

ΔΗΜΟΚΡΕΤΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΡΑΚΗΣ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ  
ΥΔΡΑΥΛΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ  
Ακαδημαϊκό έτος 2024 – 2025

**Ι. ΔΙΑΜΑΝΤΗΣ**  
Ομ. Καθηγητής Δ.Π.Θ.  
**Φ.-Κ. ΠΛΙΑΚΑΣ**  
Αφυπηρετήσας Καθηγητής Δ.Π.Θ.  
**Α. ΚΑΛΛΙΩΡΑΣ**  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

**ΕΙΔΙΚΑ ΘΕΜΑΤΑ ΕΡΕΥΝΩΝ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ**  
**ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΝΕΡΟΥ**  
**ΚΑΙ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

**1. ΠΑΡΑΚΤΙΑ ΥΠΟΓΕΙΑ ΥΔΑΤΙΚΑ**  
**ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ**

Ξάνθη 2024



## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΠΑΡΑΚΤΙΑ ΠΕΔΙΑ - ΠΑΡΑΚΤΙΑ ΥΔΡΟΦΟΡΑ ΣΤΡΩΜΑΤΑ .....	1
1.1. Γενικά.....	1
1.2. Πηγές ρύπανσης υπόγειων νερών παράκτιων πεδίων .....	4
1.2.1. Φυσικά αλμυρά νερά - Μηχανισμός διείσδυσης της θάλασσας .....	4
1.2.2. Φυσικές ενδογενείς πηγές (γεωθερμία).....	7
1.2.3. Ανθρωπογενείς πηγές (αγροτικές, αστικές, βιομηχανικές) - Έμμεσες πηγές (μεταφερόμενη ρύπανση από μεγάλα ποτάμια).....	7
1.3. Τρόποι διάκρισης των διαφόρων πηγών ρύπανσης .....	8
2. ΥΔΡΑΥΛΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΗΣ ΘΑΛΑΣΣΙΑΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΣΕ ΠΑΡΑΚΤΙΟΥΣ ΥΔΡΟΦΟΡΟΥΣ .....	10
2.1. Εισαγωγή.....	10
2.2. Σχέση των Ghyben – Herzberg μεταξύ γλυκού – αλμυρού νερού.....	11
2.3. Σχήμα της διεπιφάνειας γλυκού – αλμυρού νερού.....	13
2.4. Επίδραση της άντλησης στη θαλάσσια διείσδυση .....	15
2.5. Άνοδος της διεπιφάνειας γλυκού – αλμυρού νερού .....	16
3. ΥΔΡΟΧΗΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΗΣ ΘΑΛΑΣΣΙΑΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ .....	18
3.1. Γενικά.....	18
3.2. Πυκνότητα.....	19
3.3. Εξίσωση κατάστασης.....	20
3.4. Δυναμικό ιξώδες .....	22
3.5. Ανταλλαγή ιόντων και ρόφηση .....	24
3.5.1 Εισαγωγή.....	24
3.5.2. Ανταλλαγή κατιόντων κατά τη διείσδυση αλμυρού νερού .....	25
4. Η ΔΙΕΘΝΗΣ ΚΑΙ ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΕΜΠΕΙΡΙΑ ΣΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΘΑΛΑΣΣΙΑΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ.....	32
4.1. Εισαγωγή.....	32
4.2. Διεθνής εμπειρία θαλάσσιας διείσδυσης στην Ευρώπη και στην ευρύτερη περιοχή της Μεσογείου.....	33
4.2.1. Ιταλία .....	33
4.2.2. Τυνησία .....	35
4.2.3. Ισπανία .....	35

4.2.4. Γερμανία .....	36
4.2.5. Τουρκία.....	37
4.2.6. Δανία .....	38
4.2.7. Πορτογαλία .....	38
4.2.8. Μαρόκο.....	38
4.2.9. Κύπρος.....	39
4.3. Διεθνής εμπειρία στη θαλάσσια διείσδυση στις Η.Π.Α. ....	39
4.3.1. Los Angeles.....	39
4.3.2. Florida .....	40
4.3.3. Virginia .....	41
4.3.4. Georgia.....	41
4.3.5. Kansas .....	42
4.3.6. California .....	42
4.3.7. Hawaii.....	44
4.3.8. Sacramento .....	44
4.3.9. Jamaica .....	45
4.4. Διεθνής εμπειρία στη θαλάσσια διείσδυση στη Νότια Αμερική.....	45
4.4.1. Χιλή .....	45
4.5. Ελληνική εμπειρία περί του φαινομένου της θαλάσσιας διείσδυσης .....	46
4.5.1. Γενικά .....	46
4.5.2. Ανατολική Μακεδονία και Θράκη.....	46
4.5.2.1. Παράκτιες περιοχές του Δήμου Παγγαίου του Ν. Καβάλας.....	47
4.5.2.2 Ανατολικό Δέλτα του Ποταμού Νέστου .....	55
4.5.2.3. Πεδινή παράκτια περιοχή Ξυλαγανής-Ιμέρου του Ν. Ροδόπης.....	60
4.5.2.4. ΝΔ παράκτια περιοχή Ν. Ροδόπης.....	65
4.5.2.5. Δέλτα του Ποταμού Έβρου.....	78
4.5.3. Πελοπόννησος.....	80
4.5.4. Νησιωτική ελληνική περιφέρεια.....	82
5. ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΤΑΣΕΙΣ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ ΤΗΣ ΘΑΛΑΣΣΙΑΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΤΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ .....	83
5.1. Διαχειριστικές παράμετροι για τη θαλάσσια διείσδυση .....	83
5.1.1. Μετρήσεις .....	84
5.1.2. Παρακολούθηση .....	85
5.1.3. Μαθηματικά ομοιώματα για πρόβλεψη και αποτίμηση .....	85
5.1.4. Τροποποίηση .....	87

5.2. Σύγχρονες τάσεις αντιμετώπισης .....	87
5.3. Διαχείριση του προβλήματος της διείσδυσης της θάλασσας.....	87
5.3.1. Φραγμοί ελέγχου της θαλάσσιας διείσδυσης.....	90
5.3.2. Τεχνητός εμπλουτισμός .....	95
5.3.3. Έλεγχος των αντλήσεων.....	96
5.3.4. Ανακατανομή των αντλήσεων .....	96
5.3.5. Τροποποιημένα σχέδια αντλήσεων.....	97
5.3.6. Αντιμετώπιση της επιφανειακής διείσδυσης αλμυρού νερού στις εκβολές ποταμών .....	98
5.3.7. Εγγειοβελτιωτικά έργα και αποστράγγιση .....	98
5.3.8. Άμεση διάθεση επιφανειακού νερού σε αντικατάσταση της χρήσης του υπόγειου νερού.....	99
5.3.9. Εγκαταλειμμένες γεωτρήσεις .....	99
5.3.10. Τεχνικές αφαλάτωσης.....	101
5.4. Περιπτώσεις αντιμετώπισης της θαλάσσιας διείσδυσης στο διεθνή χώρο .....	102
6. ΑΣΚΗΣΕΙΣ .....	104
7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	110



# 1. ΠΑΡΑΚΤΙΑ ΠΕΔΙΑ - ΠΑΡΑΚΤΙΑ ΥΔΡΟΦΟΡΑ ΣΤΡΩΜΑΤΑ

(κύριες βιβλιογραφικές πηγές: Διαμαντής, 2001, Διαμαντής και Πλιάκας, 2011, Fetter, 2001)

## 1.1. Γενικά

Ο έντονος τεκτονικός διαμελισμός της Ελλάδας έχει ευνοήσει τη δημιουργία εκτεταμένων παράκτιων πεδίων, πολλά από τα οποία φιλοξενούν εύφορα εδάφη και δυναμικά υπόγεια υδροφόρα στρώματα. Τα πεδία αυτά σε συνδυασμό με τις ήπιες κλιματολογικές συνθήκες που επικρατούν στα παράκτιες περιοχές, αποτελούν ενδιαφέρουσες εστίες οικονομικής ανάπτυξης. Όμως για τους λόγους που αναφέρονται παρακάτω τα πεδία αυτά δημιουργούν έντονους προβληματισμούς, όσον αφορά στην έρευνα και στην εκμετάλλευση των φυσικών τους πόρων:

- Ο τρόπος δημιουργίας (έντονες τεκτονικές δραστηριότητες, καταβύθιση, παρουσία μεγάλων ρηγμάτων κ.λ.π.).
- Η γειτονία με τη θάλασσα (προβλήματα υφαλμύρισης υδροφόρων, διείσδυση της θάλασσας) και η συνύπαρξη με προστατευόμενες περιοχές (υγρά τοπία, εκβολές και δέλτα ποταμών).
- Οι ανθρώπινες δραστηριότητες (κυρίως αγροτικές και αστικές).
- Οι τεχνητές επεμβάσεις (επέμβαση στο υδρογραφικό δίκτυο για τη βελτίωση των εδαφών).
- Η υπερεκμετάλλευση των υπόγειων νερών (αλόγιστη χρήση νερών για άρδευση).
- Οι φυσικές πηγές ρύπανσης (γεωθερμία, κοιτάσματα, κ.λ.π.).

Για να είναι δυνατή η σύνταξη ενός ορθολογικού μοντέλου διαχείρισης των φυσικών πόρων και κατά συνέπεια των υδατικών πόρων των παράκτιων πεδίων, θα πρέπει να γίνουν γνωστά με κάθε λεπτομέρεια τα προβλήματα αυτών των πεδίων και να μελετηθούν οι πλέον κατάλληλες μέθοδοι διερεύνησής τους. Τα παράκτια πεδία αποτελούν χαρακτηριστικές περιοχές, που οριοθετούνται προς την ενδοχώρα με υψηλές ζώνες (λοφώδεις ή ορεινές) και προς τη θάλασσα από την ακτογραμμή. Παράκτια πεδία εντοπίζονται τόσο σε περιοχές με σταθερό υπόβαθρο πετρωμάτων όσο και σε περιοχές με βυθιζόμενο υπόβαθρο. Μπορεί επίσης να περιλαμβάνουν μεγάλες περιοχές που προηγουμένως αποτελούσαν θαλάσσιο πυθμένα, που στην περίπτωση αυτή η γεωλογία της παράκτιας ζώνης μπορεί να είναι όμοια με της παρακείμενης ηπειρωτικής υφαλοκρηπίδας.

Τα ιζήματα και τα ιζηματογενή πετρώματα των παράκτιων πεδίων σχηματίστηκαν είτε από τις ποταμοχειμάρριες, είτε από τις θαλάσσιες αποθέσεις. Οι ποταμοχειμάρριες αποθέσεις έχουν την τάση να εμφανίζονται προς την ξηρά, ενώ οι θαλάσσιες προς τη θάλασσα, μολονότι η διακύμανση του επιπέδου της θάλασσας έχει προκαλέσει μια εναλλαγή κατά την κατακόρυφη έννοια στα ηπειρωτικά και στα θαλάσσια στρώματα. Ομάδες που αποτέθηκαν σ' ένα δεδομένο χρόνο διαβαθμίζονται, κατά την οριζόντια έννοια, από ηπειρωτικά σε θαλάσσια. Μεμονωμένες μονάδες (χρονικές) εμφανίζουν μια ποικιλία μορφών, αν και η σειρά εντοπίζεται σε όλη την επιφάνεια του παράκτιου πεδίου συνήθως όμως γίνεται παχύτερη προς την θάλασσα.

Τα παράκτια πεδία σχεδόν πάντα περιλαμβάνουν τεταρτογενή ιζήματα όπως επίσης μπορεί να περιλαμβάνουν τριτογενούς και μεσοζωϊκής ηλικίας αποθέσεις. Οι παλαιότερες ομάδες πετρωμάτων τείνουν να εμφανίζονται πλησίον της ενδοχώρας, ενώ τα νεότερα πετρώματα και ιζήματα εντοπίζονται στην επιφάνεια πλησίον της ακτής. Τα ιζήματα των

παράκτιων πεδίων μπορεί να είναι ασύνδετα (χαλαρά) ή στερεοποιημένα (συνεκτικά ή συμπαγή), χωρίς να έχουν σχέση ως προς την ηλικία. Δηλαδή θα μπορούσαν χαλαροί υδροφόροι να ανήκουν σε παλαιότερη ηλικία και ασβεστολιθικοί υδροφορείς σε νεότερη ηλικία, κάτι που συμβαίνει σε πολλές περιοχές.

Οι παράκτιοι υδροφόροι τυπικώς αποτελούνται από ηπειρωτικής προέλευσης άμμους, χαλίκια και ψαμμίτες ή θαλάσσιας προέλευσης άμμους και ασβεστόλιθους. Τα αδιαπέρατα στρώματα αποτελούνται από θαλάσσιας και ηπειρωτικής προέλευσης αργίλους και ιλύες. Χαρακτηριστικό των παράκτιων πεδίων είναι οι εναλλαγές και οι αλληλο-συμπλεκόμενες στρώσεις διαφορετικής λιθολογίας. Μερικές ομάδες παρουσιάζουν μεγάλο πάχος και εκτείνονται σε εκατοντάδες χιλιόμετρα, ενώ άλλες συχνά εντοπίζονται σε ελάχιστα χιλιόμετρα. Ένα ή περισσότερα υδροφόρα στρώματα μπορεί να βρίσκονται στην ίδια τοποθεσία (επάλληλοι υδροφόροι). *Μερικά από τα παραγωγικότερα υδροφόρα στον κόσμο βρίσκονται σε αποθέσεις παράκτιων πεδίων.*

Τα ιζήματα των παράκτιων πεδίων αποτέθηκαν είτε κοντά στη θάλασσα είτε σε αβαθείς θάλασσες. Έτσι το νερό των πόρων ήταν αρχικά αλμυρό. Η διακύμανση του επιπέδου της θάλασσας κατά τη διάρκεια του Πλειστοκαίνου, πλημμύρισε πολλές περιοχές που σήμερα είναι ξηρά. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα το θαλασσινό νερό να καταλάβει προσωρινά πολλούς γλυκούς υδροφόρους μέχρι το πρόσφατο γεωλογικό παρελθόν. Αναλογικά το επίπεδο της θάλασσας ήταν μέχρι 90 m χαμηλότερα κατά τη διάρκεια των τελευταίων παγετώνων του Wisconsin απ' ό,τι είναι σήμερα, αποκαλύπτοντας έτσι περισσότερο την ηπειρωτική υφαλοκρηπίδα απ' ό,τι αυτή εκτίθεται σήμερα. Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου το αλμυρό νερό εκδιώχθηκε από τους υδροφόρους της ενδοχώρας σε σημαντικά βάθη.

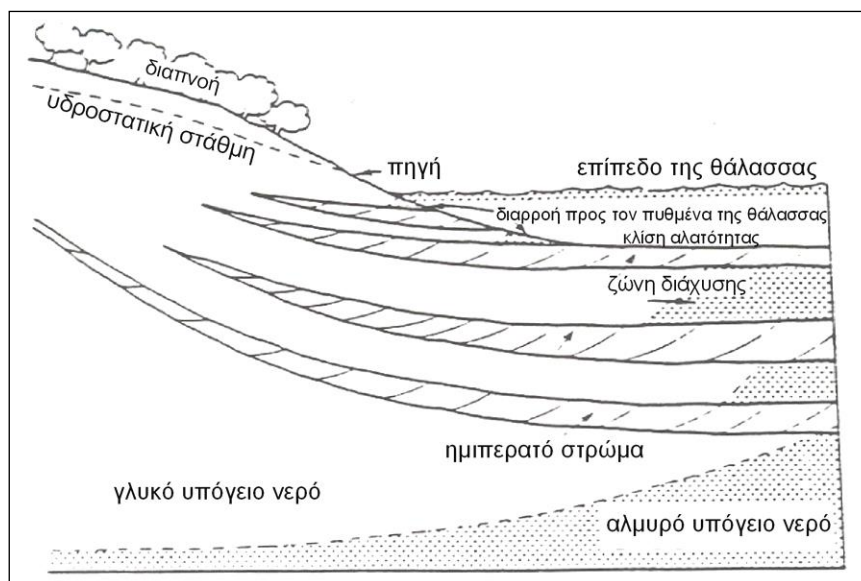
Επειδή τα φυσικά πρηνή των στρωμάτων των παράκτιων πεδίων κλίνουν προς τη θάλασσα, βαθείς υδροφόροι, κοντά στη θάλασσα ή κάτω από αυτή, τροφοδοτούνται από την ενδοχώρα. Το γλυκό νερό που ρέει προς τα κατόντη (κατεύθυνση κλίσης), στη συνέχεια εκφορτίζεται με διάφορους φυσικούς μηχανισμούς στα παράκτια πεδία. Το προσδιορισμένο ποσόν εκροής του υδροφόρου ορίζοντα είναι συνάρτηση του όγκου του υδροφόρου που εμπλουτίζεται και του όγκου του γλυκού νερού που μπορεί να διαφύγει προς τα κάτω (κατεύθυνση κλίσης) με τη βοήθεια των διαθέσιμων μηχανισμών. Αλμυρό νερό έχει εντοπιστεί στην ενδοχώρα σε μεγάλα βάθη κάτω από 1800 m από το επίπεδο της θάλασσας, αν και αυτό είναι ασύνηθες. Επίσης γλυκό νερό βρίσκεται σ' ένα βάθος 300 m ή περισσότερο κάτω από το επίπεδο της θάλασσας σε υπό πίεση υδροφόρους σε πολλά παράκτια πεδία. Ακόμη γλυκό νερό έχει εντοπιστεί σε μεγάλα βάθη σε υπό πίεση παράκτια υδροφόρα πολλά χιλιόμετρα μέσα στη θάλασσα.

Σ' ένα βαθύ πηγάδι στο νησί Nantuchet 64 km από τις ακτές της Νέας Αγγλίας των ΗΠΑ, εντοπίστηκε γλυκό νερό σε υπό πίεση υδροφόρους βάθους από 223 έως 250 m και στα 274 ως 283 m. Αυτά φιλοξενούνταν σε άμμους κρητιδικής ηλικίας και ήταν περιορισμένα (απομονωμένα) με την παρεμβολή αργίλων. Αυτά αντιπροσωπεύουν υδροφόρα που εμπλουτίστηκαν κατά τη διάρκεια του Πλειστοκαίνου όταν το επίπεδο της θάλασσας ήταν χαμηλότερο.

Το γλυκό νερό μπορεί να εκφορτίζεται από τους παράκτιους υδροφόρους διαμέσου διαφόρων φυσικών μηχανισμών (σχ. 1.1), όπως:



- με την εξατμισοδιαπνοή (συμβαίνει συνήθως από τον φρεάτιο ορίζοντα),
- με διαρροή, διαμέσου πηγών, σε υδατορεύματα, σε παλιρροιακά νερά και στον πυθμένα των θαλασσών (και η περίπτωση αυτή αφορά ελεύθερους υδροφόρους),
- αναμειγνυόμενο με το υπόγειο αλμυρό νερό στη ζώνη διάχυσης,
- με διαρροή διαμέσου ενός ημιπερατού στρώματος κάτω από την επίδραση της υδραυλικής κλίσης και
- με διαρροή διαμέσου ενός ημιπερατού στρώματος κάτω από την επίδραση της οσμωτικής πίεσης που προκαλείται από την "κλίση" αλατότητας (διαφορά αλατότητας).



Σχήμα 1.1. Σημεία εκφόρτισης γλυκού νερού παράκτιων υδροφόρων και η σχέση του με το αλμυρό νερό (Fetter, 2001).

Οι μηχανισμοί (1) και (2) είναι πολύ αποτελεσματικοί στην εκφόρτιση νερού από ελεύθερους υδροφόρους. Πηγές γλυκού νερού στον πυθμένα της θάλασσας απαντούν σε ελεύθερα και σε υπό πίεση υδροφόρους, όταν το υπό πίεση μέρος είναι ρωγματωμένο. Υπό πίεση υδροφόροι αφορούν μόνον τις τρεις τελευταίες μεθόδους (3, 4, 5) οι οποίες δεν είναι τόσο επαρκείς. Υποθέτοντας ότι όλοι οι υδροφόροι έχουν την ίδια μεταβιβασιμότητα, ο βαθύτερος μπορεί να εκφορτίσει το λιγότερο γλυκό νερό λόγω της ελάττωσης του δυνατού αριθμού μηχανισμών και της αποτελεσματικότητας των μεθόδων εκφόρτισης. Υπό πίεση παράκτιοι υδροφόροι μπορεί να περιέχουν γλυκό νερό ακόμη και αν οι υπερκείμενοι υδροφόροι περιέχουν αλμυρό νερό. Για παράδειγμα στο Long Island της Νέας Υόρκης εντοπίζεται ένας ελεύθερος και δύο βαθείς υποπίεση υδροφόροι, που όλοι εμπλουτίζονται από τις βροχοπτώσεις στο κέντρο του νησιού. Οι μεγαλύτερες ποσότητες γλυκού νερού εκφορτίζονται διαμέσου του ελεύθερου υδροφόρου και πολύ λιγότερος όγκο νερού κατευθύνεται στους υποπίεση. Πηγάδια που ανορύχτηκαν σε αποθέσεις του νησιού 8700 m από την ακτογραμμή συνάντησαν γλυκό νερό σε όλο το βάθος και των δύο υποπίεση υδροφόρων στρωμάτων, με 1,5 έως 3 m αρτεσιανό φορτίο στον υψηλότερο και 6 m στον χαμηλότερο υδροφόρο. Αυτά βρίσκονται σε μια απόσταση τουλάχιστον

19 km από το πλησιέστερο μέρος εμπλουτισμού για τους υποπίεση υδροφόρους (Pluhowski and Kantrowitz, 1964).

## 1.2. Πηγές ρύπανσης υπόγειων νερών παράκτιων πεδίων

Οι πηγές ρύπανσης που έχουν εντοπιστεί σε παράκτια πεδία ομαδοποιούνται στις παρακάτω κατηγορίες:

### 1.2.1. Φυσικά αλμυρά νερά - Μηχανισμός διείσδυσης της θάλασσας

Στην περίπτωση αυτή ανήκει η με οποιονδήποτε τρόπο διείσδυση της θάλασσας στα παράκτια πεδία, υπόγεια ή επιφανειακά, καθώς και από το υπολειμματικό νερό που προέρχεται είτε από την κατάκλυση από θάλασσα της περιοχής, σε παλαιότερες εποχές, λόγω της συνεχούς διακύμανσης του επιπέδου της θάλασσας ή από διάλυση ορυκτών ή προϋπαρχόντων αλάτων. Επίσης αλμυρά νερά μπορεί να προέλθουν και λόγω εξαμισοδιαπνοής, αυτό όμως αφορά τον εντελώς αβαθή φρεάτιο ορίζοντα των παράκτιων πεδίων. Οι παραπάνω περιπτώσεις προκαλούν ως γνωστόν αύξηση των αλάτων. Επίσης η αύξηση αυτή μπορεί να οφείλεται σε πάρα πολλές άλλες αιτίες, όπως στο περιβάλλον της υδροφορίας (λεπτόκοκκο αργιλικό περιβάλλον) που δημιουργεί συνθήκες μικρής περατότητας και γενικά αργούς ρυθμούς ανανέωσης. Βέβαια το σύνολο των αλάτων για κάθε περίπτωση, είτε διαφέρει ποσοτικά, είτε ποιοτικά, είτε μεταβάλλεται χρόνο με το χρόνο διαφορετικά. Στην περίπτωση για παράδειγμα που οφείλεται σε υδρογεωλογικούς λόγους (λεπτόκοκκος υδροφόρος), η παρουσία των αλάτων εξαρτάται κυρίως από τη σύσταση του υδροφόρου και από τον μεγάλο χρόνο παραμονής του νερού στον υδροφόρο (σχ. 1.2). Για το λόγο αυτό, με τις πρώτες αντλήσεις δημιουργούνται συνθήκες καλύτερης κυκλοφορίας και έτσι μειώνεται το σύνολο των αλάτων κατά τη διάρκεια της αντλητικής περιόδου.

Στην περίπτωση της θάλασσας το επικρατούν άλας είναι το NaCl και κατά συνέπεια τα ιόντα Na<sup>+</sup> και Cl<sup>-</sup>. Κατά την περίοδο της άντλησης, το σύνολο των αλάτων αυξάνει υπερβολικά και μπορεί να παραμείνει αυξημένο και στη συνέχεια. Αντίθετα στην περίπτωση των θαμμένων αλμυρών, η ποιότητα του νερού, είτε παραμένει σταθερή, είτε βελτιώνεται με τα χρόνια. Ακόμη πολλές φορές στις περιπτώσεις των παλιών αλμυρών, λόγω παραμονής τους στο υπέδαφος για μια μεγάλη γεωλογική περίοδο, τα ιόντα Na<sup>+</sup> έχουν αντικαταστήσει σε μεγάλο βαθμό τα μεταλλικά ιόντα των διαφόρων άλλων ενώσεων και κυρίως τα ιόντα Ca<sup>2+</sup> και Mg<sup>2+</sup>. Αυτό σημαίνει πως σε υδροφόρους που έχουν επηρεαστεί από τέτοιες πηγές, τα ιόντα Na<sup>+</sup> είναι υπερβολικά αυξημένα.

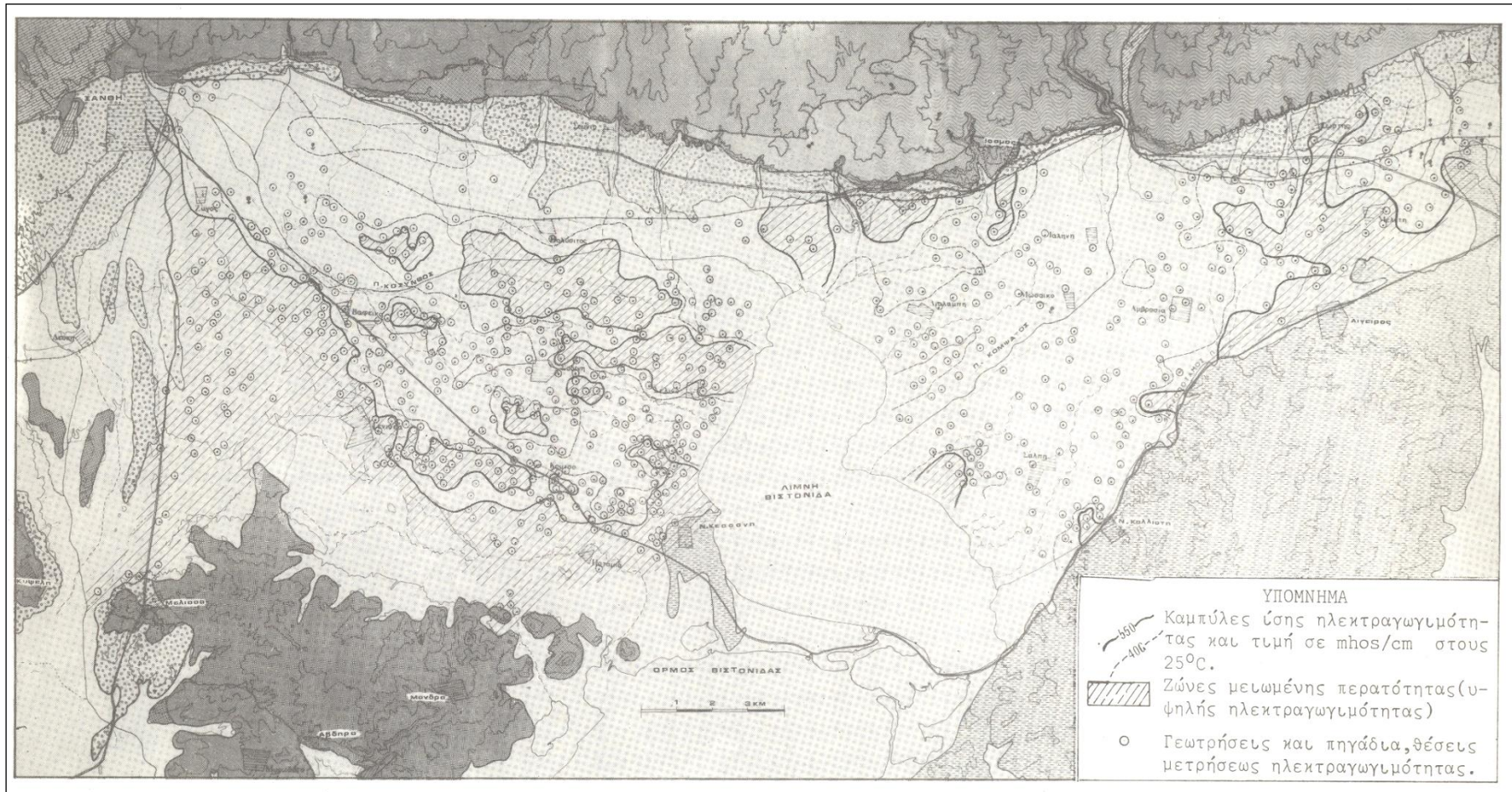
Η θάλασσα όμως αποτελεί την ουσιαστικότερη και μονιμότερη πηγή ρύπανσης των παράκτιων υδροφόρων στρωμάτων είτε αυτή προέρχεται από υπόγεια ή προέρχεται από επιφανειακή διείσδυση. Η θαλάσσια διείσδυση χαρακτηρίζεται ως *παθητική ή ενεργητική* (Fetter, 1973).

Η *παθητική θαλάσσια διείσδυση* αφορά στην είσοδο της θάλασσας στον παράκτιο υδροφόρο, χωρίς να προκαλείται αναστροφή της υδραυλικής κλίσης του υδροφόρου (σχ. 1. 3I), η οποία διατηρείται προς το σημείο επαφής των δυο διαφορετικών ρευστών (γλυκό – αλμυρό

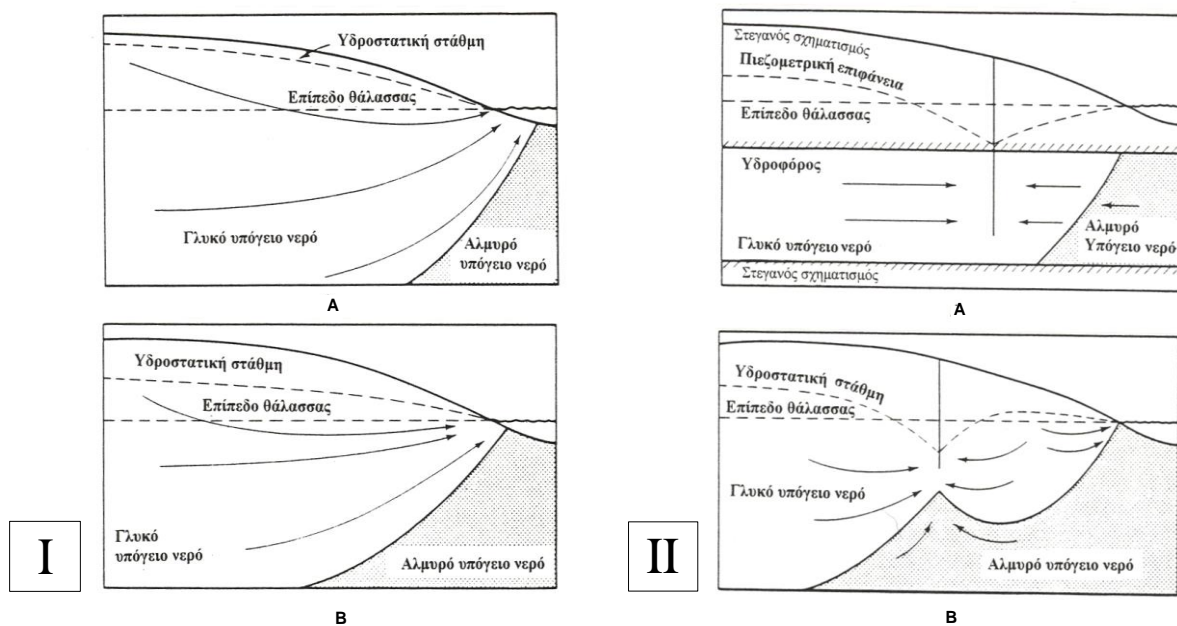
νερό). Στην περίπτωση αυτή η διεπιφάνεια θα μετατοπισθεί με αργό ρυθμό προς την ενδοχώρα έως ότου επέλθει νέα υδραυλική ισορροπία μεταξύ των δύο ρευστών. Η παθητική θαλάσσια διείσδυση λαμβάνει χώρα σε πολλούς παράκτιους υδροφόρους που υπόκεινται σε καθεστώς εκμετάλλευσης, με πολύ αργούς ρυθμούς. Πρέπει να σημειωθεί ότι μικρές αλλαγές σημειώνονται με τις εποχιακές ή ετήσιες διακυμάνσεις των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων, όπως επίσης αλλαγές μπορεί να προκύψουν μετά από μακροχρόνιες αλλαγές στον κλιματικό τύπο ή στη σχετική θέση του επιπέδου της θάλασσας.

Η *ενεργητική θαλάσσια διείσδυση* έχει δυσμενείς επιπτώσεις στο παράκτιο υδροφόρο σύστημα, προκαλώντας αναστροφή της υδραυλικής κλίσης λόγω συνεχώς αυξανόμενης απόληψης γλυκού νερού (σχ. 1.3II). Η συνεχής άντληση δημιουργεί ένα είδος ανεστραμμένου κώνου κατάπτωσης (cone of depression), ενώ η διεπιφάνεια μετακινείται γρηγορότερα προς την ενδοχώρα απ' ό τι συνήθως συμβαίνει κατά την παθητική διείσδυση. Επιπλέον η μετακίνηση δεν θα σταματήσει παρά μόνον όταν φτάσει στο χαμηλότερο σημείο της υδραυλικής κλίσης στο κέντρο της άντλησης. Αυτός είναι για παράδειγμα ο τύπος διείσδυσης της θάλασσας, που καταστρέφει τους γλυκούς υδροφόρους στο παράκτιο πεδίο της Ροδόπης.

Η αλμύριση των παράκτιων υδροφόρων που προκαλείται από επιφανειακή θαλάσσια διείσδυση πραγματοποιείται κυρίως σε ελεύθερα υδροφόρα μέσα από αποστραγγιστικά κανάλια την εποχή της πλημμυρίδας της θάλασσας. Τέτοια έργα με συνέπεια τη διείσδυση της θάλασσας έχουν εντοπιστεί στην περιοχή του Δέλτα του Π. Νέστου, στο Δέλτα του Π. Λίσσου (στην περιοχή Ιμέρου Ροδόπης), στο Δέλτα του Π. Έβρου (κοίτη Μαρίτσας) κ.α.. Πολλές φορές και διάφορα άλλα έργα που έχουν κατασκευαστεί στην παράκτια περιοχή διευκολύνουν τη διείσδυση της θάλασσας στους υδροφόρους της περιοχής. Τέτοια περίπτωση θεωρείται η κακή κατασκευή γεωτρήσεων με τοποθέτηση φίλτρων σε αλμυρά και γλυκά στρώματα, καθώς και η διάνοιξη αρδευτικών δικτύων σε περατά εδαφικά στρώματα (παλιές κοίτες) που φτάνουν σχεδόν μέχρι την ακτή.



Σχήμα 1.2. Χάρτης κατανομής ηλεκτρικής αγωγιμότητας αβαθούς υπό πίεση υδροφόρου του πεδινού τμήματος της λεκάνης Βιστωνίδας (αίτια αυξημένης ηλεκτρικής αγωγιμότητας οι περιοχές λεπτόκοκκου υλικού) (Διαμαντής, 1985).



Σχήμα 1.3. Παθητική (I) και ενεργητική (II) διείδυση της θάλασσας (από Fetter, 2001).

### 1.2.2. Φυσικές ενδογενείς πηγές (γεωθερμία)

Λόγω του έντονου διαμελισμού στις περισσότερες περιπτώσεις των παράκτιων περιοχών και της παρουσίας κατά συνέπεια μεγάλων και βαθιών ρηγμάτων, οι περιοχές φιλοξενούν σημαντικές γεωθερμικές εστίες. Το φαινόμενο αυτό εμφανίζεται ιδιαίτερα έντονο στην παράκτια περιοχή της Θράκης. Η γεωθερμία των περιοχών αυτών, δια μέσου μηχανισμού ο οποίος δεν είναι αρκετά γνωστός, προκαλεί ανάμειξη των γλυκών νερών με τα νερά της γεωθερμίας. Η εικόνα αυτή για παράδειγμα γίνεται αρκετά εμφανής στην περιοχή του Δέλτα του Νέστου και στο γεωθερμικό πεδίο της Ν. Κεσσάνης (Νομού Ξάνθης). Στην περίπτωση της γεωθερμίας, η σύσταση των αλάτων έχει σχέση με την ποιότητα του νερού της γεωθερμίας και η μεταβολή της συγκέντρωσης των αλάτων αυξάνει με την εντατική άντληση, όπως συμβαίνει και στην περίπτωση της θάλασσας.

### 1.2.3. Ανθρωπογενείς πηγές (αγροτικές, αστικές, βιομηχανικές) - Έμμεσες πηγές (μεταφερόμενη ρύπανση από μεγάλα ποτάμια)

Η έντονη καλλιέργεια των παράκτιων πεδίων συνεπάγεται και υπερβολική χρήση λιπασμάτων και φυτοφαρμάκων. Η παρουσία μεγάλου αριθμού πληθυσμού δημιουργεί την ανάγκη εξεύρεσης χώρων απόθεσης των στερεών απορριμμάτων (σκουπιδοτόποι), οι οποίοι συνήθως είναι ανεξέλεγκτοι. Η ύπαρξη επίσης βιομηχανικών μονάδων που πολλές φορές λειτουργούν με ελλιπή βιολογικό καθαρισμό, οδηγεί στην απόρριψη των υγρών λυμάτων στα

υδατορεύματα της περιοχής. Όλα τα παραπάνω δημιουργούν πηγές ρύπανσης με φορτίο κυρίως οργανικό αλλά και με βαρέα μέταλλα και ιχνοστοιχεία.

### 1.3. Τρόποι διάκρισης των διαφόρων πηγών ρύπανσης

Για τη διάκριση των διαφόρων πηγών ρύπανσης απαιτούνται:

- μετρήσεις ηλεκτρικής αγωγιμότητας στο σύνολο σχεδόν των γεωτρήσεων (η κατανομή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας δίνει μια πρώτη ένδειξη για την εστία των πηγών),
- λεπτομερείς χημικές αναλύσεις από ένα όσο το δυνατόν πιο πυκνό δίκτυο σημείων δειγματοληψίας,
- κατανομή και σχολιασμός ορισμένων χημικών στοιχείων που δηλώνουν το είδος της πηγής ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^{2-}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$  κ.λ.π.),
- χρησιμοποίηση διαφόρων χημικών λόγων ( $\text{Ca/Mg}$ ,  $\text{Na/Cl}$ ,  $\text{Cl/SO}_4$  κ.λ.π.), για παράδειγμα ο λόγος  $\text{Ca/Mg}$  είναι 0,3 στο θαλασσινό νερό, ενώ στα περισσότερα γλυκά νερά είναι  $> 1$ ,
- διάφοροι χημικοί δείκτες (π.χ. δείκτης Revelle R),
- χρησιμοποίηση ισοτόπων (τριτίου), το οποίο σε πρόσφατα γλυκά νερά υπερβαίνει τις λίγες μονάδες και στο βαθύ θαλασσινό νερό είναι σχεδόν μηδέν (επομένως η ανάμειξη γλυκού και θαλασσινού νερού σημειώνει μια αξιοσημείωτη μείωση του περιεχομένου τριτίου),
- χρησιμοποίηση διαφόρων διαγραμμάτων (Piper και διευρυμένο Durov). Το διάγραμμα Piper απεικονίζει τα αποτελέσματα ανταλλαγής κυρίως των κατιόντων. Το διάγραμμα Durov χρησιμοποιείται για την απεικόνιση των υδροχημικών τύπων.

Ο Καλλέργης (2000) αναφέρει ότι η μεταβολή στη σύνθεση του θαλασσινού νερού, που διεισδύει σε έναν υδροφόρο, μπορεί να προκληθεί με τρεις τρόπους (Revelle, 1941):

- με τη διαδικασία της βασικής ανταλλαγής ιόντων μεταξύ του νερού και των ορυκτών του υδροφόρου,
- με την απαγωγή των θειικών και την αντικατάσταση της ανθρακικής ρίζας καθώς και των ριζών άλλων ασθενών οξέων,
- με τη διάλυση και καθίζηση.

Επίσης ο Καλλέργης (2000) αναφέρει ότι μόνο η τελευταία διεργασία μπορεί να αλλάξει την ολική συγκέντρωση αλάτων, ενώ οι δύο πρώτες, οι οποίες απαιτούν διατήρηση του ιοντικού ισοζυγίου, μπορούν να μεταβάλουν την εκατοστιαία κατά βάρος συμμετοχή των διαφόρων συστατικών αλάτων και κατά συνέπεια και το TDS (Σύνολο Διαλυμένων Στερεών - Total Dissolved Solids) σε mg/L. Προκειμένου να αποφευχθεί λαθεμένη διάγνωση της διείσδυσης του θαλασσινού νερού, λόγω προσωρινής αύξησης του TDS, ο Revelle πρότεινε (1941) τη χρησιμοποίηση ως κριτηρίου διείσδυσης θαλασσινού νερού, του λόγου  $\text{Cl}/(\text{CO}_3 + \text{HCO}_3)$  σε meq/L που είναι γνωστός και ως συντελεστής Revelle (R). Πράγματι το  $\text{Cl}^-$ , το οποίο είναι το επικρατούν ανιόν στο θαλασσινό νερό, δεν μεταβάλλεται κατά τις πιο πάνω διαδικασίες μεταβολής του χημισμού του θαλασσινού νερού και απαντά συνήθως σε πολύ μικρές συγκεντρώσεις στο υπόγειο νερό. Εξάλλου, η δισανθρακική ρίζα είναι κατά

κανόνα το επικρατέστερο ανιόν στο υπόγειο νερό και απαντά σε μικρές μόνο συγκεντρώσεις στο θαλασσινό νερό. Τιμές του συντελεστή Revelle  $> 10$  μπορεί να θεωρηθούν ως ένδειξη διείσδυσης του θαλασσινού νερού.

Πίνακας 1.1. Χαρακτηρισμός βαθμού ρύπανσης νερού από τη διείσδυση της θάλασσας (Καλλέργης, 2000).

Συντελεστής Revelle Προτεινόμενο όριο	Χαρακτηρισμός νερού
$< 1$	Καλό υπόγειο νερό χωρίς ρύπανση από θάλασσα
1 – 2	Ελαφρά ρυπασμένο νερό
2 – 6	Μέτρια ρυπασμένο νερό
6 – 10	Σοβαρά ρυπασμένο νερό
10 – 150	Επικίνδυνα ρυπασμένο νερό
$> 150$	Θαλασσινό νερό

Βέβαια είναι δυνατή η αύξηση της συγκέντρωσης  $Cl^-$  στο νερό, λόγω ρύπανσής του, γι' αυτό η χρήση του συντελεστή Revelle θα πρέπει να γίνεται μετά από σαφή γνώση των υδρογεωλογικών συνθηκών της περιοχής. Το αλμυρό νερό έχει πάψει πια να θεωρείται άχρηστο και αντιμετωπίζεται ως φυσικός πόρος, αφού η τεχνική της αφαλάτωσης έχει κάνει ιδιαίτερες προόδους (αντίστροφη ώσμωση).

## 2. ΥΔΡΑΥΛΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΗΣ ΘΑΛΑΣΣΙΑΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΣΕ ΠΑΡΑΚΤΙΟΥΣ ΥΔΡΟΦΟΡΟΥΣ

(κύριες βιβλιογραφικές πηγές: Καλλιώρας, 2002, Καλλιώρας 2008, Πλιάκας, 2011, Todd and Mays, 2005)

### 2.1. Εισαγωγή

Το υπόγειο νερό αποτελεί μια από τις σημαντικότερες πηγές γλυκού νερού στον πλανήτη. Με εξαίρεση τους πολιτικούς πάγους, σχεδόν το 90% της συνολικής διαθέσιμης ποσότητας γλυκού νερού στη γη απαντάται στα υδρογεωλογικά συστήματα. Η συνεχώς αυξανόμενες αστικές, βιομηχανικές και γεωργικές δραστηριότητες του ανθρώπου βασίζονται κυρίως στην εκμετάλλευση των υπόγειων υδατικών πόρων, και αυτή η εξάρτηση επέφερε σε πολλές περιπτώσεις την αλμύριση των εκμεταλλεύσιμων υδρογεωλογικών συστημάτων.

Το φαινόμενο της υφαλμύρισης ή γενικότερα αλμύρισης, περιγράφεται ως η διαδικασία κατά την οποία η συγκέντρωση των διαλυμένων στερεών (αλάτων) στο νερό και στο έδαφος, αυξάνει λόγω φυσικών αιτιών είτε λόγω ανθρωπογενών δραστηριοτήτων. Ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες που συντελούν στην αλμύριση των εδαφών είναι οι απώλειες νερού οι οποίες οφείλονται σε έναν ή συνδυασμό των παρακάτω κύριων μηχανισμών (Salama et al., 1999):

- Εξάτμιση,
- Εξατμισοδιαπνοή,
- Υδρόλυση,
- Διήθηση μεταξύ υδροφόρων.

Ειδικότερα ο Καλλέργης (2000) αναφέρει ότι οι πιθανές αιτίες αλμύρισης είναι:

- Η παρουσία σαλαμούρας, ιδιαίτερα στα πεδία πετρελαίου,
- Η παρουσία γύψου ή ανυδρίτη ή ορυκτού αλατιού στον υδροφόρο,
- Η έντονη άρδευση (που συνεπάγεται και έντονη εξατμισοδιαπνοή),
- Η παρουσία συγγενετικού νερού σε μικρό βάθος.

Το φαινόμενο της θαλάσσιας διείσδυσης αποτελεί μια ειδική περίπτωση αλμύρισης, και αφορά τους παράκτιους υδροφόρους. Σχεδόν το σύνολο των περιπτώσεων θαλάσσιας διείσδυσης που έχουν καταγραφεί, οφείλονται σε ανθρωπογενείς δραστηριότητες και ειδικότερα στην εντατική υπεράντληση των παράκτιων υδροφόρων. Η απόληψη του υπόγειου νερού σε μεγάλες ποσότητες επιφέρει ποσοτική υποβάθμιση στο υδατικό δυναμικό του παράκτιου υδροφόρου, και εφόσον λάβει χώρα διείσδυση αλμυρού νερού, η υποβάθμιση λαμβάνει επίσης ποιοτικό χαρακτήρα. Δεν είναι τυχαίο το γεγονός ότι πολλοί επιστήμονες σήμερα για να περιγράψουν τη διαδικασία της διείσδυσης της θάλασσας, προτιμούν το χαρακτηρισμό «καταστροφή» έναντι του φαινομένου. Η θαλάσσια διείσδυση αποτελεί ένα ευρύτερο περιβαλλοντικό πρόβλημα επηρεάζοντας πολλές ευρωπαϊκές και άλλες χώρες, παρατηρείται δε εντονότερα στην ευρύτερη περιοχή της Μεσογείου, λόγω των



ημίξηρων κλιματολογικών συνθηκών που επικρατούν. Ουσιαστικά η πλειονότητα των παράκτιων υδροφόρων της μεσογειακής ακτής υπόκεινται σε καθεστώς υπερεκμετάλλευσης του υδατικού δυναμικού τους με αποτέλεσμα την έξαρση του φαινομένου της θαλάσσιας διείσδυσης στις περιοχές αυτές. Περιπτώσεις θαλάσσιας διείσδυσης στη μεσογειακή παράκτια περιοχή καταγράφονται στην Ισπανία (Sanz de Galdeano, 1990, Avidad and Duenas, 1981, Calvache and Pulido-Bosch, 1997, Elorza and Garcia-Duenas, 1981, Iribar et al., 1997, Gimenez and Morell, 1997, Morell et al., 1996, Calvache and Pulido-Bosch, 1994, Custodio et al., 1989), στην Πορτογαλία (Stigter et al., 1998, Salgueiro and Ribeiro, 2001), στην Ιταλία (Chiocchini et al., 1997, Barazzuoli et al., 1999, Cucini, 1995, Lorrain et al., 2001, Paniconi, 2000, Paniconi et al., 2001, Teatini et al., 2001), στο Ισραήλ (Yakirevich et al., 1998), στην Κροατία (Bonacci and Roje Bonacci, 1997), στην Τουρκία (Karahanoglou, 1997, Gordu et al., 2001), στην Αίγυπτο (El-Bihery and Lachmar, 1994), στη Λιβύη (El Asswad, 1995), στο Μαρόκο (Pulido-Bosch et al., 1999, Loukili et al., 2001, Hilali et al., 2001), και στην Κύπρο (Ergil, 2001). Ειδικότερα στην Ελλάδα, το φαινόμενο της θαλάσσιας διείσδυσης αποτελεί ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα στη διαχείριση των υπόγειων υδατικών πόρων. Πολλές περιπτώσεις έχουν καταγραφεί (Diamantis and Petalas, 1989, Petalas and Diamantis, 1999, Γιαννουλόπουλος, 2002, Καλλέργης κ.ά., 1997), όπως φαίνεται στο σχήμα 2.1. Η συνεχής υποβάθμιση της ποιότητας των υπόγειων νερών επιφέρει δυσμενή αποτελέσματα καθιστώντας το νερό ακατάλληλο για ύδρευση σε όλες τις περιπτώσεις, καθώς επίσης και για άρδευση σε μερικές από αυτές. Υψηλές τιμές αλατότητας στο υπόγειο νερό επηρεάζουν αρνητικά τα περισσότερα είδη καλλιέργειας, υποβαθμίζοντας την αγροτική παραγωγή.

Σήμερα πολλές από τις διαδικασίες μεταφοράς των αλάτων μέσω των παράκτιων υδρογεωλογικών συστημάτων, καθώς και η αλληλεπίδρασή τους με το γεωλογικό υλικό του υδροφόρου αποτελούν αντικείμενο έρευνας. Η ουσιαστικότερη δυσκολία που παρουσιάζεται όσον αφορά στην πλήρη ερμηνεία του φαινομένου της θαλάσσιας διείσδυσης, έγκειται τόσο στην υδραυλική όσο και στη χημική ετερογένεια των υδρογεωλογικών σχηματισμών. Η αναγκαιότητα ορθολογικής διαχείρισης των παράκτιων υπόγειων υδατικών πόρων αποτελεί πλέον επιτακτική ανάγκη, απαιτώντας την εφαρμογή ρεαλιστικών ποσοτικών και ποιοτικών μαθηματικών ομοιωμάτων.

## **2.2. Σχέση των Ghyben – Herzberg μεταξύ γλυκού – αλμυρού νερού**

Το φαινόμενο της θαλάσσιας διείσδυσης άρχισε να απασχολεί τον επιστημονικό κόσμο της υδρογεωλογίας από το 19<sup>ο</sup> αιώνα. Ο πρωτοπόρος των ερευνητικών δραστηριοτήτων όσον αφορά στην κατανόηση και ερμηνεία των μηχανισμών που διέπουν το φαινόμενο, ήταν ο αμερικάνος υδρογεωλόγος Joseph DuCommun (1828), η μνεία του οποίου, στη διεθνή βιβλιογραφία, είναι δυστυχώς ανύπαρκτη. Στη συνέχεια τη σκυτάλη πήραν οι Badon-Ghyben και Drabbe (1889) και A. Herzberg (1901), οι οποίοι ασχολήθηκαν με τις πιθανές επιπτώσεις ανόρυξης υδρογεωτρήσεων σε περιοχές κοντά στο Amsterdam, και με το νερό ύδρευσης σε παράκτιες περιοχές της Βόρειας Θάλασσας στη Γερμανία, αντίστοιχα. Η έρευνα των παραπάνω αφορούσε τη διεπιφάνεια (interface) που σχηματίζεται ανάμεσα στα

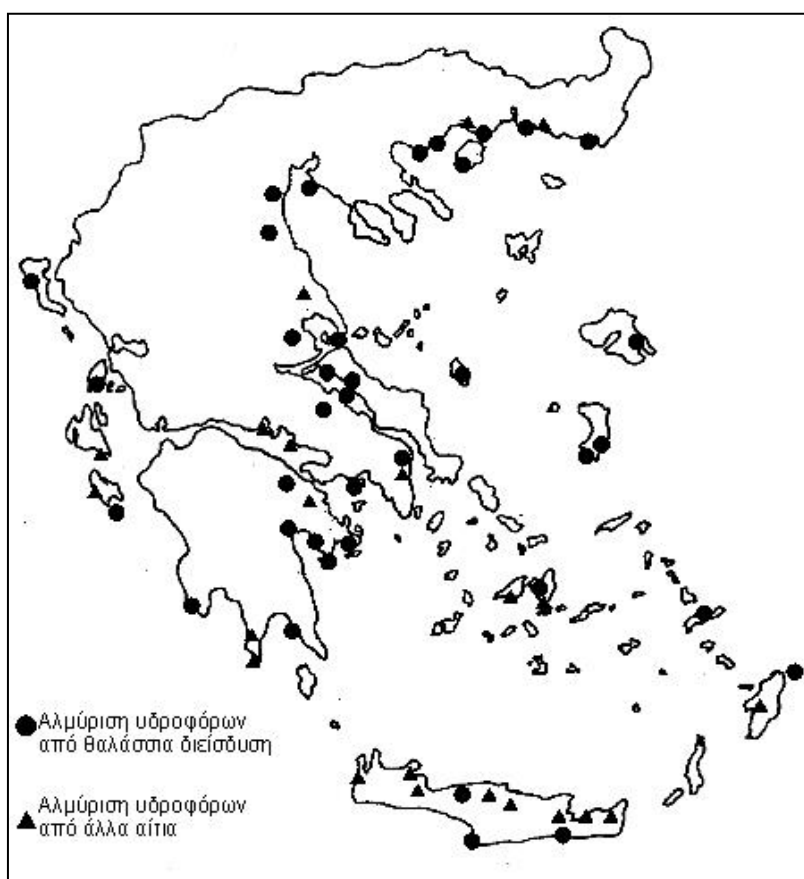
δύο υγρά (αλμυρό και γλυκό νερό) διαφορετικής πυκνότητας, και αποσκοπούσε στον προσδιορισμό της σχέσης μεταξύ του σχήματος και της θέσης της διεπιφάνειας, καθώς και στις υδραυλικές συνιστώσες της ισορροπίας του υπόγειου νερού σε μια παράκτια περιοχή. Προέκυψε έτσι, η εξίσωση των Badon-Ghyben και Herzberg, η ονομασία της οποίας καθιερώθηκε ως αρχή *Ghyben-Herzberg*, και έχει ως εξής (σχ. 2.2):

Υδροστατική πίεση θαλασσινού νερού = Υδροστατική πίεση γλυκού νερού

$$\rho_s z g = \rho_f (z+h) g \Leftrightarrow \rho_s z = \rho_f z + h \rho_f \Leftrightarrow z = \frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f} h_f \quad (2.1)$$

όπου:

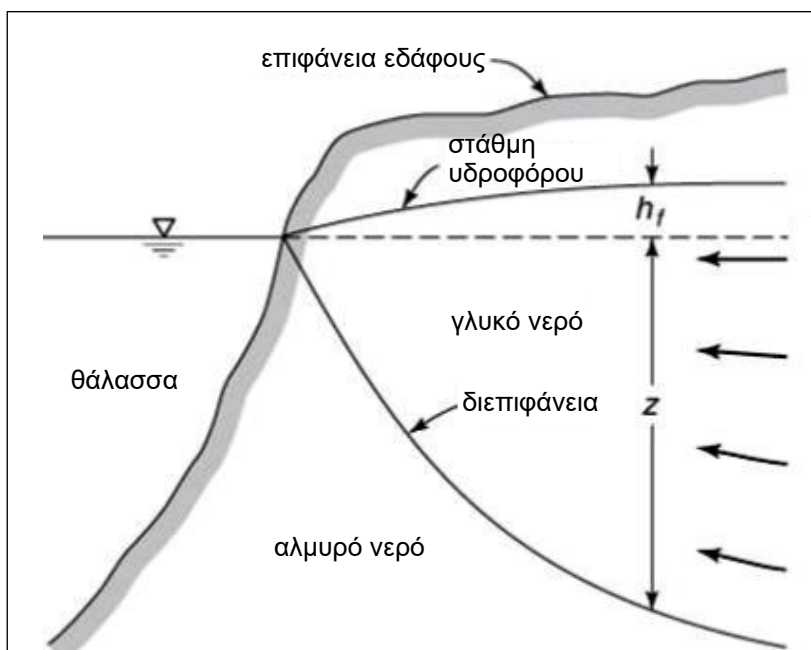
- z είναι το βάθος (m) της διεπιφάνειας κάτω από τη μέση στάθμη της θάλασσας
- h<sub>f</sub> είναι η ανύψωση (m) της στάθμης του υδροφόρου πάνω από τη μέση στάθμη της θάλασσας
- ρ<sub>f</sub> (g/cm<sup>3</sup>) είναι η πυκνότητα του γλυκού υπόγειου νερού
- ρ<sub>s</sub> (g/cm<sup>3</sup>) είναι η πυκνότητα του αλμυρού (θαλάσσιου) νερού.



Σχήμα 2.1. Περιοχές αλμύρισης παράκτιων υδροφόρων στον ελληνικό χώρο (από Υπουργείο Γεωργίας με τροποποίηση).

Η παραπάνω μαθηματική ερμηνεία του μηχανισμού της θαλάσσιας διείσδυσης, αποτελεί ένα εξιδανικευμένο μοντέλο, που αφορά στη διεπιφάνεια μεταξύ γλυκού και

αλμυρού νερού σε έναν παράκτιο φρεάτιο υδροφόρο. Οι παραδοχές που υπεισέρχονται στη σχέση Ghyben-Herzberg θεωρούν μια στατική ισορροπία ανάμεσα στα δυο υγρά και στην κατανομή της υδροστατικής πίεσης στην περιοχή του γλυκού νερού, και ότι το θαλασσινό νερό είναι στάσιμο. Επεκτείνοντας τη σχέση Ghyben-Herzberg, θεωρούμε την ύπαρξη μιας δυναμικής ισορροπίας ανάμεσα στα δύο υγρά, δηλαδή, σταθερές συνθήκες ροής, αλλά με οριζόντια ροή στην περιοχή του γλυκού νερού, και κάθετες προς αυτήν τις ισοδυναμικές γραμμές, όπως και στην υπόθεση Dupuit.



Σχήμα 2.2. Μοντέλο της θεωρίας Ghyben-Herzberg για τη διεπιφάνεια γλυκού-αλμυρού νερού σε παράκτιο ελεύθερο υδροφόρο (Todd and Mays, 2005).

Αντικαθιστώντας στην εξ. (2.1) με  $\rho_s=1,025 \text{ gr/cm}^3$  και  $\rho_f=1,0 \text{ gr/cm}^3$ , την πυκνότητα του θαλασσινού και γλυκού νερού αντίστοιχα, προκύπτει:  $z=40h_f$ .

