

ΔΗΜΟΚΡΙΤΕΙΟ 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**

**2. ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΟΥ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΥ ΤΩΝ**  
**ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΝΕΡΩΝ**

Ξάνθη 2024



# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	1
2. ΦΥΣΙΚΟΣ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΛΛΑΓΗ.....	2
2.1. Γενικά.....	2
2.2. Κλιματική αλλαγή και υπόγειοι υδατικοί πόροι .....	3
3. ΣΚΟΠΟΙ, ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΙ ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΤΟΥΣ .....	6
3.1. Μέθοδοι εμπλουτισμού απευθείας στην επιφάνεια (direct-surface recharge).....	8
3.2. Μέθοδοι εμπλουτισμού απευθείας στο υπέδαφος (Direct - subsurface recharge) .....	23
3.3. Συνδυασμοί επιφανειακού και υπεδαφικού εμπλουτισμού (combination of surface - subsurface recharge) .....	27
3.4. Μέθοδοι έμμεσου εμπλουτισμού (indirect recharge).....	28
3.5. Εφαρμογή Τ.Ε. για την αντιμετώπιση της θαλάσσιας διείσδυσης (sea water intrusion) .....	31
3.6. Τεχνητός εμπλουτισμός με επεξεργασμένα αστικά υγρά απόβλητα.....	33
4. ΤΟ ΕΥΡΥΤΕΡΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΤΩΝ ΕΡΓΩΝ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΥ .....	56
4.1. Κοινωνικοπολιτικές συνθήκες.....	56
4.2. Επιφανειακές υδρολογικές συνθήκες.....	57
4.3. Υδρογεωλογικές συνθήκες .....	57
5. ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ ΔΙΗΘΗΣΗΣ .....	59
6. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΕΡΓΩΝ ΤΕΧΝΗΤΟΥ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΥ .....	61
7. ΟΙΚΟΝΟΜΟΤΕΧΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ ΤΕΧΝΗΤΟΥ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΥ .	67
8. ΥΔΡΑΥΛΙΚΑ, ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΑ, ΤΕΧΝΙΚΑ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΣΥΓΧΡΟΝΩΝ ΘΕΩΡΗΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΟΝ ΤΕΧΝΗΤΟ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟ.....	69
8.1. Γενικά.....	69
8.2. Εισαγωγή .....	69
8.3. Συστήματα τεχνητού εμπλουτισμού.....	73
8.4. Σχεδιασμός και διαχείριση .....	79
9. ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΤΙΚΑ ΖΗΤΗΜΑΤΑ ΠΟΥ ΑΦΟΡΟΥΝ ΣΤΗΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΤΕΧΝΗΤΟΥ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΥ .....	113
9.1. Φυσικοί περιβαλλοντικοί παράγοντες που επηρεάζουν την αποτελεσματικότητα του τεχνητού εμπλουτισμού.....	113

9.2. Κοινωνικοοικονομικοί παράγοντες που επηρεάζουν την αποτελεσματικότητα του τεχνητού εμπλουτισμού .....	124
9.3. Οφέλη, περιορισμοί και αβεβαιότητες .....	129
<b>10. ΔΙΕΘΝΕΙΣ ΚΑΙ ΕΛΛΗΝΙΚΕΣ ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΕΣ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΕΣ ΣΕ ΖΗΤΗΜΑΤΑ ΤΕΧΝΗΤΟΥ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΥ .....</b>	<b>136</b>
10.1. Διεθνής Επιτροπή MAR (της ΙΑΗ) .....	136
10.2. IGRAC και Acacia Institute .....	137
10.3. Επιτροπή ARGW SC (της EWRI/ASCE).....	137
10.4. Έκδοση πρότυπων οδηγιών για τον τεχνητό εμπλουτισμό των υπόγειων νερών της ASCE .....	138
10.5. Διεθνή Συμπόσια για τον τεχνητό εμπλουτισμό των υπόγειων νερών.....	139
10.6. Ημερίδα: Τεχνητός Εμπλουτισμός υπόγειων υδροφορέων (Ελληνική Επιτροπή Υδρογεωλογίας – Ελληνική Γεωλογική Εταιρία, 1999).....	143
<b>11. ΕΡΕΥΝΕΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΕΧΝΗΤΟΥ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΥ ΣΤΟ ΔΙΕΘΝΗ ΧΩΡΟ ΚΑΙ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ .....</b>	<b>144</b>
11.1. Διεθνής εμπειρία.....	144
11.2. Έρευνες, εφαρμογές και προτάσεις διαχείρισης εμπλουτισμού στην Ελλάδα	160
11.3. Σύνοψη ερευνητικών εργασιών στο πλαίσιο προγραμματισμού, σχεδιασμού ή/και λειτουργίας έργων τεχνητού εμπλουτισμού .....	210
<b>12. ΑΣΚΗΣΕΙΣ .....</b>	<b>215</b>
<b>13. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....</b>	<b>222</b>

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο πληθυσμός της γης, το έτος 2050, προβλέπεται να αυξηθεί στο διπλάσιο από το σημερινό αριθμό, δηλαδή από τα 5,6 δισεκατομμύρια ανθρώπων να φτάσει τα 10 δισεκατομμύρια περίπου (Bouwer, 1995a). Η μεγαλύτερη αύξηση θα πραγματοποιηθεί στον Τρίτο Κόσμο, όπου θα κατοικεί, τότε, περί το 90% του συνολικού πληθυσμού της γης. Επίσης προβλέπεται να συνεχιστεί να δυναμώνει το φαινόμενο της μετανάστευσης από την ύπαιθρο στα αστικά κέντρα, ενώ προς το τέλος του αιώνα μας θα υπάρχουν 22 μεγαλουπόλεις (με πληθυσμό μεγαλύτερο των 10 εκατομμυρίων), 18 από τις οποίες θα εντοπίζονται στον Τρίτο Κόσμο. Τέτοιου μεγέθους πόλεις αναμένεται να παρουσιάζουν τεράστιες ανάγκες σε νερό, να παράγουν τεράστιες ποσότητες αποβλήτων και κατά συνέπεια να αντιμετωπίζουν εξίσου τεράστια προβλήματα.

Σήμερα, υπολογίζεται ότι ο μισός πληθυσμός του Τρίτου Κόσμου δεν έχει πρόσβαση σε καθαρό πόσιμο νερό, ότι ένα δισεκατομμύριο ανθρώπων προσβάλλονται από αρρώστιες και επιδημίες που έχουν σαν αίτιο γένεσής τους το μολυσμένο νερό, ενώ 12 εκατομμύρια από αυτούς πεθαίνουν κάθε χρόνο, από τα οποία 80% είναι παιδιά. Επίσης εκτιμάται ότι χρειάζεται όλο και περισσότερο νερό για άρδευση προκειμένου να υπάρχει αρκετή τροφή να θρέψει τον αυξανόμενο πληθυσμό. Η δοκιμασία αναζήτησης νερού γίνεται όλο και πιο έντονη, ενώ η μη έγκαιρη επίλυση του προβλήματος μπορεί να οδηγήσει, μελλοντικά, σε κατά τόπους αναταραχές και πολέμους (Priest, 1992).

Οι πληθυσμοί στις βιομηχανικές χώρες, υπολογίζεται να παραμείνουν σε σχετικά σταθερά επίπεδα, εκτός ίσως στις ΗΠΑ όπου ο πληθυσμός μπορεί να αυξηθεί, κατά τον επόμενο αιώνα, από τα μελλοντικά κύματα μετανάστευσης. Παρ' όλα αυτά, η ζήτηση νερού θα αυξάνεται και σε αυτές τις χώρες κυρίως για την κάλυψη αναγκών που έχουν να κάνουν με το περιβάλλον.

Η αυξανόμενη ζήτηση νερού απαιτεί μεγαλύτερη αποθήκευσή του κατά τις περιόδους που παρατηρείται πλεόνασμα νερού για να μπορεί αυτό να χρησιμοποιείται κατά τις περιόδους ζήτησής του. Μέχρι σήμερα αυτό έχει επιτευχθεί με την κατασκευή των φραγμάτων. Παρ' όλα αυτά, τα φράγματα έχουν περιορισμένη περίοδο ζωής εξ αιτίας των κατά περίπτωση κατασκευαστικών αστοχιών τους και της πιθανής συσσώρευσης ιζημάτων στις ανάντη λίμνες τους. Επίσης, οι κατάλληλες θέσεις που προσφέρονται για την κατασκευή φραγμάτων ολοένα και σπανίζουν, γιατί τα φράγματα δεν μπορούν να κατασκευαστούν σε μεγάλες πεδινές ή επίπεδες επιφάνειες, παρουσιάζουν απώλειες νερού κύρια από εξάτμιση και μπορεί να δημιουργήσουν δυσμενείς επιπτώσεις στο φυσικό και το πολιτικοοικονομικό περιβάλλον (Pearce, 1992). Εάν το νερό δεν μπορεί να αποθηκευτεί επιφανειακά τότε πρέπει να αποθηκεύεται υπόγεια αυξάνοντας έτσι τις διαθέσιμες ποσότητες του υπόγειου νερού κυρίως με διαδικασίες εφαρμογής τεχνητού εμπλουτισμού (Bouwer, 1995a).

Η άντληση του υπόγειου νερού έχει αυξηθεί δραματικά σε πολλά μέρη του κόσμου, ώστε σε πολλές περιπτώσεις οι ετήσιες καταναλώσεις υπόγειου νερού ξεπερνούν κατά πολύ το μέσο όρο της ποσότητας του νερού που αποθηκεύεται στο έδαφος μέσω φυσικών πηγών εμπλουτισμού. Όπου συμβαίνει αυτό, μειώνεται ο όγκος του αποθηκευμένου νερού, με αποτέλεσμα την πτώση της στάθμης του και συνεπώς την εμφάνιση προβλημάτων, όπως τη διείσδυση θαλάσσιου νερού. Υπάρχουν επίσης περιπτώσεις, όπου η κατάσταση επιδεινώνεται ακόμα περισσότερο, μειώνοντας τις πιθανότητες φυσικού εμπλουτισμού με τα παρακάτω (ASCE, 1987):

1. Κατασκευές σε αντιπλημμυρικά και αντιδιαβρωτικά έργα, που εμποδίζουν την επιφανειακή απορροή.
2. Καταστροφή περιοχών φυσικού εμπλουτισμού, με τη δόμησή τους (κτίρια, δρόμοι, αεροδρόμια κλπ.).
3. Εκτροπές ρευμάτων που θα μπορούσαν να βοηθήσουν στο φυσικό εμπλουτισμό των υπόγειων νερών.

Η ορθολογική χρήση του επιφανειακού και υπόγειου νερού είναι ένα πολύ σημαντικό στοιχείο, που θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στην ανάπτυξη ενός σχεδίου διάθεσης και αποθήκευσης νερού. Ο τεχνητός εμπλουτισμός υπόγειων υδροφόρων μπορεί να γίνει τελείως ανεξάρτητα ή και σε συνδυασμό με τη φυσική διήθηση μέσω περατών στρωμάτων. Ο τεχνητός εμπλουτισμός δίνει δυναμική λύση στο πρόβλημα της εκμετάλλευσης των υπόγειων νερών, προλαμβάνοντας ή ελαχιστοποιώντας την υπεράντληση και τα επακόλουθά της.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι το μέλλον του τεχνητού εμπλουτισμού διαφαίνεται αρκετά ευοίωνο αφού η δυνατότητα υπόγειας αποθήκευσης του νερού εξελίσσεται σε ισχυρή εναλλακτική προοπτική στην επίλυση του προβλήματος της αντιμετώπισης βραχυπρόθεσμων, εποχιακών ή και μακροπρόθεσμων διαφορών μεταξύ προσφοράς και ζήτησης νερού (Bouwer, 1995b).

## **2. ΦΥΣΙΚΟΣ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΣ ΚΑΙ ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΛΛΑΓΗ**

### **2.1. Γενικά**

(κύρια βιβλιογραφική πηγή: ASCE, 1987)

Ο φυσικός εμπλουτισμός ενός υπόγειου ταμειυτήρα νερού μπορεί να συμβεί με πολλούς τρόπους, μερικοί από τους οποίους είναι:

- Διηθήσεις από υδατορεύματα.
- Κατείσδυση προς το υπέδαφος του νερού της βροχόπτωσης.
- Διαφυγές από μικρές λίμνες νερού, από λίμνες και από δεξαμενές.
- Υποεπιφανειακή ροή.

Η διήθηση από υδατορεύματα και η κατείσδυση της βροχόπτωσης είναι γενικά, οι δυο βασικότερες πηγές εμπλουτισμού. Σημαντικές ποσότητες νερού μπορούν να κατεισδύσουν σε περιοχές, όπου χείμαρροι διασχίζουν επιφανειακές και υποεπιφανειακές αποθέσεις, όπως τα ανώτερα και αβαθή τμήματα αλλουβιακών σχηματισμών. Όταν η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα είναι σε σημαντική απόσταση κάτω από τον πυθμένα του υδατορεύματος, η περατότητα και το πάχος των υπερκείμενων αποθέσεων είναι οι πρωταρχικοί παράγοντες στον καθορισμό του ρυθμού διήθησης από το υδατόρευμα προς τον υδροφόρο, όπως και η υδραυλική κλίση του υβώματος του νερού εμπλουτισμού στις περιπτώσεις όπου η επιφάνεια του υβώματος πλησιάζει τον πυθμένα του υδατορεύματος.

Η κατείσδυση της βροχόπτωσης επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες όπως: (1) τη δομή και τη διαβάθμιση των επιφανειακών και υποεπιφανειακών αποθέσεων και την κατακόρυφη περατότητα τους, (2) τη σύσταση και το είδος της επιφανειακής φυτικής επικάλυψης, (3) τη συχνότητα, όγκο και ένταση της βροχόπτωσης, (4) την τοπογραφία της περιοχής, (5) τη θερμοκρασία. Σε μερικές περιπτώσεις, η κατείσδυση από τις κοίτες των ρευμάτων και τη βροχόπτωση παίζουν πολύ μικρό ρόλο στον φυσικό εμπλουτισμό. Άλλες πηγές, όπως είναι η υποεπιφανειακή ροή και ο ακούσιος εμπλουτισμός, που προέρχεται από χρήσεις νερού στην επιφάνεια, μπορεί να είναι μεγαλύτερης σημασίας. Ο συμπτωματικός εμπλουτισμός από χρήση νερών, περιλαμβάνει τη διείσδυση από: (α) το νερό άρδευσης, (β) βόθρους και σηπτικές δεξαμενές, (γ) τη διαρροή σωλήνων ύδρευσης και αποχέτευσης και (δ) υγρά λύματα στην επιφάνεια του εδάφους.

Υπάρχουν όμως και ανθρώπινες ενέργειες, οι οποίες έχουν αντίθετα αποτελέσματα, δηλαδή τείνουν να μειώσουν το φυσικό εμπλουτισμό. Οι δραστηριότητες αυτές είναι:

- α) Εγκιβωτισμός καναλιών για αντιπλημμυρικά και αντιδιαβρωτικά έργα.
- β) Συλλογή λυμάτων και βιομηχανικών αποβλήτων, πλούσιων σε μεταλλικά στοιχεία, και διοχέτευση αυτών στη θάλασσα ή έξω από την λεκάνη του υδροφόρου.

γ) Δόμηση των περιοχών φυσικού εμπλουτισμού (δρόμοι, πεζόδρομοι, αεροδρόμια, θέσεις πάρκινγκ, κτίρια).

δ) Εκτροπή επιφανειακών νερών, τα οποία σε άλλη περίπτωση θα διείσδυαν προς τον υπόγειο υδροφόρο.

## **2.2. Κλιματική αλλαγή και υπόγειοι υδατικοί πόροι**

(κύριες βιβλιογραφικές πηγές: ΕΜΕΚΑ, 2011, Kundzewicz et al., 2009, Treidel et al., 2012)

Η επίδραση που έχει η κλιματική αλλαγή στα υπόγεια νερά εντοπίζεται κυρίως στις αλλαγές στον εμπλουτισμό των υπόγειων υδροφόρων συστημάτων. Κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες (καλή σύνδεση μεταξύ ποταμού και υδροφόρου, χαμηλοί ρυθμοί διάχυσης του εμπλουτισμού του υπόγειου νερού), οι αλλαγές στη στάθμη του ποταμού επηρεάζουν τη στάθμη του υδροφόρου περισσότερο από τις αλλαγές στον εμπλουτισμό του (Allen et al., 2003). Εξάλλου, η αλμύριση του υπόγειου νερού στις παράκτιες περιοχές μπορεί να αυξηθεί λόγω της ανόδου της στάθμης της θάλασσας.

Συνήθως εκεί που εντοπίζεται μια τάση στην απορροή ενός ποταμού παρατηρείται παρόμοια τάση στην απορροή του υπόγειου νερού. Ωστόσο, λόγω έλλειψης στοιχείων, δεν ήταν δυνατό να καθοριστούν οι τάσεις είτε στον εμπλουτισμό των υπογείων νερών, είτε στη διακύμανση της στάθμης τους, κατά τη διάρκεια του 20<sup>ου</sup> αιώνα. Η παρατηρούμενη μείωση της στάθμης των υδροφόρων οριζόντων, οφειλόταν στον υψηλό ρυθμό άντλησης του υπόγειου νερού.

Λόγω της ελλιπούς απεικόνισης της διαδικασίας εμπλουτισμού στα σύγχρονα κλιματικά μοντέλα, η χρήση παγκόσμιων υδρολογικών μοντέλων όπως το WaterGAP Global Hydrology Model (WGHM, Döll and Fiedler, 2009) είναι απαραίτητη για τον προσδιορισμό των αλλαγών στα υπόγεια νερά. Σύμφωνα με αυτό το μοντέλο, ο μέσος παγκόσμιος εμπλουτισμός των υπόγειων νερών θα αυξηθεί λιγότερο μελλοντικά, από τη συνολική απορροή (Döll and Florke, 2005). Ενώ η συνολική απορροή υπολογίστηκε ότι θα αυξηθεί κατά 9% το 2050 σε σχέση με το κλίμα την περίοδο 1961-1990, ο εμπλουτισμός των υπόγειων νερών θα αυξηθεί μόλις κατά 2%. Οι περιοχές στις οποίες εντοπίζεται ότι θα υπάρξει αύξηση (ή μείωση) στην συνολική απορροή, σπάνια ταυτίζονται με αυτές που προβλέπεται ότι θα αυξηθεί (ή θα μειωθεί) ο εμπλουτισμός των υπόγειων νερών.

Αν ληφθούν υπόψη τέσσερα σενάρια (δύο κλιματικά μοντέλα, δύο σενάρια για τις εκπομπές), υπολογίζονται σε ορισμένες περιοχές δραματικές μειώσεις στον εμπλουτισμό των υπόγειων νερών (συγκρινόμενα με την περίοδο 1961-1990 ακόμη και πάνω από 70% μείωση μέχρι το 2050), όπως στη βορειοανατολική Βραζιλία, τη νοτιοδυτική Αφρική και κατά μήκος των νότιων ακτών της Μεσογείου. Η δραματική πτώση στον εμπλουτισμό στην βορειοανατολική Βραζιλία θεωρείται ως παράδειγμα κρίσιμης τρωτότητας παγκοσμίως (Kundzewicz et al., 2007, 2008). Στις περιοχές αυτές που παρατηρείται μείωση στη συνολική απορροή, η ποσοστιαία μείωση του εμπλουτισμού των υπόγειων νερών είναι μεγαλύτερη από αυτή της συνολικής απορροής, κάτι που οφείλεται στην υπόθεση του μοντέλου ότι στις ημιάνυδρες περιοχές ο εμπλουτισμός εμφανίζεται μόνο όταν οι κατακρημνίσεις ξεπεράσουν ένα ορισμένο όριο. Το σύστημα δείχνει ένα ισχυρό φαινόμενο ενίσχυσης, με μια μικρή μεταβολή στις κατακρημνίσεις, καταδεικνύοντας μεγάλες μεταβολές στον εμπλουτισμό. Ωστόσο, υπάρχει μεγάλη αβεβαιότητα στην πρόβλεψη μέσα από κλιματικά μοντέλα και η αύξηση της μεταβλητότητας των βροχοπτώσεων δεν λήφθηκε υπόψη σε αυτή τη μελέτη, συνεπώς είναι πιθανό να έχει υπερεκτιμηθεί η μείωση του εμπλουτισμού των ημιάγονων περιοχών. Σε μερικές περιοχές (π.χ. στην Ισπανία και την Αυστραλία), οι διαφορές στον εμπλουτισμό των υπόγειων νερών που υπολογίστηκαν από δύο διαφορετικά κλιματικά μοντέλα για τις ίδιες συνθήκες εκπομπής είναι μεγαλύτερες από αυτά που υπολογίστηκαν από διαφορετικά σενάρια εκπομπής για το ίδιο κλιματικό μοντέλο. Σε εσωτερικούς υδροφόρους, η μείωση του

εμπλουτισμού των υπόγειων νερών μπορεί να οδηγήσει στην εισχώρηση υφάλμυρου νερού από γειτονικούς υδροφόρους (Chen et al., 2004), και η αύξηση της εξατμισοδιαπνοής στις ημιάγονες περιοχές μπορεί να οδηγήσει στην υφαλμύριση των ρηχών υδροφόρων.

