ποταμός Brazos) και Granbury (Λίμνη Granbury) οι οποίες χρησιμοποιούν επιφανειακά υφάλμυρα νερά., ενώ οι Ft. Stockton και Kenedy χρησιμοποιούν υπόγεια υφάλμυρα νερά. Τα συστήματα αφαλάτωσης χωρίζονται σε αυτά που βασίζονται στη χρήση μεμβρανών, όπως η αντίστροφη όσμωση (reverse osmosis,RO), και η αντιστροφή της ηλεκτροδιάλυσης (Electrodialysis Reversal, EDR) και στα θερμικά όπως η ακτινοβολία πολλαπλής βαλβίδας (multi – stage flash,MSF) και η απόσταξη πολλαπλής επίδρασης (multiple – effect distillation MED).Η μέθοδος που χρησιμοποιείται ευρέως στην πλειοψηφία των μονάδων αφαλάτωσης σήμερα, είναι αυτή της αντίστροφης όσμωσης.

Σήμερα στη Φλόριντα (Tampa Bay) των ΗΠΑ, κατασκευάζεται σύγχρονη μονάδα αφαλάτωσης αλμυρού νερού, το κόστος της οποίας ανέρχεται στα 100 εκατ. \$ και χωρητικότητας 95.000 m^3 νερού. Σύμφωνα με το Texas Water Development Board, το κόστος του αφαλατωμένου νερού από την εν λόγω μονάδα υπολογίζεται περίπου στα 0.52\$ ανά m^3 νερού, τιμή που ανέρχεται περίπου στο μισό σε σχέση με

την παραγωγή αφαλατωμένου νερού κατά το παρελθόν. Η μονάδα αφαλάτωσης του El Paso, στο δυτικό Τέξας, με χωρητικότητα 110.000 m³ ημερησίως, πρόκειται να χρησιμοποιεί το υπόγειο υφάλμυρο νερό του υδροφόρου Hueco Bolson με σκοπό την παροχή νερού ύδρευσης, που να εξυπηρετεί το ένα τέταρτο των αναγκών του El Paso (Texas Water Development Board, 2002).

Πρόσφατη μελέτη του Ινστιτούτου Τεχνολογίας της Μασαχουσέτης (M.I.T.) για τη λωρίδα της Γάζας, έδειξε ότι η λύση της αφαλάτωσης ή η ανεύρεση νέων πηγών γλυκού νερού σε συνδυασμό με υποδομές μεταφοράς και επεξεργασίας νερού θα εμποδίσει την περαιτέρω υποβάθμιση του υδροφόρου της περιοχής αυτής από τη θαλάσσια διείσδυση. Η μελέτη περιέλαβε τη σύνταξη μοντέλων βελτιστοποίησης για την πρόβλεψη της διαθεσιμότητας σε νερό στη λωρίδα της Γάζας μέσω της ενσωμάτωσης αριθμητικών μοντέλων ροής του υπόγειου νερού και μεταφοράς αλμυρού νερού στην περιοχή, σε ένα ποσοτικό οικονομικό μοντέλο της οικιακής και αγροτικής χρήσης νερού (Huber Lee and Harvey, 2001). Το κόστος της εγκατάστασης αφαλάτωσης, με απόδοση 50 εκατ. m³ ετησίως, θα είναι τουλάχιστον 100 εκατ. \$ για την κατασκευή ετησίως και με λειτουργικό κόστος της τάξης των 0,70 \$ / m³ νερού. Η μέθοδος της αφαλάτωσης θα μπορούσε να αποτελέσει ελκυστική λύση αν συνδυάζονταν με τη δημιουργία ενός φραγμού άντλησης (κοιλώματος) (Πεταλάς κ.α., 2002).

4.10 Άμεση διάθεση επιφανειακού νερού σε αντικατάσταση χρήσης του υπόγειου νερού

Η κάλυψη των διαφόρων αναγκών μιας περιοχής από επιφανειακές πηγές νερού σε αντικατάσταση των αντλούμενων ποσοτήτων υπόγειου νερού, θα επέτρεπε την αποκατάσταση των φυσικών συνθηκών λειτουργίας του υδροφόρου, ενώ η άνοδος της στάθμης του υπόγειου νερού θα επιβράδυνε την οποιαδήποτε υφιστάμενη προώθηση της θαλάσσιας διείσδυσης και ορισμένες περιπτώσεις θα προκαλούσε ακόμη και την υποχώρηση του αλμυρού μετώπου (Πεταλάς κ.α., 2002).

4.11 Τεχνητός εμπλουτισμός

Σε περιπτώσεις παράκτιων περιοχών, όπου επαρκείς ποσότητες γλυκού νερού είναι διαθέσιμες για εμπλουτισμό σε εποχές υψηλών βροχοπτώσεων, το πλεονάζον νερό θα μπορούσε με διαδικασίες τεχνητού εμπλουτισμού να εμπλουτίζει τους υδροφόρους, να ανυψώνει τα επίπεδα της στάθμης των και να εμποδίζει τη θαλάσσια διείσδυση (Πεταλάς κ.α., 2002).

Οι προϋποθέσεις του τεχνητού εμπλουτισμού είναι (Σούλιος, 2004):

- να υπάρχει επιφανειακό νερό σε επαρκή ποσότητα
- η ποιότητα του επιφανειακού νερού να είναι κατάλληλη και χημικά συμβατή με αυτήν του υπόγειου νερού.
- να υπάρχουν κατάλληλες γεωλογικές συνθήκες (επιφάνειες με μεγάλη περατότητα, υδροφόρα στρώματα σε με αλληλουχία και υδραυλική διασύνδεση)
- το κατασκευαστικό και το λειτουργικό κόστος να μην είναι ασύμφορα.

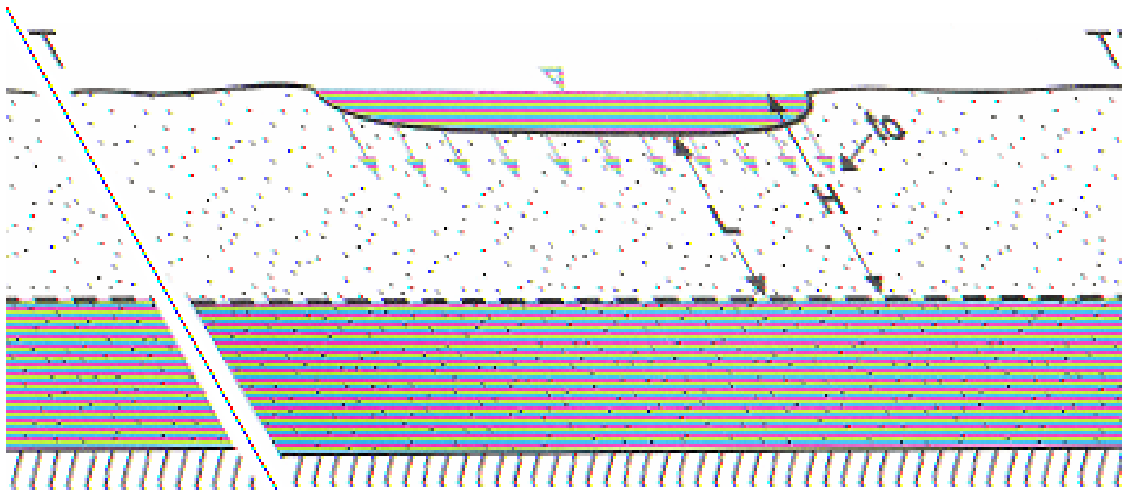
Τα μειονεκτήματα του τεχνητού εμπλουτισμού είναι (Μαριολάκος, 1998, Σούλιος, 2004):

1. απαιτείται συνεχής και συστηματική παρακολούθηση των συστημάτων του
2. υπάρχει κίνδυνος μόλυνσης-ρύπανσης του υπόγειου νερού, αν έστω και επεισοδιακά χρησιμοποιηθεί μολυσμένο-ρυπασμένο νερό και
3. η ελάττωση του ενεργού πορώδους εξαιτίας της έμφραξης των πόρων του υδροφορέα.

Στις επόμενες παραγράφους παρουσιάζονται οι μέθοδοι τεχνητού εμπλουτισμού.

4.11.1 Μέθοδος πλημμυρισμού (κατάκλυσης) επιφανειών

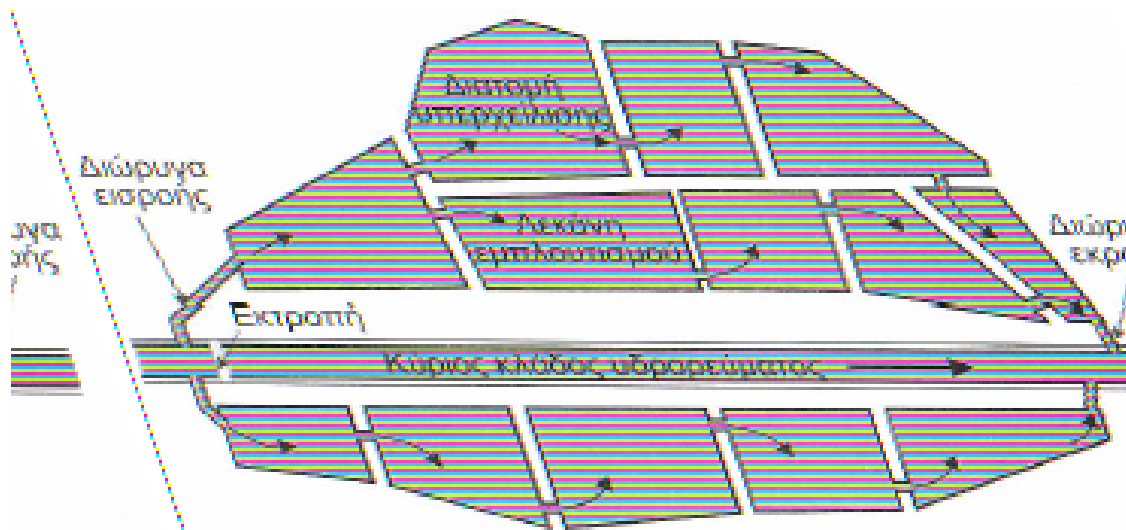
Επιλέγονται κατά το δυνατό επίπεδες επιφάνειες δίπλα ή κοντά σε ποταμό ή χείμαρρο που τα εδαφικά και γεωλογικά στρώματά τους να είναι όσο το δυνατόν περισσότερο περατά όπως φαίνεται στο Σχήμα 7. Το νερό της κατάκλυσης θα προέρχεται από τον πλησιέστερο ποταμό ή χείμαρρο από τον οποίο θα διοχετεύεται με ειδικές κατασκευές με διώρυγες ή θα αντλείται από αυτόν. Η ποσότητα του νερού που θα κατεισδύσει στον υποκείμενο υδροφόρο, δηλαδή η παροχή εμπλουτισμού εξαρτάται από την επιφάνεια κατάκλυσης, το συντελεστή κατακόρυφης περατότητας των στρωμάτων που υπέρκειται του υδροφόρου και από τη χρονική διάρκεια κατά την οποία θα πραγματοποιείται ο τεχνητός εμπλουτισμός.



**Σχήμα 7: Τεχνητός εμπλουτισμός με τη μέθοδο του πλημμυρισμού επιφανειών
(Σούλιος, 2004)**

4.11.2 Μέθοδος λεκανών κατάκλυσης

Κατά την μέθοδο αυτή, δίπλα σε κάποιο ποτάμι δημιουργούνται λεκάνες με αναχώματα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 8, έτσι ώστε να κατακλύζονται με νερό που θα έχει ορισμένο πάχος, άρα αυξημένο υδραυλικό φορτίο, που αυξάνει την ταχύτητα διήθησης. Δεν πρόκειται για μεγάλο φορτίο αλλά για μερικά μέτρα το πολύ. Μπορούμε να έχουμε πολλές διαδοχικές λεκάνες που θα διαχωρίζονται με αναχώματα και θα επικοινωνούν με διώρυγες.



Σχήμα 8: Τεχνητός εμπλουτισμός με κατάκλυση λεκανών (Σούλιος, 2004)

4.11.3 Πλημμυρισμός ξηρών κοιτών ποταμών ή χειμάρρων

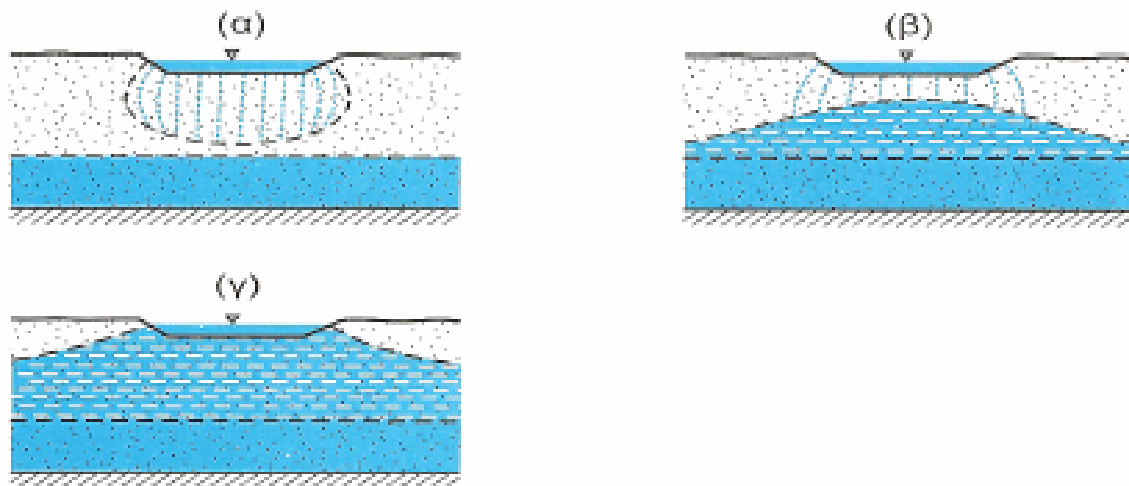
Στην Ελλάδα, αλλά και, σχεδόν, σε όλες τις μεσογειακές χώρες, έχουμε πολλούς χειμάρρους των οποίων η κοίτη έχει νερό μόνο λίγους μήνες το χρόνο. Οι κοίτες των χειμάρρων αποτελούνται κατά κανόνα από χοντρόκοκκο υλικό και συνεπώς είναι πολύ περατές. Επίσης, υπάρχουν ποτάμια μη συνεχούς ροής.

4.11.4 Τεχνητός εμπλουτισμός από τάφρους

Σε πολλές, κυρίως πεδινές, περιοχές υπάρχει πυκνό δίκτυο τάφρων το οποίο κατά την υγρή περίοδο λειτουργούν ως στραγγιστικές. Είναι δυνατό το δίκτυο αυτό κατά την ξηρή περίοδο να κατακλυστεί τεχνητά και από τον πυθμένα του να γίνεται τεχνητός εμπλουτισμός. Ο εμπλουτισμός, αυτός, πρακτικά μπορεί να γίνει σε πεδινές, σχεδόν οριζόντιες περιοχές και έχει ενδεχόμενους κινδύνους πλημμυρών.



Σχήμα 9: Δίκτυο τάφρων (αποστραγγιστικών) στην περιοχή της Σοφιάδας που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τεχνητό εμπλουτισμό



Σχήμα 10: Η εξέλιξη του εμπλουτισμού από μία τάφρο (Σούλιος, 2004)

5. ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΥΦΑΛΜΥΡΙΝΣΗΣ ΠΑΡΑΚΤΙΩΝ ΥΔΡΟΦΟΡΕΩΝ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

5.1 Γενικά

Η Ελλάδα, λόγω του μεγάλου μήκους των ακτών της, παρουσιάζει εξαιρετική ευαισθησία στη θαλάσσια διείσδυση που προέρχεται από:

1. Διαταραχές στην ισορροπία του συστήματος γλυκού – θαλασσινού νερού, που οφείλονται σε ανθρωπογενείς επεμβάσεις σε λεκάνες κοκκωδών ή καρστικών παράκτιων σχηματισμών
2. Ιδιαιτερότητες της γεωλογικής δομής (καρστική διεργασία – επίπεδο βάσης του καρστ)

Η υφαλμύρινη των παράκτιων καρστικών υδροφόρων είναι δυνατόν να λάβει χώρα υπό τα εξής σενάρια:

- Όταν καρστικοί αγωγοί βρίσκονται σε υδραυλική επικοινωνία με τη θάλασσα σε όλο τους το μήκος
- Όταν το στεγανό διάφραγμα ανάμεσα στο καρστικό σύστημα και τη θάλασσα διαταραχθεί κατά θέσεις από τη διάβρωση ή τον τεκτονισμό
- Όταν το στεγανό διάφραγμα είναι πολύ ρηχό, οπότε η κυκλοφορία γίνεται κάτω από αυτό

Οι παραπάνω μηχανισμοί μπορούν να οδηγήσουν και σε αυτογενή υφαλμύρινη, χωρίς τη ύπαρξη ανθρώπινης δραστηριότητας.