Η ερμηνεία της παραπάνω σχέσης καταλήγει στο συμπέρασμα ότι σε οποιαδήποτε απόσταση από τη θάλασσα, το βάθος της στάσιμης διεπιφάνειας κάτω από τη μέση στάθμη της θάλασσας είναι 40 φορές μεγαλύτερη της ανύψωσης της στάθμης του υδροφόρου πάνω απ' αυτήν. Έτσι λοιπόν, μείωση της στάθμης του υπόγειου νερού σε ένα παράκτιο ελεύθερο υδροφόρο κατά 1m, θα προκαλέσει άνοδο της διεπιφάνειας κατά 40m, πράγμα που επιβεβαιώνει το γεγονός ότι έστω και μια μικρή πτώση στη στάθμη του υδροφόρου, μπορεί να προκαλεί σημαντική διείσδυση του θαλασσινού νερού. Στο σχήμα 2.2 παρατηρείται ότι η διεπιφάνεια "κλείνει" στο σημείο όπου συναντώνται η μέση στάθμη της θάλασσας με τη στάθμη του υδροφόρου. Το σημείο όπου η διεπιφάνεια συναντά το στεγανό πυθμένα του υδροφόρου, ονομάζεται "πόδι" της διεπιφάνειας (toe of the interface).

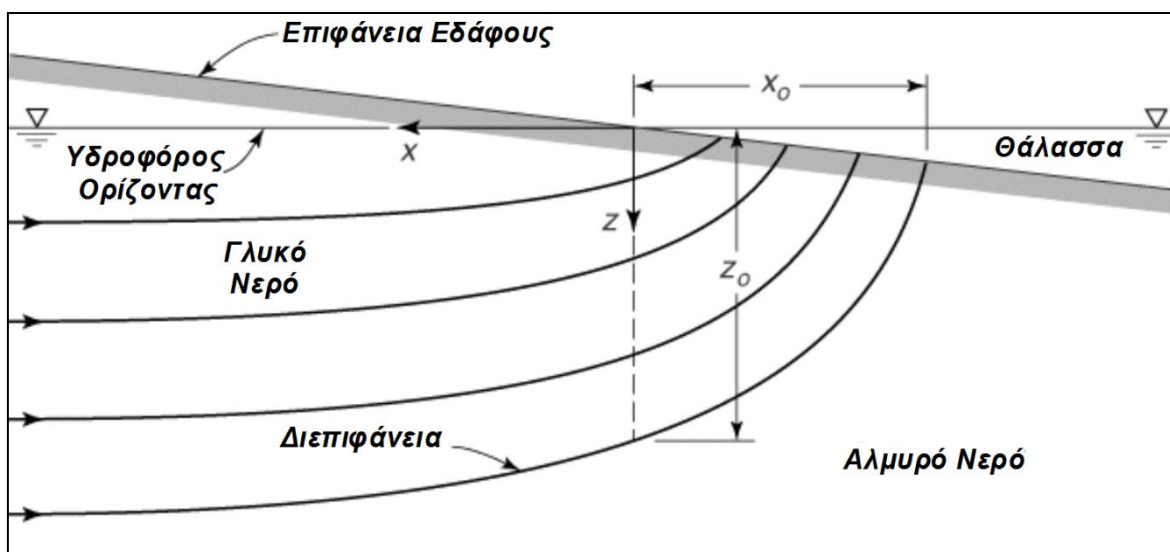
### 2.3. Σχήμα της διεπιφάνειας γλυκού – αλμυρού νερού

Οι Todd and Mays (2005) αναφέρουν ότι ο Glover κατέληξε στην παρακάτω εξίσωση σχετικά με το σχήμα της διεπιφάνειας γλυκού – αλμυρού νερού:

$$z^2 = \frac{2\rho q x}{\Delta\rho K} + \left( \frac{\rho q}{\Delta\rho K} \right)^2 \quad (2.2)$$

όπου  $z$  και  $x$  φαίνονται στο σχήμα 2.3,  $\Delta\rho = \rho_s - \rho_f$ ,  $\rho$  η πυκνότητα γλυκού νερού,  $K$  η υδραυλική αγωγιμότητα του υδροφόρου και  $q$  η ροή γλυκού νερού ανά μονάδα μήκους ακτογραμμής.

Σχήμα 2.3. Πρότυπο ροής γλυκού νερού σε ελεύθερο παράκτιο υδροφόρο (Todd and Mays,



2005).

Η ανύψωση της στάθμης του υδροφόρου πάνω από τη μέση στάθμη της θάλασσας  $h_f$ , όπως δίνεται από τους Todd and Mays (2005) είναι:

$$h_f = \left( \frac{2\Delta\rho q x}{(\rho + \Delta\rho)K} \right)^{1/2} \quad (2.3)$$

Το πλάτος  $x_0$  της υποθαλάσσιας ζώνης όπου το γλυκό νερό εκρέει στη θάλασσα (σχ. 2.3) μπορεί να υπολογιστεί για  $z=0$ , από την παρακάτω σχέση (Todd and Mays, 2005):

$$x_0 = \frac{\rho q}{2\Delta\rho K} \quad (2.4)$$

Το βάθος της διεπιφάνειας  $z_0$  κάτω από την ακτογραμμή (σχ. 2.3), δίνεται για  $x=0$  από την παρακάτω σχέση (Todd and Mays, 2005):

$$z_0 = \frac{\rho q}{\Delta\rho K} \quad (2.5)$$

## 2.4. Επίδραση της άντλησης στη θαλάσσια διείσδυση

Ο Strack (1976) ανέπτυξε τεχνική για την εκτίμηση της επίδρασης της άντλησης στη θαλάσσια διείσδυση, θεωρώντας την ύπαρξη γεώτρησης σε απόσταση  $x_w$  από την ακτογραμμή (σχ. 2.4). Για ισότροπο ομοιογενή υδροφόρο με οριζόντιο αδιαπέρατο πυθμένα, όπου παρατηρείται οριζόντια ροή γλυκού νερού, καθόλου ροή στην υφάλμυρη ζώνη (ζώνη γλυκού – αλμυρού νερού), η σχέση που υπολογίζει τη θέση του «ποδιού» της διεπιφάνειας (για σταθερές συνθήκες) είναι η εξής (Bear, 1979):

$$\frac{1}{2}(1+\delta)\frac{B^2}{\delta^2} = \frac{Q'_{0x}}{K}x + \frac{Q_w}{4\pi K} \ln \left[ \frac{(x-x_w)^2 + y^2}{(x+x_w)^2 + y^2} \right] \quad (2.6)$$

όπου  $\delta = \frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f}$  και

$B$ : το βάθος του αδιαπέρατου πυθμένα του υδροφόρου σε σχέση με τη μέση στάθμη θάλασσας

$Q'_{0x}$ : ροή γλυκού νερού ανά μονάδα μήκους ακτογραμμής

$Q_w$ : σταθερός ρυθμός άντλησης της γεώτρησης

$K$ : υδραυλική αγωγιμότητα του υδροφόρου

$x_w$ : απόσταση μεταξύ γεώτρησης και ακτογραμμής

$(x, y)$ :  $x$ - $y$  συντεταγμένες του «ποδιού» της διεπιφάνειας.

Για το σημείο στασιμότητας (stagnation point) (σχ. 2.4), ο Strack (1976) καταλήγει στη σχέση:

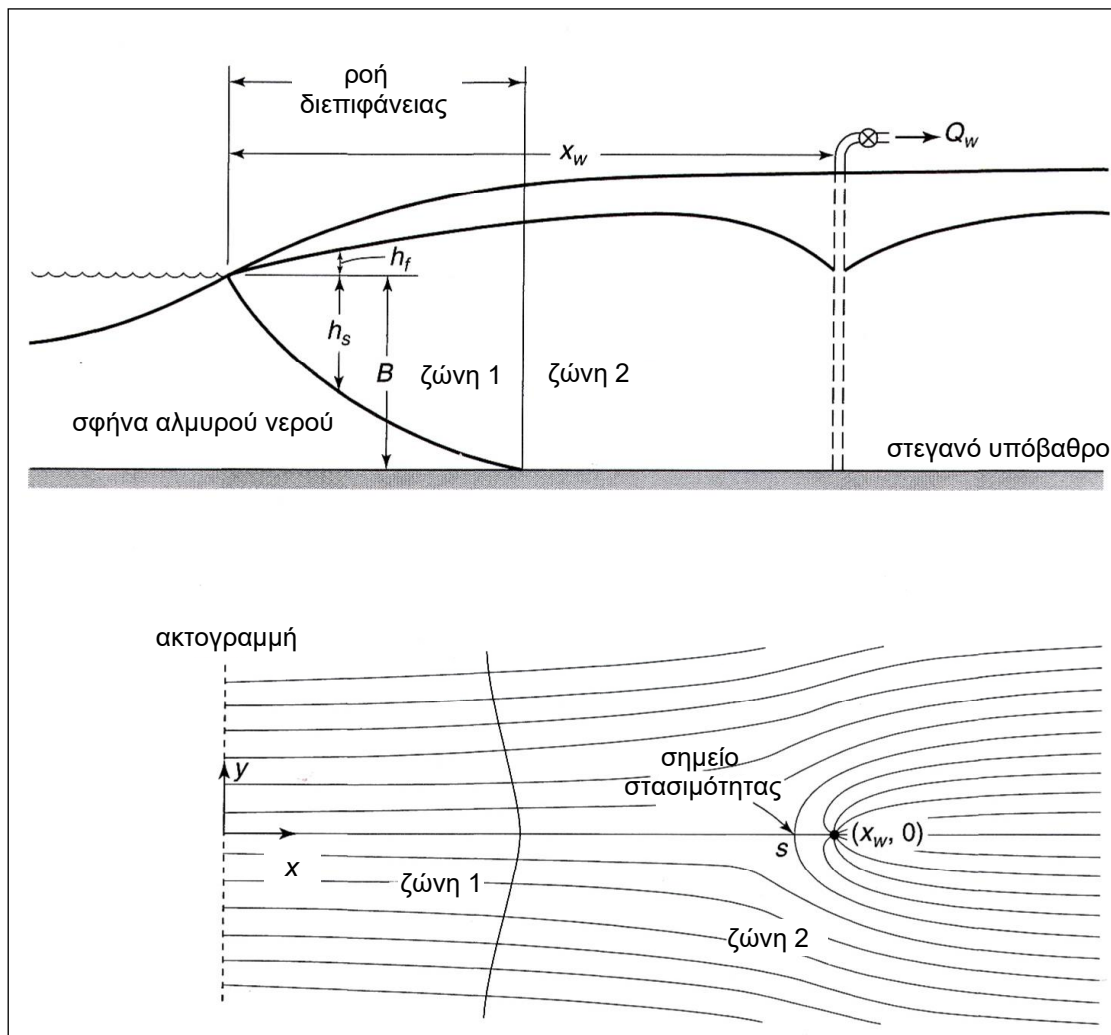
$$x_s = x_w \left[ 1 - \frac{Q_w}{\pi Q'_{0,x} x_w} \right]^{1/2}, \quad y_s = 0 \quad (2.7)$$

Υποθέτοντας ότι σε μια ειδική περίπτωση όπου το «πόδι» της διεπιφάνειας διέρχεται μέσω του σημείου στασιμότητας (stagnation point), ο Strack (1976) κατέληξε στην παρακάτω σχέση, η οποία υπολογίζει τον κρίσιμο ρυθμό άντλησης,  $Q_w$ , για ελεύθερους υδροφόρους:

$$\lambda = 2 \left( 1 - \frac{\mu}{\pi} \right)^{1/2} + \frac{\mu}{\pi} \ln \left[ \frac{1 - (1 - \mu/\pi)^{1/2}}{1 + (1 - \mu/\pi)^{1/2}} \right] \quad (2.8)$$

Όπου

$$\lambda = \left( \frac{KB^2}{Q'_{0x} x_w} \right) \left( \frac{1+\delta}{\delta^2} \right) \quad \text{και} \quad \mu = \frac{Q_w}{Q'_{0x} x_w} \quad (2.9)$$



Σχήμα 2.4. Άντληση γεώτρησης σε αβαθή παράκτιο υδροφόρο (Strack, 1976).

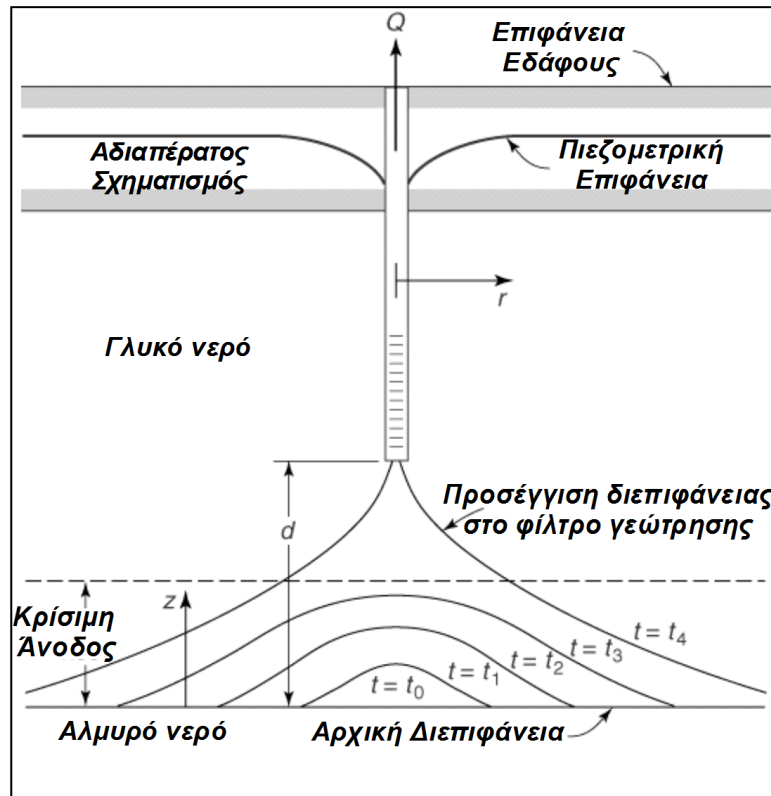
## 2.5. Άνοδος της διεπιφάνειας γλυκού – αλμυρού νερού

Όταν παράκτιος υδροφόρος περιέχει υποκείμενο στρώμα αλμυρού νερού και αντλείται από γεώτρηση η οποία έχει διατρήσει μόνο το ανώτερο τμήμα του υδροφόρου το οποίο περιέχει γλυκό νερό, τότε προκαλείται άνοδος της διεπιφάνειας η οποία παίρνει σχηματικά τη μορφή ενός ανεστραμμένου κώνου κατάπτωσης, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.5.

Αρχικά το σχήμα της διεπιφάνειας είναι οριζόντιο και υπόκειται του γλυκού νερού στον υδροφόρο ( $t = t_0$ ). Μετά την έναρξη τη άντλησης και συνεπώς της απόληψης γλυκού νερού από τη γεώτρηση, η διεπιφάνεια τείνει ανοδικά να φθάσει προς τη γεώτρηση. Έχει παρατηρηθεί ότι η άνοδος της διεπιφάνειας αρχικά λαμβάνει χώρα με σταθερό ρυθμό έως ότου φθάσει στο λεγόμενο κρίσιμο σημείο ανόδου της διεπιφάνειας, πάνω από το οποίο ο ρυθμός ανόδου αυξάνεται ακαριαία και ραγδαία προς τη γεώτρηση. Μια προσεγγιστική αναλυτική επίλυση της ανόδου της διεπιφάνειας κάτω από τη γεώτρηση, βασιζόμενη στην υπόθεση Dupuit και στη σχέση Ghyben – Herzberg, δίνεται από τους Schmorak and Mercado (1969):

$$z = \frac{Q}{2\pi d K (\Delta\rho / \rho_f)} \quad (2.10)$$

όπου  $\Delta\rho = \rho_s - \rho_f$ ,  $K$  η υδραυλική αγωγιμότητα του υδροφόρου ενώ τα υπόλοιπα σύμβολα παρατίθενται στο σχήμα 2.5.



Σχήμα 2.5. Διάγραμμα ανόδου της διεπιφάνειας λόγω άντλησης (Schmorak and Mercado, 1969, Todd and Mays, 2005).

Έχει εκτιμηθεί εμπειρικά ότι το ύψος της κρίσιμης ανόδου της διεπιφάνειας,  $z$ , σχετίζεται με το ύψος του φίλτρου της γεώτρησης,  $d$ , σύμφωνα με τη σχέση  $0,3 \leq z/d \leq 0,5$ . Έτσι θεωρώντας ένα ανώτατο όριο της τάξης του  $z/d = 0,5$ , προκύπτει ότι ο μέγιστος επιτρεπόμενος ρυθμός άντλησης χωρίς την απόληψη αλμυρού νερού έχει ως εξής (Todd and Mays, 2005):

$$Q_{\max} \leq \pi d^2 K (\Delta\rho / \rho_f) \quad (2.11)$$

Σε ανισότροπους υδροφόρους, όπου η κατακόρυφη υδροπερατότητα είναι μικρότερη της οριζόντιας υδροπερατότητας, είναι δυνατή μέγιστη απόληψη νερού μεγαλύτερη και από αυτήν της περίπτωσης του ισότροπου υδροφόρου.

### 3. ΥΔΡΟΧΗΜΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΤΗΣ ΘΑΛΑΣΣΙΑΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ

(κύριες βιβλιογραφικές πηγές: Διαμαντής και Πλιάκας, 2011, Καλλιώρας, 2002, 2008)

#### 3.1. Γενικά

Το θαλασσινό νερό περιέχει περίπου 35.000 mg/L διαλυμένων στερεών (Total Dissolved Solids, TDS), ενώ τα κυρίαρχα ιόντα είναι αυτά του χλωρίου και νατρίου, καταλαμβάνοντας το 84%, της συνολικής συγκέντρωσης ιόντων. Παρόλα αυτά, έχει παρατηρηθεί ότι η ποιότητα του θαλασσινού νερού, παρουσιάζει μεταβολές σε διάφορους ωκεανούς, εξαρτώμενη από πολλούς παράγοντες. Η αλμυρότητα του θαλασσινού νερού στον Ατλαντικό Ωκεανό (36.900 mg/L σε γεωγραφικό πλάτος 25°N) είναι μεγαλύτερη σε σχέση με την αλμυρότητα του νερού του Ειρηνικού Ωκεανού (33.600 mg/L σε γεωγραφικό πλάτος 40°N), και εξαρτάται από τοπικές συνθήκες όπως η ηπειρωτική επίδραση, ο βαθμός εξάτμισης και τα ωκεάνια ρεύματα (Custodio, 1987). Επίσης έχει παρατηρηθεί ότι η εισροή γλυκού νερού στη Βαλτική Θάλασσα έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της αλμυρότητάς της κατά 3.000 έως 8.000 mg/L, ενώ η εξάτμιση σε μερικές περιοχές στη Μεσόγειο και στην Ερυθρά Θάλασσα έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της αλατότητας σε τιμές της τάξης των 40.000 mg/L (Custodio, 1987). Η συγκέντρωση των χλωριόντων στις εκβολές του Houston Ship Channel, στον Κόλπο του Galveston, είναι 3.200 mg/L, ενώ αυξάνεται σε 13.000-14.000 mg/L και 18.000mg/L σε απόσταση 10 και 70 km αντίστοιχα, από την ακτογραμμή (Jorgensen, 1977).

Πίνακας 3.1. Τυπικές συγκεντρώσεις ιόντων στο θαλασσινό νερό σε mg/L (Goldberg et al., 1971, Hem, 1985).

ΧΗΜΙΚΟ ΣΤΟΙΧΕΙΟ	ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ	ΠΟΣΟΣΤΟ (%)	ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΠΟΣΟΣΤΟ
Cl	19.000	54	54
Na	10.500	30	84
SO <sub>4</sub>	2.700	8	92
Mg	1.350	4	96
Ca	410	1	97
K	390	1	98
HCO <sub>3</sub>	142	0,4	98,4
Br	67	0,2	98,6
Sr	8	0,02	98,6
SiO <sub>2</sub>	6,4	0,02	98,6
B	4,5	0,01	98,6
F	1,3	0,003	98,7
I	0,06	0,00017	98,7

Τα χημικά χαρακτηριστικά του υπόγειου υδατικού δυναμικού, αποτελούν παραμέτρους της πυκνότητας του νερού, της εξίσωσης κατάστασης και του δυναμικού ιξώδους.



### 3.2. Πυκνότητα

Η πυκνότητα μπορεί να θεωρηθεί συνάρτηση της πίεσης, της θερμοκρασίας του υγρού και του συνόλου των διαλυμένων στερεών (Oude Essink, 2001).

$$\rho = f(p, T, S) \quad (3.1)$$

όπου:

$\rho$ , η πυκνότητα ( $\text{kg/m}^3$ ),

$p$ , η πίεση,

$T$ , η θερμοκρασία,

$S$ , το σύνολο των διαλυμένων στερεών.

Η επίδραση της πίεσης μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα για τα περισσότερα υδρογεωλογικά συστήματα. Επιπρόσθετα, η επίδραση της θερμοκρασίας θεωρείται και πάλι μηδαμινή συγκριτικά με την επίδραση του συνόλου των διαλυμένων στερεών του νερού στην πυκνότητά του. Συνεπώς, η πυκνότητα του υπόγειου νερού συνήθως εκφράζεται ως άμεση συνάρτηση του συνόλου των διαλυμένων στερεών, ενώ η θερμοκρασία του υδρογεωλογικού συστήματος θεωρείται σταθερή. Η χρήση του συνόλου των διαλυμένων στερεών για την απεικόνιση και απόδοση της ποιότητας του υπόγειου νερού, θεωρείται ότι υπερτερεί έναντι άλλων μεθόδων αφού μπορεί να προσδιοριστεί άμεσα με τη μέτρηση της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας.

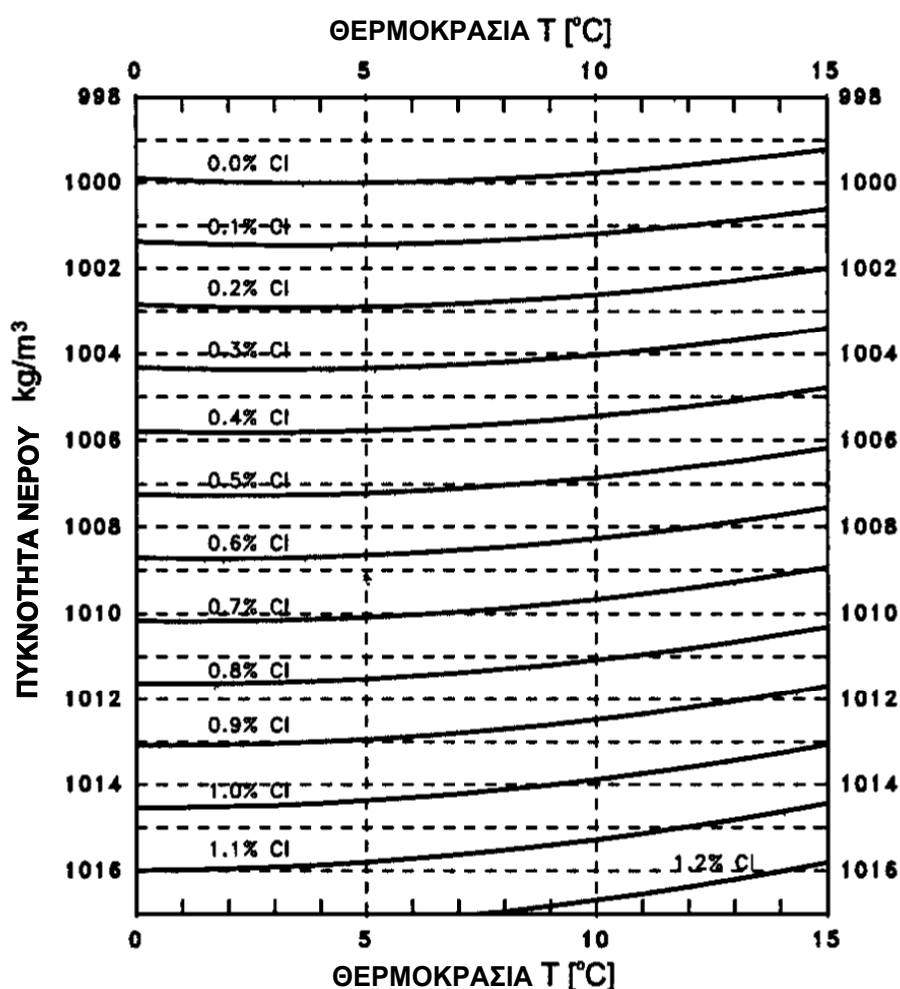
Ο Stuyfzant (1993), πρότεινε την ταξινόμηση του νερού, με βάση τη συγκέντρωσή του σε χλωριόντα, τα αποτελέσματα του οποίου φαίνονται στον Πίνακα 3.2.

Πίνακας 3.2. Ταξινόμηση νερού με βάση τη συγκέντρωση των χλωριόντων σε  $\text{mg/L}$  (Stuyfzant, 1993).

ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΝΕΡΟΥ	ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ ΧΛΩΡΙΟΝΤΩΝ
Ολιγοαλκαλικό	0 – 5
Ολιγοαλκαλικό-γλυκό	5 – 30
Γλυκό	30 – 150
Γλυκό-υφάλμυρο	150 – 300
Υφάλμυρο	300 – 1000
Υφάλμυρο-αλμυρό	1000 – 10.000
Αλμυρό	10.000 – 20.000
Υπεραλμυρό ή άλμη	$\geq 20.000$

Στη διεθνή βιβλιογραφία παρατηρείται μια πολυποικιλότητα ως προς την ταξινόμηση των κατηγοριών του νερού ανάλογα με την ποιότητά του, που έγκειται στην προτιθέμενη εφαρμογή ή χρήση τους. Για παράδειγμα, τα σταθερότυπα πόσιμου νερού για την Ευρωπαϊκή Κοινότητα, μέχρι πρόσφατα, αφορούσαν μέγιστο επιτρεπόμενο όριο στη

συγκέντρωση των χλωριόντων τα 150 mg/L (Stuyfzant, 1986), ενώ σύμφωνα με τον Παγκόσμιο Οργανισμό Υγείας (World Health Organisation, W.H.O.) τα αντίστοιχα σταθερότυπα ήταν 200 mg/L (Custodio et al., 1987). Συγκέντρωση χλωριόντων ίση με 300 mg/L θεωρείται ότι μπορεί να γίνει αντιληπτή με τη γεύση σύμφωνα με το Ινστιτούτο για την Έρευνα Διαχείρισης Εδαφών και Νερού, της Ολλανδίας (Institute for Land and Water Management Research, ICW, 1976), ενώ ο Todd (1980) θεωρεί ότι ακόμα και 100 mg/L χλωριόντων μπορούν να γίνουν αντιληπτά με τη γεύση. Ο Oude Essink (2001), θεωρεί ότι νερό που προορίζεται για κτηνοτροφική κατανάλωση, μπορεί να πλησιάσει ακόμα και 1500 mg/L χλωριόντων, εφόσον διασφαλίζεται η σταθερή τους συγκέντρωση.



Σχήμα 3.1. Πυκνότητα νερού ως συνάρτηση της συγκέντρωσης των χλωριόντων και της θερμοκρασίας (Από ILRI, 1972).

### 3.3. Εξίσωση κατάστασης

Στη διεθνή βιβλιογραφία, παρατίθενται διάφορες αριθμητικές μέθοδοι που συσχετίζουν με μαθηματικές εκφράσεις τη συγκέντρωση των χλωριόντων και την αλμυρότητα, τη

θερμοκρασία και την πίεση (Sorey, 1978, Weast, 1982, Voss, 1984, Holzbecher, 1998). Ο Oude Essink (2001), παραθέτει την ακόλουθη εξίσωση κατάστασης (equation of state) η οποία εκφράζει μαθηματικά τη γραμμική αναλογία της συγκέντρωσης των χλωριόντων και της πυκνότητας.

$$\rho(C) = \rho_f \left(1 + a \frac{C_{(i,j)}}{C_s}\right) \quad (3.2)$$

όπου:

$\rho(C)$ : πυκνότητα του υπόγειου νερού

$\rho_f$ : ενδεικτική πυκνότητα (reference density), η οποία συνήθως εκφράζεται ως η πυκνότητα του γλυκού υπόγειου νερού (χωρίς να λαμβάνεται υπόψη το σύνολο των διαλυμένων στερεών) στη μέση θερμοκρασία του υπεδάφους (mean subsoil temperature).

$\rho_s$ : πυκνότητα αλμυρού υπόγειου νερού στη μέση θερμοκρασία του υπεδάφους.

$a$ : ο λόγος  $\frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f}$  γνωστός ως σχετική διαφορά πυκνότητας (relative density difference).

$C_{(i,j)}$ : συγκέντρωση των χλωριόντων.

$C_s$ : ενδεικτική συγκέντρωση χλωριόντων.

Ο πρώτος που ασχολήθηκε με τη μαθηματική συσχέτιση, που αφορά στην αναλογία μεταξύ πυκνότητας, αλατότητας και θερμοκρασίας, ήταν ο Kundsen (1902), ο οποίος κατέληξε στην παρακάτω εμπειρική σχέση:

$$\rho_{(S,T)} = 1000 + 0,8054S - 0,0065(T - 4 + 0,2214S)^2 \quad (3.3)$$

Η παραπάνω μαθηματική έκφραση προσεγγίζει επαρκώς την πυκνότητα ως συνάρτηση της αλμυρότητας και της θερμοκρασίας, σε σταθερή πίεση 1atm, θερμοκρασία μικρότερη των 15 °C και αλμυρότητα μικρότερη των 20.000 mg/L. Ο Sorey (1978) καταλήγει σε μαθηματική έκφραση η οποία αναδुकνείει την πυκνότητα ως συνάρτηση της θερμοκρασίας, σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$\rho_{(T)} = \rho_f [1 - \beta_T(T - T_0) - \gamma_T(T - T_0)^2] \quad (3.4)$$

ή

$$\rho_{(T)} = 1000[1 - 3,17 \times 10^{-4}(T - 4) - 2,56 \times 10^{-6}(T - 4)^2] \quad (3.5)$$

Ο Hassanizadeh (1997), καταλήγει σε μαθηματική σχέση της πυκνότητας ως συνάρτηση της θερμοκρασίας  $T$ , της πίεσης  $p$  και του κλάσματος μάζας άλατος  $\omega$ , η οποία έχει ως εξής:

$$\rho_{(T,p,\omega)} = \rho_f e^{-\alpha(T-T_0) - 3(p-p_0) + \gamma\omega} \quad (3.6)$$

όπου:

$$\alpha = 2 \times 10^{-4} \text{ ανά } ^\circ\text{Kelvin}$$

$$\beta = 4,45 \times 10^{-10} \text{ (ms}^2\text{kg}^{-1}\text{)}$$

$$\gamma = 0,7$$

Στον υπολογιστικό κώδικα SUTRA, ο Voss (1984), θεωρεί τη συνύπαρξη δυο μαθηματικών εκφράσεων, οι οποίες θέτουν την εξάρτηση της πυκνότητας τόσο μεταξύ της θερμοκρασίας όσο και μεταξύ της συγκέντρωσης, σύμφωνα με τα παρακάτω:

$$\text{Πυκνότητα εξαρτώμενη από τη Θερμοκρασία: } \rho_{(T)} = \rho_f + \frac{\partial \rho}{\partial T} (T - T_o) \quad (3.7)$$

$$\text{Πυκνότητα εξαρτώμενη από τη Συγκέντρωση: } \rho_{(C)} = \rho_f + \frac{\partial \rho}{\partial C} (C - C_o) \quad (3.8)$$

όπου:

$\rho_f$ : η πυκνότητα του γλυκού νερού ( $\text{kg m}^{-3}$ )

$\frac{\partial \rho}{\partial T}$ : μεταβολή της πυκνότητας με τη θερμοκρασία

$T_o$ : Θερμοκρασία υγρού βάσης (base fluid temperature) ( $^\circ\text{C}$ )

$C$ : Κλάσμα μάζας συνόλου διαλυμένων στερεών (mass fraction of total dissolved solids)

$\frac{\partial \rho}{\partial C}$ : μεταβολή της πυκνότητας με τη συγκέντρωση.

### 3.4. Δυναμικό ιξώδες

Στην περίπτωση της βαθμωτής μεταβολής της θερμοκρασίας, κρίνεται σημαντικός ο υπολογισμός του δυναμικού ιξώδους το οποίο εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη θερμοκρασία (Huyakorn et al., 1977), σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

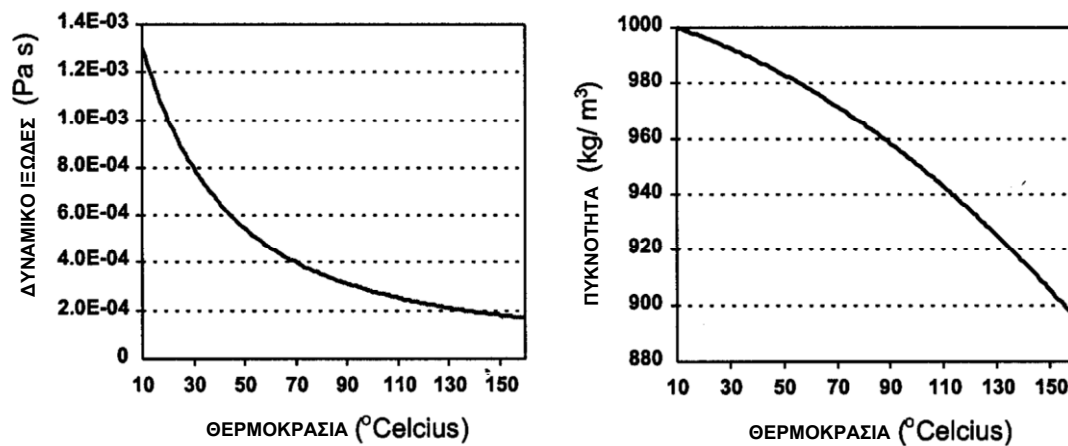
$$\mu = \int(T) \cong (2,394 \times 10^{-5}) \times 10^{\frac{248,37}{T^{133,15}}} \text{ kg/ms} \quad (3.9)$$

Η παραπάνω σχέση ισχύει στην περίπτωση που η θερμοκρασία λαμβάνει τιμές μικρότερες των  $100^\circ\text{C}$ . Ο Oude Essink (2001) εφαρμόζοντας την παραπάνω σχέση σε ανώτερα στρώματα παράκτιων περιοχών της Ολλανδίας, καταλήγει ότι για τιμές θερμοκρασίας μεταξύ  $9$  και  $10^\circ\text{C}$ , η βαθμωτή μεταβολή της θερμοκρασίας είναι περίπου  $3^\circ\text{C}$  ανά  $100\text{m}$ , που σημαίνει ότι η υδραυλική αγωγιμότητα σε βάθος  $100\text{m}$  είναι περίπου  $8\%$  μεγαλύτερη της υδραυλικής αγωγιμότητας στην επιφάνεια του εδάφους.

Πίνακας 3.3. Μεταβολή του δυναμικού ιξώδους  $\mu$ , σε σχέση με τη θερμοκρασία  $T$ , σε πίεση  $100 \text{ KPa}$  ( $1 \text{ bar}$ ) (Verruijt, 1970, Bear, 1972, Voss, 1984, Handbook of Chemistry and Physics, CRC, 1994).

Θερμοκρασία T ( °C )	Δυναμικό Ιξώδες μ (kg/ms)	
	(Verruijt, Bear, CRC)	(Huyakorn et al.)
0	$1,79 \times 10^{-3}$	$1,76 \times 10^{-3}$
5	$1,52 \times 10^{-3}$	$1,50 \times 10^{-3}$
10	$1,31 \times 10^{-3}$	$1,30 \times 10^{-3}$
15	$1,14 \times 10^{-3}$	$1,14 \times 10^{-3}$
20	$1,00 \times 10^{-3}$	$1,00 \times 10^{-3}$
40	$0,65 \times 10^{-3}$	$0,65 \times 10^{-3}$
70	$0,41 \times 10^{-3}$	$0,40 \times 10^{-3}$
100	$0,28 \times 10^{-3}$	$0,28 \times 10^{-3}$

Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστεί ότι το δυναμικό ιξώδες μ είναι συνήθως ανεξάρτητο της πίεσης, ενώ εξαρτάται από τη συγκέντρωση της διαλυμένης ουσίας στο υγρό, όταν αυτή λαμβάνει μεγάλες τιμές.

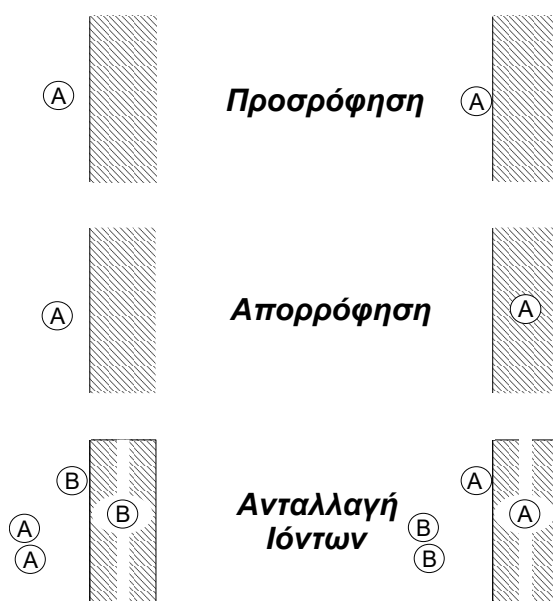


Σχήμα 3.2. Δυναμικό ιξώδες (Huyakorn & Pinder, 1977) και πυκνότητα νερού (Sorey, 1978) ως συνάρτηση της θερμοκρασίας (Smith & Chapman, 1983).

### 3.5. Ανταλλαγή ιόντων και ρόφηση

#### 3.5.1 Εισαγωγή

Το έδαφος και οι υδροφόροι σχηματισμοί περιέχουν διάφορα υλικά σε αφθονία τα οποία έχουν την ιδιότητα της ρόφησης χημικών συστατικών του νερού. Ρόφηση ορίζεται ως η μεταβολή της συγκέντρωσης ενός χημικού συστατικού στερεού υλικού, ως αποτέλεσμα της μεταφοράς μάζας μεταξύ διαλύματος και στερεού υλικού. Τα κυριότερα είδη ρόφησης είναι η προσρόφηση, απορρόφηση και η ανταλλαγή ιόντων (σχ. 3.3).



Σχήμα 3.3. Εικονογραφημένος ορισμός των διαφόρων διαδικασιών ρόφησης (Appelo and Postma, 1993).

Αναλυτικά η κάθε κατηγορία αφορά τις εξής διαδικασίες (Καλλέργης, 2000):

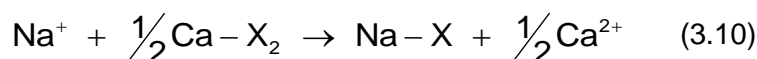
- Προσρόφηση (Adsorption): Το χημικό συστατικό προσκολλάται στην επιφάνεια του στερεού υλικού,
- Απορρόφηση (Absorption): Το χημικό συστατικό εισχωρεί στο στερεό υλικό,
- Ιοντική ανταλλαγή (Ion exchange): Το χημικό συστατικό αντικαθίσταται από ένα άλλο στην επιφάνεια του στερεού υλικού.

Οι διαδικασίες ρόφησης διέπονται από σχέσεις οι οποίες συνεπάγονται από το νόμο δράσης των μαζών. Η μεγαλύτερη διάκριση μεταξύ ρόφησης (προσρόφηση και απορρόφηση) και ιοντικής ανταλλαγής εντοπίζεται στο γεγονός ότι οι εξισώσεις που περιγράφουν το φαινόμενο της ρόφησης λαμβάνουν υπόψη τη συγκέντρωση ενός μόνο χημικού συστατικού, ενώ παραβλέπεται η επίδραση των άλλων διαλυμένων ουσιών. Δηλαδή, η γραμμική ή μη-γραμμική σχέση μεταξύ της ροφημένης χημικής ουσίας και της

διαλυμένης χημικής ουσίας παρέχει την κατανομή της διαλυμένης ουσίας στο στερεό υλικό και στο διάλυμα.

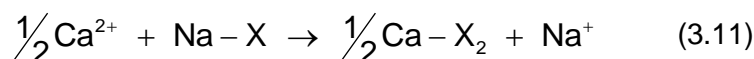
### 3.5.2. Ανταλλαγή κατιόντων κατά τη διείσδυση αλμυρού νερού

Τα επικρατέστερα ιόντα που απαντώνται στο γλυκό νερό παράκτιων υδροφόρων είναι τα  $\text{Ca}^{2+}$  και  $\text{HCO}_3^-$  (νερό οξυανθρακικό ασβεστούχο) ως αποτέλεσμα της διάλυσης του ασβεστίτη. Έτσι οι ανταλλάκτες κατιόντων του υδροφόρου έχουν προσροφήσει κυρίως ιόντα  $\text{Ca}^{2+}$  στην επιφάνειά τους. Τα επικρατέστερα ιόντα στο θαλασσινό νερό είναι τα  $\text{Na}^+$  και  $\text{Cl}^-$ , και ως εκ τούτου ένα μεγάλο μέρος της επιφάνειας του ιζήματος θα προσροφήσει ιόντα  $\text{Na}^+$  κατά την επαφή με το θαλασσινό νερό. Κατά τη διαδικασία της διείσδυσης θαλασσινού νερού σε παράκτιο γλυκό υδροφόρο η ανταλλαγή κατιόντων που λαμβάνει χώρα είναι η εξής:



Όπου με X αναπαρίσταται ο ανταλλάκτης του εδάφους.

Τα ιόντα νατρίου προσλαμβάνονται από τον ανταλλάκτη με αποτέλεσμα την απελευθέρωση  $\text{Ca}^{2+}$ . Έτσι ο χημικός τύπος του νερού μεταβάλλεται από  $\text{NaCl}$  σε  $\text{CaCl}_2$ . Όταν λάβει χώρα η αντίστροφη διαδικασία, κατά τον εμπλουτισμό του υδροφόρου, όπου το γλυκό νερό αποπλένει το τμήμα του υδροφόρου που έχει καταληφθεί από θαλασσινό νερό, η ανταλλαγή κατιόντων που παρατηρείται είναι η εξής:

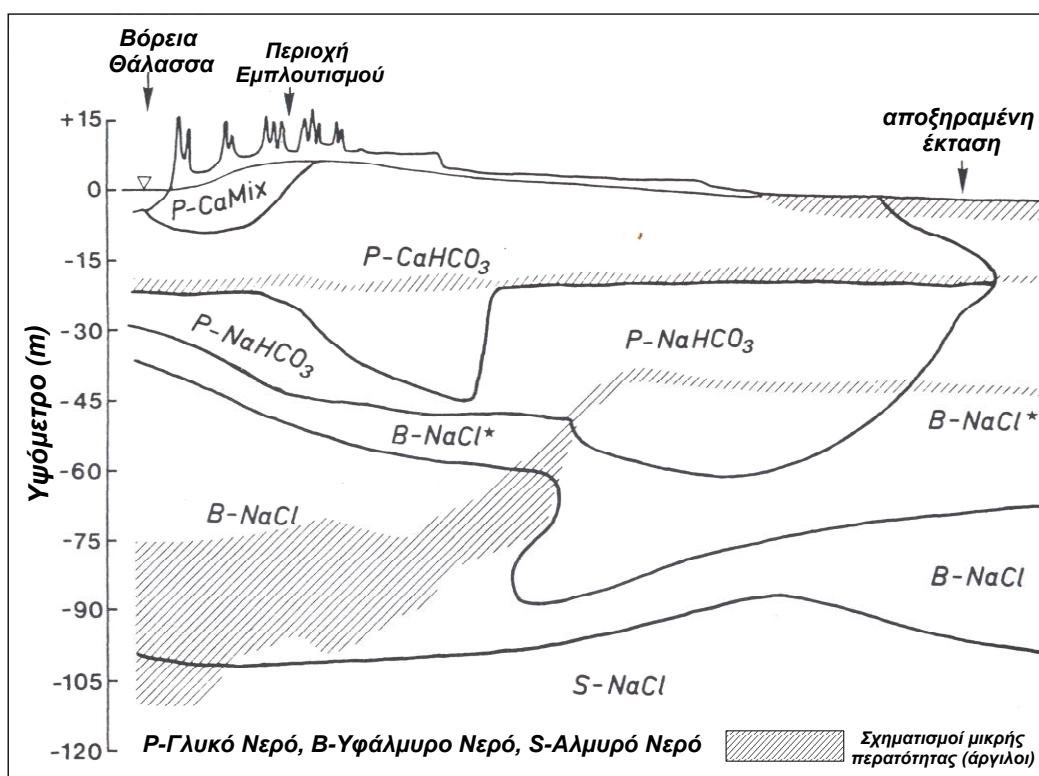


όπου έχουμε πρόσληψη ιόντων ασβεστίου από το νερό, με ανταπόδοση των ιόντων νατρίου και ως αποτέλεσμα ο χημικός τύπος του νερού μεταβάλλεται σε  $\text{NaHCO}_3$ . Συμπερασματικά προκύπτει ότι ο χημικός τύπος του νερού υποδηλώνει είτε τη διείσδυση του θαλασσινού νερού ή την αντίστροφη διαδικασία, τον εμπλουτισμό του υδροφόρου με γλυκό νερό και την απόπλυση του θαλασσινού νερού.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η διατομή σε παράκτιες θίνες στην Ολλανδία από τον Stuyfzand (1985) όπως φαίνεται στο σχήμα 3.4. Στη συγκεκριμένη περιοχή η υπερεκμετάλλευση του υπόγειου υδατικού δυναμικού του υδροφόρου για υδρευτική χρήση προκάλεσε την αναστροφή της υδραυλικής βαθμίδας με αποτέλεσμα τη διείσδυση του θαλασσινού νερού στον υδροφόρο. Έτσι διανοίχθηκαν κανάλια εμπλουτισμού τα οποία μετέφεραν νερό από τον Ρήνο Ποταμό με αποτέλεσμα την απόπλυση του αλμυρού νερού από τον υδροφόρο. Η τεχνική αυτή αποδείχθηκε αποτελεσματική, όπως καταδεικνύεται και από το χημικό τύπο του νερού ( $\text{NaHCO}_3$ ) που προέκυψε (σχ. 3.4).

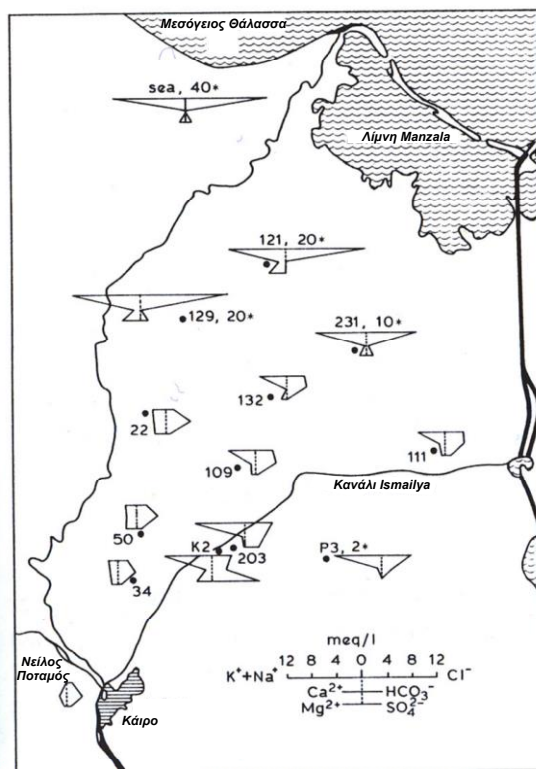
Το υδροχημικό πρότυπο του σχήματος 3.4, σχεδιάστηκε με βάση πυκνό δίκτυο γεωτρήσεων παρατήρησης και δειγματοληψίας. Όταν τα ιόντα νατρίου αποπλένονται από το υλικό του υδροφόρου, το υπόγειο νερό αποκτά και πάλι χημικό τύπο  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ , ο οποίος θα επικρατούσε συντομότερα εάν ο ρυθμός απόπλυσης ήταν μεγαλύτερος.

Επίσης τυπικό παράδειγμα αποτελεί η περιοχή του Δέλτα του Νείλου, στην Αίγυπτο. Στα διαγράμματα Stiff του σχήματος 3.5, η ρύπανση από τη διείσδυση της θάλασσας στις γεωτρήσεις 121 και 129 φαίνεται από τη σχετική αύξηση της συγκέντρωσης των ιόντων ασβεστίου σε σχέση με το θαλασσινό νερό. Οι γεωτρήσεις πλησίον του καναλιού Ismailya, το οποίο απορρέει από το Κάιρο και εκβάλλει στην Ερυθρά Θάλασσα, παρουσιάζουν μείωση στη συγκέντρωση των ιόντων ασβεστίου σε σύγκριση με τη συγκέντρωση των χλωριόντων του Νείλου Ποταμού. Τα ιόντα χλωρίου είναι συντηρητικά στοιχεία, η συγκέντρωση των οποίων αυξάνει κυρίως ως αποτέλεσμα της εξατμισοδιαπνοής των νερών του Νείλου που χρησιμοποιούνται για άρδευση. Η σχετική αύξηση των ιόντων ασβεστίου οφείλεται εν μέρει στην καθίζηση του ασβεστίτη, αλλά η επακόλουθη αύξηση των ιόντων νατρίου υποδεικνύει ότι η ιοντική ανταλλαγή μεταξύ  $\text{Ca}^{2+}$  και  $\text{Na}^+$  από το υλικό του υδροφόρου είναι επίσης σημαντική. Οι Nativ et al. (1983), ερμηνεύουν το φαινόμενο λόγω του πλούσιου σε νάτριο ασβεστούχου πηλού της ερήμου, όπως έχει παρατηρηθεί στην έρημο Negev, ο οποίος μεταφέρεται λόγω των ανέμων και επικάθεται στην υγρή περιοχή του δέλτα.



Σχήμα 3.4. Διατομή σε παράκτιες ολλανδικές θίνες (περιοχή εμπλουτισμού) κατά τη διάρκεια εμπλουτισμού του υδροφόρου και ως εκ τούτου της απόπλυσης του αλμυρού από γλυκό νερό (Stuyfzand, 1985, με τροποποίηση από Appelo and Postma, 1994).





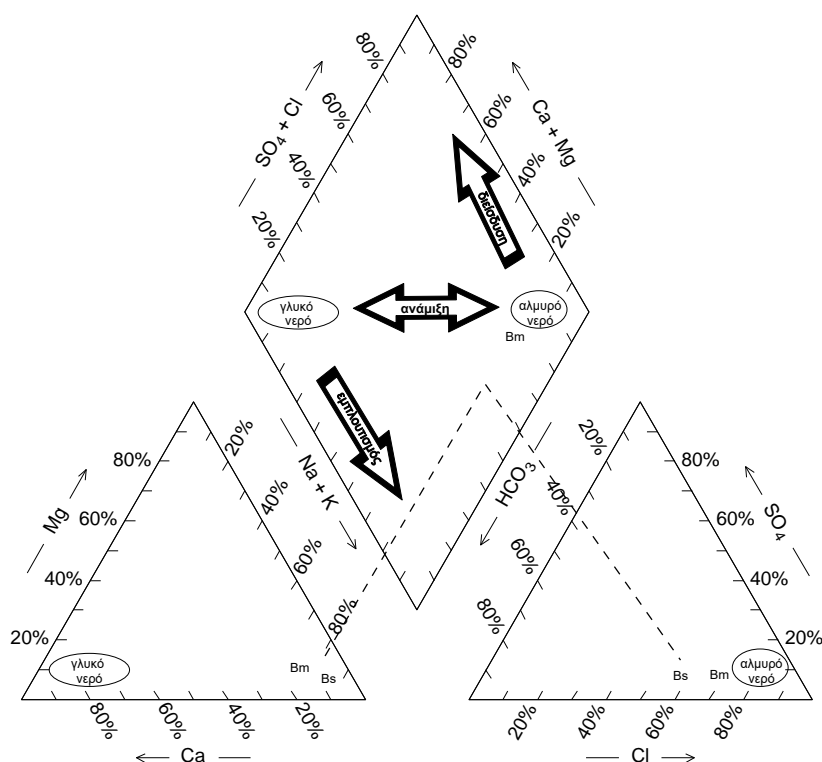
Σχήμα 3.5. Διαγράμματα Stiff των υπόγειων νερών του Δέλτα του Νείλου στην Αίγυπτο, καταδεικνύοντας τη ρύπανση από θαλάσσια διείσδυση στις γεωτρήσεις 121 και 129, καθώς επίσης και την ανταλλαγή  $\text{Ca}^{2+}$  και  $\text{Na}^+$  πλησίον του καναλιού Ismailiya (Appelo and Postma, 1994).

Τα δείγματα υπόγειων νερών παράκτιων υδροφόρων συνήθως εμφανίζουν περίσσειμα ιόντων ασβεστίου που υποδηλώνει διείσδυση της θάλασσας ή περίσσειμα ιόντων νατρίου υποδηλώνοντας εμπλουτισμό από γλυκό νερό. Επίσης ενδέχεται να αποτυπώνονται μεταξύ γλυκού και αλμυρού νερού στα τριγραμμικά διαγράμματα Piper, γεγονός που αποτελεί ένδειξη συντηρητικής ανάμιξης νερών. Μερικές τυπικές συγκεντρώσεις δειγμάτων νερού με τα προαναφερθέντα χαρακτηριστικά παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.4.

Η επίδραση της ανταλλαγής ιόντων είναι περισσότερο διακριτή όταν τα αποτελέσματα των χημικών αναλύσεων παρουσιάζονται σε διάγραμμα Piper, όπως αυτό του σχήματος 3.6

Πίνακας 3.4. Χημικές αναλύσεις δειγμάτων υπόγειων νερών της Ολλανδίας που προκύπτουν είτε από ανάμιξη είτε από ανταλλαγή κατιόντων (χημικοί τύποι  $\text{CaCl}_2$  και  $\text{NaHCO}_3$ ). Οι συγκεντρώσεις αναφέρονται σε mmol/L.

	Αναμιγμένο νερό		Νερό τύπου $\text{CaCl}_2$		Νερό τύπου $\text{NaHCO}_3$	
pH	7,50	7,20	6,91	6,6	8,7	8,30
$\text{Na}^+$	24,53	54,33	341,00	124,0	40,0	2,00
$\text{K}^+$	0,82	1,41	2,80	2,4		
$\text{Mg}^{2+}$	2,90	7,10	27,90	30,7	2,8	1,10
$\text{Ca}^{2+}$	3,00	7,90	39,60	47,2	0,7	0,65
$\text{Cl}^-$	27,20	70,80	440,00	271,0	25,6	1,40
$\text{HCO}_3^-$	9,20	15,30	7,00	3,8	14,4	4,00
$\text{SO}_4^{2-}$	0,07	0	18,80	4,7	2,7	0,20
Γεώτρηση			48E	48H	48E	48A
Κωδικός			45-1	35-1	69-1	3-3



Σχήμα 3.6. Διάγραμμα Piper με την τυπική σύσταση γλυκού και θαλασσινού νερού και δειγμάτων νερού χημικού τύπου  $\text{NaHCO}_3$  ( $B_s$ ) από τον Πίνακα 3.4. Η γραμμή από το δείγμα  $B_s$  επεκτείνεται στην υπολογισμένη χημική σύσταση ενός συντηρητικού δείγματος  $B_m$ .

Οι χημικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα κατά τη διεύδυση της θάλασσας σε παράκτιο υδροφόρο συνάγονται ευκολότερα υπολογίζοντας τη χημική σύσταση του νερού η οποία αφορά στη συντηρητική ανάμιξη αλμυρού και γλυκού νερού και συγκρίνοντας την με αυτή που προκύπτει από τη χημική ανάλυση. Η συγκέντρωση ιόντος  $i$ , με συντηρητική ανάμιξη γλυκού και αλμυρού νερού έχει ως εξής:

$$m_{i,mix} = f_{sea} \cdot m_{i,sea} + (1 - f_{sea}) \cdot m_{i,fresh} \quad (3.12)$$

όπου  $m_i$  η συγκέντρωση του ιόντος  $i$  (mmol/L),  $f_{sea}$  το κλάσμα του θαλασσινού νερού στο αναμιγμένο νερό, ενώ οι δείκτες  $_{mix}$ ,  $_{sea}$  και  $_{fresh}$  αφορούν στο συντηρητικό αναμιγμένο νερό και στα ακραία μέλη του θαλασσινού και γλυκού νερού.

Κάθε μεταβολή της συγκέντρωσης  $m_{i,react}$  ως αποτέλεσμα αντίδρασης (και όχι ανάμιξης) έχει ως εξής:

$$m_{i,react} = m_{i,sample} - m_{i,mix} \quad (3.13)$$

όπου  $m_{i,sample}$  είναι η μετρημένη συγκέντρωση του δείγματος.

Το κλάσμα του θαλασσινού νερού συνήθως βασίζεται στη συγκέντρωση των ιόντων  $Cl^-$  του δείγματος. Το κλάσμα με βάση τη συγκέντρωση ιόντων χλωρίου του θαλασσινού νερού έχει ως εξής:

$$f_{sea} = \frac{m_{Cl^-,sample} - m_{Cl^-,fresh}}{m_{Cl^-,sea} - m_{Cl^-,fresh}} \quad (3.14)$$

Τα ιόντα που απαντώνται στο γλυκό νερό πλησίον της ακτογραμμής συνήθως προέρχονται από τη ζώνη ψεκασμού της θάλασσας, ενώ μόνο τα ιόντα  $Ca^{2+}$  και  $HCO_3^-$  προέρχονται από τη διάλυση του ασβεστίτη. Σ' αυτή την περίπτωση  $m_{i,fresh} = 0$  για όλα τα ιόντα πέραν των ιόντων ασβεστίου και των διττανθρακικών. Στην περίπτωση που η μόνη πηγή ρύπανσης αναφορικά με τα ιόντα χλωρίου είναι το θαλασσινό νερό, μπορεί να θεωρηθεί ότι  $m_{Cl^-,fresh} = 0$  και κατά συνέπεια το κλάσμα έχει ως εξής:

$$f_{sea} = m_{Cl^-,sample} / 566 \quad (3.15)$$

όπου η συγκέντρωση των χλωριόντων εκφράζεται σε mmol/L, ενώ η συγκέντρωση των χλωριόντων σε 35‰ θαλασσινού νερού θεωρείται ίση με 566 mmol/L.