Οι περιοχές που προβλέπεται αύξηση στον εμπλουτισμό των υπόγειων νερών μεγαλύτερο του 30% μέχρι το 2050 είναι τμήματα της Σαχέλ (στεπική λωρίδα γης νότια της ερήμου Σαχάρα), η Μέση Ανατολή, η βόρεια Κίνα, η Σιβηρία και οι δυτικές Η.Π.Α. Παρότι μια αύξηση στον εμπλουτισμό του υδροφόρου αυξάνει τις ανανεώσιμες πηγές του υδροφορέα, εντούτοις οι υδροφόροι που προκύπτουν μπορεί να προκαλέσουν προβλήματα που συνδέονται με την υφαλμύριση του εδάφους, όπως συνέβη στην Αυστραλία (εξαιτίας της αλλαγής χρήσης της γης και όχι λόγω των κλιματικών αλλαγών, και σε υγρά εδάφη πόλεων ή αγροτικών περιοχών).

Οι Hiscock et al, 2008, παρουσίασαν προβλέψεις για τον εμπλουτισμό στην Ευρώπη, χρησιμοποιώντας ένα ευρύ φάσμα από μελλοντικά κλιματικά σενάρια, συγκρίνοντας την περίοδο 1961-1990 με τις συνθήκες μέχρι και το τέλος του 21<sup>ου</sup> αιώνα. Τα αποτελέσματά τους έδειξαν αύξηση στον προβλεπόμενο ετήσιο εμπλουτισμό των υπόγειων νερών στη βόρεια Δανία (28%), στη νότια Αγγλία (32%), στη βόρεια Γαλλία, και μείωση στη νότια Ιταλία (22%) και στη νότια Ισπανία (78%). Οι Hiscock et al., 2008 σημειώνουν ότι μια μείωση στον πιθανό εμπλουτισμό των υπόγειων νερών στη νότια Ευρώπη ως συνέπεια των κλιματικών αλλαγών θα είχε σημαντική επίπτωση στη διαθεσιμότητα γλυκού νερού, πόσιμου και αρδευτικής χρήσης. Οι ελάχιστες έρευνες που υπάρχουν για συγκεκριμένους υδροφόρους (π.χ. στην Αγγλία, στο Βέλγιο, στη Γερμανία, στον Καναδά και στις Η.Π.Α) δείχνουν τα τοπικά ειδικά χαρακτηριστικά και τα πρότυπα χαρακτηριστικά.

Σε υδροφόρους με σημαντική εποχιακή χιονοκάλυψη, ο εμπλουτισμός είναι πιθανό να παρουσιάσει μείωση εξαιτίας της μικρότερης ύπαρξης χιονιού καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται. Η τήξη του χιονιού είναι υπεύθυνη για το 40-70% του εμπλουτισμού του υπόγειου νερού σε μελέτη που έγινε σε τέσσερα σημεία παρατήρησης των νοτιοανατολικών Η.Π.Α, παρότι μόνο το 25-50% των μέσων ετήσιων κατακρημνίσεων εμφανίζεται με τη μορφή χιονιού.

Σε μεγαλύτερα υψόμετρα, τήξη των παγετώνων προκαλεί αλλαγές τόσο στη στάθμη όσο και στην ποιότητα του υδροφόρου εξαιτίας της αυξημένης αλληλεπίδρασης με επιφανειακά νερά. Οι κλιματικές αλλαγές είναι πιθανό να οδηγήσουν σε αλλαγές στη βλάστηση, γεγονός που επιδρά και αυτό με τη σειρά του στον εμπλουτισμό του υδροφορέα.

Τα υπόγεια υδάτινα αποθέματα δεν επηρεάζονται τόσο από την αυξανόμενη κλιματική μεταβλητότητα, όσο τα αντίστοιχα επιφανειακά. Πιο συγκεκριμένα η «αντίδραση» των υπόγειων νερών στην κλιματική αλλαγή εκδηλώνεται με μεγαλύτερη καθυστέρηση σε σχέση με αυτήν των επιφανειακών υδάτινων όγκων. Οι υδροφόροι οι οποίοι βρίσκονται σε μεγάλα βάθη αντιδρούν, με καθυστέρηση, μόνο σε μεγάλης κλίμακας κλιματικές αλλαγές. Αντίθετα, υπόγειοι υδροφόροι που βρίσκονται σε μικρότερα βάθη, και ιδιαίτερα εκείνοι που εντοπίζονται σε ιζήματα ή σε θραυσμένο βραχώδες υπόβαθρο, αντιδρούν και σε περιορισμένης κλίμακας κλιματικές μεταβολές.

Η αυξημένη μεταβλητότητα της βροχόπτωσης μπορεί να προξενήσει μεταβολές και στη διαδικασία εμπλουτισμού των υδροφόρων. Σε ημι-άγονες και άγονες περιοχές η αυξημένη συχνότητα και διάρκεια ισχυρών βροχοπτώσεων, όπως και οι πλημμύρες, μπορούν να ενισχύσουν τον εμπλουτισμό των υδροφόρων. Αυτό συμβαίνει διότι μόνο κατά τη διάρκεια ραγδαίας βροχόπτωσης είναι δυνατόν να επιτευχθεί ταχεία διήθηση του απορρέοντος νερού, χωρίς να προλάβει να εμφανιστεί το φαινόμενο της εξατμισοδιαπνοής. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν οι αλλουβιακοί υδροφόροι, ο εμπλουτισμός των οποίων επιτυγχάνεται κυρίως από έντονες βροχοπτώσεις ή πλημμύρες (Al Sefry et al., 2004). Δεν συμβαίνει όμως το ίδιο σε «υδρόφοβα» ή καρστικοποιημένα εδάφη, στα οποία ο ρυθμός διήθησης είναι μικρός.

Σε υπό-υγρές και υγρές περιοχές μπορεί να παρουσιαστεί μείωση του εμπλουτισμού των υδροφόρων, επειδή η αυξημένη εκδήλωση ραγδαίων βροχοπτώσεων έχει ως



αποτέλεσμα την υπέρβαση της ικανότητας διήθησης του εδάφους συχνότερα. Η αυξημένη συχνότητα εμφάνισης ραγδαίων βροχοπτώσεων μπορεί να προκαλέσει και υποβάθμιση της ποιότητας του υπογείου νερού. Αυτό οφείλεται στην ταχύτερη μεταφορά παθογόνων μικροοργανισμών στο υπέδαφος κατά τη διάρκεια μιας έντονης βροχής (Kundewicz et al., 2007).

Οι επιπτώσεις των κλιματικών αλλαγών στα υδατικά, κυρίως τα υπόγεια υδατικά συστήματα μπορούν να συνοψιστούν στα εξής (ΕΜΕΚΑ, 2011):

- ✓ Γενική μείωση της τροφοδοσίας και ανανέωσης του νερού των υδροφόρων λόγω της μείωσης των βροχοπτώσεων και της αύξησης της εξατμισοδιαπνοής.
- ✓ Αυξημένη υφαλμύριση των παράκτιων και υποθαλάσσιων υδροφόρων, ιδιαίτερα των καρστικών, με προέλαση του μετώπου υφαλμύρισης προς την ενδοχώρα λόγω του μειωμένου δυναμικού της χερσαίας υδατικής φάσης εξαιτίας της μειωμένης τροφοδοσίας και της υπεράντλησης.
- ✓ Αύξηση της συγκέντρωσης ρυπαντικού φορτίου στα παράκτια υδατικά σώματα και στη θάλασσα λόγω μικρότερης αραίωσης.
- ✓ Εντατικοποίηση της αποδόμησης των δελταϊκών περιοχών, που ήδη έχει ξεκινήσει λόγω της κατασκευής εγκάρσιων φραγμάτων στην ανάντη ζώνη (μείωση απορροής και στερεοπαροχής) και παράλληλων αναχωμάτων στην πεδινή ζώνη των δέλτα (άφιξη μεταφερόμενου υλικού σε ένα και μοναδικό στόμιο).
- ✓ Ρύπανση ή αποξήρανση των παράκτιων υγροτόπων.
- ✓ Επιδείνωση του φαινομένου της ερημοποίησης λόγω υδατικού ελλείμματος και εδαφικών μεταβολών (συμπυκνώσεις στεγανοποιήσεις κ.λπ.).

Άξια επισήμανσης αποτελεί η έκδοση της International Association of Hydrogeologists (IAH) (Treidel et al., 2012), όπου αναπτύσσονται ζητήματα και περιγράφονται περιπτώσεις στο διεθνή χώρο που αφορούν στις επιδράσεις της κλιματικής αλλαγής στους υπόγειους υδαικούς πόρους. Στην πολύ ενδιαφέρουσα έκδοση αναφέρεται ότι η άμεση επίδραση της κλιματικής αλλαγής σε φυσικές διεργασίες (εμπλουτισμός υπόγειου νερού, εκφόρτιση υπόγειου νερού, υπόγεια αποθήκευση νερού, διείσδυση θαλασσινού νερού, βιοχημικές αντιδράσεις, χημική απομείωση και μεταφορά) μπορεί να επιδεινωθεί από ανθρώπινες ενέργειες (έμμεση επίδραση). Επίσης επισημαίνεται ότι οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στους υπόγειους υδαικούς πόρους σχετίζονται στενά με άλλες κινητήριες παγκόσμιες αλλαγές, που πρειλαμβάνουν την αύξηση του πληθυσμού, την αστικοποίηση και την αλλαγή στη χρήση γης, σε συδυασμό με άλλες κοινωνικοοικονομικές και πολιτικές τάσεις. Η απόκριση του υπόγειου νερού σε αυτές τις αλλαγές σε παγκόσμια κλίμακα αποτελεί μια σύνθετη διαδικασία, που εξαρτάται από την κλιματική αλλαγή και μεταβλητότητα, την τοπογραφία, τα χαρακτηριστικά των υπόγειων υδροφόρων συστημάτων, τη δυναμική των καλλιεργιών και τις ανθρώπινες δραστηριότητες. Η έκδοση περιέχει 20 περιπτώσεις έρευνας από διάφορα συστήματα υδροφόρων, σε 30 χώρες, που έχουν διερευνηθεί στο πλαίσιο του προγράμματος της UNESCO-HIP Groundwater Resources Assessment under the Pressure of Humanity and Climate Change (GRAPHIC).

### 3. ΣΚΟΠΟΙ, ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΙ ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΤΟΥΣ

(κύριες βιβλιογραφικές πηγές: ASCE, 1987, Διαμαντής και Πλιάκας, 2011, Πλιάκας, 1998, Πλιάκας και Διαμαντής, 1998)

Ο τεχνητός εμπλουτισμός (Τ.Ε.) των υπόγειων νερών ή όπως λέγεται πλέον τα τελευταία χρόνια, η διαχείριση του εμπλουτισμού των υδροφόρων (MAR, management of aquifer recharge) μπορεί να χαρακτηριστεί ως μια διαδικασία αύξησης της φυσικής ροής του επιφανειακού νερού προς τους υπόγειους υδροφορείς με την κατασκευή κατάλληλων έργων, την κατάκλυση με νερό ή τη μεταβολή των φυσικών συνθηκών (Todd and Mays, 2005).

Ο Τ.Ε. έχει χρησιμοποιηθεί στο διεθνή κυρίως χώρο εδώ και 200 χρόνια περίπου, με ελάχιστες εφαρμογές στην Ελλάδα κατά τις τελευταίες δεκαετίες, σ' ένα ευρύ φάσμα περιπτώσεων, όπως (Aronovici et al., 1972, Franson, 1989, Harpaz, 1971, Iihola, 1989, Καλλέργης, 1986, Todd and Mays, 2005, Walton, 1970, Wilson, 1985):

- τη συνδυασμένη διαχείριση υπόγειων και επιφανειακών νερών,
- την αντιμετώπιση προβλημάτων που έχουν σχέση με την ποσότητα και την ποιότητα του υπόγειου νερού και τη διείσδυση της θάλασσας,
- την αντιμετώπιση προβλημάτων καθίζησης του εδάφους,
- την επεξεργασία και αποθήκευση χρησιμοποιούμενων νερών προκειμένου να ξαναχρησιμοποιηθούν,
- τη διατήρηση ή αύξηση του φυσικού υπόγειου νερού ως οικονομικού πόρου,
- τη δημιουργία υπόγειας αποθήκευσης για τα εισαγόμενα στην κατά περίπτωση περιοχή νερά,
- την εξοικονόμηση ή παραγωγή ενέργειας με τη μορφή ζεστού ή κρύου νερού,
- τον έλεγχο των πλημμυρών,
- την άντληση πετρελαίου με μικρότερο κόστος,
- την ανάπτυξη καλλιεργειών,
- την αύξηση των ποσοτήτων ροής των υδρορρευμάτων,
- την αύξηση τροφοδοσίας των υδροφόρων στρωμάτων μετά από έμμεσα επιζήμια ανθρώπινη παρέμβαση (κατασκευή δρόμων ή αεροδρομίων, διευθετήσεις χειμάρρων, καταστροφές δασών).

Πολλές μέθοδοι Τ.Ε. έχουν αναπτυχθεί, όπως (Bianchi, 1978, Bouwer, 1995, Buchan, 1958, Committee on Ground Water, 1961, Διαμαντής κ.α., 1994, Διαμαντής κ.α., 1999, Καλλέργης, 1986, Meinzer, 1946, Muckel, 1958, Muckel, 1959, Muckel and Schiff, 1955, Nightingale and Bianchi, 1977, Oaksford, 1985, Pettyjohn, 1981, Πλιάκας και Διαμαντής, 1995, Πλιάκας, 1998, Πλιάκας και Διαμαντής, 1999, Pliakas et al., 2001, Todd, 1980, Todd and Mays, 2005) (σχ. 3.1):

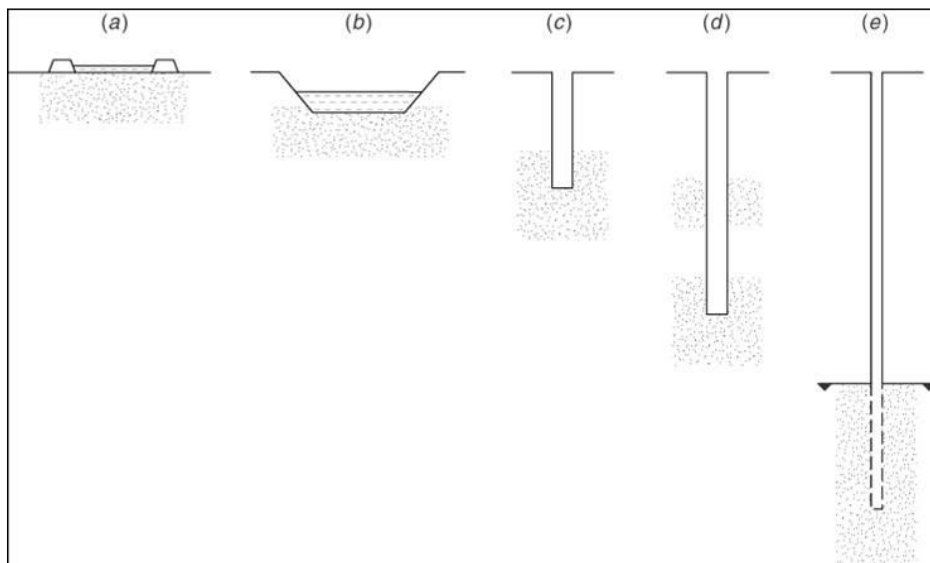
#### - Μέθοδοι εμπλουτισμού απευθείας στην επιφάνεια

- Μέθοδος λεκάνης (basin method)
- Μέθοδος τάφρων και αυλάκων (ditch and furrow method)
- Μέθοδος πλημμύρας (flooding method)
- Μέθοδος διευθέτησης υδρορρευμάτος (stream-channel modification)
- Επανενεργοποίηση ή αύξηση της ροής υδρορρευμάτος (stream flow reactivation or augmentation)
- Μέθοδος άρδευσης (irrigation method)

#### - Μέθοδοι εμπλουτισμού απευθείας στο υπέδαφος

- Μέθοδος με φυσικά ανοίγματα (natural openings method)
- Μέθοδος ορυγμάτων (pit method)
- Μέθοδος αντίστροφης αποστράγγισης (reverse drainage method)
- Μέθοδος με γεωτρήσεις εμπλουτισμού (recharge well method)
- Μέθοδος με γεωτρήσεις αποθήκευσης - άντλησης (aquifer storage and recovery-ASR-wells)
- Μέθοδος με πηγάδια στην ακόρεστη ζώνη (vadose zone wells)

- Συνδυασμοί επιφανειακού και υπεδάφικου εμπλουτισμού
  - Συνδυασμός λεκάνης εμπλουτισμού και αποστραγγιστικού δικτύου (combination of surface – subsurface recharge)
  - Συνδυασμός λεκανών και ορυγμάτων, εκσκαφών ή γεωτρήσεων (basins with pits, shafts, or wells)
- Μέθοδοι έμμεσου εμπλουτισμού
  - Επαγωγικός εμπλουτισμός (induce recharge)
  - Συμπτωματικός εμπλουτισμός (incidental recharge)
  - Διευθέτηση υδροφορέων (aquifer modification)
- Μέθοδοι εμπλουτισμού με επεξεργασμένα αστικά απόβλητα
  - Συστήματα φυσικής επεξεργασίας μέσω του εδάφους-υδροφορέα (Soil-Aquifer Treatment Systems, SAT)
  - Γεωτρήσεις μετά από προηγμένες διαδικασίες καθαρισμού (Advanced Wastewater Treatment, AWT)



Σχήμα 3.1. Συστήματα εμπλουτισμού υδροφόρων σε διάφορα βάθη: (a) επιφανειακή λεκάνη κατάκλυσης, (b) λεκάνη κατάκλυσης μετά από εκσκαφή, (c) τάφρος εμπλουτισμού, (d) φρεάτιο εμπλουτισμού στην ακόρεστη ζώνη, (e) γεώτρηση εμπλουτισμού (Bouwer, 1999, Todd and Mays, 2005).

Η επιλογή της πιο κατάλληλης μεθόδου είναι συνάρτηση (Καλλέργης, 1986, Pettyjohn, 1981): ων γεωλογικών, μορφολογικών και υδρογεωλογικών συνθηκών της ευρύτερης περιοχής, της διαθεσιμότητας της περιοχής εφαρμογής του Τ.Ε., της προέλευσης, διαθεσιμότητας, φυσικής και χημικής ποιότητας του νερού εμπλουτισμού, της ύπαρξης ή δυνατότητας κατασκευής των βασικών απαραίτητων έργων υποδομής όπως και του κόστους χρήσης και συντήρησής τους, διαφόρων οικονομικών και νομικών παραγόντων και κριτηρίων.

Τα πλεονεκτήματα της εφαρμογής του Τ.Ε. και κυρίως της χρήσης του υπόγειου νερού σε συστήματα δημόσιας διάθεσής του, μπορεί να επισκιαστούν από ορισμένα μειονεκτήματα, όπως είναι (Oaksford, 1985, Buchan, 1958): η πιθανή αδυναμία επαναπλήρωσης του νερού εμπλουτισμού, η μεγάλη επιφάνεια που απαιτείται για τη λειτουργία και συντήρηση ενός συστήματος διάθεσης υπόγειου νερού (συμπεριλαμβανομένου και του αντίστοιχου υπόγειου ταμιευτήρα) σε σχέση με εκείνη που απαιτείται για ένα ανάλογο σύστημα παροχής επιφανειακού νερού, η δυσκολία απομάκρυνσης των αλάτων ασβεστίου, μαγνησίου, σιδήρου, μαγγανίου ή άλλων

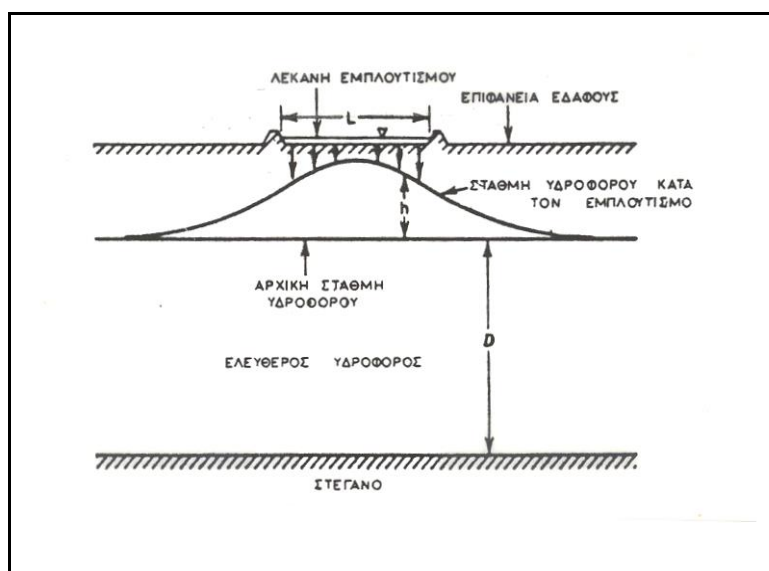
στοιχείων που πιθανόν να υπάρχουν στο νερό εμπλουτισμού, η δυσκολία αποτελεσματικής αντιμετώπισης του φαινομένου clogging (απόφραξη των πόρων του εδάφους), η αδυναμία ικανοποίησης αιφνιδίων απαιτήσεων σε νερό, αφού οι υπόγειοι υδροφόροι δεν μπορούν να αποστραγγιστούν τόσο εύκολα όπως οι αντίστοιχοι επιφανειακοί ταμειυτήρες, το μεγάλο σχετικά κόστος μιας ενδεχόμενης επέκτασης των συστημάτων διάθεσης υπόγειου νερού.