Στην Ελλάδα η κύρια πηγή κάλυψης των αναγκών σε γλυκό νερό είναι τα υπόγεια νερά. Η χρήση του νερού γίνεται κυρίως για πόση και άρδευση καθώς επίσης και για την κάλυψη των τουριστικών και βιομηχανικών αναγκών. Στις περισσότερες

παράκτιες περιοχές η οικονομία βασίζεται κυρίως στον τουρισμό και τη γεωργία. Ιδιαίτερα τους καλοκαιρινούς μήνες, οι απαιτήσεις σε νερό είναι ιδιαίτερα υψηλές με αποτέλεσμα την υπεράντληση των υπόγειων υδροφόρων. Το γεγονός αυτό έχει ως συνέπεια την υφαλμύρινη των υδροφόρων στρωμάτων και την υποβάθμιση της ποιότητας του γλυκού νερού, με αποτέλεσμα να είναι ακατάλληλο για κάθε χρήση.

Είναι λοιπόν φανερό, ότι η μελέτη του φαινομένου της υφαλμύρινης των παράκτιων υδροφόρων είναι πολύ σημαντική για την Ελλάδα λόγω της μεγάλης ακτογραμμής και των κοινωνικοοικονομικών επιπτώσεων στις παράκτιες περιοχές. Παρακάτω παρουσιάζονται περιοχές με διαπιστωμένα προβλήματα θαλάσσιας διείσδυσης.

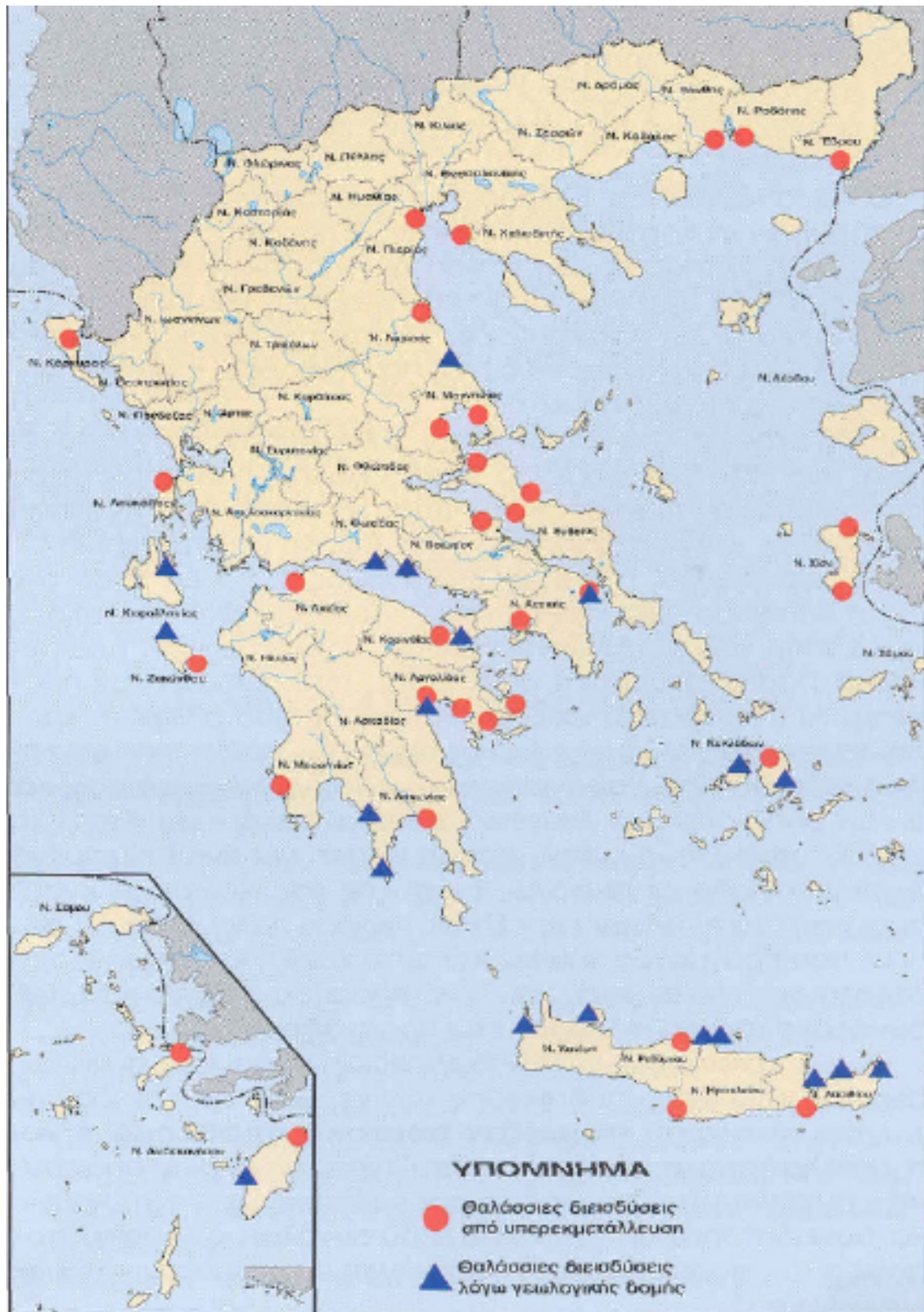
5.2 Παραδείγματα υφαλμύρινης παράκτιων υδροφορέων στην Ελλάδα

Στην ηπειρωτική Ελλάδα η υφαλμύρινη των υπόγειων υδάτων διαπιστώθηκε για πρώτη φορά στο Αργολικό πεδίο στα τέλη της δεκαετίας του '50. Από τότε μέχρι και σήμερα η κατάσταση δεν έχει αντιμετωπιστεί ούτε καλύτερευσει, καθώς το φαινόμενο αυτό συναντάται στις περισσότερες παράκτιες περιοχές της χώρας και απειλεί με ερημοποίηση την καλλιεργούμενη γη. Σε μία συνοπτική καταγραφή των υφάλμυρων περιοχών φαίνεται η πραγματική διάσταση του φαινομένου, που είναι ιδιαίτερα έντονο στις ανατολικές ακτές της Ελλάδας. Η αναφορά στις υφάλμυρες περιοχές γίνεται ξεχωριστά για κάθε γεωγραφικό διαμέρισμα.

Στη Θράκη και τη Μακεδονία, από τα ανατολικά προς τα δυτικά, ως προβληματικές περιοχές χαρακτηρίζονται τα Δέλτα των ποταμών Έβρου, Νέστου και Λίσσου, γενικά η παράκτια περιοχή ανάμεσα στο Νέστο ως τη λίμνη Μητρικού και οι παράκτιες περιοχές της Νέας Καρβάλης, της Ελευθερούπολης και της Νέας Περάμου. Στη συνέχεια, ιδιαίτερα προβλήματα εμφανίζονται σχεδόν σε όλες τις ακτές της Χαλκιδικής, που παρουσιάζουν έντονη τουριστική ανάπτυξη. Όσον αφορά τη λεκάνη του Ανθεμούντα, σύμφωνα με πρόσφατες μελέτες της Αναπτυξιακής Εταιρείας Ανατολικής Θεσσαλονίκης «Ανατολική Α.Ε.» η στάθμη των υπόγειων νερών έχει κατέβει την τελευταία δεκαετία περισσότερο από δέκα μέτρα, ενώ το έλλειμμα νερού

που παρουσιάζεται κάθε χρόνο είναι της τάξης των 17.400.000 m³ (Γιαννουλόπουλος κ.α., 2002).

Σύμφωνα με έρευνες του ΙΓΜΕ η υφαλμύρινη έχει εισχωρήσει στο υπέδαφος του δρόμου Θεσσαλονίκης - Χαλκιδικής, ενώ ταυτόχρονα οι περιοχές πλησίον του δρόμου αναπτύσσονται ιδιαίτερα στο γεωργικό και τον κτηνοτροφικό τομέα και η οικιστική ανάπτυξη αυξάνεται επίσης ραγδαία. Αποτέλεσμα όλων των παραπάνω είναι η υπεράντληση των υδάτων, με φυσικό επακόλουθο, τα υδατικά προβλήματα, τα οποία αποτελούν τροχοπέδη στην ανάπτυξη αυτή. Στην Περαία, η υπεράντληση των υδάτων εικάζεται ότι επιδεινώνει τις καθιζήσεις του εδάφους που συμβαίνουν εκεί τα τελευταία χρόνια (Voudouris et al, 2005, Moujaber et al, 2006).



Χάρτης 1: Υφάλμυρα υπόγεια νερά θαλάσσιας διείσδυσης (Γιαννουλόπουλος κ.ά., 2002)

Φαινόμενα υφαλμύρινσης παρατηρούνται και στη δυτική πλευρά του Νομού Θεσσαλονίκης, στις βιομηχανικές περιοχές Σίνδου - Καλοχωρίου. Ο ποταμός Αξιός, εκτός από τη ρύπανση εξαιτίας υψηλών συγκεντρώσεων σιδήρου, ψευδαργύρου, μολύβδου, καδμίου, βαρίου, νικελίου, ουρανίου και αρσενικού εμφανίζει και ρύπανση λόγω υψηλών συγκεντρώσεων αλάτων. Τέλος, προβλήματα εμφανίζονται και στην παράκτια ζώνη του Νομού Πιερίας (Ghabayen et al, 2006).

Στη Θεσσαλία, τα πλέον σοβαρά προβλήματα εμφανίζονται στο δέλτα του Πηνειού, στην περιοχή Ριζόμυλου Μαγνησίας και επεκτείνονται προς τη Λάρισα, στην πεδιάδα του Αλμυρού και στην περιοχή του Βόλου.

Στη Στερεά Ελλάδα, φαινόμενα υφαλμύρινσης παρατηρήθηκαν στη λεκάνη του Σπερχειού και στην περιοχή Πελασγίας στη Φθιώτιδα, ενώ σοβαρότατο πρόβλημα αντιμετωπίζει το λεκανοπέδιο της Αττικής. Στην Αττική προβληματικές περιοχές θεωρούνται οι ακόλουθες: Άγιοι Απόστολοι, Κάλαμος, κάμπος Μαραθώνα, περιοχή Μαρκόπουλου, Σπάτα, Βραυρώνα, Πόρτο Ράφτη, παραλιακή ζώνη από Σούνιο μέχρι Κορωπί, Αγία Μαρίνα, Βάρη, Βάρκιζα, Βουλιαγμένη, Βούλα. Επίσης οι περιοχές Γλυφάδα, Φάληρο, Καλλιθέα, Πειραιάς, Δραπετσώνα, Κερατσίνι, Ασπρόπυργος, Ελευσίνα, Θριάσιο, Νέα Πέραμος και Μέγαρα (Κουμαντάκης, 1998, Μαριολάκος, 1998, Χαρμανίδης 1998).

Οι περιοχές της Πελοποννήσου που έχουν υποστεί υφαλμύριση εκτός από το Αργολικό πεδίο είναι οι βόρειες παραλιακές ακτές της από την Κορινθία ως την Αχαΐα και ιδίως η βόρεια και βορειοανατολική Κορινθία και η βόρεια και βορειοδυτική Αχαΐα. Επίσης συναντώνται προβλήματα στην περιοχή της Ερμιόνης και το Πόρτο Χέλι. Στην Καλαμάτα το πρόβλημα είναι υπαρκτό αλλά όχι τόσο έντονο, ενώ υφαλμύριση έχει διαπιστωθεί και στην Τριφυλία. Τέλος, ως υφάλμυρες αναφέρονται και οι περιοχές Αστέρος και Λεωνίδιο (Πουλοβασίλης κ.ά, 1999, Pulido - Leboeuf et al, 2003).

Στη Δυτική Ελλάδα και κυρίως στην Ήπειρο υπαρκτό πρόβλημα υπάρχει στο Νομό Θεσπρωτίας, στις περιοχές Σαγράδα, Πλασταριά και στα Σίβα, ενώ στο Νομό Πρέβεζας υφάλμυρες ακτές συναντώνται ανάμεσα στην πόλη της Πρέβεζας και τη Νικόπολη. Αξίζει να σημειωθεί ότι υφάλμυρα υπόγεια και επιφανειακά νερά

συναντώνται στις πηγές Σαντινίκου, Περάματος και Χανόπουλο και Περάνθη Άρτας, μόνο που η μεγάλη συγκέντρωση ιόντων χλωρίου και νατρίου οφείλεται στην επαφή των υπόγειων υδροφορέων με δόμους ορυκτού άλατος (Demirel, 2004).

Οι λόγοι που οδηγούν στην υφαλμύριση οφείλονται περισσότερο στην εντατική καλλιέργεια των παράκτιων πεδιάδων και στην υπεράντληση των υδάτων εξαιτίας των πυκνοκατοικημένων παράκτιων περιοχών. Το μέσο ετήσιο ύψος βροχής δεν επηρεάζει σε τόσο μεγάλο βαθμό την πτώση του υδροφόρου ορίζοντα (Καλλέργης, 2000).

Στα παρακάτω Κεφάλαια περιγράφονται αναλυτικά ανά περιοχή τα φαινόμενα υφαλμύρισης που παρατηρούνται σε αυτή.

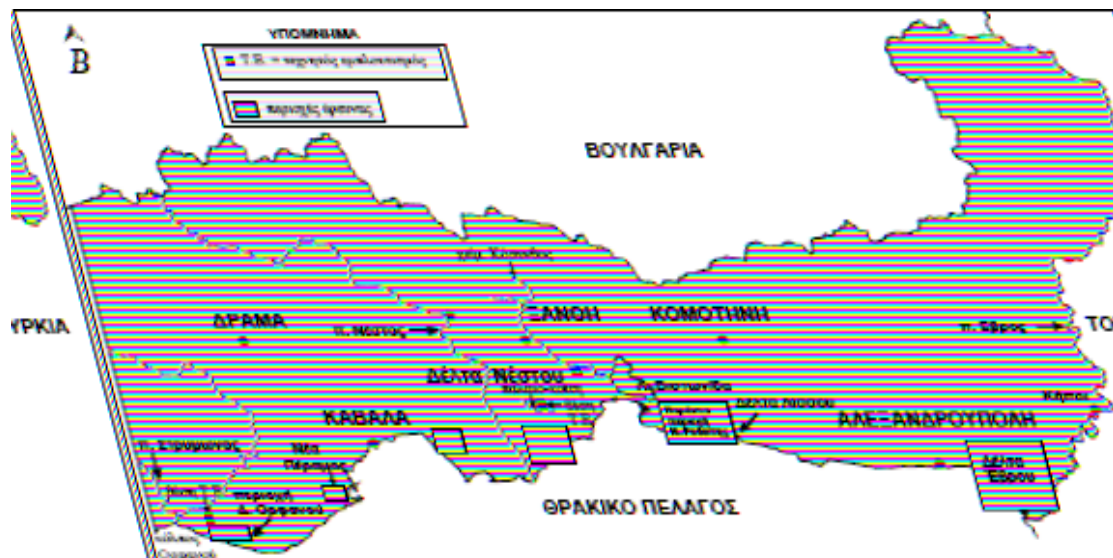
5.3 Υφαλμύριση στην Μακεδονία και τη Θράκη

Ο έντονος τεκτονικός διαμελισμός της Ανατολικής Μακεδονίας και Θράκης, έχει ευνοήσει τη δημιουργία εκτεταμένων παράκτιων πεδίων, όπως το πεδίο το κόλπου Ορφανού Καβάλας, το Δέλτα Νέστου, το νότιο πεδίο Ροδόπης και το Δέλτα Έβρου, πολλά από τα οποία φιλοξενούν εύφορα εδάφη με δυναμικά υπόγεια υδροφόρα στρώματα. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με τις ήπιες κλιματολογικές συνθήκες της περιοχής ευνόησε τη δημιουργία σημαντικών εστιών οικονομικής ανάπτυξης. Η παρουσία όμως της θάλασσας με τη συνεχή διακύμανση του επιπέδου της και η ευνοϊκή γεωλογική δομή των πεδίων αυτών που επιτρέπει την άμεση υδραυλική επικοινωνία των παράκτιων υδροφόρων με τη θάλασσα, σε συνδυασμό με την υπερεκμετάλλευση των υπόγειων νερών συνέβαλαν στην ενεργοποίηση του φαινομένου της θαλάσσιας διείσδυσης.

Η εικόνα που εμφανίζουν τα πεδία αυτά είναι ιδιαίτερα ανησυχητική επειδή η θάλασσα έχει διεισδύσει αρκετά χιλιόμετρα προς την ενδοχώρα σε πολλές θέσεις με αποτέλεσμα να καθίσταται προβληματική και ελλειμματική η ύδρευση αυτών των περιοχών. Από αρδευτικής άποψης τα προβλήματα που προκαλούνται είναι πολλαπλά. Παρουσιάζεται έλλειψη ικανής ποσότητας νερού, λόγω κυρίως της έλλειψης στοιχειωδών έργων υποδομής αρδευτικής ανάπτυξης, όπως έργων εκμετάλλευσης των επιφανειακών υδάτινων πόρων. Αυτό οδηγεί είτε στη ποσοτικά

ελλειμματική άρδευση είτε στην κάλυψη των αρδευτικών αναγκών με υφάλμυρο νερό με αποτέλεσμα την αύξηση της αλατότητας των εδαφών (Διαμαντής κ.ά., 1998).