Ο Πίνακας 3.5 επεξηγεί τα αποτελέσματα σύμφωνα με τις παραπάνω μαθηματικές εκφράσεις και αφορούν στις χημικές αναλύσεις που παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.4. Η σχετική αύξηση ιόντων  $Na^+$  σε νερό χημικού τύπου  $NaHCO_3$ , και των ιόντων  $Ca^{2+}$  σε νερό χημικού τύπου  $CaCl_2$  είναι εμφανής. Η αύξηση αυτή, η οποία είναι συνηθισμένη και λαμβάνει τιμές έως και άνω των 10 mmol/L, μπορεί να αποδοθεί στη διάλυση του ασβεστίτη, η οποία λαμβάνει χώρα κατά την απομάκρυνση των ιόντων  $Ca^{2+}$  λόγω της ανταλλαγής με τα ιόντα  $Na^+$  (Back, 1966, Chapelle, 1983). Η διάλυση του ασβεστίτη μπορεί να επιφέρει αύξηση του pH με τιμές άνω του 8, στα νερά χημικού τύπου  $NaHCO_3$ .

Αντιθέτως, τα νερά χημικού τύπου  $\text{CaCl}_2$  παρουσιάζουν χαμηλές τιμές του pH, κάτω του 7, γεγονός που ενδεχομένως αποδίδεται ως αποτέλεσμα της καθίζησης του ασβεστίτη λόγω αύξησης των ιόντων  $\text{Ca}^{2+}$  κατά την κατιοντική ανταλλαγή.

Πίνακας 3.5. Επανυπολογισμένες αναλύσεις νερού του Πίνακα 3.4, καταδεικνύοντας την έκταση των αντιδράσεων (ανταλλαγή κατιόντων). Οι τιμές συγκέντρωσης αναφέρονται σε mmol/L.

	Θαλασσινό νερό	Νερό τύπου $\text{CaCl}_2$			Νερό τύπου $\text{NaHCO}_3$			Γλυκό νερό
		*sample	**mix	***react	*sample	**mix	***react	
$\text{Na}^+$	485	341	377	-36	40	22	18	0
$\text{K}^+$	10,6	2,8	8,2	-5,4				0
$\text{Mg}^{2+}$	55,1	27,9	42,8	-14,9	2,8	2,5	0,3	0
$\text{Ca}^{2+}$	10,7	39,6	9	30,6	0,7	3,3	-2,6	3
$\text{Cl}^-$	566	440	440	-	25,6	25,6	-	0
$\text{HCO}_3^-$	2,4	7	3,2	3,8	14,4	5,8	8,6	6
$\text{SO}_4^{2-}$	29,3	18,8	22,8	-4	2,7	1,3	1,4	0
% θαλασσινό νερό	100	78			5			0
Σύμβολο Διαγράμματος Piper					$B_s$	$B_m$		

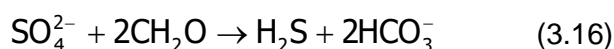
\*δεδομένη συγκέντρωση από σχήμα 3.6, \*\*υπολογισμένη χημική σύσταση νερού βάσει ανάμιξης, \*\*\*Sample – Mix, καταδεικνύοντας την επίδραση της ανταλλαγής κατιόντων και άλλες αντιδράσεις.

Οι υπόλοιπες αντιδράσεις απεικονίζονται σε διάγραμμα Piper, προεκτείνοντας από το σημείο που αφορά στη χημική ανάλυση του νερού προς τη σύσταση που προκύπτει κατά την ανάμιξη γλυκού και αλμυρού νερού. Ο χημικός τύπος  $\text{NaHCO}_3$  των δειγμάτων του Πίνακα 3.5 παρουσιάζεται στο διάγραμμα Piper ως  $B_s$  (πραγματική συγκέντρωση) και  $B_m$  (υπολογισμένη σύσταση από ανάμιξη). Όταν λαμβάνει χώρα μόνο κατιοντική ανταλλαγή, η προέκταση είναι παράλληλη με την εξωτερική πλευρά του ρομβικού διαγράμματος. Όταν λαμβάνουν χώρα και άλλες αντιδράσεις, η προέκταση παρεκκλίνει από την παραπάνω πλευρά. Η διάλυση του  $\text{CaCO}_3$  μετατοπίζει το αναμιγμένο νερό προς τη γωνία των ιόντων  $\text{Ca}^{2+} + \text{HCO}_3^-$ , ενώ ελάττωση των  $\text{SO}_4^{2-}$  μετατοπίζει το δείγμα παράλληλα προς τον άξονα των ανιόντων, και τέλος απόθεση  $\text{CaCO}_3$  κατευθύνει το δείγμα προς τη γωνία των ιόντων  $\text{Na}^+$  και  $\text{SO}_4^{2-} + \text{Cl}^-$ .

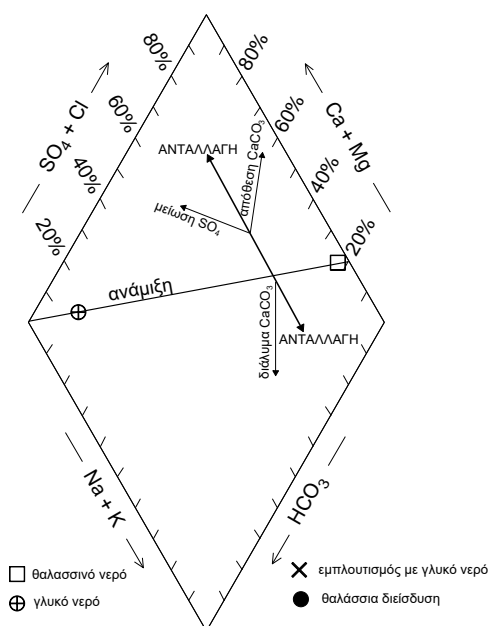
Οι παραπάνω μετατοπίσεις απεικονίζονται στο σχήμα 3.7, και αφορούν σε δείγματα υπόγειων νερών των περιοχών Zeeland και Western Brabant στην Ολλανδία. Το πίσω άκρο του αποτυπώματος στο διάγραμμα Piper (σχ. 3.7) έχει διεύθυνση προς τη γραμμή ανάμιξης βάσει της συγκέντρωσης των χλωριόντων του δείγματος νερού.

Στο σχήμα 3.7 φαίνεται η ύπαρξη αντιδράσεων με τον ασβεστίτη λόγω εμπλουτισμού του υδροφόρου με γλυκό νερό (σχετική αύξηση των ιόντων  $\text{HCO}_3^-$ ), αλλά αποτελεί διαδικασία μικρότερης σημασίας σε σχέση με τη διαδικασία αλμύρισης. Για την ακρίβεια, φαίνεται ότι η σύσταση του δείγματος νερού αναπτύσσεται προς κατεύθυνση αντίθετη από αυτή που αναμένεται κατά την ανταλλαγή ιόντων  $\text{Na}^+$  με ιόντα  $\text{Ca}^{2+}$  συνοδευμένη από

απόθεση  $\text{CaCO}_3$ . Παρόλο που λαμβάνει χώρα απόθεση του  $\text{CaCO}_3$ , είναι πιθανόν αυτή να υποκρύπτεται στο διάγραμμα Piper από τη μείωση των  $\text{SO}_4^{2-}$ , καθώς ελαττώνει το ποσοστό  $\text{SO}_4^{2-} + \text{Cl}^-$  και παράγει  $\text{HCO}_3^-$  σύμφωνα με την αντίδραση:



Η μείωση των θειικών ιόντων αποτελεί συνήθη διαδικασία και σχετίζεται με τη γένεση των υπό εξέταση νερών, καθώς το θαλασσινό νερό συχνά διεισδύει μέσω τυρφώδους εδάφους, η δημιουργία του οποίου άρχισε κατά την αύξηση του επιπέδου της θάλασσας. Είναι επίσης δυνατό η αυξημένη συγκέντρωση σε άλατα του θαλασσινού νερού να προκαλέσει ανταλλαγή πρωτονίων με τους ιζηματογενείς σχηματισμούς. Η παραπάνω επίδραση παρατηρείται όταν το pH του εδάφους μετράται σε απιονισμένο νερό και σε διάλυμα 1 M KCl, με το τελευταίο να προσδίδει πτώση του pH έως και κατά 2 μονάδες. Κατά τη θαλάσσια διείσδυση, η επίδραση δύναται να μειώσει την τιμή του pH με αποτέλεσμα το δείγμα του νερού να παρουσιάζεται υποκορεσμένο αναφορικά με τον ασβεστίτη, παρά την αυξημένη συγκέντρωση των ιόντων  $\text{Ca}^{2+}$  λόγω της ανταλλαγής κατιόντων.



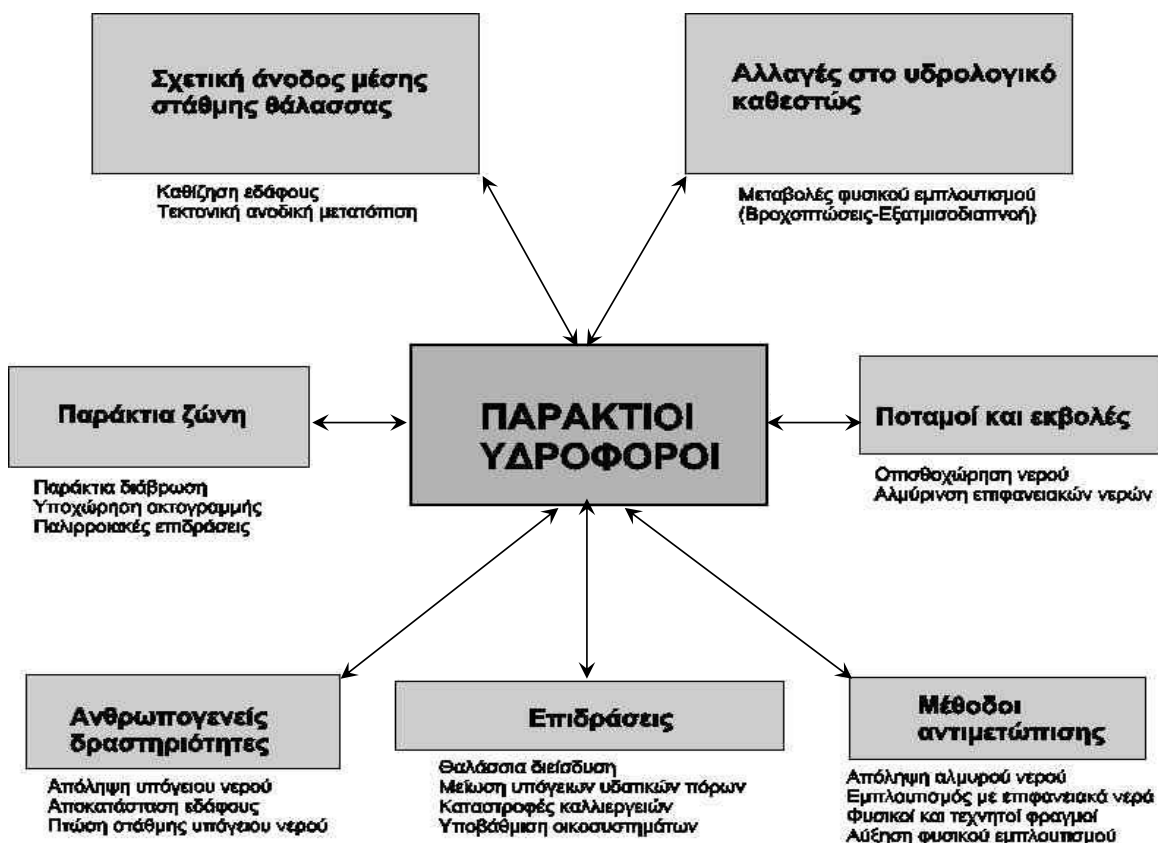
Σχήμα 3.7. Διάγραμμα Piper, με τη χημική σύσταση των υπόγειων νερών της περιοχής Zeeland και Western Brabant στην Ολλανδία, με ευδιάκριτη τη ανταλλαγή κατιόντων.

## 4. Η ΔΙΕΘΝΗΣ ΚΑΙ ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΕΜΠΕΙΡΙΑ ΣΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΘΑΛΑΣΣΙΑΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ

(κύριες βιβλιογραφικές πηγές: Διαμαντής και Πλιάκας, 2011, Καλλιώρας, 2002, 2008)

### 4.1. Εισαγωγή

Πολλές παράκτιες ζώνες και ιδιαίτερα αυτές στις οποίες απαντώνται δελταϊκοί σχηματισμοί αφορούν μεγάλες πληθυσμιακές μάζες. Για παράδειγμα, περίπου 50% του συνολικού πληθυσμού της γης απαντάται σε παράκτια ζώνη εύρους 60 km από την ακτογραμμή (Oude Essink, 2001). Ο λόγος αφορά κυρίως την αφθονία σε φυσικούς πόρους και δραστηριότητες οι οποίες αποσκοπούν στην εκμετάλλευση αυτών, όπως αλιεία και γεωργία καθώς και τη δυνατότητα οικονομικών δραστηριοτήτων όπως το εμπόριο και διάφορες άλλες υλικοτεχνικές υποδομές. Η συνεχώς αυξανόμενη ανάπτυξη των οικισμών, των γεωργικών καλλιεργειών και των οικονομικών δραστηριοτήτων επιφέρει τόσο ποσοτική όσο και ποιοτική υποβάθμιση των παράκτιων υδατικών πόρων για οικιακή, γεωργική και βιομηχανική χρήση.



Σχήμα 4.1. Σχηματική αναπαράσταση επιδράσεων στους παράκτιους υδροφόρους (Oude Essink, 2001).

Η ποιοτική κατανομή του υπόγειου νερού (γλυκό, υφάλμυρο, αλμυρό) στους γεωλογικούς σχηματισμούς συσχετίζεται άμεσα με διάφορες φυσικές διαδικασίες καθώς και με τη μεσολάβση του ανθρώπινου παράγοντα. Η διεθνής επιστημονική εμπειρία καταγράφει την παρουσία υφάλμυρου και αλμυρού νερού όχι μόνο εντός της παράκτιας ζώνης, αλλά σε περιοχές που εκτείνονται ευρύτερα αυτής, σε μεγάλη απόσταση πολλές φορές προς την ενδοχώρα. Υπό μια ευρύτερη υδρογεωλογική θεώρηση, οι πιο ενδιαφέρουσες παράκτιες περιοχές αφορούν σε υδρογεωλογικά συστήματα που εμπεριέχουν κυρίως ιζηματογενείς σχηματισμούς (πορώδη μέσα) παρά ρωγματωμένα πετρώματα.

Οι Bear et al. (1999) κατηγοριοποιούν τους υπόγειους υδατικούς πόρους παράκτιων περιοχών σε δυο ομάδες, ανάλογα με το βάθος που αυτοί απαντώνται, ως εξής:

- Υπόγειοι υδατικοί πόροι μικρού βάθους (μικρότερου των 800 m)
- Υπόγειοι υδατικοί πόροι μεγάλου βάθους (μεγαλύτερου των 800 m).

Συνήθως τα υπόγεια νερά μικρού βάθους είναι αυτά που υπόκεινται σε υπερεκμετάλλευση, αφού και η απόληψή τους μπορεί να πραγματοποιηθεί με τη χρήση συμβατικών γεωτρητικών τεχνολογιών. Η απόληψη υπόγειου νερού από παράκτιους υδροφόρους έχει ως αποτέλεσμα την αναστροφή της υδραυλικής βαθμίδας προς τη θάλασσα, προκαλώντας τη διείσδυση του θαλάσσιου νερού προς την ενδοχώρα, και συνεπώς την ποιοτική υποβάθμιση του γλυκού νερού.

## **4.2. Διεθνής εμπειρία θαλάσσιας διείσδυσης στην Ευρώπη και στην ευρύτερη περιοχή της Μεσογείου**

### **4.2.1. Ιταλία**

Η υπερεκμετάλλευση του παράκτιου αλλουβιακού πεδίου του Ποταμού Cornia- και ειδικότερα το τμήμα που ανήκει στην Ολόκαινη Περίοδο- στην Τοσκάνη της Ιταλίας, για αρδευτική, υδρευτική και βιομηχανική χρήση είχε ως συνέπεια τη διείσδυση της θάλασσας προς την ενδοχώρα. Πρόσφατα ο αλλουβιακός υδροφόρος της περιοχής υπόκειται σε εντατικούς ρυθμούς άντλησης της τάξης των  $4 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/έτος, επιπλέον, από το μέσο όρο ετήσιας απόληψης, με αποτέλεσμα την πτώση της μέσης στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα κατά 8m για την περίοδο 1961-1990 (Barazuolli et. al., 1999). Για τις μετρήσεις των πιεζομετρικών φορτίων της περιοχής χρησιμοποιήθηκαν υδρογεωτρήσεις παρατήρησης και πιεζόμετρα εγκαταστημένα σε δειγματοληπτικές γεωτρήσεις, για σημεία του υδροφόρου με αξιόπιστες τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας (Cucini, 1995). Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι η περιοχή έρευνας, καθώς και η ευρύτερη περιοχή μεταξύ του Ποταμού Cornia και της περιοχής Venturina, καλύπτονταν από βάλτους και έλη (Canavari, 1928) και στη συνέχεια μέσω κατάλληλης υποδομής μετατράπηκε σε καλλιεργήσιμη έκταση. Ο Cucini (1995) αναφέρει ότι μετρήσεις των χλωριόντων στην περιοχή υπέδειξαν αύξηση της συγκέντρωσης του χλωρίου από 100 σε 1000 mg/L σε περίοδο ενός έτους, γεγονός που υποδηλώνει την άμεση υποβάθμιση της ποιότητας του υπόγειου νερού λόγω της συνεχόμενης πτώσης της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα.

Η πεδιάδα της Muravera στο νοτιοανατολικό τμήμα της Σαρδηνίας καλύπτει έκταση της τάξης των 130 km<sup>2</sup> και αποτελεί επίσης τυπική περίπτωση θαλάσσιας διείσδυσης στην Ιταλία. Το φαινόμενο παρατηρήθηκε κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1970, και θεωρείται ότι οφείλεται τόσο σε φυσικά αίτια (συνεχείς περίοδοι ξηρασίας και παρουσία αλατούχων γεωλογικών σχηματισμών) όσο και σε ανθρωπογενείς δραστηριότητες όπως υπεράντληση του υδροφόρου, παράκτια έργα και ιχθυοκαλλιέργειες. Οι Lorrain et al. (2001) αναφέρουν ότι επί του παρόντος τόσο ο φρεάτιος υδροφόρος όσο και ο υδροφόρος, που βρίσκεται υπό πίεση, υπόκεινται σε ποιοτική υποβάθμιση λόγω της θαλάσσιας διείσδυσης. Για την ερμηνεία και αντιμετώπιση της θαλάσσιας διείσδυσης στην περιοχή έλαβε χώρα διεθνές ερευνητικό πρόγραμμα (Paniconi, 2000) με σκοπό την εφαρμογή τεχνητού εμπλουτισμού, τη δημιουργία υδροδυναμικών φραγμών και την ανάπτυξη ειδικά καταναμημένου δικτύου υδρογεωτρήσεων για την παρεμπόδιση της θαλάσσιας διείσδυσης. Ο Wilcox (1995) κατατάσσει την ποιότητα των υπόγειων νερών της περιοχής σε πέντε κατηγορίες, χρησιμοποιώντας δίκτυο 123 γεωτρήσεων παρατήρησης, και συμπεραίνει ότι η ηλεκτρική αγωγιμότητα EC κυμαίνεται από 250 μS/cm έως 3000 μS/cm. Ο πίνακας που ακολουθεί, σχηματοποιεί τις περιπτώσεις θαλάσσιας διείσδυσης στη Σαρδηνία, που λαμβάνουν χώρα στους τέσσερις κυριότερους υδροφόρους της περιοχής.

Πίνακας 4.1. Περιπτώσεις θαλάσσιας διείσδυσης στη Σαρδηνία (European Environment Agency, 1996).

ΥΔΡΟΦΟΡΟΣ	Μέσος ετήσιος εμπλουτισμός (x 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /έτος)	Μέση ετήσια εκμετάλλευση (x 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /έτος)	Μέση ετήσια συγκέντρωση χλωριόντων (mg/L)
S. Lucia	6,8	4,0	180-3000
Muravera	3,3	4,8	400-8000
(Flumendosa)			
Villasimius Rio	1,1	0,5	200-1000
Foxi			

Περίπτωση θαλάσσιας διείσδυσης αποτελεί και ο υδροφόρος του Portorecanati, στην Αδριατική ακτή της Ιταλίας λόγω της πρόσφατης υπερεκμετάλλευσής του (τελευταίες δεκαετίες). Η λιθοστρωματογραφία της περιοχής βασιζόμενη στην ανόρυξη 30 ερευνητικών υδρογεωτρήσεων καταδεικνύει τα παρακάτω (Cescon et al., 1988): α) το ανώτερο τμήμα καταλαμβάνεται από ολοκαινικά αλλουβιακά ιζήματα, αποτελούμενα από άμμο, χαλίκια, ιλύ και αργιλοίλυ, β) τα κατώτερα στρώματα καταλαμβάνονται αργιλικά υλικά πλαιστοκαινικής προέλευσης. Για την ερμηνεία του μηχανισμού της θαλάσσιας διείσδυσης, οι Teatini et al. (2001) χρησιμοποίησαν δισδιάστατο μαθηματικό ομοίωμα μεταφοράς και οριζόντιας ροής, με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων. Τα αποτελέσματα του μοντέλου υπέδειξαν τη συνεχή πτώση του υδροφόρου ορίζοντα λόγω των τεταμένων αντλήσεων στην περιοχή (για



την περίοδο 1985 έως 1998), πράγμα που αποτέλεσε την αιτία της θαλάσσιας διείσδυσης στον παράκτιο υδροφόρο.

#### 4.2.2. Τυνησία

Το παράκτιο πεδίο της Korba, στη βορειοδυτική Τυνησία, υπόκειται σε συνεχή εκμετάλλευση τα τελευταία χρόνια, προκαλώντας την εισχώρηση της θαλάσσιας σφήνας σε μεγάλη απόσταση προς την ενδοχώρα (Paniconi et. al., 2001). Πρόκειται για τυπική περίπτωση θαλάσσιας διείσδυσης σε περιοχή της μεσογειακής λεκάνης με ημίξηρες κλιματολογικές συνθήκες, από αυτές που υπόκεινται σε παρατεταμένο καθεστώς υπεραντλήσεων υπόγειου νερού. Η περιοχή έρευνας καταλαμβάνει έκταση 438 km<sup>2</sup>, στο βορειοανατολικό μέρος της χερσονήσου Cap-Bon της Τυνησίας, με μέση ετήσια βροχόπτωση 460 mm. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν μέσω δικτύου 99 γεωτρήσεων από το 1996 και έπειτα, ενώ σε συνδυασμό με στοιχεία που συλλέχθηκαν κατά την περίοδο 1962-1977 με τη χρήση εγκαταλειμμένων γεωτρήσεων της περιοχής, διαφαίνεται η συνεχής εισχώρηση της αλμυρής σφήνας προς την ενδοχώρα με μέγιστες τιμές αλατότητας της τάξης του 5-8 g/L (Paniconi, 2001). Ο ελεύθερος υδροφόρος απαρτίζεται από Πλειοκαινικούς σχηματισμούς sandstone καθώς και από αλλουβιακά ιζήματα τεταρτογενούς προέλευσης. Ο Paniconi (2001) αναφέρει ότι ο συνολικός όγκος υπόγειου νερού που αντλείται σε ετήσια βάση από τον υδροφόρο της περιοχής αγγίζει τα 50x10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/έτος. Δεδομένου ότι η αποτελεσματική ετήσια βροχόπτωση υπολογίζεται στα 40 mm, και σε συνδυασμό με το ότι ο υδροφόρος εμπλουτίζεται ετησίως με 18x10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> νερού, υπονοείται η εντατική υπερεκμετάλλευση των υπόγειων υδατικών πόρων της περιοχής, γεγονός που δίνει προάγει και επαυξάνει το ρυθμό διείσδυσης της θάλασσας.

#### 4.2.3. Ισπανία

Το 58% του συνόλου των υδρογεωλογικών μονάδων της Ισπανίας και των Νήσων των Βαλεαρίδων παρουσιάζουν ενδείξεις θαλάσσιας διείσδυσης, ως άμεσο αποτέλεσμα παρατεταμένης υπερεκμετάλλευσης. Σε μερικές περιπτώσεις (7%) το φαινόμενο αποτελεί τοπικό χαρακτηριστικό περιμετρικά της περιοχής άντλησης, ενώ σε άλλες (33%) το μέτωπο καταλαμβάνει το σύνολο μιας ευρύτερης περιοχής. Για το υπόλοιπο 18% η διείσδυση της θάλασσας αφορά ολόκληρο το σώμα του υδροφόρου (Mortma-Miner, 1994).

Η εφαρμογή μαθηματικού μοντέλου για το υδρογεωλογικό καθεστώς περιοχής της νότιας Ισπανίας, εκεί όπου εκτείνεται ένα σύστημα τριών υδροφόρων (Rio Verde, Rio Velez και Castell de Ferro), υποδεικνύει την ύπαρξη του φαινομένου της θαλάσσιας διείσδυσης. Πρόκειται για τρία υδροφόρα συστήματα που βρίσκονται στην περιοχή Betic Cordillera, και τα οποία σε συνδυασμό με το Βόρειο Αφρικανικό Ύφαλο, απαρτίζουν το δυτικότερο τμήμα της ευρύτερης μεσογειακής περιοχής (Sanz de Galdeano, 1990). Οι δύο ανατολικοί υδροφόροι (Rio Verde και Castell de Ferro) αποτελούν συνοθύλευμα αποσαθρωμένων υλικών το οποίο υπέρκειται μεταπελιτικών (metapelitic) πετρωμάτων του Σύμπλοκου Alpujarride (Avidad et al., 1981, Aldaya, 1981). Ο αποσαθρωμένος υδροφόρος του Rio Velez βρίσκεται σε υδραυλική επικοινωνία με τα μεταμορφωμένα πετρώματα του Σύμπλοκου Malaguide, καθώς επίσης με πλειοκαινικά θαλάσσια ιζήματα (Elorza et al., 1981). Οι υδροφόροι Rio Verde και Castell de Ferro καταλαμβάνουν έκταση μικρότερη των

5 km<sup>2</sup>, ενώ τα αποσαθρωμένα υλικά του υδροφόρου Rio Velez εκτείνονται σε έκταση της τάξης των 16 km<sup>2</sup> (Calvache, 1991). Το 70% της αντλήσιμης ποσότητας υπόγειου νερού των εν λόγω υδροφόρων περιορίζεται κατά την ξηρή περίοδο (Ιούνιος-Σεπτέμβριος), προκαλώντας πτώση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα η οποία εκτιμάται στα 6 m στην περιοχή Rio Velez, 5,5 m στην περιοχή Rio Verde και τέλος μερικά dm κάτω από τη μέση στάθμη της θάλασσας για τον υδροφόρο Castell de Ferro (Calvache et al., 1997). Τα παραπάνω επιφέρουν αλλαγή στο υδρογεωλογικό καθεστώς της περιοχής, μεταβάλλοντας την υδραυλική κλίση του υδροφόρου συστήματος και συνεπώς επηρεάζουν το σχηματισμό αλμυρής σφήνας στο παράκτιο υπόγειο περιβάλλον. Ο υδροφόρος Rio Verde αφορά σε υψηλές τιμές μεταβιβασιμότητας και απουσία αργιλικών ιζημάτων πράγμα που υποδεικνύει μεγάλη παροχή και αδυναμία συγκράτησης αλάτων αντίστοιχα. Στην περίπτωση του Rio Velez οι τιμές μεταβιβασιμότητας παρουσιάζονται σχετικά υψηλές σχεδόν σε όλη την έκταση του υδροφόρου, με εξαίρεση το δελταϊκό τμήμα του, όπου απαντάται συσσώρευση λεπτόκοκκων υλικών. Ο υδροφόρος του Castell de Ferro, ενώ εμφανίζει υψηλή μεταβιβασιμότητα, το μέτωπο της θαλάσσιας διείσδυσης παραμένει σταθερό τα τελευταία χρόνια (Calvache et al., 1997). Η εφαρμογή υδραυλικών (MODFLOW) και υδροχημικών (MOCDENSE, BADON2) μαθηματικών ομοιωμάτων για την ανάλυση των υδρογεωλογικών συνθηκών της περιοχής υπέδειξε ότι το μέτωπο της θαλάσσιας διείσδυσης για τις ανατολικές περιοχές εμφανίζεται μεγαλύτερο. Τα μέτρα αντιμετώπισης που προτείνονται για κάθε υδροφόρο συνοψίζονται ως εξής (Calvache et al., 1997):

- Υδροφόρος Rio Verde: τεχνητός εμπλουτισμός με ρυθμούς της τάξης του 1 hm<sup>3</sup>/ μήνα για περίοδο οκτώ μηνών, πράγμα που θα επιφέρει άμεση άνοδο του υδροφόρου ορίζοντα κατά 8m.
- Υδροφόρος Rio Velez: διατήρηση σταθερής παροχής στον παρακείμενο ποταμό με αποτέλεσμα συνεχή ροή νερού προς τη θάλασσα, διατήρηση της υδραυλικής κλίσης και συνεπώς τη δημιουργία υδραυλικού φραγμού. Θεωρείται ότι η διατήρηση μέσης ετήσιας παροχής της τάξης των 6,6 με 5,3 hm<sup>3</sup>/έτος θα επιφέρει μείωση του μετώπου της θαλάσσιας διείσδυσης κατά 40% (0,32 έως 0,20 hm<sup>3</sup>/ έτος)
- Υδροφόρος Castell de Ferro: λόγω της καρστικής υδροφορίας των πετρωμάτων της κύριας ορεινής μάζας της περιοχής, ενδείκνυται η δημιουργία τεχνητού φραγμού με αποτέλεσμα τη μείωση της παροχής του νερού, τόσο από την πλευρά της θάλασσας, όσο και από την πλευρά του καρστικού συστήματος. Τα αποτελέσματα καταδεικνύουν την ελάττωση της θαλάσσιας διείσδυσης σε 0,09 hm<sup>3</sup>/έτος και απώλειες γλυκού υπόγειου νερού από 0,33 σε 0,26 hm<sup>3</sup>/έτος.

#### 4.2.4. Γερμανία

Στο Bradenburg της Γερμανίας, έχει παρατηρηθεί το φαινόμενο της θαλάσσιας διείσδυσης λόγω της εντατικής υπεράντλησης του παράκτιου υδροφόρου (Hermisdorf et al., 1997) του πεδινού τμήματος της περιοχής. Η περιοχή έρευνας βρίσκεται βορειοδυτικά του Βερολίνου στην κομητεία Teltow-Flamig της πολιτείας Bradenburg. Η γεωμορφολογία της περιοχής αφορά πανεπίπεδη έκταση η οποία σχηματίστηκε από τις ποταμοχειμάρριες

δραστηριότητες του Ποταμού Nuthe (Kalatz, 1976). Το δίκτυο παρακολούθησης απαρτίζεται από 80 ερευνητικές υδρογεωτρήσεις, με μέγιστο βάθος τα 180 m, ενώ το μέσο βάθος τους ανέρχεται στα 50 m. Οι Voss et al. (2001) αναφέρουν ότι ο συντελεστής υδραυλικής αγωγιμότητας λαμβάνει την τιμή των  $5 \times 10^{-4}$  m/s για το αμμώδες έδαφος, ενώ τα ιλυώδη ιζήματα παρουσιάζουν υδραυλική αγωγιμότητα της τάξης των  $5 \times 10^{-8}$  m/s. Η υδραυλική κλίση κυμαίνεται από 0,006% στο βορειοανατολικό τμήμα του ποταμού Nuthe έως 0,001% στην κοιλάδα του ποταμού, ενώ το μέσο ετήσιο ύψος βροχής ανέρχεται στα 530 mm. Για τη μαθηματική ομοίωση του μηχανισμού της θαλάσσιας διείσδυσης στην περιοχή έρευνας χρησιμοποιήθηκε ο υπολογιστικός κώδικας SUTRA (Voss, 1984). Τα ερευνητικά συμπεράσματα υπέδειξαν ότι η διείσδυση του θαλασσινού νερού λαμβάνει χώρα λόγω του αβαθούς του υδροφόρου, ενώ η τοπογραφία της περιοχής επηρεάζει άμεσα τη ροή και τη μεταφορά των ρυπαντών στο υπόγειο νερό.

Οι Panteleit et al. (2001), ερεύνησαν τα γεωχημικά χαρακτηριστικά Δοκιμαστικού Πεδίου Παράκτιου Υδροφόρου (Coastal Aquifer Test Field, CAT-Field), στην περιοχή μεταξύ των πόλεων Bremerhaven και Cuxhaven, στη Βόρεια Γερμανία. Τα αποτελέσματα των ερευνών αποτέλεσαν τα εισαγόμενα στοιχεία για το αριθμητικό ομοίωμα του μηχανισμού της θαλάσσιας διείσδυσης με τη χρήση του μοντέλου PHREEQC (Parkhurst et al., 1999). Η ζώνη αλμυρότητας του παράκτιου υδροφόρου μπορεί εύκολα να προσδιοριστεί από την αύξηση της συγκέντρωσης των χλωριόντων για βάθος περίπου 35 m. Ο λόγος Cl<sup>-</sup>/Br<sup>-</sup> χρησιμοποιήθηκε για τον εντοπισμό της προέλευσης της αλατότητας, ενώ θεωρείται ότι οι αυξημένες συγκεντρώσεις των ιόντων Ca<sup>+2</sup>, Mn<sup>+2</sup>, Fe<sup>+2</sup> και Li<sup>+</sup> καταδεικνύουν την αλληλεπίδραση του γεωλογικού υλικού του υδροφόρου με το θαλασσινό νερό (Panteleit et al., 2001).

#### 4.2.5. Τουρκία

Έρευνες στη Τουρκία, και συγκεκριμένα στο Δέλτα Goksu, περιοχή η οποία υπόκειται σε συνεχή υπερεκμετάλλευση λόγω καλλιεργητικών δραστηριοτήτων των κατοίκων-υποδεικνύουν την ύπαρξη του φαινομένου της θαλάσσιας διείσδυσης. Το Δέλτα Goksu βρίσκεται στη βορειοκεντρική Τουρκία καλύπτοντας έκταση περίπου ίση με 150 km<sup>2</sup>. Οι Gordu et al. (2001) αναφέρουν ότι πρόκειται για αλλουβιακό πεδίο το οποίο σχηματίστηκε λόγω των ποταμοχειμάρριων δραστηριοτήτων του ποταμού Goksu, με τα αλλουβιακά ιζήματα να εκτείνονται σε βάθος 500 m. Αργιλικό στρώμα σχετικά χαμηλής υδραυλικής αγωγιμότητας και πάχους 20-30 m, υπέρκειται του υδροφόρου στρώματος το οποίο παρουσιάζει πάχος της τάξης των 130 m, και αποτελείται από άμμο, χαλίκια, άργιλο και αμμώδη άργιλο. Εφαρμόζοντας τον υπολογιστικό κώδικα SUTRA και χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων για μεταβλητή πυκνότητα, επιτεύχθηκε η προσομοίωση του μηχανισμού της θαλάσσιας διείσδυσης στην περιοχή, καταδεικνύοντας τιμές συγκέντρωσης χλωριόντων εύρους από 0 έως 22.000 mg/L. Το αριθμητικό μοντέλο απέδειξε ότι το μέτωπο της θάλασσας παρουσιάζει την τάση να διεισδύει μέσω του κατώτερου στρώματος του υδροφόρου, ενώ η διεπιφάνεια αλμυρού-γλυκού νερού εμφανίζει πάχος της τάξης των 100 m, μέγεθος που συνιστά περίπου το 20% της κάθετης διατομής του υδροφόρου συστήματος (Gordu et al., 2001).

#### 4.2.6. Δανία

Έρευνες στον υδροφόρο Skansehage, στη Δανία, με έμφαση τόσο στα γεωχημικά όσο και στα φυσικά χαρακτηριστικά του φαινομένου της θαλάσσιας διείσδυσης, πραγματοποιήθηκαν μέσω τριών πειραματικών εφαρμογών. Αρχικά δόθηκε έμφαση στην παρακολούθηση των φυσικών συνθηκών του μηχανισμού της θαλάσσιας διείσδυσης, ενώ στη συνέχεια με τη δημιουργία κατάλληλων πειραματικών διεργασιών έλαβαν χώρα δοκιμαστικές παρατεταμένες αντλήσεις στην περιοχή για την παρακολούθηση της μετατόπισης της θαλάσσιας σφήνας προς την ενδοχώρα. Τέλος διακόπηκαν οι δοκιμαστικές αντλήσεις με σκοπό την παρακολούθηση της μετατόπισης του μετώπου της θαλάσσιας σφήνας προς τη θάλασσα. Για τη μαθηματική προσομοίωση της μετατόπισης του μετώπου, χρησιμοποιήθηκε το τρισδιάστατο αριθμητικό μοντέλο PHASTD το οποίο αναπτύχθηκε με με στόχο την ερμηνεία και προσομοίωση της ροής και μεταφοράς ρυπαντών με βάση την πυκνότητά τους σε συνδυασμό με τις γεωχημικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα κατά τη διάρκεια του φαινομένου (Christensen et al., 2001). Τα αποτελέσματα του πειράματος υπέδειξαν τη διείσδυση της θάλασσας από τον πυθμένα του υδροφόρου, ενώ η αυξημένη συγκέντρωση των θειικών αλάτων προκάλεσε διάβρωση του οργανικού υλικού του υδροφόρου, με αποτέλεσμα την περαιτέρω αύξηση της αλατότητας.

#### 4.2.7. Πορτογαλία

Στην Πορτογαλία πραγματοποιήθηκε ερευνητικό πρόγραμμα από το Ίδρυμα Επιστημών και Τεχνολογίας (Science and Technology Foundation) στην περιοχή Algarve, η οποία υπόκειται σε διαρκή υπερεκμετάλλευση όσον αφορά στα υπόγεια υδατικά αποθέματα. Συγκεκριμένα ο υδροφόρος Mexilhoeira Grande- Portimao, αποτελεί αντικείμενο έρευνας όσον αφορά στο μηχανισμό της θαλάσσιας διείσδυσης και στην ανάπτυξη της διεπιφάνειας μεταξύ γλυκού και αλμυρού νερού. Ο εν λόγω υδροφόρος αποτελείται από δυο στρώματα, με την παρουσία ασβεστόλιθων Ιουράσιας προέλευσης στο βόρειο τμήμα και ασβεστόλιθων με άμμο μειοκαινικής προέλευσης στο νότιο τμήμα του (Salgueiro et al., 2001). Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του μοντέλου η αύξηση της συγκέντρωσης των χλωριόντων για το 90% της έκτασης ανέρχεται στα 647,53 mg/L, για το βόρειο τμήμα του υδροφόρου.

#### 4.2.8. Μαρόκο

Η περιοχή έρευνας αφορά τον παράκτιο υδροφόρο Meseta στο Μαρόκο, και καταλαμβάνει έκταση 3100 km<sup>2</sup>. Οι κύριες ανθρωπογενείς δραστηριότητες, οι οποίες αφορούν άμεσα την εκμετάλλευση του υδροφόρου είναι κατά κύριο λόγο γεωργικές. Για την ανάλυση και ερμηνεία του μηχανισμού της θαλάσσιας διείσδυσης αναπτύχθηκε βάση δεδομένων με τις εξής παραμέτρους (Hilali et al., 2001):

- Τοποθεσία και κύρια χαρακτηριστικά των παραγωγικών και δειγματοληπτικών υδρογεωτρήσεων,
- Τρισδιάστατη απεικόνιση του υδροφόρου,
- Χωροχρονικές μεταβολές διαφόρων μεταβλητών, όπως η πιεζομετρία της περιοχής, η αλμυρότητα και άλλες χημικές παράμετροι,

- Κατανομή των υδραυλικών και υδροχημικών παραμέτρων,
- Περιγραφή των διαφορετικών συνθηκών εμπλουτισμού και απόληψης του υδροφόρου,
- Αναπαράσταση διαφόρων δραστηριοτήτων που συσχετίζονται άμεσα ή έμμεσα με το υδροφόρο σύστημα (όπως περιοχές με δυναμικό άρδευσης).

Το υπόγειο υδατικό δυναμικό του υδροφόρου Souss-Massa, ο οποίος βρίσκεται ανάμεσα στους ορεινούς όγκους High Atlas και Anti Atlas, παρουσιάζει αυξημένες ποσότητες συνόλου διαλυμένων στερεών οι οποίες οφείλονται μεταξύ άλλων και στη διείσδυση της θάλασσας λόγω παρατεταμένων αντλήσεων στην περιοχή. Λόγω των παραπάνω, πραγματοποιήθηκαν υδρογεωλογικές μελέτες με τη χρήση ισοτόπων  $^{18}\text{O}$ ,  $^4\text{He}$ ,  $^{36}\text{Cl}$  και  $^{129}\text{I}$  για τον προσδιορισμό της προέλευσης του νερού, της αλμυρότητας και την ηλικία των δειγμάτων νερού. Τα αποτελέσματα των μελετών υπέδειξαν την ύπαρξη αλμυρού μετώπου από τα δυτικά προς τα ανατολικά.

Στο νοτιοδυτικό τμήμα του Μαρόκο, ο υδροφόρος Rharb αποτελεί φρεάτιο υδρογεωλογικό σχηματισμό ο οποίος βρίσκεται ανάμεσα στον Ποταμό Sebou και τη Λίμνη Bleu, με μήκος ακτογραμμής το οποίο ανέρχεται στα 76 km. Ο υδροφόρος παρουσιάζει δυναμικό ρύπανσης τόσο από την πλευρά της θάλασσας διείσδυσης όσο και από τη μεταφορά ρυπαντών γεωργικής προέλευσης (Loukili et al., 2001). Η μαθηματική ομοίωση του μηχανισμού της θάλασσας διείσδυσης επιτεύχθηκε αρχικά μακροσκοπικά ερμηνεύοντας τη δυναμική σχέση μεταξύ των δυο υγρών για το συνολικό εύρος της διεπιφάνειας μεταξύ γλυκού και αλμυρού νερού.

#### 4.2.9. Κύπρος

Ο παράκτιος υδροφόρος Guzelyurt στην κατεχόμενη περιοχή της Κύπρου, υπόκειται σε συνθήκες υπερεκμετάλλευσης του υπόγειου υδατικού αποθέματός του, τόσο για υδρευτικούς, όσο και για αρδευτικούς σκοπούς. Οι έρευνες αφορούν τη συλλογή και αξιολόγηση υδρογεωλογικών στοιχείων της περιοχής για περίοδο 20 ετών, διαμέσου δικτύου 90 δειγματοληπτικών και παραγωγικών υδρογεωτρήσεων. Ο Ergil (2001) παραθέτει ότι από το 1950 έχουν ανορυχθεί περίπου 2000 υδρογεωτρήσεις χωρίς να προηγηθεί μελέτη περιβαλλοντικών επιπτώσεων, γεγονός που επέφερε τη διείσδυση της θάλασσας προς την ενδοχώρα. Ο αριθμός των υδρογεωτρήσεων, οι οποίες αντλούν την περιοχή σήμερα υπολογίζεται στις 650, ενώ το κρίσιμο μέτωπο στο οποίο υφίσταται σημαντική διείσδυση της θάλασσας καλύπτει έκταση  $108\text{ km}^2$  σε μια απόσταση 9 km από την ακτογραμμή. Έρευνες όσον αφορά στην ποιότητα των υπόγειων νερών της περιοχής καταδεικνύουν συγκεντρώσεις σε NaCl, που αγγίζουν τιμές της τάξης των 7000 mg/L σε απόσταση 3,5 km από την ακτογραμμή (Ergil, 2001).

### 4.3. Διεθνής εμπειρία στη θάλασσα διείσδυση στις Η.Π.Α.

#### 4.3.1. Los Angeles

Ο παράκτιος υδροφόρος στην περιοχή του Los Angeles, σε όλο σχεδόν το μήκος του από την Κεντρική έως την Δυτική Ακτή, υπόκειται σε συνθήκες διείσδυσης θαλασσινού νερού εξαιτίας της αλόγιστης υπεράντλησής του. Οι Johnson et al. (2001) αναφέρουν ότι

για την παρακολούθηση και αντιμετώπιση του φαινομένου, έλαβε χώρα ανόρυξη σημαντικού αριθμού υδρογεωτρήσεων και συγκεκριμένα 230 γεωτρήσεις έγχυσης, 758 γεωτρήσεις παρακολούθησης και 4 γεωτρήσεις απόληψης.

#### 4.3.2. Florida

Η γεωλογία της λιμνοθάλασσας του Ποταμού Indian θεωρείται ότι καθορίζει την υδρολογία της ανατολικής ακτής της κεντρικής Florida, ενώ σεισμικές μέθοδοι υπέδειξαν την παρουσία ρήγματος στην περιοχή. Ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι χημικές αναλύσεις σε δείγματα νερού του υδροφόρου, όπου οι συγκεντρώσεις των χλωριόντων κυμαίνονται μεταξύ 1.400 και 2.900 mg/L ανατολικά του ρήγματος, ενώ οι αντίστοιχες συγκεντρώσεις για την περιοχή ανατολικά του ρήγματος λαμβάνουν τιμές μικρότερες της τάξης των 700 mg/L. Η υδρογεωλογία της περιοχής αφορά δυο κύρια υδροφόρα συστήματα- το Επιφανειακό (Surficial) και το Φλοριδιακό (Floridan). Το Επιφανειακό υδροφόρο σύστημα αποτελείται από άμμους, ιλύ, άργιλο και δολομιτικούς ασβεστόλιθους Μειοκαινικής και Ολοκαινικής προέλευσης, ενώ στη μεγαλύτερη έκτασή του είναι ελεύθερο και ανομοιογενές. Ο Φλοριδιακός υποδιαιρείται στον ανώτερο και κατώτερο Φλοριδιακό υδροφόρο, οι οποίοι διαχωρίζονται μεταξύ τους από λιγότερο διαπερατές ημι-ελεύθερες μονάδες. Τα αποτελέσματα της έρευνας των Kindinger et al. (2001), υπέδειξαν ότι:

- Οι ρωγμές των πετρωμάτων παρέχουν διόδους επαυξάνοντας τη μεταφορά ρύπων στο υπόγειο νερό,
- Οι ανομοιογένεια που παρατηρείται στη συγκέντρωση των χλωριόντων οφείλεται κυρίως στην ανοδική μετανάστευση αλμυρού υπόγειου νερού μέσω των ρωγματωμένων πετρωμάτων,
- Η αυξητική τάση της συγκέντρωσης των ιόντων χλωρίου θεωρείται ότι θα επηρεάσει την ποιότητα του υπόγειου νερού του Ανώτερου Φλοριδιακού υδροφόρου στρώματος.

Στο Εθνικό Πάρκο Everglades της Florida εφαρμόστηκε η πρωτοποριακή μέθοδος της χαρτογράφησης του μετώπου της θαλάσσιας διείσδυσης με τη χρήση αεροπορικών ηλεκτρομαγνητικών τεχνικών (airborne electromagnetic techniques). Η μέθοδος βασίζεται στις υψηλές τιμές ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας που παρουσιάζει το αλμυρό νερό σε αντίθεση με αυτές του γλυκού υπόγειου νερού. Με τη χρήση ηλεκτρομαγνητικών αισθητήρων μετρήθηκε η ηλεκτρομαγνητική συμπεριφορά του εδάφους σε διάφορες συχνότητες, παρέχοντας πληροφορίες για διάφορα βάθη του υδροφόρου. Οι Fitterman et al. (2001) αναφέρουν ότι η ηλεκτρομαγνητική ανταπόκριση του εδάφους μετατρέπεται σε μαθηματικό ομοίωμα αντίστασης-βάθους (resistivity-depth model) με την εφαρμογή μιας τεχνικής προσδιορισμού μη γραμμικών παραμέτρων, γνωστής ως αντιστροφή. Οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση ελικοπτέρου το οποίο με ειδικό πρόγραμμα πτήσης, ουσιαστικά σαρώνει την επιφάνεια του υδροφόρου παρέχοντας πληροφορίες του γεωλογικού και υδρογεωλογικού προφίλ ανά 10-15 m εύρος. Η εξαιρετικά μεγάλη πυκνότητα των τιμών της ηλεκτρικής αντίστασης του εδάφους ουσιαστικά παρέχει μια ολοκληρωμένη εικόνα των υδρογεωλογικών συνθηκών του υδροφόρου. Το εύρος του μετώπου της θαλάσσιας διείσδυσης μπορεί να εκτιμηθεί με τη χρήση μοντέλων ηλεκτρικής αγωγιμότητας.

Στο προστατευόμενο πάρκο Big Cypress, στην επαρχία Collier της νότιας Florida, επιτεύχθηκε ο προσδιορισμός της θαλάσσιας διείσδυσης με τη χρήση γεωφυσικών μεθόδων. Πρόκειται για ελεύθερο υδροφόρο ο οποίος βρίσκεται σε υδραυλική επικοινωνία με επιφανειακά νερά της περιοχής και υπόκειται ανυδροφόρων και υδροφόρων στρωμάτων. Η θαλάσσια διείσδυση λαμβάνει χώρα με τη μορφή θαλάσσιας σφήνας, ενώ ενδιαφέρον παρουσιάζει το πρότυπο της αλμυρότητας για το υδρογεωλογικό σύστημα της περιοχής. Η θαλάσσια σφήνα στους υποκείμενους υδροφόρους λαμβάνει χώρα με εντελώς ακανόνιστους ρυθμούς και σχήμα, τόσο ως προς τη θαλάσσια σφήνα του ελεύθερου υδροφόρου, όσο και προς την απόσταση από την ακτογραμμή. Ο Paillet (2001) θεωρεί ότι η ανισοκατανομή της αλμυρότητας στα κατώτερα υδροφόρα στρώματα οφείλεται κυρίως στην ικανότητα διήθησης των εν λόγω στρωμάτων παρά στην υδραυλική σχέση μεταξύ γλυκού και αλμυρού νερού.

#### 4.3.3. Virginia

Πειραματικές διεργασίες κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1970 στο Norfolk της Virginia υπέδειξαν την ύπαρξη αργιλικής διασποράς σε μη συνεκτικό ιζηματογενή υδροφόρο εξαιτίας κατιοντικής ανταλλαγής των αργιλικών ορυκτών λόγω της εκτόπισης υφάλμυρου από γλυκό νερό. Η μετανάστευση των διάκενων αργιλικών σωματιδίων είχε ως αποτέλεσμα τη φραγή των πόρων του υδροφόρου, τη μείωση της υδραυλικής αγωγιμότητας, καθώς και τη μείωση της ικανότητας επαναπλήρωσης του υδροφόρου. Οι Konikow et al. (2001) απέδειξαν πειραματικά ότι η ελάττωση της υδραυλικής αγωγιμότητας παρατηρείται καθώς η αναλογία σε άργιλο αυξάνεται όπως επίσης και όταν αυξάνεται η αλμυρότητα του περιεχόμενου νερού. Η πτωτική τάση της υδραυλικής αγωγιμότητας εξαιτίας του ποσοστού αργίλου μπορεί να εκφραστεί σαν γραμμική συνάρτηση της συγκέντρωσης των χλωριόντων (Konikow et al., 2001). Οι ίδιοι συγγραφείς (2001), προσάρμοσαν τις παραπάνω γραμμικές συναρτήσεις, στον υπολογιστικό κώδικα SUTRA, με αποτέλεσμα μια πιο εμπειριστατωμένη μαθηματική ομοίωση του υδροφόρου της περιοχής στην οποία υπεισέρχεται και η παράμετρος της μεταβολής της υδραυλικής αγωγιμότητας.

#### 4.3.4. Georgia

Οι συνεχώς αυξανόμενες αντλήσεις του παράκτιου υδροφόρου της Georgia επέφεραν σημαντικές αλλαγές στην υδραυλική ισορροπία μεταξύ γλυκού και θαλασσινού νερού με αποτέλεσμα τη διείσδυση της θάλασσας προς την ενδοχώρα. Με σκοπό τον προσδιορισμό και την ερμηνεία του μετώπου της θαλάσσιας σφήνας, η Γεωλογική Επισκόπηση των Ηνωμένων Πολιτειών (U.S. Geological Survey, U.S.G.S.) σε συνεργασία με το Τμήμα Φυσικών Πόρων της Georgia, ανέπτυξαν μαθηματικό μοντέλο για την προσομοίωση της ροής του γλυκού νερού στον παράκτιο υδροφόρο, καθώς και την επίδραση της μεταβολής της πυκνότητας στα δυο υγρά. Σκοπός του ερευνητικού προγράμματος είναι η πρόβλεψη διαφόρων «σεναρίων» άντλησης με στόχο την επίτευξη ορθολογικής διαχείρισης των παράκτιων υπόγειων υδατικών πόρων της περιοχής. Για την πραγματοποίηση των παραπάνω χρησιμοποιήθηκε ο υπολογιστικός κώδικας SUTRA. Οι Payne et al. (2001)

παραθέτουν ότι το αρχικό στάδιο της ομοίωσης αφορά στο μηχανισμό της θαλάσσιας διείσδυσης, και συγκεκριμένα την ανάλυση των παρακάτω παραμέτρων:

- Είσοδος του θαλασσινού νερού στην ενδοχώρα διαμέσου περιοχών όπου τα υπερκείμενα αδιαπέρατα στρώματα έχουν υποστεί διάβρωση, με αποτέλεσμα την πλευρική διείσδυση της θάλασσας.
- Ανοδική κατακόρυφη κίνηση του αλμυρού νερού διαμέσου διόδων όπως ρωγμές ή καρστ.

#### 4.3.5. Kansas

Ο αλλουβιακός υδροφόρος Great Bend Prairie, στο νότιο τμήμα του κεντρικού Κάνσας υπέρκειται του υπεραλμυρού υδροφόρου ο οποίος ανήκει στην Πέρμιο εποχή. Η συνεχής και εντατική άντληση του υποκείμενου υδροφόρου κυρίως για αρδευτικούς σκοπούς είχε ως αποτέλεσμα την άνοδο αλμυρού νερού στα ανώτερα υδροφόρα στρώματα και την υποβάθμιση της ποιότητας του γλυκού νερού που περιέχεται σ' αυτά. Οι Shing Ma et al. (1997) προσομοίωσαν αριθμητικά την άνοδο της διεπιφάνειας και την επίδρασή της στην αλμύριση του γλυκού νερού χρησιμοποιώντας τον υπολογιστικό κώδικα SWIFT-II. Κατά την προσομοίωση του μηχανισμού της ανόδου της διεπιφάνειας, διαφάνηκε ότι οι κυριότεροι παράγοντες που επηρεάζουν την αλμύριση των αντλούμενων ποσοτήτων νερού είναι η τοποθεσία και τα χαρακτηριστικά των αργιλικών στρωμάτων στον υδροφόρο, ο ρυθμός άντλησης, η τοποθεσία των φίλτρων της υδρογεώτρησης και τέλος η υδραυλική αγωγιμότητα του υδροφόρου μέσου. Η επίδραση του πορώδους του υδροφόρου καθώς και ο τρόπος με τον οποίο διανέμεται η αλμυρότητα αποδείχθηκαν παράγοντες δευτερεύουσας σημασίας, ενώ ο φυσικός εμπλουτισμός από τις βροχοπτώσεις αποδείχθηκε αμελητέος.

#### 4.3.6. California

Η περιοχή έρευνας αφορά την υδρογεωλογική λεκάνη Santa Clara-Calleguas, στην επαρχία Ventura της California, με έκταση 3.112 km<sup>2</sup> ενώ αντλήσεις υπόγειου νερού λαμβάνουν χώρα για την εξυπηρέτηση αρδευτικών και υδρευτικών αναγκών. Για την προσομοίωση των φυσικών διαδικασιών της θαλάσσιας διείσδυσης χρησιμοποιήθηκαν δυο εναλλακτικά εννοιολογικά μοντέλα, τα οποία στη συνέχεια δοκιμάστηκαν με τη χρήση του υπολογιστικού κώδικα SUTRA. Και τα δυο μοντέλα αφορούν στην ομοίωση των χαρακτηριστικών ετερογενούς, στρωματοποιημένου υδροφόρου με σημαντικά αποθέματα υπόγειου νερού. Ο Nishikawa (1997) αναφέρει ότι το πρώτο μοντέλο θεωρεί την ύπαρξη επίπεδων υδροφόρων στρωμάτων με υψηλές τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας, γεγονός που παρέχει δίοδο στο θαλάσσιο νερό ώστε να διεισδύσει προς την ενδοχώρα. Το δεύτερο μοντέλο θεωρεί την ύπαρξη παράκτιων πτυχών οι οποίες παρέχουν συντομότερη δίοδο για την εμφάνιση της θάλασσας. Ο Nishikawa (1997) παραθέτει τα κυριότερα αποτελέσματα των μοντέλων τα οποία έχουν ως εξής:

- Το υδροφόρο σύστημα προσομοιώνεται ευκολότερα με την παραδοχή επίπεδων, ετερογενών υδροφόρων στρωμάτων,
- Τα σχετικά λεπτά στρώματα υδροφόρου με υψηλές τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας αποτελούν τις ευκολότερες διόδους της θαλάσσιας διείσδυσης,



- Η ύπαρξη συνεχόμενων αργιλικών στρωμάτων με χαμηλές τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας αποτελούν σημαντικούς σχηματισμούς για τον έλεγχο της κίνησης του αλμυρού νερού κατά τη διάρκεια της θαλάσσιας διείσδυσης.

Στην ίδια περιοχή, ο υδροφόρος της πεδιάδας Oxnard, θεωρείται ότι υποβαθμίζεται ποιοτικά εξαιτίας θαλάσσιας διείσδυσης που λαμβάνει χώρα σ' αυτόν από τη δεκαετία του 1930. Η περιοχή έρευνας καταλαμβάνει έκταση 120 mi<sup>2</sup> ενώ το πάχος του υδροφόρου συστήματος φθάνει τα 1.400 ft και διαχωρίζεται στο ανώτερο και κατώτερο υδροφόρο στρώμα. Το ανώτερο υδροφόρο στρώμα περιέχει δυο διαφορετικούς υδροφόρους, τον Oxnard και το Mugu, ενώ το κατώτερο υδροφόρο στρώμα καταλαμβάνεται από εναλλαγές αλλουβιακής άμμου και αργίλων. Ο Izbicki (1997) αναφέρει ότι η συγκέντρωση των χλωριόντων φθάνει τις 17.000 mg/L ενώ η συγκέντρωση των ίδιων ιόντων στον υδροφόρο Mugu προσεγγίζει την τιμή των 6.700 mg/L. Η αλμυρότητα του υπόγειου νερού σε αιωρούμενους υδροφόρους οι οποίοι εμπεριέχονται στον υδροφόρο Mugu πλησιάζει τις 23.000 mg/L σε συγκέντρωση ιόντων χλωρίου.