### **3.1. Μέθοδοι εμπλουτισμού απευθείας στην επιφάνεια (direct-surface recharge)**

Είναι από τις πλέον απλές, τις παλαιότερες και τις πιο ευρέως χρησιμοποιούμενες μεθόδους Τ.Ε.. Σκοπός τους είναι η αύξηση της ποσότητας του νερού που κατεισδύει στο υπέδαφος και τροφοδοτεί τον ελεύθερο υδροφόρο ορίζοντα, με την παροχέτευση νερού στην επιφάνεια του εδάφους (Muckel, 1959). Οι πιο σημαντικοί παράγοντες που επηρεάζουν το μέγεθος της ποσότητας του νερού που τροφοδοτεί τον υποκείμενο υδροφόρο είναι η έκταση και τα υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά της περιοχής εμπλουτισμού και η χρονική διάρκεια που το νερό βρίσκεται σε επαφή με το έδαφος (Todd, 1980). Η αποτελεσματικότητα ή απόδοση του Τ.Ε. μετριέται με τη ταχύτητα κίνησης του νερού προς το υπέδαφος.

#### **Μέθοδος λεκάνης κατάκλυσης (basin method)**

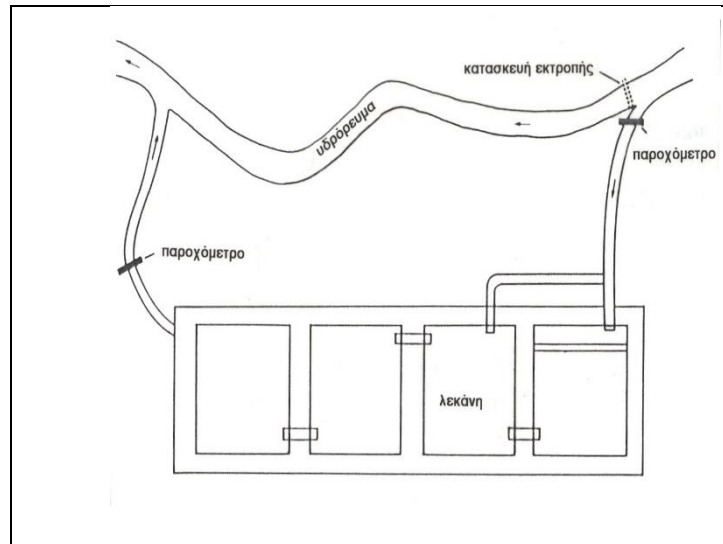
Οι λεκάνες εμπλουτισμού είναι από τις πλέον προσφιλείς μεθόδους Τ.Ε. γιατί επιτρέπουν επαρκή χρήση της επιφάνειας του εδάφους και απαιτούν σχετικά απλή συντήρηση. Το νερό εμπλουτισμού παροχετεύεται σε λεκάνες που σχηματίζονται με την κατασκευή αναχωμάτων, τάφρων ή εκσκαφών. Το μέγεθος και το σχήμα της λεκάνης προσαρμόζεται στη μορφολογία του εδάφους. Όταν το νερό διηθείται από τον πυθμένα μια λεκάνης κατάκλυσης τότε η υδροστατική επιφάνεια σχηματίζει ένα ύβωμα (σχ. 3.2). Η γεωμετρία του υβώματος εξαρτάται από εκείνη της λεκάνης, τα χαρακτηριστικά του υδροφόρου ορίζοντα, την παροχή και τη διάρκεια εμπλουτισμού (Bauman, 1965, Bittinger and Tzeleas, 1965, Hantush, 1967, Haskell and Bianchi, 1965).



Σχήμα 3.2. Διάγραμμα ανύψωσης της υδροστατικής επιφάνειας κάτω από μια τετράγωνη λεκάνη εμπλουτισμού (Todd, 1980, Καλλέργης 1986).

Οι λεκάνες μπορούν να κατασκευασθούν ανεξάρτητα, όπως σε μικρές εκτάσεις όπου αποστραγγίζεται η απορροή βροχοπτώσεων ή καταιγίδων, ή σε σειρά από λεκάνες όπου παροχετεύεται το νερό υδρορρευμάτων (σχ. 3.3). Η τελευταία διάταξη παρουσιάζει διάφορα πλεονεκτήματα, όπως (Oaksford, 1985):

- η δυνατότητα αποθήκευσης διευκολύνει την αύξηση του χρόνου εμπλουτισμού,
- οι ανάντη πρώτες λεκάνες βοηθούν στη διαδικασία καθαρισμού του νερού που οδηγείται στις επόμενες κατάντη λεκάνες,
- παρέχεται η ευχέρεια να τίθονται εκτός λειτουργίας λεκάνες που χρειάζονται συντήρηση (ξύσιμο, σκάψιμο, αναμόχλευση) χωρίς να παρεμποδίζεται η όλη λειτουργία του έργου εμπλουτισμού.



Σχήμα 3.3. Τυπική διάταξη σειράς λεκανών εμπλουτισμού παράπλευρα σε υδρόρευμα (Bianchi and Muckel, 1970, Καλλέργης 1986).

Η ικανότητα διήθησης του νερού, που πρέπει να είναι απαλλαγμένο από αιωρούμενα υλικά (ιλύ), μπορεί να βελτιωθεί με την προσθήκη οργανικών και χημικών ουσιών στο νερό. Επίσης μπορεί να βελτιωθεί και με την καλλιέργεια βλάστησης στην επιφάνεια ή με άλλες ειδικές επεμβάσεις στη λειτουργία του έργου όπως προγραμματισμένες παύσεις λειτουργίας κάποιων λεκανών με αποξήρανσή τους και περιοδικό όργωμά τους με στόχο την αντιμετώπιση του φαινομένου της απόφραξης των εδαφικών πόρων (clogging) (Muckel, 1959, Schiff, 1955).

Μερικά από τα πλεονεκτήματα των λεκανών περιλαμβάνουν:

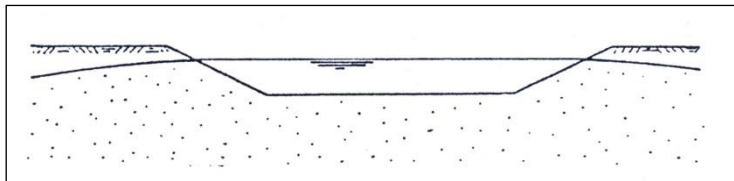
- τη δυνατότητα επαρκούς εκμετάλλευσης της εδαφικής επιφάνειας που προσφέρεται για εμπλουτισμό αφού το νερό εμπλουτισμού έρχεται σε άμεση επαφή με το 75-90% της περιοχής εμπλουτισμού (Καλλέργης, 1986),
- τη δυνατότητα συγκράτησης των διαθέσιμων ποσοτήτων νερού με την κατασκευή ανάλογων λεκανών καταλλήλων διαστάσεων,
- τη δυνατότητα αποθήκευσης περιοδικών πλημμυρών για μελλοντική χρήση τους με σκοπό τον εμπλουτισμό,
- την αντιμετώπιση του φαινομένου clogging (Oaksford, 1985).

Η μέθοδος της λεκάνης επιτρέπει την άμεση επαφή του νερού εμπλουτισμού με το 75-90% της περιοχής που θα εμπλουτιστεί. Το νερό του εμπλουτισμού πρέπει να απαλλαγεί από τα αιωρούμενα υλικά (ιλύς): αυτό γίνεται στη "λεκάνη κατακράτησης ιζήματος". Συχνά οι λεκάνες του συστήματος τίθενται περιοδικά εκτός λειτουργίας, προκειμένου να καθαριστούν. Αυτό γίνεται διαδοχικά για κάθε μια λεκάνη.

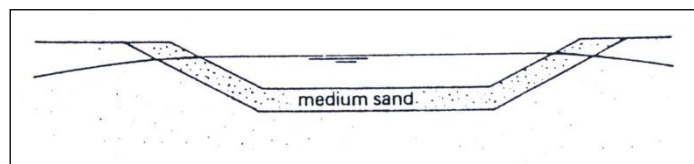
### Κριτήρια και στοιχεία κατασκευής των λεκανών εμπλουτισμού

Συνήθως οι θέσεις των λεκανών επιλέγονται κοντά σε υδρορρεύματα και σχηματίζονται δύο οι περισσότερες σε σειρά με εκσκαφές ή και κατασκευή αναχωμάτων. Κατά την κατασκευή των λεκανών το έδαφος σκάβεται τόσο όσο να αφαιρεθεί κάποιου πάχους επιφανειακό εδαφικό στρώμα. Η έκτασή τους κυμαίνεται από λίγες εκατοντάδες τετραγωνικά μέτρα μέχρι και κάποιες δεκάδες στρέμματα.

Ανάλογα με την κλίση του εδάφους ποικίλλει και το μέγεθός τους. Γενικά, όσο πιο επίπεδη είναι η επιφάνεια του εδάφους τόσο πιο μεγάλη κατασκευάζεται και η λεκάνη. Στην πραγματικότητα, η κατασκευή μιας λεκάνης κατάκλυσης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις τοπικές υδρογεωλογικές συνθήκες. Όταν η στάθμη του υδροφορέα φτάνει κοντά στην επιφάνεια του εδάφους και η κοκκομετρική του σύσταση δεν περιλαμβάνει ούτε πολύ λεπτόκοκκο ούτε πολύ χονδρόκοκκο υλικό, απλές σκαμμένες λεκάνες μπορούν να χρησιμοποιηθούν, με κλίση πρανών 1:2 ή και ελαφρά πιο απότομη (σχ. 3.4) (Huisman and Olsthoorn, 1983). Ένα από τα προβλήματα που συνήθως παρουσιάζονται είναι η μείωση της περατότητας λόγω της μεταφοράς ιλύος από το νερό εμπλουτισμού που έχει ως αποτέλεσμα την απόφραξη των πόρων του πυθμένα (clogging). Όταν το υλικό του υδροφορέα είναι σχετικά λεπτόκοκκο, η απόφραξη των πόρων μπορεί να συμβεί σχετικά γρήγορα και σε αυτή την περίπτωση καλύτερα αποτελέσματα μπορούν να επιτευχθούν καλύπτοντας τον πυθμένα και τα πρανή της λεκάνης με μια στρώση πάχους περίπου 0.5 m μεσόκοκκης άμμου που θα πρέπει να ανανεώνεται κάθε χρόνο (σχ. 3.5). Από τους μεγαλύτερους πόρους του σχετικά χονδρόκοκκου υλικού της επικάλυψης είναι δυνατή μια βαθύτερη διείσδυση των αιωρούμενων υλικών του ανεπεξέργαστου νερού με συνέπεια την καθυστέρηση της απόφραξης και την αύξηση της ροής εμπλουτισμού. Το ίδιο στρώμα μεσόκοκκης άμμου μπορεί να τοποθετηθεί πάνω από ένα υδροφορέα από χονδρόκοκκο υλικό ή ρωγματομένο πέτρωμα ώστε να αποτρέψει μια βαθιά διείσδυση των αιωρούμενων υλικών καθώς τότε η απόφραξη θα ήταν πολύ δύσκολο έως αδύνατο να αντιμετωπιστεί. Όταν ο υδροφόρος δεν είναι ομοιογενής μέχρι την επιφάνεια του εδάφους αλλά καλύπτεται από ένα λιγότερο περατό στρώμα (σχ. 3.6), η λεκάνη θα πρέπει να κατασκευαστεί αρκετά βαθιά ώστε να επιτευχθεί πλήρης διείσδυση. Για να επιτευχθούν μεγαλύτερες κλίσεις των πρανών και για να αποφύγουμε τη μόλυνση του νερού εμπλουτισμού από εδαφικό υλικό που έχει διαβρωθεί από τη δράση των κυμάτων, χρησιμοποιούνται συχνά τοίχοι αντιστήριξης (σχ. 3.7).

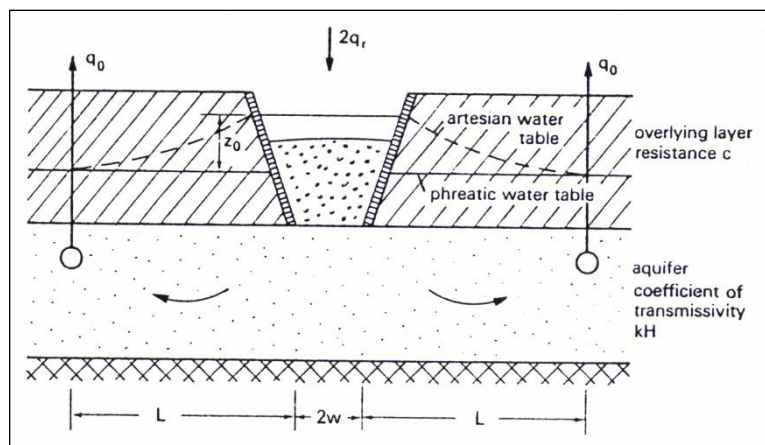


Σχήμα 3.4. Απλή λεκάνη κατάκλυσης (Huisman and Olsthoorn, 1983).

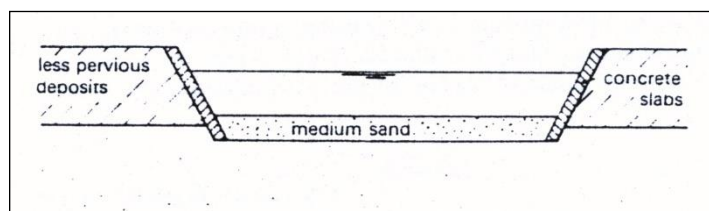


Σχήμα 3.5. Λεκάνη κατάκλυσης με στρώμα άμμου στο πυθμένα και τα πρανή (Huisman and Olsthoorn, 1983).

Τα περατά εδάφη συνήθως έχουν υδραυλικές αγωγιμότητες που κυμαίνονται από 1 m/ημέρα (λεπτή αργιλώδης άμμος) έως 10 m/ημέρα και μερικές φορές ακόμη περισσότερο (αμμώδη και αμμοχαλικώδη εδάφη) (Bouwer, 1989). Εξαιτίας της απόφραξης, η ταχύτητα διήθησης των λεκανών εμπλουτισμού τείνει να είναι μικρότερη από την επανακορεσμένη υδραυλική αγωγιμότητα των υποκείμενων εδαφικών υλικών. Οι πραγματικές ταχύτητες διήθησης κατά την κατάκλυση ωστόσο γενικώς κυμαίνονται από 0,3 m/ημέρα έως 3 m/ημέρα. Για εργασίες καθ' όλη τη διάρκεια της χρονιάς συμπεριλαμβανομένου του χρόνου για αποξήρανση και καθαρισμό των λεκανών, οι ρυθμοί υδραυλικής φόρτισης ή η συσσωρευμένη διήθηση κυμαίνονται από 30 έως 300 m / χρόνο (Bouwer, 1989).



Σχήμα 3.6. Εμπλουτισμός σε υδροφόρο υπό πίεση με δυνατότητα κίνησης του νερού (Huisman and Olsthoorn, 1983).



Σχήμα 3.7. Λεκάνη κατάκλυσης με τοίχους αντιστήριξης (Huisman and Olsthoorn, 1983).

Οι λεκάνες εμπλουτισμού απαιτούν περατά εδάφη, η αναγνώριση περιοχών με τέτοια εδάφη και η επιλογή της τοποθεσίας είναι πολύ σημαντικά. Γενικά για την εξέταση της περατότητας χρησιμοποιούνται διάφορων τύπων περατόμετρα, όπως μικρά κυλινδρικά διαπερατόμετρα με διπλό δακτύλιο (ουδετεροποιημένα) όπως επίσης και συστήματα με μονό δακτύλιο. Αυτά είναι χρήσιμα για συγκρίσεις και μετρήσεις σχετικών ταχυτήτων διήθησης, αλλά όμως υπερεκτιμούν τις ταχύτητες διήθησης για μεγαλύτερες ποσότητες νερού και δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να προβλεφθούν οι ρυθμοί υδραυλικής φόρτισης σε λεκάνες εμπλουτισμού (Bouwer, 1996). Τέτοιες προβλέψεις είναι πιο αξιόπιστες όταν γίνονται με μεγαλύτερες δοκιμαστικές λεκάνες και με συμπληρωματικές δοκιμές διήθησης με μετρήσεις της υδραυλικής αγωγιμότητας του εδάφους στη ακόρεστη ζώνη. Για μη αποφραγμένες λεκάνες και για βαθιά στάθμη υπόγειου νερού, οι ταχύτητες διήθησης των λεκανών είναι περίπου ίσες με τη μέση υδραυλική αγωγιμότητα της ακόρεστης ζώνης (Bouwer, 1978). Συνεπώς, οι μετρήσεις υδραυλικής αγωγιμότητας

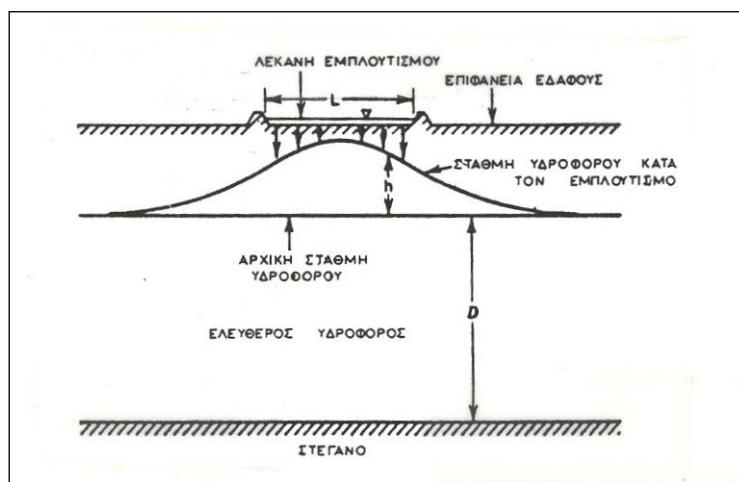
μπορούν να δώσουν μια καλή εκτίμηση του μέγιστου ρυθμού υδραυλικής φόρτισης που μπορεί να επιτευχθεί με τις λεκάνες.

### Ύβωμα εμπλουτισμού

Όταν το νερό που κατεισδύει φτάνει στον υποκείμενο ελεύθερο υδροφόρο, σχηματίζεται ένα ύβωμα στο υπόγειο νερό και το νερό εμπλουτισμού κινείται κυρίως πλευρικά προς τον υδροφόρο (σχ. 3.8) (Bouwer, 1989). Η ανύψωση του υβώματος εμπλουτισμού κατά τη διάρκεια της κατάκλισης και η πτώση του υβώματος κατά τη διάρκεια της αποξήρανσης μπορεί να προβλεφθεί με την εξίσωση του Hantush (Bouwer, 1978). Η εξίσωση αυτή μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για να υπολογιστεί η επιρροή του συστήματος διήθησης στη στάθμη του υπόγειου νερού σε διάφορες αποστάσεις από τις λεκάνες κατάκλισης.

Αν υπάρχουν περίπλοκοι παράγοντες στο σύστημα του υδροφόρου, όπως η κλίση στο φυσικό υπόγειο νερό και άλλοι μηχανισμοί ανανέωσης ή εκμετάλλευσης του υπόγειου νερού (χείμαρροι, πηγάδια, πηγές, άντληση του υπόγειου νερού για αγροτικούς σκοπούς κτλ), η επιρροή του τεχνητού εμπλουτισμού στη στάθμη του υπόγειου νερού μπορεί να εκτιμηθεί με μοντέλα του συστήματος του υδροφόρου χρησιμοποιώντας τεχνικές ανάλυσης πεπερασμένων διαφορών ή πεπερασμένων στοιχείων.