Σημαντικές εκτάσεις που συνεχώς αυξάνονται σε μέγεθος έχουν καταστεί ακατάλληλες για καλλιέργεια. Αναλυτικά η κατάσταση για τα σημαντικότερα πεδία από ανατολικά προς τα δυτικά έχει ως εξής :



Σχήμα 11: Περιοχές της Ανατ. Μακεδονίας και Θράκης όπου παρατηρήθηκε το φαινόμενο της θαλάσσιας διείσδυσης (Πεταλάς κ.ά., 2002)

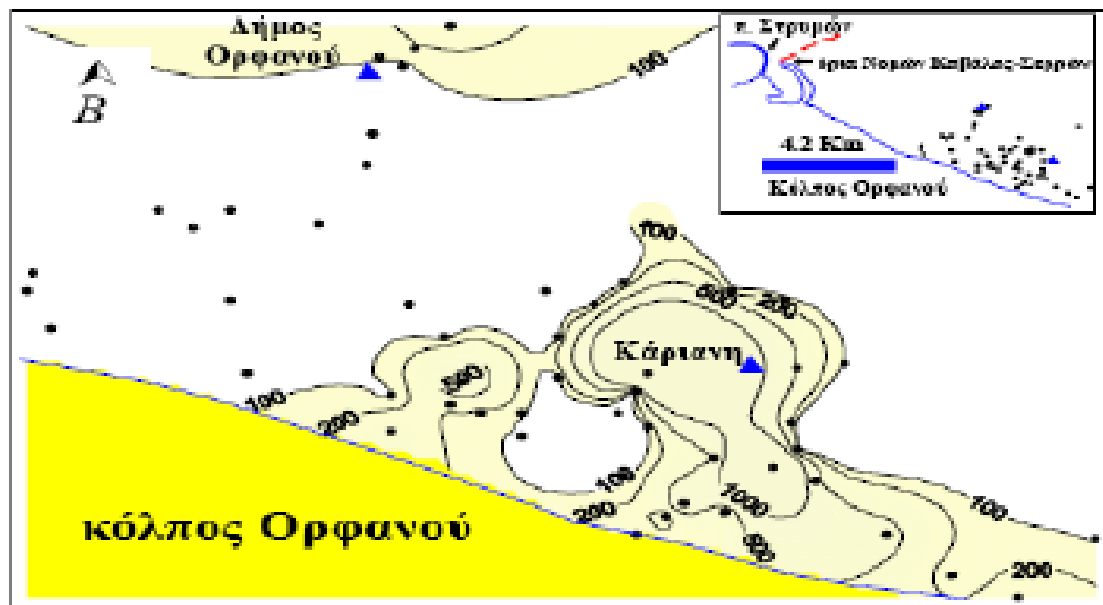
5.3.1 Πεδίου κόλπου Ορφανού Καβάλας

Πρόκειται για ένα πεδινό πεδίο, το οποίο τα τελευταία χρόνια αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους οικονομικούς πνεύμονες του νομού, λόγω της μεγάλης και συστηματικής καλλιέργειας επιτραπέζιων εξαγωγίμων σταφυλιών.

Η εντατική καλλιέργεια της αμπέλου απαιτεί μεγάλες ποσότητες νερού ενώ η οικονομική απόδοσή τους έχει οδηγήσει στην αύξηση των εκτάσεων που

καταλαμβάνουν και κατά συνέπεια και στην υπερβολική αύξηση των αντλούμενων ποσοτήτων νερού. Η ανόρυξη μεγάλου αριθμού γεωτρήσεων χωρίς προηγούμενη υδρογεωλογική μελέτη, έχει διαταράξει το υδραυλικό ισοζύγιο με αποτέλεσμα η στάθμη των υπόγειων νερών μιας μεγάλης παράκτια έκτασης να βρίσκεται συνεχώς κάτω από τη στάθμη του επιπέδου της θάλασσας. Αποτέλεσμα αυτού του γεγονότος είναι η συνεχής υφαλμύριση των υπόγειων υδροφορέων. Η κατάσταση αυτή έγινε αντιληπτή με μετρήσεις της ηλεκτραγωγιμότητας στο σύνολο σχεδόν των υδρογεωτρήσεων και για διαδοχικές χρονικές περιόδους.

Συμπερασματικά προκύπτει ότι η θαλάσσια διείσδυση στην περιοχή του κόλπου Ορφανού οφείλεται σχεδόν αποκλειστικά στην υπερεκμετάλλευση των υπόγειων νερών σε συνδυασμό με την έλλειψη επαρκούς τροφοδοσίας από τις μικρές λεκάνες απορροής των χειμάρρων που καταλήγουν στην παράκτια περιοχή. (1)

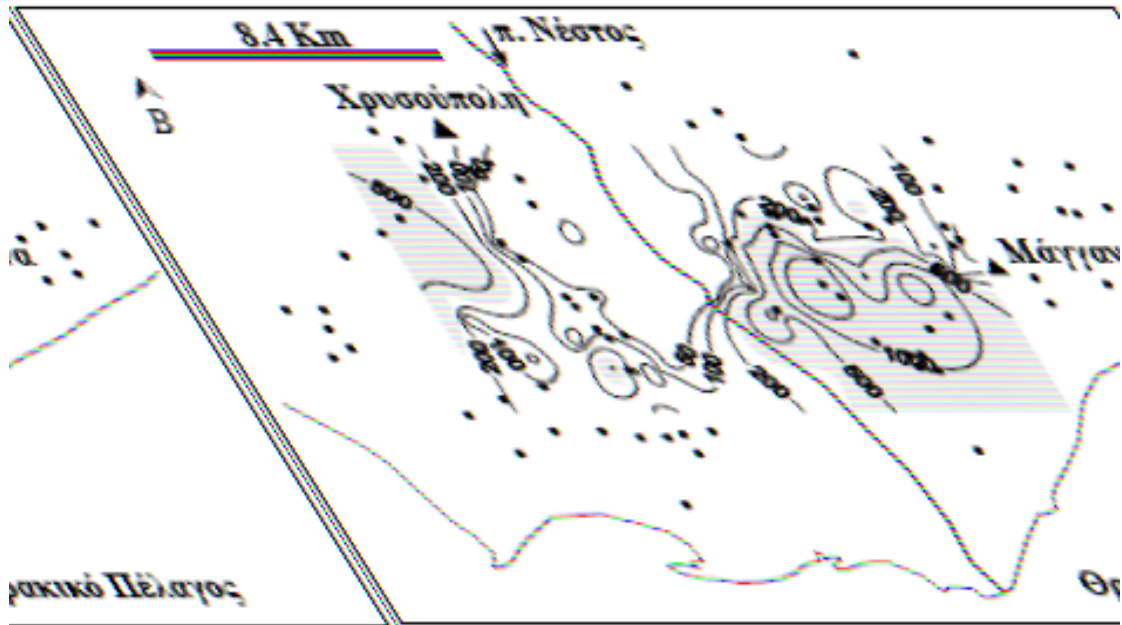


Σχήμα 12: Κατανομή του Cl- (mg/l) στα υπόγεια νερά της περιοχής του Δήμου Ορφανού-Ν.Καβάλας (Πεταλάς κ.ά., 2002)

5.3.2 Δέλτα του ποταμού Νέστου

Η υποβάθμιση του Δέλτα του ποταμού Νέστου, όπως και αυτή του Δέλτα του ποταμού Έβρου, αποτελούν τα πιο χαρακτηριστικά παραδείγματα αλλοίωσης του υδρολογικού καθεστώτος της αλληλεπίδρασης υπόγειων και επιφανειακών νερών, με άμεση συνέπεια την ενεργοποίηση του φαινομένου της θαλάσσιας διείσδυσης. Ο περιορισμός των υδροβιότοπων, με στόχο να αυξηθούν οι καλλιεργούμενες εκτάσεις, και ο εγκιβωτισμός και η ευθυγράμμιση του ποταμού Νέστου, επέφεραν δραστικές αλλαγές στο υδρολογικό καθεστώς του ανατολικού τμήματος, ενώ πολύ λίγο επέδρασαν στο δυτικό τμήμα. Οι κοίτες στο ανατολικό τμήμα αποκόπηκαν τελείως από τον ποταμό. Η θαλάσσια διείσδυση είναι ιδιαίτερα έντονη τα τελευταία χρόνια, όπως και οι δραματικές συνέπειές της στους γλυκούς υδροβιότοπους. Όπως φαίνεται και στο χάρτη κατανομής των χλωριόντων υπάρχει μια σημαντικού μήκους και έκτασης αλμυρή σφήνα στα υπόγεια νερά του ανατολικού Δέλτα και μόνο μια περιορισμένης έκτασης αλμυρή σφήνα στο δυτικό τμήμα του Δέλτα.

Και στις δύο περιπτώσεις η ποιότητα των υπόγειων νερών έχει επηρεαστεί από τη γεωθερμία και την παρουσία εγκλωβισμένων αλμυρών παλαιότερων περιόδων. Η τεχνητή ανάμιξη νερών διαφορετικών υδροφόρων μέσω των γεωτρήσεων είναι και εδώ υπαρκτή. Η βασική γραμμή του Cl⁻ στα γλυκά υπόγεια νερά είναι 50 mg/l. Πάνω από το όριο αυτό αρχίζει η επιβάρυνση σε άλατα (Πεταλάς κ.ά., 2002).



Σχήμα 13: Κατανομή του Cl⁻ (mg/l) στα υπόγεια νερά του Δέλτα του ποταμού Νέστου

5.3.3 Δέλτα του ποταμού Έβρου

Θα πρέπει καταρχήν να γίνει μια διάκριση στο τμήμα του Δέλτα που εντοπίζεται ανατολικά του χειμάρρου Λουτρού με ελάχιστες γεωτρήσεις και σε εκείνο δυτικά του χειμάρρου όπου παρατηρείται ένας αξιόλογος αριθμός αρδευτικών γεωτρήσεων. Γενικά πρόκειται για μία πεδινή περιοχή, όπου σε απόσταση 4-5 Km από την ακτή το υψόμετρο σπάνια υπερβαίνει τα +50 cm και πολλά τμήματά της βρίσκονται κάτω από το επίπεδο της θάλασσας. Την περιοχή στο παρελθόν διέσχιζαν πέντε κοίτες ποταμών, οι οποίες τροφοδοτούσαν και κάλυπταν με γλυκό νερό τις ευρύτερές τους περιοχές, το οποίο στη συνέχεια εμπλούτιζε το φρεάτιο ορίζοντα εμποδίζοντας τη θαλάσσια διείσδυση. Σήμερα νερό ρέει εποχιακά μόνο στη νέα (τεχνητή) κοίτη του Έβρου και στο χείμαρρο του Λουτρού. Η περιοχή υπόκειται σε

συστηματική αποστράγγιση από το 1970 μέσω δικτύου βαθιών αποστραγγιστικών καναλιών, το οποίο λόγω του χαμηλού υψομέτρου της περιοχής, κατά το μεγαλύτερο διάστημα του έτους κατακλύζεται από αλμυρά νερά, τα οποία και τροφοδοτούν τον υδροφόρο ορίζοντα. Η κοίτη του Έβρου και μέχρι το ύψος των Κήπων συχνά καταλαμβάνεται από αλμυρά νερά ως συνέπεια της δράσης της παλίρροιας. Ο φρεάτιος ορίζοντας του Δέλτα εμφανίζει μεν υψηλή υδροστατική στάθμη, αλλά στο μεγαλύτερο τμήμα του είναι υφάλμυρος κυρίως λόγω της απουσίας διαχείρισης των υδατικών πόρων στο ανατολικό Δέλτα. Οι ενέργειες που οδήγησαν, σε συνδυασμό με τις ευνοϊκές υδρογεωλογικές και τοπογραφικές συνθήκες, στην κατάσταση αυτή, είναι:

1. η εκβάθυνση της κοίτης και ο περιορισμός της ροής του Έβρου λόγω συγκράτησης του νερού στα ανάντη για την κάλυψη αρδευτικών αναγκών,
2. ο περιορισμός της ροής του Έβρου σε μια εγκιβωτισμένη και ευθυγραμμισμένη κοίτη και
3. η λειτουργία ενός άστοχα σχεδιασμένου αποστραγγιστικού δικτύου.

Η χωρίς επιστημονικά κριτήρια ανθρώπινη παρέμβαση διατάραξε δραστικά το καθεστώς φυσικής αλληλεπίδρασης υπόγειων και επιφανειακών νερών με αποτέλεσμα τόσο στην επιφάνεια όσο και σε βάθος να κυριαρχούν αλμυρά ή υφάλμυρα νερά. Η κατάσταση στο δυτικό τμήμα του Δέλτα μπορεί να βελτιωθεί με επαναφορά των αντλήσεων στα φυσιολογικά επίπεδα ή και με την εφαρμογή τεχνητού εμπλουτισμού. Στο ανατολικό τμήμα η αντιμετώπιση της θαλάσσιας διείσδυσης αποτελεί σύνθετο πρόβλημα, επειδή η παρουσία επαρκούς ροής γλυκού νερού στον Έβρο συνιστά διακρατικό ζήτημα, δεδομένου ότι μόνο το 6,5 % της συνολικής λεκάνης του ποταμού ανήκει στην Ελλάδα. Παρακάτω παρουσιάζεται η κατανομή των χλωριόντων στα υπόγεια νερά του Δέλτα του (Πεταλάς κ.ά., 2002).



Σχήμα 14: Κατανομή του Cl- (mg/l) στα υπόγεια νερά του Δέλτα του ποταμού Έβρου

4.2.4 Νέα Κεσσάνη

Το υδροφόρο δίκτυο της Νέας Κεσσάνης στο Νομό Ξάνθης αποτελείται από μερικώς υπό πίεση υδροφόρους και τροφοδοτείται κυρίως, τουλάχιστον κοντά στις ακτές, με νερό της θάλασσας. Ο ιδιαίτερος ρόλος της τεκτονικής με τη μορφή ρηγμάτων που παίζουν το ρόλο του αγωγού, όσον αφορά την υδραυλική επικοινωνία του συστήματος με τη θάλασσα, είναι καθοριστικός στην όλη διαδικασία. Η εκτροπή του χειμάρρου Κόσυνθου προς τη λίμνη Βιστωνίδα απέκοψε το υδροφόρο σύστημα από την κύρια πηγή τροφοδοσίας του.

Η υπερεκμετάλλευση των υπόγειων νερών της περιοχής σε συνδυασμό με τη μείωση της τροφοδοσίας τους λόγω δυσμενών κλιματικών αλλαγών (μείωση των βροχοπτώσεων κατά 30 % την τελευταία εικοσαετία σε σχέση με αυτές της περιόδου 1950-1981), ενέτεινε την εκδήλωση του φαινομένου της θαλάσσιας διείσδυσης (Πεταλάς κ.ά., 2002).

4.2.5 Δέλτα του ποταμού Λίσσου - Παράκτια περιοχή Νομού Ροδόπης

Ανάλογες με αυτές του ποταμού Έβρου παρουσιάζονται οι συνθήκες και στο Δέλτα του ποταμού Λίσσου. Ο φρεάτιος υδροφορέας της περιοχής με την υπερεκμετάλλευσή του λόγω της δραστηρικής ανθρώπινης παρέμβασης έγινε αποδέκτης σύγχρονης θαλάσσιας διείσδυσης, με την υποχώρηση της στάθμης σε συνδυασμό με το χαμηλό υψόμετρο ($< 4 \text{ m}$). Ένα τεχνητό σύστημα επιβάρυνσης των υπόγειων νερών, με τη μορφή ενός άστοχα σχεδιασμένου αποστραγγιστικού συστήματος της περιοχής, εμπλουτίζει με θαλάσσιο νερό τον υδροφόρο. Οι άστοχες παρεμβάσεις με τη μορφή εκτροπής, ευθυγράμμισης, εγκιβωτισμού και εκβάθυνσης του ποταμού Λίσσου στέρησαν από τον φρεάτιο υδροφόρο της περιοχής την άμεση τροφοδοσία.

Ο υπό πίεση υδροφόρος ορίζοντας της ίδιας περιοχής τροφοδοτείται τεχνητά με αλμυρό νερό από τον φρεάτιο ορίζοντα μέσω γεωτρήσεων που επιτρέπουν (λόγω κατασκευαστικών αστοχιών) την κατακόρυφη υδραυλική επικοινωνία φυσικώς απομονωμένων υδροφόρων. Κατά την ξηρή περίοδο που οι ποταμοί δεν έχουν ροή, η θάλασσα διεισδύει σε σημαντική απόσταση προς την ενδοχώρα. Οι διαδικασίες αυτές τροφοδοτούν τον φρεάτιο υδροφόρο ορίζοντα με αλμυρό νερό καθιστώντας τον

υφάλμυρο σε μεγάλο τμήμα του. Το μήκος του άξονα της αλμυρής σφήνας έχει υπολογιστεί ότι ξεπερνά τα 10 Km (Πεταλάς κ.ά., 2002).