Ο Reichard (1995) με σκοπό τη διαχείριση των υπόγειων και επιφανειακών υδατικών πόρων σε παράκτιο υδροφόρο στη βόρεια California, ανέπτυξε μαθηματικό μοντέλο βελτιστοποίησης, χρησιμοποιώντας ως μια από τις μεταβλητές του συστήματος και τη διανομή του επιφανειακού νερού για υδρευτική χρήση. Η ροή του υπόγειου νερού προσομοιώθηκε αναπτύσσοντας μαθηματικό μοντέλο, το οποίο αφορούσε υδρογεωλογικό σύστημα ενός ελεύθερου και ενός υπό-πίεση υδροφόρου, ενώ τα επιφανειακά νερά θεωρήθηκαν ως μέρος μιας στοχαστικής διαδικασίας. Το μαθηματικό μοντέλο του Reichard (1995) αφορούσε στη ροή του υπόγειου νερού και όχι ειδικά στη θαλάσσια διείσδυση. Τα αποτελέσματα του μοντέλου κατέδειξαν ότι η αντιμετώπιση της θαλάσσιας διείσδυσης έγκειται στη μείωση της χρήσης των υδατικών πόρων του υδροφόρου ή στην εισαγωγή σημαντικών ποσοτήτων νερού. Τα αποτελέσματα του μοντέλου ανέδειξαν επίσης τη σημαντικότητα του φυσικού εμπλουτισμού του υδροφόρου συστήματος στην αντιμετώπιση της θαλάσσιας διείσδυσης.

Εν συνεχεία, οι Nishikawa κ.α. (Nikishawa et. al., 1996) αξιολογώντας και επεκτείνοντας το μοντέλο του Reichard (1995) σχετικά με την υδραυλική προσομοίωση του υδρογεωλογικού συστήματος της περιοχής, χρησιμοποίησαν την ανάλυση Monte Carlo και τον υδροχημικό κώδικα SUTRA (για την προσομοίωση της ροής μεταβλητής πυκνότητας και μεταφοράς ρυπαντών), με σκοπό την παρεμπόδιση του μετώπου της θαλάσσιας διείσδυσης. Τα συμπεράσματα (Nishikawa, 1998) του μοντέλου υπέδειξαν ότι η χρήση των παραπάνω μεθόδων αναλύει αποτελεσματικά το σύνολο του συστήματος λήψης αποφάσεων για την αντιμετώπιση της θαλάσσιας διείσδυσης της περιοχής.

Συνήθως, το φαινόμενο της θαλάσσιας διείσδυσης παρατηρείται εξαιτίας της εκτεταμένης υπεράντλησης σε παράκτιους υδροφόρους ή από άλλες παρεμβάσεις οι οποίες έχουν ως αποτέλεσμα τη μείωση της τροφοδοσίας των υδροφόρων (π.χ. εκτροπές ή διευθετήσεις ποταμών ή χειμάρρων οι οποίοι ανέκαθεν εμπλούτιζαν τους υδροφόρους) (Yates, 1988, Fetter, 1994). Στην περιοχή της Salinas Valley και του Ποταμού Salinas, και οι δυο παραπάνω συνθήκες υφίστανται, σύμφωνα με το Haddad (2002), όπου η θαλάσσια διείσδυση αποτελεί μείζονα παράγοντα στην υποβάθμιση της παραγωγής των

καλλιεργειών και του εδάφους της παράκτιας περιοχής. Ο ίδιος (Haddad, 2002) θεωρεί ότι περαιτέρω εισχώρηση του αλμυρού μετώπου προς την ενδοχώρα θα επιφέρει ποιοτική υποβάθμιση των υπόγειων νερών τα οποία βρίσκονται ενδότερα, η χρήση των οποίων προορίζεται για ύδρευση. Προκειμένου να αντιμετωπιστεί το φαινόμενο της θαλάσσιας διείσδυσης έχει κατασκευαστεί μονάδα τριτοβάθμιας επεξεργασίας λυμάτων, η Monterey County Water Recycling Project, η οποία διανέμει επεξεργασμένο νερό για αρδευτική χρήση.

Ενδιαφέρον παρουσιάζει η προσέγγιση των Loaiciga και Leirnik (2000), οι οποίοι ανέπτυξαν μαθηματικό μοντέλο για τη διαχείριση των υδατικών πόρων του παράκτιου υδροφόρου της Santa Barbara, λαμβάνοντας υπόψη παράγοντες όπως οι κλιματικές αλλαγές, τα αρχικά πιεζομετρικά φορτία, τα επιτόκια προεξοφλήσεων, το κόστος άντλησης και την τιμή αγοράς του υπόγειου νερού. Το εν λόγω μοντέλο κατέληξε σε αποτελέσματα τα οποία συνδέουν γραμμικά το ρυθμό άντλησης ως συνάρτηση της κλίσης του κόστους για χαμηλά και υψηλά αρχικά πιεζομετρικά φορτία υπό τις τρέχουσες κλιματολογικές συνθήκες και με μέση τιμή κόστους νερού 1 U.S. \$/ m<sup>3</sup> (Loaiciga et. al., 2000).

#### 4.3.7. Hawaii

Στην περιοχή Barbers Point στο νότιο τμήμα του Oahu της Hawaii, οι εντατικοί ρυθμοί άντλησης είχαν ως συνέπεια την ποσοτική υποβάθμιση των υπόγειων υδατικών πόρων του παράκτιου υδροφόρου συστήματος. Έτσι, η ανάπτυξη του μοντέλου RASA (Regional Aquifer System Analysis) χρησιμοποιώντας κυρίως ως εισαγόμενα στοιχεία τις αντλούμενες ποσότητες υπόγειου νερού, καθώς και τις ποσότητες εμπλουτισμού, θεωρήθηκε επιτακτική ανάγκη. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα του μοντέλου οι Souza et al. (2001) θεωρούν ότι ο υδροφόρος μπορεί να επαναπληρώσει το υπόγειο υδατικό δυναμικό του ακόμα και υπό καθεστώς αντλήσεων της τάξης των 4,34 x 10<sup>6</sup> gallons/day, χωρίς αυτό να επιφέρει αύξηση του μετώπου της θαλάσσιας διείσδυσης.

#### 4.3.8. Sacramento

Η υδραυλική ισορροπία μεταξύ του γλυκού και του θαλασσινού νερού στις εκβολές ποταμών θεωρείται ιδιαίτερα ευαίσθητη λόγω των ιδιότυπων συνθηκών ροής (επιφανειακή πλέον ανάμιξη των δύο υγρών) και οποιαδήποτε παρέμβαση ανάντη του δελταϊκού πεδίου, όπως η εκτροπή του ποταμού για δημιουργία αρδευτικών καναλιών δύναται να επιφέρει σημαντική εκτόπιση του θαλασσινού μετώπου προς την ενδοχώρα. Περίπτωση όπως αυτή που περιγράφηκε παραπάνω αποτελεί και το δέλτα του Ποταμού San Joaquin στην περιοχή του Sacramento, όπου μια παρατεταμένη περίοδος ξηρασίας ανάμεσα στα τέλη της δεκαετίας του 1980 και στις αρχές τη δεκαετίας του 1990 σε συνδυασμό με την εκτροπή του ποταμού San Joaquin ανάντη του δέλτα, προκάλεσε περαιτέρω διείσδυση του θαλασσινού νερού στον παράκτιο υδροφόρο της περιοχής. Η κλίμακα της ποιοτικής υποβάθμισης του υδροφόρου από τα έργα εκτροπής του ποταμού ήταν τέτοια που επέφερε αύξηση της αλατότητας του υπόγειου του υδροφόρου του Κόλπου του San Francisco (Denton et al., 1997). Οι υδραυλικές συνθήκες του δέλτα του Ποταμού San Joaquin προσομοιώθηκαν μαθηματικά από τους Sanders και Piasecki (Sanders et al., 2002), και στη συνέχεια αναπτύχθηκε μαθηματικό ομοίωμα βελτιστοποίησης με σκοπό το βέλτιστο

προγραμματισμό των εκτροπών του ποταμού ανάντη του δέλτα με την ελάχιστη εισχώρηση του θαλασσινού μετώπου.

#### 4.3.9. Jamaica

Η επίδραση των κλιματικών αλλαγών στο υπόγειο υδατικό δυναμικό των παράκτιων υδροφόρων των νησιών είναι πολύ σημαντική, γι' αυτό και η περίπτωση των τροπικών Νήσων της Καραϊβικής δεν αποτελεί εξαίρεση. Το υπόγειο υδατικό δυναμικό του εν λόγω νησιωτικού συμπλέγματος αποτελεί το μοναδικό πόρο νερού για υδρευτική χρήση και συνεπώς η αλλαγή του κλίματος του πλανήτη θέτει υπό αμφισβήτηση την βιωσιμότητα των υδατικών πόρων της περιοχής. Ο Shrivastava (1998) μελέτησε την επίδραση του φαινομένου της κλιματικής αλλαγής του πλανήτη και κατ' επέκταση την άνοδο του επιπέδου της θάλασσας όσον αφορά στην επιδείνωση του φαινομένου της θαλάσσιας διείσδυσης. Ως περιοχή έρευνας χρησιμοποιήθηκε η περίπτωση του παράκτιου υδροφόρου Golden Grove στη Jamaica. Πρόκειται για αβαθή υπό-πίεση αλλουβιακό υδροφόρο με εύρος 400 m κατά μήκος της ακτογραμμής και πάχος περί τα 4 m. Πρέπει να σημειωθεί ότι η πλειοψηφία των παράκτιων υδροφόρων της Καραϊβικής Θάλασσας έχουν τα παραπάνω γεωμετρικά και υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά, π.χ. οι παράκτιοι υδροφόροι των περιοχών Grand Cayman, Bahamas, Barbados, Belize και Jamaica, παρέχοντας όμως σημαντικά υδατικά αποθέματα σε νερό ύδρευσης (Caribbean SIWR, 1980, Weddenburn, 1977). Ο Shrivastava (1998) ανέπτυξε υδροχημικό μαθηματικό ομοίωμα χρησιμοποιώντας τον υπολογιστικό κώδικα SUTRA, για να ερμηνεύσει τον τρόπο και το βαθμό επίδρασης της ανόδου της στάθμης της θάλασσας στην περαιτέρω εισχώρηση του αλμυρού μετώπου προς την ενδοχώρα.

### 4.4. Διεθνής εμπειρία στη θαλάσσια διείσδυση στη Νότια Αμερική

#### 4.4.1. Χιλή

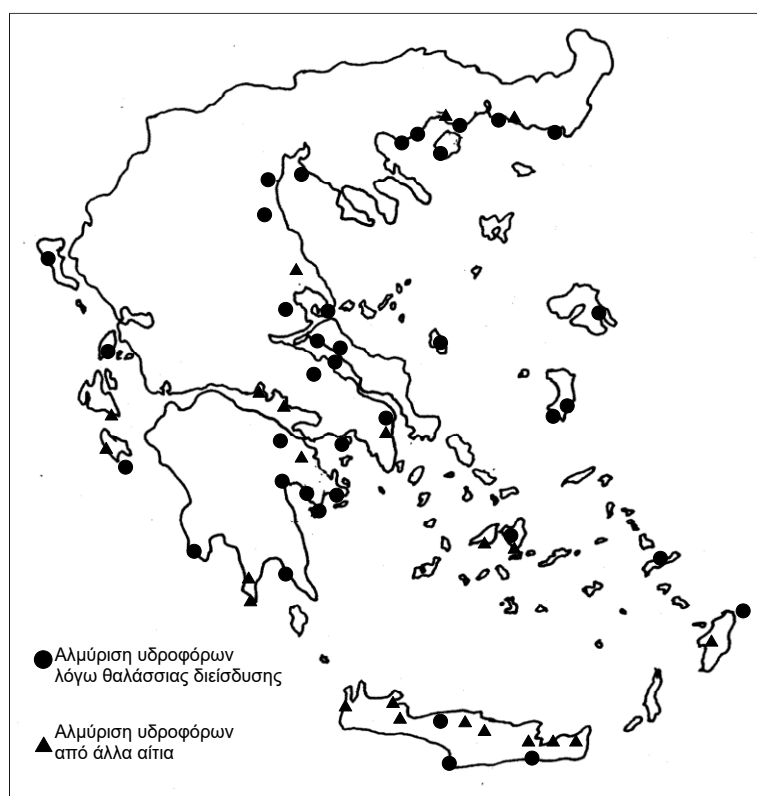
Σύμφωνα με τους Duffy και Al - Hassan (Duffy et al., 1988), οι αλμυρές λίμνες αποτελούν περιοχές επιφανειακής απορροής υπόγειου νερού σε κλειστές ερημοποιημένες λεκάνες, όπου η εξάτμιση έχει δημιουργήσει επιφάνειες με μεγάλη συσσώρευση αλάτων. Η περιοχή Salar de Atacama της Χιλής αποτελεί τυπική περίπτωση εισχώρησης αλμυρού νερού σε υδροφόρο της ενδοχώρας, του οποίου η προέλευση αφορά στην αλμυρή λιμνοθάλασσα της περιοχής. Πρόκειται για περιοχή με έντονη εξάτμιση, μεγάλες αυξομειώσεις στη θερμοκρασία, αυξημένο το φαινόμενο της αποσύνθεσης (κατά τη διάρκεια της αιολικής απενέργειας), μεταβολές του υδροφόρου ορίζοντα και αιολικές αποθέσεις ιζημάτων (Moraga et al., 1974). Οι Tejada et al., (Tejada et al., 2003) ανέπτυξαν μαθηματικό ομοίωμα αποσκοπώντας στην ερμηνεία της μεταφοράς των ρυπαντών στο υπόγειο νερό λαμβάνοντας ταυτόχρονα υπόψη τις επιδράσεις της μεταβλητής πυκνότητας. Οι ίδιοι θεωρούν ότι η χρήση ενός μοντέλου διάχυσης - διασποράς αποτελεί τον πλέον αποτελεσματικό τρόπο για την προσομοίωση των υδρογεωλογικών συστημάτων όπως αυτό της περιοχής έρευνας.

## 4.5. Ελληνική εμπειρία περί του φαινομένου της θαλάσσιας διείσδυσης

### 4.5.1. Γενικά

Η διεθνής εμπειρία που αφορά στις έρευνες για την ερμηνεία του φαινομένου της θαλάσσιας διείσδυσης, υποδεικνύει την έλλειψη επιστημονικής διαχείρισης σχετικά με τους υπόγειους υδατικούς πόρους των παράκτιων υδροφόρων, ως την κύρια αιτία εμφάνισης του προβλήματος.

Στον ελλαδικό χώρο, όπου η έννοια της ορθολογικής διαχείρισης των υδατικών πόρων περιορίζεται μόνο στο θεωρητικό πλαίσιο της ισχύουσας νομοθεσίας, η εισχώρηση της θάλασσας στους παράκτιους υδροφόρους αποτελεί πλέον ένα μείζον περιβαλλοντικό ζήτημα (σχ. 4.2). Είναι γεγονός ότι διακυβεύονται άμεσα πλέον οι οικονομικές δραστηριότητες (γεωργικές, βιομηχανικές και αστικές) που σχετίζονται άμεσα με τη χρήση των υπόγειων υδατικών πόρων στις παράκτιες και νησιωτικές περιοχές της χώρας.



Σχήμα 4.2. Χάρτης με τις περιοχές διείσδυσης της θάλασσας στην Ελλάδα (από Υπουργείο Γεωργίας με τροποποίηση)

### 4.5.2. Ανατολική Μακεδονία και Θράκη

Σήμερα είναι πλέον διαπιστωμένο ότι η διείσδυση της θάλασσας λαμβάνει χώρα στις περιοχές (σχ. 4.3) των Δέλτα των ποταμών Έβρου, Λίσσου και Νέστου (Diamantis and Petalas, 1989), στην παράκτια περιοχή Ν. Ροδόπης μεταξύ Λιμνών Ισμαρίδας και Βισθωνίδας και στις παράκτιες περιοχές (του Δήμου Παγγαίου) της Νέας Περάμου (Diamantis and Petalas, 1989) και του Ορφανού (Πλιάκας κ.ά., 1999).

Στις περιοχές αυτές έχουν διεξαχθεί κατά περιόδους έρευνες που αφορούν στο υδρογεωλογικό καθεστώς των υπόγειων υδροφόρων συστημάτων τους από το Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Δημοκριτείου Πανεπιστημίου Θράκης (Δ.Π.Θ.) (Γκιουγκής κ.ά., 2009, Gkiougkis et al., 2010, Gkiougkis et al., 2011, Διαμαντής 1985, Διαμαντής κ.ά., 1990, Καλλιώρας 2008, Kallioras et al., 2006, Kallioras et al., 2010, Kallioras et al., 2011, Πεταλάς, 1997, Πλιάκας, 1998, Πλιάκας κ.ά., 1999, Pliakas et al., 2001, Pliakas et al., 2007a, 2007b, Pliakas et al., 2011). Τα αποτελέσματα των σχετικών αυτών υδρογεωλογικών και υδροχημικών ερευνών συνηγορούν στη διαπίστωση ότι σε παράκτια τμήματα των περιοχών μελέτης παρατηρείται έντονο το πρόβλημα της αλμύρισης τόσο των υπόγειων νερών από τη θαλάσσια διείσδυση όσο και των υπερκείμενων εδαφών που έχουν αλμυρίσει σε βαθμό πλέον τέτοιο που να εμφανίζονται πρώιμα σημεία ερημοποίησης.



Σχήμα 4.3. Περιοχές της Ανατολικής Μακεδονίας και Θράκης όπου έχει διερευνηθεί το πρόβλημα της διείσδυσης της θάλασσας σε υπόγεια υδροφόρα συστήματα παράκτιων πεδίων της (Πεταλάς κ.ά., 2002a).

#### 4.5.2.1. Παράκτιες περιοχές του Δήμου Παγγαίου του Ν. Καβάλας

Στις παράκτιες περιοχές του Ορφανού (Δημοτική Ενότητα-ΔΕ Ορφανού) και της Νέας Περάμου (ΔΕ Ελευθερών) του Δήμου Παγγαίου του Ν. Καβάλας (σχ. 4.4) έχουν διεξαχθεί συστηματικές έρευνες, που αφορούν στο υδρογεωλογικό καθεστώς υπόγειων υδροφόρων συστημάτων που αναπτύσσονται σε αυτά τα παράκτια πεδινά πεδία από το Εργαστήριο



Σχήμα 4.4. Περιοχές μελέτης του Δήμου Παγγαίου στο Ν. Καβάλας: [1] παράκτια περιοχή της ΔΕ Ορφανού, [2] παράκτια περιοχή Ν. Περάμου της ΔΕ Ελευθερών.

#### 1. Παράκτια περιοχή ΔΕ Ορφανού

(κύριες βιβλιογραφικές πηγές: Πεταλάς κ.ά., 2002α, Πλιάκας κ.ά., 1999)

Προς τα βόρεια της ευρύτερης περιοχής της ΔΕ Ορφανού υψώνεται ο ορεινός όγκος του Παγγαίου, προς τα ανατολικά βρίσκεται ο Ποταμός Στρυμόνας, που αποτελεί και το όριο του Ν. Καβάλας με το Ν. Σερρών και προς τα νότια η θάλασσα (κόλπος Ορφανού) (σχ. 4.4). Το γεωμορφολογικό ανάγλυφο της περιοχής μπορεί να θεωρηθεί γενικά ομαλό, χωρίς ιδιαίτερες εξάρσεις, με σταδιακή ταπείνωση από τα βόρεια προς τα νότια. Ένα μεγάλο τμήμα χαρακτηρίζεται ως παράκτιο. Διασχίζεται από μικρούς σχετικά χειμάρρους και ρέματα, καταλαμβάνοντας μια έκταση 104 km<sup>2</sup>. Το μεγαλύτερο τμήμα της έκτασης αυτής καταλαμβάνει η λεκάνη απορροής του χειμάρρου Ορφανίου (45 km<sup>2</sup>), και στη συνέχεια η λεκάνη απορροής του ρέματος Πηγαδούλι (25,2 km<sup>2</sup>). Τέλος το υπόλοιπο τμήμα καταλαμβάνεται από τη λεκάνη απορροής του ρέματος Ξεριά, δυτικά του Οφρυνίου (12,9 km<sup>2</sup>) και τις λεκάνες απορροής μικρορεμάτων συνολικής έκτασης 20,9 km<sup>2</sup>, που εντοπίζονται κύρια στη νότια λοφώδη έως ημιλοφώδη περιοχή.

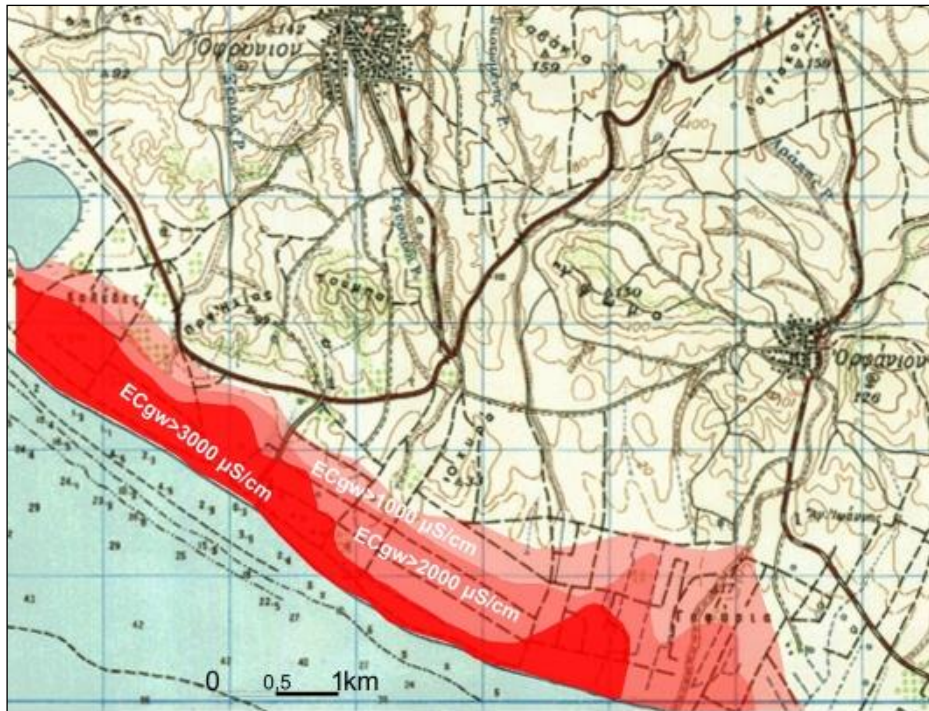
Οι καλλιεργήσιμες εκτάσεις για τους περισσότερους οικισμούς δεν διαφοροποιούνται από χρόνο σε χρόνο με ελάχιστες εξαιρέσεις, εξαιτίας του ανάγλυφου που δεν προσφέρεται

για περαιτέρω επέκταση των καλλιεργειών αλλά και των ελάχιστων επιπλέον διαθέσιμων προς εκμετάλλευση υδατικών πόρων. Το νερό της άρδευσης εξασφαλίζεται από μεμονωμένες βαθιές ιδιωτικές ή κρατικές γεωτρήσεις ή από επιφανειακά νερά (πρόχειρη μεταφορά από τον Ποταμό Στρυμόνα). Στους οικισμούς Ορφανίου και Οφρυνίου, το ποσοστό της αρδεύσιμης έκτασης προς τις συνολικά διαθέσιμες εκτάσεις προς καλλιέργεια είναι 50% έως 80%. Τα σιτηρά καταλαμβάνουν ένα μεγάλο ποσοστό της καλλιεργούμενης έκτασης (έως και 36%), που σημαίνει ότι οι διαθέσιμοι υδατικοί πόροι δεν επαρκούν για την καλλιέργεια υδροβόρων ειδών. Οι δενδρώδεις καλλιέργειες (25–64%), με κύριο είδος τις αμυγδαλιές, κυριαρχούν σχεδόν σε όλες τις κοινότητες της περιοχής. Επίσης η άμπελος καταλαμβάνει ένα σημαντικό ποσοστό (έως 32%) και θεωρείται το προϊόν με τις περισσότερες οικονομικές απολαβές για την περιοχή. Τα υπόλοιπα είδη όπως μποστανικά, πατάτες, κηπευτικά κ.λ.π. συνολικά καταλαμβάνουν ένα πολύ μικρό ποσοστό που εκτιμάται κάτω του 5%.

Οι κύριοι γεωλογικοί σχηματισμοί της περιοχής, που ενδιαφέρει η υδρογεωλογική τους συμπεριφορά, είναι οι τεταρτογενείς αποθέσεις, που διακρίνονται:

- στις ποταμοχειμάρριες παλαιοτεταρτογενείς και πρόσφατες αποθέσεις (με κατά θέσεις πλούσιο ως μέσου δυναμικού φρεάτιο ή μερικώς υπό πίεση υδροφόρο και με παροχές περί τα 150 m<sup>3</sup>/h, στις ευρύτερες περιοχές των χειμάρρων δυτικά και σε μικρή απόσταση ανατολικά του Ορφανίου, ενώ πλέον ανατολικά του Ορφανίου, δυτικά της Κάριανης, οι παροχές περιορίζονται σε 20-30 m<sup>3</sup>/h), καθώς και
- στις πρόσφατες παράκτιες αποθέσεις που εντοπίζονται σε μια παραλιακή ζώνη, πλάτους που δεν υπερβαίνει κατά μέσο όρο τα 2 km, με εξασφάλιση της τροφοδοσίας τους από τα νερά της βροχής και έμμεσα από διηθήσεις των νερών των χειμάρρων, μόνο όμως κατά τους χειμερινούς μήνες τότε που αυτά μπορούν να φτάσουν μέχρι τη θάλασσα.

Η πιεζομετρική επιφάνεια της υπόγειας υδροφορίας της περιοχής εμφανίζει μεγάλες κλίσεις, δυτικά του Ορφανίου και μικρές κλίσεις Ν και ΝΔ του Ορφανίου, ενώ διακρίνονται προνομιακοί άξονες συγκλίνουσας και αποκλίνουσας ροής με τελική κατεύθυνση τη θάλασσα. Ορισμένοι υπόγειοι άξονες αποκλίνουσας ροής δημιουργούνται σε θέσεις τροφοδοσίας από διηθήσεις της επιφανειακής απορροής. Αξίζει να αναφερθεί ιδιαίτερα ότι η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα βρίσκεται κάτω από το υψόμετρο της επιφάνειας της θάλασσας για τη μεγαλύτερη έκταση της παράκτιας περιοχής. Αυτό παρατηρείται για όλες τις εποχές του χρόνου, που σημαίνει ότι με την παρατηρούμενη υπεράντληση των υπόγειων νερών και τον αισθητό περιορισμό των διηθούμενων ποσοτήτων από την έλλειψη επαρκών ποσοτήτων νερού στις κοίτες των χειμάρρων λόγω περιορισμού των βροχοπτώσεων κατά τις τελευταίες δεκαετίες, μπορεί εύκολα να συνεχιστεί με γρηγορότερους ρυθμούς η υφαλμύριση των υπόγειων νερών της περιοχής (σχ. 4.5).

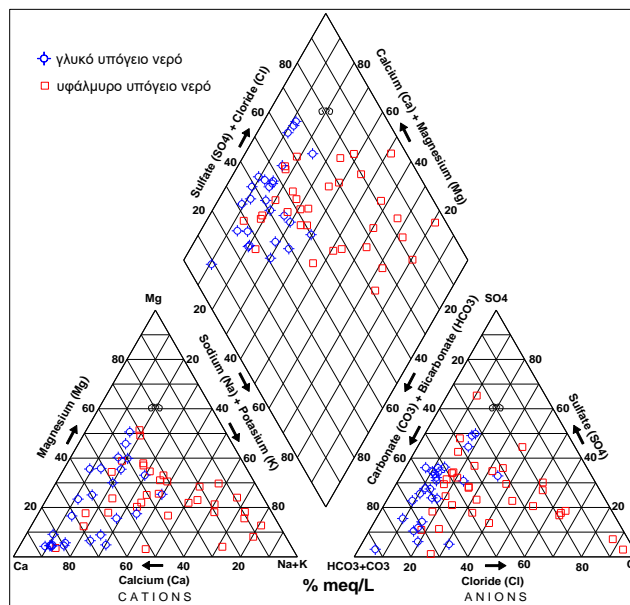


Σχήμα 4.5. Κατανομή ενδεικτικών τιμών ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC<sub>gw</sub>) του ελεύθερου έως μερικώς υπό πίεση υδροφόρου της παράκτιας περιοχής της ΔΕ Ορφανού (Ιούλιος 1998) (Πλιάκας κ.ά., 1999).

Τα υδροχημικά χαρακτηριστικά των υπόγειων νερών της περιοχής δίνονται στο διάγραμμα Piper του σχήματος 4.6, το οποίο στηρίχθηκε στα δεδομένα 59 χημικών αναλύσεων (Πεταλάς, κ.ά., 2002a). Η ανταλλαγή των ιόντων  $\text{Ca}^{2+}$  και  $\text{Na}^+$  ανάμεσα στο υλικό του υδροφόρου και στο διεισδύον θαλάσσιο νερό χαρακτηρίζει μεγάλο αριθμό δειγμάτων και συνεχίζεται στο διεισδύον νερό μέχρι τον κορεσμό των ιζημάτων του υδροφόρου σε  $\text{Na}^+$ , μετά τον οποίο δεν παρατηρείται πρόσθετη απελευθέρωση ασβεστίου από το υλικό του υδροφόρου (Monterey County Flood & Water Conservation District, 1989). Η εικόνα και εδώ θα ήταν πιο σαφής, αν υπήρχαν δεδομένα από γεωτρήσεις κοντά στην ακτή. Στο μεγαλύτερο μέρος των δειγμάτων η ανθρακική σκληρότητα υπερβαίνει το 50%, ενώ στα δείγματα που η σύσταση πλησιάζει αυτή του θαλάσσιου νερού (δεξιά γωνία του ρόμβου) τα μη ανθρακικά αλκάλια υπερβαίνουν το 50%.

Η σχέση κατά βάρος  $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ , που είναι 3,26 στα υφάλμυρα νερά (0,3 στο νερό της θάλασσας) και 12,30 στα γλυκά υπόγεια νερά της περιοχής, ενισχύει την άποψη για ύπαρξη θαλάσσιας διείσδυσης.





Σχήμα 4.6. Διάγραμμα Piper βασισμένο σε χημικές αναλύσεις 42 δειγμάτων υπόγειου νερού από την περιοχή έρευνας (Πεταλάς κ.ά., 2002a).

## 2. Παράκτια περιοχή ΔΕ Ελευθερών

(κύριες βιβλιογραφικές πηγές: Pliakas et al., 2007a, Pliakas et al., 2011)

Η ευρύτερη υδρολογική λεκάνη της περιοχής Ν. Περάμου της ΔΕ Ελευθερών περιβάλλεται από το Σύμβολο όρος (βόρειο, δυτικό και νότιο όριο), γεγονός που συμβάλλει στη γεωλογία της περιοχής, ενώ το ανατολικό όριο καταλήγει στο Αιγαίο πέλαγος (σχ. 4.4). Η έκταση της περιοχής έρευνας είναι περί τα 20 km<sup>2</sup> όπου βρίσκονται μικροί οικισμοί με μικρούς πληθυσμούς που αυξάνονται το καλοκαίρι λόγω τουριστικής δραστηριότητας. Η γεωμορφολογία της περιοχής χαρακτηρίζεται ως επίπεδη με υψόμετρα μέχρι περίπου 20 m, ενώ ο χείμαρρος Ελευθερών αποτελεί τον κυριότερο χείμαρρο της περιοχής με ροή από ΒΔ προς ΝΑ. Οι κύριες καλλιεργητικές δραστηριότητες με τους αμπελώνες, τους οπωρώνες και τα ελαιόδεντρα συμβάλλουν σημαντικά στην τοπική οικονομία.

Το υπόγειο υδροφόρο σύστημα περιλαμβάνει ένα υπερκείμενο στρώμα τεταρτογενών και αλλουβιακών αποθέσεων, βάθους μέχρι 20 m και τον υποκείμενο μεταμορφωμένο σχηματισμό του σχιστοφυή γρανιοδορίτη. Η υδρογεωλογική έρευνα εντοπίζεται στον υπερκείμενο ελεύθερο πορώδη υδροφόρο, όπου συντελείται η διαδικασία της θαλάσσιας διείσδυσης.

Στην περιοχή έρευνας υπάρχει ένα πυκνό δίκτυο υδρογεωτρήσεων, οι οποίες μπορούν να διακριθούν σε τρεις κατηγορίες ανάλογα με το βάθος τους και συνεπώς ανάλογα με την εκμετάλλευση συγκεκριμένων υδροφόρων στα αντίστοιχα βάθη (GEOSERVICE, 2000, Pliakas et al., 2007a):

- ρηχές γεωτρήσεις που αντλούν από τον ελεύθερο υδροφόρο μόνο,

- βαθιές γεωτρήσεις που αντλούν αποκλειστικά από τον υποκείμενο υπό πίεση υδροφόρο στο γρανιοδορίτη και
- βαθιές γεωτρήσεις που έχουν φίλτρα και στους δυο τύπους υδροφόρων και αντλούν και από τους δύο.

Ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά των ερευνών που έχουν κατά καιρούς διεξαχθεί κυρίως από το Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Δ.Π.Θ., είναι τα θετικά υψόμετρα της στάθμης του υπόγειου νερού στον ελεύθερο υδροφόρο που μελετάται. Αυτό το φαινόμενο ενεργεί ως ένα μέτρο αντιμετώπισης της παρουσίας των συνθηκών ενεργής θαλάσσιας διείσδυσης στην παράκτια γραμμή, εμποδίζοντας το συνεχή εμπλουτισμό του υδροφόρου από τη θάλασσα. Θα πρέπει να επισημανθεί ότι παρατηρείται μείωση της στάθμης του υπόγειου νερού περί τα 2 m στους παράκτιους άξονες του υδροφόρου, γεγονός που οφείλεται στις συνθήκες άντλησης για την κάλυψη των αρδευτικών αναγκών.

Σχετική υδρογεωλογική έρευνα έχει περιλάβει τη διερεύνηση ποιοτικών χαρακτήρων του υπόγειου νερού με τη διεξαγωγή ανάλογων χημικών αναλύσεων δειγμάτων νερού από 15 επιλεγμένες γεωτρήσεις παρακολούθησης και με επί τόπου μετρήσεις της ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC), του pH και της θερμοκρασίας. Η δειγματοληψία έγινε στις 15-7-2006 και επακολούθησαν χημικές αναλύσεις και σχετική επεξεργασία από το Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Δ.Π.Θ. Τα χημικά στοιχεία και παράμετροι που ερευνήθηκαν ήταν:  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ , αλκαλικότητα M and ολική σκληρότητα (Πίνακας 4.2).

Στον Πίνακα 4.2, το νερό των γεωτρήσεων F053, F108A, E109, E05 και E03 εμφανίζεται πιο ρυπασμένο από των υπολοίπων, αφού παρουσιάζουν μεγάλες συγκεντρώσεις χλωριόντων  $\text{Cl}^-$  (με bold στον πίνακα), γεγονός που οφείλεται στη θαλάσσια διείσδυση. Σχετικά με την ηλεκτρική αγωγιμότητα EC, τα δείγματα των F53, F108A και E108 παρουσίασαν τιμές μεγαλύτερες των 1500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , γεγονός που αποδίδεται επίσης στη θαλάσσια διείσδυση. Πρέπει να επισημανθεί ότι οι θέσεις των γεωτρήσεων αυτών εντοπίζονται κατά μήκος του κύριου άξονα υπόγειας αποστράγγισης του ελεύθερου υδροφόρου, διεύθυνσης Δ-Α.

Σύμφωνα με τα σταθερότυπα πόσιμου νερού (Καλλέργης, 2000) το νερό των δειγμάτων παρουσιάζεται να έχει καλά ποιοτικά χαρακτηριστικά, με εξαίρεση αυτό των δειγμάτων των γεωτρήσεων E102, E123, F108A, E109, E05 και E03, που εντοπίζονται στην παράκτια ζώνη. Οι τελευταίες παρουσιάζουν τιμές Revelle μεταξύ 1 και 2, γεγονός που δείχνει ότι τα δείγματα νερού των γεωτρήσεων αυτών έχουν ρυπανθεί ελαφρά από θαλάσσια διείσδυση, σύμφωνα με σχετική διαβάθμιση αξιολόγησης ρύπανσης από θαλάσσια διείσδυση με βάση τις τιμές του συντελεστή Revelle (Καλλέργης, 2000).

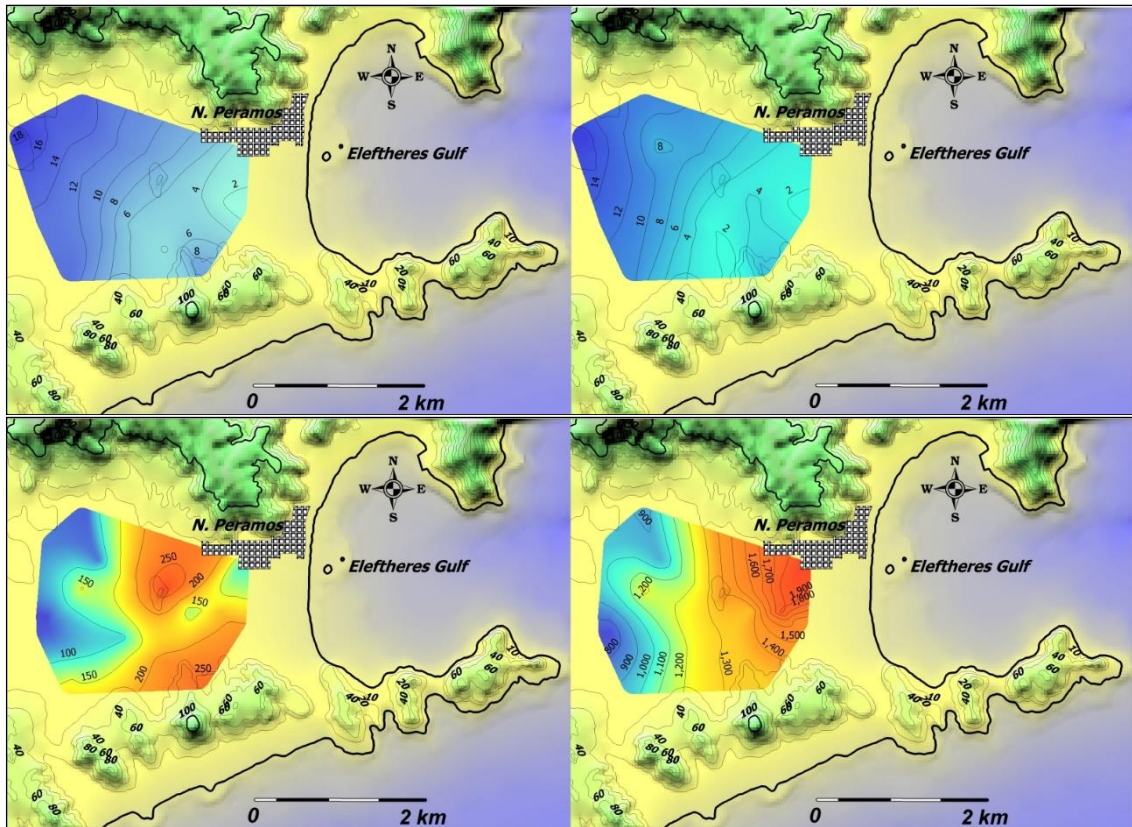
Πίνακας 4.2. Ποιοτικά χαρακτηριστικά δειγμάτων νερού από γεωτρήσεις της περιοχής έρευνας (δειγματοληψία: 15/07/2006) (Pliakas at al., 2007a με τροποποιήσεις).

γεώτρηση	Ca <sup>2+</sup> (mg/L)	Mg <sup>2+</sup> (mg/L)	Na <sup>+</sup> (mg/L)	K <sup>+</sup> (mg/L)	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/L)	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	Cl <sup>-</sup> (mg/L)	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/L)	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)
E28	82,56	3,89	53	3,1	0,882	242,78	65,60	212,5	45,0
E102	75,35	14,09	84	3,0	0,345	235,46	154,25	130,0	14,0
E105	84,97	25,76	50	6,5	0,427	256,20	51,42	192,5	14,0
E106	64,93	34,02	53	1,6	0,393	218,38	56,74	318,5	7,0
E123	57,72	18,95	105	3,5	0,243	241,56	156,02	69,7	1,0
E121	89,78	58,32	65	2,0	0,652	301,34	92,20	279,5	23,0
E035	71,34	50,54	46	3,8	0,196	235,46	67,37	193,5	65,0
E113	92,99	35,48	42	4,2	0,223	172,02	58,51	182,0	75,0
F53	87,37	61,72	103	1,7	1,910	417,24	<b>187,94</b>	421,0	21,0
F108A	68,14	46,66	155	3,7	0,598	326,96	<b>198,58</b>	308,0	2,0
PUMP01	165,93	18,95	86	2,5	0,430	279,38	129,43	278,0	80,0
E109	59,32	15,55	200	9,8	0,221	281,82	<b>289,00</b>	3,0	1,0
E05	64,93	28,19	170	7,5	0,192	281,82	<b>223,40</b>	16,0	4,0
E03	52,91	18,47	180	8,3	0,202	291,58	<b>251,77</b>	1,0	3,0
E108	108,22	51,03	210	3,8	0,292	196,42	111,70	57,5	15,0

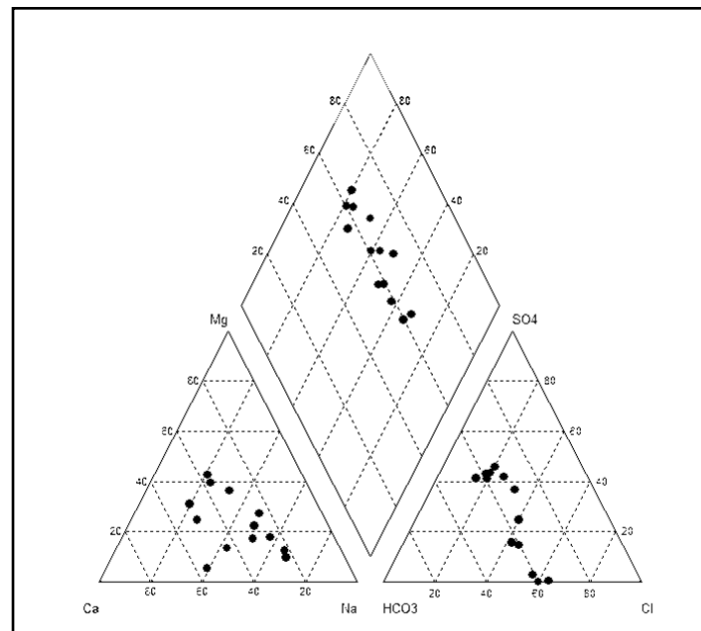
  

γεώτρηση	Mn <sup>2+</sup> (mg/L)	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> (mg/L)	Fe <sup>2+</sup> (mg/L)	T (°C)	pH	EC (μS/cm)	Αλκαλ. M	Ολ. Σκληρ. (°F)	Revelle
E28	2,4	0,32	0,304	17,1	8,03	908	3,98	22,2	0,465
E102	0,5	0,58	0,460	18,1	7,32	1234	3,86	24,6	<b>1,128</b>
E105	0,3	1,32	0,045	16,2	7,43	824	4,20	31,8	0,345
E106	1,4	0,68	0,660	17,6	7,25	738	3,58	2,2	0,447
E123	0,3	0,86	0,422	20,5	7,34	947	3,96	22,2	<b>1,112</b>
E121	0,6	0,57	0,098	18,3	8,18	1205	4,94	46,4	0,527
E035	0,1	0,92	0,023	17,8	7,25	945	3,86	38,6	0,492
E113	0,4	0,90	0,090	16,2	6,66	895	2,82	37,8	0,585
F53	0,4	1,29	0,019	18,4	7,26	<b>1920</b>	6,84	47,2	0,775
F108A	1,1	0,45	0,127	18,0	7,30	<b>1550</b>	5,36	36,2	<b>1,045</b>
PUMP01	0,3	0,70	0,023	18,2	6,78	1330	4,58	33,6	0,797
E109	0,4	0,96	0,027	25,4	7,27	1435	4,62	21,2	<b>1,765</b>
E05	0,2	0,76	0,091	23,2	7,75	1310	4,62	27,8	<b>1,364</b>
E03	0,4	0,67	0,043	23,9	7,34	1305	4,78	20,8	<b>1,486</b>
E108	0,5	0,54	0,121	20,0	7,11	<b>2050</b>	3,22	48,0	0,979

Στα σχήματα 4.7 παρουσιάζονται χάρτες κατανομής συγκέντρωσης χλωριόντων Cl<sup>-</sup> (mg/L) στον ελεύθερο υδροφόρο της περιοχής έρευνας και κατανομής των τιμών ηλεκτρικής αγωγιμότητας EC (μS/cm), αντίστοιχα. Στον τελευταίο χάρτη διαφαίνεται ότι ο κύριος άξονας αλμύρισης του υπόγειου νερού εμφανίζεται σε διεύθυνση ΒΑ-ΝΔ, όπου οι τιμές EC είναι μεγαλύτερες από 1500 μS/cm. Το σχήμα 4.8 παρουσιάζει ένα διάγραμμα Piper των δειγμάτων νερού της περιοχής έρευνας, όπου διαφαίνεται ότι το νερό των δειγμάτων αποτελεί κυρίως αναμεμιγμένο υπόγειο νερό με χαρακτηριστική την ανταλλαγή κατιόντων εξαιτίας των συνθηκών θαλάσσιας διείσδυσης.



Σχήμα 4.7. Επάνω: Πιεζομετρικοί χάρτες (αριστερά: Μάιος 2006, δεξιά: Οκτώβριος 2006). Κάτω αριστερά: χάρτης κατανομής τιμών συγκέντρωσης ιόντων χλωρίου Cl<sup>-</sup> (mg/L) (15/07/2006), κάτω δεξιά: χάρτης κατανομής τιμών ηλεκτρικής αγωγιμότητας EC (μS/cm) (15/07/2006) (Pliakas et al., 2007a, Pliakas et al., 2011).



Σχήμα 4.8. Διάγραμμα Piper με βάση τις χημικές αναλύσεις δειγμάτων νερού από γεωτρήσεις της περιοχής έρευνας (δειγματοληψία: 15/07/2006) (Pliakas et al., 2007a).

#### 4.5.2.2 Ανατολικό Δέλτα του Ποταμού Νέστου

(κύριες βιβλιογραφικές πηγές: Γκιουγκής κ.ά., 2009, Gkiouγκis et al., 2010)

Η περιοχή έρευνας εντοπίζεται σε ένα σύνολο πρόσφατων ιζημάτων, που προέκυψαν κυρίως από τις αποθέσεις του Ποταμού Νέστου (σχ. 4.9). Χαρακτηριστικό της περιοχής είναι γενικά οι μικρές κλίσεις και η διαμόρφωση προς τα νότια και ΝΑ αβαθών τμημάτων, που δημιουργούν κατά καιρούς λιμνάζουσες επιφάνειες που εντοπίζονται μόνο λίγες στη νοτιοανατολική περιοχή και αποτελούν μέρος των φυσικών βιότοπων του Δέλτα του Π. Νέστου. Στα ανατολικά όρια του Δέλτα διέρχεται με διεύθυνση Β-Ν ο χείμαρρος Λασπίας ο οποίος δέχεται επιβαρυνμένα νερά από εργοστάσια και την εκροή της Εγκατάστασης Επεξεργασίας Λυμάτων-ΕΕΛ Ξάνθης.

Η πεδιάδα Νέστου (ανατολική, δυτική) υπάγεται στις προστατευόμενες περιοχές από τη συνθήκη RAMSAR και έχει γίνει η οριοθέτησή της (ΦΕΚ 854/Β/16-9-96). Το ανατολικό τμήμα του δέλτα του ποταμού κατέχει συνολική έκταση περίπου 176.400 στρέμματα από τα οποία καλλιεργούνται τα 106.630 στρέμματα, δηλαδή μόνο το 60%. Από τις καλλιεργήσιμες εκτάσεις αρδεύονται (από τα νερά του Νέστου και από γεωτρήσεις) μόνο τα 89.893 στρέμματα (δηλαδή μόλις το 51% της συνολικής έκτασης) και από αυτά μάλιστα ένα μέρος πλημμελώς, λόγω της συνεχούς επιβάρυνσης των υπόγειων νερών και των εδαφών. Κύριες καλλιέργειες είναι ο αραβόσιτος, που καταλαμβάνει πάνω από 50% των καλλιεργήσιμων εδαφών και ακολουθούν τα σιτηρά, η μηδική, τα σακχαρότευτλα, τα κηπευτικά, η βιομηχανική ντομάτα, το βαμβάκι, η σόγια και τα καπνά.



Σχήμα 4.9. Γεωγραφική θέση της περιοχής έρευνας στο πεδινό τμήμα του ανατολικού Δέλτα του Π. Νέστου (Γκιουγκής κ.ά., 2009).

Από σχετικές έρευνες στην περιοχή (Σακκάς κ.ά., 1998, Pliakas et al., 2001) προκύπτει ότι στο βόρειο τμήμα της περιοχής έρευνας, μέχρι το βάθος των 30 m, επικρατούν εναλλαγές άμμων και αργίλων με επικράτηση των άμμων. Στη συνέχεια παρεμβάλλεται ένα στρώμα μαργαϊκού υλικού, πάχους πάνω από 50 m και ακολουθούν και πάλι εναλλαγές στρώσεων αργίλων και άμμων. Στο κεντρικό τμήμα της περιοχής, επιφανειακά, επικρατούν μέχρι τα 60 m αργιλικά υλικά (με εξαίρεση τα πρώτα 2 m) και στη συνέχεια μέχρι τα 115 m και πάλι άργιλος αλλά με την παρουσία άμμου και χαλικιών, ενώ τα καθαρά υδροφόρα στρώματα είναι ελάχιστα και εντοπίζονται από τα 115 m και κάτω. Προς τα νότια επικρατούν τα περατά υλικά με εναλλαγές ποταμοχειμάρριων και θαλάσσιων αποθέσεων.

Οι αλλουβιακές αποθέσεις της περιοχής διακρίνονται ανάλογα με την υδρογεωλογική τους συμπεριφορά, σε δύο ευδιάκριτες υδροαποθεματικές ζώνες, στα αβαθή μερικώς υπό πίεση υδροφόρα στρώματα, που εντοπίζονται μέχρι ένα βάθος περίπου 30 m και στα επάλληλα υπό πίεση βαθιά, που φτάνουν σε βάθος τουλάχιστον μέχρι τα 190 m περίπου. Το πρώτο υδροφόρο σύστημα (αβαθής υδροφορία) δέχεται τροφοδοσία κυρίως από τις κατεισδύσεις από τις βροχοπτώσεις που πέφτουν στο ανάπτυσμα της περιοχής και ελάχιστα από τις διηθήσεις των επιφανειακών νερών της ανάντη λοφώδους περιοχής. Τα αβαθή υδροφόρα της περιοχής, κατά την προηγούμενη δεκαετία, αντλούνταν από ένα μεγάλο αριθμό αβαθών γεωτρήσεων μικρής διαμέτρου, βάθους μέχρι 15 m. Σήμερα ελάχιστες από αυτές λειτουργούν και έχουν αντικατασταθεί στην περιοχή του Δεκάρχου με βαθύτερες μέχρι 50 m. Το δεύτερο υδροφόρο σύστημα (βαθιά υδροφορία) τροφοδοτείται κύρια από τις διηθήσεις του Νέστου μέσα από παλαιογεωγραφικούς άξονες υπόγειας απορροής (παλιές κοίτες) και ένα μέρος από τις πλευρικές μεταγίσεις από τα υδροφόρα της παρακείμενης λεκάνης της Λιμνοθάλασσας Βιστωνίδας. Η κύρια περιοχή έρευνας αντλείται από βαθιές γεωτρήσεις, που το βάθος τους φτάνει τα 200 m. Από προηγούμενη υδρογεωλογική έρευνα στην περιοχή (Σακκάς, et al., 1998) προέκυψε ο συντελεστής μεταβιβασιμότητας (T) καταλαμβάνει ένα ευρύ φάσμα τιμών από  $4,0 \times 10^{-4}$  έως  $1,1 \times 10^{-2}$  m<sup>2</sup>/sec, ενώ οι τιμές του συντελεστή υδροχωρητικότητας (S) κυμαίνονται στο  $10^{-3}$  έως και μικρότερες κατά θέσεις, ενώ η διακύμανσή τους αντιστοιχεί σε υπό πίεση (κυρίως στα δυτικά της περιοχής) και κατά τόπους ημιελεύθερα υδροφόρα στρώματα.

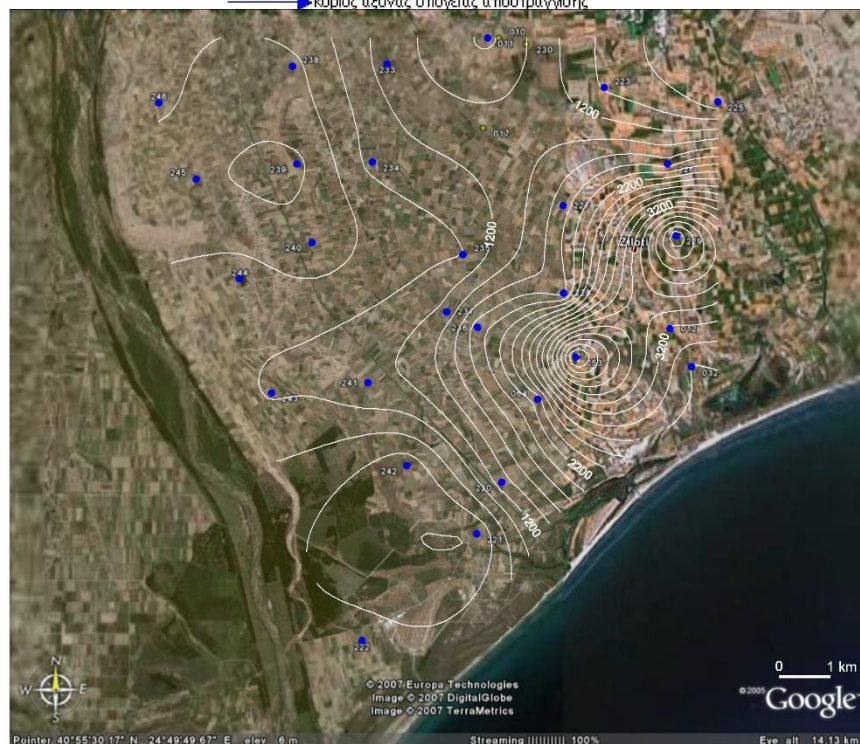
Από την επεξεργασία των σχετικών πιεζομετρικών χαρτών (σχ. 4.10, 4.11) προκύπτει ότι η κύρια υπόγεια τροφοδοσία συντελείται κυρίως από τη βόρεια περιοχή και ειδικά στην περίπτωση του υπερκείμενου ελεύθερου υδροφόρου κατά μήκος ενός άξονα υπόγειου εμπλουτισμού που διατρέχει το δυτικό όριο της περιοχής έρευνας.

Στο πλαίσιο υδρογεωλογικής έρευνας στην περιοχή επιλέχθηκε δίκτυο 32 γεωτρήσεων στις οποίες έγιναν μετρήσεις pH, θερμοκρασίας και ηλεκτραγωγιμότητας επιτόπου, όπως και δειγματοληψία νερού για χημική ανάλυση στο Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Δ.Π.Θ. (σχ. 4.10, 4.11). Παράμετροι που εξετάστηκαν είναι οι εξής: Na, K, Ca, Mg, Fe, Zn, Mn, NH<sub>4</sub>, Cl, HCO<sub>3</sub>, SO<sub>4</sub>, PO<sub>4</sub>, NO<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, αλκαλικότητα P, αλκαλικότητα M, σκληρότητα (παροδική, μόνιμη, ολική), pH, ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC).

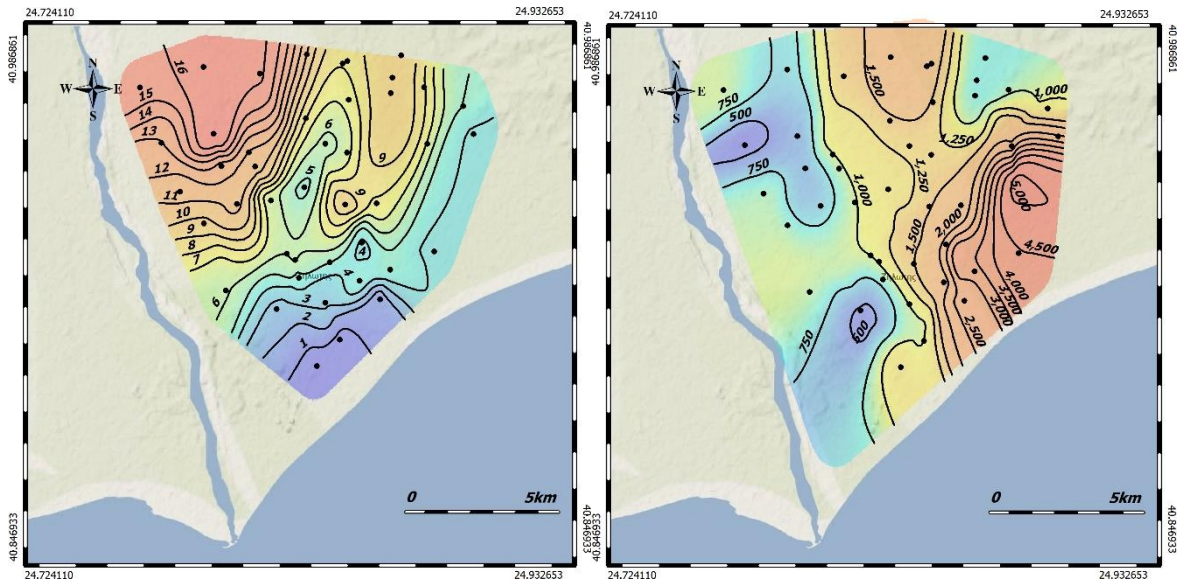


◆ γεώτρηση παρακολούθησης — — ► κύριος άξονας υπόγειας τροφοδοσίας  
 ► κύριος άξονας υπόγειας απεστράγγισης

11-10-2007



Σχήμα 4.10. Επάνω: Πιεζομετρικός χάρτης του ελεύθερου υπόγειου υδροφόρου συστήματος της περιοχής έρευνας (11/10/2007). Κάτω: Χάρτης με την κατανομή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας EC ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) του ελεύθερου υδροφόρου της περιοχής έρευνας (27/7/2007) (Γκιουγκής κ.ά., 2009).



Σχήμα 4.11. Αριστερά: πιεζομετρικός χάρτης (Απρίλιος 2009) Δεξιά: Χάρτης με την κατανομή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας EC ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) του υπόγειου υδροφόρου συστήματος (Ιούλιος 2009) (Gkioungkis et al., 2010).