Ο υδροφόρος θα πρέπει να διαθέτει ικανοποιητική μεταβιβαστικότητα ώστε να κρατηθεί το ύβωμα του υπόγειου νερού κάτω από τον πυθμένα των λεκανών διήθησης για να αποφευχθούν μειώσεις στο ρυθμό διήθησης (Bouwer, 1989). Μια διαμήκης και στενή λεκάνη εμπλουτισμού ή μια σειρά από λεκάνες παράγουν χαμηλότερα υβώματα από ότι οι τετράγωνες ή κυκλικές λεκάνες με το ίδιο εμβαδόν και υδραυλικά φορτία.



Σχήμα 3.8. Διάγραμμα ανύψωσης της υδροστατικής επιφάνειας κάτω από μια λεκάνη εμπλουτισμού (Todd, 1980, Καλλέργης, 1986).

### Διαχείριση και σχεδιασμός λεκανών

Τα κριτήρια σχεδιασμού και διαχείρισης των λεκανών για να μεγιστοποιηθεί η απόδοση των λεκανών εμπλουτισμού εξαρτώνται από την ποιότητα του νερού, το κλίμα και το έδαφος. Συνεπώς αυτά τα κριτήρια έχουν τοπικό χαρακτήρα και πρέπει συχνά να αξιολογούνται με επί τόπου έρευνα. Παράγοντες που πρέπει να ερευνοούνται είναι (Bouwer, 1989):

- ο βέλτιστος προγραμματισμός πλήρωσης, αποξήρανσης και καθαρισμού των λεκανών,



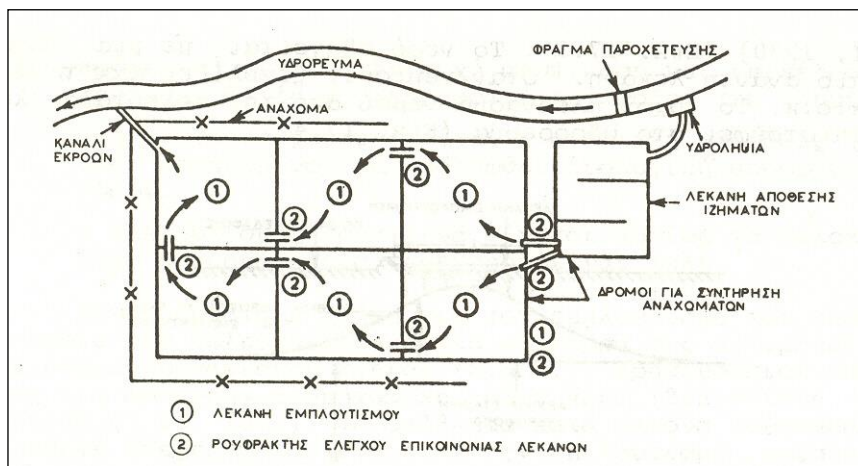
- η βέλτιστη προεπεξεργασία του νερού εμπλουτισμού, όπου αυτή απαιτείται,
- το βέλτιστο βάθος του νερού στη λεκάνη,
- η βέλτιστη ταχύτητα του νερού σε λεκάνες με λιμνάζον νερό ή σε κανάλια με τρεχούμενο νερό.

Υπάρχουν επίσης περιβαλλοντολογικοί παράγοντες που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη (έντομα, υδρόβια βλάστηση, δυσάρεστες οσμές). Το νερό που χρησιμοποιείται για τεχνητό εμπλουτισμό μπορεί να προέρχεται από (Bouwer, 1989):

- το πλεονάζον νερό ρεμάτων και ποταμών,
- την απορροή καταιγίδων ή από το λιώσιμο χιονιών,
- το πλεόνασμα νερού από υδραγωγεία ή εγκαταστάσεις μεταφοράς νερού,
- αστικά λύματα ή άλλου είδους υγρά απόβλητα.

Μερικές πηγές τροφοδοσίας νερού για εφαρμογές εμπλουτισμού είναι συνεχείς και επιτρέπουν τη λειτουργία των λεκανών εμπλουτισμού όλο τον χρόνο, ενώ άλλες είναι εποχιακές ή ευκαιριακές.

Όταν τα υδραυλικά φορτία λειτουργίας πρέπει να μεγιστοποιηθούν, τα συστήματα διήθησης για τον τεχνητό εμπλουτισμό του υπόγειου νερού θα πρέπει να περιλαμβάνουν αρκετές λεκάνες (σχ. 3.9). Ανάλογα με την τοπογραφία, τέτοιες λεκάνες μπορεί να έχουν μια επιφάνεια από 1 περίπου στρέμμα ή και λιγότερο μέχρι 100 στρέμματα ή και περισσότερο (Bouwer, 1989). Κάθε λεκάνη θα πρέπει να έχει τις δικές τις διατάξεις κατάκλισης και αποξήρανσης έτσι ώστε να μπορεί να γεμίζει νερό, να αποξηραίνεται και να καθαρίζεται ανάλογα με το βέλτιστο σχεδιασμό. Οι λεκάνες δεν θα πρέπει ποτέ να είναι συνδεδεμένες σε σειρά έτσι ώστε το νερό που εκρέει από τη μια να πέφτει μέσα σε χαμηλότερες λεκάνες γιατί σε τέτοια συστήματα οι λεκάνες δεν μπορούν να αποξηρανθούν και να καθαριστούν ανεξάρτητα η μια από την άλλη. Συχνά οι πρώτες λεκάνες «θυσιάζονται» σαν εγκαταστάσεις καθίζησης. Οι βαθιές λεκάνες συχνά δεν αποξηραίνονται για να καθαρίζονται αρκετά τακτικά ώστε να διατηρούν υψηλές ταχύτητες διήθησης. Όταν τέτοιες λεκάνες καθαρίζονται, οι ταχύτητες διήθησης είναι τελικά πολύ χαμηλές και όλο το νερό της λεκάνης χρειάζεται πολύ χρόνο για να διηθηθεί. Έτσι τέτοιες λεκάνες πρέπει να έχουν τα δικά τους συστήματα αποχέτευσης για να είναι δυνατόν να φεύγει το νερό από τη λεκάνη πολύ γρήγορα ώστε να καθαριστεί.



Σχήμα 3.9. Τυπικό έργο εμπλουτισμού με πολλαπλές λεκάνες (Καλλέργης, 1986).

Οι ρηχές λεκάνες με υψηλές ταχύτητες διήθησης δεν απαιτούν ειδικά αποχετευτικά συστήματα γιατί συνήθως το νερό εξαφανίζεται μέσω της διήθησης λίγες μέρες αφότου σταματήσει η εισροή στη λεκάνη. Οι λεκάνες θα πρέπει να κατασκευάζονται με οριζόντιο

ή καλά διαβαθμισμένο πυθμένα για να αποφευχθεί η δημιουργία κοιλωμάτων όπου το νερό θα μπορεί να παραμένει για μεγάλα χρονικά διαστήματα και να παρεμποδίσει τη επανεκκίνηση της διήθησης και τις εργασίες καθαρισμού.

Μερικές φορές οι περίοδοι αποξήρανσης και κατάκλυσης νερού εξαρτώνται από τους κύκλους ζωής των εντόμων. Για να αποφευχθούν ενοχλητικά προβλήματα, οι περίοδοι κατάκλυσης νερού μπορεί να χρειαστεί να περιοριστούν σε λίγες μόλις μέρες για να αποφευχθεί η εκκόλαψη των αυγών των εντόμων και η εμφάνιση ενήλικων εντόμων.

Όπου το νερό των λεκανών εμπλουτισμού περιέχει αρκετή ποσότητα υλικών σε αιώρηση, μπορεί να είναι πιο οικονομικό να απομακρύνουμε το υλικό αυτό με λεκάνες προκαταρκτικής καθίζησης ή λεκάνες απομάκρυνσης της ιλύος με πιθανή χρήση θρομβωτικών για να αυξηθεί η κατακάθιση των στερεών (Bouwer, 1989). Ωστόσο όλα αυτά κοστίζουν. Από την άλλη όμως η μη απομάκρυνση των στερεών που βρίσκονται σε αιώρηση και η κατά συνέπεια συσσωμάτωσή τους στον πυθμένα της λεκάνης κοστίζει επίσης, καθώς απαιτείται συχνή αποξήρανση και καθαρισμός των λεκανών ενώ παρατηρούνται απώλειες στην απόδοση εμπλουτισμού του νερού. Συνεπώς, υπάρχει ένας βέλτιστος συνδυασμός προεπεξεργασίας του νερού, αποξήρανσης και καθαρισμού των λεκανών και απώλειας της απόδοσης εμπλουτισμού. Η πιο οικονομική λύση πρέπει να καθορίζεται για κάθε σύστημα ξεχωριστά όταν η προκαταρκτική διαδικασία καθίζησης μοιάζει να είναι μια ικανοποιητική λύση.

Όπου το επιφανειακό νερό είναι διαθέσιμο για τεχνητό εμπλουτισμό το μεγαλύτερο μέρος του χρόνου ή όλο τον χρόνο, ίσως να είναι ενδιαφέρουσα η χρησιμοποίηση των λεκανών διήθησης για ψυχαγωγικούς σκοπούς (Bouwer, 1989). Τέτοια χρήση ωστόσο θέτει κάποια εμπόδια στη διαχείριση των λεκανών για την εκμετάλλευση του μέγιστου υδραυλικού φορτίου καθώς η συχνή αποξήρανση και ο καθαρισμός μπορεί να είναι δύσκολα. Η προκαταρκτική διαδικασία καθίζησης μπορεί να είναι αναγκαία για να ελαχιστοποιηθεί η συσσώρευση ιζήματος στον πυθμένα τέτοιων λεκανών. Μπορούμε να επιλέξουμε μεταξύ λεκανών εμπλουτισμού που έχουν στάσιμο νερό όταν ακόμα και τα μικρότερα σωματίδια μπορούν να κατακαθίσουν και καναλιών εμπλουτισμού, όπου το νερό συνεχίζει να κινείται ώστε να δημιουργείται αρκετός στροβιλισμός για να κρατηθούν τα λεπτόκοκκα σωματίδια σε αιώρηση. Επί τόπου δοκιμές πρέπει να γίνουν για να διαπιστωθεί ποιό σύστημα ανταποκρίνεται καλύτερα και δίνει τους μεγαλύτερους ρυθμούς διήθησης. Εάν χρησιμοποιείται ένα σύστημα καναλιών με κινούμενο νερό, μερικές λεκάνες μπορεί να κατασκευαστούν στο τέλος των καναλιών για να παγιδεύσουν τυχόν παραμένονσα ροή.

Όπου το ύψωμα του υπόγειου νερού μπορεί να ανέλθει πάνω από το πυθμένα των εγκαταστάσεων διήθησης και να μειώσει τους ρυθμούς διήθησης, οι λεκάνες θα πρέπει να σχεδιαστούν έτσι ώστε να μην υπάρχει μεγάλο τμήμα σε τετράγωνο ή κυκλικό σχήμα περιοχής που κατακλύζεται με νερό. Συμπερασματικά, οι λεκάνες θα πρέπει να είναι μικρές ή/και μακρόστενες και οι παρακείμενες λεκάνες δεν θα πρέπει να γεμίζουν με νερό ταυτόχρονα.

#### Παράγοντες που επηρεάζουν το ρυθμό εμπλουτισμού

Ο Bouwer (1989) αναφέρει τους εξής παράγοντες :

1. Αυξανόμενου του βάθους του νερού στη λεκάνη αυξάνεται η πίεση που ασκείται στο στρώμα ιζήματος από ιλύ και άγλη που υπάρχει στον πυθμένα με αποτέλεσμα αυτό να συμπυκνώνεται και έτσι μειώνεται η τιμή διήθησης του νερού.
2. Σε μεγαλύτερα βάθη νερού αυτό καθίσταται λιγότερο τυρβώδες στην κίνηση και πιο διαυγές, γεγονός που επιτρέπει μεγαλύτερη διείσδυση του φωτός και μεγαλύτερη ανάπτυξη αλγών, τα οποία επικάθονται στον πυθμένα και μειώνουν έτσι το ποσοστό διήθησης του νερού.
2. Τα αναπτυσσόμενα στα βαθύτερα νερά άγλη λόγω φωτοσύνθεσης απορροφούν CO<sub>2</sub> από το νερό, με αποτέλεσμα να αυξάνεται το PH του σε τιμές 9-10. Τέτοια νερά όμως αποβάλλουν ως ίζημα CaCO<sub>3</sub> το οποίο

καθιζάνει στον πυθμένα της λεκάνης και μειώνει την ταχύτητα διήθησης του νερού.

Γενικά στην πράξη, μετά από πειράματα, έχει αποδειχθεί ότι είναι προτιμότερο το μικρό πάχος νερού (10-20 cm) γεγονός που αποτρέπει τη ανάπτυξη αλγών.

### Προφυλάξεις

Στις εγκαταστάσεις εμπλουτισμού πρέπει να υπάρχει προσωπικό για να επιθεωρεί το συνολικό χώρο του έργου ενώ κρίνεται και ως απαραίτητη η περιφραγή της περιοχής όπου λαμβάνει χώρα το έργο για την αποφυγή ατυχημάτων. Επίσης εάν η περιοχή του έργου είναι κατοικημένη πρέπει να αντιμετωπισθούν τα προβλήματα που θα δημιουργήσει η ανάπτυξη οργανισμών όπως κουνούπια, ποντίκια που συνήθως παρατηρούνται σε αφθονία σε χώρους εμπλουτισμού, καθώς επίσης και μυρωδιές από τα άλγη.

Σε αρκετές περιπτώσεις οι χώροι των λεκανών μπορούν να χρησιμοποιηθούν και ως χώροι αναψυχής. Τότε φροντίζουμε να έχουμε νερό σε αυτές για μεγαλύτερη χρονική περίοδο, δηλαδή οι κύκλοι υγρής - ξηρής περιόδου γίνονται αραιότεροι και επίσης διατηρείται, στις λεκάνες, μεγαλύτερο βάθος νερού (Bouwer, 1989).

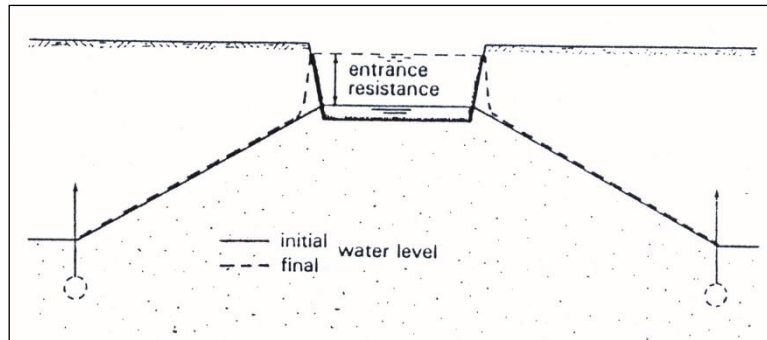
### Απόφραξη πόρων (clogging) και αντιμετώπιση

Το μεγαλύτερο πρόβλημα στην εφαρμογή του εμπλουτισμού παραμένει η απόφραξη των πόρων (clogging). Ιδιαίτερα αισθητό είναι το φαινόμενο αυτό στις λεκάνες εμπλουτισμού.

Όπως προαναφέρθηκε, καθώς διοχετεύεται το νερό στη λεκάνη, οι εδαφικοί πόροι του πυθμένα της φράζουν. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται λόγω (Huisman and Olsthoorn, 1983):

- της συγκράτησης αιωρούμενων υλικών του νερού εμπλουτισμού από το δίκτυο των πόρων του υδροφορέα,
- της καθίζησης διαλυμένων στερεών από τη διασπορά αργιλικών σχηματισμών, καθώς και της συσσωμάτωσης αποσαθρωμένου εδάφους όταν το νερό εμπλουτισμού δεν είναι χημικά συμβατό με το ήδη υπάρχον νερό ή με το υλικό των σχηματισμών,
- της ανάπτυξης φυτικών οργανισμών και βακτηρίων όταν το νερό είναι πλούσιο σε θρεπτικά συστατικά,
- της βαθμιαίας ανάπτυξης διαλυμένων ή παρασυρόμενων από τη ροή αερίων καθώς το νερό περνάει μέσα από ανοίγματα.

Όλοι μαζί οι παραπάνω παράγοντες έχουν ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη μιας επίστρωσης σε μορφή μεμβράνης στον πυθμένα και στα πρανή της λεκάνης παρεμποδίζοντας την είσοδο του νερού στο υπέδαφος. Η αντίσταση στην είσοδο του νερού μπορεί να αντισταθμιστεί ανεβάζοντας τη στάθμη του νερού στη λεκάνη ώστε να επιτευχθεί μια αύξηση του υδραυλικού φορτίου (σχ. 3.10).



Σχήμα 3.10. Επιρροή της απόφραξης (Huisman and Olsthoorn, 1983).

Στην εφαρμογή του εμπλουτισμού για αστική χρήση η απόφραξη των λεκανών κατάκλισης δεν αποτελεί σοβαρό πρόβλημα. Οι ποσότητες του νερού που χρησιμοποιούνται είναι μικρές, ενώ η υψηλή τιμή πώλησης του νερού που αντλείται δίνει περιθώρια για πιθανή σοβαρή αρχική επεξεργασία όταν αυτή είναι αναγκαία.

Οι πραγματικές δυσκολίες εμφανίζονται όταν ο τεχνητός εμπλουτισμός γίνεται για γεωργική χρήση, όπως για παράδειγμα για να ανεβάσουμε την υποβιβασμένη λόγω υπερεκμετάλλευσης στάθμη ενός υδροφόρου. Οι ποσότητες νερού που θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν εδώ είναι μεγαλύτερες, αποφέροντας σχετικά χαμηλό κέρδος, πράγμα που σημαίνει ότι μόνο οι πλέον οικονομικές μέθοδοι μπορούν να ληφθούν υπόψη για να διατηρηθεί ή και να αυξηθεί ο ρυθμός εμπλουτισμού (Huisman and Olsthoorn, 1983). Οι πιο σημαντικές από αυτές τις μεθόδους είναι:

- Μηχανική επεξεργασία του νερού που προέρχεται από ποτάμι με απλή καθίζηση για να απομακρυνθεί η θολότητα. Ο χρόνος που απαιτείται για την κατακράτηση των υλικών αυτών είναι περίπου 4 ώρες για το 75% του ιζήματος. Όταν τα αιωρούμενα υλικά διαχωριστούν, η αποτελεσματικότητα της καθίζησης μπορεί να αυξηθεί με την προσθήκη πηκτικών ή συσσωματικών χημικών.
- Χημική επεξεργασία του νερού με πολυφωσφορικά άλατα για σταθεροποίηση, ώστε να αποφευχθεί η συσσωμάτωση του σιδήρου, του ανθρακικού ασβεστίου κ.α. Για να αποφευχθεί η ανάπτυξη φυτικών οργανισμών που επιπλέουν στο νερό και μικροβίων στο έδαφος της λεκάνης μερικές φορές γίνεται χλωρίωση του νερού. Συνήθως οι φυτικοί αυτοί οργανισμοί (άλγη) παρατηρούνται σε επιφανειακά νερά (ποτάμια) κατά τους καλοκαιρινούς μήνες. Κατά τον Price (1965), για να χρησιμοποιηθεί τέτοιου είδους νερό στον εμπλουτισμό πρέπει, πριν μπουν στις λεκάνες, να ρίχνεται  $\text{CuSO}_4$  και παράλληλα το νερό να χλωριώνεται. Στη Γερμανία, για την καταπολέμηση των αλγών που αναπτύσσονται τους θερινούς μήνες στις λεκάνες χρησιμοποιείται  $\text{KMnO}_4$  (Schmidt and Meyer, 1989).
- Μηχανική επεξεργασία του εδάφους με όργωμα, σβάρνισμα κ.α. για να αυξηθεί το πορώδες. Για τον ίδιο σκοπό μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια στρώση από χονδρόκοκκο υλικό, συνήθως χαλίκι.
- Φυτική επεξεργασία του εδάφους. Για παράδειγμα μια αυτοφυής στρώση από γρασίδι μπορεί να παγιδεύσει το αιωρούμενο μέρος του νερού εμπλουτισμού. Περαιτέρω οι τρύπες που αφήνουν οι ρίζες που αποσυντίθενται αυξάνουν το πορώδες του εδάφους.
- Χημική επεξεργασία του εδάφους με άλατα ασβεστίου, για να αποφευχθεί η αποσυσσωμάτωση τεμαχίων αργίλου και η απόφραξη του εδάφους και με ρυθμιστικά εδάφους, για να αναπτυχθεί μια σταθερή συσσωμάτωση και να αυξηθεί το πορώδες του εδάφους.
- Επεξεργασία του εδάφους με οργανικά υλικά, όπως υπολείμματα εκκοκκιστικής μηχανής βαμβακιού, πριονίδι, τριφύλλι κ.α. έτσι ώστε να αυξηθεί η μικροβιακή δραστηριότητα αμέσως μόλις το νερό διοχετευτεί στο έδαφος. Όταν, μετά μια