4.3 Υφαλμύριση το Αργολικό πεδίο

Η υφαλμύριση στο Αργολικό πεδίο άρχισε να γίνεται αισθητή στο τέλος της δεκαετίας του 1950 μετά από την αλματώδη ανάπτυξη των αρδευόμενων καλλιεργειών και ιδιαίτερα των εσπεριδοειδών. Εντονότερη ήταν στις ανατολικές περιοχές της Αργολικής πεδιάδας, στα όρια των οικισμών Νέας Τίρυνθας, και Άριας καθώς και ανατολικότερα στην αλλουβιακή περιοχή Ασίνης - Τολού. Το φαινόμενο αυτό είχε άμεσες συνέπειες τόσο στο φυσικό περιβάλλον της περιοχής όσο και στο κοινωνικό και στο οικονομικό.

Στις αρχές του 1960 σημαντικές εκτάσεις εσπεριδοειδών στις παραπάνω περιοχές παρουσίασαν συμπτώματα ξήρανσης, λόγω αλατότητας του νερού άρδευσης, ενώ βασικό πρόβλημα σχεδόν κάθε αγροτικού νοικοκυριού, ιδιαίτερα στις παράκτιες περιοχές ήταν η αναζήτηση καλής ποιότητας υπόγειου νερού για την κάλυψη των αρδευτικών του αναγκών.

Από το παρακάτω Σχήμα 15 προκύπτει ότι αρχικά η υφαλμύριση άρχισε από το νοτιοανατολικό τμήμα του Αργολικού πεδίου και επεκτάθηκε σταδιακά καλύπτοντας περίπου το ένα τρίτο της συνολικής του έκτασης. Μετά από επεξεργασία των σχετικών μετρήσεων εκτιμήθηκε ότι την περίοδο εκείνη η ταχύτητα του μετώπου υφαλμύρισης ήταν 500 μέτρα ετησίως. Σε ό,τι αφορά την κατακόρυφη διεύθυνση, η επεξεργασία των διαθέσιμων στοιχείων έδειξε ότι ο μηχανισμός της υφαλμύρισης ενεργοποιήθηκε αρχικά σε βάθη 20 - 50 μέτρων, τα οποία αντιστοιχούσαν και στο μέσο βάθος εκμετάλλευσης των υδροφόρων σχηματισμών εκείνη την εποχή (1965 - 1975). Το γεγονός, αυτό, σε συνδυασμό με την ανεύρεση καλύτερης ποιότητας νερού σε μεγαλύτερα βάθη οδήγησε αρχικά, τους αγρότες της περιοχής, στην ψευδαίσθηση ότι βαθύτερες γεωτρήσεις θα μπορούσαν να αποδώσουν καλύτερης ποιότητας νερό.

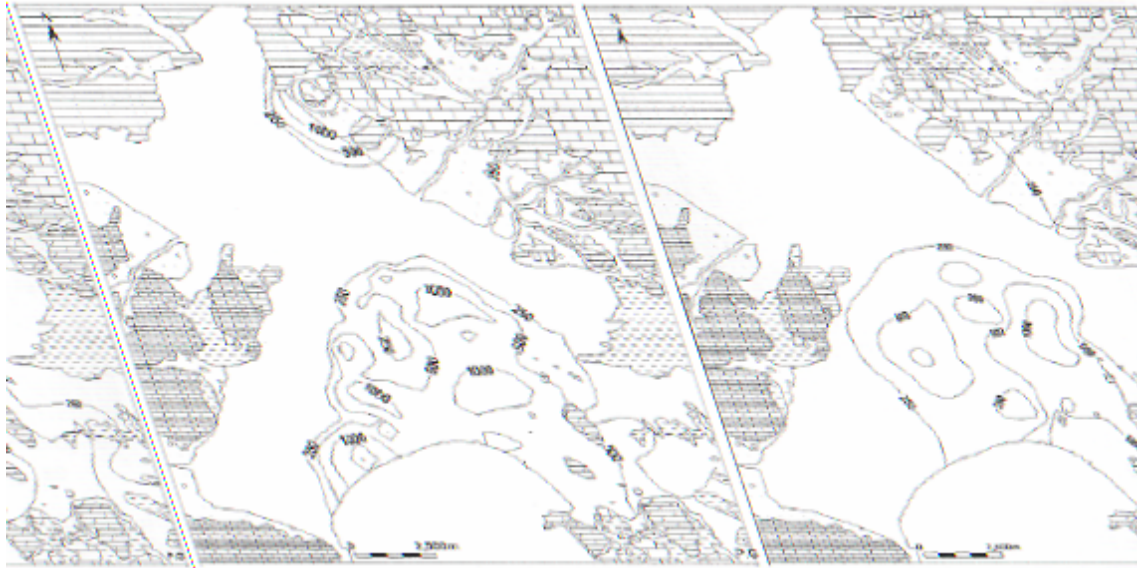
Οι υποθέσεις όμως αυτές είχαν μόνο προσωρινή επιτυχία αφού τελικά και οι βαθύτερες γεωτρήσεις υφαλμυρώθηκαν ταχύτατα. Εκτός από την υφαλμύριση των

υδροφόρων σχηματισμών του Αργολικού πεδίου επισημαίνεται ότι στις ερευνητικές γεωτρήσεις και ιδιαίτερα στα επιφανειακά στρώματα, στον φρεάτιο υδροφόρο σχηματισμό έχουν καταγραφεί συγκεντρώσεις χλωριόντων που κυμαίνονται μεταξύ 35.000 και 40.000 mg/l. Δεδομένου ότι η συγκέντρωση σε χλωρίοντα του θαλάσσιου νερού είναι περίπου 19.000 mg/l προκύπτει ότι οι παραπάνω τιμές είναι σχεδόν διπλάσιες από τις συνήθεις συγκεντρώσεις σε χλωρίοντα του θαλάσσιου νερού. Οι μηδενικές εδαφικές κλίσεις σε συνδυασμό με τη διακύμανση της στάθμης της θάλασσας είχε ως αποτέλεσμα την επαναλαμβανόμενη κατάκλυση των εδαφών αυτών με θαλασσίνο νερό. Στη συνέχεια, αφού βέβαια η στάθμη του υπόγειου νερού βρισκόταν σε βάθος μικρότερο του μισού μέτρου (ελώδεις εκτάσεις) ακολουθούσε έντονη εξάτμιση που είχε ως αποτέλεσμα την απομάκρυνση του νερού και τη συνεχή συσσώρευση αλάτων με συνέπεια συσσώρευση χλωριόντων στο εδαφικό νερό η οποία έφτασε έτσι τις ασυνήθιστα υψηλές τιμές των 35.000 - 40.000 mg/l (Γιαννουλόπουλος κ.ά., 2002).



(α)

(β)



(γ)

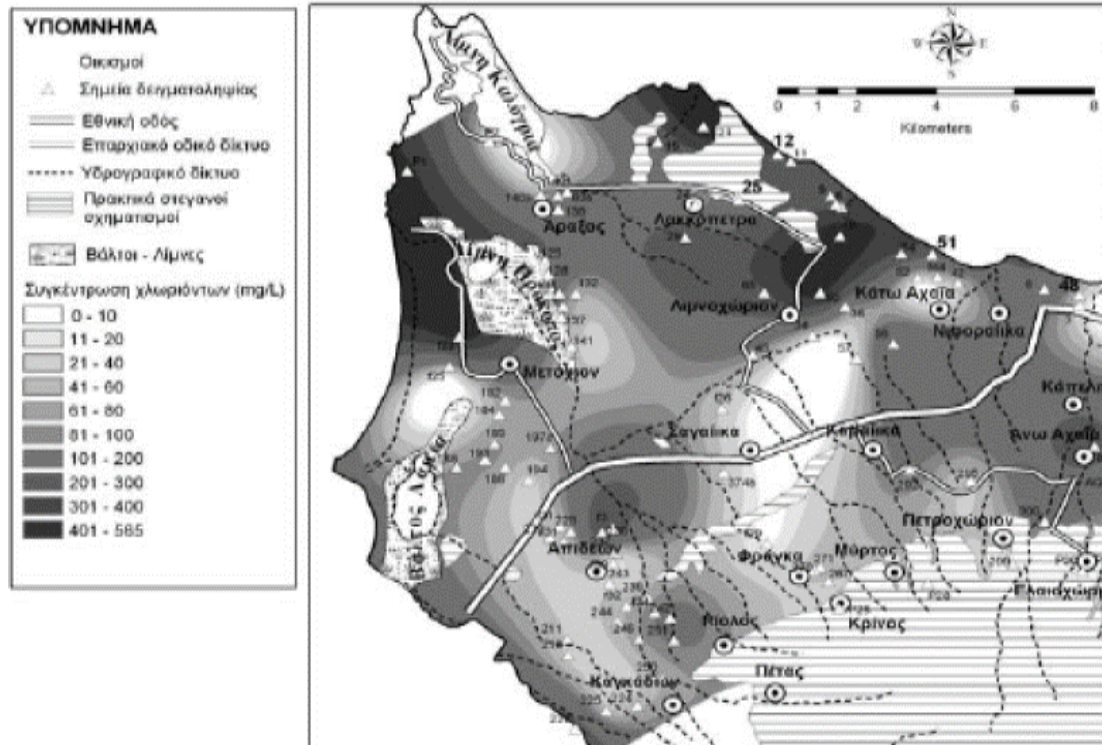
(δ)

Σχήμα 15: Ισογλώριες καμπύλες (hptm) για (α) την Άνοιξη του 1965, (β) την Άνοιξη του 1975, (γ) την Άνοιξη του 1990 και (δ) την Άνοιξη του 2000

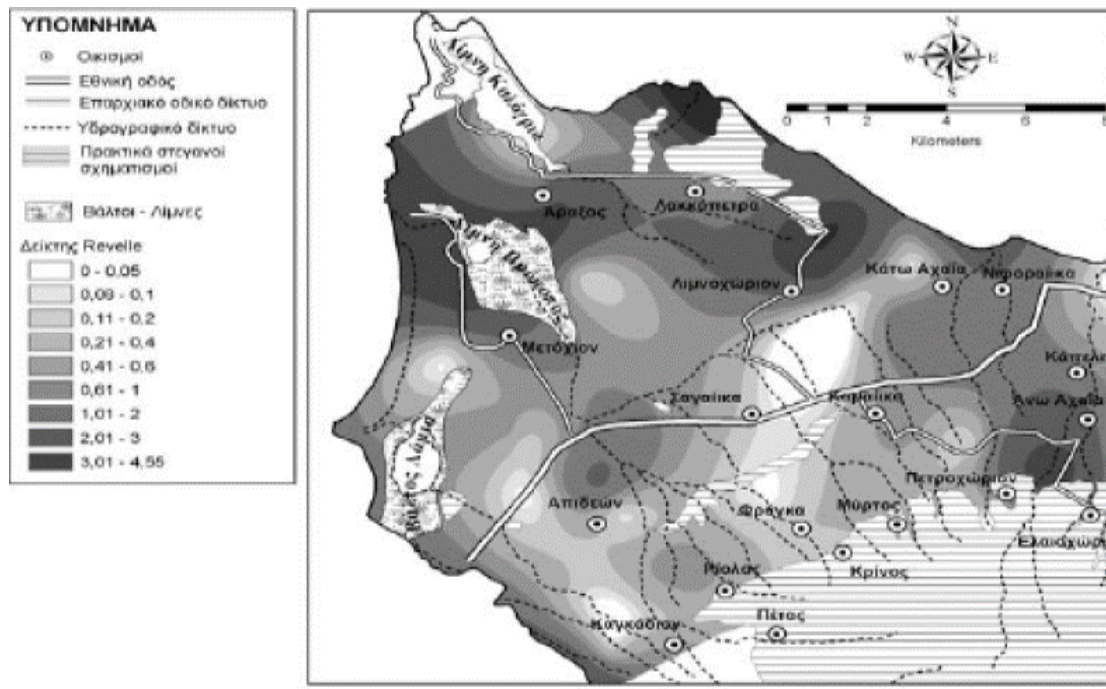
4.4 Υφαλμύριση στην Αχαΐα

Αντίστοιχα φαινόμενα έχουν παρουσιαστεί και στο ΒΔ τμήμα του νομού Αχαΐας. Η περιοχή αυτή είναι αγροτική, ενώ παράλληλα αναπτύσσεται και τουριστικά. Η κάλυψη των υδατικών αναγκών γίνεται κυρίως με την εκμετάλλευση των υπόγειων νερών από μεγάλο αριθμό γεωτρήσεων μεγάλου βάθους. Η εντατική εκμετάλλευση, ιδιαίτερα τις τελευταίες δεκαετίες έχει οδηγήσει σε ποσοτική μείωση με εγκατάσταση αρνητικού ισοζυγίου, καθώς και ποιοτική υποβάθμιση των υπόγειων νερών. Χαρακτηριστικά αναφέρουμε ότι το ποσοστό των καλλιεργούμενων εκτάσεων έχει αυξηθεί από 21,8 % το 1971 σε 42% το 2001.

Το παραπάνω ποσοστό είναι ένα από τα υψηλότερα στην Ελλάδα. Όπως φαίνεται και από τη γεωγραφική κατανομή των χλωριόντων αλλά και του δείκτη Revelle το φαινόμενο της θαλάσσιας διείσδυσης είναι ιδιαίτερα εκτεταμένο στη βορειοδυτική Αχαΐα, όπου εντοπίζονται διάφορα μέτωπα υφαλμύρινης όπως στη Λακόπετρα στον Άραξο και το Μετόχι (Βουδούρης κ.ά., 2004)



Σχήμα 16: Χάρτης κατανομής χλωριόντων (mg/l) στην περιοχή της Αχαΐας



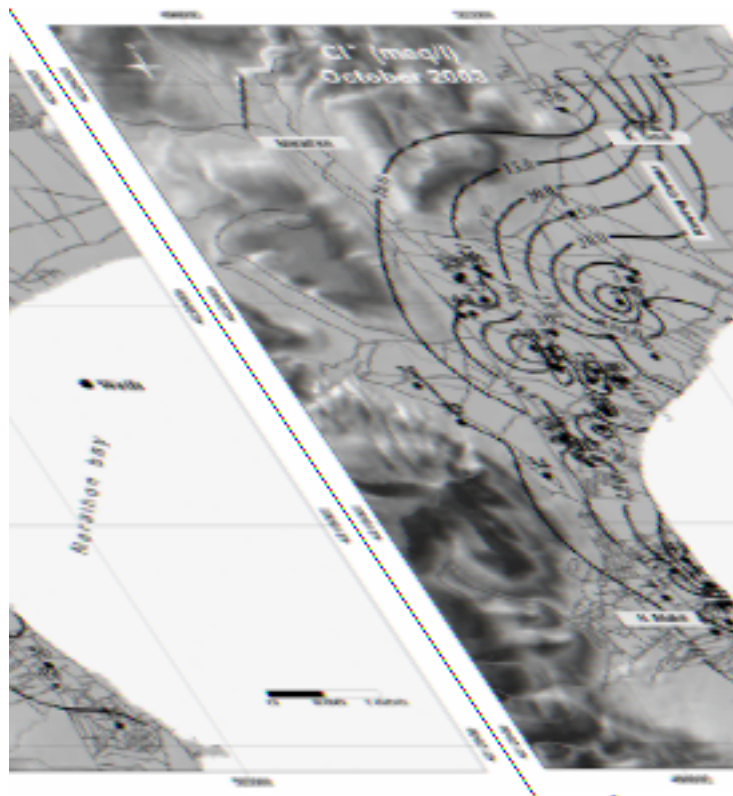
Σχήμα 17: Χάρτης κατανομής του συντελεστή Revelle στην περιοχή της Αχαΐας

4.5 Υφαλμύρινη στο Μαραθώνα

Η αύξηση των αρδευόμενων καλλιεργειών και η εντατική γεωργική δραστηριότητα, αυξάνουν τον κίνδυνο υποβάθμισης του υπόγειου νερού λόγω των υψηλών ρυθμών άντλησής του. Η χρήση υποβαθμισμένης ποιότητας νερού για αρδευτικούς σκοπούς, έχει σαν αποτέλεσμα την μείωση της παραγωγής των καλλιεργειών και την υποβάθμιση των εδαφών.