Από τους χάρτες κατανομής της ηλεκτρικής αγωγιμότητας των σχημάτων 4.10 και 4.11 προκύπτει ότι οι μεγαλύτερες τιμές ( $> 4000 \mu\text{S}/\text{cm}$ ) εντοπίζονται στην ευρύτερη περιοχή του νότιου και ανατολικού τμήματος της περιοχής έρευνας. Επίσης παρατηρείται σημαντική πτώση των τιμών προς την περιοχή που γειτνιάζει με τον ποταμό Νέστο. Άξια επισήμανσης είναι η διαπίστωση των επιβαρυνμένων τιμών σχεδόν όλων των ποιοτικών χαρακτηριστικών στις ίδιες περιοχές.

Από τις χημικές αναλύσεις που πραγματοποιήθηκαν εξάγεται το συμπέρασμα ότι το σύνολο των δειγμάτων νερών που αναλύθηκαν κρίνονται ακατάλληλα προς πόση αφού δεν εντοπίστηκε ούτε ένα δείγμα το οποίο να έχει όλες τις συγκεντρώσεις των στοιχείων που μετρήθηκαν εντός των αποδεκτών ορίων.

Στο πλαίσιο της διερεύνησης της καταλληλότητας του υπόγειου νερού της περιοχής έρευνας για άρδευση και για πόση από οικόσιτα ζώα ακολουθούν οι κατατάξεις (Γκιουγκής κ.ά., 2009):

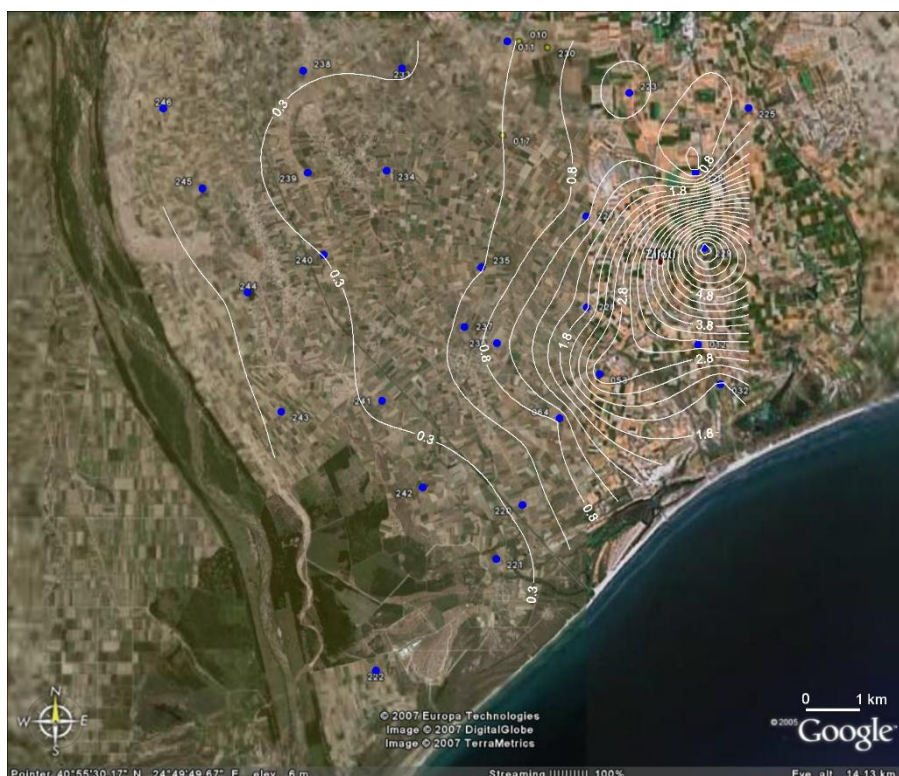
- Κατάταξη των δειγμάτων νερού της περιοχής έρευνας κατά Ayers (1975). Στο μεγαλύτερο ποσοστό των δειγμάτων για την επίδραση της αλατότητας στην καρποφορία κατατάσσεται στην κατηγορία των αυξανόμενων προβλημάτων ενώ υπάρχουν και δείγματα τα οποία ελήφθησαν από συγκεκριμένες γεωτρήσεις στις οποίες η επίδραση της αλατότητας στην καρποφορία κατατάσσεται στην κατηγορία των σοβαρών προβλημάτων.
- Κατάταξη των δειγμάτων νερού της περιοχής έρευνας κατά Richards (1954). Το σύνολο των δειγμάτων του νερού κατατάσσεται σε μέτρια αλατότητα (7 στις 32 γεωτρήσεις), υψηλές αλατότητες (18 στις 32 γεωτρήσεις), πολύ υψηλές αλατότητες (6 στις 32 γεωτρήσεις) και αλατότητες πέρα από το ανώτατο όριο των πολύ υψηλών αλατοτήτων εντοπίστηκε σε μία γεώτρηση.



- Κατάταξη των δειγμάτων νερού της περιοχής έρευνας με βάση τις συγκεντρώσεις νατρίου (Na), που κυμαίνονται από 19,23 mg/L έως 742,17 mg/L, και κατατάσσουν το νερό 10 γεωτρήσεων στην κατηγορία 'κανένα πρόβλημα', 22 γεωτρήσεων στην κατηγορία των αυξανόμενων προβλημάτων.
- Κατάταξη των δειγμάτων νερού της περιοχής έρευνας με βάση τις συγκεντρώσεις χλωρίου (Cl). Οι συγκεντρώσεις Cl κυμαίνονται από 10,64 mg/L έως 1134,72 mg/L, και κατατάσσουν το νερό 19 γεωτρήσεων στην κατηγορία 'κανένα πρόβλημα', 6 γεωτρήσεων στην κατηγορία των αυξανόμενων προβλημάτων και 7 γεωτρήσεων στην κατηγορία των σοβαρών προβλημάτων.
- Κατάταξη των δειγμάτων νερού της περιοχής έρευνας με βάση τις συγκεντρώσεις όξινων ανθρακικών ιόντων ( $\text{HCO}_3$ ). Οι συγκεντρώσεις  $\text{HCO}_3$  κυμαίνονται από 114,68 mg/L έως 751,52 mg/L, και κατατάσσουν το νερό καμίας γεώτρησης στην κατηγορία 'κανένα πρόβλημα', 29 γεωτρήσεων στην κατηγορία των αυξανόμενων προβλημάτων και 3 γεωτρήσεων στην κατηγορία των σοβαρών προβλημάτων.
- Χαρακτηρισμός των δειγμάτων νερού της περιοχής έρευνας με βάση τις τιμές των κριτηρίων %E.sp (ή %Na) και ειδικής αγωγιμότητας κατά Wilcox (1955). Σύμφωνα με το κριτήριο του Wilcox η ποιότητα του νερού 7 γεωτρήσεων κατατάσσεται ως 'Καλό', 16 γεωτρήσεων ως 'Αποδεκτό', 6 γεωτρήσεων ως 'Αμφίβολη' και 3 γεωτρήσεων ως 'Ακατάλληλη'.
- Στην περιοχή έρευνας το TDS κυμαίνεται από 265,2 mg/L έως 3087,5 mg/L. Τιμές TDS >3000 mg/L μετρήθηκαν στο νερό μόλις μιας γεώτρησης. Σύμφωνα με τα παραπάνω κριτήρια το σύνολο των δειγμάτων του νερού κρίνεται κατάλληλο για το 'πότισμα' όλων των οικόσπιτων ζώων.

Από τα παραπάνω προκύπτει το συμπέρασμα ότι το σύνολο των δειγμάτων νερού της περιοχής έρευνας χαρακτηρίζεται ως προβληματικό. Στο τμήμα της περιοχής έρευνας που εμπλουτίζεται από τον Ποταμό Νέστο και παρακείμενη αρδευτική τάφρο, τα νερά χαρακτηρίζονται από καλά έως αποδεκτά, ενώ στην υπόλοιπη περιοχή χαρακτηρίζονται από αμφίβολα έως ακατάλληλα.

Με βάση τις τιμές του δείκτη Revelle (R) του υπόγειου υδροφόρου συστήματος της περιοχής έρευνας, το νερό στις βαθιές γεωτρήσεις χαρακτηρίζεται ελαφρά έως μέτρια ρυπασμένο ( $R=0,52-3,15$ ), ενώ στις επιφανειακές γεωτρήσεις που γειτνιάζουν με τη θάλασσα χαρακτηρίζεται ελαφρά έως μέτρια ρυπασμένο ( $R=0,08-5,94$ ) με εξαίρεση τη γεώτρηση 229 ( $R=6,61$ ) που παρουσιάζεται σοβαρά ρυπασμένο (σχ. 4.12).



Σχήμα 4.12. Χάρτης με την κατανομή του δείκτη Revellé (R) του ελεύθερου υδροφόρου της περιοχής έρευνας (27/7/2007) (Γκιουγκής κ.ά., 2009).

#### 4.5.2.3. Πεδινή παράκτια περιοχή Ξυλαγανής-Ιμέρου του Ν. Ροδόπης

(κύριες βιβλιογραφικές πηγές: Kallioras et al., 2011, Pliakas et al., 2007b)

Η ευρύτερη περιοχή Ξυλαγανής - Ιμέρου του Ν. Ροδόπης ταυτίζεται με ένα από τα πεδινά τμήματα, που εντοπίζονται στις ευρύτερες κοίτες του Λίσσου Ποταμού και των παραποτάμων του, δηλαδή αποτελεί μέρος του προσχωματικού πεδίου του ποταμού (σχ. 4.16). Χαρακτηριστικό του πεδινού τμήματος είναι η ήπια μορφολογία με τις ήπιες κλίσεις και ιδιαίτερα τα χαμηλά υψόμετρα. Τα υψόμετρα του πεδινού τμήματος, της περιοχής ενδιαφέροντος, ξεκινούν στο βορειότερο σημείο από τα +8 m περίπου και καταλήγουν στο ύψος του Ιμέρου περίπου στα +20 cm. Πρόκειται δηλαδή για χαμηλά υψόμετρα τα οποία κατά το παρελθόν ευνοούσαν τη συνεχή είσοδο της θάλασσας σε ένα μεγάλο βάθος από την ακτή. Το μήκος του άξονα της αλμυρής σφήνας ξεπερνά εδώ τα 10 km. Σύμφωνα με τις παρατηρήσεις της περιόδου 1954 - 2005, η μέση ετήσια βροχόπτωση της περιόδου, υπολογίζεται στα 554,9 mm.

Από υδρογεωλογικής πλευράς σχετικό ενδιαφέρον παρουσιάζουν τόσο οι πρόσφατες αποθέσεις όσο και οι πλειοπλειστοκαινικές στις οποίες μέσα στα αδρόκοκκα υλικά τους σχηματίζονται τοπικοί υδροφόροι ικανοποιητικής υδροφορίας. Οι γεωτρήσεις στους σχηματισμούς αυτούς, που αριθμούν περίπου τις 20, έχουν μέσο βάθος 70 m, ενώ εμφανίζουν μια μέση παροχή περίπου 40 m<sup>3</sup>/h. Η υδροφορία απαντά συνήθως με τη μορφή πολυάριθμων επάλληλων υδροφόρων στρωμάτων των οποίων το πάχος κυμαίνεται μεταξύ

1-10 m. Μεταξύ των υδροφόρων στρωμάτων παρατηρούνται παρεμβολές αργίλων ποικίλου πάχους.

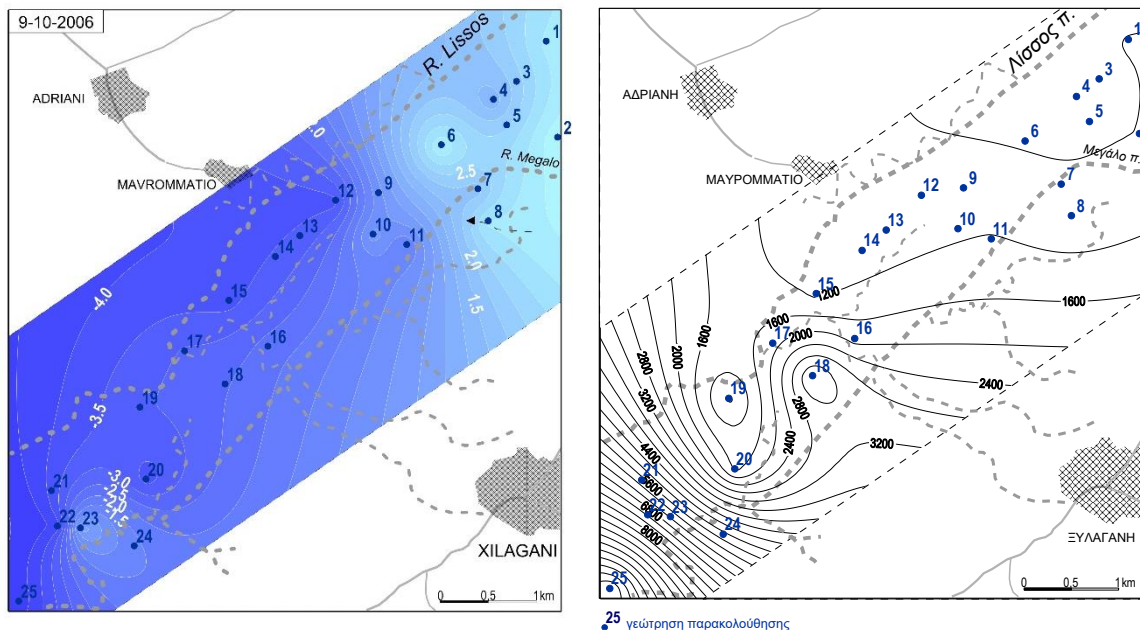
Σχετικές υδρογεωλογικές έρευνες στην περιοχή (Pliakas et al., 2007b) έχουν περιλάβει την παρακολούθηση της μεταβολής της στάθμης σε 24 γεωτρήσεις ομοιόμορφα κατανομημένες στο πεδινό τμήμα, σε τακτά χρονικά διαστήματα από 20/2/1994-7/12/1997, όπως και σε 25 γεωτρήσεις (10 από τις οποίες είναι κοινές με τις προηγούμενες) από 17/12/2002-9/10/2006 (σχ. 4.16).

Στους πιεζομετρικούς χάρτες που σχεδιάστηκαν για την περίοδο 17/12/2002 - 9/10/2006 (σχ. 4.17), εντοπίζονται 2 κύριοι άξονες υπόγειας τροφοδοσίας, ο ένας στο ΒΑ όριο της περιοχής (κύρια τροφοδοσία του υδροφόρου από την ευρύτερη περιοχή της ορεινής ζώνης) και ο άλλος στο ΝΔ τμήμα της (τροφοδοσία από τον Ποταμό Λίσσο), ο οποίος εμφανίζεται, μετά το 2003, ιδιαίτερα ενισχυμένος, γεγονός που πιθανά οφείλεται στην εκβάθυνση της υπάρχουσας τοπικής τάφρου που έγινε το 2003. Επίσης διαπιστώνεται ότι το νότιο τμήμα της περιοχής παρουσιάζει υψόμετρα στάθμης κάτω από το επίπεδο της θάλασσας, σχεδόν καθ' όλη τη διάρκεια του έτους, εκτός ενός σύντομου χρονικού διαστήματος μεταξύ των μηνών Φεβρουάριου και Μαρτίου. Το γεγονός αυτό αν αξιολογηθεί, λαμβάνοντας υπόψη και το ότι στους χάρτες των Μαρτίου και Απριλίου των ετών 2005 και 2006 σχεδόν όλη η περιοχή έρευνας εμφανίζει θετικά υψόμετρα στάθμης, αναδεικνύει την αδυναμία του υδροφόρου να ανταποκριθεί στις αυξημένες αντλήσεις, που πραγματοποιούνται στην περιοχή κατά τους θερινούς μήνες, και ταυτόχρονα να διατηρήσει τη στάθμη του υδροφόρου σε υψόμετρα πάνω από τη στάθμη της θάλασσας.

Στο πλαίσιο των ίδιων προηγούμενων ερευνών, για την εκτίμηση της ποιότητας του υπόγειου νερού της περιοχής έρευνας, συλλέχτηκαν στις 8/7/2003 και 20/7/2006 δείγματα νερού από εννέα (9) και δεκατρία (13) υδροληπτικά σημεία του δικτύου παρακολούθησης αντίστοιχα. Οι αναλύσεις, που έγιναν από το Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Δ.Π.Θ., αφορούσαν στα στοιχεία: Ca, Mg, Na, K, Mn, Fe, Zn, NH<sub>4</sub>, CO<sub>3</sub>, HCO<sub>3</sub>, Cl, SO<sub>4</sub>, NO<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub>, PO<sub>4</sub>, αλκαλικότητα P, αλκαλικότητα M, σκληρότητα (παροδική, μόνιμη, ολική), pH, ηλεκτρική αγωγιμότητα (EC). Οι τιμές της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας των δειγμάτων που ελήφθησαν το 2003 κυμαίνονται από 933 έως 6895 μS/cm και αυτών του 2006 από 733 έως 12380 (σχ. 4.17). Οι μεγαλύτερες τιμές (> 4000 μS/cm) παρουσιάζονται στις γεωτρήσεις 18, 22, 23, 25, 26, ενώ το σύνολο σχεδόν των γεωτρήσεων παρουσιάζει ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα > 1000 μS/cm. Άρα το νερό της περιοχής με βάση το κριτήριο της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας δεν μπορεί να θεωρηθεί πόσιμο. Επίσης, προέκυψαν τον Ιούλιο του 2003 και τον Ιούλιο του 2006 τιμές συγκέντρωσης Cl από 116 mg/L έως 2375 mg/L και Cl από 57,80 mg/L έως 4184,28 mg/L αντίστοιχα.



Σχήμα 4.16. Αριστερά: Χάρτης με την περιοχή έρευνας Ξυλαγανής-Ιμέρου. Δεξιά: οι ερευνητικές γεωτρήσεις και το δίκτυο με τις γεωτρήσεις παρακολούθησης, οι θέσεις και οι άξονες γεωφυσικών διασκοπήσεων (Kallioras et al., 2011).



Σχήμα 4.17. Αριστερά: Πιεζομετρικός χάρτης (9/10/2006). Δεξιά: Χάρτης με την κατανομή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας EC ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) του υπόγειου υδροφόρου συστήματος (20/7/2006) (Pliakas et al., 2007b, Kallioras et al., 2011).

Σύμφωνα με την ταξινόμηση του αρδευτικού νερού με βάση τα κριτήρια TDS και EC παρατηρείται ότι το σύνολο των δειγμάτων του νερού χαρακτηρίζεται από υψηλή και πολύ υψηλή αλατότητα. Το γεγονός αυτό φανερώνει τη σοβαρότητα του προβλήματος της θαλάσσιας διείσδυσης στον υδροφόρο της περιοχής και καθιστά αναγκαία τη λήψη μέτρων ελέγχου της αλατότητας και την καλλιέργεια μόνο ανθεκτικών στην αλατότητα φυτών.

Μία μέθοδος εκτίμησης της τρωτότητας υπόγειου υδροφόρου συστήματος είναι η μέθοδος GALDIT (Lobo Ferreira et al., 2005 a, b). Η μέθοδος αυτή αναφέρεται στη ρύπανση των παράκτιων υδροφόρων συστημάτων από τη διείσδυση του θαλασσινού νερού. Η λέξη GALDIT προέρχεται από τους σημαντικότερους χαρτογραφήσιμους παράγοντες που ελέγχουν τη διείσδυση της θάλασσας: Groundwater Occurrence (Παρουσία του υπόγειου νερού – τύπος υδροφόρου, ελεύθερος, υπό πίεση υδροφόρος, υδροφόρος με διαρροή), Aquifer Hydraulic Conductivity (Υδραυλική αγωγιμότητα υδροφόρου), Height of Groundwater Level above Sea Level (Υδραυλικό φορτίο του γλυκού νερού πάνω από τη στάθμη της θάλασσας), Distance from the Shore (Απόσταση από την ακτή μετρημένη κάθετα προς την ακτογραμμή), Impact of existing status of seawater intrusion in the area (Επιπτώσεις της υφιστάμενης κατάστασης της θαλάσσιας διείσδυσης στην περιοχή), Thickness of the aquifer (Πάχος του υδροφόρου). Οι παράγοντες αυτοί πολλαπλασιάζονται με την αντίστοιχη βαρύτητά τους, οι οποίες απεικονίζουν τη σχετική σημασία του δείκτη στη διαδικασία της θαλάσσιας διείσδυσης. Οι πιο σημαντικοί δείκτες έχουν βαρύτητα της τάξης του 4, και οι λιγότερο σημαντικοί της τάξης του 1. Στο τέλος προκύπτει ο δείκτης GALDIT όπου οι υψηλότερες τιμές του, που προκύπτουν, αντιστοιχούν σε περισσότερο τρωτούς υδροφόρους στη διείσδυση του θαλασσινού νερού. Ο δείκτης GALDIT υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\text{GALDIT - Index} = \frac{\sum_{i=1}^6 \{(W_i)R_i\}}{\sum_{i=1}^6 W_i}$$

όπου:  $W_i$  είναι η βαρύτητα και  $R_i$  είναι η τιμή βαθμονόμησης του δείκτη  $i$ .

Ο δείκτης GALDIT (GALDIT Vulnerability Index, GVI) εκτιμήθηκε με βάση τις τιμές κάθε παραμέτρου σε κάθε θέση σημείου νερού το οποίο επηρεάζεται από τη διείσδυση του θαλασσινού νερού (τύπος υδροφόρου, υδραυλική αγωγιμότητα, υψόμετρο στάθμης υπόγειου νερού, απόσταση από την ακτή, επίδραση του καθεστώτος θαλάσσιας διείσδυσης, πάχος κορεσμένου υδροφόρου). Επίσης με τη χρήση σχετικών λογισμικών σχεδιάστηκαν επιμέρους χάρτες κατανομής ορισμένων παραμέτρων, καθεμιά από τις οποίες επηρεάζει και συμβάλλει χωριστά στη διαμόρφωση του δείκτη GVI, όπως χάρτης κατανομής τιμών του πάχους του κορεσμένου υδροφόρου, χάρτης κατανομής της υδραυλικής αγωγιμότητας, χάρτης κατανομής του καθεστώτος θαλάσσιας διείσδυσης στην περιοχή. Ο δείκτης GALDIT στην περιοχή έρευνας κυμαίνεται για το 2003 και 2006 από 5,5 έως 9,0 και από 4,5 έως 8,5 αντίστοιχα. Με βάση τη διακύμανση των τιμών του δείκτη GALDIT, η περιοχή έρευνας διαιρείται σε 3 ζώνες τρωτότητας (Kallioras et al., 2011):

- 1<sup>η</sup> ζώνη, χαμηλής τρωτότητας, με τιμές συντελεστή τρωτότητας GVI μικρότερες της τιμής 5,

- 2<sup>η</sup> ζώνη, μέσης τρωτότητας, με τιμές συντελεστή τρωτότητας GVI από 5 έως 7,5,
- 3<sup>η</sup> ζώνη, υψηλής τρωτότητας, με τιμές συντελεστή τρωτότητας GVI μεγαλύτερες της τιμής 7,5.

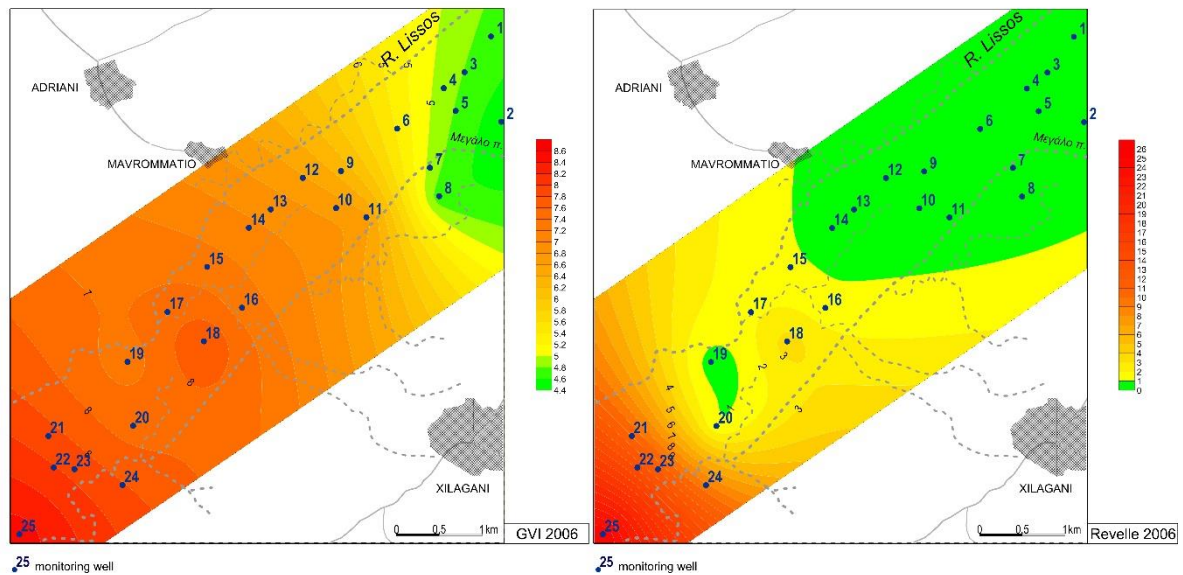
Για τον έλεγχο της αξιοπιστίας της μεθόδου χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα χημικών αναλύσεων από δείγματα υπογείου νερού των περιόδων Ιουλίου 2003 και 2006, που έγιναν στο πλαίσιο προηγούμενων ερευνών στην περιοχή και συγκεκριμένα, διερευνήθηκε η συσχέτιση μεταξύ των τιμών του δείκτη GALDIT και των τιμών του δείκτη Revelle. Από τη συσχέτιση διαφαίνεται ότι σε γεωτρήσεις, όπου στα δείγματα νερού που ελήφθησαν από αυτές παρουσιάζονται οι υψηλότερες τιμές του δείκτη Revelle, σε αυτές τις γεωτρήσεις υπολογίσθηκαν αντίστοιχα μεγάλες τιμές του δείκτη τρωτότητας GALDIT και σίγουρα ανήκουν στις δυο ζώνες μέσης και υψηλής τρωτότητας.

Με βάση τα αποτελέσματα της μεθόδου GALDIT στην περιοχή συντάχτηκε χάρτης τρωτότητας στον οποίο διαφαίνονται οι 3 ζώνες τρωτότητας - διακινδύνευσης ρύπανσης των υπόγειων νερών της περιοχής από θαλάσσια διείσδυση, που αναφέρθηκαν προηγούμενα (σχ. 4.18).

Με βάση τη συλλογή στοιχείων για τον υπολογισμό του δείκτη Revelle στην περιοχή συντάχτηκαν χάρτες κατανομής των τιμών Revelle στους οποίους διαφαίνονται περιοχές των τιμών > 1, με κίτρινο προς πορτοκαλί χρώμα και περιοχές των τιμών > 10, με κόκκινο χρώμα. Διαπιστώνεται ότι οι περιοχές αυτές στα μεγαλύτερα τμήματά τους συμπίπτουν με τις περιοχές μέσης και υψηλής τρωτότητας GALDIT (σχ. 4.18).

Οι σχολιασμοί που προηγούνται αποτελούν ισχυρό αποδεικτικό στοιχείο στην ανάδειξη της αξιοπιστίας της προσπάθειας αποτίμησης με τη μέθοδο GALDIT, της τρωτότητας - διακινδύνευσης ρύπανσης των υπόγειων νερών της περιοχής έρευνας από θαλάσσια διείσδυση.

Από την τελευταία διαπίστωση προκύπτει η ανάγκη περαιτέρω σχετικής διερεύνησης για να προσεγγισθεί καλύτερα και πλέον αξιόπιστα η διαδικασία αποτίμησης των τιμών του δείκτη GALDIT.



Σχήμα 4.18. Αριστερά: Χάρτης κατανομής του δείκτη τρωτότητας (GVI) στην περιοχή της Ξυλαγανής–Ιμέρου (2006). Δεξιά: Χάρτης κατανομής των τιμών του δείκτη Revelle στην ίδια περιοχή (20-7-2006) (Kallioras et al., 2011).

#### 4.5.2.4. ΝΔ παράκτια περιοχή Ν. Ροδότης

(κύριες βιβλιογραφικές πηγές: Καλλιώρας, 2008, Kalloras et al., 2006, Kallioras et al., 2010)

Η περιοχή έρευνας στο ΝΔ παράκτιο πεδινό τμήμα του Ν. Ροδότης (σχ. 4.19), όσον αφορά στα κύρια υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά της δομείται κυρίως από αλλουβιακές αποθέσεις οι οποίες συνίστανται σε χονδρόκοκκα υλικά, άμμους, χαλίκια και κροκάλες. Τα χονδρόκοκκα υλικά αποτελούν το κυρίως υδροφόρο στρώμα της περιοχής έρευνας, του οποίου ο πυθμένας αποτελείται από στρώμα γκριζοπράσινης αργίλου. Το υδροφόρο στρώμα συχνά εμφανίζεται σε δύο ή και τρεις ενστρωματώσεις οι οποίες παρουσιάζουν υδραυλική επικοινωνία μεταξύ τους, ενώ το φαινόμενο αυτό γίνεται εντονότερο στο νότιο όριο της περιοχής έρευνας. Τα στρώματα τα οποία παρεμβάλλονται ενδιάμεσα των παραπάνω ενστρωματώσεων έχουν ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ποικίλων συνθηκών υδραυλικής αγωγιμότητας του σχηματισμού τόσο στην οριζόντια όσο και στην κατακόρυφη διεύθυνση.



Σχήμα 4.19. Η περιοχή έρευνας στο ΝΔ παράκτιο πεδινό τμήμα του Ν. Ροδόπης (Καλλιώρας, 2008).

Το ανώτερο γεωλογικό στρώμα διαμορφώνει τις υπό πίεση συνθήκες του υδροφόρου συστήματος ως μια γεωλογική στρωματογραφική ενότητα η οποία περιλαμβάνει υλικά όπως ιλυόλιθοι, φαμμίτες, μικροκροκαλοπαγή και άργιλοι. Το ενδιάμεσο στρώμα, το οποίο αποτελεί και το κύριο υδροφόρο στρώμα της περιοχής, και λαμβάνεται ως ενιαία γεωλογική ενότητα, περιέχει αλλουβιακές αποθέσεις, χονδρόκοκκα υλικά, άμμους, χαλίκια και κροκάλες. Πρόκειται για υλικά μεγάλης περατότητας τα οποία αποτελούν το κυρίως υδροφόρο στρώμα της περιοχής. Ο πυθμένας της υδρογεωλογικής λεκάνης οριοθετείται από την παρουσία της γκριζοπράσινης αργίλου.

Τα δεδομένα δοκιμαστικών αντλήσεων προηγούμενων ερευνών έδειξαν ότι οι τιμές της μεταβιβασιμότητας,  $T$ , κυμαίνονται μεταξύ των  $1,15 \times 10^{-3}$  και  $99,71 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{sec}$ , με μέση τιμή τα  $23,95 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{sec}$ , γεγονός που υποδηλώνει πολύ καλό δυναμικό υδροφόρων της περιοχής. Επιπλέον οι τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας,  $K$ , κυμαίνονται μεταξύ των  $2,49 \times 10^{-5}$  και  $221,58 \times 10^{-5} \text{ m}/\text{sec}$ , με μέση τιμή τα  $46,66 \times 10^{-5} \text{ m}/\text{sec}$ . Οι τιμές του συντελεστή εναποθήκευσης  $S$ , της περιοχής έρευνας κυμαίνονται μεταξύ  $1,3 \times 10^{-4}$  (ή  $0,13 \times 10^{-3}$ ) και  $2,9 \times 10^{-2}$  (ή  $29 \times 10^{-3}$ ) με μέση τιμή  $5,06 \times 10^{-3}$ .

Η ερμηνεία των πιεζομετρικών χαρτών που συντάχθηκαν αναδεικνύει την ύπαρξη βασικών αξόνων τροφοδοσίας του υπό εξέταση υδροφόρου, οι οποίοι εμφανίζονται καθ' όλη τη διάρκεια του υδρογεωλογικού έτους (Οκτώβριος-Απρίλιος 2005) (σχ. 4.20). Ο πρώτος άξονας τροφοδοσίας είναι αυτός που παρατηρείται στο βόρειο-ανατολικό όριο της περιοχής έρευνας. Όσον αφορά στην τροφοδοσία της περιοχής από τον αλλουβιακό κώνο του Π. Κομψάτου (βόρειο παρακείμενο υδροφόρο σύστημα), παρατηρούνται δυο άξονες τροφοδοσίας, οι οποίοι θα μπορούσαν να θεωρηθούν ως ζεύγος αξόνων τροφοδοσίας με κοινή προέλευση. Η τροφοδοσία της περιοχής μέσω διηθήσεων από τα νερά του



Ασπροποτάμου μπορεί με ασφάλεια να αποκλειστεί εξαιτίας της έντονης ύπαρξης αργιλικών σχηματισμών στην περιοχή, γεγονός που δημιουργεί συνθήκες υδραυλικής απομόνωσης του ποταμού και του υπό εξέταση υδροφόρου συστήματος της περιοχής έρευνας. Κατά μήκος του ίδιου ποταμού, παρατηρείται πύκνωση των καμπυλών των πιεζομετρικών χαρτών όλων των σχημάτων, γεγονός που αποδίδεται στην ύπαρξη ρήγματος κατά μήκος του Ασπροποτάμου το οποίο φέρει σε υδραυλική επικοινωνία τα δύο υδροφόρα συστήματα της περιοχής -αυτό της περιοχής έρευνας και του αλλουβιακού κώνου του Κομψάτου- με το δεύτερο να τροφοδοτεί το πρώτο. Κατά τη διερεύνηση όλων των πιεζομετρικών χαρτών παρατηρούνται επίσης τρεις άξονες τροφοδοσίας, οι οποίοι εντοπίζονται στο νότιο-δυτικό, στο νότιο και στο νότιο-ανατολικό όριο της περιοχής έρευνας. Ο πρώτος από τους προαναφερθέντες έχει διεύθυνση N-ΝΔ προς Β-ΒΑ ενώ σε συνδυασμό με τα δεδομένα της ποιοτικής παρακολούθησης του υπό εξέταση υδροφόρου, πρόκειται για άξονα εμπλουτισμού από τη θάλασσα, ή άξονα θαλάσσιας διείσδυσης. Ενδιαφέρον παρουσιάζει επίσης ο άξονας τροφοδοσίας που αναπτύσσεται νότιο-ανατολικά της Λίμνης Ισμαρίδας με διεύθυνση N-ΝΑ προς Β-ΒΔ, όπου επίσης παρατηρείται ποιοτική επιβάρυνση των υπόγειων νερών της περιοχής έρευνας, ενώ το ίδιο συμβαίνει επίσης και με το νότιο άξονα τροφοδοσίας της περιοχής. Η πύκνωση των πιεζομετρικών γραμμών η οποία εμφανίζεται κατά μήκος του Ποταμού Βοζβόζη, αποδίδεται και αυτή (όμοια με την αντίστοιχη στο βόρειο-δυτικό όριο κατά μήκος του Ασπροποτάμου) στην ύπαρξη ρήγματος το οποίο δημιουργεί συνθήκες υδραυλικής απομόνωσης μεταξύ του Ποταμού Βοζβόζη και της περιοχής έρευνας, συνθήκες οι οποίες εντείνονται και λόγω της επικράτησης των αργιλικών υλικών κατά μήκος του ποταμού.

Το βασικό χαρακτηριστικό της πιεζομετρικής επιφάνειας του υπό εξέταση υδροφόρου είναι οι τιμές των ισοπιεζομετρικών καμπυλών, όπου πρόκειται αποκλειστικά για αρνητικές τιμές στάθμης, γεγονός το οποίο παρατηρείται άμεσα ακόμα και από μη ειδικούς. Οφείλεται στις συνθήκες υπεράντλησης οι οποίες λαμβάνουν χώρα συστηματικά στην περιοχή, τουλάχιστον κατά τη διάρκεια της τελευταίας 20-ετίας, η οποία συνοδεύεται από παντελή έλλειψη οποιουδήποτε ορθολογικού διαχειριστικού σχεδιασμού. Πρόκειται για δημιουργία τυπικού κώνου κατάπτωσης, το υψόμετρο του βαθύτερου σημείου του οποίου κυμαίνεται μεταξύ -36 και -40m ανάλογα με την περίοδο ανώτατης ή κατώτατης στάθμης.

Λαμβάνοντας υπόψη τα υδρογεωλογικά, στρωματογραφικά, υδρολογικά και γεωλογικά (ιζηματολογικά) χαρακτηριστικά της υδρογεωλογικής λεκάνης έρευνας, ο εμπλουτισμός του υδροφόρου επιτυγχάνεται από:

- την άμεση κατείσδυση των κατακρημνισμάτων,
- τις επιστροφές άρδευσης,
- τις διηθήσεις χειμάρρων,
- τον βόρειο αλλουβιακό κώνο του Ποταμού Κομψάτου,
- το ανατολικό τεταρτογενές υδροφόρο σύστημα.



Σχήμα 4.20. Πιεζομετρικοί χάρτες περιοχής έρευνας (επάνω: Απρίλιος 2005, κάτω: Οκτώβριος 2005) (Kalloras et al., 2006, Καλλιώρας, 2008).

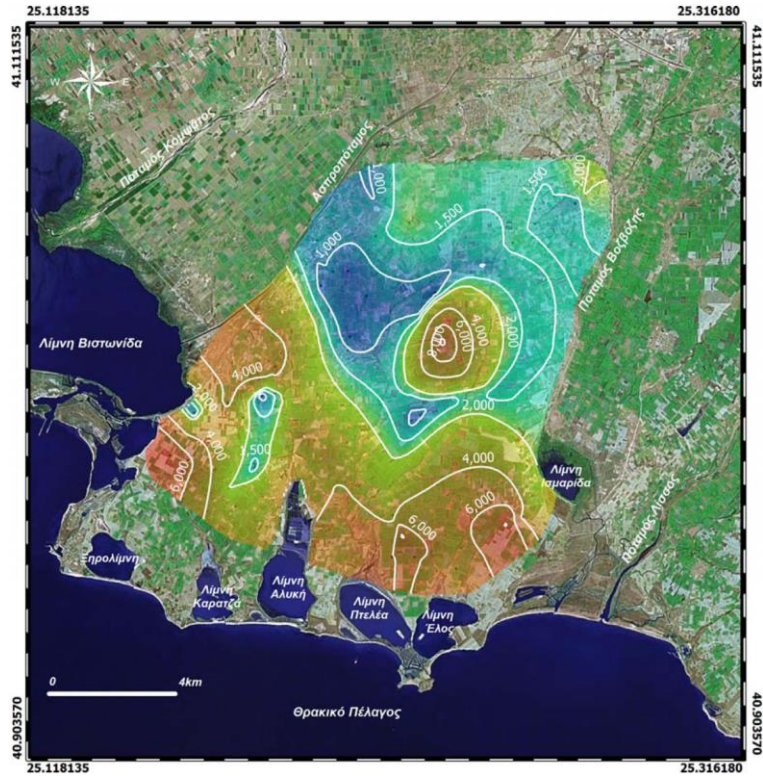
Οι αλλουβιακοί σχηματισμοί της περιοχής έρευνας, οι οποίοι δομούν και το κυρίως υδροφόρο στρώμα της περιοχής, καλύπτονται από συνεχείς εναλλαγές λεπτών στρώσεων αργίλων, ιλυολίθων και φαμμιτών και σπανιότερα μικροκροκαλοπαγών, γεγονός το οποίο

επιηραάζει αρνητικά την κατακόρυφη κίνηση του νερού διαμέσου των προαναφερθέντων ενστρωματώσεων και κατά συνέπεια ελαττώνει την άμεση κατείσδυση του νερού των βροχοπτώσεων. Στην περιοχή έρευνας, οι ποσότητες νερού που εμπλουτίζουν έμμεσα τον υδροφόρο, από τις επιστροφές άρδευσης εκτιμώνται στα ίδια επίπεδα με αυτές της κατείσδυσης.

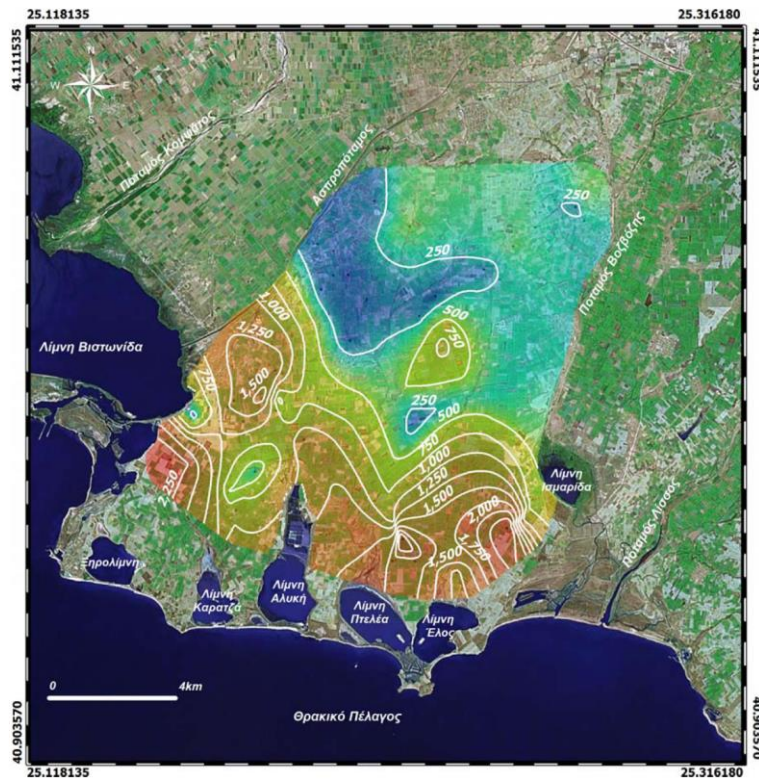
Οι εργασίες υπαίθρου έχουν λάβει χώρα κατά την περίοδο 2003, 2004 και 2005. Προηγήθηκε πλήρης καταγραφή των παραγωγικών γεωτρήσεων της περιοχής έρευνας και επιλέχθηκε κατάλληλο δίκτυο γεωτρήσεων δειγματοληψίας, τέτοιο ώστε να αφορά στο υπό εξέταση υδροφόρο στρώμα καθώς επίσης και στις ιδιαίτερες συνθήκες άντλησης κάθε επί μέρους περιοχής. Οι εργασίες υπαίθρου για την εκτίμηση των ποιοτικών χαρακτηριστικών του υδροφόρου περιέλαβε:

- Αρχικά, κατά τη διάρκεια της ερευνητικής περιόδου του έτους 2003, πραγματοποιήθηκε ευρεία δειγματοληψία -τόσο σε έκταση όσο και σε αριθμό σημείων- των υπόγειων νερών της περιοχής, με σκοπό την όσο το δυνατόν αντιπροσωπευτικότερη απόδοση της έκτασης του υφάλμυρου μετώπου στην περιοχή έρευνας, με τις επί τόπου μετρήσεις της ηλεκτρικής αγωγιμότητας, EC ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) καθώς επίσης και των κύριων φυσικοχημικών παραμέτρων των νερών όπως η θερμοκρασία ( $^{\circ}\text{C}$ ) και το pH (δειγματοληψία από 375 σημεία),
- Συστηματικές ετήσιες δειγματοληψίες στάθμης από ένα εκτεταμένο δίκτυο 40 περίπου γεωτρήσεων παρακολούθησης ποιότητας των υπόγειων νερών,
- Χημικές αναλύσεις βασικών χημικών στοιχείων νερού, ιχνοστοιχείων και βαρέων μετάλλων (στο Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Δημοκρίτειου Πανεπιστημίου Θράκης και στο Εργαστήριο Υδρογεωλογίας του Γεωλογικού Τμήματος του Πανεπιστημίου Πατρών).

Οι χάρτες κατανομής της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας και ιόντων χλωρίου, καταδεικνύουν την έκταση του μετώπου της αλμυρής σφήνας του υδροφόρου συστήματος της περιοχής (σχ. 4.21, 4.22). Ειδικότερα όσον αφορά το χάρτη ο οποίος προέκυψε από τις μετρήσεις 375 σημείων δειγματοληψίας και συνεπώς παρέχει πληρέστερη απεικόνιση της πραγματικής κατανομής της ειδικής ηλεκτρικής αγωγιμότητας, φαίνεται ευδιάκριτα η ύπαρξη ενός εκτεταμένου αλμυρού μετώπου το οποίο εντοπίζεται σε δυο διαφορετικά πεδία, στο δυτικό και νότιο τμήμα της περιοχής έρευνας. Εκεί διαφαίνονται δυο κύρια μέτωπα θαλάσσιας διείσδυσης, το δυτικό διαμέσου του στομίου της Βιστωνίδας Λίμνης, και το νότιο μέσω της περιοχής Ισμαρίδας. Ειδικά όσον αφορά τις μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν κατά τα έτη 2003 και 2004 οι τιμές της ηλεκτρικής αγωγιμότητας φθάνουν τις 15.500 και 17.240  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , γεγονός που καθιστά τα νερά της περιοχής ακατάλληλα προς άρδευση οποιουδήποτε είδους καλλιέργειας. Τα βασικότερα συμπεράσματα που εξαγονται από την ερμηνεία των παραπάνω χαρτών είναι τα εξής:



Σχήμα 4.21. Χωρική κατανομή της ηλεκτρικής αγωγιμότητας EC ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) (Ιούλιος 2005) (υπόβαθρο Google Earth) (Kalloras et al., 2006, Καλλιώρας, 2008).



Σχήμα 4.22. Χωρική κατανομή χλωριόντων  $\text{Cl}^-$  σε  $\text{mg}/\text{L}$  (Ιούλιος 2005) (υπόβαθρο Google Earth) (Kalloras et al., 2006, Καλλιώρας, 2008).

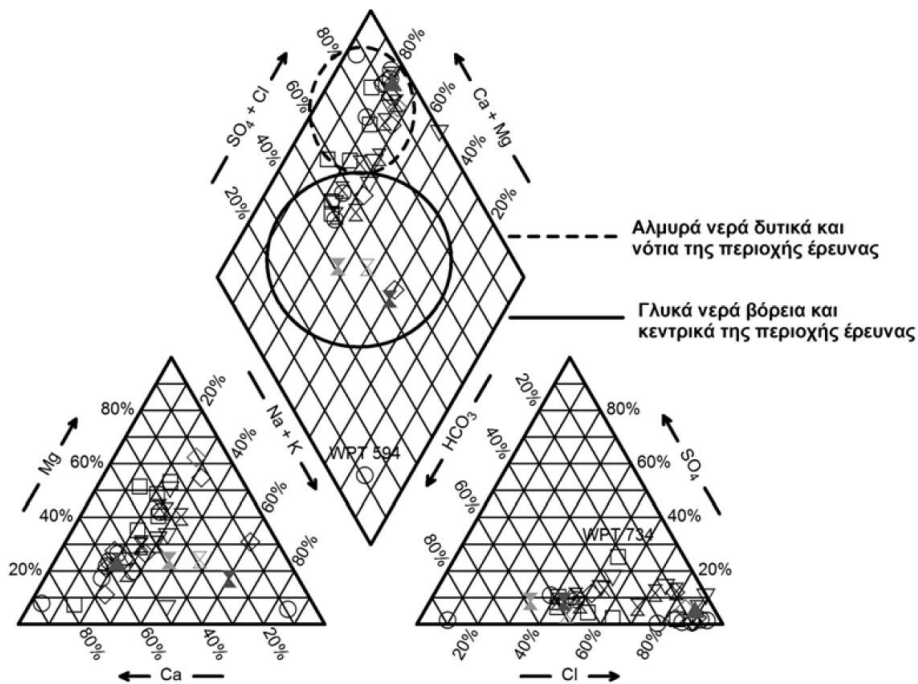
- Υπάρχει ένα αλμυρό μέτωπο το οποίο εντοπίζεται στην περιοχή Γλυκονερίου, από τη δυτική ακτή της περιοχής έρευνας.
- Αλμυρό μέτωπο εντοπίζεται επίσης στο τμήμα της περιοχής έρευνας που εκτείνεται νοτιοδυτικά της Λίμνης Ισμαρίδας.
- Στο βόρειο όριο της περιοχής (περιοχή Ν. Καλλίστης-Καλλίστης), αναπτύσσεται περιορισμένης έκτασης επιβάρυνση, η οποία αποδίδεται σε αλμύριση γεωλογικής προέλευσης.
- Το κυρίως υδροφόρο στρώμα της περιοχής έρευνας, άνω μειοκαινικής ηλικίας, περιέχει υπόγεια νερά πολύ καλής ποιότητας, με τιμές ηλεκτρικής αγωγιμότητας που δεν υπερβαίνουν τα 1000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

Όσον αφορά στο διάγραμμα Piper (σχ. 4.23), εκεί φαίνονται διακριτά δύο ποιοτικές ομάδες νερών οι οποίες κατηγοριοποιούνται ως εξής:

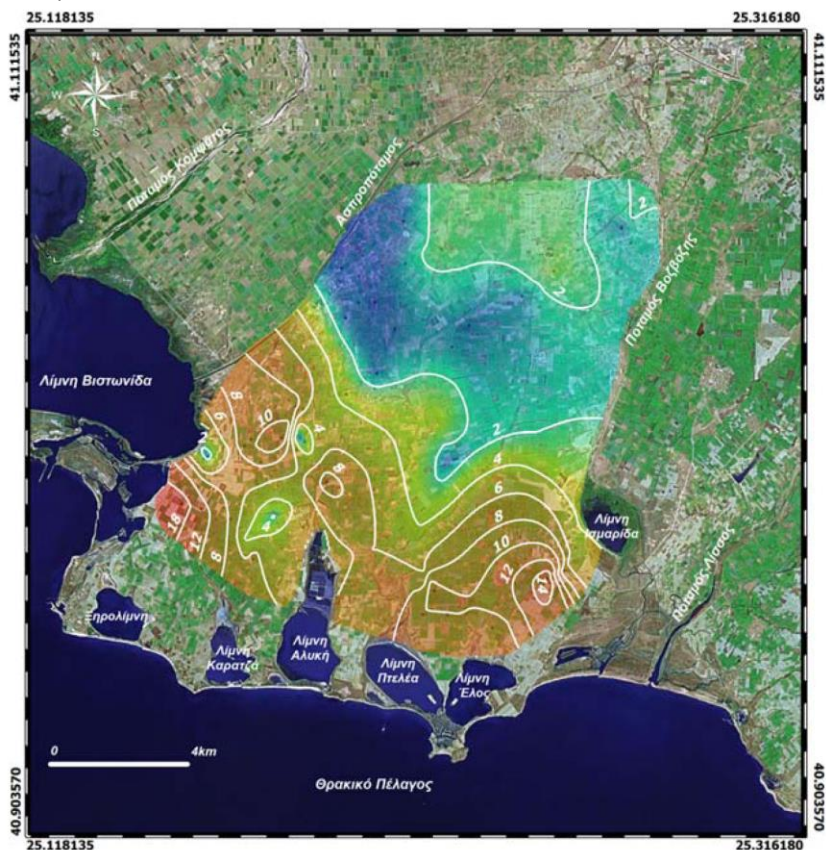
- έντονα αλμυρισμένα υπόγεια νερά με περιοχή προέλευσης το δυτικό (στόμιο Βιστωνίδας) και το νότιο (άξονας παράκτιων λιμνών –Ξηρολίμνη, Λ. Καρατζά, Λ. Αλυκή, Λ. Πελέα, Λ. Έλος- και Λ. Ισμαρίδας) τμήμα της περιοχής έρευνας, όπου εξακριβώνουν το φαινόμενο της θαλάσσιας διείσδυσης στα συγκεκριμένα τμήματα.
- γλυκά υπόγεια νερά με περιοχή προέλευσης το κεντρικό και βόρειο (άξονας κατά μήκος της κοίτης του Ασπροποτάμου) τμήμα της περιοχής έρευνας όπου λαμβάνει χώρα εμπλουτισμός του υδροφόρου συστήματος της περιοχής έρευνας από τον αλλουβιακό κώνο του Πποταμού Κομψάτου (βόρεια περιοχή).

Στο σχήμα 4.24 παρατηρείται η συνεχής εξάπλωση του μετώπου της θαλάσσιας διείσδυσης στην περιοχή, με κύριο χαρακτηριστικό τις αυξημένες τιμές σε συντελεστή Revelle. Αυτό παρατηρείται ειδικότερα στα τμήματα που γεινιάζουν άμεσα με τη θάλασσα, γεγονός που δείχνει τις έντονες συνθήκες άντλησης που επικρατούν στην περιοχή, και την ποιοτική επιβάρυνση που έχει υποστεί το υδροφόρο σύστημα που εξετάζεται, εξαιτίας της εκτεταμένης υφαλμύρισης.

Τα δείγματα των υπόγειων νερών της περιοχής έρευνας συνήθως εμφανίζουν περίσσειμα ιόντων ασβεστίου που υποδηλώνει διείσδυση της θάλασσας ή περίσσειμα ιόντων νατρίου υποδηλώνοντας εμπλουτισμό από γλυκό νερό. Η σχετική αύξηση ιόντων  $\text{Na}^+$  σε νερό χημικού τύπου  $\text{NaHCO}_3$ , και των ιόντων  $\text{Ca}^{2+}$  σε νερό χημικού τύπου  $\text{CaCl}_2$  είναι εμφανής κατά τη διάρκεια όλων των ετών δειγματοληψίας. Η αύξηση αυτή μπορεί να αποδοθεί στη διάλυση του ασβεστίτη η οποία λαμβάνει χώρα κατά την απομάκρυνση των ιόντων  $\text{Ca}^{2+}$  λόγω της ανταλλαγής με τα ιόντα  $\text{Na}^+$ . Η διάλυση του ασβεστίτη επιφέρει αύξηση του pH με τιμές άνω του 8, στα νερά χημικού τύπου  $\text{NaHCO}_3$ . Αντιθέτως, τα νερά χημικού τύπου  $\text{CaCl}_2$  παρουσιάζουν χαμηλές τιμές του pH, κάτω του 7, γεγονός που ενδεχομένως αποδίδεται ως αποτέλεσμα της καθίζησης του ασβεστίτη λόγω αύξησης των ιόντων  $\text{Ca}^{2+}$  κατά την κατιοντική ανταλλαγή.



Σχήμα 4.23. Τριγωνικό διάγραμμα κατά Piper (1944) με δείγματα των υπόγειων νερών της περιοχής έρευνας κατά τη δειγματοληψία του έτους 2005 (Kalloras et al., 2006, Καλλιώρας, 2008).



Σχήμα 4.24. Χωρική κατανομή συντελεστή Revelle κατά την περίοδο Ιούλιος 2005 (υπόβαθρο Google Earth) (Kalloras et al., 2006, Καλλιώρας, 2008).

Οι χάρτες κατανομής χρωματογραφικών υδροχημικών τύπων των υπόγειων νερών της περιοχής έρευνας κατά τη διάρκεια της δειγματοληψίας για τα έτη 2003, 2004 και 2005, καταδεικνύουν ότι η περιοχή του υδροφόρου που άμεσα γειτνιάζει με τη θάλασσα, εμπεριέχει υπόγεια νερά του υδροχημικού τύπου  $\text{CaCl}$  (σχ. 4.25). Στη συνέχεια, στο τμήμα όπου επίσης απαντάται διείσδυση της θάλασσας, αλλά σε μικρότερο βαθμό -χαμηλότερες τιμές αλατότητας- όπως φαίνεται και από την κατανομή της συγκέντρωσης των ιόντων χλωρίου, ο υδροχημικός τύπος του νερού είναι πλέον νατριο-χλωριούχος,  $\text{NaCl}$ . Στις περιοχές εμπλουτισμού του υδροφόρου, όπου η διείσδυση της θάλασσας δεν έχει επιβαρύνει ποιοτικά τον υδροφόρο, οι κυρίαρχοι υδροχημικοί τύποι που εμφανίζονται είναι οι  $\text{CaHCO}_3$  και  $\text{MgHCO}_3$ . Ειδικότερα όσον αφορά στον τύπο  $\text{CaHCO}_3$ , αυτός εμφανίζεται στον άξονα ΒΔ-ΒΑ, δηλαδή κατά μήκος της κοίτης του Ασπροποτάμου, όπου λαμβάνει χώρα ο εμπλουτισμός της περιοχής έρευνας από το υδροφόρο σύστημα του αλλουβιακού κώνου του Ποταμού Κομφάτου.



Σχήμα 4.25. Χωρική κατανομή χρωματογραφικών υδροχημικών τύπων των υπόγειων νερών της περιοχής έρευνας κατά τη διάρκεια της δειγματοληψίας του έτους 2005 (υπόβαθρο Google Earth) (Kalloras et al., 2006, Καλλιώρας, 2008).

Τα αργιλικά δείγματα αφορούν σε κρίσιμα σημεία της περιοχής έρευνας, εκεί όπου απαντάται έντονα το φαινόμενο της θαλάσσιας διείσδυσης. Η συνεχής παρουσία του μοντμοριλονίτη τόσο στο νοτιοδυτικό και δυτικό όριο όσο και στο νότιο τμήμα, είναι

εμφανέστατη, γεγονός που εδραιώνει τη θεωρία των έντονων φαινομένων κατιοντικής ανταλλαγής στην περιοχή, και την επικράτηση του ασβεστοχλωριούχου υδροχημικού τύπου στα υπόγεια νερά των τμημάτων αυτών. Ειδικότερα όσον αφορά στο νοτιοδυτικό τμήμα της περιοχής έρευνας, γίνεται επιπλέον έντονη και η παρουσία του βερμικουλίτη, ο οποίος παρουσιάζει μεγαλύτερη ικανότητα κατιοντικής ανταλλαγής από το μοντμοριλονίτη.

Στο πλαίσιο της προσομοίωσης της ροής του υπόγειου νερού στο ΝΔ παράκτιο πεδινό τμήμα του Ν. Ροδόπης, έγινε εφαρμογή του λογισμικού Visual MODFLOW και διατυπώθηκαν εναλλακτικές υδρογεωλογικές συνθήκες για το υδροφόρο σύστημα της περιοχής με σκοπό τη δημιουργία σεναρίων πρόβλεψης του μοντέλου.