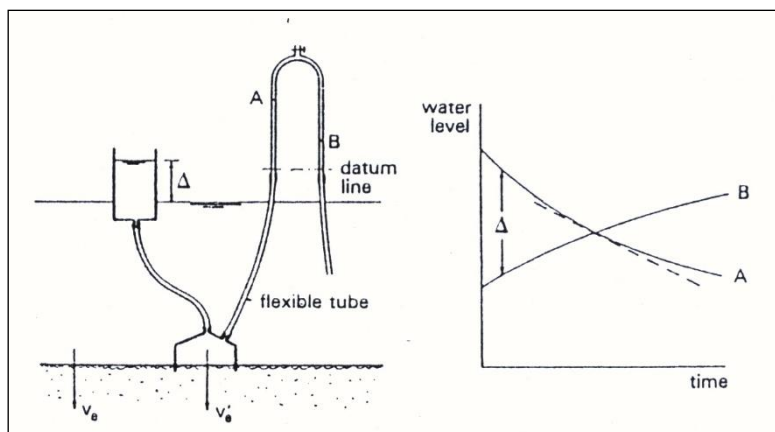
- περίοδο επώασης, το έδαφος στεγνώσει, τα μικροβιακά κύτταρα και τα στερεά παραπροϊόντα ενώνονται, τείνοντας να συσσωματώσουν τα μόρια και να δημιουργήσουν μια, λίγο έως πολύ, αδρανή χημικά ως προς το νερό επικάλυψη γύρω από τα μεγαλύτερα αυτά μόρια. Όταν ξαναρχίσουν οι εργασίες εμπλουτισμού, οι μεγαλύτεροι και πιο σταθεροί πόροι επιτρέπουν μια πιο γρήγορη ροή του νερού.
- Η εφαρμογή διαδοχικής κατάκλισης και αποξήρανσης της λεκάνης, π.χ. με τρεις εβδομάδες παροχή νερού και μια εβδομάδα αποξήρανση το καλοκαίρι και τρεις εβδομάδες παροχή και τρεις εβδομάδες αποξήρανση το χειμώνα. Η διαδικασία της εκκένωσης (ξήρανσης) της λεκάνης σκοτώνει τους περισσότερους μικροοργανισμούς που προξενούν απόφραξη (κλείσιμο) των πόρων του εδάφους, οι οποίοι στη συνέχεια αποσυντίθενται. Επί πλέον οι λεπτόκοκκες μάζες της λάσπης, που δημιουργούν την αδιαπέρατη στρώση, κατατέμνονται λόγω της ξήρανσης αυξάνοντας τη διηθητικότητα, ενώ το οργανικό υλικό οξειδώνεται και αποσυντίθεται. Μετά την αποξήρανση, τα σωματίδια του υλικού της απόφραξης διαλύονται και παρασύρονται από τον άνεμο. Το σύστημα της περιοδικής κατάκλισης και αποξήρανσης της λεκάνης περιορίζει συν τοις άλλοις την ανάπτυξη υδρόβιων φυτών και την ενόχληση από κουνούπια, σκνίπες και άλλα μικρά έντομα.
  - Η εκτέλεση του εμπλουτισμού κατά τους ζεστούς μήνες του έτους δίνει καλύτερα αποτελέσματα, επειδή το νερό εμπλουτισμού είναι θερμότερο από το νερό του υδροφόρου και έχει μικρότερο ιξώδες γεγονός που ευνοεί την απορροφητικότητα.

Όταν η απόφραξη έχει γίνει, ο καθαρισμός της λεκάνης είναι αναγκαίος και γίνεται απλά αποστραγγίζοντας, στεγνώνοντας και σκάβοντας ή αποξέοντας την επιφάνεια της λεκάνης. Γι' αυτό το σκοπό, διάφορες εταιρίες διαχείρισης υδάτινων πόρων έχουν αναπτύξει ειδικά μηχανήματα. Όμως δεν πρέπει να εργάζονται βαριά μηχανήματα μέσα στις λεκάνες εμπλουτισμού γιατί συμπυκνώνεται το έδαφος και κλείνουν οι πόροι του προπαντός όταν αυτό είναι υγρό. Η χρήση τους πάντως προϋποθέτει ότι η λεκάνη θα τίθεται εκτός λειτουργίας, διακόπτοντας την διαδικασία εμπλουτισμού. Στην περίπτωση που αυτή η διακοπή δεν είναι εφικτή, μπορούν να χρησιμοποιηθούν δύο λεκάνες. Με μια πρώτη εκτίμηση, ο αριθμός των καθαρισμών το χρόνο μπορεί να λαμβάνεται ίσος ή διπλάσιος με το ρυθμό εμπλουτισμού σε m/ημέρα (Huisman and Olsthoorn, 1983).

Εάν το υλικό της απόφραξης αποτελείται βασικά από ιλύ, άργιλο ή άλλες μη οργανικές ύλες, τότε θα πρέπει να απομακρύνεται με απόξεση, τσουγκράνισμα ή άλλη παρόμοια διαδικασία που μπορεί να το αφαιρέσει. Το σβάρνισμα του αποφρακτικού υλικού μέσα στο υπέδαφος δίνει κάποια προσωρινά αποτελέσματα βελτίωσης, αλλά τελικά ολοκληρωτή η οργανική στρώση μέχρι το βάθος του σβαρνίσματος μπορεί να χρειαστεί να αφαιρεθεί λόγω της συσσώρευσης λεπτόκοκκων υλικών. Εάν το υλικό της απόφραξης είναι στο μεγαλύτερο μέρος του οργανικό (λάσπη, βακτήρια, φύκια), η αποξήρανση από μόνη της μπορεί να δώσει μια υπολογίσιμη αύξηση των ρυθμών διήθησης λόγω της αποσύνθεσης, της συρρίκνωσης και της ρωγμάτωσης του υλικού απόφραξης. Το καθάρισμα του πυθμένα των λεκανών, σε αυτή τη περίπτωση, μπορεί να μην είναι αναγκαίο για κάθε περίοδο αποξήρανσης αλλά μπορεί να γίνεται περιστασιακά μια ή δυο φορές το χρόνο. Ο βέλτιστος σχεδιασμός των προγραμμάτων συνδυασμού αποξήρανσης και καθαρισμού πρέπει να γίνεται επί τόπου, ειδικά για έργα σε νέες περιοχές όπου δεν υπάρχει τοπική εμπειρία στη διαχείριση λεκανών διήθησης.

Αρχικά η ταχύτητα εισόδου του νερού εμπλουτισμού στο υπέδαφος είναι μεγαλύτερη στις πλευρές και μικρότερη στο κέντρο της λεκάνης. Η απόφραξη που συνοδεύει τις εργασίες εμπλουτισμού είναι περισσότερο ή λιγότερο ανάλογη με την ποσότητα του νερού που κατεισδύει και έτσι θα είναι πιο έντονη κοντά στις πλευρές, με αποτέλεσμα με την πάροδο του χρόνου, ο ρυθμός εισόδου να μειώνεται εκεί, μεταφέροντας το φορτίο της ροής εμπλουτισμού προς το κέντρο της λεκάνης. Η ταχύτητα εισόδου πάνω από την επιφάνεια του πυθμένα της λεκάνης μπορεί να μετρηθεί με το μετρητή διήθησης (σχ. 3.11), που εξελίχθηκε από τον Bouwer στο Denver του Colorado. Η διάταξη αποτελείται από κυλινδρικό χαλύβδινο δοχείο διαμέτρου περί τα 25 cm, κλειστό από πάνω και ανοιχτό από κάτω και το οποίο βυθίζεται κατά 2-3 cm μέσα στον πυθμένα της λεκάνης

κατάκλισης. Παροχετεύεται νερό εμπλουτισμού στο δοχείο από μια δεξαμενή με τη στάθμη του νερού  $s'$  αυτή να μπορεί να φτάνει σε ένα ύψος  $\Delta$  πάνω από την επιφάνεια του νερού στη λεκάνη. Για όσο διάστημα το  $\Delta$  είναι θετικό, η ταχύτητα εισόδου  $v_e$  μέσα στο δοχείο θα είναι μεγαλύτερη από την κανονική  $v_e$ , ενώ θα έχουμε ίσες ταχύτητες όταν  $\Delta=0$ . Η ταχύτητα  $v_e$  μπορεί εύκολα να μετρηθεί από την πτώση του  $\Delta$  σε σχέση με το χρόνο, αλλά μια πιο καλή εκτίμηση μπορεί να γίνει με τη χρήση ενός ανεστραμμένου εύκαμπτου σωλήνα - μανομέτρου σε σχήμα U που μπορεί να δείχνει το πιεζομετρικό φορτίο (A) στο δοχείο και το φορτίο του νερού (B) στη λεκάνη σε σχέση με μια τυχαία γραμμή αναφοράς. Η διακύμανση των δύο φορτίων σε σχέση με το χρόνο και η αποτύπωση σε ανάλογο διάγραμμα, δίνει την κλίση της καμπύλης (A) που είναι η ταχύτητα  $v_e$  που γίνεται ίση με τη  $v_e$  στο σημείο τομής με την καμπύλη (B).



Σχήμα 3.11. Μετρητής διήθησης (Huisman and Olsthoorn, 1983).

### Η επίδραση του υδραυλικού φορτίου

Με μια πρώτη ματιά φαίνεται λογικό ότι το μεγάλο φορτίο (βάθος) νερού στις λεκάνες διήθησης θα έδινε μεγαλύτερους ρυθμούς διήθησης από ότι το μικρό φορτίο. Παρόλα αυτά δεν είναι πάντα έτσι. Εάν η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα είναι πάνω από τον πυθμένα της λεκάνης (λεκάνες σε παλιά λατομεία αδρανών υλικών) ή όπου η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα είναι υψηλή, τότε μια αύξηση στο φορτίο του νερού μπορεί να δημιουργήσει μια αξιοσημείωτη αύξηση στη ταχύτητα διήθησης. Αν η στάθμη του υπόγειου νερού βρίσκεται όμως αρκετά κάτω από τον πυθμένα της λεκάνης, τότε μια αύξηση στο φορτίο του νερού θα δώσει μια μικρή αύξηση στο ρυθμό διήθησης εάν ο πυθμένας και τα πρανή της λεκάνης είναι καθαρά (δεν καλύπτονται από ιζήματα που έχουν κατακαθίσει ή από άλλο υλικό απόφραξης). Αυτό μπορεί να αποδειχθεί με την εφαρμογή του νόμου του Darcy για τη ροή από τη λεκάνη προς το υπόγειο νερό. Εάν, ωστόσο, η βρεχόμενη περίμετρος της λεκάνης καλύπτεται από μια ικανή στρώση αποφρακτικού υλικού (οργανικού ή μη) τότε ολόκληρο το φορτίο λόγω του βάθους του νερού στη λεκάνη κατασπαταλείται κατά μήκος της αποφρακτικής στρώσης και το διηθούμενο νερό κινείται σαν ακόρεστη ροή στο υποκείμενο υπόγειο νερό. Εφαρμόζοντας την εξίσωση του Darcy στη ροή μέσα από τη αποφρακτική στρώση αποδεικνύεται ότι  $s'$  αυτή την περίπτωση υπάρχει μια σχεδόν γραμμική σχέση ανάμεσα στο βάθος του νερού της λεκάνης και στο ρυθμό διήθησης. Σ' αυτή τη περίπτωση, για παράδειγμα, ο διπλασιασμός του βάθους του νερού ουσιαστικά θα οδηγούσε σε διπλασιασμό της ταχύτητας διήθησης.

Ωστόσο υπάρχουν άλλα φαινόμενα που μπορούν να αλλάξουν αυτή τη γραμμική σχέση:

- Το πρώτο φαινόμενο είναι η συμπύκνωση της στρώσης απόφραξης καθώς το βάθος του νερού αυξάνεται. Η συμπύκνωση της αποφρακτικής στρώσης

δημιουργεί μια σημαντική μείωση στην υδραυλική αγωγιμότητά της, προκαλώντας μια μικρότερη αύξηση στην ταχύτητα διήθησης από την αναμενόμενη λόγω της αύξησης της υδραυλικής πίεσης (βάθος νερού), και ίσως μια μείωση, ανάλογα με τον τύπο του αποφρακτικού υλικού .

- Το δεύτερο φαινόμενο είναι ότι εάν η αύξηση στο βάθος του νερού δεν μας δίνει ανάλογη αύξηση στη ταχύτητα διήθησης όπως είδαμε πριν, τότε η ταχύτητα ανακύκλωσης του νερού στη λεκάνη μειώνεται, πράγμα που θα μπορούσε να υποβοηθήσει την ανάπτυξη των αιωρούμενων μονοκύτταρων φυκιών στο νερό λόγω της μεγαλύτερης έκθεσής τους στο φως. Τα φύκια σ' αυτή την περίπτωση επικάθονται στο πυθμένα καθώς το νερό διηθείται και σχηματίζεται μια κρούστα πάνω στη αποφρακτική στρώση, η οποία μειώνει περαιτέρω την υδραυλική της αγωγιμότητα και κατά συνέπεια την ταχύτητα διήθησης. Αυτό, με τη σειρά του, μειώνει την ταχύτητα ανακύκλωσης του νερού στη λεκάνη ακόμη περισσότερο, αυξάνοντας την έκθεση στο ηλιακό φως των αιωρούμενων φυκιών που ευνοεί την ανάπτυξη των φυκιών και εντείνει την απόφραξη του πυθμένα με την κρούστα των φυκιών κτλ.
- Το τρίτο φαινόμενο είναι η αύξηση της ανάληψης διοξειδίου του άνθρακα από το νερό για φωτοσύνθεση σε υψηλές συγκεντρώσεις φυκών, μεγαλώνοντας την τιμή του pH του νερού σε τιμές που φτάνουν το 9 ή ακόμη και το 10. Σ' αυτές τις τιμές του pH, το ανθρακικό ασβέστιο θα καθιζάνει και θα συσσωρευτεί στον πυθμένα επιδεινώνοντας περισσότερο τη διαδικασία απόφραξης και μειώνοντας την ταχύτητα διήθησης ακόμα περισσότερο.

Σύμφωνα με τις διαπιστώσεις αυτές, οι ρηχές λεκάνες μπορούν στην πραγματικότητα να δίνουν μεγαλύτερες ταχύτητες διήθησης από ότι οι βαθιές λεκάνες όταν η βρεχόμενη επιφάνεια της λεκάνης καλύπτεται από μια αποφρακτική στρώση και η ύπαρξη αυτών των στρώσεων είναι μάλλον ο κανόνας παρά η εξαίρεση. Επειδή αρκετοί παράγοντες καθορίζουν τη σχέση μεταξύ του βάθους του νερού και της ταχύτητας διήθησης, το βάθος του νερού που δίνει τις μεγαλύτερες ταχύτητες διήθησης πρέπει να καθορίζεται από επί τόπου δοκιμές. Εάν υπάρχει σοβαρή σκέψη για κατασκευή βαθιών λεκανών ή μελετάται αλλαγή μεθόδου από ρηχές σε βαθιές λεκάνες, οι τοπικές συνθήκες θα πρέπει να ερευνώνται λεπτομερώς και θα πρέπει να γίνουν μελέτες με ερευνητικές λεκάνες ώστε να σιγουρευτούμε ότι οι βαθιές λεκάνες θα μας δώσουν τα επιθυμητά αποτελέσματα.

### Ποιότητα του νερού εμπλουτισμού

Καθώς το διηθούμενο νερό κινείται μέσα από την ακόρεστη ζώνη πριν φτάσει στον υδροφόρο, μερικές παράμετροι της ποιότητας του μπορεί να βελτιώνονται και μερικές μπορεί να επηρεάζονται δυσμενώς (Bouwer, 1989). Τα συστατικά που αφαιρούνται σε μεγάλο βαθμό ή και εντελώς από αυτό καθώς κινείται μέσα από την ακόρεστη ζώνη και τον υδροφόρο είναι τα αιωρούμενα στερεά, βακτηρίδια, ιοί, άλλοι μικροοργανισμοί, βιοδιασπώμενα υλικά (BOD), νιτρικά και φωσφορικά άλατα και κάποια συνθετικά οργανικά μείγματα, ειδικά μη αλογονομένοι υδρογονάνθρακες. Επειδή τα εδάφη στα συστήματα τεχνητού εμπλουτισμού είναι συνήθως αρκετά αδρά και περατά, υπάρχει λίγη έως καθόλου άργιλος και η ανταλλαγή ιόντων είναι αμελητέα. Έτσι η ιοντική σύνθεση του νερού μετά τη διήθησή του από την ακόρεστη ζώνη θα είναι περίπου η ίδια με αυτή του νερού που έπεσε στις λεκάνες.

Ανεπιθύμητο φαινόμενο είναι η παρουσία του σιδήρου και του μαγγανίου και η απόπλυση ιχνοστοιχείων (όπως σελήνιο, αρσενικό, βόριο, κάδμιο, μόλυβδος και υδράργυρος) από τη ακόρεστη ζώνη. Η απόπλυση των ιχνοστοιχείων μπορεί να είναι σημαντική όπου τα εδάφη είναι σχετικά λεπτόκοκκα και σχεδόν οριακή για εφαρμογές τεχνητού εμπλουτισμού σε εδάφη που δεν έχουν υποστεί στο παρελθόν σημαντική διήθηση. Τέτοια εδάφη περιλαμβάνουν ιζήματα λεκανών και κοιλάδων καθώς και θαλάσσιες αποθέσεις, όπως στην περίπτωση της κοιλάδας του San Joaquin στη

California όπου το σελήνιο αποπλύθηκε από το έδαφος και εμφανίστηκε στο αρδευτικό νερό (Bouwer, 1989). Αλλουβιακές αποθέσεις, κανάλια χειμάρρων και πλημμυρικά πεδία δεν αναμένεται να εμφανίσουν προβλήματα απόπλυσης ιχνοστοιχείων, αλλά οι πιθανές περιοχές θα πρέπει να ελέγχονται έτσι ή αλλιώς για να αποφευχθούν δυσάρεστες εκπλήξεις αργότερα.

Μπορεί επίσης να υπάρχει πρόβλημα με κάποια οργανικά οξέα, φυκώδη συσσωματώματα και με υλικά προερχόμενα από μεταβολισμό που μπορεί να είναι ήδη μέσα στο νερό πριν από τη διήθηση. Αυτές οι οργανικές ύλες μπορεί να μην απομακρυνθούν εντελώς στην ακόρεστη ζώνη και στον υδροφόρο. Αφού αντιδρούν με το χλώριο για να σχηματίσουν τριχλωρομεθάνια, ειδικά μέτρα ίσως πρέπει να ληφθούν όταν το νερό αντλείται από τον υδροφόρο και πρέπει να απολυμανθεί για να γίνει πόσιμο. Ωστόσο και το αμόλυντο, καθαρό υπόγειο νερό περιέχει οργανικό άνθρακα συνήθως με τη μορφή οργανικών οξέων σε τυπικές συγκεντρώσεις από 0,2 έως 0,7 mg/lit. Αυτό το νερό συνήθως απολυμαίνεται με χλώριο όταν αντλείται για αστική χρήση, χωρίς να δίνεται ιδιαίτερη σημασία στην πιθανότητα σχηματισμού THM.