Είναι προφανές ότι η ποιότητα του υπόγειου νερού είναι πολύ υποβαθμισμένη λόγω της υπεράντλησης του υδροφόρου, της ανοικτής επικοινωνίας του υδροφόρου και της θάλασσας για αρκετά μεγάλο μήκος και του χαμηλού βαθμού βροχόπτωσης. Η περιοχή όπου παρατηρείται περισσότερο η υφαλμύρινη είναι και η περιοχή με την

έντονη γεωργική δραστηριότητα. Αντιθέτως στην περιοχή της Νέας Μάκρη όπου οι οικιστική ζώνη έχει επεκταθεί με ταυτόχρονη μείωση των καλλιεργειών, η ποιότητα του νερού είναι πολύ καλύτερη. Συγκριτικά με τη συμπεριφορά του υδροφόρου τον Οκτώβρη και τον Μάιο παρατηρούμε ότι η ποιότητα του υπόγειου νερού τον Μάιο (τέλος της υγρής περιόδου) δεν παρουσιάζει σημαντική βελτίωση σε σχέση με τον Οκτώβριο. Αυτό σημαίνει ότι ο φυσικός εμπλουτισμός του υδροφόρου δεν είναι επαρκής για να βελτιώσει σημαντικά την ποιότητα του νερού.





Σχήμα 18: Ισοχλώριες καμπύλες (meq/l) για τον Οκτώβριο 2003 και το Μάϊο 2004

4.6 Υφαλμύρινη στην υπόλοιπη Ελλάδα

Επίσης προβλήματα υφαλμύρινης εντοπίζονται και στις παρακάτω περιοχές:

Δυτική Μεσσηνία: Η θάλασσα έχει διεισδύσει 1 - 2 χιλιόμετρα στα παράκτια υπόγεια αποθέματα της περιοχής. Το ιδιαίτερο στην περίπτωση αυτή δεν είναι το πόσο βαθιά έχει διεισδύσει η θάλασσα, αλλά πόσο επιμήκης είναι η ζώνη όπου παρουσιάζεται το πρόβλημα, η οποία ξεκινάει πλέον λίγο μετά τον Πύργο.

Αιγαίο: Μόνο υφάλμυρους υπόγειους υδροφορείς έχουν πλέον αρκετά νησιά, λόγω μικρής έκτασης της ενδοχώρας, λιγοστών βροχοπτώσεων και μεγάλης τουριστικής και οικιστικής ανάπτυξης. Σαντορίνη, Νάξος, Σύρος, Σίφνος, Αμοργός είναι μερικά από τα νησιά με οξύ πρόβλημα.

Χερσόνησος Κρήτης: Η περιοχή της Χερσονήσου, περίπου 20-30 χιλιόμετρα ανατολικά της πόλης του Ηρακλείου, αντιμετωπίζει την τελευταία δεκαετία οξύ πρόβλημα με την υποβάθμιση των παράκτιων υδροφορέων της από τη διείσδυση της θάλασσας. Η θάλασσα έχει διεισδύσει για περισσότερα από 2 χιλιόμετρα στο εσωτερικό, με αποτέλεσμα όλες οι γεωτρήσεις -οι νόμιμες είναι περίπου 20- να δίνουν υφάλμυρο νερό. Στην περιοχή υπάρχουν μεγάλες ξενοδοχειακές μονάδες, ενώ εξακολουθεί η καλλιέργεια μεγάλων εκτάσεων. Το πρόβλημα είναι τέτοιο που ο τοπικός δήμος προσανατολίζεται στη δημιουργία μονάδας αφαλάτωσης για να καλύψει μέρος των αναγκών, ιδίως για την τουριστική περίοδο, η οποία όμως στην Κρήτη είναι χρονικά διευρυμένη.

Καμποχώρα Χίου: Ιδιαίτερα οξύ είναι το πρόβλημα της υφαλμύρινσης των υπόγειων υδάτων στον Κάμπο και την Καμποχώρα της Χίου, μερικά μόλις χιλιόμετρα από την πρωτεύουσα του νησιού. Η θάλασσα έχει διεισδύσει μέσα στον υδροφόρο ορίζοντα σε βάθος 4 χιλιομέτρων ή και περισσότερο. Το νερό όχι μόνο δεν είναι πόσιμο, αλλά δεν χρησιμοποιείται ούτε για μαγείρεμα, ενώ καταστρέφει φίλτρα, βρύσες και πλυντήρια. Επιπρόσθετο ποιοτικό πρόβλημα δημιουργεί η ανίχνευση στο νερό ίχνους υδραργύρου, το οποίο όμως εκτιμάται ότι οφείλεται σε φυσικά αίτια (Καθημερινή, 2008).

6. ΠΟΛΙΤΙΚΕΣ ΚΑΙ ΠΡΑΚΤΙΚΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΤΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ ΤΗΣ ΥΦΑΛΜΥΡΙΝΣΗΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

6.1 Γενικά

Στην Ελλάδα η αντιμετώπιση του φαινομένου της υφαλμύρισης βρίσκεται ακόμα σε αρχικό στάδιο. Η έλλειψη πρωτογενών δεδομένων για την ποιότητα των υδάτων στη χώρα, η μη σύσταση ενιαίου φορέα για τη διαχείριση των υδατιών πόρων και η μη άμεση συμμόρφωση με την Οδηγία 2000/60/EK είναι μερικές αιτίες. Η μοναδική ουσιαστική προσπάθεια διαχείρισης των υφάλμυρων νερών και αντιμετώπισης του φαινομένου έγινε στην περιοχή του Αργολικού πεδίου, καθώς εκεί όχι μόνο εμφανίστηκε η υφαλμύρωση για πρώτη φορά, αλλά υπάρχει από τότε για την περιοχή, αρχείο με πλήθος μετρήσεων για την ποιότητα του νερού.

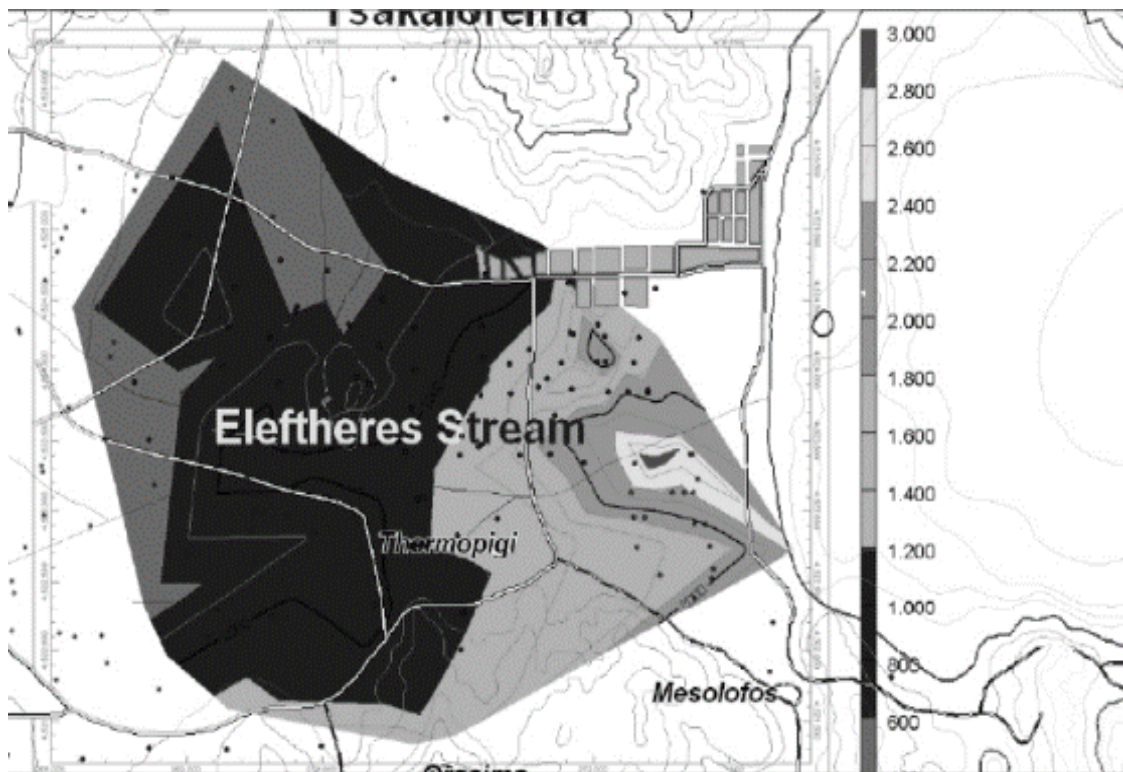
Η υφαλμύρωση στην Ελλάδα έχει αντιμετωπιστεί κυρίως με τη χρήση του τεχνητού εμπλουρισμού όπως έχει αναλυθεί σε προηγούμενο Κεφάλαιο, παρά με άλλες μεθόδους. Ωστόσο, αξίζει να σημειωθεί ότι έχουν γίνει μεμονωμένες έρευνες και προσπάθειες ώστε να αντιμετωπισθεί το φαινόμενο, όπως για παράδειγμα η χρήση κάποιων πειραματικών μεθόδων ή η έμμεση αντιμετώπιση του προβλήματος με τη δημιουργία φραγμάτων για συγκράτηση των επιφανειακών υδάτων και εξοικονόμηση του φυσικού πόρου.

Οι μέθοδοι που έχουν εφαρμοστεί κατά καιρούς στην Ελλάδα με σκοπό την αντιμετώπιση της υφαλμύρωσης δεν σχετίζονται με την ορθολογική διαχείριση των υδατικών πόρων, όπως, για παράδειγμα, την μείωση της υπεράντλησης. Συνήθως, εφαρμόζονται εκ των υστέρων μέθοδοι, οι οποίες είναι χρονοβόρες και οικονομικά ασύμφορες, ενώ ενέχουν μεγάλους περιβαλλοντικούς κινδύνους. Η μη ορθολογική διαχείριση των υδατικών πόρων θα έχει στο άμεσο μέλλον σοβαρό αντίκτυπο στη ποιότητα και την ποσότητα του διαθέσιμου νερού. Ο κυριότερος, όμως, λόγος είναι η έλλειψη ενός νομοθετικού πλαισίου που θα καλύπτει το πρόβλημα της υφαλμύρωσης, θεωρώντας το ως πρόβλημα ρύπανσης των υπογείων υδάτων. Είναι επιτακτική η

ανάγκη να εφαρμοστεί η Οδηγία 2000/60/ΕΚ σύμφωνα με τον Ελληνικό Νόμο που εναρμονίζεται με αυτή, αλλά και να υπάρχουν αυστηρότατοι έλεγχοι που να αφορούν την περιβαλλοντική αδειοδότηση για την παραχώρηση άδειας γεώτρησης. Η αδιαφορία της κυβέρνησης και των πολιτών ίσως αποβεί, αν δεν έχει ήδη συμβεί αυτό, καταστρεπτική για το πολυτιμότερο φυσικό αγαθό, το νερό.

6.2 Πειραματικές μέθοδοι στη λεκάνη Ελευθέρες

Η περιοχή μελέτης αποτελεί η λεκάνη Ελευθέρες στην Καβάλα, μία τοποθεσία που πληροί τα απαιτούμενα κριτήρια για την επιλογή της μεθόδου όπως φαίνεται στο παρακάτω Σχήμα . Η μικρή έκτα που καταλαμβάνει, καθώς και τα ιδιαίτερα γεωλογικά, γεωχημικά και φυσικά χαρακτηριστικά της σε συνδυασμό με την εκτεταμένη υφαλμύρωση στην περιοχή, την καθιστούν ιδανική για την υλοποίηση της προσπάθειας.



**Σχήμα 19: Έκταση του μετώπου υφαλμύρινης στη λεκάνη Ελευθέρες στη Καβάλα
(Ziegenbalg et al, 2002)**

6.3 Υδραυλικά έργα στη Αττική

Στη περιοχή της Αττικής το πρόβλημα της υφαλμύρινης έχει λάβει δραματικές διαστάσεις. Παρόλα αυτά δεν έχουν ληφθεί ιδιαίτερα μέτρα αντιμετώπισης και δεν γίνονται προσπάθειες ώστε να περιοριστεί η υπεράντληση. Οι εκτεταμένες γεωργικές και βιομηχανικές δραστηριότητες, σε συνδυασμό με την έντονη ζήτηση νερού για την κάλυψη των αναγκών ύδρευσης των κατοίκων, έχουν επηρεάσει σε μεγάλο βαθμό την ποιότητα των υδάτων του υπόγειου υδροφορέα υποβιβάζοντας συνεχώς την στάθμη του. Από την άλλη μεριά, οι γεωτρήσεις αυξάνονται συνεχώς και οι περισσότερες από αυτές χαρακτηρίζονται ως παράνομες.

Τα κυριότερα έργα που γίνονται στην Αττική είναι υδραυλικά έργα, όπως κατασκευή φραγμάτων και λεκανών διήθησης για τη συλλογή και την αποθήκευση του νερού της βροχής. Με τον τρόπο αυτό θα εξασφαλίζονται περισσότερα κυβικά γλυκού νερού τα οποία θα κατέληγαν στη θάλασσα. Είναι μία έμμεση αντιμετώπιση του προβλήματος της υφαλμύρινης, στοχεύοντας στη μείωση της υπεράντλησης.

Έχουν ήδη κατασκευαστεί στην Αττική, φράγματα που συγκρατούν το νερό της βροχής με λεκάνες διήθησης και με φρεάτια. Ταυτόχρονα γίνεται προσπάθεια εμπλουτισμού του υδροφορέα στα ρέματα Βύρου, Κουμουνδούρου, στο Κουλουριώτικο και το Σαρανταπόταμο στη Δυτική Αττική και το χείμαρρο Χάρανδρο στην περιοχή Αφιδνών.

Ωστόσο για την ολοκληρωμένη διαχείριση του προβλήματος της υφαλμύρινης απαιτούνται δραστικότερα μέτρα. Παρόλα αυτά αποτελεί ένα θετικό βήμα στη διαχείριση των υδατικών πόρων της Αττικής. Η κατάσταση θα είναι μη αναστρέψιμη σύντομα, καθώς η συνεχιζόμενη πτώση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα και η ρύπανση των υδάτων απειλούν την ποιότητα ζωής των κατοίκων της.

6.4 Τεχνητός εμπλουτισμός στο Αργολικό πεδίο

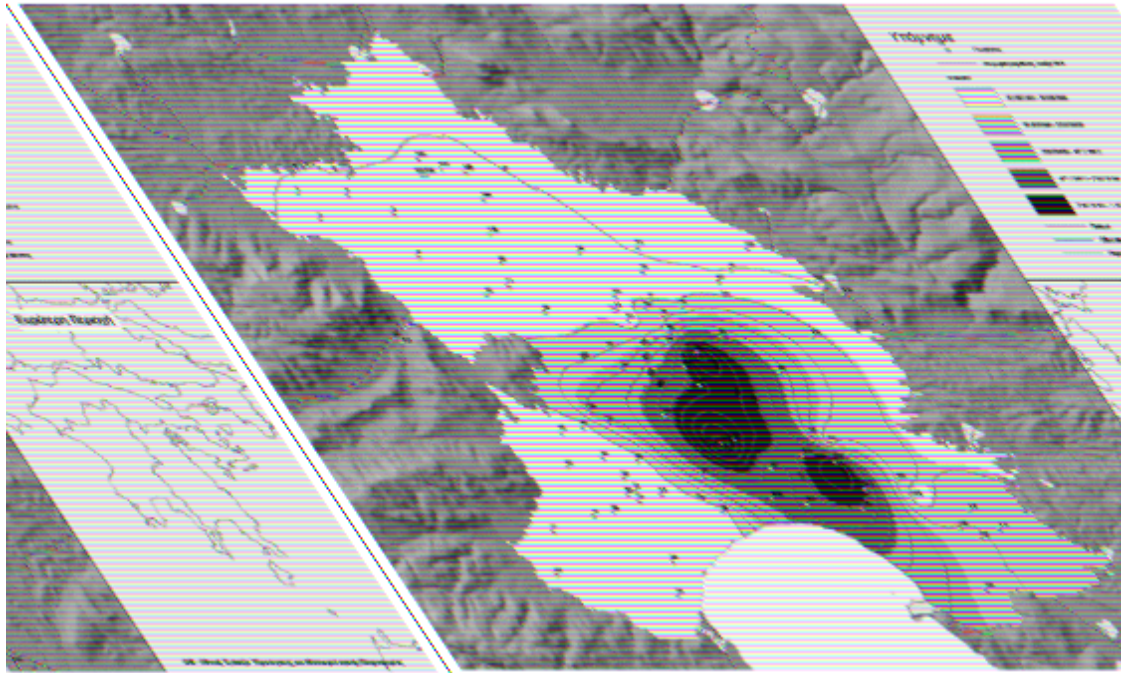
Το Αργολικό πεδίο ήταν η πρώτη περιοχή στην οποία διαπιστώθηκε το φαινόμενο της υφαλμύρινσης και επομένως, οι περισσότερες μελέτες και μετρήσεις έγιναν στους υπόγειους υδροφορείς της περιοχής. Άμεση συνέπεια τα σημαντικότερα στοιχεία που αφορούν το φαινόμενο της υφαλμύρινσης σχετίζονται με τη συγκεκριμένη περιοχή. Επειδή η έκταση του φαινομένου ήταν πολύ μεγάλη εφαρμόστηκε ως μέθοδος αντιμετώπισης ο τεχνητός εμπλουτισμός των υδάτων.