Για την ανάπτυξη του εννοιολογικού μοντέλου (conceptual model) έγιναν κάποιες παραδοχές σχετικά με τα χαρακτηριστικά των γεωλογικών σχηματισμών που δομούν το υπό εξέταση υδροφόρο σύστημα και το οποίο στην προκειμένη περίπτωση θεωρείται ως υπό πίεση σε όλη την έκτασή του. Οι παραδοχές βασίστηκαν σε στοιχεία από γεωλογικές τομές παραγωγικών και ερευνητικών γεωτρήσεων καθώς και γεωηλεκτρικών διασκοπήσεων. Έτσι το ανώτερο γεωλογικό στρώμα, υπερκείμενο του κυρίως υδροφόρου στρώματος, περιλαμβάνει σχετικά στεγανά για την περιοχή υλικά όπως ιλυόλιθους, ψαμμίτες, μικροκροκαλοπαγή και αργίλους, υπεύθυνα για τη δημιουργία υπό πίεση συνθηκών. Το άμεσα υποκείμενο στρώμα περιέχει αλλουβιακές αποθέσεις που αποτελούνται από χονδρόκοκκα υλικά (άμμους, χαλίκια και κροκάλες). Πρόκειται για υλικά μεγάλης περατότητας τα οποία αποτελούν το κυρίως υδροφόρο στρώμα της περιοχής και το οποίο εμφανίζει μέσο πάχος της τάξης των 50 m περίπου. Τα υδρογεωλογικά όρια ως προς το βάθος του υπό εξέταση υδροφόρου σχηματισμού καθορίζονται από την εμφάνιση της γκριζοπράσινης αργίλου.

Κατά την ανάπτυξη του εννοιολογικού μοντέλου της περιοχής απαιτείται να καθορισθεί το είδος της τροφοδοσίας του υπόγειου υδροφόρου συστήματος, όπου στην παρούσα περίπτωση αφορά τα εξής (σχ. 4.26):

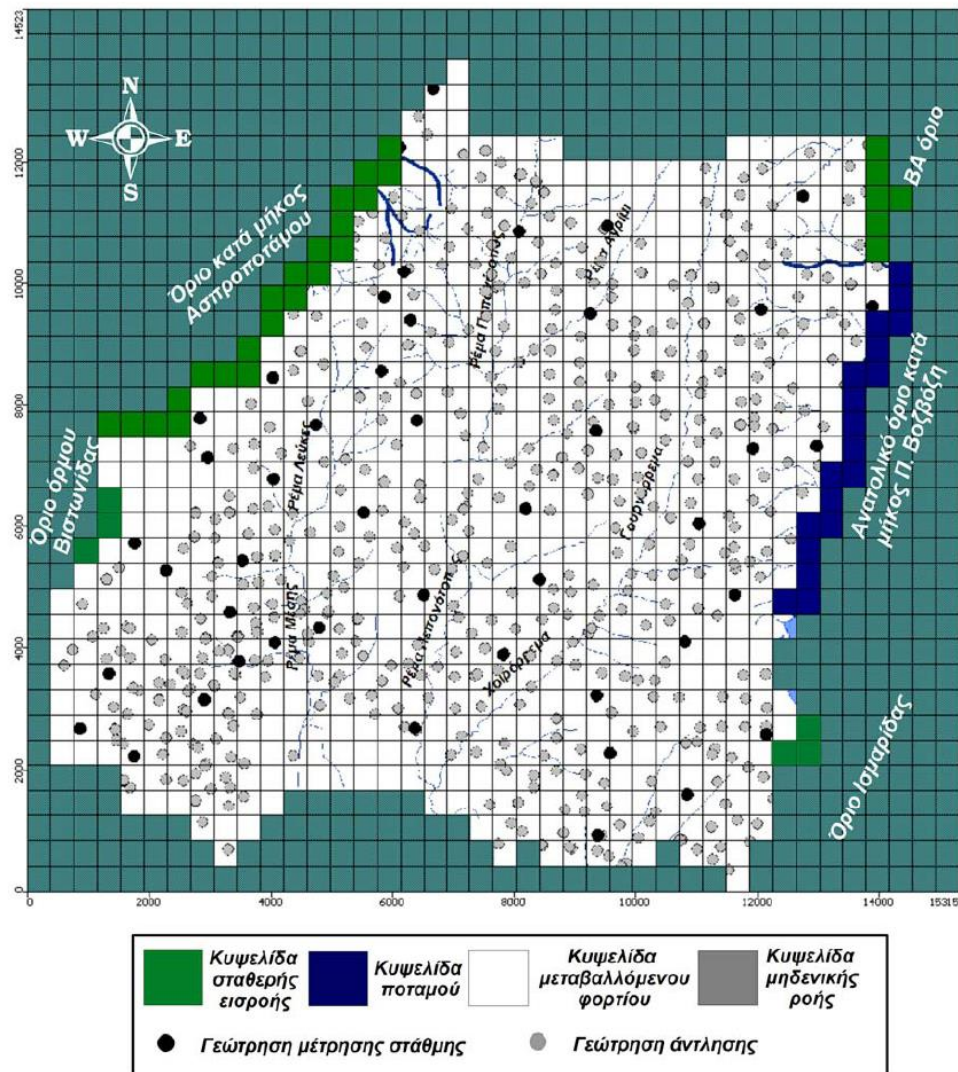
- Υπόγειες πλευρικές εισροές,
- Διηθήσεις,
- Επιστροφές άρδευσης (έμμεσος εμπλουτισμός)
- Κατείσδυση από βροχοπτώσεις (φυσικός εμπλουτισμός)

Για την επίτευξη της προσομοίωσης του υδροφόρου συστήματος της περιοχής έρευνας εισήχθησαν τρεις τύποι οριακών συνθηκών στο μοντέλο οι οποίοι είναι οι παρακάτω:

- Οριακές συνθήκες σταθερής εισροής,
- Οριακές συνθήκες ποταμού,
- Οριακές συνθήκες μηδενικής ροής.

Η επιλογή των παραπάνω έγινε με βάση τις τοπικές υδρογεωλογικές συνθήκες των επί μέρους τμημάτων του υδροφόρου συστήματος, όπως προέκυψαν από τη σχετική έρευνα.





Σχήμα 4.26. Ενοιολογικό μοντέλο, κάνναβος και οριακές συνθήκες του μοντέλου ροής του υπόγειου νερού της περιοχής έρευνας στο ΝΔ πεδινό τμήμα του Ν. Ροδόπης (Kallioras et al., 2010, Καλλιώρας, 2008).

Η συνολική περίοδος προσομοίωσης αφορά στο διάστημα 16/04/2003 έως 29/03/2004. Το μοντέλο διαιρέθηκε σε δύο περιόδους φόρτισης, SP1 και SP2, οι οποίες αφορούν την περίοδο άντλησης και την περίοδο ηρεμίας, αντίστοιχα, του υδροφόρου συστήματος. Η επιλογή του κάθε χρονικού βήματος  $TS_{1a}$  και  $TS_{1b}$ , για την πρώτη περίοδο φόρτισης, και για τη δεύτερη περίοδο φόρτισης,  $TS_{2a}$  και  $TS_{2b}$ , καθορίστηκε με βάση τις πραγματοποιημένες μετρήσεις πεδίου καθ' όλη τη διάρκεια της περιόδου προσομοίωσης. Για την προσομοίωση χρησιμοποιήθηκαν μετρήσεις στάθμης από 49 επιλεγμένες γεωτρήσεις.

Τα αποτελέσματα της ρύθμισης του μοντέλου για τις περιόδους φόρτισης αφορούν στην καταγραφή της μετρημένης τιμής στάθμης (M), της υπολογισμένης στάθμης (C) και

της διαφοράς μεταξύ των δύο (D). Σημειώνεται ότι τιμές μέσου τετραγωνικού σφάλματος RMSE για κάθε χρονικό βήμα TS<sub>1b</sub>, TS<sub>2a</sub> και TS<sub>2b</sub> είναι 0,706, 0,417 και 0,517 m, αντίστοιχα.

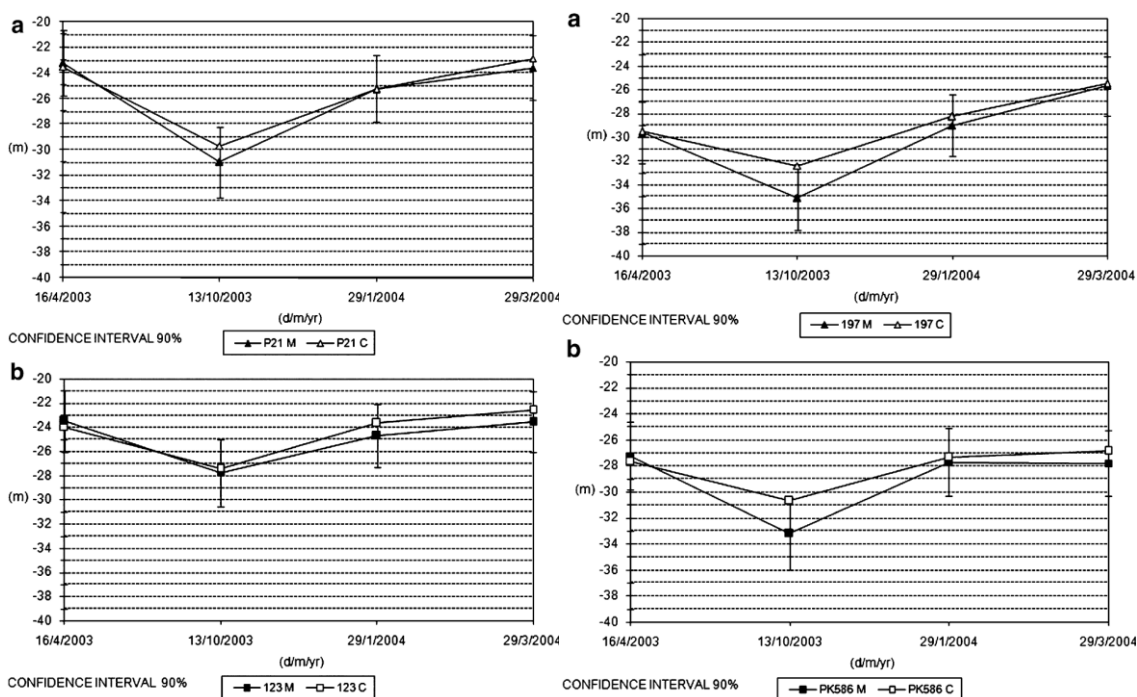
Στο σχήμα 4.27 παρουσιάζεται πιεζομετρικός χάρτης, που σχεδιάστηκε με βάση τις μετρημένες και υπολογισμένες τιμές στάθμης της μέτρησης 29/03/2004. Από το σχήμα προκύπτει ότι στα βόρειο-δυτικά όρια του μοντέλου κατά μήκος του Ασπροπόταμου παρουσιάζεται μεγάλη ταύτιση των μετρημένων και υπολογισμένων από το μοντέλο τιμών στάθμης. Η ίδια παρατήρηση ισχύει και για το κεντρικό τμήμα της περιοχής έρευνας, ειδικά στο σημείο όπου εντοπίζεται ο κώνος κατάπτωσης του υδροφόρου συστήματος. Μικρές αποκλίσεις μεταξύ των παραπάνω τιμών παρατηρούνται στο βόρειο-ανατολικό τμήμα της περιοχής έρευνας καθώς επίσης και στο δυτικό όριο της περιοχής.



Σχήμα 4.27. Μετρημένες (άσπρες) και υπολογισμένες (γκρι) ισοπιεζομετρικές καμπύλες για τη μέτρηση 29/03/2004 στο πλαίσιο ρύθμισης του μοντέλου ροής του υπόγειου νερού της περιοχής έρευνας στο ΝΔ πεδινό τμήμα του Ν. Ροδόπης (υπόβαθρο Google Earth) (Kallioras et al., 2010, Καλλιώρας, 2008).

Στο σχήμα 4.28 παρουσιάζεται ενδεικτικά η γραφική επαλήθευση της ρύθμισης του μοντέλου συγκρίνοντας τις μετρημένες (M) και τις υπολογισμένες (C) στάθμες των γεωτρήσεων παρακολούθησης της περιοχής έρευνας P21, 123, 197, και PK586, όπου παρουσιάζονται και οι τιμές των 90% διαστημάτων εμπιστοσύνης (παρουσιάζεται στα

διαγράμματα ως κατακόρυφες γραμμές). Σημειώνεται ότι όλες οι τιμές της διαφοράς M-C βρίσκονται μέσα στα διαστήματα των τιμών 90% εμπιστοσύνης, οι οποίες τιμές, για όλες τις 49 γεωτρήσεις, είναι: 16-4-2003:  $\pm 2,57$  m, 13-10-2003:  $\pm 2,76$  m, 29-1-2004:  $\pm 2,6$  m, 29-3-2004:  $\pm 2,52$  m.



Σχήμα 4.28. Διαγράμματα μεταβολής μετρημένων τιμών (M) και υπολογισμένων τιμών (C) του υψομέτρου στάθμης των γεωτρήσεων που αναγράφονται και κατακόρυφα τμήματα διαστημάτων εμπιστοσύνης 95% (Kallioras et al., 2010).

Μετά τη ρύθμιση του μοντέλου της περιοχής έρευνας διατυπώθηκαν δυο εναλλακτικές υδρογεωλογικές συνθήκες για το υδροφόρο σύστημα της περιοχής με σκοπό τη δημιουργία σεναρίων πρόβλεψης του μοντέλου.

Το πρώτο σενάριο, αφορά στη διατήρηση των υπάρχοντων συνθηκών όσον αφορά στο υδρολογικό ισοζύγιο της περιοχής, για το χρονικό διάστημα μιας δεκαετίας. Αυτό θα σήμαινε για το υδροφόρο σύστημα μια ποσότητα εκροών της τάξης των  $388,549 \times 10^6 \text{ m}^3$  σε συνδυασμό με ποσότητες εμπλουτισμού της τάξης των  $361,56 \times 10^6 \text{ m}^3$ , γεγονός το οποίο θα επέφερε μια συνολική απώλεια υπόγειου υδατικού δυναμικού, για τη δεκαετία 2003-2013, της τάξης των  $26,989 \times 10^6 \text{ m}^3$ .

Το δεύτερο σενάριο πρόβλεψης αφορά στην αύξηση των αντλήσεων κατά 5%, για τη δεκαετία 2003-2013. Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι ποσότητες των ετήσιων αντλήσεων ύδρευσης της περιοχής έρευνας, θεωρούνται σταθερές και για τα δυο σενάρια πρόβλεψης. Η παραδοχή αυτή έγκειται στο γεγονός ότι τα δημογραφικά χαρακτηριστικά της περιοχής έρευνας δεν παρουσιάζουν σημαντικές αυξομειώσεις, έτσι ώστε να επηρεάσουν δραστικά το υδρολογικό ισοζύγιο της περιοχής έρευνας. Άλλωστε, το ποιοτικό καθεστώς των

υπόγειων νερών του υπό εξέταση υδροφόρου συστήματος, προβλέπεται τόσο δυσσίωνο, γεγονός που θα έχει ως αποτέλεσμα τη μετατόπιση των υδρευτικών γεωτρήσεων σε περιοχές βορειότερα, όπου απαντώνται νερά καλύτερης ποιότητας.

Σύμφωνα με τις παραπάνω παραδοχές, οι αντλήσεις στο τέλος της δεκαετίας του σεναρίου (έτος 2013) θα περιλάβουν μια ποσότητα απόληψης της τάξης των  $400,273 \times 10^6$  m<sup>3</sup> (με επιπρόσθετα  $7,367 \times 10^6$  m<sup>3</sup> για ύδρευση), ενώ οι συνολικές ποσότητες που θα εμπλουτίσουν το υδροφόρο σύστημα θα ανέλθουν σε  $36,375 \times 10^6$  m<sup>3</sup>, γεγονός που θα επιφέρει έλλειμμα των υπόγειων νερών της τάξης των  $43,89 \times 10^6$  m<sup>3</sup>.

#### 4.5.2.5. Δέλτα του Ποταμού Έβρου

(κύρια βιβλιογραφική πηγή: Πεταλάς κ.ά., 2002a)

Θα πρέπει καταρχάς να γίνει μια διάκριση στο τμήμα του Δέλτα του Π. Έβρου, που εντοπίζεται ανατολικά του χειμάρρου Λουτρού με ελάχιστες γεωτρήσεις και σε εκείνο δυτικά του χειμάρρου όπου παρατηρείται ένας αξιόλογος αριθμός αρδευτικών γεωτρήσεων (σχήμα 4.29). Γενικά πρόκειται για μια πεδινή περιοχή (πανεπίπεδο) 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 ευρύτερες τους περιοχές, το οποίο στη συνέχεια εμπλούτιζε το φρεάτιο οριζόντα εμποδίζοντας τη διείσδυση της θάλασσας (από μη δημοσιευμένη εσωτερική έκθεση της Νομαρχίας Έβρου).



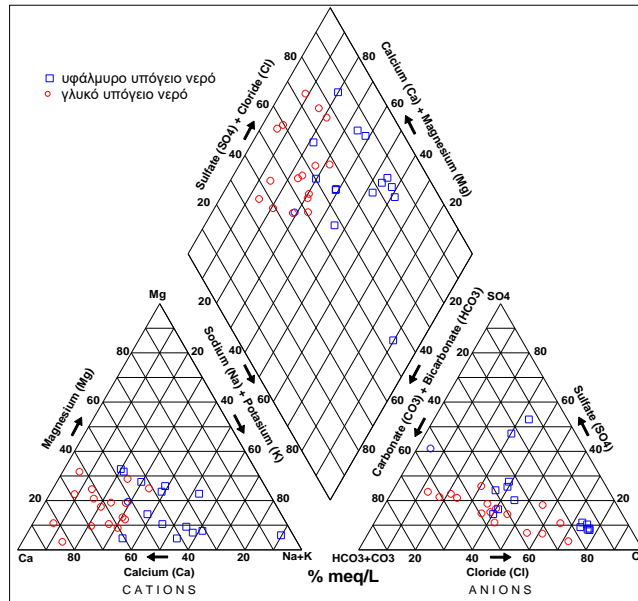
Σχήμα 4.29. Κατανομή του Cl<sup>-</sup> (mg/L) στα υπόγεια νερά του Δέλτα του Π. Έβρου (Πεταλάς κ.ά., 2002a).

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 το φρεάτιο ορίζοντα.

Η κοίτη του Έβρου και μέχρι το ύψος των Κήπων συχνά καταλαμβάνεται από αλμυρά νερά ως αποτέλεσμα της δράσης της παλίρροιας. Ο φρεάτιος ορίζοντας του Δέλτα εμφανίζει μεν υψηλή υδροστατική στάθμη, αλλά στο μεγαλύτερο τμήμα του είναι υφάλμυρος, αφού υπόκειται στη διαδικασία της υφαλμύρισης κυρίως λόγω της έλλειψης κατάλληλης διαχείρισης των υδατικών πόρων στο ανατολικό Δέλτα. Τα κύρια αίτια που επέφεραν την εισχώρηση του θαλασσινού νερού στην περιοχή είναι οι υδρογεωλογικές και τοπογραφικές συνθήκες της περιοχής σε συνδυασμό με ανθρώπινες δραστηριότητες όπως: 1) η εκβάθυνση της κοίτης και ο περιορισμός της ροής του ποταμού Έβρου λόγω συγκράτησης του νερού στα ανάντη για την κάλυψη αρδευτικών αναγκών, 2) ο περιορισμός της ροής του ποταμού σε μία εγκιβωτισμένη και ευθυγραμμισμένη κοίτη και 3) η λειτουργία ενός άστοχα σχεδιασμένου αποστραγγιστικού δικτύου.

Η εκτεταμένη αλμύριση των υπόγειων νερών της περιοχής αυτής αποθάρρυνε την ανόρυξη και λειτουργία πολλών γεωτρήσεων. Αντίθετα, στο δυτικό Δέλτα η παρουσία πολλών ενεργών γεωτρήσεων ποικίλου βάθους, με τις οποίες σήμερα γίνεται υπερεκμετάλλευση των υπόγειων υδροφόρων δημιουργούν ευνοϊκές συνθήκες για διείσδυση της θάλασσας σε συνδυασμό με το σύστημα αποστράγγισης της περιοχής. Σήμερα υγροβιότοποι γλυκού νερού παρατηρούνται στην περιοχή μόνο κατά μήκος του Έβρου, ενώ έκταση περίπου 56 km<sup>2</sup> του Δέλτα καταλαμβάνεται από υγροβιότοπους αλόφιλης βλάστησης ή ξηρούς βοσκότοπους μικτής βλάστησης. Κρυσταλλικό αλάτι έχει αποτεθεί σε μεγάλα τμήματα του Δέλτα και η περιοχή εμφανίζεται ερημοποιημένη. 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 και οι διεθνούς σημασίας υγροβιότοποι της περιοχής να έχουν υποστεί ανεπανόρθωτη ζημία. Η κατάσταση στο δυτικό τμήμα του Δέλτα μπορεί να βελτιωθεί με επαναφορά των αντλήσεων στα φυσιολογικά επίπεδα ή και με την εφαρμογή τεχνητού εμπλουτισμού των υπόγειων νερών. Στο ανατολικό τμήμα η αντιμετώπιση της διείσδυσης της θάλασσας 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 Έβρου (52.386 Km<sup>2</sup>) ανήκει στην Ελλάδα.

Οι αναλύσεις από 32 δείγματα υπόγειων νερών (Πεταλάς, κ.ά., 2002a) παρουσιάζουν τα υδροχημικά χαρακτηριστικά που δείχνει το διάγραμμα Piper (σχ. 4.30).



Σχήμα 4.30. Διάγραμμα Piper βασισμένο σε 32 χημικές αναλύσεις δειγμάτων υπόγειου νερού από το Δέλτα του Π. Έβρου (Πεταλάς κ.ά., 2002a).

Το διάγραμμα Piper φανερώνει ότι ουσιαστικά έχουμε ενεργοποίηση δύο διαδικασιών, την ανταλλαγή ιόντων και την ανάμιξη γλυκού με αλμυρό νερό. Σε σημαντικό αριθμό δειγμάτων η μη ανθρακική σκληρότητα ξεπερνά το 50%, ενώ στα υπόλοιπα κανένα ζεύγος ανιόντος/κατιόντος δεν υπερβαίνει το 50%. Σημαντική εμφανίζεται και η νιτρορύπανση των υπόγειων νερών κυρίως από αγροτικές δραστηριότητες. Γενικά η σχέση κατά βάρος  $Ca^{2+}/Mg^{2+}$  είναι 0,3 στο νερό της θάλασσας και  $>1$  στο πλείστο των γλυκών υπόγειων νερών. Η σχέση κατά βάρος  $Ca^{2+}/Mg^{2+}$  στα υφάλμυρα υπόγεια νερά της περιοχής είναι 6,47, δηλαδή πολύ μεγαλύτερη από την τιμή της σχέσης αυτής στο νερό της θάλασσας (0,3) και μικρότερη από την τιμή της ίδιας σχέσης στα γλυκά υπόγεια νερά (12,12). Ο διαθέσιμος αριθμός των δειγμάτων υπόγειου νερού είναι πολύ περιορισμένος λόγω της εγκατάλειψης των αλμυρών γεωτρήσεων ή και της έλλειψης γεωτρήσεων στις περιοχές με αλμυρό υπόγειο νερό. Κατά συνέπεια, η υδροχημική εικόνα, όπως αποκαλύπτεται από την εξέταση του περιορισμένου αυτού αριθμού δειγμάτων, είναι περισσότερο ενδεικτική.

#### 4.5.3. Πελοπόννησος

Η περίπτωση του παράκτιου αλλουβιακού υδροφόρου του Αργολικού πεδίου αποτελεί ίσως την τυπικότερη περίπτωση θαλάσσιας διείσδυσης στην Ελλάδα, με πλήθος ερευνητικών δραστηριοτήτων με σκοπό την ανάλυση και ερμηνεία του μηχανισμού διείσδυσης της θάλασσας, ήδη από το τέλος της δεκαετίας του 1950. Πρόκειται για χαρακτηριστική διείσδυση λόγω εντατικής εκμετάλλευσης του υπόγειου υδατικού δυναμικού του υδροφόρου με σκοπό τη χρήση του υπόγειου νερού για άρδευση. Ο Γιαννουλόπουλος (2002) ανέπτυξε αριθμητικό μοντέλο προσομοίωσης της ροής στον παράκτιο αλλουβιακό υδροφόρο σχηματισμό Αργολικού πεδίου βασιζόμενος σε εννοιολογικό μοντέλο ανεπτυγμένο σε προηγούμενες έρευνες με σκοπό τη διεξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με συνιστώσες του υδατικού ισοζυγίου της περιοχής. Τα αποτελέσματα της τελευταίας

δεκαετίας καθώς και η ποσοτική επεξεργασία των διαθέσιμων στοιχείων έδειξαν ότι με την εφαρμογή του τεχνητού εμπλουτισμού στο Αργολικό είναι δυνατή η αποθήκευση αξιόλογων ποσοτήτων πηγαίων υδάτων στους υδροφόρους σχηματισμούς και η διατήρηση της διακύμανσης της στάθμης και της ποιότητας των υπόγειων νερών σε επιθυμητά πλαίσια, καθιστώντας έτσι τα υπόγεια νερά ως σημαντική και βιώσιμη πηγή νερού άρδευσης (Πουλοβασίλης κ.ά., 2002). Η διαχείριση του εμπλουτισμού του παράκτιου υδροφόρου της περιοχής, έχει ως αποτέλεσμα την ποσοτική αναβάθμιση του υπόγειου υδατικού δυναμικού της περιοχής, ενώ παρεμποδίζοντας την εισχώρηση του θαλασσινού νερού προς την ενδοχώρα συνεισφέρει στη βελτίωση της ποιότητας των υπόγειων νερών.

Οι Γιόζας κ.ά. (2002) μελετώντας τις γεωλογικές και υδρογεωλογικές συνθήκες που επικρατούν στον πεδινό τομέα της λεκάνης απορροής του Ποταμού Βολιναίου στο δυτικό τμήμα του Κορινθιακού Κόλπου αναφέρουν ότι οι έντονες αντλήσεις στην παράκτια περιοχή των Αραχωβίτικων έχει προκαλέσει την υφαλμύριση του υπόγειου νερού λόγω διείσδυσης του θαλασσινού νερού προς την ενδοχώρα.

Οι Σταμάτης κ.ά. (2002) αναφέρουν ότι η ποιότητα των υπόγειων νερών των τεταρτογενών και νεογενών αποθέσεων στη περιοχή Εξαμίλλια Κορίνθου έχει έντονα υποβαθμιστεί εξαιτίας ανθρωπογενών επιδράσεων, που συνέβαλαν στην αύξηση των συγκεντρώσεων των ιόντων των χλωρίων από την εισχώρηση της θάλασσας, ενώ η συνεχιζόμενη χρήση των υφάλμυρων γεωτρήσεων οδηγεί σε περαιτέρω αλάτωση των εδαφών και την αδιάπρωτη αύξηση της ποιοτικής επιβάρυνσης του υδροφόρου με το χρόνο.

Οι Κουμαντάκης κ.ά. (1999) αναφέρουν την ποιοτική υποβάθμιση του παράκτιου υδροφόρου πεδίου της βόρειας παραλιακής και ημιλοφώδους ζώνης του Νομού Κορινθίας, όπου οι έντονες και αυξανόμενου ρυθμού αντλήσεις επέφεραν την εισχώρηση του θαλασσινού νερού προς την ενδοχώρα υποβαθμίζοντας την ποιότητα του γλυκού νερού του υδροφόρου. Οι ίδιοι (Κουμαντάκης κ.ά., 1999) ερεύνησαν την εφαρμογή τεχνητού εμπλουτισμού στην περιοχή, με σκοπό την ενίσχυση του υπόγειου υδατικού δυναμικού του υδροφόρου, την ανύψωση της πιεζομετρικής επιφάνειας και κατά συνέπεια επαναφορά της φυσικής υδραυλικής βαθμίδας του συστήματος και παρεμπόδιση της θαλάσσιας διείσδυσης.

Οι Καλλέργης κ.ά. (1997) μελετώντας τον απαιτούμενο χρόνο απόπλυσης υφάλμυρων υδροφόρων οι οποίοι έχουν υποστεί την εισχώρηση της θάλασσας, αναφέρουν τις συνθήκες θάλασσας διείσδυσης στις περιοχές της λεκάνης Γλαύκου Αχαΐας, του Αργολικού πεδίου Αργολίδας, της περιοχής Γουβών Κρήτης και των λεκανών Μάννα – Γαλησά Σύρου. Πρόκειται για περιπτώσεις θαλάσσιας διείσδυσης λόγω της εντατικής υπεράντλησής των υδροφόρων, του μεγάλου βάθους των υδρομαστευτικών έργων στους παράκτιους υδροφόρους αλλά και της έλλειψης ορθολογικής διαχείρισης των υπόγειων υδατικών πόρων τους.

Οι Μιμίδης κ.ά. (1997) εξετάζουν τον υδροφόρο της πεδιάδας των Ιρίων του Ν. Αργολίδας ανατολικά του Ναυπλίου, μελετώντας ιδιαίτερα μερικές υδροχημικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα, ενώ από τα δεδομένα των μετρήσεων τεκμηριώνεται η εισβολή της θάλασσας στον υδροφόρο ορίζοντα και ταυτόχρονα φαίνεται ότι αναπτύσσεται έντονα το φαινόμενο της αντίστροφης κατιοανταλλαγής κυρίως στο κέντρο της πεδιάδας.

#### 4.5.4. Νησιωτική ελληνική περιφέρεια

Σχεδόν το σύνολο των νησιωτικών υδροφόρων και ιδιαίτερα αυτοί οι οποίοι εντοπίζονται σε παράκτιες περιοχές, χαρακτηρίζονται από χαμηλό υπόγειο υδατικό δυναμικό. Έρευνες στην ανατολική Λήμνο (Παναγόπουλος κ.α., 2002) κατέδειξαν υψηλές τιμές συγκέντρωσης ιόντων χλωρίου, ενώ παράλληλα, παρατηρήθηκε σημαντική μεταβολή μεταξύ των χειμερινών και των θερινών μηνών, κατά τους οποίους οι συγκεντρώσεις αυξάνονται μέχρι 25% ως αποτέλεσμα της υπεράντλησης που προκαλεί την άμεση διείσδυση θαλασσινού νερού. Η σημαντική αυτή εποχιακή μεταβολή είναι ενδεικτική του ασθενούς υδατικού δυναμικού της περιοχής και των περιορισμένων τιμών υδροχωρητικότητας που εκτιμάται ότι χαρακτηρίζουν το υδροφόρο σύστημα της περιοχής.

Η Διαμαντοπούλου (1999) ερευνώντας τις υδρογεωλογικές συνθήκες που επικρατούν στον υπό-πίεση παράκτιο υδροφόρο του ανώτερου ορίζοντα των πλειοκαινικών ιζημάτων στο βορειοανατολικό τμήμα της Ζακύνθου, παρατηρεί μεταβολές στην πιεζομετρία της περιοχής με αξιοσημείωτο το γεγονός αρνητικών τιμών στάθμης στην παραλιακή ζώνη. Το φαινόμενο παρατηρείται εντονότερα ειδικότερα το Σεπτέμβριο στο τέλος της χαμηλής περιόδου, όταν η υδροστατική στάθμη είναι χαμηλότερη από το επίπεδο της θάλασσας σε όλο το μήκος της ακτής, γεγονός που οδηγεί σε αναστροφή της υδραυλικής βαθμίδας και διείσδυση του θαλασσινού νερού.

Ο Χαρμανίδης (1999) αναφέρει ότι τα υπόγεια νερά των νησιών Σύρου, Τήνου και Αντιπάρου, έχουν υποστεί σημαντική υποβάθμιση εξαιτίας της διείσδυσης της θάλασσας, φαινόμενο που δεν παρατηρείται στην Πάρο.

Οι Μονόπωλης κ.ά. (1997, 1995) μελετώντας τον παράκτιο καρστικό υδροφόρο που τροφοδοτεί την πηγή Αλμυρού Ηρακλείου Κρήτης, συμπεραίνουν ότι η σταδιακή εντατικοποίηση της εκμετάλλευσης του υδροφόρου προκάλεσε την ταχεία ταπείνωση της στάθμης των γεωτρήσεων, η οποία συνοδεύτηκε από ανάλογη υποβάθμιση της ποιότητας των υπόγειων νερών, λόγω της θαλάσσιας διείσδυσης. Ο Οικονομόπουλος (1997, 1995) για την ίδια περίπτωση αναφέρει ότι δικές του έρευνες συνδέουν το φαινόμενο της εισόδου της θάλασσας από τις εσταβέλλες του Μπαλί με την έξοδο του υφάλμυρου μίγματος από την πηγή του Αλμυρού.

Οι Λαμπράκης κ.ά. (1995) μελετώντας τα υδροχημικά χαρακτηριστικά του γρανοδιοριτικού υδροφόρου της Σερίφου, απέδειξαν ότι ο χημικός χαρακτήρας των υπόγειων νερών είναι επηρεασμένος από την παρουσία των μεταλλοφόρων ορυκτών του νησιού καθώς και από την επίδραση της θαλάσσιας διείσδυσης.

Οι Διαμαντής κ.ά. (1991) εξετάζοντας την υδρογεωλογική συμπεριφορά των προσχωματικών πεδίων Πρίνου Ραχωνίου, αναφέρουν ότι η ποιοτική υποβάθμιση των υπόγειων νερών σε ένα εντελώς περιορισμένο παράκτιο πεδίο, όπως αυτό της περιοχής έρευνας, υποδεικνύουν το φαινόμενο της θαλάσσιας διείσδυσης ως τη μόνη πηγή ποιοτικής επιβάρυνσης.



## 5. ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΤΑΣΕΙΣ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ ΤΗΣ ΘΑΛΑΣΣΙΑΣ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΤΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ

(κύριες βιβλιογραφικές πηγές: Διαμαντής και Πλιάκας, 2011, Καλλιώρας, 2002, 2008, Πεταλάς κ.α., 2002b)

### 5.1. Διαχειριστικές παράμετροι για τη θαλάσσια διείσδυση

Ο όρος θαλάσσια διείσδυση περιλαμβάνει το σύνολο των φαινομένων που αφορούν στην εισχώρηση αλμυρού νερού σε παράκτιους γλυκούς υδροφόρους ή ακόμα τη διείσδυση αλμυρού νερού σε εκβολές ή δέλτα ποταμών. Παρόλα αυτά, η παρουσία αλμυρού νερού μπορεί να εντοπιστεί όχι μόνο σε παράκτιους υδροφόρους, αλλά και σε αυτούς της ενδοχώρας, προκαλώντας παρόμοια περιβαλλοντικά προβλήματα της ίδιας κλίμακας και στις δυο περιπτώσεις. Το φαινόμενο της θαλάσσιας διείσδυσης αποτελεί μείζον θέμα των υπόγειων υδατικών πόρων σε κάθε παράκτιο περιβάλλον, και σε συνδυασμό με τη συνεχή αύξηση του πληθυσμού στις εν λόγω περιοχές, αποτελεί εδώ και μερικές δεκαετίες διαχειριστικό πρόβλημα.



Σχήμα 5.1. Σχηματική απόδοση διαχειριστικού πλαισίου για το φαινόμενο της θαλάσσιας διείσδυσης.

Σε γενικές γραμμές, θεωρείται ότι υπάρχουν τέσσερις βασικές διαχειριστικές συνιστώσες για την αντιμετώπιση του προβλήματος, οι οποίες περιλαμβάνουν μεταξύ άλλων τα εξής (σχ. 5.1):

- Μετρήσεις: για τον εντοπισμό και χαρακτηρισμό της ήδη υπάρχουσας κατάστασης, τόσο όσον αφορά τις υδρογεωλογικές, όσο και τις χωρικές συνθήκες της διεπιφάνειας.
- Παρακολούθηση: η ανάπτυξη κατάλληλου προγράμματος παρακολούθησης για το χωροχρονικό έλεγχο των αλλαγών της διεπιφάνειας. Αυτό συνήθως επιτυγχάνεται με την ανάπτυξη δικτύου υδρογεωτρήσεων δειγματοληψίας και παρακολούθησης σε κρίσιμα σημεία της περιοχής έρευνας.
- Μαθηματικό ομοίωμα: αποτελεί το μέσο ή το εργαλείο για τη μελέτη και ομοίωση του φαινομένου, παρέχοντας τη δυνατότητα πρόβλεψης σε μακροχρόνια κλίμακα της κίνησης ή ακόμα της ανταπόκρισης της διεπιφάνειας σε αλλαγές του πληθυσμού, χρήσης νερού, βροχοπτώσεων και άλλων παραμέτρων που επηρεάζουν ποιοτικά και ποσοτικά το παράκτιο υπόγειο υδατικό δυναμικό.
- Τροποποίηση: η χρήση των αποτελεσμάτων της πρόβλεψης για την ανακατανομή του δικτύου των υδρογεωτρήσεων και την τροποποίηση των αντλήσεων στα σημεία απόληψης υπόγειου νερού.

Στη συνέχεια αναλύονται οι παραπάνω έννοιες για την επιστημονική προσέγγιση του θέματος. Το σύνολο των παραπάνω διαχειριστικών συνιστωσών πρέπει να εφαρμοστεί σε μια αποτελεσματική οικονομική βάση, που θα εγγυάται μεταξύ άλλων την αποτελεσματικότητά τους, ως ένα ολοκληρωμένο διαχειριστικό σύστημα.

#### 5.1.1. Μετρήσεις

Οι μετρήσεις που θα λάβουν χώρα κατά την εφαρμογή ενός διαχειριστικού σχεδίου για την αντιμετώπιση της θαλάσσιας διείσδυσης ανήκουν σε δυο διαφορετικές κατηγορίες. Αρχικά αφορούν αυτές που αποσκοπούν στον εντοπισμό του γεωλογικού περιβάλλοντος και του υδρολογικού και υδρογεωλογικού καθεστώτος της περιοχής. Επιπρόσθετα, θεωρείται αναγκαίος ο χαρακτηρισμός των γεωμορφολογικών αλλαγών και ο εντοπισμός των πιο σημαντικών ανωμαλιών (διαπερατά, ημι-περατά και αδιαπέρατα στρώματα) καθώς επίσης και η εντόπιση των καλλιεργητικών ή γεωργικών δραστηριοτήτων που επηρεάζουν τις γεωλογικές και υδρολογικές συνθήκες της περιοχής. Σε δεύτερο επίπεδο, θεωρείται απαραίτητος ο επαρκής αριθμός μετρήσεων για τον εντοπισμό της χωρικής έκτασης του μετώπου της θαλάσσιας διείσδυσης. Οι παραπάνω μετρήσεις θεωρούνται ίσως το σημαντικότερο βήμα για τη συνολική εφαρμογή και σχεδιασμό του διαχειριστικού προγράμματος, η εγκυρότητα των οποίων θα καθορίσουν την αξιοπιστία των επακόλουθων παραμέτρων.

Σε γενικές γραμμές, οι γεωτρήσεις δειγματοληψίας και παρακολούθησης δεν αποτελούν από μόνες τους ένα κριτήριο για μια πλήρη υδρογεωλογική έρευνα, αφού ο αριθμός τους συνήθως είναι περιορισμένος, καλύπτοντας μια μικρή έκταση της περιοχής έρευνας. Γι' αυτό λοιπόν, πολλές φορές ενδείκνυται η χρήση και εφαρμογή γεωφυσικών μεθόδων έρευνας, οι οποίες θα χρησιμεύσουν, τόσο στην απεικόνιση του γεωλογικού προφίλ της περιοχής, όσο και για να παρέχουν καθοδήγηση για τυχόν ανόρυξη επιπρόσθετων δειγματοληπτικών

γεωτρήσεων. Οι γεωφυσικές μέθοδοι οι οποίες θεωρούνται ιδανικότερες για την περίπτωση της θαλάσσιας διείσδυσης και κατ' επέκταση του μετώπου υφαλμύρισης, είναι αυτές της ηλεκτρικής μεθόδου, αφού έχουν τη δυνατότητα να εντοπίσουν και να χαρτογραφήσουν κατά μια έννοια την αλμυρή σφήνα. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα των γεωλογικών σχηματισμών συνδέεται άμεσα με το σύνολο των διαλυμένων στερεών (Total Dissolved Solids, TDS) του περιεχόμενου υπόγειου νερού, γιαυτό και οι μέθοδοι της ηλεκτρικής αντίστασης καθώς και οι ηλεκτρομαγνητικές μέθοδοι αποτελούν χρήσιμες τεχνικές για τον εντοπισμό της αλμυρής σφήνας.

Η επιλογή της μεθόδου εξαρτάται άμεσα από την έκταση της περιοχής έρευνας και τον αριθμό των απαραίτητων στοιχείων πεδίου. Γενικά οι γεωφυσικές μέθοδοι αποτελούν ένα γρήγορο και αποδοτικό οικονομικά μέσο για την παροχή πληροφοριών σε σχέση με τη στρωματογραφία της περιοχής και τον εντοπισμό του θαλάσσιου μετώπου διείσδυσης.

### 5.1.2. Παρακολούθηση

Η διεπιφάνεια μεταξύ του γλυκού και αλμυρού νερού δεν αποτελεί μια γραμμή η οποία διαχωρίζει ευδιάκριτα τα δυο υγρά, όπως συνήθως αναπαριστάται στο εννοιολογικό μοντέλο. Η δομή της αφορά περισσότερο μια δυναμική μεταβατική ζώνη συγκεκριμένου πάχους, το ύψος και η κλίση της οποίας μεταβάλλεται με το χρόνο. Όπου δυνατόν, οι γεωτρήσεις παρακολούθησης θα πρέπει να ανορυχθούν σε σχετικά μεγάλο βάθος ώστε κατά τη δειγματοληψία να είναι εφικτή η παρακολούθηση των αλλαγών του μετώπου της θαλάσσιας διείσδυσης. Οι αλλαγές λαμβάνουν χώρα λόγω βραχυπρόθεσμων βαρομετρικών και παλιρροιακών μεταβολών, καθώς και μακροπρόθεσμων εποχιακών μεταβολών των βροχοπτώσεων και της εκμετάλλευσης του υπόγειου υδατικού δυναμικού. Για παράδειγμα ο Kohout (1960), χρησιμοποίησε 39 δειγματοληπτικές υδρογεωτρήσεις, για τον προσδιορισμό των υδραυλικών παραμέτρων του γλυκού και αλμυρού νερού στον υδροφόρο Biscayne, στο Miami, Florida, και τον εντοπισμό της αλμυρής σφήνας. Σύμφωνα με τους Benson et al. (1986), η έρευνα του Kohout θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί με μόλις 8 γεωτρήσεις δειγματοληψίας, δεδομένου ότι η ανόρυξή τους θα είχε γίνει σε μεγάλο βάθος και τα φίλτρα τους θα είχαν μεγάλο μήκος (TECHNOTES). Οι Yuhr and Benson (1991), ότι ο ποιοτικός προσδιορισμός του μετώπου της θαλάσσιας διείσδυσης, μπορεί να επιτευχθεί με μετρήσεις της ηλεκτρικής αγωγιμότητας σε διαστήματα των 2,5 με 5 ft διαμέσου του φίλτρου των γεωτρήσεων. Στις περισσότερες περιπτώσεις, η σχέση μεταξύ της συγκέντρωσης των χλωριόντων και της ηλεκτρικής αγωγιμότητας απαιτεί τη χρήση απλών μαθηματικών εξισώσεων. Στη συνέχεια μπορεί να σχεδιαστεί η καμπύλη βαθμονόμησης (calibration curve) για τον προσδιορισμό μακροχρόνιων δεδομένων.

### 5.1.3. Μαθηματικά ομοιώματα για πρόβλεψη και αποτίμηση

Η πρόβλεψη της χωροχρονικής μεταβολής της θαλάσσιας σφήνας εξαιτίας της αλλαγής του πληθυσμού και της εκμετάλλευσης των υπόγειων υδατικών πόρων σε μακροχρόνια κλίμακα, επιτυγχάνεται με τη χρήση μαθηματικών ομοιωμάτων και μόνο.

Όταν το θαλασσινό νερό βρίσκεται σε δυναμική ισορροπία με το γλυκό υπόγειο νερό παράκτιου υδροφόρου, η χρήση της μαθηματικής έκφρασης των Ghyben-Herzberg, αποτελεί μια αποτελεσματική προσέγγιση για τον προσδιορισμό της αλμυρής σφήνας. Η παραπάνω μαθηματική σχέση, αποτελεί ίσως την πιο απλουστευμένη προσέγγιση του θέματος, και βρίσκει εφαρμογή στη χρήση μονοδιάστατων ομοιωμάτων (one-dimensional model).

Η εφαρμογή δισδιάστατων ομοιωμάτων σε κατακόρυφη επίπεδη επιφάνεια (vertical plane) βασίζονται στη χρήση μαθηματικών εξισώσεων της ροής υγρών και μεταφοράς αλατούχων ρυπαντών και αποτελούν το αμέσως επόμενο επίπεδο στην ομοίωση της θαλάσσιας διείσδυσης.

Τα επαρκώς αναπτυγμένα τρισδιάστατα ομοιώματα, αποτελούν πλέον την πιο ολοκληρωμένη μαθηματική έκφραση του φαινομένου της θαλάσσιας διείσδυσης. Η εφαρμογή τους διευθετεί, εξομαλύνει και προσαρμόζει την ανισοκατανομή των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της ακτογραμμής, των ανθρωπογενών δραστηριοτήτων ως προς την εκμετάλλευση των υπόγειων νερών, των ανομοιογενειών των υδροφόρων σχηματισμών, των προσωρινών μεταβολών των ορίων της περιοχής, και τέλος των χωροχρονικών μεταβολών της συγκέντρωσης των αλάτων. Οι διάφοροι τύποι μαθηματικών ομοιωμάτων, καθώς και οι περιορισμοί και τα πλεονεκτήματα που συσχετίζονται με αυτούς παρουσιάζονται σχηματικά παρακάτω.

Πίνακας 5.1. Σχηματική απόδοση διαφόρων τύπων μαθηματικών ομοιωμάτων.

ΤΥΠΟΣ ΟΜΟΙΩΜΑΤΟΣ	ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ	ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ
Μονοδιάστατο, σταθερή κατάσταση, σχέση Ghyben-Herzberg	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Εύκολο στη χρήση</li> <li>• Δεν απαιτεί πολλά στοιχεία και δεδομένα</li> <li>• Δεν απαιτεί τη χρήση Η/Υ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Περίπτωση σταθερής κατάστασης</li> <li>• Περιορισμοί υποθέσεων</li> </ul>
Δισδιάστατο, δυναμικό αριθμητικό ομοίωμα	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Επαρκές σε πολυπλοκότερες καταστάσεις</li> <li>• Ρεαλιστική απεικόνιση του μηχανισμού θαλάσσιας διείσδυσης</li> <li>• Υπολογισμός πολυποίκιλων φυσικών καταστάσεων</li> <li>• Ικανότητα πραγματοποίησης υποθετικών εκτιμήσεων</li> <li>• Υπολογισμός προσωρινών ασταθειών</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Απαιτεί χρήση Η/Υ</li> <li>• Αριθμητικές δυσκολίες</li> <li>• Απαιτεί εκπαίδευση</li> </ul>
Τρισδιάστατο, δυναμικό αριθμητικό ομοίωμα	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Όπως παραπάνω</li> <li>• Υπολογισμός τρισδιάστατων χαρακτηριστικών</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Όπως παραπάνω</li> <li>• Απαιτεί μεγάλη εκπαίδευση</li> </ul>

#### 5.1.4. Τροποποίησηση

Η εκτεταμένη και αλόγιστη άντληση υπόγειου νερού σε παράκτιους υδροφόρους, έχει ως αποτέλεσμα τη συνεχή μετατόπιση του μετώπου της θαλάσσιας διείσδυσης προς την ενδοχώρα. Για την αποφυγή του παραπάνω προβλήματος προτείνεται μια σειρά τροποποιήσεων στο γενικότερο πλαίσιο άντλησης, όπως η μεταβολή των θέσεων των υδρογεωτρήσεων, όπως επίσης η μείωση της παροχής άντλησης των υφιστάμενων υδρογεωτρήσεων (Καλλέργης, 2000).

### 5.2. Σύγχρονες τάσεις αντιμετώπισης

Το δεύτερο μισό του περασμένου αιώνα χαρακτηρίζεται από έξαρση της αστικοποίησης, ιδιαίτερα σε παράκτιες περιοχές του πλανήτη. Το γεγονός αυτό οδήγησε σε αυξημένη χρήση του νερού των παράκτιων υδροφόρων με αποτέλεσμα να διαταραχθεί η υφιστάμενη, από πολύ παλιά, φυσική ισορροπία ανάμεσα στο γλυκό νερό και στο αλμυρό νερό εκεί όπου υπάρχει υδραυλική επικοινωνία ανάμεσα στο γλυκό νερό και στο αλμυρό νερό. Ελάχιστο νερό της θάλασσας, της τάξης του 2% μέσα στο γλυκό νερό, καθιστά το γλυκό νερό μη πόσιμο, ενώ το αλμυρό νερό αποτελεί τον πιο συνήθη ρυπαντή του γλυκού νερού.

Ο όρος διείσδυση αλμυρού νερού περιγράφει την ιδιαίτερη εκείνη κατάσταση όπου νερό της θάλασσας αντικαθιστά ή αναμιγνύεται με το γλυκό νερό ενός υδροφόρου ως απόκριση σε μια αλλαγή στο υδρογεωλογικό περιβάλλον. Ο ίδιος όρος χρησιμοποιείται συχνά για να περιγράψει οποιαδήποτε περίπτωση όπου υδάτινα σώματα διαφορετικής αλατότητας υπάρχουν στο ίδιο υπόγειο υδροφόρο σύστημα. Η φυσικοχημική αλληλεπίδραση ανάμεσα στο γλυκό νερό και στο αλμυρό νερό είναι ιδιαίτερα πολύπλοκη (Πεταλάς κ.ά., 2001). Το πρόβλημα της αλμυρής διείσδυσης απαιτεί την εφαρμογή ιδιαίτερων διαχειριστικών τεχνικών. Η κατανόηση της προέλευσης του αλμυρού νερού, της έκτασης του προβλήματος και του υδραυλικού καθεστώτος του υπόγειου υδροφόρου συστήματος είναι θεμελιώδους σημασίας στην αποτελεσματική διαχείριση ενός προβλήματος αλμύρισης από διείσδυση.

### 5.3. Διαχείριση του προβλήματος της διείσδυσης της θάλασσας

Η διείσδυση της θάλασσας προκαλείται κυρίως από τη μείωση της ροής του γλυκού νερού προς τη θάλασσα ως αποτέλεσμα της υπεράντλησης του υπόγειου νερού, που προέρχεται από την εκροή από ελεύθερο υδροφόρο, ή την απελευθέρωση νερού από ελαστική αποθήκευση, ή/και την εκροή από τη διεπιφάνεια θαλάσσιου νερού/γλυκού νερού, όπου το γλυκό νερό αντικαθίσταται από το αλμυρό νερό (Essaid, 1986). Η αλμυρή σφήνα κινείται συνεπώς προς την ενδοχώρα, η εκροή μειώνεται και το πάχος της αλμυρής σφήνας αυξάνει. Εάν διατηρηθεί κάποια ροή γλυκού νερού, τότε ενδεχομένως να αναπτυχθεί μια νέα κατάσταση ισορροπίας.

Ο έλεγχος της αλμυρής διείσδυσης απαιτεί ικανοποιητική γνώση των υδραυλικών συνθηκών του υδροφόρου και της πηγής του αλμυρού νερού. Η γνώση της έκτασης ενός

προβλήματος υφαλμύρισης και η εκτίμηση της συμπεριφοράς του αλμυρού υδάτινου σώματος 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 παρεμπόδιση της με τη ρύθμιση του υδροφόρου, ώστε η σφήνα του θαλάσσιου νερού να ελέγχεται σε ένα 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. 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 ή αγροτικές εφαρμογές.

Οι μέθοδοι προστασίας των υπόγειων νερών από τη θαλάσσια διείσδυση αποβλέπουν (Bear, 1979):

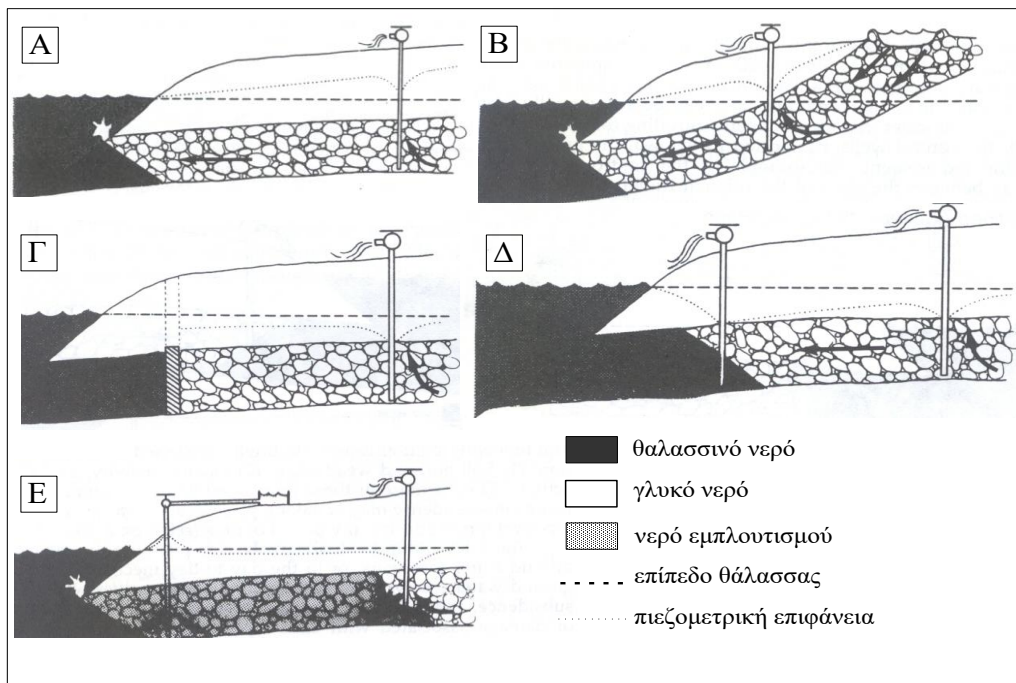
- στην εμπόδιση της πλήρους ή μερικής διαφυγής του γλυκού νερού προς τη θάλασσα,
- στην αύξηση του υδραυλικού φορτίου και κατά συνέπεια του ρυθμού ροής στον υδροφόρο και
- στη ρύθμιση των αντλήσεων σε ορισμένες ζώνες με σκοπό να μη παρατηρείται η κρίσιμη ανύψωση του αλμυρού νερού.

Οι κύριες μέθοδοι παρεμπόδισης της θαλάσσιας διείσδυσης είναι:

1. Μείωση των αντλούμενων ποσοτήτων υπόγειου νερού και διατήρηση της στάθμης του υπόγειου νερού πάνω από το επίπεδο της θάλασσας με τροποποίηση του σχεδίου άντλησης (ASCE, 1987), (σχ. 5.2-A).
2. Εφαρμογή επιφανειακού τεχνητού εμπλουτισμού με κατάκλυση, όταν οι συνθήκες το επιτρέπουν, με στόχο την αναστροφή της υδραυλικής κλίσης προς την κατεύθυνση της θάλασσας (ASCE, 1987), (σχ. 5.2-B).
3. Κατασκευή υπόγειου φυσικού φραγμού αδιαπέρατου (σε αβαθείς σχηματισμούς), που διακόπτει την υδραυλική επικοινωνία των υδροφόρων με τη θάλασσα (εδώ παρουσιάζονται κίνδυνος αύξησης της αλατότητας και υποχώρησης του εδάφους σε υπό πίεση συνθήκες, κατασκευαστικές δυσκολίες και οικονομικά προβλήματα), (ASCE, 1987), (σχ. 5.2-Γ).
4. Δημιουργία κοιλώματος άντλησης (rumping-trough), μια ιδιαίτερα αποτελεσματική μέθοδος, που περιλαμβάνει τη δημιουργία μιας γραμμής από γεωτρήσεις ελεγχόμενης άντλησης αλμυρού νερού, κατάλληλα διατεταγμένες κατά μήκος της ακτής ανάμεσα στις παραγωγικές γεωτρήσεις και τη διαδρομή του νερού της θάλασσας και με ρυθμό άντλησης ελαφρώς μεγαλύτερο του αρχικού ρυθμού διείσδυσης του θαλασσινού νερού (ASCE, 1987, California Department of Water Resources, 1970), (σχ. 5.2-Δ). Κατά την εφαρμογή της μεθόδου παρατηρείται αλμύριση αξιοσημείωτων ποσοτήτων γλυκού νερού, ενώ η στάθμη του κοιλώματος είναι η χαμηλότερη σε όλη την υδρογεωλογική λεκάνη. Όταν η μέθοδος συνδυάζεται με γεωτρήσεις εμπλουτισμού (σχ. 5.2-E), τότε

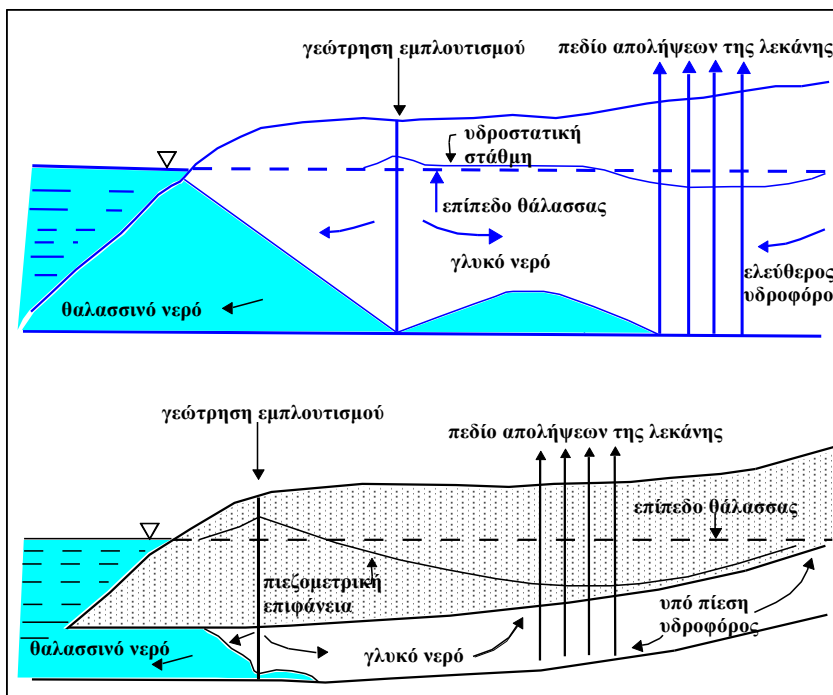
ελαχιστοποιείται ο κίνδυνος υποχώρησης και πλημμυρίσματος του εδάφους, δεν περιορίζεται το δυναμικό αποθήκευσης και το εγχείρημα είναι ευέλικτο (Bruington and Seares, 1965).

5. Δημιουργία υδραυλικού υβώματος (ανύψωση της υδροστατικής ή πιεζομετρικής επιφάνειας) μετά από έντονο τεχνητό εμπλουτισμό με πεδία κατάκλυσης ή γεωτρήσεις εμπλουτισμού ή συνδυασμό των δύο όπως υπαγορεύεται από τις επικρατούσες γεωλογικές συνθήκες (ASCE, 1987) (σχ. 5.3). Το νερό κινείται μακριά από το ύβωμα και όταν το ύψος του υβώματος ελέγχεται, η αλμύριση του χρησιμοποιούμενου γλυκού νερού που θα προκληθεί θα είναι περιορισμένη και το μεγαλύτερο μέρος του θα είναι διαθέσιμο για επαναχρησιμοποίηση. Σε υπό πίεση υδροφόρους η εφαρμογή της μεθόδου με γεωτρήσεις εμπλουτισμού αποδείχθηκε πολύ αποτελεσματική (Larson, et al., 1977).