Οι πιο σημαντικοί παράμετροι της ποιότητας του νερού που παροχετεύεται στις λεκάνες εμπλουτισμού είναι το σύνολο των διαλυμένων αλάτων (TDS) και ο συντελεστής προσρόφησης νατρίου (SAR) που υπολογίζεται σαν  $Na/[(Ca + Mg)/2]^{1/2}$  με τις συγκεντρώσεις να εκφράζονται σε meq/lit. Χαμηλός δείκτης SAR και υψηλός δείκτης TDS ευνοούν τη συσσωμάτωση (flocculation) της αργίλου που υπάρχει στο έδαφος, ενώ αντίθετα υψηλός δείκτης SAR και χαμηλός δείκτης TDS ευνοούν τη διασπορά (dispersion) της (Bouwer, 1978). Τα εδάφη κάτω από τις λεκάνες κατάκλυσης γενικά είναι αμμώδη ή χαλικώδη και περιέχουν από λίγη έως καθόλου άργιλο. Το ίδιο ισχύει και για τους υδροφόρους. Έτσι ο SAR και το TDS θα έχουν από λίγη έως καθόλου επιρροή στην υδραυλική αγωγιμότητα της ακόρεστης ζώνης και του υδροφόρου, αλλά θα επηρεάσουν την υδραυλική αγωγιμότητα των ιζημάτων που σχηματίζουν τον πυθμένα των λεκανών. Τέτοια ιζήματα περιέχουν λεπτόκοκκα υλικά και συχνά περιέχουν άργιλο που ήταν διαλυμένη στο νερό. Η απόφραξη λόγω της καθίζησης ανόργανων ιζημάτων στη βρεχόμενη επιφάνεια της λεκάνης τείνει να γίνει πιο έντονη όταν οι τιμές των δεικτών SAR και TDS κάνουν την άργιλο να διασπείρεται παρά να συσσωματώνεται, κάνοντας αναγκαίο τον πιο συχνό καθαρισμό. Μερικές φορές, ανάλογα με τις διάφορες τιμές των SAR και TDS, μπορούν να κινητοποιηθούν σωματίδια αργίλου στο σύστημα του υδροφόρου. Τα σωματίδια αυτά μπορούν να μετακινηθούν μέσω του υδροφόρου προς τα πηγάδια και να αυξήσουν τη θολότητα του αντλούμενου νερού.

### **Μέθοδος τάφρων και αυλάκων (ditch and furrow method)**

Το νερό παροχετεύεται σε μια σειρά από τάφρους ή αυλάκια μικρού βάθους, πλάτους 0,3-1,8 m, επίπεδου πυθμένα και σε μικρή απόσταση μεταξύ τους (σχ. 3.12). Το σύστημα αυτό των τάφρων και αυλάκων μπορεί να έχει (Καλλέργης, 1986, Muckel, 1959):

- μαιανδρική μορφή (ακολουθώντας τις ισοΰψεις),
- δενδροειδή μορφή (το κύριο κανάλι διακλαδίζεται σε δευτερεύοντα),
- πλευρική μορφή (κατασκευή μικρών καναλιών ή τάφρων πλευρικά προς το κύριο κανάλι)

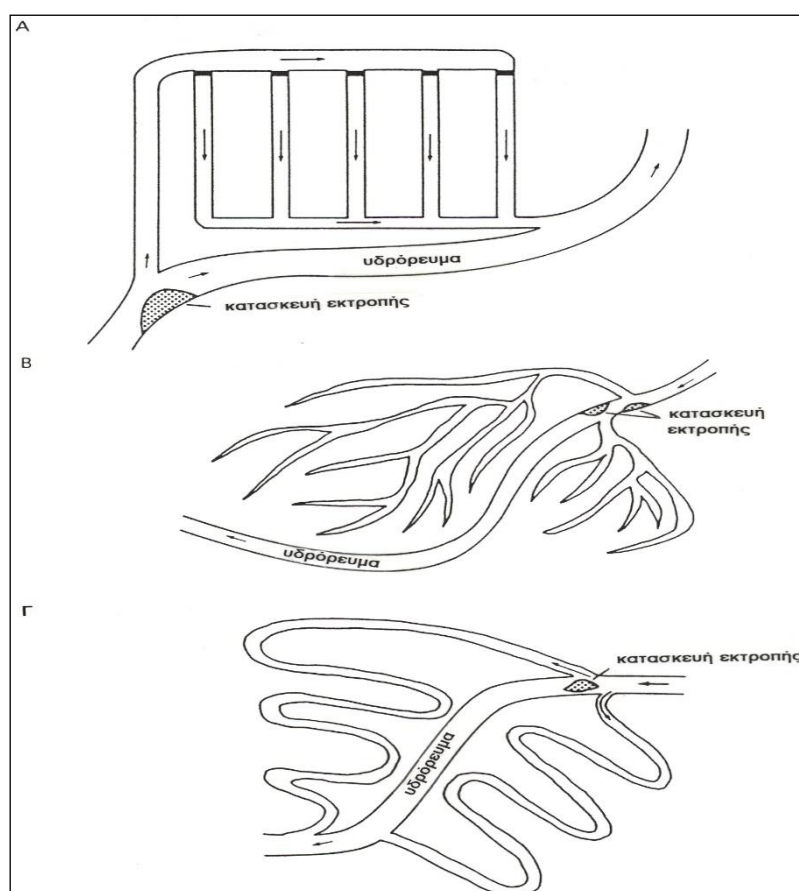
Η μέθοδος αυτή είναι πρακτικά προτιμητέα όπου το νερό εμπλουτισμού περιέχει μεγάλα φορτία αιωρούμενων υλικών. Επίσης είναι καλή σε ανώμαλο εδαφικό ανάγλυφο, αλλά η επιφάνεια επαφής νερού-εδάφους σπάνια φτάνει το 10% όλης της επιφάνειας εφαρμογής του εμπλουτισμού.



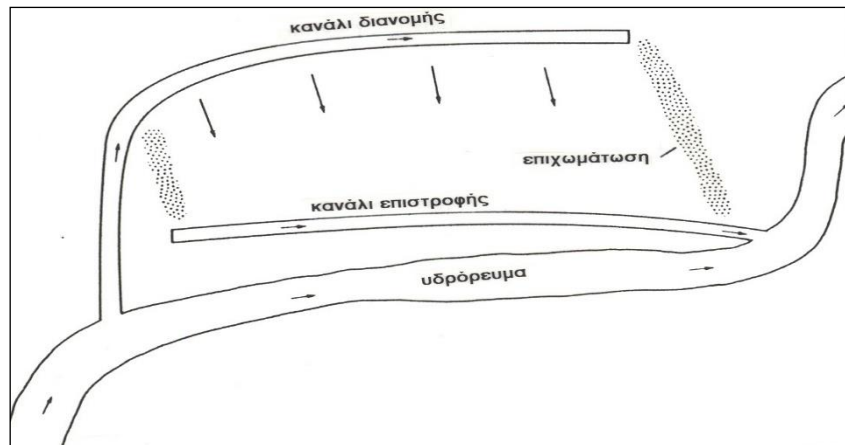
## Μέθοδος πλημμύρας (Flooding method)

Με τη μέθοδο αυτή, σε σχετικά μικρής κλίσης (1-3%) περιοχές, το νερό απλώνεται με τη βοήθεια καναλιών και αυλάκων διανομής, με σκοπό να κατακλύσει μεγάλη έκταση σχηματίζοντας ένα στρώμα μικρού πάχους που κινείται αργά, ώστε να μη διαταραχθεί το έδαφος (σχ. 3.13). Γενικά οι ταχύτητες διήθησης είναι μεγαλύτερες σε περιοχές με αδιατάρακτη βλάστηση και αδιατάρακτο έδαφος. Το μεγάλο πλεονέκτημα της μεθόδου είναι το σχετικά χαμηλό κόστος κατασκευής και συντήρησης, ενώ παρουσιάζει μειονεκτήματα σημαντικά, όπως (Καλλέργης, 1986, Oaksford, 1985):

- η απαίτηση για μεγάλη έκταση εφαρμογής της,
- η εξάτμιση μεγάλων ποσοτήτων από το νερό εμπλουτισμού,
- η δυσκολία ικανοποιητικής ανάσχεσης του νερού που πλημμυρίζει.



Σχήμα 3.12. Τυπικό σύστημα τεχνητού εμπλουτισμού τάφρων και αυλάκων  
Α. Πλευρική διάταξη Β. Δενδρική διάταξη Γ. Μαιανδρική διάταξη (Asano, 1985, Καλλέργης 1986).



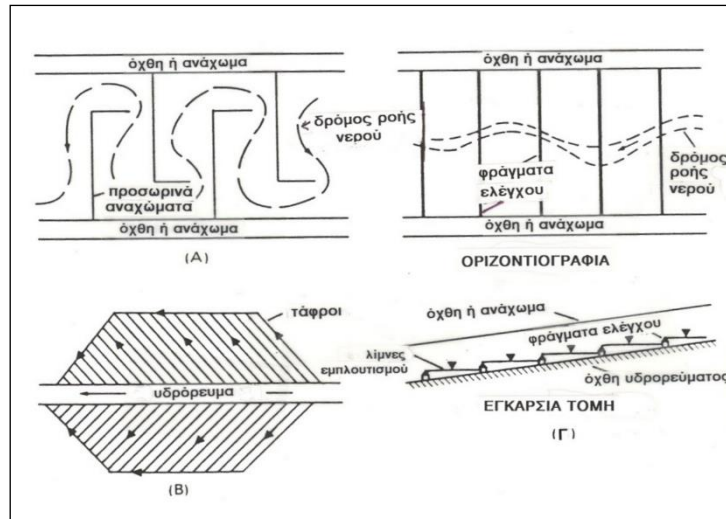
Σχήμα 3.13. Τυπική διάταξη συστήματος εμπλουτισμού με πλημμύρα (Asano, 1985, Καλλέργης, 1986).

### **Μέθοδος διευθέτησης υδρορρέυματος (stream - channel modification)**

Με τη μέθοδο αυτή επιχειρείται η αύξηση της ικανότητας διήθησης με την κατάλληλη διευθέτηση της κοίτης υδρορρέυματος με σκοπό την επιβράδυνση της ροής του νερού μέσα στο υδρόρρευμα και την αύξηση της επιφάνειας της κοίτης που έρχεται σε επαφή με το νερό του υδρορρέυματος (σχ. 3.14). Οι εργασίες διευθέτησης μπορεί να περιλαμβάνουν την κατασκευή χαμηλών διαφραγμάτων κλιμακωτών και εγκάρσια προς τη ροή του νερού, τη διεύρυνση, την επιπέδωση, την εκσκαφή της κοίτης, τη δημιουργία παράπλευρων τάφρων, την κατασκευή αναχωμάτων εγκάρσια προς τη ροή. Τα έργα αυτά είναι συνήθως προσωρινά, φτιαγμένα από τα υλικά του πυθμένα του υδρορρέυματος και σχεδιασμένα να αυξάνουν τις ποσότητες που εμπλουτίζονται εποχιακά. Επίσης καταρρέουν εύκολα σε πιθανές πλημμύρες. Παρόλα αυτά η μέθοδος αυτή είναι αποτελεσματική όπου αποφασίζεται να εφαρμοστεί, αφού το κόστος κατασκευής των έργων είναι σχετικά χαμηλό, η συντήρησή τους δεν είναι ιδιαίτερα δαπανηρή ενώ η όλη διαδικασία δεν επηρεάζει άλλες χρήσεις γης.

### **Επανενεργοποίηση ή αύξηση της ροής υδρορρέυματος (stream flow reactivation or augmentation)**

Η μέθοδος αυτή επιχειρεί την εφαρμογή του εμπλουτισμού στην αρχή της πηγής τροφοδοσίας υδρορρέυματος με σκοπό την επανενεργοποίηση ή την αύξηση της ικανότητας διήθησης. Η μέθοδος χρησιμοποιείται ως εναλλακτική μέθοδος Τ.Ε. σε περιοχές όπου έχουμε κοίτες εγκαταλειμμένες όπως στην περιοχή Πολυσίτου Ξάνθης (Διαμαντής et al., 1994, Πλιάκας et al., 1995, Πλιάκας, 1998, Πλιάκας et al., 1999), ή σε κοίτες που έχει μειωθεί η έκτασή τους εξ αιτίας της μεγάλης πτώσης του υποκείμενου υδροφόρου ορίζοντα, όπως στο Long Island της Νέας Υόρκης (Prince, 1982). Εκτός από το πρακτικό μέρος της ευεργετικής από υδρογεωλογική άποψη εφαρμογής του Τ.Ε., η εφαρμογή της μεθόδου αποκτά και άλλες διαστάσεις αφού με την εκ νέου ροή νερού στην κοίτη, το ευρύτερο περιβάλλον επανακτά τη διαταραγμένη φυσική του λειτουργία. Η μέθοδος αυτή βέβαια είναι λιγότερο αποτελεσματική από άλλες αφού οι ταχύτητες ροής του νερού στην κοίτη συχνά υπερβαίνουν την ταχύτητα διήθησης ενώ οι οικονομικοί πόροι για την εφαρμογή της δεν είναι πάντα διαθέσιμοι.



Σχήμα 3.14. Τεχνητός εμπλουτισμός με διευθέτηση υδρορέυματος Α. Εκτροπή Β. Με τάφρους Γ. Φράγματα και λεκάνες ελέγχου (Asano 1985, Καλλέργης, 1986).

### Μέθοδος άρδευσης (irrigation method)

Με τη μέθοδο αυτή επιτυγχάνεται εμπλουτισμός από το πλεόνασμα νερού της άρδευσης σε αρδευόμενες περιοχές κατά τις περιόδους της αγρανάπαυσης, το χειμώνα ή τις μη αρδευτικές περιόδους (σχ. 3.15). Η μέθοδος είναι παρόμοια με την τυπική διαδικασία των τεχνικών της άρδευσης, που μπορεί να περιλαμβάνουν επιφανειακή ροή του νερού, τάφρους και αύλακες, σύστημα υπόγειας άρδευσης, διατάξεις εμπλουτισμού με πλημμύρα, συστήματα καταιονισμού (Israelson, 1950). Η μέθοδος χρησιμοποιεί συνήθως μια από τις πιο πάνω τεχνικές άρδευσης, αφού εκμεταλλεύεται το πλεονάζον νερό άρδευσης. Είναι πολύ φτηνή μέθοδος γιατί χρησιμοποιείται το αρδευτικό σύστημα διανομής του νερού που ήδη είναι εγκαταστημένο και δεν χρειάζεται ιδιαίτερη προπαρασκευή του εδάφους. Το συνηθισμένο πρόβλημα της μεθόδου είναι η απόπλυση των εδαφών (leaching), με τη μεταφορά αλάτων από τη ριζική ζώνη στο υπόγειο νερό ή με την απομάκρυνση λιπασμάτων του εδάφους, προκαλώντας έτσι μείωση της παραγωγής (Καλλέργης, 1986).

### 3.2. Μέθοδοι εμπλουτισμού απευθείας στο υπέδαφος (Direct - subsurface recharge)

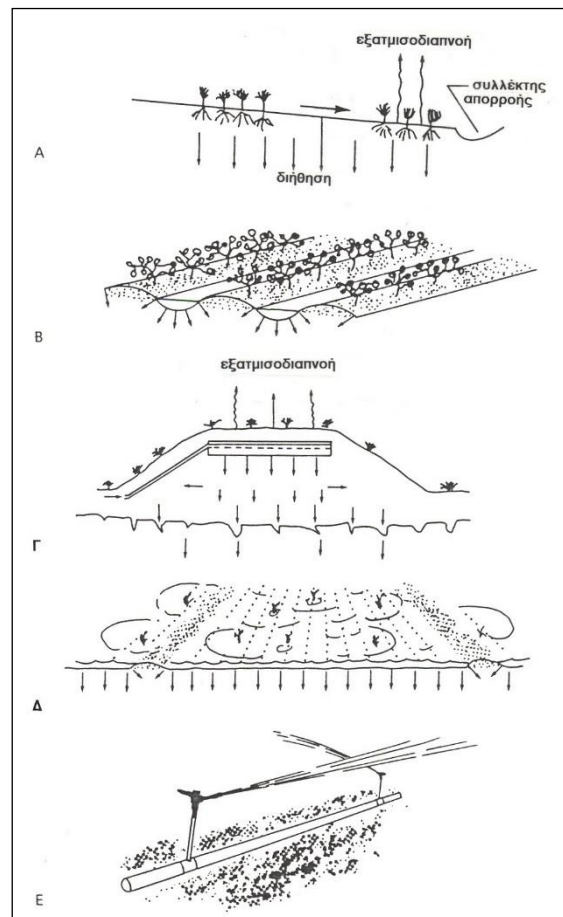
Οι μέθοδοι αυτές αποσκοπούν στην επίτευξη απευθείας τροφοδοσίας των υδροφόρων. Συνήθως χρησιμοποιούνται όταν ένα ημιπερατό υπό πίεση υδροφόρο στρώμα διαχωρίζει την πηγή τροφοδοσίας του νερού εμπλουτισμού από τον υδροφόρο που πρόκειται να εμπλουτισθεί. Σε όλες αυτές τις μεθόδους δίνεται μεγάλη σημασία στην ποιότητα του νερού εμπλουτισμού αφού το νερό εισέρχεται στον υδροφόρο χωρίς την προηγούμενη επεξεργασία που υφίσταται όταν κατεισδύει μέσω της ακόρεστης ζώνης. Όλες οι μέθοδοι χρησιμοποιούν σημαντικά μικρότερη επιφάνεια εμπλουτισμού από εκείνη των μεθόδων επιφανειακού εμπλουτισμού.

### Μέθοδος με φυσικά ανοίγματα (natural openings method)

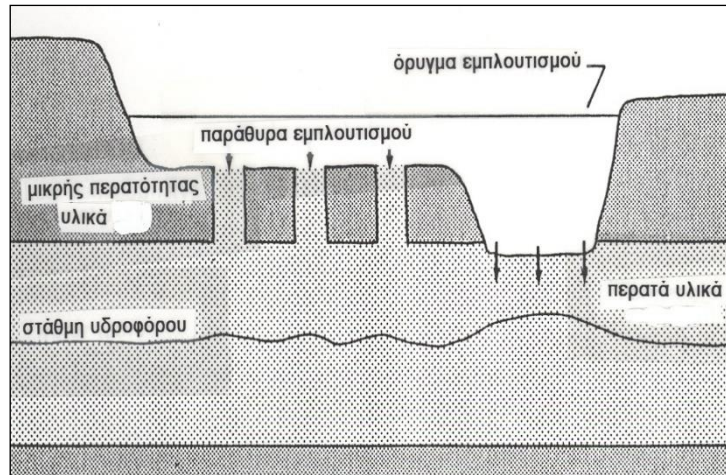
Ο εμπλουτισμός επιτυγχάνεται μέσα από φυσικά ανοίγματα που προέρχονται από σπάσιμο ή διάλυση ασβεστολίθων ή άλλων ευδιάλυτων πετρωμάτων. Αυτό το σύστημα εμπλουτισμού είναι σχετικά χαμηλού κόστους, μπορεί όμως η εφαρμογή της μεθόδου να επισκιασθεί από ανεπιθύμητες δυσμενείς εδαφικές και γεωλογικές συνθήκες.

### Μέθοδος ορυγμάτων (pit method)

Αν σε μικρό βάθος από την επιφάνεια του εδάφους υπάρχουν στρώματα μικρής υδραυλικής αγωγιμότητας, τότε ο υποκείμενος υδροφόρος μπορεί να εμπλουτισθεί με τη διάνοιξη βαθιών ορυγμάτων ή φρεάτων που να διαπερνούν τα πιο πάνω στρώματα (σχ. 3.16) (Kelly, 1967, McWhorter et al., 1972). Το βασικό πλεονέκτημα είναι ότι η αιωρούμενη στο νερό ιλύς καθιζάνει στον πυθμένα του ορύγματος και δεν επικάθεται στα τοιχώματά του, λόγω της μεγάλης κλίσης τους (Bianchi et al., 1970). Προκειμένου να επιτευχθεί το καλύτερο αποτέλεσμα κατά τον εμπλουτισμό, πρέπει να δοθεί προσοχή στη γεωμετρία του ορύγματος (Dvorace et al., 1963, Scot et al., 1967). Η εφαρμογή της μεθόδου είναι περιορισμένη αφού η δαπάνη κατασκευής και συντήρησης είναι μεγάλη αν συγκριθεί με τις μεθόδους επιφανειακού εμπλουτισμού. Μπορεί όμως να μειωθεί αισθητά αν χρησιμοποιηθούν εγκαταλειμμένα ή χαλικιώδη ορύγματα.



Σχήμα 3.15. Τεχνικές άρδευσης: Α. Επιφανειακή, Β. Τάφρων και αυλάκων, Γ. Υπεδαφική, Δ. Πλημμύρας, Ε. Καταιονισμού (Asano, 1985, Καλλέργης, 1986).



Σχήμα 3.16. Μέθοδος εμπλουτισμού με ορύγματα και κανάλια (Asano, 1985, Καλλέργης, 1986).

### Μέθοδος αντίστροφης αποστράγγισης (reverse drainage method)

Με τη μέθοδο αυτή, το νερό διοχετεύεται σε ένα υπόγειο δίκτυο αγωγών από το οποίο διηθείται στο έδαφος, παρόμοια με τη τεχνική της υπόγειας άρδευσης. Η διαδικασία της μεθόδου είναι αντίστροφη εκείνης της διαδικασίας κατά την οποία συγκεντρώνεται και απομακρύνεται νερό από την κορεσμένη ζώνη. Το βασικό πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι η ασήμαντη χρήση της επιφάνειας του εδάφους, λύση αρκετά δελεαστική για την εφαρμογή της σε περιοχές όπου η αξία της γης είναι μεγάλη. Τέτοια παραδείγματα εφαρμογής της μεθόδου έχουμε στην Ιαπωνία (Public Works Research Institute, 1980) και στην Κύπρο (Whetstone, 1956).