Συστηματικά πειράματα τεχνητού εμπλουτισμού έγιναν για πρώτη φορά στην Αργολίδα αλλά και την Ελλάδα κατά την περίοδο από το 1964 έως το 1968 (Γιανουλόπουλος και Πουλοβασίλης, 1999). Τα πρώτα πειράματα έγιναν στις περιοχές Πολυγώνου, Αγίου Αδριανού, Λευκανίων, Ασίνης και Δρέπανου, επειδή εκεί είχε διαπιστωθεί η ιδιαίτερη ένταση του φαινομένου της υφαλμύρινσης. Αρχικά, η μεταφορά των υδάτων που χρησιμοποιήθηκαν κατά τον τεχνητό εμπλουτισμό προερχόταν από νερά της πηγής Κεφαλαρίου. Τα πειράματα έγιναν το Μάιο του 1964 και το Φεβρουάριο του 1965 ενώ επαναλήφθηκαν ένα χρόνο μετά. Συνεχίστηκαν, το Δεκέμβριο του 1966 έως και τον Απρίλιο του 1967, ενώ εφαρμόστηκαν και την άνοιξη του 1968.

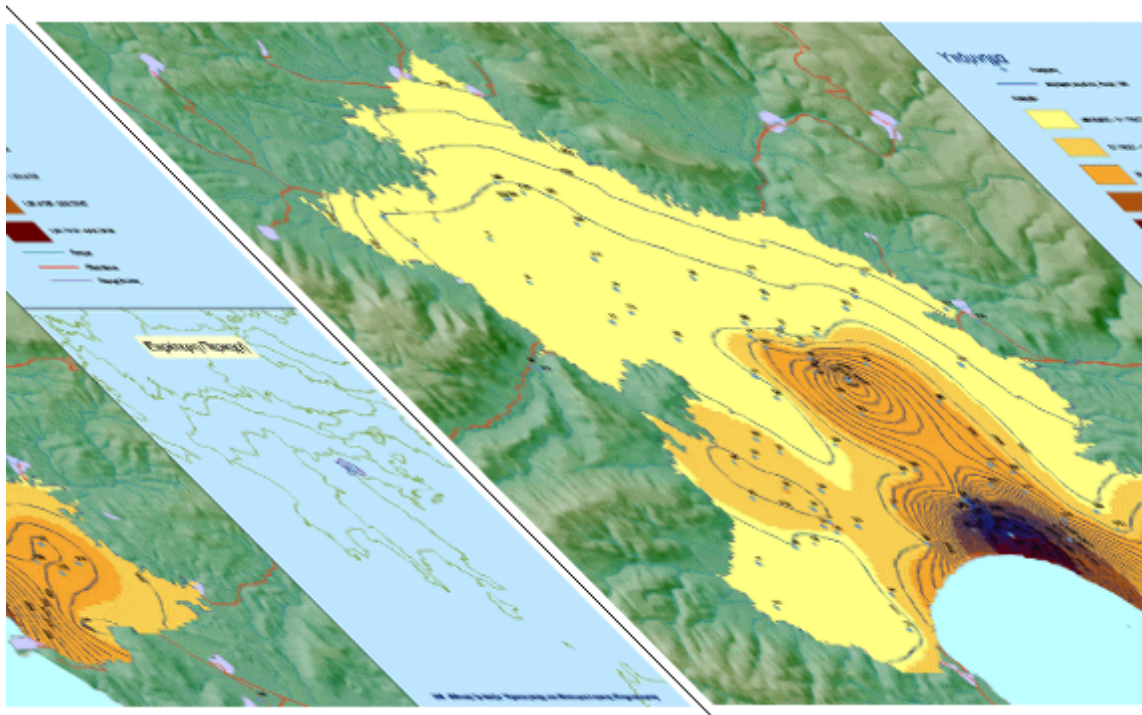
Κατά την διάρκεια αυτής της πρώτης φάσης του τεχνητού εμπλουτισμού στο Αργολικό πεδίο δεν έλειπε το στάδιο της παρακολούθησης και της καταγραφής της παροχής του νερού και της περιεκτικότητας των χλωριόντων σε αυτό. Οι συνολικές ποσότητες νερού που εφαρμόστηκαν για τεχνητό εμπλουτισμό τα έτη 1965, 1966 και 1967 ήταν 1.160.000 κ.μ., 745.000 κ.μ. και 1.400.000 κ.μ. αντίστοιχα. Αν και τα αποτελέσματα ήταν ιδιαίτερα θετικά, η υπεράντληση των υδάτων συνδέθηκε με την προέλαση του μετώπου της υφαλμύρινσης προς το τέλος της δεκαετίας του 1980. Η ολική πτώση της στάθμης μεταξύ των ετών 1964 και 1990 έφτασε ακόμη και τα 70 έως 80m. Έτσι, ξεκίνησε μία δεύτερη φάση τεχνητού εμπλουτισμού κατά τη περίοδο από το 1990 έως το 1998. Τα αποτελέσματα της ήταν ιδιαίτερα ευεργετικά στη ποιότητα του υπόγειου νερού, γεγονός που είχε θετικό αντίκτυπο στην κοινωνική και την οικονομική ζωή της περιοχής. Επίσης, θετικό είναι και το γεγονός πως δεν παρατηρήθηκαν περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την εφαρμογή της μεθόδου.

Στο Σχήμα 15 φαίνονται οι γεωτρήσεις της δεύτερης φάσης του εμπλουτισμού στο Αργολικό πεδίο. Στη συνέχεια, με βάση τα δεδομένα της Εθνικής Τράπεζας Υδρολογικής και Μετεωρολογικής Πληροφορίας (ΕΤΥΜΠ) συντάχθηκαν οι χάρτες

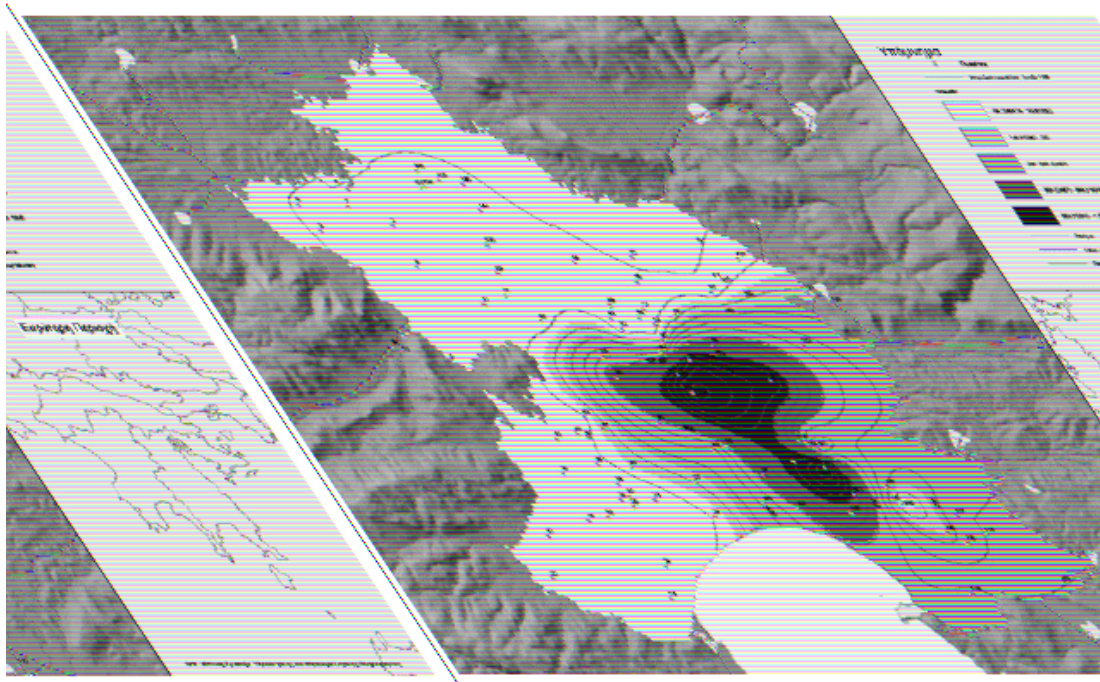
Σχήμα 20: Θέσεις γεωτρήσεων τεχνητού εμπλουτισμού στο Αργολικό πεδίο την περίοδο 1990 – 1998 (Γιαννουλόπουλος και Πουλοβασίλης, 1999)



Σχήμα 21: Συγκέντρωση χλωριόντων την άνοιξη του 1986 (ΕΤΥΜΠ)



Σχήμα 22: Συγκέντρωση χλωριόντων την άνοιξη του 1990 (ΕΤΥΜΠ)

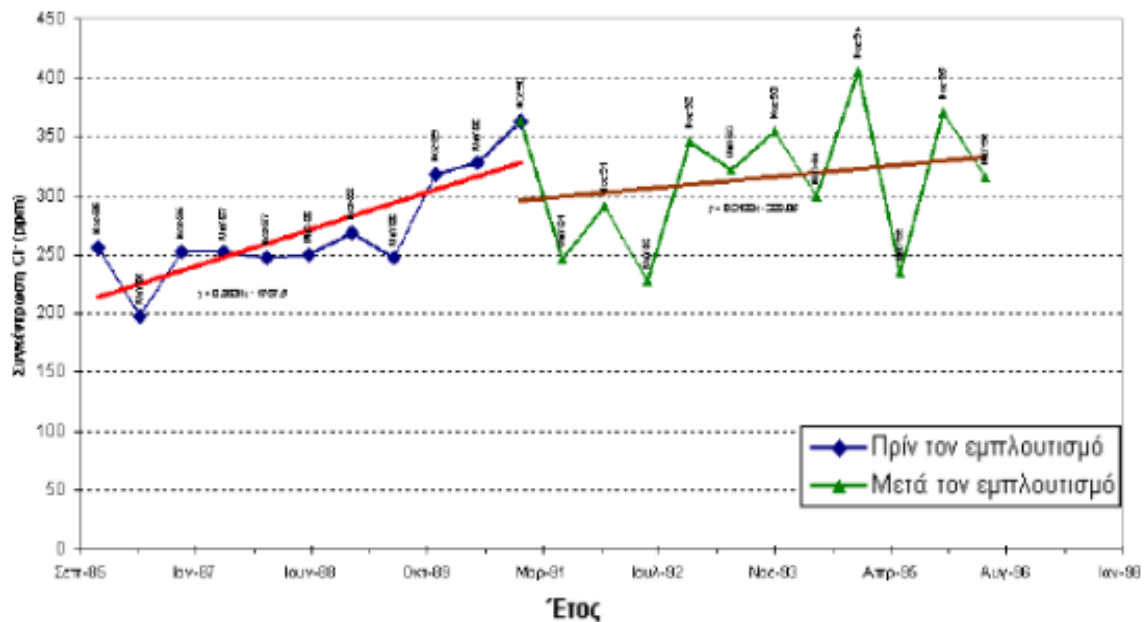


Σχήμα 23: Συγκέντρωση χλωριόντων την άνοιξη του 1996 (ΕΤΥΜΠ)

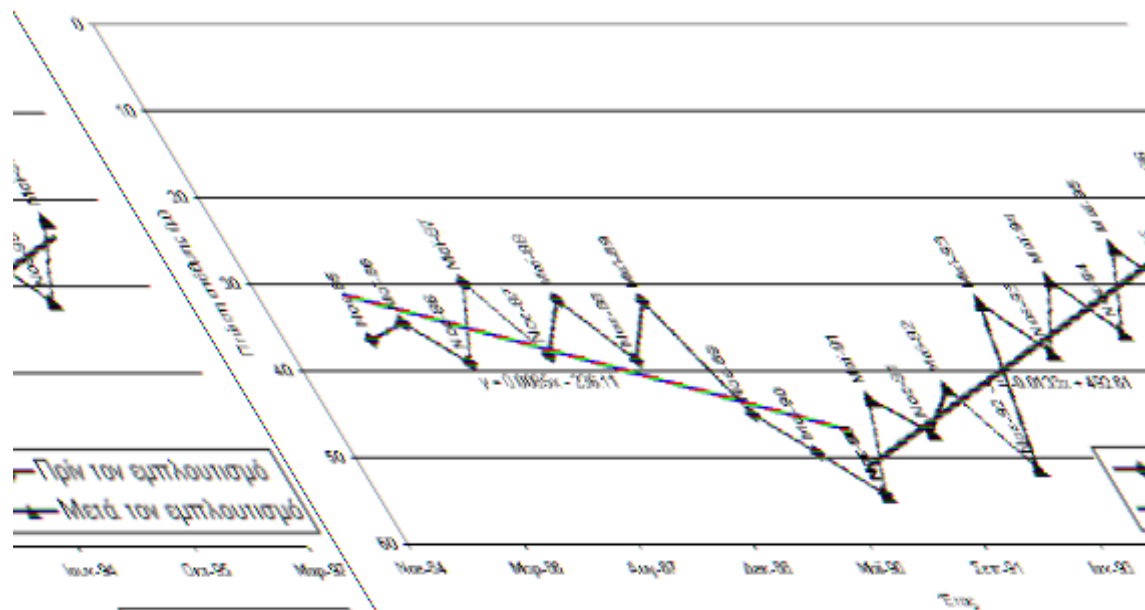
Συγκεκριμένα, μέχρι το 1990 πριν δηλαδή από την εφαρμογή του τεχνητού εμπλουτισμού, η κατάσταση ήταν ιδιαίτερα επιβαρυνμένη όσον αφορά την συγκέντρωση των χλωριόντων. Ο τεχνητός εμπλουτισμός ωφέλησε την ποιότητα των υδάτων, αν και η υψηλή περιεκτικότητα σε χλωριόντα συνέχιζε να υπερβαίνει τα 250ppm. Με το σκούρο καφέ χρώμα απεικονίζονται οι υψηλότερες συγκεντρώσεις χλωρίου και με τα ανοιχτόχρωμα χρώματα οι χαμηλότερες.

Στο Σχήμα 18 φαίνεται η διακύμανση της στάθμης των χλωριόντων για το Αργολικό πεδίο κατά την περίοδο πριν και μετά τον τεχνητό εμπλουτισμό. Στα Σχήματα 19 και 20 φαίνεται η μέση διακύμανση της στάθμης και η μέση διακύμανση του πιεζομετρικού φορτίου αντίστοιχα που όμως φαίνεται επηρεάστηκαν θετικά από

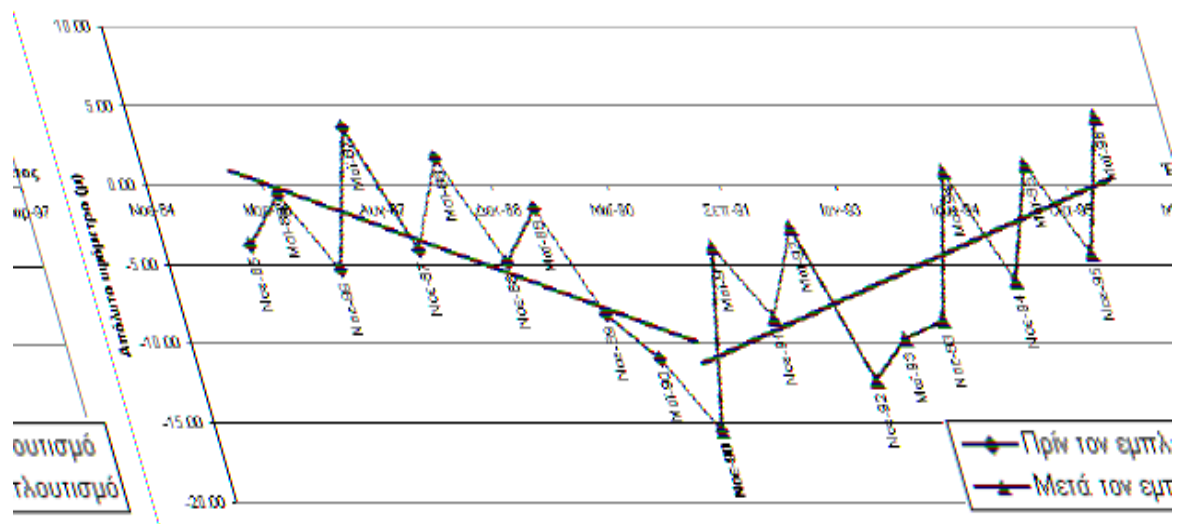
τον τεχνητό εμπλουτισμό. Ο τεχνητός εμπλουτισμός δεν επηρέασε τη διακύμανση των νιτρικών, καθώς αυτή σχετίζεται με τις καλλιέργειες της περιοχής και τη χρήση λιπασμάτων σε αυτές όπως φαίνεται στο Σχήμα 21.