Σχήμα 5.2. Μέθοδοι αντιμετώπισης της θαλάσσιας διείσδυσης σε υπό πίεση υδροφόρους με: (Α) ελεγχόμενες αντλήσεις, (Β) επιφανειακό τεχνητό εμπλουτισμό, (Γ) υπόγειο φυσικό

φραγμό, (Δ) κοίλωμα άντλησης (rumping-trough), (E) συνδυασμό ελεγχόμενων αντλήσεων και γεωτρήσεων εμπλουτισμού (από ASCE, 1987).



Σχήμα 5.3. Δημιουργία υδραυλικού υβώματος από εμπλουτισμό με γεωτρήσεις σε ελεύθερο και υπό πίεση υδροφόρο.

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 τη διείσδυση αλμυρού νερού. Όμως, εδώ εγκυμονεί ο κίνδυνος να έχουμε διαρροή από τον υπερκείμενο προς τον υποκείμενο 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 παράσχουν μια διαδρομή μεταβίβασης αλμυρού νερού από τον υπερκείμενο προς τον υποκείμενο υδροφόρο.

### 5.3.1. Φραγμοί ελέγχου της θαλάσσιας διείσδυσης

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 ακόμη απολέσει την ιδιότητά τους ως πηγές νερού και αυτό οφείλεται στην πολύ αργή ταχύτητα κίνησης του αλμυρού νερού. Οι σχετικοί υπεύθυνοι φορείς των περιοχών αυτών βέβαια πρέπει να λύσουν το πρόβλημα, γιατί αν το αλμυρό νερό εισβάλει στον υδροφόρο, τότε θα πάρει εκατοντάδες χρόνια για την

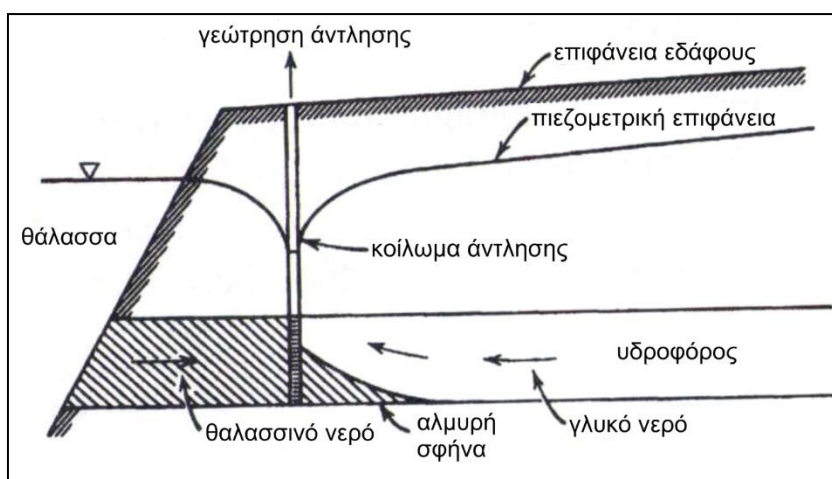


επαναφορά της αλμυρότητας του υδροφόρου στα επίπεδα εκείνα πριν την εκμετάλλευσή του.

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

#### Φραγμοί άντλησης

Οι φραγμοί ή κοιλώματα άντλησης (rumping trough) δημιουργούνται από τις συνεχείς αντλήσεις κατά μήκος μιας γραμμής γεωτρήσεων πολύ κοντά στην ακτογραμμή, με αποτέλεσμα το γλυκό νερό να ρέει προς τη θάλασσα (σχ. 5.4). Το αντλούμενο γλυκό νερό μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διάφορες χρήσεις στην ενδοχώρα.



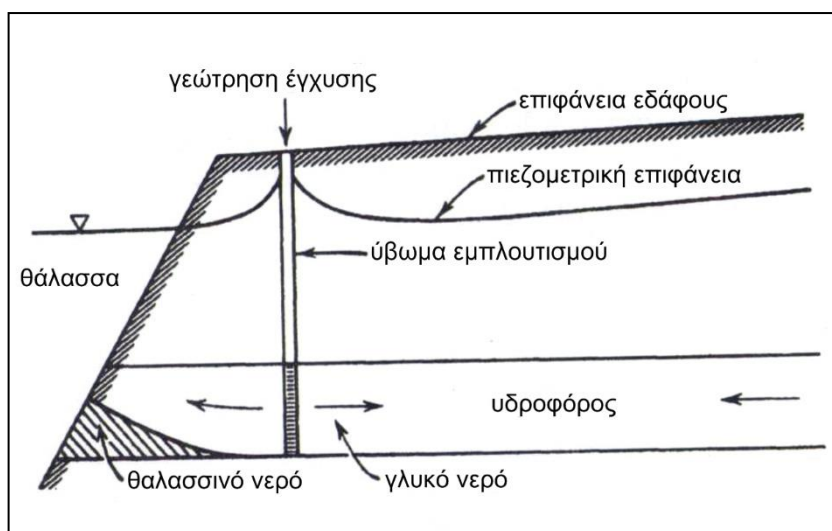
Σχήμα 5.4. Έλεγχος θαλάσσιας διείσδυσης με τη δημιουργία φραγμού άντλησης παράλληλα προς την ακτή (από Todd and Mays, 2005).

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 δημιουργήθηκε στον υδροφόρο Oxnard, στην Oxnard Plain, Ventura County, στις ΗΠΑ, από το California Department of Water Resources (CDWR) (Stone, 1978). Ο πειραματικός αυτός φραγμός αποτελούμενος από 5 γεωτρήσεις σταμάτησε να λειτουργεί το 1968 εξαιτίας της διάβρωσης και επειδή αποδείχθηκε αναποτελεσματικός στην παρεμπόδιση της διείσδυσης της θάλασσας. Οι φραγμοί αυτού του τύπου μπορεί να αντλήσουν και χρήσιμο γλυκό νερό και αποτελούν πολύτιμη λύση σε περιοχές που το γλυκό νερό σπανίζει. Γενικά οι Kashef (1977) και 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 ειδικές 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 υδροφόρο.

#### Φραγμοί εμπλουτισμού (έγχυσης) γλυκού νερού

Υβώματα εμπλουτισμού (φραγμοί εμπλουτισμού) σχηματίζονται από γεωτρήσεις εμπλουτισμού ή έγχυσης (injection wells) με σκοπό τη διατήρηση ενός υβώματος πίεσης κατά μήκος της ακτογραμμής (σχ. 5.5). 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. Το δημιουργούμενο ύβωμα προστατεύει τον υδροφόρο από τη θαλάσσια 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.



Σχήμα 5.5. Έλεγχος θαλάσσιας διείσδυσης με τη δημιουργία φραγμού εμπλουτισμού παράλληλα προς την ακτή (από Todd and Mays, 2005).

Ο σχεδιασμός και ο τρόπος κατασκευής των γεωτρήσεων εμπλουτισμού εξαρτώνται από τις ιδιαίτερες συνθήκες της θέσης της γεώτρησης, δίνοντας ιδιαίτερη προσοχή στον περιφραγματικό της γεώτρησης, το φίλτροσωλήνα της γεώτρησης, το χαλικόφιλτρο, την πάκτωση με υδαρές κονίαμα/τσιμέντο γύρω από τον περιφραγματικό και την αντλία. Το νερό που θα χρησιμοποιηθεί πρέπει να είναι υψηλής ποιότητας για να μειώνει τη συχνότητα της απόφραξης (clogging), να αυξάνει την περίοδο λειτουργίας της γεώτρησης και να μειώνει το κόστος καθαρισμού. Επιπροσθέτως, η χλωρίωση του νερού εμπλουτισμού προστατεύει τους σωλήνες, εμποδίζει τις δυναμικές διαρροές και μειώνει τη βιορύπανση (βιοαπόφραξη) των σχηματισμών (fouling) (Bloetscher, 1999).

Η γεώτρηση εμπλουτισμού, όταν υπάρχει απόφραξη και η στάθμη του νερού εμπλουτισμού υπερβαίνει τα αποδεκτά επίπεδα, πρέπει να υποβάλεται στη διαδικασία της επανανάπτυξης ανά τριετία (Brington, 1968). 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 χαλκόφιльтρου ή ακόμη και να προκαλέσουν βλάβες στην ίδια τη γεώτρηση.

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 (Atkinson, 1968).

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 (Bloetscher, 1999). Τα κριτήρια ποιότητας του νερού εμπλουτισμού θα πρέπει να τίθενται με βάση τα κύρια και δευτερεύοντα σταθερότυπα του πόσιμου νερού, όπως γίνεται στις ΗΠΑ (Crook et al., 1991). Οι παράμετροι που εξετάζονται στο νερό εμπλουτισμού στις Η.Π.Α. είναι οι ακόλουθες (EPA, 1999): οι πτητικές οργανικές ενώσεις, όπως βρωμοφόρμιο, χλωροφόρμιο, διβρωμοχλωρομεθάνιο, διβρωμοδιχλωρομεθάνιο, διχλωροοξικό οξύ, διχλωρομεθάνιο, τα ανόργανα χημικά, όπως Al, An, As, αμίαντος, Ba, Be, Cd, Cr, Co, Cu, κυανιούχα άλατα, F, Fe, Pb, Mn, Hg, νιτρικά, νιτρώδη και το σύνολό τους με τη μορφή του N, Sn, Ag, τα ραδιονουκλεΐδια, όπως σωματίδια άλφα και βήτα, Ra-226, Ra-228, Rn-222, Sr-90, T, U, οι χημικές παράμετροι Cl, αφρώδεις παράγοντες (MBAS), pH, θεϊκά, TDS, Ca, Mg, Na, K, και συνολικός οργανικός άνθρακας.

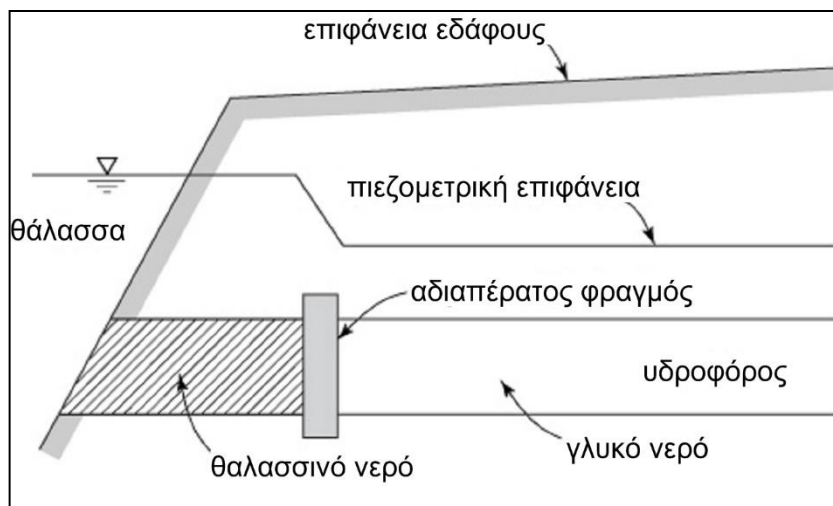
Η κατασκευή του φραγμού εμπλουτισμού της Los Angeles County Flood District κόστισε από το 1953 έως το 1973, 20 εκατομμύρια \$, μη συμπεριλαμβανομένου του κόστους προμήθειας (αγοράς) του νερού εμπλουτισμού και της τιμαριθμικής αναπροσαρμογής (DRBC, 1981). Το ετήσιο κόστος συντήρησης και λειτουργίας του φραγμού, μήκους 32 km, ήταν κατά προσέγγιση 1,5 εκατομμύρια \$ την περίοδο 1978-1980, ενώ το ετήσιο κόστος του φιλτραρισμένου νερού εμπλουτισμού ήταν 0,086 \$ / m<sup>3</sup> νερού (Bookman-Edmonston Engineers, 1982). Το μέσο λειτουργικό κόστος για την περίοδο 1978-1980 ήταν 44.000 \$ ανά km (6 γεωτρήσεις / km), δηλαδή 7000\$ ανά γεώτρηση για μια υπολογισμένη έγχυση ανά ημέρα της τάξης των 3,8 x 10<sup>5</sup> m<sup>3</sup> 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 που εμπλουτίζει τον υδροφόρο και αντλείται για να χρησιμοποιηθεί.

Ο Stone (1978) συνοψίζει, για το Oxnard Plain, το κόστος κεφαλαίου σε 18,3 εκατομμύρια \$ και το ετήσιο λειτουργικό κόστος σε 430000 \$. Για φραγμό μήκους 13 km, το 1980, το κόστος κεφαλαίου είναι 1,4 εκατομμύρια \$ / km ενώ το ετήσιο κόστος συντήρησης είναι 34.000 \$ / km. Το κόστος κεφαλαίου και το λειτουργικό κόστος ανά

μονάδα νερού εμπλουτισμού είναι 1,225 \$ και 0,028 \$ / m<sup>3</sup> αντίστοιχα, αν λάβουμε υπόψη ότι 1,5 δισεκατομμύρια m<sup>3</sup> νερού εγχέονται ετησίως στον υδροφόρο.

#### 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 (sheet piles), ή την κατασκευή τάφρων από άργιλο, ή την έγχυση αδιαπέρατων υλικών μέσω γεωτρήσεων, όπως μπεντονίτη, υδατοστεγανή άργιλο, ρευστοκονίαμα από τσιμέντο (σχ. 5.6).



Σχήμα 5.6. Έλεγχος θαλάσσιας διείσδυσης με την κατασκευή στεγανού υπόγειου διαφράγματος παράλληλα προς την ακτή (από Todd and Mays, 2005).

Ο Kashef (1997) υποδηλώνει ότι, παρά την τεχνική αρτιότητα των μεθόδων κατασκευής τους, το κόστος είναι συνήθως πάρα πολύ υψηλό, επειδή το απαιτούμενο βάθος είναι μεγάλο. Ακόμη και στις περιπτώσεις των ανώτερων στρωμάτων όπου το κόστος μπορεί να μην είναι απαγορευτικό, ο Kashef σημειώνει ότι μπορεί να έχουμε πλημμύρισμα παράκτιων χαμηλών περιοχών πίσω από το φραγμό. Υπολογισμοί του μοναδιαίου κόστους για τοίχια από υδαρό κονίαμα κυμαίνονται μεταξύ 20 και 40 \$ / m<sup>2</sup>. Έτσι, για ένα τοίχιο με εύρος παρόμοιο με το στάνταρτ εξοπλισμό εκσκαφής και 10 m βάθους, το κόστος είναι 200-400 \$ ανά τρέχον m του τοιχίου. 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 τοίχια μπορεί να είναι 100% αποτελεσματικά αλλά στην πράξη πάντα υπάρχουν κάποια κενά στην κατασκευή τους.

#### Βιολογικοί φραγμοί

Καινοτόμες τεχνολογίες χρειάζονται για την παρεμπόδιση της προώθησης του μετώπου της διείσδυσης της θάλασσας η οποία απειλεί τις παροχές πόσιμου νερού των παράκτιων κοινοτήτων. Οι James κ.ά. (2001) παρουσιάζουν μια πρωτοποριακή μέθοδο

που αναπτύχθηκε μέσω της συνεργασίας του MSE Technology Applications και του Center for Biofilm Engineering του Πανεπιστημίου της Montana State, στις ΗΠΑ. Εργαστηριακές μελέτες έχουν αποδείξει την αποτελεσματικότητα της μεθόδου στα πορώδη μέσα (James et al., 2000). Η μέθοδος αυτή αποτελεί μια διαδικασία επιλεκτικής απόφραξης των πόρων μιας διαπερατής στρώσης με μικροβιακά μικροφίλμ. Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει την ανάπτυξη βακτηριακών μικροφίλμ, που μέσω της παραγωγής υπερκυτταρικών πολυμεροειδών ουσιών (EPS) φράσσουν 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 ένα τεχνητό υδροφόρο. Ο σχηματισμός του φραγμού από μικροφίλμ άρχισε με την εισαγωγή βακτηρίων και διαλύσεων με θρεπτικές ουσίες με γεωτρήσεις έγχυσης. Η διάλυση των βακτηρίων συνίσταται από στερούμενης τροφής κυτταρική αιώρηση του τύπου *Pseudomonas fluorescens* και ακολουθήθηκε ένα πρωτόκολλο της MSE που αυξάνει τη μεταφορά και την επιβίωση στο υπέδαφος των βακτηρίων. Η μέση υδραυλική αγωγιμότητα μειώθηκε πλησίον του βιοφίλμ από  $2,1 \times 10^{-2}$  στο  $1,3 \times 10^{-4}$  cm/sec, μια μείωση της τάξης του 99,4%.

Μια λεπτομερής οικονομική ανάλυση πραγματοποιήθηκε για την εγκατάσταση ενός φραγμού από βιοφίλμ σε ένα παράκτιο υδροφόρο των δυτικών Η.Π.Α. Σήμερα η διείσδυση της θάλασσας στον υδροφόρο αυτό 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 (James et al., 2001). Η εγκατάσταση και η συντήρηση του φραγμού θα κόστιζε 5,3 εκατομμύρια \$ και θα απέφερε μειωμένο κόστος απόληψης νερού περισσότερο από 1,3 εκατομμύρια \$ 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 (αυξημένο 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 εγκαθιδρυθεί σε πραγματικές συνθήκες, με σοβαρά πλεονεκτήματα, αφού δεν χρειάζονται εκσκαφές και επομένως έχουν χαμηλό κόστος εγκατάστασης, δεν υπάρχουν περιορισμοί στο βάθος, ενώ οι παραδοσιακοί υποεπιφανειακοί φραγμοί δεν είναι οικονομικά πραγματοποιήσιμοι σε βάθος μεγαλύτερο των 6,1 m.

### 5.3.2. 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 και να εμποδίζει τη θαλάσσια διείσδυση. Ιδιαίτερα αποτελεσματική είναι η μέθοδος αυτή στην περίπτωση υπό πίεση υδροφόρων που

επικοινωνούν με τη θάλασσα και η περιοχή εμπλουτισμού τους βρίσκεται μακριά από αυτήν, όπως συμβαίνει στην Oknard Plain της California (Stone, 1978).

Πρόβλημα μπορεί να αποτελέσει η μη διάθεση επαρκούς ποσότητας νερού εμπλουτισμού, η έλλειψη φθηνής γης για τις λεκάνες εμπλουτισμού και για τις ρηχές γεωτρήσεις εμπλουτισμού και δαπανηρά τεχνικά προβλήματα στη διατήρηση επαρκούς ρυθμού εισροής. Στην Oknard Plain, το κόστος κεφαλαίου είναι 0,45 \$/m<sup>3</sup> νερού εμπλουτισμού με γεωτρήσεις ετησίως συν 0,002 \$/m<sup>3</sup> νερού εμπλουτισμού με κατακλύσεις. Οι ποσότητες νερού εμπλουτισμού είναι συνάρτηση των αντλήσεων υπόγειου νερού από τους χρήστες, του φυσικού εμπλουτισμού και της γεωμετρίας της λεκάνης.

### 5.3.3. Έλεγχος των αντλήσεων

Στην περίπτωση που ο υδροφόρος υπέρκειται ενός αλμυρού ρευστού, η άνοδος του αλμυρού ρευστού μπορεί να περιοριστεί από τον κατάλληλο σχεδιασμό και λειτουργία των γεωτρήσεων (Bowen, 1986). 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 (Riddell, 1993). Μια εναλλακτική μέθοδο αποτελεί η κατασκευή μιας στοάς διήθησης (infiltration gallery), δηλαδή μιας οριζόντιας γεώτρησης, η οποία βοηθά στη μείωση της ανοδικής κίνησης του αλμυρού νερού που είναι αποτέλεσμα υπεράντλησης από μια κατακόρυφη γεώτρηση (Das Gupta, 1983). Η μέθοδος όμως αυτή είναι πιο δαπανηρή από την προηγούμενη, ενώ τα οφέλη είναι παρόμοια. Οι ρυθμοί των απολήψεων μπορούν να μειωθούν όταν η ζήτηση σε νερό μειώνεται. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με τη λήψη μέτρων όπως (van Dam, 1999):

- Πληροφόρηση του ευρύτερου κοινού και του τομέα της βιομηχανίας για την ανάγκη οικονομίας στο νερό και αν είναι αναγκαίο απαγόρευση ορισμένων χρήσεων, όπως είναι για παράδειγμα το πλύσιμο των αυτοκινήτων, η άρδευση κήπων σε περιόδους έλλειψης και η χρησιμοποίηση του νερού για ψύξη μόνο στη βιομηχανία.
- 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, που κάνουν οικονομία στο νερό, όπως η στάγδην άρδευση και η επένδυση των καναλιών.

### 5.3.4. Ανακατανομή των αντλήσεων

Η επανατοποθέτηση των γεωτρήσεων άντλησης στην ενδοχώρα μπορεί να βοηθήσει στην αποκατάσταση της εκροής του γλυκού υπόγειου νερού. Σύμφωνα με τους Headworth

and Fox (1986), μερικά σχέδια μείωσης των επιπτώσεων της διείσδυσης της θάλασσας χρησιμοποιούν δύο ομάδες γεωτρήσεων, η μια στην ενδοχώρα και η άλλη πλησίον της ακτής. Οι παράκτιες γεωτρήσεις αντλούνται σε περιόδους με υψηλές στάθμες του υπόγειου νερού, ενώ οι γεωτρήσεις της ενδοχώρας χρησιμοποιούνται σε περιόδους με χαμηλές στάθμες του υπόγειου νερού.

### 5.3.5. Τροποποιημένα σχέδια αντλήσεων

Είναι φανερό ότι ιδιαίτερα στους υπό πίεση υδροφόρους, η θέση μιας γεώτρησης πιο κοντά προς την ενδοχώρα είναι πιο επιθυμητή από μια θέση πλησίον της ακτής και αυτό επειδή, προς την ενδοχώρα, 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 ρυθμό συνεχόμενων σταθερών αντλήσεων, αλλά και ελαχιστοποίηση του κινδύνου περαιτέρω διείσδυσης της αλμυρής σφήνας. Σε φρεάτιους υδροφόρους νησιών, τα υδρομαστευτικά έργα πρέπει να τοποθετούνται σε τόση 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 σε μικρότερο διαθέσιμο όγκο γλυκού νερού, που θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως στρατηγικό απόθεμα για περιόδους ξηρασίας.

Για ελεύθερους ή υπό πίεση υδροφόρους με καθεστώς μέτριων αντλήσεων, μπορεί να σχεδιαστεί συντονισμένη παύση των αντλήσεων σε ένα αριθμό γεωτρήσεων, καθώς η παρακολουθούμενη διείσδυση της θάλασσας προοδεύει. 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 ακόμη όμως λειτουργούν. Σύμφωνα με τον Stone (1978) το κόστος εξαρτάται από την ιδιαίτερη περίπτωση και στην Oknard Plain για ένα δεδομένο σχέδιο το κόστος κεφαλαίου ανέρχεται στα 10 εκατομμύρια \$, με ετήσιο λειτουργικό κόστος το 1980 τις 180 χιλιάδες \$ (Sorensen et al., 1984).

Ένα τροποποιημένο σχέδιο άντλησης θα επέτρεπε την επαναφορά της στάθμης του υπόγειου νερού στα φυσικά επίπεδα σε κρίσιμες 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, το ρυθμό των αντλήσεων, την καθαρή υπεράντληση, τη στάθμη του υπόγειου νερού, τη γεωμετρία του υδροφόρου, τα χαρακτηριστικά του υδροφόρου και τον υφιστάμενο βαθμό της διείσδυσης της θάλασσας. Το μέτρο αυτό οδηγεί και στη μείωση των απωλειών του γλυκού νερού μέσω μη ελεγχόμενων εκροών.

### 5.3.6. Αντιμετώπιση της επιφανειακής διείσδυσης αλμυρού νερού στις εκβολές ποταμών

Κατά τη διάρκεια εκτεταμένων ξηρασιών, οι μειωμένες ροές των ποταμών επιτρέπουν στο αλμυρό νερό να διεισδύσει στις κοίτες τους και να φτάσει στα ανάντη των εκβολών. Μια άνοδος του επιπέδου της θάλασσας μπορεί να επιφέρει επίσης το ίδιο αποτέλεσμα. Οι γενικές μέθοδοι παρεμπόδισης της αλμυρής διείσδυσης στις εκβολές ποταμών είναι παρόμοιες ανεξάρτητα αν οφείλονται στην άνοδο του επιπέδου της θάλασσας, σε συνθήκες ξηρασίας ή σε φουσκοθαλασσιά από καταιγίδα. Η πρώτη αιτία διαφέρει από τις άλλες δύο ως προς τη μεγαλύτερη διάρκεια εκδήλωσης του φαινομένου. Με στόχο να ελαχιστοποιηθεί η διείσδυση του αλμυρού νερού στα ανάντη των εκβολών των ποταμών, οι οργανισμοί διαχείρισης των ποτάμιων λεκανών, κατά τη διάρκεια ξηρών περιόδων, πρέπει να αποθηκεύουν νερό από τις βροχοπτώσεις σε μεγάλους ταμιευτήρες, το οποίο απελευθερώνεται κατά τη διάρκεια των ξηρασιών για να διατηρηθεί μια συνεχής ροή.

Η παρεμπόδιση αυτού του τύπου θαλάσσιας διείσδυσης μπορεί να γίνει και με άλλους τρόπους όπως:

- την κατασκευή επιφανειακών φραγμάτων, οι οποίοι παρεμποδίζουν την κίνηση του αλμυρού νερού πέραν ενός ορισμένου σημείου στην εκβολή, ή και σε συνδυασμό υπόγειων φραγμών εμπλουτισμού, που έχουν εφαρμοστεί επίσης με επιτυχία,
- την κατασκευή καναλιών, που επιτρέπουν στο αλμυρό νερό να μεταναστεύει προς επιλεγμένες περιοχές της ενδοχώρας,
- την εξασφάλιση εναλλακτικών πηγών διάθεσης νερού, που δεν απειλούνται από τη διείσδυση της θάλασσας,
- τη λήψη μέτρων, κατά τη διάρκεια περιόδων ανόδου της θάλασσας ή ξηρασίας, για περιορισμένες περιόδους, όπως η αυστηρότερη συντήρηση του νερού και οι περιορισμοί στην εξαγωγή νερού από την ποτάμια λεκάνη.

### 5.3.7. Εγγειοβελτιωτικά έργα και αποστράγγιση

Η ταπείνωση της υδροστατικής στάθμης εφαρμόζεται σε περιοχές με λίμνες, λιμνοθάλασσες ή έλη κατά μήκος της ακτής με σκοπό 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 αλλά και αλμυρό και υφάλμυρο νερό) ρέει προς τις δημιουργούμενες ταπεινώσεις της υδροστατικής στάθμης με τους μηχανισμούς διήθησης και με πολύ αργούς ρυθμούς, έτσι ώστε μπορεί να χρειαστεί να παρέλθει πολύ μεγάλη 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. Οι υδροφόροι σε παράκτιες και δελταϊκές περιοχές είναι γενικά μεγάλοι πάχους, δεκάδων έως εκατοντάδων μέτρων, οπότε η διαδικασία δεν μπορεί να σταματήσει με τη δημιουργία αδιαπέρατων φραγμών. Το αλμυρό ή υφάλμυρο νερό πρέπει να αντλείται ή να διοχετεύεται στη θάλασσα μέσω της πιο σύντομης διαδρομής.

#### 5.3.8. Άμεση διάθεση επιφανειακού νερού σε αντικατάσταση της χρήσης του υπόγειου νερού

Η κάλυψη των διαφόρων αναγκών σε νερό 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 διείσδυσης της θάλασσας και σε ορισμένες περιπτώσεις θα προκαλούσε ακόμη και την υποχώρηση του αλμυρού μετώπου.

#### 5.3.9. Εγκαταλειμμένες γεωτρήσεις

Οι ιδιοκτήτες των γεωτρήσεων έχουν το δικαίωμα να χρησιμοποιούν το νερό που βρίσκεται κάτω από τις περιουσίες τους για σχεδόν οποιαδήποτε χρήση, αλλά επίσης έχουν την ευθύνη να διασφαλίζουν ότι η γεώτρησή τους δεν θα συμβάλει στη ρύπανση εκείνου του ίδιου του υπόγειου νερού που χρησιμοποιούν. Χωρίς ιδιαίτερη προσοχή, αυτός ο σημαντικός πόρος, που λέγεται υπόγειο νερό, θα μπορούσε να βλαφτεί σοβαρά ή και ακόμη να καταστεί άχρηστος για τις μελλοντικές γενιές. Ο δακτύλιος ανάμεσα στο εξωτερικό μέρος των σωλήνων μιας γεώτρησης και των τοιχωμάτων της γεώτρησης είναι απαραίτητο, σε σημαντικά τμήματα της στήλης, να φράζεται ερμητικά γιατί διαφορετικά μπορεί να λειτουργήσει ως αγωγός επιτρέποντας σε πτωχής ποιότητας νερό ή ρυπαντές να διεισδύσουν στα κατώτερα ή ανώτερα τμήματα της γεώτρησης. Σε πολλές παλιές αλλά και καινούργιες γεωτρήσεις δεν έχουν απομονωθεί επαρκώς ούτε τα επιφανειακά τμήματά τους αλλά ούτε και τα τμήματα μεταξύ των υδροφόρων στρωμάτων.

Ατυχώς στη χώρα μας οι κανονισμοί και γενικά η νομοθεσία που διέπει την κατασκευή αλλά και τις συνθήκες λειτουργίας μιας γεώτρησης δεν επαρκούν για να διασφαλίσουν το μέλλον των υπόγειων υδατικών πόρων. Ακόμη και στην περίπτωση, που η νομοθεσία προσδιορίζει τον τύπο των γεωτρήσεων και τις μεθόδους κατασκευής στο πλείστο των περιπτώσεων, αυτή δεν λαμβάνεται πάντα υπόψη και συχνά η κατασκευή μιας γεώτρησης στερείται του απαραίτητου επιστημονικού ελέγχου. Η υφιστάμενη νομοθεσία δεν συμπεριλαμβάνει την περίπτωση εκείνη της καταστροφής των γεωτρήσεων, που συμβάλλουν στη ρύπανση του υπόγειου νερού. Οι οικονομικοί μηχανισμοί ελέγχου είναι ανύπαρκτοι. Η έκδοση αδειών ανόρυξης των γεωτρήσεων δεν είναι τίποτα περισσότερο από τυπικές γραφειοκρατικές διαδικασίες, ενώ και τα περιοριστικά μέτρα, που επιβάλλονται, δεν βασίζονται σε επιστημονικές προσεγγίσεις, αλλά προσδιορίζεται απλά κάποια ελάχιστη απόσταση μεταξύ γειτονικών γεωτρήσεων (π.χ. 300 m). Και στην περίπτωση αυτή όμως οι κανονισμοί παραβιάζονται μέσω πολιτικών ή οικονομικών

πιέσεων. Δεν είναι σπάνιο το φαινόμενο να ηλεκτροδοτούνται γεωτρήσεις σε περιοχές με υποβαθμισμένα σε ποιότητα νερά, ενώ είναι γνωστό ότι η ΔΕΗ είναι υποχρεωμένη να ηλεκτροδοτεί μόνο γεωτρήσεις που αποδεδειγμένα αντλούν νερό καλής ποιότητας. Δεν υπάρχει καμία μέριμνα για τη μέτρηση της ποσότητας του αντλούμενου νερού, ενώ και στις περιπτώσεις, που υπήρχε η δυνατότητα αυτή σε σημαντικό αριθμό γεωτρήσεων (π.χ. παράκτιο τμήμα του Νομού Ροδόπης), οι γεωργοί κατέστρεψαν τους μετρητές επειδή θεώρησαν ότι πιθανόν τα δεδομένα των μετρητών να χρησιμοποιηθούν για την επιβολή τελών χρήσης αρδευτικού νερού.

Η απουσία σχετικού θεσμικού αλλά και επιστημονικού ελέγχου, οδήγησαν στο να υπάρχουν σήμερα στη χώρα μας χιλιάδες εγκαταλειμμένες γεωτρήσεις σε ευαίσθητες ως προς τη ρύπανση περιοχές, οι οποίες εκτός των άλλων χαρακτηρίζονται και από τη διάβρωση των σωλήνων ή σοβαρές κακοτεχνίες. Παρά το γεγονός ότι σήμερα είναι διαθέσιμος ένας μεγάλος αριθμός αξιόπιστων τεχνικών ελέγχου των εγκαταλειμμένων γεωτρήσεων, με χαρακτηριστικό παράδειγμα, τον έλεγχο που έλαβε χώρα στην περιοχή Oxnard Plain των Η.Π.Α. από την υπηρεσία U.S. Geological Survey, θα είναι εξαιρετικά δύσκολο στη χώρα μας να εντοπισθούν και πολύ περισσότερο να καταστραφούν με ορθό τρόπο οι εγκαταλειμμένες γεωτρήσεις. Η παράμετρος αυτή θα πρέπει να ληφθεί σοβαρά υπόψη κατά τη διαδικασία εναρμόνισης της νέας οδηγίας της Ε.Ε. για τη διαχείριση των υδατικών πόρων με την ελληνική πραγματικότητα. Ιδιαίτερα, όσον αφορά τις περιοχές όπου υδροφόροι επικοινωνούν υδραυλικά με τη θάλασσα, όταν αντλούνται υπερβολικές ποσότητες νερού από ένα υδροφόρο, η προκαλούμενη απώλεια φορτίου μπορεί να επιτρέψει την είσοδο στη γεώτρηση νερού υποβαθμισμένης ποιότητας. Το υψηλότερο φορτίου αλμυρό νερό διεισδύει μέσα στο γλυκό νερό και προκαλεί μια παραπλανητική άνοδο της στάθμης του νερού. Εγκαταλειμμένες ή φθαρμένες γεωτρήσεις μπορούν πολύ εύκολα να μετατρέψουν νερό πολύ καλής ποιότητας σε αλμυρό. Σε όλη την παράκτια περιοχή του Ν. Ροδόπης, από τη λιμνοθάλασσα της Βιστωνίδας μέχρι το Δέλτα του Π. Λίσσου, η υπαλμύριση των γλυκών υπόγειων νερών προκλήθηκε κατ' αρχήν από τις υπεραντλήσεις και σήμερα ολοκληρώνεται μέσω των δεκάδων εγκαταλειμμένων γεωτρήσεων (Πεταλάς, 1997).

Είναι καιρός πλέον η ανόρυξη των γεωτρήσεων να μπει σε νέες βάσεις, με την άμεση δημιουργία μιας σχολής γεωτροπανιστών, με την εγκαθίδρυση ενός ουσιαστικού θεσμικού πλαισίου, όπου θα προσδιορίζεται με σαφήνεια το περιεχόμενο της έκδοσης αδειών ανόρυξης και καταστροφής των γεωτρήσεων. Στην τελευταία περίπτωση θα πρέπει να προσδιορίζονται επαρκώς οι κατάλληλες μέθοδοι και τα υλικά που θα χρησιμοποιούνται κατά την καταστροφή των γεωτρήσεων. Οι αρχικοί σωλήνες της γεώτρησης πρέπει να απομακρυνθούν (εξαγωγή), ο χώρος της γεώτρησης σε όλο το πάχος των υδροφόρων στρωμάτων να πληρωθεί με καθαρή άμμο ή μικρής διαμέτρου χάλικες για την αποκατάσταση των αρχικών συνθηκών. Το υπόλοιπο τμήμα πληρούται με καθαρό μίγμα νερού και τσιμεντοκονιάματος. Σε περίπτωση που η εξαγωγή των σωλήνων δεν είναι εφικτή, χρησιμοποιείται η ανατίναξη με δυναμίτη για τη διάνοιξη των σωλήνων και στη συνέχεια τόσο ο εσωτερικός όσο και ο δακτύλιος εξωτερικά των σωλήνων πληρούνται με καθαρό μείγμα τσιμεντοκονιάματος και νερού.

### 5.3.10. Τεχνικές αφαλάτωσης

Πριν από τέσσερεις δεκαετίες περίπου, ο τότε Πρόεδρος των ΗΠΑ John F. Kennedy, είχε δηλώσει ότι: «Εάν θα μπορούσαμε να παράγουμε γλυκό νερό από αλμυρό με χαμηλό κόστος, τότε αυτό θα ήταν εξαιρετικά ωφέλιμο για την ανθρωπότητα, και θα επισκίαζε οποιαδήποτε άλλο επιστημονικό επίτευγμα». Η τρέχουσα εμπειρία στις ΗΠΑ αποδεικνύει ότι η παραπάνω δήλωση είναι ακόμα πιο σημαντική σήμερα απ' ό,τι το 1962. Οι διάφορες τεχνικές που εφαρμόζονται σήμερα, ουσιαστικά βοηθούν στη διατήρηση των υπαρχόντων διαθέσιμων υδατικών πόρων, ενώ οι τεχνικές αφαλάτωσης μπορούν να παράγουν ανανεωμένο νερό από μη χρησιμοποιήσιμο νερό. Σύμφωνα με τη Διεθνή Ένωση Αφαλάτωσης, σήμερα λειτουργούν περίπου 13.600 μονάδες αφαλάτωσης σε παγκόσμια κλίμακα, οι οποίες παράγουν περίπου  $25,744 \times 10^6 \text{ m}^3$  γλυκού νερού σε ημερήσια βάση. Οι ΗΠΑ θεωρούνται η δεύτερη χώρα στον κόσμο, με το μεγαλύτερο αριθμό μονάδων αφαλάτωσης, επεξεργάζοντας επιφανειακά και υπόγεια υφάλμυρα νερά. Στην Πολιτεία του Τέξας λειτουργούν σήμερα πάνω από 100 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 κατηγοριοποιούνται σ' 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 βαθμίδας (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), στις ΗΠΑ, κατασκευάζεται σύγχρονη μονάδα αφαλάτωσης αλμυρού νερού, το κόστος της οποίας ανέρχεται στα  $100 \times 10^6$  \$ και χωρητικότητας  $95.000 \text{ m}^3$  νερού. Σύμφωνα με το Texas Water Development Board (2002), το κόστος του αφαλατωμένου νερού από την εν λόγω μονάδα υπολογίζεται περίπου στα  $0,52$  \$ /  $\text{m}^3$  νερού, τιμή που ανέρχεται περίπου στο μισό σε σχέση με την παραγωγή αφαλατωμένου νερού στο πρόσφατο παρελθόν. Η μονάδα αφαλάτωσης του El Paso, στο δυτικό Τέξας, με χωρητικότητα  $110.000 \text{ m}^3$  σε ημερήσια βάση, πρόκειται να χρησιμοποιεί το υπόγειο υφάλμυρο νερό του υδροφόρου Hueco Bolson με σκοπό την παροχή νερού ύδρευσης, που θα εξυπηρετεί το ένα τέταρτο των αναγκών του El Paso.

Πρόσφατη μελέτη του M.I.T. για τη λωρίδα της Gaza, 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 του νερού στη λωρίδα της Gaza 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 εκατομμυρίων  $m^3$  ετησίως) θα είναι τουλάχιστον 100 εκατομμύρια \$ για την κατασκευή / έτος και με λειτουργικό κόστος της τάξης των 0,70 \$ /  $m^3$  νερού. Η μέθοδος της αφαλάτωσης θα μπορούσε να αποτελέσει ελκυστική λύση αν συνδυάζονταν με τη δημιουργία ενός φραγμού άντλησης (κοιλώματος).

#### **5.4. Περιπτώσεις αντιμετώπισης της θαλάσσιας διείσδυσης στο διεθνή χώρο**

Σύμφωνα με το Πρόγραμμα των Ενωμένων Εθνών UNEP (2002), στην παράκτια περιοχή Saurashtra της Ινδίας πραγματοποιήθηκε τεχνητός εμπλουτισμός με τη χρησιμοποίηση γεωτρήσεων εμπλουτισμού και με λεκάνες εμπλουτισμού. Ως πηγές νερού χρησιμοποιήθηκαν τα πλεονάζοντα νερά από το τελικό άκρο ενός συστήματος αρδευτικών καναλιών και το νερό από απορροές καταιγίδων. Η μελέτη του τεχνητού εμπλουτισμού συμπεριλάμβανε και την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας κατασκευών ελέγχου της παλίρροιας (φράγματα ελέγχου), που σχεδιάστηκαν για να περιορίσουν τη διείσδυση της θάλασσας. Στην περιοχή αυτή, όπου τα υδροφόρα στρώματα είναι εξαιρετικά διαπερατά και εκφορτίζονται στην παράκτια ζώνη, η γρήγορη εκροή του νερού εμπλουτισμού προς τη θάλασσα καθιστά τον τεχνητό εμπλουτισμό μια όχι βιώσιμη πρόταση. Το κόστος επένδυσης των γεωτρήσεων εμπλουτισμού ανέρχεται σε 0,55 \$ /  $m^3$  νερού εμπλουτισμού, ενώ το λειτουργικό κόστος ανέρχεται στο 0,02 \$ /  $m^3$  νερού εμπλουτισμού ετησίως. Το κόστος της επένδυσης των λεκανών εμπλουτισμού κυμαίνεται μεταξύ 0,001 \$ και 0,008 \$ /  $m^3$  νερού εμπλουτισμού, ενώ το ετήσιο λειτουργικό κόστος κυμαίνεται από 0,02 \$ έως 0,001 \$ /  $m^3$  νερού εμπλουτισμού.

Το σύστημα παρεμπόδισης της θαλάσσιας διείσδυσης των Alamitos and Dominguez Barrier Projects (Καλιφόρνια, ΗΠΑ) αποτελείται από τρεις φραγμούς με γεωτρήσεις εμπλουτισμού. Οι παράκτιοι υδροφορείς της Central και της West υδρογεωλογικών λεκανών στη Los Angeles County προστατεύονται από τη θαλάσσια διείσδυση μέσω 230 γεωτρήσεων εμπλουτισμού, 758 γεωτρήσεων παρακολούθησης και 4 γεωτρήσεων άντλησης. Ετησίως χρησιμοποιούνται για εμπλουτισμό 37 εκατομμύρια  $m^3$  εισαγόμενου και ανακτημένου νερού αξίας 0,5 € /  $m^3$ . Πρόκειται για ένα περιβαλλοντικό σχέδιο διεθνούς σημασίας και για το μεγαλύτερο σύστημα παρεμπόδισης της θαλάσσιας διείσδυσης σε όλη τη Βόρεια Αμερική (Lipshie and Larson, 1995). Το 80% του νερού εμπλουτισμού επαναχρησιμοποιείται. Οι γεωτρήσεις εγχείουν υψηλού βαθμού επεξεργασμένο νερό σε υπόγειο υδροφόρο σύστημα, που αποτελείται από αλλουβιακούς και θαλάσσιους υπόγειους υδροφορείς σε βάθη που κυμαίνονται από 46 m έως 213 m (Johnson et al., 2001). Το υδρολογικό έτος 1998/99, έγινε έγχυση συνολικά  $3,2 \times 10^7 m^3$  νερού μέσω των γεωτρήσεων με κόστος 13.500.000 \$ ή 0,04219 \$ /  $m^3$  νερού εμπλουτισμού. Σε σχέση με το έτος 1960 το κόστος του νερού εμπλουτισμού έχει αυξηθεί κατά 2.445% ή από 0,017 \$ /  $m^3$  σε ένα μέγιστο της τάξης των 0,428 \$ /  $m^3$  νερού εμπλουτισμού. Το κόστος αυτό επιβαρύνονται τα 4,3 εκατομμύρια των κατοίκων και των επιχειρήσεων σε όλη την έκταση των υδρογεωλογικών λεκανών και θα μπορούσε σχεδόν να διπλασιαστεί τα αμέσως επόμενα 5 χρόνια, καθώς θα γίνουν βελτιώσεις στο σύστημα των φραγμών.

Η Water Replenishment District of Southern California, το Los Angeles County Department of Public Works και η United States Department of the Interior – Bureau of Reclamation, στις ΗΠΑ, πραγματοποίησαν μια τεχνικοοικονομική μελέτη για να βρουν βιώσιμες εναλλακτικές λύσεις αντί των γεωτρήσεων εμπλουτισμού (Johnson et al., 2001). Αναγνωρίστηκαν 10 εναλλακτικοί τύποι φραγμών στους οποίους συμπεριλαμβάνονται:

- τοιχώματα υδαρούς κονιάματος,
- σε βάθος ανάμιξη εδάφους,
- επένδυση καναλιών,
- φράγματα από ελαστικό,
- τοιχίο στεγανότητας (διάφραγμα) από ρευστό κονίαμα,
- εκτόξευση ρευστού κονιάματος,
- έγχυση αέριου αζώτου,
- εξαγωγή νερού,
- τοιχώματα βιολογικών φραγμών και
- επί τόπου υαλοποίηση.

Την τεχνικοοικονομική μελέτη ακολούθησε μια οικονομική και τεχνική διαδικασία λήψης απόφασης για την αξιολόγηση των εναλλακτικών λύσεων κατά την οποία εξετάστηκαν όλες οι πλευρές της εφαρμογής οποιασδήποτε από τις προηγούμενες τεχνικές. Η διαδικασία κατέληξε στη διαπίστωση ότι ένα βαθύ εδαφικό τοίχωμα θα μπορούσε να εφαρμοστεί σε δύο θέσεις καθώς και ένας φραγμός από έγχυση αέρος/αζώτου σε μια τρίτη θέση αντί των γεωτρήσεων εμπλουτισμού. Η τελευταία περίπτωση δεν οριστικοποιήθηκε επειδή το πιλοτικό πρόγραμμα ήταν σε εξέλιξη.

Το Water Factory 21, στις ΗΠΑ, μια μονάδα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων στην California χρησιμοποιείται για την παρεμπόδιση της θαλάσσιας διείσδυσης (Wicks and Herman, 1996). Παράγονται 1.627.772 m<sup>3</sup> νερού ημερησίως για τη συντήρηση του υδραυλικού φραγμού Talbert στην υδρογεωλογική λεκάνη της Orange County στην California. Το κόστος του νερού που αποτελείται κατά 62% από ανακτημένο και κατά 38% από βαθύ υπόγειο νερό είναι 0,28 € / m<sup>3</sup>.

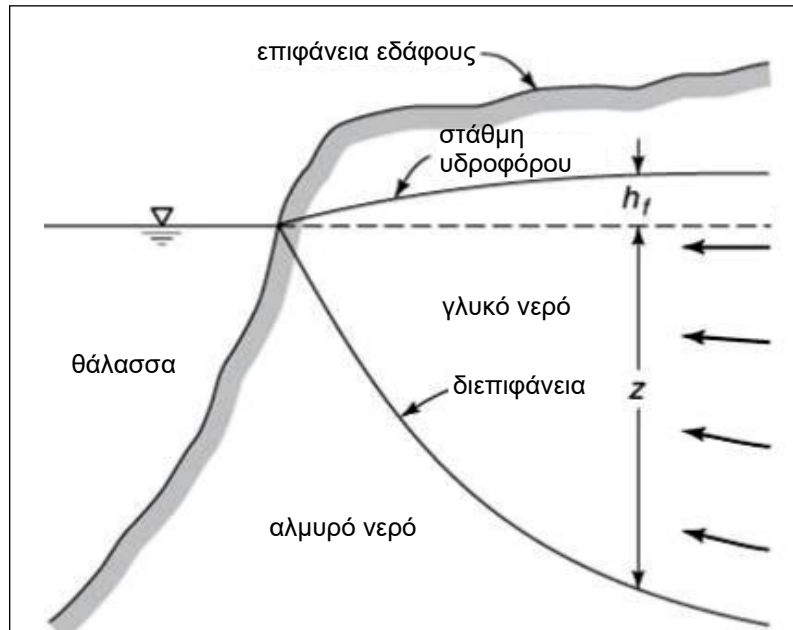
Η αξιολόγηση των υδραυλικών χαρακτηριστικών ενός υδροφόρου μπορεί να γίνει με μεγάλη ακρίβεια μέσω της χρήσης ιχνηθετών, όπως τα ευγενή αέρια π.χ. ξένο κ.τ.λ. Αποτελεί μια σχετικά φθηνή μέθοδο η οποία απαιτεί μικρή ποσότητα ισοτοπικώς εμπλουτισμένων ιχνηθετών (Moran και Hudson, 2001). Τα ευγενή αέρια είναι χημικά αδρανή, άχρωμα και άοσμα, δεν είναι ραδιενεργά και δεν περικλείουν κανένα κίνδυνο για την υγεία. Επιπλέον, η χαμηλή φυσική περιεκτικότητα ορισμένων ισοτόπων των διαλυμένων ευγενών αερίων, σημαίνει ότι επαρκεί ένας μικρός όγκος ιχνηθέτη διαλυμένος στο φυσικό υπόγειο νερό για να δημιουργήσει ένα μεγάλο δυναμικό πεδίο. Τα ευγενή αέρια δεν προσροφώνται από τα υλικά των υδροφορέων και υπόκεινται στην ταχύτητα της ροής του νερού. Η χρησιμοποίηση της μεθόδου αυτής μπορεί να δώσει αξιόπιστα στοιχεία στη μελέτη των διαδρομών νερού που ακολουθεί η θαλάσσια διείσδυση και επομένως στη σχεδίαση των θέσεων των εγκαταστάσεων εμπλουτισμού.

## 6. ΑΣΚΗΣΕΙΣ

(επιλογή από: Todd and Mays, 2005, με τροποποιήσεις)

### Άσκηση 1

Σε παράκτιο υδροφόρο, η σταθερή διεπιφάνεια γλυκού – αλμυρού νερού βρίσκεται 43 m κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας, σε απόσταση 500 m από την ακτογραμμή προς την ενδοχώρα. Να προσδιοριστεί η ανύψωση της στάθμης του υδροφόρου πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας.



Μοντέλο της θεωρίας Ghyben-Herzberg για τη διεπιφάνεια γλυκού-αλμυρού νερού σε παράκτιο ελεύθερο υδροφόρο (Todd and Mays, 2005).

Οι τιμές της πυκνότητας για το γλυκό ( $\rho_f$ ) και το αλμυρό ( $\rho_s$ ) νερό είναι  $1,0 \text{ gr/cm}^3$  και  $1,025 \text{ gr/cm}^3$  αντίστοιχα. Από τη σχέση Ghyben – Herzberg έχουμε:

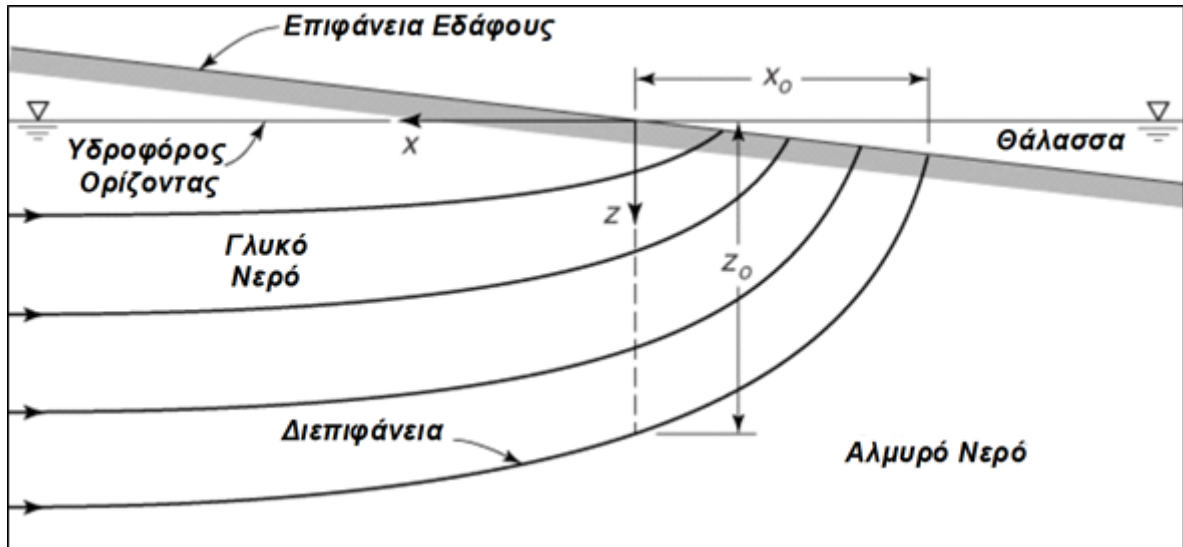
(εξ. 2.1 και σχήμα) →

$$z = \frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f} h_f \Rightarrow h_f = \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f} z = \frac{1,025 - 1,0(\text{gr/cm}^3)}{1,0(\text{gr/cm}^3)} (43\text{m}) \Rightarrow h_f = 1,075\text{m}$$

Άρα ο υδροφόρος βρίσκεται 1,075 m πάνω από τη μέση στάθμη θάλασσας.

## Άσκηση 2

Η σταθερή εκφόρτιση γλυκού νερού από έναν παράκτιο ελεύθερο υδροφόρο προς τη θάλασσα είναι  $1,6 \text{ m}^3/\text{ημέρα}/\text{m}$  κατά μήκος της ακτογραμμής. Η υδραυλική αγωγιμότητα του υδροφόρου είναι  $8,6 \text{ m}/\text{ημέρα}$  και το οριζόντιο αδιαπέρατο υπόβαθρο του υδροφόρου εκτείνεται  $57 \text{ m}$  κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας. Να καθορίσετε το σχήμα της διεπιφάνειας γλυκού – αλμυρού νερού και την απόσταση της θέσης του «ποδιού» της διεπιφάνειας από την ακτογραμμή.



Πρότυπο ροής γλυκού νερού σε ελεύθερο παράκτιο υδροφόρο (Todd and Mays, 2005).

Η ακριβής θέση  $x$  του ποδιού της διεπιφάνειας (από το σημείο όπου η διεπιφάνεια τέμνει την ακτογραμμή) δίνεται από τη σχέση:

(εξ. 2.2 και σχήμα) →

$$z = \sqrt{\frac{2\rho q x}{\Delta\rho K} + \left(\frac{\rho q}{\Delta\rho K}\right)^2} \Rightarrow$$

$$57\text{m} = \sqrt{\frac{2(40)(1,6\text{m}^3/\text{ημέρα})(x)}{(8,6\text{m}/\text{ημέρα})} + \left(\frac{(40)(1,6\text{m}^3/\text{ημέρα}/\text{m})}{(8,6\text{m}/\text{ημέρα})}\right)^2} \Rightarrow$$

$$x = 214,57\text{m} \approx 215\text{m}$$

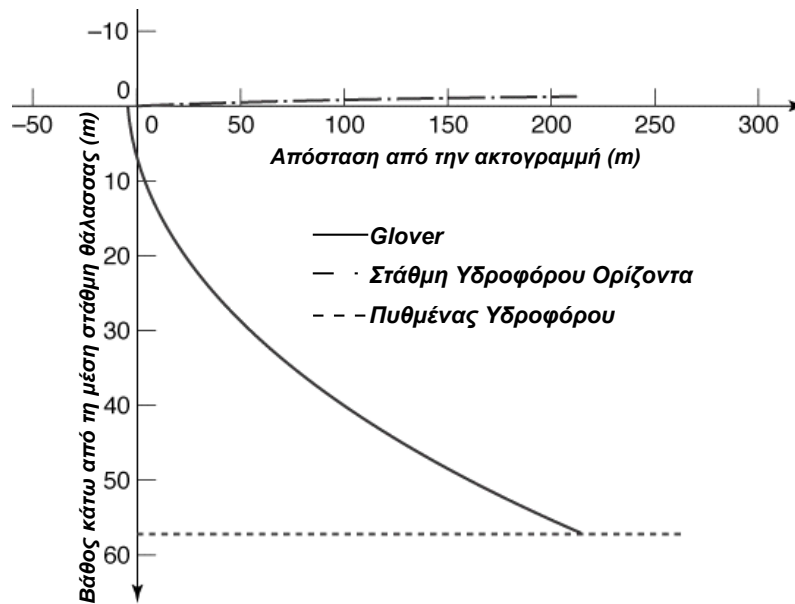
όπου  $\rho / \Delta\rho = 40$  υποθέτοντας ότι πρόκειται για τις τυπικές πυκνότητες γλυκού και αλμυρού νερού.

Τα αποτελέσματα του προφίλ του υδροφόρου και του σχήματος της διεπιφάνειας, όπως προκύπτουν από την εφαρμογή των σχέσεων Glover, δίνονται στον παρακάτω πίνακα (σε m).

x	z (Glover)*	h <sub>f</sub> (Glover)**
0	7,44	0,00
20	18,79	0,42
40	25,51	0,60
60	30,79	0,73
80	35,29	0,85
100	39,29	0,95
120	42,91	1,04
140	45,70	1,12
160	49,35	1,20
180	52,28	1,27
200	55,06	1,34
215	57,00	1,39

\*: (εξ. 2.2 και σχήμα)  $\rightarrow z = \sqrt{\frac{2\rho q x}{\Delta\rho K} + \left(\frac{\rho q}{\Delta\rho K}\right)^2} \Rightarrow z = \sqrt{14,88x + 55,38}$

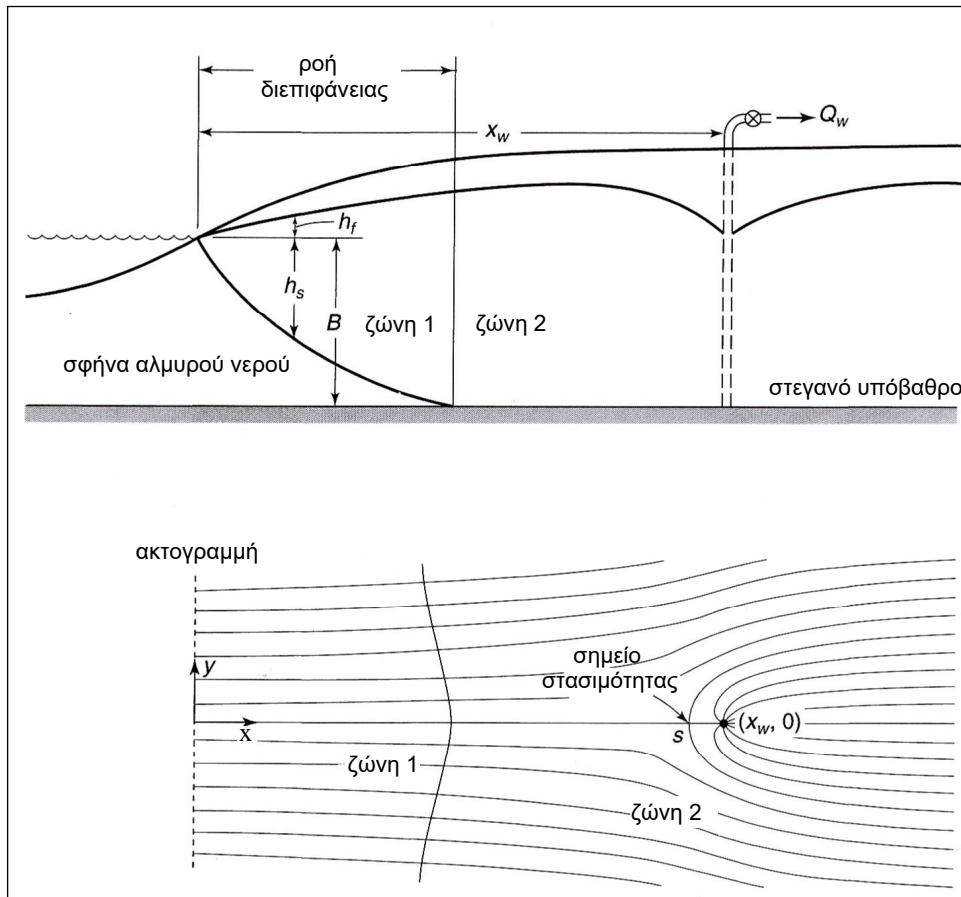
\*\* : (εξ. 2.3)  $\rightarrow h_f = \sqrt{\frac{2\Delta\rho q x}{(\rho + \Delta\rho)K}} \Rightarrow h_f = \sqrt{0,009x}$





### Άσκηση 3

Παραγωγική γεώτρηση στον παράκτιο ελεύθερο υδροφόρο της προηγούμενης άσκησης, αντλεί με σταθερό ρυθμό της τάξης των 5 L/sec, σε απόσταση 800 m από την ακτογραμμή. Να προσδιοριστεί η ακριβής νέα θέση του «ποδιού» της διεπιφάνειας υπό σταθερές συνθήκες ροής. Δεδομένου ότι η γεώτρηση έχει διατρήσει όλο το βάθος του υδροφόρου, να εκτιμηθεί εάν θα υπάρξει απόληψη υφάλμυρου νερού κατά την άντληση.