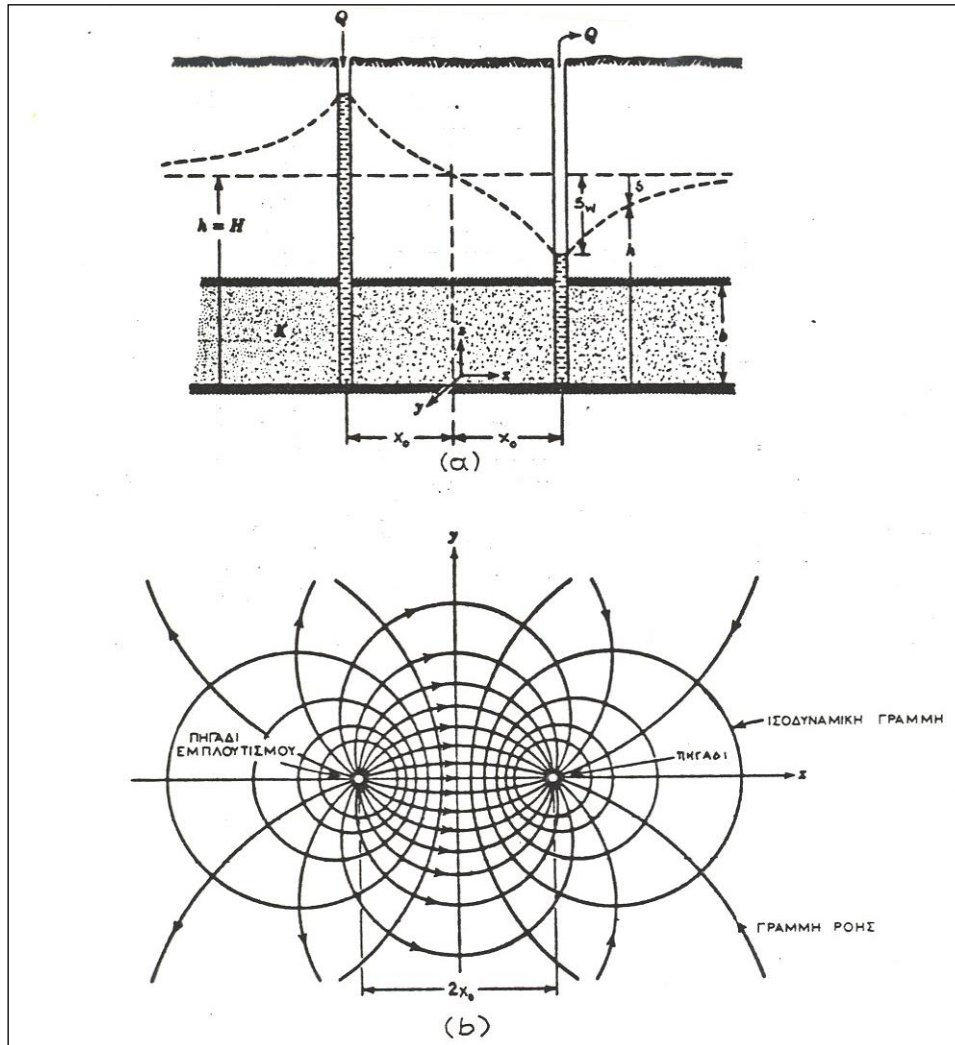
### Μέθοδος με γεωτρήσεις εμπλουτισμού (recharge well method)

Ως γεώτρηση εμπλουτισμού μπορεί να θεωρηθεί μια γεώτρηση που διαβιβάζει νερό από την επιφάνεια προς τους υποκείμενους υδροφόρους (Todd, 1980) και λειτουργεί κατά αντίστροφη φορά σε σχέση με μια γεώτρηση άντλησης (σχ. 3.17). Οι γεωτρήσεις εμπλουτισμού χρησιμοποιούνται για τον εμπλουτισμό βαθιών αρτεσιανών υδροφόρων απομονωμένων από την επιφάνεια εξαιτίας της ύπαρξης ενδιάμεσων υλικών χαμηλής περατότητας, ή εκεί όπου υπεισέρχονται παράγοντες οικονομίας χώρου, όπως σε αστικές περιοχές. Οι γεωτρήσεις εμπλουτισμού μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη τροφοδοσία δύο ή περισσότερων υδροφόρων συγχρόνως ή να επιτύχουν την υδραυλική επικοινωνία, όπου οι υδραυλικές συνθήκες το επιτρέπουν, απομονωμένων μεταξύ τους υδροφόρων. Επίσης το νερό εμπλουτισμού δεν είναι απαραίτητο πάντα να προέρχεται από επιφανειακή πηγή τροφοδοσίας. Εκτός από τον αρχικό σκοπό τους που είναι ο εμπλουτισμός των υδροφόρων που παρέχουν πόσιμο νερό, οι γεωτρήσεις εμπλουτισμού χρησιμοποιούνται, επίσης, για τον εμπλουτισμό των υπόγειων νερών που χρησιμοποιούνται για ψύξη όπως και για να ανανεώνουν με γλυκό νερό τους παράκτιους υδροφορείς που αντιμετωπίζουν προβλήματα διείσδυσης αλμυρού νερού.

Σημαντικοί παράγοντες που ελαττώνουν προοδευτικά την απόδοση εμπλουτισμού των γεωτρήσεων αποτελούν:

- η μείωση της περατότητας των φίλτρων των γεωτρήσεων και του υδροφόρου γύρω από τις γεωτρήσεις, λόγω της απόθεσης αιωρούμενης ιλύος που περιέχει το νερό εμπλουτισμού (clogging effect),
- η μεταφορά στον υδροφόρο από το νερό εμπλουτισμού, μεγάλων ποσοτήτων διαλυμένου αέρα,

- η πιθανή παρουσία βακτηρίων στο νερό εμπλουτισμού με συνέπεια την ανάπτυξη ανεπιθύμητων καλλιεργειών στις σωληνώσεις των γεωτρήσεων,
- η ενδεχόμενη υψηλή περιεκτικότητα σε Na με αποτέλεσμα την πιθανή αποκροκίδωση του εδάφους.



Σχήμα 3.17. (α) Πηγάδι άντλησης και εμπλουτισμού σε αρτεσιανό υδροφόρο και (β) δίκτυο ροής του συστήματος των δύο πηγαδιών (Καλλέργης, 1986).

Γι' αυτό η χρήση της μεθόδου πρέπει να γίνεται με περίσκεψη και ιδιαίτερα εκεί που δεν προσφέρεται η περιοδική εκτέλεση διορθωτικών εργασιών στις γεωτρήσεις (Hauser et al., 1967, Valliant, 1964). Η θερμοκρασία επίσης τόσο του υδροφόρου όσο και του νερού εμπλουτισμού μπορεί να έχει δυσμενή επίδραση στην απόδοση της μεθόδου (U.S. Department of Agriculture, 1967). Τα καρσικά πετρώματα και οι λάβες προσφέρονται καλύτερα για την εφαρμογή της μεθόδου (Καλλέργης, 1986). Στις ΗΠΑ, τα τελευταία χρόνια, η μέθοδος των γεωτρήσεων εμπλουτισμού εφαρμόζεται με τους πλέον γοργούς ρυθμούς ανάπτυξης σε σχέση με όλες τις άλλες μεθόδους εμπλουτισμού αντίθετα με τις τάσεις και τις ανάγκες του άμεσου παρελθόντος (David, 1994).

Σε επίπεδες παράκτιες περιοχές, όπου δεν προσφέρεται η κατασκευή ταμιευτήρων και οι υδροφόροι ορίζοντες έχουν αλμυρίσει, ενδείκνυται η προσωρινή αποθήκευση γλυκού νερού σε γεωτρήσεις στις οποίες προηγείται ο εμπλουτισμός και ακολουθεί η

άντληση, ενώ η αποτελεσματικότητα της μεθόδου αυξάνει με κάθε κύκλο "εμπλουτισμός - αποθήκευση - άντληση" (Brown et al., 1977, Esmail et al., 1967, Kumar et al., 1970).

Η χρήση υγρών αποβλήτων για εμπλουτισμό με γεωτρήσεις περιορίζεται μόνον σε περιπτώσεις που πρόκειται να αντιμετωπισθούν ειδικά προβλήματα, όπως η καθίζηση του εδάφους, η διείσδυση θαλασσινού νερού, κλπ. Η δαπάνη επεξεργασίας των αποβλήτων είναι αρκετά υψηλή, προκειμένου να φθάσει η ποιότητά τους τα επιτρεπόμενα όρια ποιότητας χρήσης νερού εμπλουτισμού με τη μέθοδο αυτή (Baier et al., 1971, Schicht, 1971).

### **Μέθοδος με γεωτρήσεις αποθήκευσης - άντλησης (aquifer storage and recover wells - ASR wells)**

Είναι μια νέα μέθοδος T.E. που διαδίδεται διεθνώς με γοργούς ρυθμούς. Οι γεωτρήσεις αυτές αποτελούν συνδυασμό γεωτρήσεων εμπλουτισμού και άντλησης. Χρησιμοποιούνται όπου υπάρχει διαθέσιμο πλεονάζον νερό, και αντλούνται όταν το νερό χρειάζεται. Οι ASR γεωτρήσεις τυπικά χρησιμοποιούνται με σκοπό την εποχιακή αποθήκευση πόσιμου νερού σε περιοχές όπου η ζήτηση νερού είναι μεγαλύτερη κατά την περίοδο του καλοκαιριού από εκείνη της περιόδου του χειμώνα ή το αντίστροφο. Το χειμερινό πλεόνασμα νερού, με τις ASR γεωτρήσεις, αποθηκεύεται υπόγεια και αντλείται κατά το καλοκαίρι (ή το αντίστροφο), αυξάνοντας έτσι τις ποσότητες πόσιμου νερού που παρέχουν οι εγκαταστάσεις επεξεργασίας πόσιμου νερού και συντελώντας στη μείωση του κόστους της λειτουργίας όλου του συστήματος, αφού μετά την άντληση, το νερό χρειάζεται απλώς μόνο χλωρίωση (Bouwer, 1995b).

### **Μέθοδος με πηγάδια στην ακόρεστη ζώνη (vadose - zone wells)**

Τα πηγάδια στην ακόρεστη ζώνη είναι πηγάδια που διατρέχουν την ακόρεστη ζώνη φτάνοντας σε βάθος 10-50 m και έχουν διάμετρο 1-2 m. Χρησιμοποιούνται για την απόθεση και διήθηση των απορροών των καταιγίδων σε περιοχές με σχετικά χαμηλές βροχοπτώσεις και χωρίς εγκαταστάσεις αποχέτευσης όμβριων νερών. Τα πηγάδια αυτά διανοίγονται σε περατούς σχηματισμούς, στην ακόρεστη ζώνη τους που αυτή μπορεί να διηθήσει τα νερά της βροχής με ικανοποιητικές ταχύτητες. Όπου το βάθος του υδροφόρου είναι μεγάλο (100-300 m), η εφαρμογή αυτού του τύπου των πηγαδιών είναι αρκετά πιο φτηνή από εκείνη των γεωτρήσεων εμπλουτισμού, και προτιμάται η πρώτη. Το κύριο πρόβλημα των πηγαδιών αυτών είναι η δημιουργία του φαινομένου clogging στα τοιχώματα του πηγαδιού, και η αδυναμία αποκατάστασης του προβλήματος σε αντίθεση με τις δυνατές διορθωτικές παρεμβάσεις που μπορούν να γίνουν στις τυπικές γεωτρήσεις εμπλουτισμού (άντληση ή εκ νέου ανάπτυξη). Παρόλα αυτά, η μέθοδος αυτή, όπως και η των τυπικών γεωτρήσεων εμπλουτισμού, είναι αρκετά πιο δαπανηρή από τις αντίστοιχες μεθόδους επιφανειακού εμπλουτισμού. Τέλος, ζώνες ακόρεστες που έχουν μολυνθεί πρέπει να αποκλείονται για την εφαρμογή της μεθόδου (Bouwer, 1995b).

### **3.3. Συνδυασμοί επιφανειακού και υπεδαφικού εμπλουτισμού (combination of surface - subsurface recharge)**

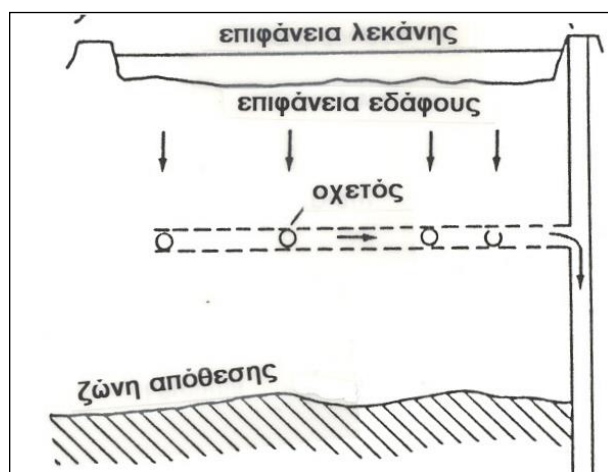
Σε ιδιαίτερες περιπτώσεις για την κάλυψη ειδικών αναγκών, μπορούν να χρησιμοποιηθούν μέθοδοι επιφανειακού εμπλουτισμού σε συνδυασμό με μεθόδους υπεδαφικού εμπλουτισμού συνδυάζοντας έτσι τα πλεονεκτήματα των πρώτων (ευκολία συντήρησης, μεγάλες επιφάνειες διήθησης, δυνατότητα αποθήκευσης νερού) με αυτά των δεύτερων (προσπέλαση σε βαθύτερους υδροφόρους και ελάχιστες απαιτήσεις σε γη).

### Συνδυασμός λεκάνης εμπλουτισμού και αποστραγγιστικού δικτύου (Basins with subsurface drainage collectors and wells)

Το δυναμικό εμπλουτισμού λεκανών εμπλουτισμού που βρίσκονται πάνω σε στρώματα υλικών σχετικά μεγάλου πάχους και μικρής υδραυλικής αγωγιμότητας, μπορεί να αυξηθεί σημαντικά με την τοποθέτηση υπόγειου συστήματος οριζόντιων σωλήνων συλλογής του νερού μεταξύ των λεκανών και των υποκειμένων στρωμάτων που προαναφέρθηκαν και διοχέτευσή του σε γεωτρήσεις που διαπερνούν τα στρώματα αυτά και εμπλουτίζουν έτσι βαθύτερους υδροφόρους (σχ. 3.18) (Bianchi et al., 1978).

### Συνδυασμός λεκανών και ορυγμάτων, εκσκαφών ή γεωτρήσεων (basins with pits, shafts, or wells)

Ο συνδυασμός αυτός επιτρέπει στις λεκάνες να αποθηκεύσουν νερό και στη συνέχεια στα ορύγματα, τις εκσκαφές ή τις γεωτρήσεις (3.19) να διανείμουν το νερό γρήγορα σε περισσότερο περατές ζώνες που υπόκεινται των περιοχών εμπλουτισμού (Aronson et al., 1974, Pettyjohn, 1968).

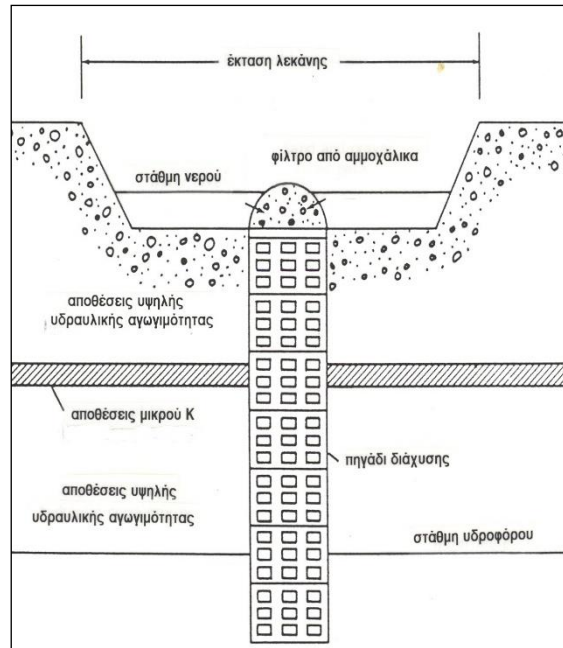


Σχήμα 3.18. Υπεδαφικό σύστημα συγκέντρωσης και αποστράγγισης του νερού, συνδεδεμένο με ένα πηγάδι εμπλουτισμού (Bianchi et al., 1978, Καλλέργης 1986).

### 3.4. Μέθοδοι έμμεσου εμπλουτισμού (indirect recharge)

Οι μέθοδοι αυτές περιλαμβάνουν τεχνικές: (i) άντλησης υδροφόρων με σκοπό την πρόκληση εμπλουτισμού από παρακείμενα επιφανειακά νερά που βρίσκονται σε άμεση υδραυλική επικοινωνία, (ii) διευθέτησης υδροφόρων ή δημιουργίας νέων υδροφόρων με σκοπό την ανανέωση ή δημιουργία αποθήκευσης υπόγειου νερού.

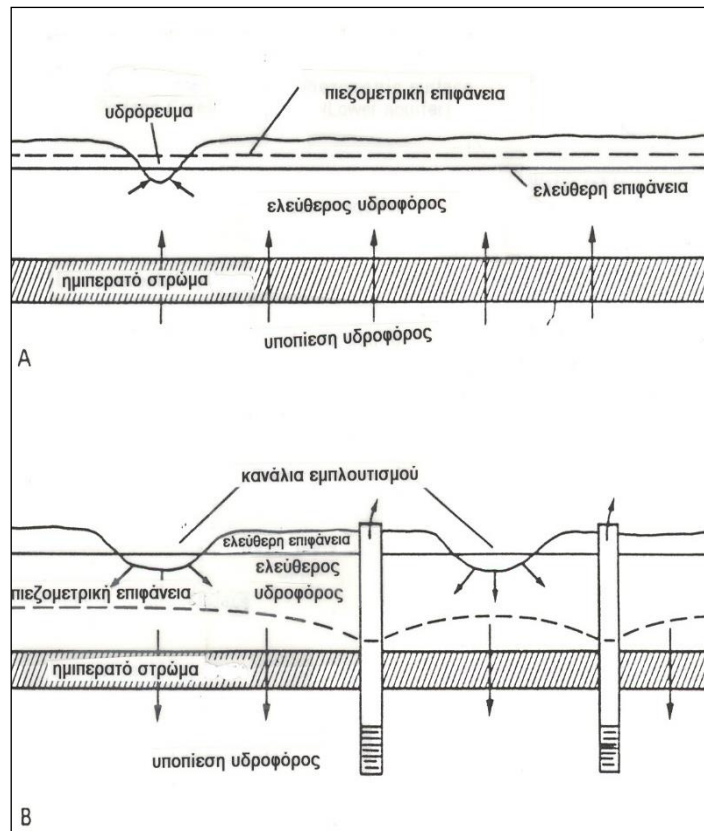




Σχήμα 3.19. Συνδυασμός λεκάνης και γεώτρησης εμπλουτισμού (Asano, 1985, Καλλέργης, 1986).

### Επαγωγικός εμπλουτισμός (induced surface water recharge)

Η διαδικασία αυτή του εμπλουτισμού δεν θεωρείται πάντα σαν μια αμιγής μέθοδος Τ.Ε. γιατί δεν οδηγεί τυπικά στην αύξηση της ποσότητας του υπόγειου νερού σε αποθήκευση, αλλά προκαλεί αύξηση του ρυθμού πτώσης της στάθμης ενός υδροφόρου (Buchan, 1964). Ο επαγωγικός εμπλουτισμός συμβαίνει με την άντληση υπόγειου νερού σε μια περιοχή που γειτνιάζει με ένα υδρόρρευμα ή μια λίμνη (σχ. 3.20). Η πτώση στάθμης στον υδροφόρο θα προκαλέσει μεγάλη υδραυλική κλίση από το επιφανειακό σώμα νερού προς τον υδροφόρο και έτσι αυξημένη ροή του νερού από το πρώτο προς το δεύτερο. Η μέθοδος είναι φθηνή και πολύ αποτελεσματική, ιδιαίτερα αν το σώμα επιφανειακού νερού είναι μια λίμνη ή υδρόρρευμα με συνεχή ροή, οπότε εξασφαλίζεται ένας συνεχής εμπλουτισμός, έστω και αν σε γειτονική περιοχή πραγματοποιούνται απολήψεις μεγαλύτερες από τη φυσική αναπλήρωση του υδροφόρου (Καλλέργης, 1986). Η ποσότητα του νερού που εισέρχεται με τη μέθοδο αυτή στον υδροφόρο, εξαρτάται από την ποσότητα και την εγγύτητα του επιφανειακού νερού, την υδραυλική αγωγιμότητα και τη μεταβιβασιμότητα του υδροφόρου, την έκταση και την περατότητα των υλικών της κοίτης του υδρορρέυματος ή του πυθμένα της λίμνης και την υδραυλική κλίση που δημιουργείται κατά την άντληση (Reed et al., 1966). Θα πρέπει η ταχύτητα ροής νερού στο υδρόρρευμα να είναι σημαντική, ώστε να αποφευχθεί η απόθεση ιλύος που θα προκαλέσει απόφραξη στους πόρους της κοίτης (Καλλέργης, 1986). Ο επαγωγικός εμπλουτισμός παρέχει νερό ελεύθερο οργανικών υλών και παθογόνων βακτηρίων (Kazmann, 1948, Klaer, 1953).