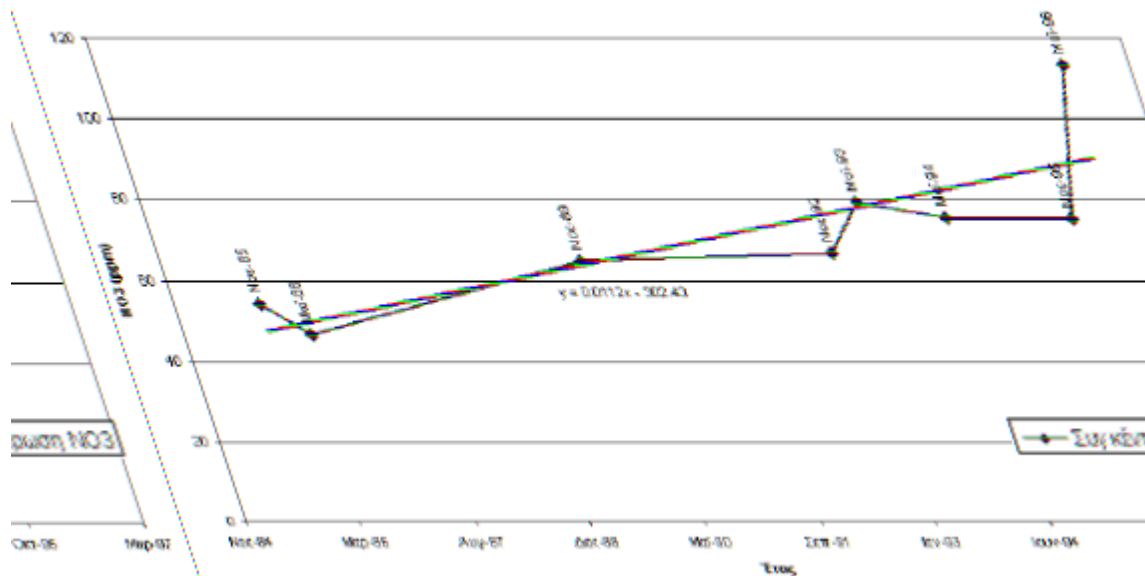
Σχήμα 24: Μέση διακύμανση συγκέντρωση Cl- στο Αργολικό πεδίο κατά τα έτη 1985 – 1996 (ΕΤΥΜΠ)



Σχήμα 25: Μέση διακύμανση στάθμης στο Αργολικό πεδίο κατά τα έτη 1985 – 1996 (ΕΤΥΜΠ)



Σχήμα 26: Μέση διακύμανση πιεζομετρικού φορτίου στο Αργολικό πεδίο κατά τα έτη 1985 – 1996 (ΕΤΥΜΠ)



Σχήμα 27: Συγκέντρωση NO₃- στο Αργολικό πεδίο κατά τα έτη 1985 – 1996 (ΕΤΥΜΠ)

6.5 Τεχνητός εμπλουτισμός στη Βιομηχανική Περιοχή του Ηρακλείου Κρήτης

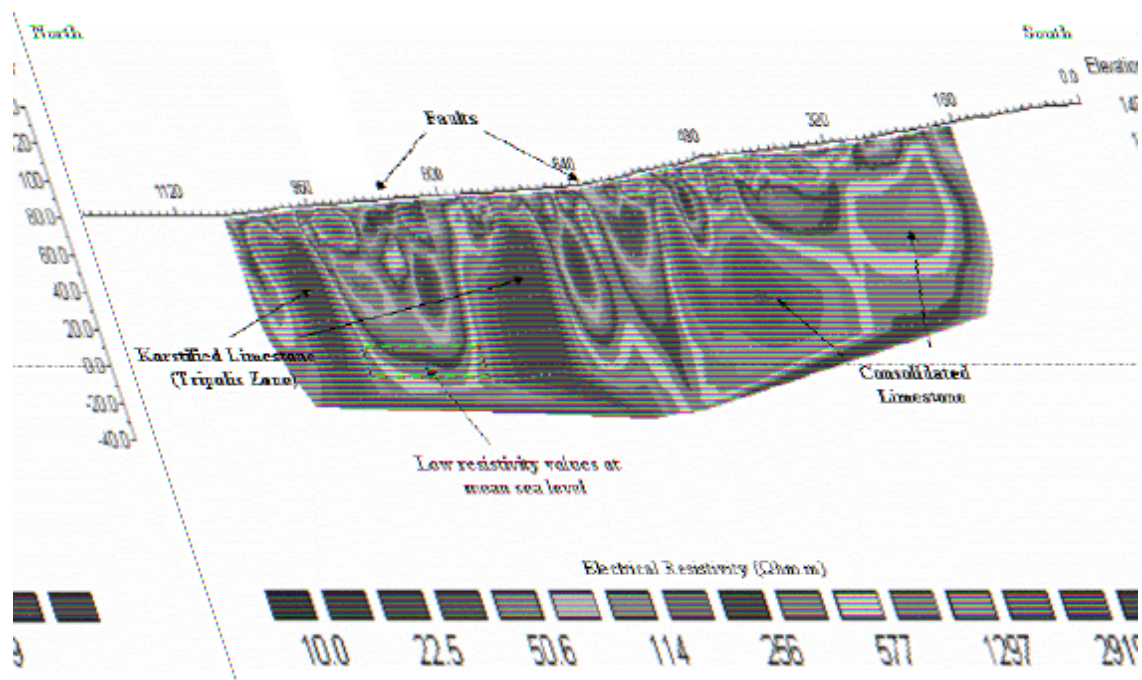
Στη βιομηχανική περιοχή του Ηρακλείου Κρήτης γίνονται κάποιες προσπάθειες για την εφαρμογή τεχνητού εμπλουτισμού με τη χρήση επεξεργασμένων βιομηχανικών αποβλήτων. Στόχος είναι η αντιμετώπιση της υφαλμύρωσης στους υπόγειους υδροφορείς.

Από τον Ιανουάριο του 2004 μέχρι και τον Ιούνιο του 2005 στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Ανταγωνιστικότητα», με τη στήριξη του Γ' Κ.Π.Σ. εκπονήθηκε το έργο με τίτλο «Διεθνής συνεργασία στη βιομηχανική έρευνα και

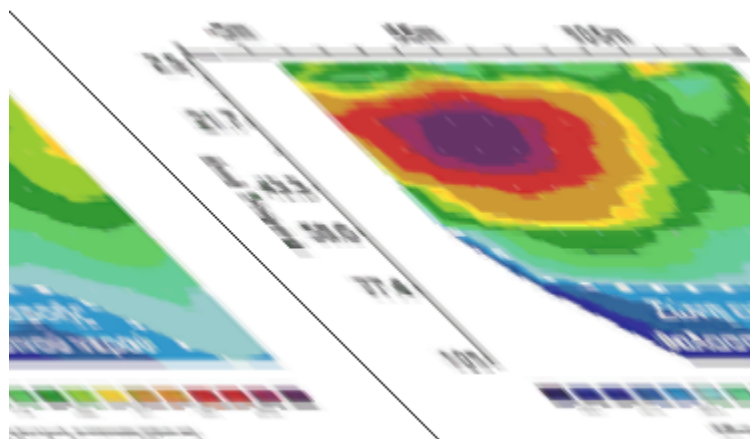
δραστηριότητες ανάπτυξης σε προανταγωνιστικό στάδιο 2003» στο τομέα «Φυσικό περιβάλλον και Βιώσιμη Ανάπτυξη». Ο τίτλος του ερευνητικού προγράμματος ήταν ο εξής: «Προστασία υπόγειων υδροφορέων από υφαλμύρωση μέσω εμπλουτισμού με επεξεργασμένα βιομηχανικά απόβλητα και ανάπτυξη εργαλείων και τεχνολογιών για βιώσιμη διαχείριση ιλύων από μονάδες καθαρισμού βιομηχανικών αποβλήτων – SMILES».

Το συγκεκριμένο ερευνητικό πρόγραμμα αφορά την προστασία των υπόγειων υδροφορέων από την υφαλμύρινη. Μέρος, αυτού του προγράμματος, σχετίζεται με την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των ηλεκτρικών γεωφυσικών διασκοπήσεων, για τον προσδιορισμό της γεωλογικής δομής τμήματος της βιομηχανικής περιοχής του Ηρακλείου, όπως, επίσης, και με τη χαρτογράφηση πιθανής ζώνης υφαλμύρινης που συναντάται στην ευρύτερη περιοχή μελέτης. Τέλος, συνεργαζόμενοι φορείς στο εν λόγω πρόγραμμα είναι το Εργαστήριο Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, το Τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης και η Γεωτεκ E.P.E. Georesources Technology Ltd.

Όσον αφορά τη μεθοδολογία της εργασίας, αρχικά, υπάρχει η τάση να μελετάται το φαινόμενο με τη βοήθεια γεωφυσικών διασκοπήσεων, κυρίως, ηλεκτρικών και σεισμικών. Στις μελέτες που πραγματοποιούνται επεξεργάζονται τα δεδομένα των διασκοπήσεων και με τη βοήθεια των αποτελεσμάτων προσδιορίζεται η ηλεκτρική αντίσταση του υπεδάφους και η ηλεκτρική αγωγιμότητα του νερού. Από τις γεωηλεκτρικές τομογραφίες της περιοχής (Σχήμα 28) προσδιορίζεται επίσης, και η επίδραση του θαλασσινού νερού στο γλυκό και ανιχνεύεται το μέτωπο της υφαλμύρωσης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 29.



Σχήμα 28: Γεωηλεκτρική τομογραφία Ηρακλείου Κρήτης (Paradouroulou et al., 2005)



***Σχήμα 29: Ηλεκτρική τομογραφία στη βιομηχανική περιοχή Ηρακλείου Κρήτης
(Papadopoulou et al., 2005)***

Μετά από τη καταγραφή της κατάστασης, με τη βοήθεια των γεωφυσικών διασκοπήσεων εφαρμόζονται διάφορα σενάρια με βάση το μοντέλο PTC ώστε να βρεθεί η βέλτιστη λύση (Papadopoulou et al., 2005).

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η διείσδυση του θαλασσινού νερού στα παράκτια υδροφόρα στρώματα είναι μία φυσική διαδικασία που είναι γνωστή ως υφαλμύριση. Το γλυκό νερό που έρχεται σε επαφή με το αλμυρό εμπλουτίζεται σε χλωριόντα και καθίσταται ακατάλληλο για κάθε χρήση. Το φαινόμενο της υφαλμύρισης επηρεάζει την ποιότητα ζωής των ανθρώπων που διαμένουν σε παραθαλάσσιες περιοχές και μπορεί να έχει αρνητικές, κοινωνικές και οικονομικές επιπτώσεις.

Το υφάλμυρο νερό είναι ακατάλληλο για την ύδρευση μίας περιοχής ενώ η χρήση του στις καλλιέργειες μπορεί να οδηγήσει σε υπερβολική αλάτωση των εδαφών, με συνέπεια την καταστροφή της παραγωγής. Επόμενο στάδιο είναι η ερημοποίηση των εδαφών, φαινόμενο που συνδέεται άμεσα με το φαινόμενο της υφαλμύρωσης. Πολλές φορές η χρήση του είναι απαγορευτική και για τις βιομηχανικές εγκαταστάσεις.

Με δεδομένη την εξάντληση των υδατικών πόρων και τη ρύπανση των υπαρχόντων υπόγειων υδάτων, η υφαλμύριση του νερού ανεξάρτητα από τα γεγονότα ότι σχετίζεται με φυσικά αίτια μπορεί να θεωρηθεί ως περιβαλλοντικό πρόβλημα. Το χλώριο αντιμετωπίζεται ως ρύπος στο υφάλμυρο νερό και η ανίχνευσή του γίνεται με κλασικές υδρολογικές μεθόδους. Η απορρύπανση του νερού από τα χλωριόντα θεωρείται μία επίπονη και χρονοβόρα διαδικασία οπότε οι μέθοδοι αντιμετώπισης της υφαλμύρωσης προσανατολίζονται, κυρίως, προς την πρόληψη του φαινομένου.

Αν και η υφαλμύρωση είναι ένα γενικό φαινόμενο για τις περισσότερες παράκτιες περιοχές του πλανήτη είναι δυνατόν να εμφανιστεί με μεγαλύτερη ένταση όταν συνδυαστεί με κάποιους άλλους παράγοντες όπως η υπεράντληση των υδάτων για χρήση τους στη γεωργία και τη βιομηχανία, οι έντονες κλιματικές αλλαγές που σχετίζονται με το φαινόμενο του θερμοκηπίου, η λειψυδρία κ.ά.

Στην Ελλάδα και γενικά στη λεκάνη της Μεσογείου η έκταση του φαινομένου είναι μεγάλη και εάν δεν ληφθούν τα κατάλληλα μέτρα, η περιοχή θα ερημοποιηθεί. Οι έντονες ξηρασίες κατά τους καλοκαιρινούς μήνες δεν βοηθούν στην αναπλήρωση των υδατικών αποθεμάτων, οπότε η υπεράντληση του υπόγειου νερού από όσο το δυνατό μεγαλύτερα βάθη προκαλεί πτώση της στάθμης του υδροφορέα. Οι χώρες της

Μεσογείου ασχολούνται σε μεγάλο βαθμό με την αγροτική παραγωγή, με αποτέλεσμα να χρειάζονται όλο και περισσότερο νερό ώστε να καλύψουν τις ανάγκες τους για άρδευση. Όλα αυτά σε συνδυασμό με το γεγονός πως στις χώρες γύρω από την Μεσόγειο θάλασσα, δεν έχουν αναπτυχθεί πλήρως τα ποτάμια συστήματα, λόγω γεωτεκτονικών διεργασιών, γεγονός που σημαίνει λιγοστές ποσότητες επιφανειακών υδάτων, συντελούν στο να θεωρείται σήμερα η Μεσόγειος ως η περιοχή στην Ευρώπη με τα μεγαλύτερα προβλήματα υφαλμύρινης και τον κίνδυνο της ερημοποίησης να ελλοχεύει.

Στην Ελλάδα το πρόβλημα είναι ιδιαίτερα οξύμενο και διαπιστώνεται στις περισσότερες ακτές της ηπειρωτικής και της νησιωτικής χώρας. Ιδιαίτερα μέτρα πρόληψης ή αντιμετώπισης δεν έχουν ληφθεί μέχρι σήμερα, ενώ λείπουν ακόμη και ολοκληρωμένες μελέτες που να πιστοποιούν το πρόβλημα. Οι αιτίες υφαλμύρινης στην Ελλάδα μπορούν να θεωρηθούν περισσότερο τοπικές, καθώς σε κάθε περιοχή το φαινόμενο εξαρτάται από διαφορετικούς κάθε φορά λόγους. Στο λεκανοπέδιο της Αττικής για παράδειγμα, κύρια αιτία είναι η υπεράντληση των υδάτων για ύδρευση, ενώ στην Θεσσαλία, η υπεράντληση οφείλεται στην άρδευση των μεγαλύτερων καλλιεργήσιμων εκτάσεων της Ελλάδας. Το αποτέλεσμα είναι η έντονη υφαλμύρινη, που υποβαθμίζει την ποιότητα του υπόγειου νερού και μειώνει τις διαθέσιμες ποσότητες υδάτων που μπορεί να χρησιμοποιήσει ο άνθρωπος.

Οι κύριες αιτίες εμφάνισης του φαινομένου υφαλμύρινης στην Ελλάδα είναι κυρίως τα γεωμορφολογικά, γεωλογικά και κλιματολογικά χαρακτηριστικά της. Αρχικά, το γεγονός ότι η Ελλάδα περιβάλλεται στο μεγαλύτερο τμήμα της, από θάλασσα συνεπάγεται μεγάλο μήκος ακτογραμμής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την έξαρση του φαινομένου. Επίσης, σημαντικός παράγοντας είναι και ο σημαντικός αριθμός των ελληνικών νησιών, αφού στα περισσότερα από αυτά έχουν διαπιστωθεί αντίστοιχα φαινόμενα.

Ένας άλλος παράγοντας που επιδρά στο φαινόμενο της υφαλμύρινης είναι το μεσογειακό κλίμα της Ελλάδας, που συνεπάγεται ήπιους βροχερούς χειμώνες με θερμά και ξηρά καλοκαίρια. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με το απότομο ανάγλυφο στην ηπειρωτική χώρα και τις πεδιάδες στις παραθαλάσσιες ακτές σχετίζεται με την ανισοκατανομή των βροχοπτώσεων. Το αποτέλεσμα είναι να υπάρχουν λιγοστά υδατικά αποθέματα στις ακτές και να μειώνεται η στάθμη του γλυκού υπόγειου νερού. Ακόμη, το χαμηλό ύψος βροχής στη νησιωτική περιοχή

εντείνει το πρόβλημα της επάρκειας του νερού στα νησιά, κυρίως του Αιγαίου, καθώς η ποσότητα και η ποιότητα των υδάτων δεν αρκεί για να καλύψει τις ανάγκες των κατοίκων, ούτε για να συντηρήσει τον τουρισμό, που είναι και ο κύριος οικονομικός παράγοντας στις περιοχές αυτές κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.