Άντληση γεώτρησης σε αβαθή παράκτιο υδροφόρο (Strack, 1976).

Η επίλυση κατά Strack, υπολογίζει τη θέση του «ποδιού» της διεπιφάνειας από την ακόλουθη σχέση:

(εξ. 2.6 και σχήμα) →

$$\frac{1}{2}(1+\delta)\frac{B^2}{\delta^2} = \frac{Q'_{ox}}{K}x + \frac{Q_w}{4\pi K} \ln \left[ \frac{(x-x_w)^2 + y^2}{(x+x_w)^2 + y^2} \right] \text{ όπου } \delta = \frac{\rho_f}{\rho_s - \rho_f}$$

Αντικαθιστώντας  $\delta = 40$  για τυπικό αλμυρό και γλυκό νερό και  $y = 0$ , έχουμε:

$$\frac{1}{2}(1+40)\frac{(57\text{m})^2}{40^2} = \frac{[1,6(\text{m}^3/\text{ημέρα})/\text{m}]}{8,6\text{m}/\text{ημέρα}}x + \frac{\overset{5 \text{ L/sec}}{\uparrow}}{4\pi(8,6\text{m}/\text{ημέρα})} \ln \left[ \frac{(x-800\text{m})^2 + (0\text{m})^2}{(x+800\text{m})^2 + (0\text{m})^2} \right] \Rightarrow$$

$$x = 252 \text{ m}$$

Να σημειωθεί ότι το «πόδι» της διεπιφάνειας βρίσκεται 215 m από την ακτογραμμή. Έτσι το «πόδι» μετακινείται  $252 - 215 = 37$  m προς την ενδοχώρα λόγω της σταθερής άντλησης με ρυθμό 5 L/sec.

Προκειμένου να εκτιμηθεί εάν η γεώτρηση θα αντλήσει ή όχι υφάλμυρο νερό θα πρέπει αρχικά να προσδιοριστεί ο κρίσιμος ρυθμός άντλησης, που μπορεί να προκαλέσει τη ραγδαία εισχώρηση της διεπιφάνειας προς την ενδοχώρα έως ότου αποκατασταθεί νέα υδραυλική ισορροπία μεταξύ των δύο υγρών. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται η παρακάτω εξίσωση κατά Strack:

(εξ. 2.9α)  $\rightarrow$

$$\lambda = \left( \frac{KB^2}{Q'_{0x} x_w} \right) \left( \frac{1+\delta}{\delta^2} \right) = \left( \frac{(8,6\text{m}/\text{ημέρα})(57\text{m})^2}{(1,6\text{m}^3/\text{ημέρα}/\text{m})(800\text{m})} \right) \left( \frac{1+40}{40^2} \right) = 0,559$$

Αντικαθιστώντας με  $\lambda = 0,599$  στην εξίσωση 2.8

$$\lambda = 2 \left( 1 - \frac{\mu}{\pi} \right)^{1/2} + \frac{\mu}{\pi} \ln \left[ \frac{1 - (1 - \mu/\pi)^{1/2}}{1 + (1 - \mu/\pi)^{1/2}} \right], \text{ και λύνοντας ως προς } \mu, \text{ έχουμε:}$$

$$\mu = 1,524$$

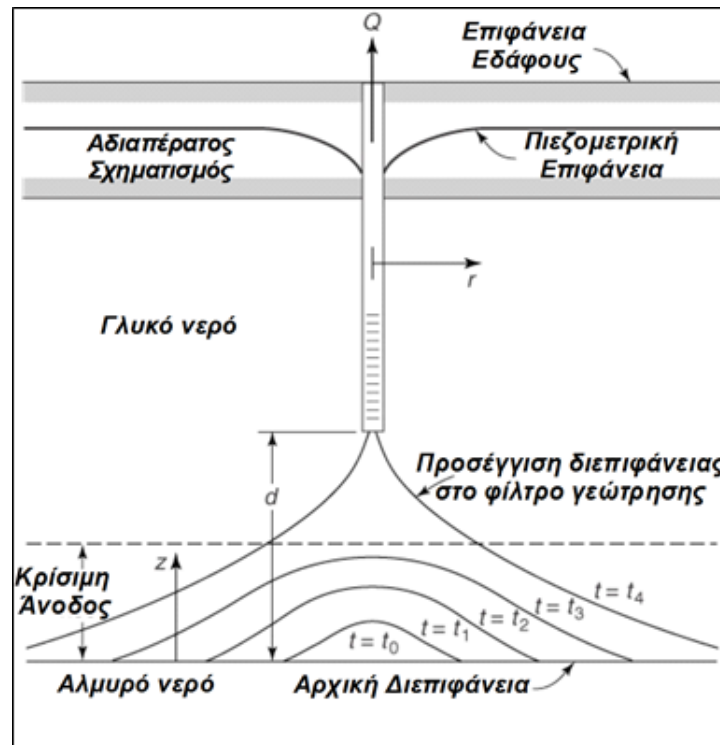
Έτσι ο κρίσιμος ρυθμός άντλησης θα προσδιοριστεί από τη σχέση (2.9β):

$$\mu = \frac{Q_w}{Q'_{0x} x_w} \Rightarrow 1,524 = \frac{Q_w}{(1,6\text{m}^3/\text{ημέρα}/\text{m})(800\text{m})} \Rightarrow Q_w = 1951 \text{ m}^3/\text{ημέρα}$$

Αφού ο ρυθμός άντλησης είναι  $5\text{L}/\text{sec} = 432\text{m}^3/\text{ημέρα}$ , δηλαδή κατώτερος του κρίσιμου ρυθμού άντλησης, το «πόδι» της διεπιφάνειας θα σταθεροποιηθεί σε κάποια απόσταση από το σημείο στασιμότητας (stagnation point). Έτσι σύμφωνα με το συγκεκριμένο ρυθμό άντλησης θεωρείται ότι δεν θα υπάρξει απόληψη υφάλμυρου νερού από τη γεώτρηση.

#### Άσκηση 4

Γεώτρηση έχει διατρήσει μέρος ενός υπό πίεση υδροφόρου και ο πυθμένας του φίλτρου της (κατώτερο μέρος του σωλήνα της γεώτρησης) βρίσκεται σε απόλυτο υψόμετρο +25 m. Τα υψόμετρα του άνω (υπερκείμενου) και κάτω (υποκείμενου) στεγανού στρώματος είναι +64 m και +8 m αντίστοιχα. Εάν υπάρχει οριζόντια διεπιφάνεια γλυκού – αλμυρού νερού με απόλυτο υψόμετρο +12 m πριν την έναρξη της άντλησης, να προσδιοριστεί ο μέγιστος επιτρεπόμενος ρυθμός άντλησης ώστε να αποφευχθεί η απόληψη αλμυρού νερού από τη γεώτρηση. Η υδραυλική αγωγιμότητα του υδροφόρου είναι 25 m/ημέρα.



Διάγραμμα ανόδου της διεπιφάνειας λόγω άντλησης (Schmorak and Mercado, 1969, Todd and Mays, 2005).

Από τα δεδομένα της άσκησης έχουμε (σχήμα):

$d = 25\text{m} - 12\text{m} = 13\text{m}$ . Το κρίσιμο σημείο ανύψωσης της διεπιφάνειας είναι  $0,3 \leq \frac{z}{d} \leq 0,5$  και

$\rho_f / \Delta\rho = 40$  για τυπικές πυκνότητες γλυκού – αλμυρού νερού. Άρα ο μέγιστος ρυθμός άντλησης θα προσδιοριστεί από τη σχέση (εξ. 2.11):

$$Q_{\max} = \pi d^2 K (\Delta\rho / \rho_f) = \frac{\pi (13\text{m})^2 (25\text{m}/\text{ημέρα})}{40} = 332\text{m}^3 / \text{ημέρα} \text{ για } \frac{z}{d} = 0,5$$

ή

$$Q_{\max} = 0,6\pi d^2 K (\Delta\rho / \rho_f) = \frac{0,6\pi (13\text{m})^2 (25\text{m}/\text{ημέρα})}{40} = 199\text{m}^3 / \text{ημέρα} \text{ για } \frac{z}{d} = 0,3$$

## 7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Aldaya F., (1981). Mapa Geologico y memoria explicativa de la hoja 1056 (Albunol) Del Mapa Geologico de Geologico de Espana a Escala 1:50.000, IGME.
- Appelo C.A.J., and D. Postma, (1993). Geochemistry, groundwater and pollution, A. A. Balkema, Rotterdam.
- ASCE, (1987). "Ground Water Management". Third Edition, ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No 40, New York.
- Atkinson S.F., G.D. Miller, and D.S. Curry, (1986). Salt-water intrusion, Status and potential in the Contiguous United States. Lewis Publishers.
- Avidad J., and V. Garcia–Duenas, (1981). Mapa geologico y memoria explicativa de la Hoja 1055 (Velez–Malaga) del Mapa Geologico Nacional a Escala, 1:50.000, IGME.
- Ayers R.S., (1975). Quality of water for irrigation. Proceeding of the Irrigation and Drainage Division, Specialty Conference, ASCE, 13-15/8/1975, Logan, Utah, pp. 24-56.
- Badon Ghyben W., and J. Drabbe, (1889). Nota in verband met de voorgenomen putboring nabij Amsderdam, Tijdschrift van het Konink Instituut voor Ingenieurs 1888-1889, pp. 8-22.
- Barazzuoli P., M. Bouzelboudjen, S. Cucini, L. Kiraly, P. Menicory, M. Salleolini, (1999). Olocenic alluvial aquifer of the River Cornia coastal plain (southern Tuscany, Italy)- database design for groundwater management, Environmental Geology, 39 (2), Springer, pp. 123-143.
- Bear J., (1979). Dynamics of fluids in porous media, American Elsevier Publishing Company Inc., New York, 764 p.
- Bear J., (1979). Hydraulics of Groundwater. McGraw-Hill, New York, N.Y., 569 p.
- Bear J., A.H.-D. Cheng, S. Sorek, D. Ouazar and I. Herrera (Eds.), (1999). Seawater intrusion in coastal aquifers – Concepts, Methods and Practices. Kluwer Academic Publishers, 625 p.
- Benson R.C., and D. Sharma, (1986). A systems approach to evaluating saltwater intrusion. Presented at National Water Well Conference, FOCUS on Southeastern Ground Water Issues, Tampa, Florida, October 6-8, 1986.
- Bloetscher F., (1999). Comments on the May 17, 1999 Draft of the Class V Underground injection Control Study: Saltwater intrusion Barrier wells information Summary. Florida Governmental Utility Authority. June 16, 1999.
- Bonacci O., and T. Roje Bonacci, (1997). Seawater intrusion on coastal karst springs: Example of the Blaz spring (Croatia), Hydrological Sciences Journal, 42 (1), 89-100.
- Bookman-Edmonston Engineering, (1982). Annual survey report on groundwater replenishment. Prepared for the Central and West Basin Water Replenishment District, California.
- Bowen R., (1986). Groundwater, 2<sup>nd</sup> ed., Elsevier Applied Science Publishers, London, 427 p.

- Bruington A.E., (1968). The amelioration of prevention of salt-water intrusion in aquifers- Experience in Los Angeles County, California. Salt-water encroachment into Aquifers: Proceedings of the Limited Professional Symposium Held at Louisiana State University, Baton Rouge, Louisiana May 4-5,1967. Baton Rouge, Louisiana. Water resources Research Institute, Bulletin 3. October 1968.
- Bruington, A. E., and Seares, F. D., (1965). Operating a sea water barrier project. J. of the irrigation and drainage division, ASCE, V. 91, No. IR1, Proc. Paper 4264, pp. 117-140.
- California Department of Water Resources, (1970). Oxnad Basin Experimental Extraction Type Barrier, Bulletin 147-6, September.
- Calvache M.L., and A. Pulido-Bosch A., (1997). Effects of geology and human activity on the dynamics of seawater intrusion in three coastal aquifers in southern Spain, *Environmental Geology* 30 (3/4), pp. 215-223, Springer-Verlag.
- Calvache M.L., and A. Pulido-Bosch, (1991). Saltwater intrusion into small a coastal aquifer (Rio Verde, Almunecar, southern Sapain), *J. Hydrology* 129, pp. 195-213.
- Calvache M.L., and A. Pulido-Bosch, (1994). Modeling of the effects of a salt-water-intrusion dynamics for a coastal karstified block connected to a Detrital Aquifer, *Ground Water*, 32 (5), pp. 767-777.
- Canavari M., (1928). *Manuale di geologia tecnica*, Nistri – Lischi Ed, Pisa.
- Caribbean Small Islands Water Resources, (1980). Assessment development management, Proceedings of the seminar on small island water problems, Report No. CSC (80) SLR 6, Commonwealth Science Council, London, U.K.
- Cescon B., F. Federici, G. Marangoni, M. Stizza, (1988). Sistema informativo dotato di modelli numerici di simulazione per la gestione delle risorse idriche del bacino del fiume Potenza, *Ingegneria Sanitaria*, 36 (2), pp. 2-16.
- Chiocchini U., G. Gissoti, A. Macioce, F. Manna, A. Bolasco, C. Lucarini, G.M. Patrizi, (1997). Environmental geology problems in the Tyrrhenian coastal area of Santa Marinella, province of Rome, central Italy, *Environmental Geology*, 32 (1), pp. 1-8.
- Christensen F. D., P. Engesgaard P., K.L. Kipp, (2001). A reactive transport investigation of a seawater intrusion experiment in a shallow aquifer, Skansehage Denmark, First International Conference in Saltwater Intrusion and Coastal Aquifers- Monitoring, Modeling and Management., Essaouira, Morocco, April 23-25, 2001.
- CRC: Handbook of Chemistry and Physics, 75<sup>th</sup> Edition. Lide, D. R. (ed), (1994). Chemical Rubber Company Press, Boca Raton, Florida.
- Cucini S., (1995). Acquifero della Valle del Cornia e ruolo dei GIS nello studio idrogeologico regionale, *Travail de diplome en Hydrologie*, Universite de Neuchatel.
- Custodio E., G.A. Bruggeman, (Eds.), (1987). Groundwater problems in coastal areas, *Studies and Reports in Hydrology*, UNESCO, International Hydrological Programme, Paris.
- Custodio E., M. Pascual, A. Bayo, X. Bosh, (1989). Processes in the Mixing Zone in Carbonate Formations: Central and Southern Catalonia, Proceedings of 10<sup>th</sup> Salt-Water Intrusion Meeting, Geologisch Institut R.U.G. (S8), Ghent, pp. 263-277.

- Das Gupta, A., (1983). Steady interface upcoming beneath a coastal infiltration gallery. *Groundwater*, 21 (4), pp. 465-474.
- Delaware River Basin Commission, DRBC, (1981). "The final report and environmental impact statement of the level B. Study." West Trenton, N.J.
- Denton R.A. and D.A. Briggs, (1997). Incorporating a new salinity – outflow algorithm into an operations model for the Central Valley, California, Proc. XXVII IAHR Congress, Theme B, pp. 611-616.
- Diamantis J., and C. Petalas, (1989). Sea water Intrusion into Coastal aquifers of Thrace and its impact on the environment. *Toxicological and Environmental Chemistry*, Vols. 20-21, pp. 291-305.
- Du Commun J., (1828). On the cause of freshwater springs, fountains, etc., *American Journal of Science and Arts*, 14, pp. 174-175.
- Duffy C.J., and S. Al-Hassan, (1988). Groundwater circulation in closed desert basin: topographic scaling and climate forcing, *Water Resources Research*, 24(10), pp. 1675-1688.
- El Asswad R.M., (1995). Agricultural prospects and water resources in Libya, *Ambio*, 24 (6), 324-327.
- El-Bihery M.A., and T.E. Lachmar, (1994). Groundwater quality degradation as a result of overpumping in the Delta Wadi El-Arish Area, Sinai Peninsula, Egypt, *Environmental Geology*, 24 (4), p. 293-305.
- Elorza J.J., and V. Garcia-Duenas, (1981). Mapa geologico y memoria explicativa de la Hoja 1055 (Motril) del Mapa Geologico Nacional a Escala, 1:50.000, IGME.
- Ergil M., (2001). Estimation of saltwater intrusion through a salt balance equation and its economic impact with suggested rehabilitation scenarios: A case study, *First International Conference in Saltwater Intrusion and Coastal Aquifers- Monitoring, Modeling and Management*, Essaouira, Morocco, April 23-25, 2001.
- Essaid H.I., (1986). A comparison of the coupled fresh water-salt water flow and the Ghyben-Herzberg sharp interface approaches to modeling of transient behavior in coastal aquifer systems, *Journal of Hydrology*, 86, pp. 169-193.
- European Environment Agency, EPA, (1996). *Water Resources Problems in Southern Europe, An Overview Report*, Topic Report No. 15 – 1996, Copenhagen, pp. 45, August 1996.
- Fetter C.W., (1973). Water resources management in coastal plain aquifers, *Proceedings of the International Water Resources Association, 1<sup>st</sup> World Congress on Water Resources*, pp. 322-331.
- Fetter C.W., (1994). *Applied hydrogeology*, Macmillan College Publishing Company Inc., 3<sup>rd</sup> Edition.
- Fetter C.W., (2001). *Applied Hydrogeology*, Prentice – Hall, Inc., New Jersey.
- Fitterman D.V., and M. Deszcz-Pan, (2001). Saltwater intrusion in Everglades National Park, Florida Measured by airborne electromagnetic surveys, *First International Conference in Saltwater Intrusion and Coastal Aquifers- Monitoring, Modeling and Management.*, Essaouira , Morocco, April 23-25, 2001.

- GEOSERVICE, (2000). Cystallization technologies for prevention of saline water intrusion. CRYSTECHSALIN (EVK1-2000-631): Geological-hydrogeological and geochemical survey of the Greek test site in Eleftheres basin, Greece. Report 1, Research Directorates, 5<sup>th</sup> Framework Program, Energy, Environment and Sustainable Development, European Commission, 64p.
- Gimenez E., and I. Morell, (1997). Hydrogeochemical analysis of salinisation processes in the coastal aquifer of Oropesa (Castellon, Spain), *Environmental Geology*, 29 (1-2), pp. 118-131.
- Gkiougkis I., Mwila G., Pliakas F., Kallioras A., Diamantis I., (2010). Hydrogeological assessment of groundwater degradation at the eastern Nestos River Delta, N.E. Greece. 12<sup>th</sup> International Conference of the Geological Society of Greece, Patras, Greece, 19-22/5/2010, 4, 1697-1706.
- Gkiougkis I., T. Tzevelekis, F. Pliakas, I. Diamantis, A. Pechtelidis, (2011). Geophysical research of groundwater degradation at the eastern Nestos River Delta, NE Greece. *Advances in the Research of Aquatic Environment, Environmental Earth Sciences*, Springer, Vol. 1, pp. 259-266.
- Goldberg E. D., Broecker W. S., Gross M. G., Turekian K. K., (1971). Marine Chemistry, in *Radioactivity in the Marine Environment: Washington D. C., National Academy of Sciences*, D, p. 137–146.
- Gordu F., L.H. Motz, R. Yurtal, (2001). Simulation of seawater intrusion in the Goksu Delta at Silifke, Turkey, *First International Conference in Saltwater Intrusion and Coastal Aquifers- Monitoring, Modeling and Management.*, Essaouira, Morocco, April 23-25, 2001.
- Haddad M. Brent, (2002). Monterey County Water Recycling Project: Institutional Study, *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 128, No. 4, p. 280 – 287, July – August, 2002.
- Hassanizadeh S.M., (1997). *Mathematical modeling of hydro-geologic processes* Academic Publishing of Utrecht University.
- Headworth, H.G. and G.B. Fox, (1986). The South Downs Chalk aquifer: its development and management. *Journal of the Institute of water Engineers and Scientists*, 40, pp. 345-361.
- Hermsdorff A., and B. Rechlin, (1997). Hydrogeologische Verhältnisse., In: Schroder J. H.: *Geologie von Berlin und Brandenburg, Nr. 4: Postdam und Umgebung*, Selbstverlag Geowiss von Berlin und Brandenburg e. V., Berlin, pp. 138-142.
- Herzberg A., (1901). Die Wasserversorgung einiger Nordseebaden, *Zeitung fur Gasbeleuch und Wasserversorgung*; 44: pp. 815-819 & pp. 842-844.
- Hilali M., E. Lorrain, A. Larabi, A. Giacomelli, (2001). Setup of a G.I.S. database for the study of seawater intrusion in the Sahel aquifer system (Morocco), *First International Conference in Saltwater Intrusion and Coastal Aquifers- Monitoring, Modeling and Management.*, Essaouira , Morocco, April 23-25, 2001.
- Holzbecher E., (1998). *Modeling density-driven flow in porous media, Principles, numerics, software*, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 286 p.

- Huber Lee and Hurvey, (2001). Salt in Gaza Strip water could destroy agriculture in 20 years, M.I.T. Tech Talk, M.I.T. News Office.
- Huyakorn P.S., and G.F. Pinder, (1977). A pressure enthalpy finite difference model for simulating hydrothermal reservoirs, 2<sup>nd</sup> Int. Symp. on Computer Meth. For Part. Diff. Eq. Lehigh Univ. Bethlehem, Pa., June 22-24, 1977.
- ICW, Institute for Land and Water Management Research, (1976). Wageningen, Hydrology and water quality of the Central part of the Western Netherlands, ICW Regional Studies 9, 101 p.
- International Institute for Land Reclamation and Improvement (ILRI), (1972). Veldboek voor Land-en Waterdeskundigen, The Netherlands.
- Iribar V., J. Carrera, E. Custodio, A. Medina, (1997). Inverse modeling of seawater intrusion in the Llobregat delta deep aquifer, *Journal of Hydrology*, 198 (1-4), pp. 226-244.
- James G.A., B.K. Warwood, and R. Hiebert, (2000). "In-situ biological barriers to the spread of pollution". In: *Bioremediation*, ed. J.J. Valdez, pp. 1-13, Kluwer Academic Publishers, Boston.
- James G.A., R. Hiebert, and B.K. Warwood and A. Cunningham, (2001). Subsurface biofilm barriers for controlling saltwater intrusion. First International Conference on Saltwater Intrusion and Coastal Aquifers – Monitoring, Modeling, and Management. Essaouira, Morocco, April 23-25, 2001.
- Johnson T., E. Reichard, M. Land, S. Crawford, (2001). Monitoring, modeling and managing saltwater intrusion, Central and West Coast groundwater basins, Los Angeles County, California, First International Conference in Saltwater Intrusion and Coastal Aquifers- Monitoring, Modeling and Management., Essaouira, Morocco, April 23-25, 2001.
- Johnson T.A., R. Whitaker, W. Jackson, and D. Watt (2001). Alternatives to injection wells for seawater intrusion control, Central and West Coast groundwater basins, Los Angeles County, California. First International Conference on Saltwater Intrusion and Coastal Aquifers – Monitoring, Modeling, and Management. Essaouira, Morocco, April 23-25, 2001.
- Jorgensen D.G., (1977). Saltwater encroachment in aquifers near the Houston Ship Channel, Texas, U. S. Geological Survey Open-File Report 76-781, 45 p.
- Kalatz R., (1976). Hydrogeologischer Ergebnisbericht mit Vorratsnachweis Thyrow 1974/75, VEB Hydrogeologie Nordhausen.
- Kallioras A., F. Pliakas, and I. Diamantis, (2006). Conceptual model of a coastal aquifer system in northern Greece and assessment of saline vulnerability due to seawater intrusion conditions. *Environmental Geology*, Springer, Vol. 51, No 3, pp. 349-361.
- Kallioras A., F. Pliakas, and I. Diamantis, (2010). Simulation of groundwater flow in a sedimentary aquifer system, subjected to overexploitation. *Water, Air, & Soil Pollution*, Springer, Vol. 211, Numbers 1-4, pp. 177-201.
- Kallioras A., F. Pliakas, S. Skias, I. Gkioungkis, (2011). Groundwater vulnerability assessment at SW Rhodope aquifer system in NE Greece. *Advances in the Research of Aquatic Environment, Environmental Earth Sciences*, Springer, Vol. 2, pp. 351-358.



- Karahanoglou N., (1997). Assessment of seawater intrusion in a coastal aquifer by using correlation, principal component, and factor analyses, *Water Environment Research*, 69 (3), pp. 331-342.
- Kashef A.I., (1997). Management and control of salt-water intrusion in coastal aquifers. *Critical Reviews in Environmental Control*, Vol. 7, pp. 217-275.
- Kindiger J.L., J.B. Davis, P. Swarzensky, J.G. Flocks, (2001). Geophysical investigations of upward migrating saline water from the Lower Floridan to the Upper Floridan Aquifer, Central Indian River Region, Florida, First International Conference in Saltwater Intrusion and Coastal Aquifers- Monitoring, Modeling and Management, Essaouira , Morocco, April 23-25, 2001.
- Kohout F.A., (1960). Flow pattern of fresh water and salt water in the Biscayne Aquifer of the Miami area, Florida. *Internat. Assoc. Sci. Hydro.*, No. 52.
- Konikow L.F., L.L. August, C.I. Voss, (2001). Effects of clay dispersion on aquifer storage and recovery in coastal aquifers, First International Conference in Saltwater Intrusion and Coastal Aquifers- Monitoring, Modeling and Management, Essaouira, Morocco, April 23-25, 2001.
- Larson, S. P., et al., (1977). Simulation of Wastewater Injection into a Coastal Aquifer System Near Kahului, Maui, Hawaii, *Hydraulics in the Coastal Zone Proceedings, 25th Annual Hydraulics Division Specialty Conference, ASCE, 1977*, pp. 107-116.
- Lipshie S.R. and R.A. Larson, (1995). The West coast basin, Dominguez gap, and Alamitos seawater-intrusion barrier system, Los Angeles and Orange Counties, California. *AEGL NEWS*, 38(4), pp. 25-29.
- Loaiciga H.A., and R.B. Leipnik, (2000). Closed – form solution for coastal aquifer management, *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 126, No. 1, pp. 30-35, January – February, 2000.
- Lobo Ferreira J. P., Chachadi A. G., Catarina Diamantino, Henriques M. J., (2005a). Assessing aquifer vulnerability to seawater intrusion using GALDIT method: Part 1 – Application to the Portuguese Aquifer of Monte Gordo. *Proceedings of the 4<sup>th</sup> InterCeltic Colloquium on Hydrology and Management of Water "Water in Celtic Countries: Quantity, Quality and Climate Variability"*, eds. J.P. Lobo Ferreira and José M. P. Vieira, held at Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, July 11- 13, 2005, <http://www.iahs.info/>, IAHS (International Association of Hydrological Sciences), (<http://www.aprh.pt/celtico/PAPERS/25.PDF>), Publication 310, pp. 161-171.
- Lobo Ferreira J. P., Chachadi A. G., Diamantino C., Henriques M. J., (2005b). Assessing aquifer vulnerability to seawater intrusion using GALDIT method: Part 1 – Application to the Portuguese Aquifer of Monte Gordo. *Proceedings of the 4<sup>th</sup> InterCeltic Colloquium on Hydrology and Management of Water "Water in Celtic Countries: Quantity, Quality and Climate Variability"*, eds. J.P. Lobo Ferreira and José M. P. Vieira, held at Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, July 11- 13, 2005, <http://www.iahs.info/>, IAHS (International Association of Hydrological Sciences), (<http://www.aprh.pt/celtico/PAPERS/25.PDF>), Publication 310, pp. 161-171.

- Lorrai E., G. Lecca, M.R. Lai, A. Gadeddu, A. Giacomelli, (2001). Saltwater intrusion in the Muravera Plain (Italy), First International Conference in Saltwater Intrusion and Coastal Aquifers- Monitoring, Modeling and Management., Essaouira, Morocco, April 23-25, 2001.
- Loukili Y., D. Esselaoui, E.B. Mansouri, (2001). A numerical methodology for estimating flow, saline intrusion and contamination in coastal aquifers, First International Conference in Saltwater Intrusion and Coastal Aquifers- Monitoring, Modeling and Management., Essaouira, Morocco, April 23-25, 2001.
- Mompta – Miner, (1994). Libro Blanco de las Aguas Subterranas, Ministerio de Obras Publicas, Transportes y Medio Ambiente (MOPTMA) y Ministerio de Industria y Energia, Madrid, Espana.
- Monterey County Flood & Water Conservation District, (1989). Sources of saline intrusion in the 400-foot aquifer, Castroville area, California: D.K. Todd Engineers, Inc., Berkeley, California, 43 p.
- Moraga A., G. Chong, M.A. Fortt, H. Henriquez H., (1974). Estudio geologico de Salar de Atacama, provincial de Antofagasta, Boletin 29, Instituto de Investigaciones Geologicas, Santiago, Chile.
- Moran J.E., and G.B. Hudson, (2001). Isotopically-enriched Noble gas tracers of artificial recharge: Case Studies from California. Analytical and Nuclear Chemistry Division, Lawrence Laboratory, Livermore, CA, USA.
- Morell I., E. Gimenez, M.V. Esteller, (1996). Application of principal components analysis to the study of salinisation on the Castellon Plain (Spain), Science of the Total Environment, 177, pp. 161-171.
- Nativ R., A. Isaar, J. Rutledge, (1983). Chemical composition of rainwater and floodwaters in the Negev desert, Israel, Journal of Hydrology, 62, pp. 201-223.
- Nield D.A., and A. Bejan, (1992). Convection in porous media, Springer-Verlag, New York Inc., 408 p.
- Nishikawa T., (1997). Testing alternative conceptual models of seawater intrusion in a coastal aquifer using computer simulation, Southern California, USA, Hydrogeology Journal, V. 5, No. 3, pp. 60-74.
- Nishikawa T., and E.G. Reichard, (1996). Evaluating strategies to manage seawater intrusion, C. T. Bathala, ed., North Am. Water and Environment Congr., ASCE, Reston, Va.
- Nishikawa Tracy, (1998). Water – resources optimization model for Santa – Barbara, California, Journal of Water Resources Planning and Management, Vol. 124, No. 5, pp. 252 – 263, September – October, 1998.
- Oude Essink G.H.P., (2001). Density Dependent Groundwater Flow, Academic Publishing of Utrecht University, f. 12.50.
- Paillet F.L., (2001). Integrating surface and borehole geophysics in the characterization of salinity in a coastal aquifer, First International Conference in Saltwater Intrusion and Coastal Aquifers- Monitoring, Modeling and Management, Essaouira, Morocco, April 23-25, 2001.

- Paniconi C., (2000). Report on the preliminary study of soil and aquifer degradation from seawater intrusion in the coastal areas of Tunisia, Morocco, and Sardinia (R.A.S. L.R. 19/96, Phase II), Centre for Research, Development, and Advanced Studies in Sardinia (CRS4) and Etnte Autonomo del Flumendosa (EAF), Cagliari, Italy.
- Paniconi C., I. Khlaifi, G. Lecca, A. Giacomelli, J. Tarhouni, (2001). A modeling study of seawater intrusion in the Korba Coastal Plain, Tunisia, *Phys. Chem. Earth (B)*, Vol. 26, No. 4, pp. 345-351.
- Panteleit B., W. Kessels, W. Kantor, H.D. Schultz, (2001). Geochemical characteristics of salinisation-zones in the Coastal Aquifer Test Field (CAT-Field) in North-Germany, First International Conference in Saltwater Intrusion and Coastal Aquifers- Monitoring, Modeling and Management., Essaouira, Morocco, April 23-25, 2001.
- Payne D.F., A.M. Provost, C.I. Voss, J.S. Clarke, (2001). Mechanisms of saltwater contamination of groundwater in coastal Georgia, USA-Preliminary results of variable density transport modeling, First International Conference in Saltwater Intrusion and Coastal Aquifers- Monitoring, Modeling and Management, Essaouira, Morocco, April 23-25, 2001.
- Petalas C., and I. Diamantis, (1999). Origin and distribution of saline groundwaters in the Miocene aquifer system in coastal Rhodope area, Thrace - NE Greece. *Hydrogeology journal*, Vol. 7, No. 3, pp.305-316.
- Pliakas F., I. Diamantis, and C. Petalas, (2001). Saline water intrusion and groundwater artificial recharge in east delta of Nestos River. *Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Conference on Environmental Science and Technology*, University of the Aegean, Dept. of Environmental Studies, and Global Nest, Ermoupolis, Syros, Greece, 3-6/9/2001, Vol. 2, pp. 719-726.
- Pliakas F, Kallioras A, Diamantis I, Giougis I (2007a) Seawater intrusion in a coastal phreatic aquifer of Kavala Prefecture, Northern Greece. *Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Conference on the Environmental Science and Technology (CEST2007)*, University of the Aegean, Dept. of Environmental Studies, and Global Nest, 5-7/9/2007, Cos Island, Greece, Vol. B, 626-633
- Pliakas F, Mouzaliotis A, Kallioras A, Diamantis I (2007b) Hydrogeological assessment of the salinization problem of Xilagani – Imeros aquifer system in SW plain area of Rhodope Prefecture, Greece. *Proceedings of the 11<sup>th</sup> International Conference of the Geological Society of Greece*, Athens, Greece, 24-26/5/2007, Vol. 2, pp. 536-547
- Pliakas F., A. Kallioras, I. Diamantis, M. Stergiou, (2011). Groundwater recharge using a Soil Aquifer Treatment (SAT) system in NE Greece. *Advances in the Research of Aquatic Environment, Environmental Earth Sciences*, Springer, Vol. 1, pp. 291-298.
- Pluhowski E.J., and I.H. Kantrowitz, (1964). Hydrology of the babylon – Islip area, Suffolk County, Long Island, New York, U. S. Geological Survey, Water – Supply Paper 1768.
- Pulido-Bosch A., A. Tahiri, A. Vallejos, (1999). Hydrogeochemical characteristics of processes in the Temara aquifer in northwestern Morocco, *Water Air and Soil Pollution*, 114 (3-4), pp. 323-337.

- Reichard E.G., (1995). Groundwater – surface water management with stochastic surface water supplies: A simulation – optimization approach, *Water Resources Research*, 31(11), pp. 2845-2865.
- Revelle, R., (1941). Criteria for recognition of sea water in ground-waters. *Transactions of American Geophysical Union*, 22, pp. 593-597.
- Richards I.A., (ed), (1954). *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils*, Agric. Handbook 60, U.S. Dept. Agric. Washington, D.C., 160p.
- Riddel J.O., (1993). Excluding salt water from island wells – a theory of the occurrence of groundwater on experience at Nassau, Bahamas Islands. *Civil Engineering*, 3, pp. 383-385.
- Salama R.B., C.J. Otto, R.W. Fitzpatrick, (1999). Contributions of groundwater conditions to soil and water salinisation. *Hydrogeology Journal*. 7, pp. 46-64.
- Salgueiro R., Ribeiro L., (2001). Assessment of saltwater intrusion risk at Mexilhoeira Grande-Portimao Aquifer (Portugal) by indicator geostatistics, *First International Conference in Saltwater Intrusion and Coastal Aquifers- Monitoring, Modeling and Management.*, Essaouira, Morocco, April 23-25, 2001.
- Sanders F.B., and M. Piasecki, (2002). Mitigation of salinity intrusion in well-mixed estuaries by optimization of freshwater diversion rates, *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 128, No. 1, pp. 64 – 77, January, 2002.
- Sanz de Galdeano C., (1990). Geologic evolution of the Betic Cordilleras in the Western Mediterranean, Miocene to the present, *Tectonophysics* 172 , pp. 107-119.
- Schmorak S., and A. Mercado, (1969). Upconing of fresh water – sea water interface below pumping wells, field study, *Water Resources Research*, v. 5, pp. 1290-1311.
- Shing Ma T., M. Sophocleous, Y. Yun-Sheng, R.W. Buddemeier, (1997). Modeling saltwater upconing in a freshwater aquifer in south-central Kansas, *Journal of Hydrology*, (201), Elsevier Science B. V., pp. 120-137.
- Shrivastava S. Gyan, (1998). Impact of sea level rise on seawater intrusion into coastal aquifer, *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 3, No. 1, January 1998, pp. 74-78.
- Smith L., and D.S. Chapman, (1983). On the thermal effects of groundwater flow: 1. Regional scale systems, *J. Geophys. Res.*, 88 (B1), pp. 593-608.
- Sorensen R., M. Weisman, and G.P. Lennon, (1984). Control of erosion, inundation and salinity intrusion caused by sea level rise. In *Greenhouse Effect and Sea level rise*. M. C. Barth, J. G. Titus, (eds), Van Nostrand Reinhold, New York, New York, N.Y., pp. 179-214.
- Sorey M.L., (1978). Numerical modeling of liquid geothermal systems, U.S. Geological Survey Prof. Pap., 16044-D.
- Souza W.R., and Meyer W., (2001). Numerical simulation of regional changes in groundwater levels and in the freshwater-saltwater interface induced by increased pumpage at Barbers Point Shaft, Oahu, Hawaii, U. S. Geological Survey Water Resources Information Report 95-4206, 47 p.
- Stigter T. Y., van S.P.J. Ooijen, V.E.A. Post, C.A.J. Appelo, A.M.M. Carvalho Dill, (1998). A hydrogeological and hydrochemical explanation of the groundwater composition

- under irrigated land in a Mediterranean environment, Aljavre, Portugal, *Journal of Hydrology*, 208 (3-4), pp. 262-279.
- Stone W.L., (1978). An assessment of alternate seawater intrusion control strategies for the Oxnard Plain of Ventura County, California. "Report submitted in partial satisfaction of the requirements for the degree of Doctor of Environmental Science and Engineering. Berkeley: University of California.
- Strack O.D.L., (1976). A single-potential solution for regional interface problems in coastal aquifers, *Water Resources Research*, v. 12, no. 6, Dec. 1976.
- Stuyfzand P.J., (1985). Hydrochemistry and hydrology of the dune area between Egmond and Wijk aan Zee (in Dutch). KIWA, SWE, 85.012, Nieuwegein.
- Stuyfzand P.J., (1986). A new hydrochemical classification of watertypes: principles and application to the coastal dunes aquifer system of the Netherlands, *Proc. 9<sup>th</sup> Salt Water Intrusion Meeting*, Delft, The Netherlands, pp. 641-655.
- Stuyfzand P.J., (1993). Hydrochemistry and hydrology of the coastal dune area of the Western Netherlands, Ph.D. Thesis, Vrije Universiteit Amsterdam, The Netherlands, 366 p.
- Teatini P., G. Gambolati, M. Gonella, B. Brunone, M. Ferrante, S. Marconi, (2001). Modeling seawater intrusion in the Portorecanati Aquifer, Italy, *First International Conference in Saltwater Intrusion and Coastal Aquifers- Monitoring, Modeling and Management*, Essaouira, Morocco, April 23-25, 2001.
- Tejeda I., R. Cienfuegos, F.J. Munoz, M. Duran, (2003). Numerical modelling of saline intrusion in Salar de Atacama, *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 8, No. 1, January 2003, pp. 25-34.
- Todd D.K., (1980). *Groundwater Hydrology*, 2<sup>nd</sup> ed., John Wiley & Sons, New York, 535 p.
- Todd D.K., and L.W. Mays, (2005). *Groundwater Hydrology* (3<sup>rd</sup> edition). John Wiley & Sons, Inc., New York, USA.
- United Nations Environment Programme (UNEP), (2002). "Artificial Groundwater Recharge—India." In: *Sourcebook of Alternative Technologies for Freshwater Augmentation in Some Countries in Asia*. Newsletter and Technical Publications.
- Van Dam J.C., (1982). *Geohydrology, Lecture Notes*, Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering, Section of Hydrology, the Netherlands, 1992. Dam J. C. & Sikkema P. C.: Approximate solution of the problem of the shape of the interface in a semi-confined aquifer. *Jour. of Hydrol.*, 56, pp. 221-237.
- Van Dam J.C., (1999). *Exploitation, Restoration and Management, Theory and Applications of Transport in Porous Media, Seawater Intrusion in Coastal Aquifers*, Volume 14, Kluwer Academic Publishers, Netherlands.
- Verruijt A., (1970). *Theory of Groundwater Flow*, Macmillan, London.
- Voss A., and M. Koch, (2001). Numerical simulation of topography-induced saltwater upconing in the State of Brandenburg, Germany, *Phys. Chem. Earth (B)*, Vol. 26, No. 4, pp. 353-359.
- Voss C.I., (1984). SUTRA- A finite element simulation for saturated-unsaturated, fluid-density-dependent ground-water flow with energy transport or chemically reactive

- single-species solute transport, U.S.G.S., Water Resources Investigations Report 84-4369, 409 p.
- Weast R.C., (1982). Handbook of Chemistry and Physics, 3<sup>rd</sup> ed, D261, CRC Press, Boca Raton, Fla.
- Weddenburn L.A., (1977). Groundwater resources of Jamaica, Proceedings of 8<sup>th</sup> Caribbean Water Engineers Conference, National Water Authority, Kingston, Jamaica, pp. 23-45.
- Wilcox L.V., (1955). Classification and use of irrigation waters, U.S. Dept. Agric. Circ. 969.
- Wilcox L.V., (1995). Classification and use of irrigation waters, U.S. Dept. Agric. Circ. 969.
- Yakirevich A., A. Melloul, S. Sorek, S. Shaath, V. Borishov, (1998). Simulation of seawater intrusion into the Khan Yunis area of the Gaza Strip coastal aquifer, Hydrogeology Journal, 6 (4), pp. 549-559.
- Yates E.B., (1988). Simulated effects of groundwater management alternatives for the Salinas Valley, California, U. S. Geological Survey, Water \_ Resources Investigations, Rep. 87 – 4006, Sacramento, California.
- Yuhr L., and R. Benson, (1991). A strategy for monitoring the salt-water interface. Proceedings of the Annual Meeting and 10th Anniversary of the American Institute of Hydrology, Orlando, Florida, September 4-7, 1991.
- Ziegenbalg G., K. Dimitriadis, E. Sarrikostis, (2002). CRYSTECHSALIN, a European Project to manage and reduce saline water intrusion into coastal aquifers, Πρακτικά 6<sup>ου</sup> Πανελληνίου Υδρογεωλογικού Συνεδρίου, Ξάνθη 8 – 10 Νοεμβρίου 2002, σελ. 13–34.
- Γιαννουλόπουλος Π., (2002). Μοντέλο προσομοίωσης της ροής των υπόγειων νερών του αργολικού πεδίου, Πρακτικά 6<sup>ου</sup> Πανελληνίου Υδρογεωλογικού Συνεδρίου, Ξάνθη 8 – 10 Νοεμβρίου 2002, σελ. 223-234.
- Γιόζας Γ., Α. Παναγόπουλος, Α. Αντωνάκος, Ν. Λαμπράκης, (2002). Υδρογεωλογικές και υδροχημικές συνθήκες του προσχωματικού υδροφόρου ορίζοντα της λεκάνης απορροής του ποταμού Βολιναίου, ΒΔ Πελοπόννησος, Πρακτικά 6<sup>ου</sup> Πανελληνίου Υδρογεωλογικού Συνεδρίου, Ξάνθη 8 – 10 Νοεμβρίου 2002, σελ. 71-82.
- Γκιουγκής Ι., Φ. Πλιάκας, και Ι. Διαμαντής, (2009). Διερεύνηση της ποιοτικής υποβάθμισης υπόγειου υδροφόρου συστήματος του Ανατολικού Δέλτα του Ποταμού Νέστου. Πρακτικά Κοινού Συνεδρίου, 11<sup>ου</sup> της Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης (ΕΥΕ) και 7<sup>ου</sup> της Ελληνικής Επιτροπής Διαχείρισης Υδατικών Πόρων (ΕΕΔΥΠ) με θέμα: Ολοκληρωμένη Διαχείριση Υδατικών Πόρων σε Συνθήκες Κλιματικών Αλλαγών. Βόλος, 27-30/5/2009, σελ. 107-114.
- Διαμαντής Ι., (1985). Υδρογεωλογική μελέτη της λεκάνης Βιστονίδας. Μελέτη υδροφόρων οριζόντων μέσα σε ένα ευρύ ετερογενές πεδίο. Διδακτορική διατριβή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών ΔΠΘ, Ξάνθη.
- Διαμαντής Ι., (2001). Παράκτια υδροφόρα στρώματα. Σημειώσεις για τους μεταπτυχιακούς φοιτητές του Α΄ εξαμήνου του Γεωλογικού Τμήματος του Α.Π.Θ.
- Διαμαντής Ι., και Θ. Τζεβελέκης, (1991). Υδρογεωλογικές και υδροχημικές συνθήκες στις παράκτιες προσχώσεις της Νήσου Θάσου, Πρακτικά 1<sup>ου</sup> Υδρογεωλογικού Συνεδρίου (Δελτίο 6), Λευκωσία Κύπρου, 14 – 17 Οκτωβρίου 1991, σελ. 131-148.

- Διαμαντής Ι., και Φ. Πλιάκας, (2011). Ειδικά θέματα Εφαρμοσμένης Υδρογεωλογίας. Σημειώσεις στο πλαίσιο του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών: Υδραυλική Μηχανική, του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Δ.Π.Θ., Ξάνθη.
- Διαμαντής Ι., Π. Μαρίνος, κ.ά., (1990). Αναγνώριση εναλλακτικών λύσεων για τις ανάγκες νερού για άρδευση των ευρύτερων περιοχών λεκάνης Κάριανης - Ορφανίου και Γιαλοχωρίων. Ερευνητική Έκθεση προς το Νομαρχιακό Διαμέρισμα Καβάλας, 117 σελ.
- Διαμαντοπούλου Π., (1999). Υδρογεωλογικές συνθήκες και υδραυλικές παράμετροι του υδροφόρου ορίζοντα που αναπτύσσεται στον ανώτερο ορίζοντα των πλειοκαινικών ιζημάτων της ΒΑ Ζακύνθου, Πρακτικά 5<sup>ου</sup> Υδρογεωλογικού Συνεδρίου, Λευκωσία, Νοέμβριος 1999, σελ. 217-229.
- Καλλέργης Γ., (2000). Εφαρμοσμένη Περιβαλλοντική Υδρογεωλογία, Εκδόσεις ΤΕΕ, Β' Τόμος.
- Καλλέργης Γ., Ν. Λαμπράκης, Η. Νόκας – Ζωγράφος, (1997). Απαιτούμενος χρόνος για την απορρύπανση υφαλμυρισμένων υδροφόρων, Πρακτικά 4<sup>ου</sup> Υδρογεωλογικού Συνεδρίου, Θεσσαλονίκη 14 – 16/11/1997, σελ. 97-103.
- Καλλιώρας Α., (2002). Διερεύνηση συνθηκών υφαλμύρισης υδροφόρων του νοτιοδυτικού πεδινού τμήματος του Ν. Ροδόπης. Προδιδακτορική Διατριβή που υποβλήθηκε στο Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Δ.Π.Θ., Οκτώβριος 2002, Ξάνθη, 130 σελ.
- Καλλιώρας Α., (2008). Διαχείριση υπόγειων υδατικών πόρων σε υδροφόρους που υπόκεινται σε καθεστώς θαλάσσιας διείσδυσης. Η περίπτωση του δυτικού παράκτιου τμήματος του Νομού Ροδόπης. Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή Δ.Π.Θ., Ξάνθη, 285 σελ.
- Κουμαντάκης Ι., Α. Παναγόπουλος, Ξ. Σταυρόπουλος, Κ. Βουδούρης, (1999). Εφαρμογή τεχνητού εμπλουτισμού στο παράκτιο υδροφόρο σύστημα του βορείου τμήματος του νομού Κορινθίας, Πρακτικά 5<sup>ου</sup> Υδρογεωλογικού Συνεδρίου, Λευκωσία, Νοέμβριος 1999, σελ. 65-80.
- Λαμπράκης Ν., Λ. Τηνιακός, Κ. Βουδούρης, Γ. Καλλέργης, (1995). Υδροχημικά χαρακτηριστικά των νερών του γρανοδιοριτικού υδροφορέα της νήσου Σερίφου (Δυτικές Κυκλάδες), Πρακτικά 3<sup>ου</sup> Υδρογεωλογικού Συνεδρίου, Ηράκλειο Κρήτης, 3 – 5 Νοεμβρίου 1995, σελ. 308-319.
- Μιμίδης Θ., Σ. Αγγελίδης, Σ. Κουτσομήτρος, Μ. Ψυχογιού, Γ. Κάργας, Α. Σγουμποπούλου, (1997). Μελέτη του υδροφόρου ορίζοντα της πεδιάδας των Ιρίων Αργολίδας με έμφαση στις υδροχημικές διεργασίες και την εισβολή της θάλασσας, Πρακτικά 4<sup>ου</sup> Υδρογεωλογικού Συνεδρίου, Θεσσαλονίκη 14 – 16/11/1997, σελ. 292-308.
- Μονόπωλης Δ., Π. Σοφίου, Δ. Παπαμαστοράκης, Ε. Στειακάκης, Μ. Κλειδοπούλου, Δ. Βαβαδάκης, (1995). Μελέτη των υδρολογικών παραμέτρων της πηγής Αλμυρού Ηρακλείου (Κρήτη) σε συνθήκες φυσικής ροής, Πρακτικά 3<sup>ου</sup> Υδρογεωλογικού Συνεδρίου, Ηράκλειο Κρήτης, 3 – 5 Νοεμβρίου 1995, σελ. 105-123.
- Μονόπωλης Δ., Π. Σοφίου, Δ. Παπαμαστοράκης, Ε. Στειακάκης, Μ. Κλειδοπούλου, Δ. Βαβαδάκης, (1995). Μελέτη των υδρολογικών παραμέτρων της πηγής Αλμυρού

- Ηρακλείου (Κρήτη) σε συνθήκες τεχνητών παρεμβάσεων, Πρακτικά 3<sup>ου</sup> Υδρογεωλογικού Συνεδρίου, Ηράκλειο Κρήτης, 3 – 5 Νοεμβρίου 1995, σελ. 132-149.
- Μονόπωλης Δ., Π. Σοφίου, Ε. Στειακάκης, Μ. Καδιανάκης, Δ. Βαβαδάκης, Μ. Κλειδοπούλου, (1997). Εκμετάλλευση παράκτιων καρστικών υδροφόρων μέσω δικτύων γεωτρήσεων (Παραδείγματα από Κρήτη), Πρακτικά 4<sup>ου</sup> Υδρογεωλογικού Συνεδρίου, Θεσσαλονίκη 14 – 16/11/1997, σελ. 309-323.
- Οικονομόπουλος Π., (1995). Η υπαλμύρωση της καρστικής πηγής Ηρακλείου Αλμυρού και η σχέση της με τις υποθαλάσσιες πηγές Μπαλί, Πρακτικά 3<sup>ου</sup> Υδρογεωλογικού Συνεδρίου, Ηράκλειο Κρήτης, 3 – 5 Νοεμβρίου 1995, σελ. 124-127.
- Οικονομόπουλος Π., (1997). Οι ποσοτικές και ποιοτικές εποχιακές μεταβολές των αμφιδρομούντων υποθαλάσσιων πηγών του Μπαλί ως μοναδικοί υπεύθυνοι παράγοντες υπαλμύρωσεως της καρστικής πηγής Ηρακλείου Κρήτης, Πρακτικά 4<sup>ου</sup> Υδρογεωλογικού Συνεδρίου, Θεσσαλονίκη 14 – 16/11/1997, σελ. 366.
- Παναγόπουλος Α., Ε. Μεταξά, Φ. Παπαδόπουλος, (2002). Χαρακτηριστικά του υπόγειου υδατικού δυναμικού της ανατολικής Λήμνου, Πρακτικά 6<sup>ου</sup> Πανελληνίου Υδρογεωλογικού Συνεδρίου, Ξάνθη 8 – 10 Νοεμβρίου 2002, σελ. 95-106.
- Πεταλάς Χ., (1997). Ανάλυση υδροφόρων συστημάτων στο ετερογενές και παράκτιο πεδίο Ν. Ροδόπης. Διδακτορική διατριβή. Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών - Πολυτεχνική Σχολή του Δ.Π.Θ., Ξάνθη, Ιούλιος 1997, 288 σελ.
- Πεταλάς Χ., Ι. Διαμαντής, Φ. Πλιάκας, (1999). Συνέπειες από την έλλειψη κατάλληλης διαχείρισης των παράκτιων υδροφορέων- Η περίπτωση της Ροδόπης. Πρακτικά 5<sup>ου</sup> Υδρογεωλογικού Συνεδρίου, 12-14/11/1999, Λευκωσία, Κύπρος, σελ. 19-33.
- Πεταλάς Χ., Σ. Πανίλας, Ι. Διαμαντής, Φ. Πλιάκας, (2001). Υπολογισμός και αξιολόγηση των υδραυλικών παραμέτρων δυο υδροφόρων συστημάτων σε διαφορετικό ιζηματογενές περιβάλλον στη μάζα της Ροδόπης, Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Congress of the Geological Society of Greece, Athens, 26-28/9/2001, Vol. 5, pp. 1913-1922.
- Πεταλάς Χ., Φ. Πλιάκας, και Ι. Διαμαντής, (2002a). Το πρόβλημα της διείσδυσης της θάλασσας σε παράκτιους υδροφορείς της Ανατολικής Μακεδονίας και Θράκης και μέθοδοι αντιμετώπισής του. Τεχνικά Χρονικά, Επιστημονική Έκδοση του Τ.Ε.Ε., σειρά Ι, τόμος 22, τεύχος 1-2, 2002, σελ. 31-43.
- Πεταλάς Χ., Φ. Πλιάκας, Α. Καλλιώρας, Ι. Διαμαντής, (2002b). Τεχνικά, διαχειριστικά και οικονομοτεχνικά στοιχεία σύγχρονων τάσεων αντιμετώπισης της διείσδυσης του αλμυρού νερού σε παράκτιες περιοχές στο διεθνή χώρο”. Πρακτικά 6<sup>ου</sup> Υδρογεωλογικού Συνεδρίου της Ελληνικής Επιτροπής Υδρογεωλογίας της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας (Ε.Γ.Ε.) και του Συνδέσμου Γεωλόγων και Μεταλλειολόγων Κύπρου, 8-10/11/2002, Ξάνθη, σελ. 23-34.
- Πλιάκας Φ., (1998). Έρευνα επί των καταλλήλων μεθόδων τεχνητού εμπλουτισμού σε ετερογενείς υδροφορείς αλλουβιακών σχηματισμών. Εφαρμογές σε υδροφορείς του πεδινού τμήματος Ξάνθης. Διδακτορική διατριβή που υποβλήθηκε στο Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών του Δ.Π.Θ., 29/1/1998, σελ. xx+290, Ξάνθη.
- Πλιάκας Φ., (2011). Ειδικά θέματα Υδραυλικής των Υπόγειων Νερών. Σημειώσεις για το 8<sup>ο</sup> εξάμηνο σπουδών του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Δ.Π.Θ., 121 σελ., Ξάνθη



- Πλιάκας Φ., Ι. Διαμαντής, Χ. Πεταλάς, (1999). Περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την προτεινόμενη εφαρμογή τεχνητού εμπλουτισμού υπόγειων υδροφορέων περιοχής Ορφανού Καβάλας. 6<sup>ο</sup> Διεθνές Συνέδριο Περιβαλλοντικής Επιστήμης & Τεχνολογίας – Πυθαγόρειο Σάμου, 30/8 - 2/9/1999, σελ. 381-390.
- Πουλοβασίλης Α., Π. Γιαννουλόπουλος, Α. Ζύμης, (2002). Η εφαρμογή του τεχνητού εμπλουτισμού στο αργολικό πεδίο. Πρόσφατα αποτελέσματα και προοπτικές, Πρακτικά 6<sup>ου</sup> Πανελληνίου Υδρογεωλογικού Συνεδρίου, Ξάνθη 8 – 10 Νοεμβρίου 2002, σελ. 59-70.
- Σακκάς Ι., Διαμαντής Ι., Πλιάκας Φ., κ.ά., (1998). Μελέτη τεχνητού εμπλουτισμού υδροφορέων Ξάνθης - Ροδόπης. Ερευνητικό πρόγραμμα για λογαριασμό του Υπουργείου Γεωργίας, Τομείς Υδραυλικών Έργων και Γεωτεχνικής Μηχανικής, Δ.Π.Θ., τεύχη 5, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Δ.Π.Θ., Ξάνθη.
- Σταμάτης Γ., Ν. Λαμπράκης, Ε. Ψωμιάδης, Ι. Γάτσης, (2002). Χωροχρονική εξέλιξη της ποιοτικής υποβάθμισης του φρεάτιου υδροφορέα από ανθρωπογενείς επιδράσεις στην περιοχή Εξαμίλλια Κορίνθου, Πρακτικά 6<sup>ου</sup> Πανελληνίου Υδρογεωλογικού Συνεδρίου, Ξάνθη 8 – 10 Νοεμβρίου 2002, σελ. 259-268.
- Χαρμανίδης Φ., (1999). Υδροχημική σύσταση των υπόγειων νερών στα νησιά Σύρο – Τήνο – Πάρο – Αντίπαρο, Πρακτικά 5<sup>ου</sup> Υδρογεωλογικού Συνεδρίου, Λευκωσία, Νοέμβριος 1999, σελ. 397-406.