Στα παραπάνω θα πρέπει να προστεθούν και ορισμένοι γεωλογικοί παράμετροι που επηρεάζουν την υφαλμύρινη. Η μορφολογία της Ελλάδας είναι αποτέλεσμα των αλπικών πτυχώσεων και αυτό έχει ως συνέπεια η διάβρωση να μην έχει προλάβει να προσβάλλει τους ορεινούς όγκους και έτσι το ανάγλυφο στην ηπειρωτική ενδοχώρα να είναι έντονο. Επομένως, τα ποτάμια συστήματα να χαρακτηρίζονται ως μέτρια ανεπτυγμένα και να σχηματίζουν ένα ανώριμο υδρογραφικό δίκτυο. Τα επιφανειακά νερά της Ελλάδας είναι λίγα και ως ποταμοί με μεγάλες παροχές θεωρούνται οι διακρατικοί. Το νερό που χρειάζεται για να καλύψει τη ζήτηση είναι κυρίως υπόγειο, οπότε αντλείται από ολοένα και αυξανόμενο βάθος από τους υπόγειους υδροφορείς. Επιπλέον, το γεγονός ότι η Ελλάδα αποτελείται σε μεγάλο βαθμό από ασβεστολιθικά πετρώματα έχει ως αποτέλεσμα την ύπαρξη πολλών παράκτιων καρστικών υδροφορέων. Η υδροφορία των οποίων εμφανίζει ιδιαιτερότητας, καθώς συχνά η στάθμη του γλυκού νερού σε αυτούς βρίσκεται κάτω από το επίπεδο της στάθμης της θάλασσας. Επίσης, και οι υπόγειοι υδροφορείς που αποτελούνται από αλλουβιακούς σχηματισμούς εμφανίζουν αρκετά συχνά μέτρια έως φτωχή υδροφορία.

Οι συνέπειες του φαινομένου της υφαλμύρινης είναι ιδιαίτερα σοβαρές στις περιοχές που εμφανίζεται. Το υφάλμυρο νερό είναι ακατάλληλο για κάθε ανθρώπινη χρήση με αποτέλεσμα να μην μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα υδατικά αποθέματα καθώς η ποιότητά τους είναι υποβαθμισμένη. Άμεσο αποτέλεσμα είναι η ανάγκη εύρεσης νέων υδατικών πόρων για την κάλυψη των αναγκών των περιοχών αυτών ή εφόσον αυτό δεν είναι εφικτό η μεταφορά νερού από άλλες περιοχές. Η ύδρευση δεν αποτελεί το μόνο πρόβλημα της υφαλμύρινης καθώς η χρήση του υφάλμυρου νερού είναι ακατάλληλη τόσο στον αγροτικό όσο και το βιομηχανικό τομέα. Η ανάπτυξη όμως των παράκτιων περιοχών βασίζεται κυρίως σε αυτούς τους παραγωγικούς τομείς, οπότε η οικονομική ανάπτυξη της περιοχής δεν είναι δυνατή. Μεγάλο είναι και το οικονομικό κόστος για την κατασκευή των έργων προστασίας έναντι στην υφαλμύρινη. Ενώ η πρόληψη του φαινομένου είναι περισσότερο συμφέρουσα, συνήθως στην Ελλάδα το πρόβλημα αντιμετωπίζεται εκ των υστέρων και δυστυχώς σε πολλές περιπτώσεις δεν εφαρμόζονται καθόλου μέθοδοι αντιμετώπισης.

Η αντιμετώπιση του φαινομένου της υφαλμύρινσης θα είναι περισσότερο αποτελεσματική εάν γίνεται έπειτα από την πλήρη καταγραφή των υδρογεωλογικών και υδρολογικών συνθηκών μίας περιοχής με αντίστοιχο πρόβλημα. Πρέπει να λαμβάνονται σοβαρά υπόψη οι τοπικοί παράγοντες που οφείλονται για την εμφάνιση της υφαλμύρωσης και να αντιμετωπίζονται ξεχωριστά, ώστε με αυτόν τον τρόπο να μειώνονται οι αιτίες που συντελούν στην υπεράντληση των υπόγειων υδάτων.

Η αντιμετώπιση του φαινομένου της υφαλμύρινσης θα είναι περισσότερο αποτελεσματική αν γίνεται έπειτα από την πλήρη καταγραφή των υδρογεωλογικών και υδρολογικών συνθηκών μίας περιοχής με προβλήματα υφαλμύρινσης. Πρέπει να λαμβάνονται σοβαρά υπόψη οι τοπικοί παράγοντες που οφείλονται για την εμφάνιση της και να αντιμετωπίζονται ξεχωριστά, ώστε με αυτόν τον τρόπο να μειώνονται οι αιτίες που συντελούν στην υπεράντληση του υπόγειου νερού.

Εν κατακλείδη, το φαινόμενο της υφαλμύρινσης έχει πάρει μεγάλη έκταση και για το λόγο αυτό θα πρέπει να εκτιμηθεί η σοβαρότητα της κατάστασης και να ληφθούν δραστικά μέτρα για την πρόληψη, ελαχιστοποίηση και αντιμετώπιση του προβλήματος. Η ενημέρωση, εκπαίδευση, ευαισθητοποίηση και δραστηριοποίηση των τοπικών φορέων, αρμόδιων υπηρεσιών και χρηστών είναι άμεσο μέτρο αντιμετώπισης στο πλαίσιο της αειφορικής διαχείρισης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνική

- Αγγελίδης Μ. και Οικονόμου Α., (2005), Χρήσεις γης και επιπτώσεις στον παράκτιο χώρο της Ελλάδας, HELECO '05, ΤΕΕ, Αθήνα, 3-6 Φεβρουαρίου 2005, http://library.tee.gr/digital/m2045/m2045_aggelidis.pdf
- Βουδούρης Κ., Νίκας Κ. και Αντωνάκος Α., (2004), Μελέτη της εξέλιξης του μετώπου υφαλμύρωσης σε παράκτιος υδροφόρους ορίζοντες. Η περίπτωση του παράκτιου τμήματος της ΒΔ Αχαΐας, 10ο Διεθνές Συνέδριο Θεσσαλονίκη Απρίλιος 2004, σελ 1952 - 1961
- Γιαννουλόπουλος Π., Αλεξανδρής Σ., Ψυχογιού Μ. και Πουλοβασίλης Α., (2002), Υφαλμύρωση και ποιοτικά χαρακτηριστικά των υπόγειων νερών του Αργολικού πεδίου, 6ο Υδρογεωλογικό Συνέδριο, Ξάνθη 8 – 10/11/2002, σελ 1-12
- Γιαννουλόπουλος Π. και Πουλοβασίλης Α. (1999), Η εφαρμογή του τεχνητού εμπλουτισμού στο Αργολικό πεδίο – Πρόσφατα αποτελέσματα και προοπτικές, Ημερίδα «Τεχνητός εμπλουτισμός υπόγειων υδροφορέων», Ξάνθη
- Διαμαντής Ι., Πεταλάς Χ., Πλιάκας Φ. (1998), Προβλήματα υφαλμύρινης υπόγειων νερών παράκτιων πεδίων Ανατολικής Μακεδονίας και Θράκης – μέθοδοι αντιμετώπισης, Ημερίδα με θέμα "Υφαλμύρωση υπόγειων υδάτων", ΤΕΕ, Αθήνα 10 Δεκεμβρίου 1998
- Ζανάκη Κ., (2001), Έλεγχος ποιότητας νερού, Αθήνα, Εκδόσεις Ίων
- Καλλέργης Γ.Α. (1998) Υφαλμύρωση παράκτιων υδροφορέων – απορρύπανση, Ημερίδα "Υφαλμύρωση υπόγειων υδάτων", ΤΕΕ, Αθήνα, 10 Δεκεμβρίου 1998
- Καλλέργης Γ.Α. (2000) Εφαρμοσμένη – Περιβαλλοντική Υδρογεωλογία Β' Τόμος, Έκδοση Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας, Αθήνα
- Κουμαντάκης Ι. (1999) Διεθνής εμπειρία σε θέματα τεχνητού εμπλουτισμού υπόγειων νερών με βάση τις εργασίες του σχετικού συμποσίου του Amsterdam (21-25/9/1998), Ημερίδα της Ελληνικής Επιτροπής Υδρογεωλογίας με θέμα "Τεχνητός εμπλουτισμός υπόγειων υδροφορέων", Ξάνθη, 28/5/1999 σελ 14-30

- Κουμαντάκης Ι. (1998). Υφαλμύρωση υπόγειων υδροφόρων σε παραλιακές ζώνες Αττικής – Κορινθίας – Κεφαλονιάς – Ιθάκης – Νάξου – Καβάλας. Προτάσεις για συμβολή στη βελτίωσή των, Ημερίδα με θέμα "Υφαλμύρωση υπόγειων υδάτων", ΤΕΕ, Αθήνα, 10 Δεκεμβρίου 1998
- Μαριολάκος Η. (1998) Γεωοικολογική αντιμετώπιση της υφαλμύρωσης των υπόγειων υδροφορέων. Ημερίδα με θέμα "Υφαλμύρωση υπόγειων υδάτων", ΤΕΕ, Αθήνα, 10 Δεκεμβρίου 1998
- Περγιαλιώτης Π., Παπαδάκου Σ. (1998) Τα υφάλμυρα υπόγεια νερά και οι γενεσιουργές αιτίες τους. Ημερίδα με θέμα "Υφαλμύρωση υπόγειων υδάτων", ΤΕΕ, Αθήνα, 10 Δεκεμβρίου 1998
- Πεταλάς Χ., Πλιάκας Φ., Διαμαντής Ι. (2002) Το πρόβλημα της διείσδυσης της θάλασσας σε παράκτιους υδροφορείς της Ανατολικής Μακεδονίας και Θράκης και μέθοδοι αντιμετώπισής του. Τεχνολογική Επιστημονική Έκδοση ΤΕΕ, Τεύχος 1-2, σελ. 31 - 43
- Πεταλάς Χ., Πλιάκας Φ., Καλλιώρας Α., Διαμαντής Ι. (2002) Τεχνικά, διαχειριστικά και οικονομοτεχνικά στοιχεία σύγχρονων τάσεων αντιμετώπισης της διείσδυσης αλμυρού νερού σε παράκτιες περιοχές στο διεθνή χώρο. 6^ο Υδρογεωλογικό Συνέδριο, Ξάνθη 8-10/11/02
- Πουλοβασίλης Α., Γιαννουλόπουλος Π., Ζυμής Α. (1999) Η εφαρμογή του τεχνητού εμπλουτισμού στο Αργολικό πεδίο. Πρόσφατα αποτελέσματα και προοπτικές. Ημερίδα με θέμα "Τεχνητός εμπλουτισμός υπόγειων υδροφορέων", Ελληνική Επιτροπή Υδρογεωλογίας, Ξάνθη, 28/5/1999
- Σουλιός Γ. (2004) Γενική Υδρογεωλογία, Γ' Τόμος, Εκδόσεις Κυριακίδη Θεσσαλονίκη
- Τολίκας Δ., Γκεμιτζή Α. (1998) Προσομοίωση της υφαλμύρωσης σε τρισδιάστατα πεδία ροής-εφαρμογή στον υδροφορέα της Γερμασογείας Κύπρου, Ημερίδα με θέμα "Υφαλμύρωση υπόγειων υδάτων", ΤΕΕ, Αθήνα, 10 Δεκεμβρίου 1998
- Τολίκας Δ., Κανακούλης Β., Αργυριάδου Ι. (1998) Ολοκληρωμένο πλαίσιο αντιμετώπισης του προβλήματος της υφαλμύρωσης παράκτιων υδροφορέων. Ημερίδα με θέμα "Υφαλμύρωση υπόγειων υδάτων", ΤΕΕ, Αθήνα, 10 Δεκεμβρίου 1998

Χαρμανίδης Φ. (1998) Φαινόμενα υφαλμύρωσης σε παράκτιους καρστικούς υδροφορείς νησιών Ν-ΝΑ Αιγαίου, δυνατότητες ορθολογικής διαχείρισής τους και αναστροφής του φαινομένου. Ημερίδα με θέμα "Υφαλμύρωση υπόγειων υδάτων", ΤΕΕ, Αθήνα, 10 Δεκεμβρίου 1998

Ξενόγλωσση

Capaccioni Bruno, Didero Mariano, Paletta Carmela, Didero Lia (2005). Saline intrusion and refreshing in a multilayer aquifer in the Catania Plain (Sicily, Southern Italy): dynamics of degradation processes according to the hydrochemical characteristics of groundwaters. *Journal of Hydrology* 307, pp 1-16

Chen K.P., Jiao J.J. (2007) Seawater intrusion and aquifer freshening near reclaimed coastal area of Shenzhen. *Water science and Technology: Water supply* vol 7 No2, pp 137-145

Demirel Zeynel. (2004). The history and the evaluation of saltwater intrusion into a coastal aquifer in Mersin, Turkey. *Journal of Environmental Management* 70, pp 275-282

Ghabayen Said, McKee Mac, Kembrowski Mariush. (2006) Ionic and isotopic ratios for identification of salinity sources and missing data in the Gaza aquifer. *Journal of Hydrology* 318, pp360-373

Moujaber M. El., Bousamrab., Darwish T., Atallah T. (2006) Comparison of different indicators for groundwater contamination by seawater intrusion on Lebanese coast. *Water Resources Management* 20, pp161-181

Mustafa E. Ergil (2000) The salinization problem of the Guzelyurt aquifer, Cyprus. *Water Reserve* vol 34 No 4, pp 1201-1214

Pulido – Leboeuf Pablo, Pulido-Bosch Antonio, Calvache Maria Luisa, Vallejos Angela, Andreu Jose Miguel (2003). Strontium, SO_4^{2-} / Cl^- and $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ ratios as tracers for the evolution of seawater into coastal aquifers : the example of Castell de Ferro aquifer (SE Spain). *Comptes Rendus Geosciences* 335 pp. 1039-1048

- Shammas M.I., Jacks G. (2007) Seawater intrusion in the Salalah plain aquifer, Oman. Environmental Geology 53, pp575-587
- Voudouris K., Daskalaki P., Antonakos A. (2005) Water Resources and groundwater quality in North Peloponnesus (Greece). Global Nest Journal vol.7 pp 340-353
- Wu Jichun, Meng Fanhai, Wang Xiaowen, Wang Dong. (2008) The development and control of the seawater intrusion in the eastern coastal of Laizhou Bay, China. Environmental Geology 54, pp1763-1770
- Ziegenbalg G., Dimitriadis K. and Sarrikostis E., (2002), Crystechsalin – A European project to manage and reduce saline water intrusion in coastal aquifers, 6^ο Υδρογεωλογικό Συνέδριο, Ξάνθη
- Papadopoulou M.P., Karatzas G.P., Koukadaki M.A. and Trichakis Y., (2005), Modeling the saltwater intrusion phenomenon in coastal aquifers – A case study in the industrial zone of Herakleio in Crete, Global NEST Journal, Vol. 7, No 2, pp. 197 – 203

Διαδικτυακές πηγές

<http://www.eea.europa.eu/>

<http://www.lenntech.com/groundwater/seawater-intrusions.htm>

<http://ndbhmi.chi.civil.ntua.gr/el/index.html>

[http://ec.europa.eu/research/infocentre/article_en.cfm?id=/research/headlines/news/art
icle_07_08_20_en.html&item=&artid=](http://ec.europa.eu/research/infocentre/article_en.cfm?id=/research/headlines/news/article_07_08_20_en.html&item=&artid=)

<http://www.blod.gr/lectures/Pages/viewlecture.aspx?LectureID=416>

<http://www.geo.auth.gr/763/ch5.htm>

<http://kireas.org/smf/index.php?topic=651.0;wap2>

<http://www.tovima.gr/relatedarticles/article/?aid=118482>

<http://www.tovima.gr/relatedarticles/article/?aid=93093>

[http://flashnews.gr/post/220006/leipsydria-telos-gia-thn-gaydo-ndash-brethhke-
afthono-nero](http://flashnews.gr/post/220006/leipsydria-telos-gia-thn-gaydo-ndash-brethhke-afthono-nero)

[http://www.ecocity.gr/index.php?option=com_k2&view=item&id=3239:t%CE%B5%
25](http://www.ecocity.gr/index.php?option=com_k2&view=item&id=3239:t%CE%B5%
25)

<http://www.kathimerini.gr/282948/article/epikairothta/ellada/170000-gewtrhseis-ekanan-thn-ellada-soyrwthri>

<http://www.tovima.gr/relatedarticles/article/?aid=93093>

http://www.geotriseis-adeies.gr/index.php?option=com_content&view=article&id=56:2011-10-15-17-57-25&catid=19&Itemid=164

<http://www.tovima.gr/relatedarticles/article/?aid=118482>

<http://www.kathimerini.gr/320002/article/epikairothta/ellada/epi-meres-oi-vrysesetrexan-8alassa>