Σχήμα 3.20. Επαγωγικός εμπλουτισμός Α. Κατάσταση πριν την άντληση Β. Μετά την άντληση (Pettyjohn, 1981, Καλλέργης, 1986).

### Συμπτωματικός εμπλουτισμός (incidental recharge)

Ο εμπλουτισμός αυτός είναι αποτέλεσμα των δραστηριοτήτων του ανθρώπου, που δεν συνδέονται κατ' αρχήν με τον Τ.Ε. των υδροφόρων. Σ' αυτήν την κατηγορία ανήκει ο εμπλουτισμός που προέρχεται από το νερό της άρδευσης, των καταβόθρων, των σηπτικών δεξαμενών, των διαφόρων υπονόμων, αγωγών, καναλιών κ.λ.π. Έχει υπολογισθεί ότι το 30% του νερού της άρδευσης επιστρέφει στους ελεύθερους υδροφόρους. Συχνά όμως ο συμπτωματικός εμπλουτισμός προκαλεί προβλήματα ποιοτικής υποβάθμισης του υπόγειου νερού (μόλυνση-ρύπανση) (Καλλέργης, 1986).

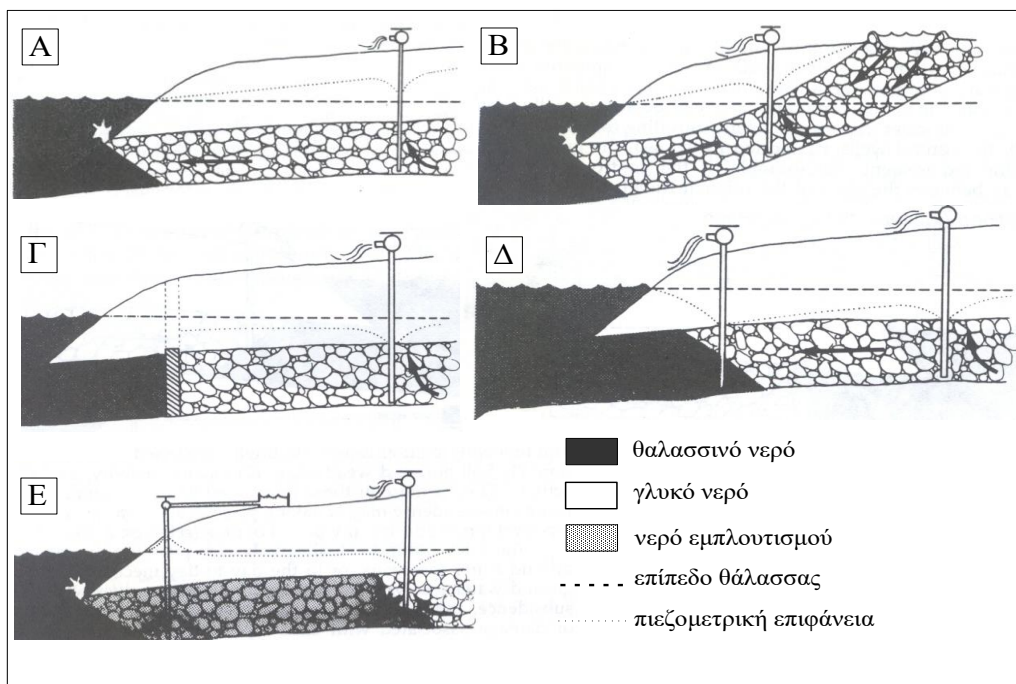
### Διευθέτηση υδροφορέων (Aquifer modification)

Οι υδροφόροι μπορεί να διευθετηθούν με διάφορες κατασκευές όπως υπόγεια διαφράγματα που παρεμποδίζουν τη διαροή τους, (Keller, 1933, Ratnoprarkhi, 1978, Pettyjohn, 1981), ή με τεχνικές που δημιουργούν επιπρόσθετη αποθηκευτική ικανότητα όπως με τη δημιουργία τεχνητών υδροφόρων μικρής κλίμακας (σχ. 3.21). Στην τελευταία περίπτωση, οι σημαντικοί παράγοντες που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη είναι: (i) η επιλογή καταλλήλων διαστάσεων λεκάνης αποστράγγισης, (ii) η μέριμνα για τη διατήρηση της ικανότητας αποθήκευσης στα επιθυμητά όρια, και (iii) η πρόληψη φαινομένων clogging (Helweg et al., 1978).

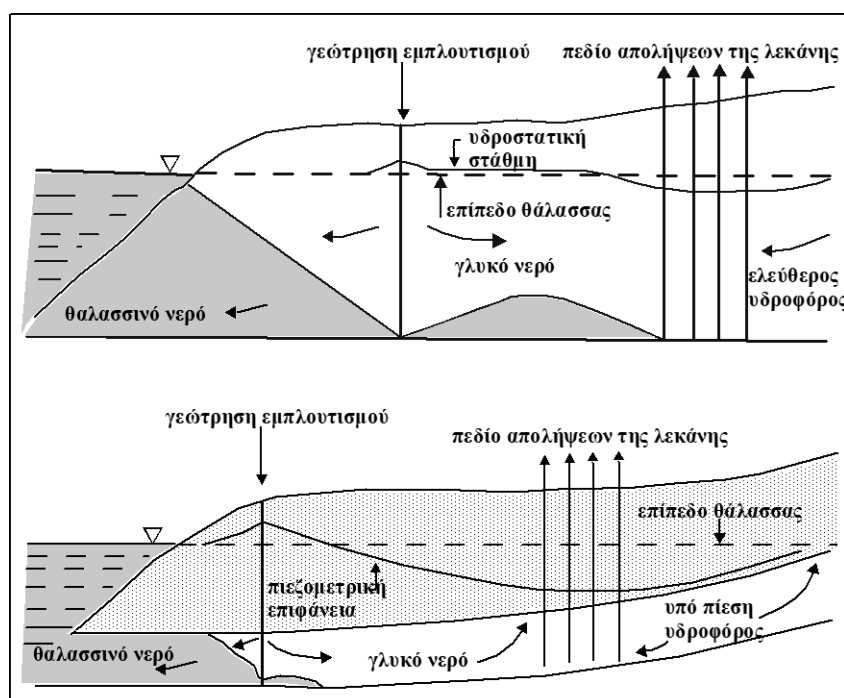


παρουσιάζονται κίνδυνος αύξησης της αλατότητας και υποχώρησης του εδάφους σε υπό πίεση συνθήκες, κατασκευαστικές δυσκολίες και οικονομικά προβλήματα), (ASCE, 1987), (σχ. 3.22-Γ).

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. 3.22-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. 3.22-Ε), 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 κατάκλισης ή γεωτρήσεις εμπλουτισμού ή συνδυασμό των δύο όπως υπαγορεύεται από τις επικρατούσες γεωλογικές συνθήκες (ASCE, 1987). 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 (σχ. 3.23). Σε υπό πίεση υδροφόρους η εφαρμογή της μεθόδου με γεωτρήσεις εμπλουτισμού αποδείχθηκε πολύ αποτελεσματική (Larson, et al., 1977).



Σχήμα 3.22. Μέθοδοι αντιμετώπισης της θαλάσσιας διείσδυσης σε υπό πίεση υδροφόρους με: (Α) ελεγχόμενες αντλήσεις, (Β) επιφανειακό τεχνητό εμπλουτισμό, (Γ) υπόγειο φυσικό φραγμό, (Δ) κοιλώμα άντλησης (rumping-trough), (Ε) συνδυασμό ελεγχόμενων αντλήσεων και γεωτρήσεων εμπλουτισμού (από ASCE, 1987).



Σχήμα 3.23. Δημιουργία υδραυλικού υβώματος από εμπλουτισμό με γεωτρήσεις σε ελεύθερο και υπό πίεση υδροφόρο.

### **3.6. Τεχνητός εμπλουτισμός με επεξεργασμένα αστικά υγρά απόβλητα**

(κύριες βιβλιογραφικές πηγές: Διαμαντής και Πλιάκας, 2004, Αγγελάκης κ.ά., 1999)

#### **Εισαγωγή**

Η επαναχρησιμοποίηση του νερού παρά τις αντιρρήσεις του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας (W.H.O), γίνεται όλο και περισσότερο σημαντική α) όπου η ζήτηση του νερού υπερβαίνει τις διαθέσιμες ποσότητες και β) στις περιπτώσεις όπου η ποιότητα των επιφανειακών νερών πρέπει να διατηρηθεί σε τέτοιο επίπεδο έτσι ώστε να προστατευθεί γενικότερα η δημόσια υγεία και ειδικότερα η υδρόβια ζωή των επιφανειακών νερών, και επομένως απαιτείται η μηδενική εισροή ρυπαντικών ουσιών.

Τα αστικά υγρά απόβλητα ή άλλα υγρά απόβλητα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για οποιοδήποτε σκοπό, υπό την προϋπόθεση ότι έχουν επεξεργασθεί και πληρούν τις απαιτούμενες προϋποθέσεις για την προβλεπόμενη χρήση. Εξαιτίας του κόστους επεξεργασίας και της δυνατότητας εφαρμογής από οικονομική πλευρά, τα επεξεργασμένα υγρά απόβλητα χρησιμοποιούνται κυρίως για άλλες χρήσεις, που δεν απαιτούν νερό υψηλής ποιότητας (περίπτωση πόσιμου), όπως τη βιομηχανία, την άρδευση και τον εμπλουτισμό υδροφορέων. Ωστόσο, επεξεργασμένα υγρά απόβλητα, είναι τεχνικά δυνατό μετά από κατάλληλη επεξεργασία, να χρησιμοποιηθούν ακόμη και ως πόσιμο νερό. Τέτοια τεχνολογία είναι σήμερα διαθέσιμη στις ανεπτυγμένες χώρες (Bouwer, 1996). Το σύστημα εμπλουτισμού υδροφορέων και ανάκτησης του νερού θεωρούνται ότι αποτελούν ένα σημαντικό τμήμα της όλης διαδικασίας για την επεξεργασία και επαναχρησιμοποίηση των υγρών αποβλήτων.

Οι κυριότερες χρήσεις των επεξεργασμένων υγρών οικιακών αποβλήτων είναι: (α) Άρδευση καλλιεργειών και φυτωρίων, (β) Άρδευση χώρων αναψυχής (πάρκων, γηπέδων, καλλωπιστικών χώρων κλπ.) (γ) Βιομηχανία (ψύξη μηχανών, τροφοδοσία λεβήτων κλπ.) (δ) Δημιουργία χώρων αναψυχής και προστασίας περιβάλλοντος

(αύξηση της ροής χειμάρρων, παγοδιάδρομοι, τεχνητές λίμνες κλπ.) (ε) μη-πόσιμες αστικές χρήσεις (πυρόσβεση, νερό για τουαλέτες κλπ.) και (στ) εμπλουτισμό υπόγειων υδροφορέων (Tchobanoglous and Angelakis, 1996).

Μετά από πρωτογενή και δευτερογενή επεξεργασία τους, τα αστικά λύματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για εμπλουτισμό των υπόγειων νερών, με την κατασκευή καταλλήλων λεκανών διήθησης ή με γεωτρήσεις εισαγωγής, οι οποίες όμως έχουν πολύ μεγαλύτερο κόστος από αυτό των λεκανών διήθησης. Το εδαφικό υλικό στην ακόρεστη ζώνη και στη συνέχεια τα υλικά του υδροφορέα επενεργούν σαν φυσικά φίλτρα που μπορούν να "καθαρίσουν" ή να επεξεργαστούν τα λύματα έτσι ώστε μετά την απόληψή του από τον υδροφόρο το "ανανεωμένο" πλέον νερό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να ικανοποιήσει σχεδόν όλες τις ανάγκες χρήσης μη πόσιμου νερού, που αναφέρθηκε προηγουμένως.

Η απαιτούμενη επεξεργασία των υγρών αποβλήτων που χρησιμοποιούνται για άρδευση είναι ελάχιστη για ελεγχόμενη άρδευση (Restricted irrigation), όπως η άρδευση των καλλιεργειών που δεν καταναλώνεται από τον άνθρωπο ή επεξεργάζονται πριν την κατανάλωση. Μη ελεγχόμενη άρδευση (Unrestricted irrigation), όπως η άρδευση των οπωροφόρων και των κηπευτικών που καταναλώνονται νωπά, απαιτεί πιο προωθημένη επεξεργασία των αποβλήτων. Σύμφωνα με τα standards για την ποιότητα του νερού της Παγκόσμιας Οργάνωσης Υγείας (WHO) η συγκέντρωση των κοπρωδών κολοβακτηριδίων δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 1.000/100 ml και η συγκέντρωση των αυγών από νηματώδεις να είναι  $\leq 1$  ανα λίτρο νερού (Bouwer, 1993). Πολλά κράτη όπως οι ΗΠΑ, το Ισραήλ και η Ν. Αφρική έχουν θεσπίσει κριτήρια ακόμη πιο αυστηρά, βασιζόμενα κυρίως στην συγκέντρωση σε ολικά κολοβακτηρίδια. Για την απόληψη πόσιμου νερού απαιτείται επιπρόσθετη επεξεργασία (Bouwer, 1993).

Τα συστήματα αυτού του εμπλουτισμού μπορεί να σχεδιαστούν και να λειτουργούν σαν "συστήματα φυσικής επεξεργασίας μέσω του εδάφους-υδροφορέα", "Soil-Aquifer Treatment Systems" (SAT Systems) με πλήρη ανάκτηση του νερού μέσα από κατάλληλα τοποθετημένες γεωτρήσεις ή αγωγούς αποστράγγισης (Bouwer, 1993). Τέτοιου είδους συστήματα μπορούν επίσης να εξασφαλίσουν την αποθήκευση νερού στους υδροφόρους για βραχυπρόθεσμες ή μακροχρόνιες περιόδους.

Τα SAT συστήματα είναι σχετικά απλά στην κατασκευή τους και τη λειτουργία τους, ανθεκτικά στο χρόνο και μικρού κόστους. Από τη στιγμή που το νερό απολαμβάνεται από γεώτρηση μετά τη διαδικασία SAT και όχι από κάποια εγκατάσταση τριτογενούς ή προηγμένης επεξεργασίας λυμάτων, οι άνθρωποι το αντιμετωπίζουν σαν υπόγειο υδάτινο πόρο παρά σαν προϊόν επεξεργασίας λυμάτων. Αυτό αποτελεί ένα αισθητικό και ψυχολογικό πλεονέκτημα και βοηθάει στην αποδοχή του κοινού της επαναχρησιμοποίησης αυτών των νερών.

Σήμερα, η επαναχρησιμοποίηση και η ανακύκλωση αποτελούν τις βασικές μορφές της διαχείρισης των διαφόρων πόρων, και το νερό δεν μπορεί να εξαιρεθεί από αυτή τη διαπίστωση. Σε περιοχές που παρουσιάζεται έλλειψη νερού, η σχεδιασμένη επαναχρησιμοποίηση νερού μπορεί να βοηθήσει στην παροχή επαρκούς ανανεωμένου νερού, που πρέπει η ποσότητά του να κυμαίνεται τουλάχιστον στο επίπεδο των 2.000m<sup>3</sup> ανά άτομο το χρόνο για να ικανοποιεί επαρκώς τις ανάγκες μιας άνετης διαβίωσης (Postel, 1992).

Η χρησιμοποίηση των επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων για τον τεχνητό εμπλουτισμό των υδροφορέων οδηγεί σε δύο κύρια οφέλη: (α) Βελτιώνει την ποιότητα του νερού και προστατεύει την ποιότητα του από την μόλυνση και (β) ελέγχει την εξάντληση σε υπερ-αντλούμενους υδροφορείς. Ένα επιπλέον όφελος αυτής της πρακτικής είναι το χαμηλό κόστος σε σύγκριση με τις άλλες συνήθως χρησιμοποιούμενες τεχνολογίες. Επομένως η μέθοδος SAT μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την προστασία των επιφανειακών νερών, π.χ. ποταμών, υδρορευμάτων, λιμνών και της θάλασσας από τη ρύπανση ή τη μόλυνση από τη διάθεση ή εκφόρτωση των αστικών λυμάτων σε αυτά (Bouwer, 1985b).

Όπου χρησιμοποιούνται υγρά απόβλητα για εφαρμογή τεχνητού εμπλουτισμού μέσα από γεωτρήσεις, αυτά, πρέπει να υπόκεινται σε εκτενή και σοβαρή επεξεργασία, που περιλαμβάνει τον καταρχήν καθαρισμό του νερού μέχρις ότου φθάσει η ποιότητά του τα στοιχειώδη κριτήρια ποιότητας πόσιμου νερού και στη συνέχεια σε προηγμένες διαδικασίες καθαρισμού (Advanced Wastewater Treatment - AWT) (Bouwer, 1995b). Η χρήση υγρών αποβλήτων για εμπλουτισμό με γεωτρήσεις περιορίζεται μόνον σε περιπτώσεις που πρόκειται να αντιμετωπισθούν ειδικά προβλήματα, όπως η καθίζηση του εδάφους, η διείσδυση θαλασσινού νερού κλπ. Η δαπάνη επεξεργασίας των αποβλήτων είναι αρκετά υψηλή, προκειμένου να φθάσει η ποιότητά τους τα επιτρεπόμενα όρια ποιότητας χρήσης νερού εμπλουτισμού με τη μέθοδο αυτή (Baier et al., 1971, Schicht, 1971).

### **Συστήματα SAT (Soil-Aquifer Treatment Systems)**

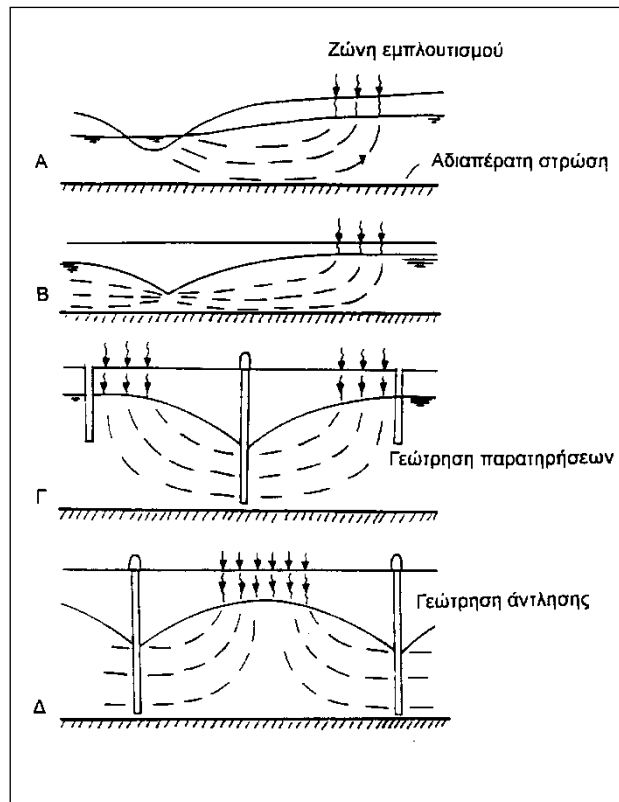
Οι υπόγειοι υδροφορείς έχουν φυσικούς μηχανισμούς για επεξεργασία, αποθήκευση και διακίνηση των επεξεργασμένων αποβλήτων. Όταν η εφαρμογή του αποβλήτου γίνεται με το σύστημα SAT η βελτίωση της ποιότητας του νερού επιτυγχάνεται καθώς το νερό κινείται αρχικά προς τα κάτω δια μέσου της ακόρεστης ζώνης (vadose) του υδροφορέα προς τα υδρομαστευτικά έργα (Bouwer, 1993). Όταν το έδαφος είναι κατάλληλο, με την διαδικασία της διήθησης απομακρύνονται όλα τα στερεά, BOD και οι μικροοργανισμοί, η πλειονότητα των μετα-φωσφορικών και σημαντική ποσότητα αζώτου. Η διαδικασία απομάκρυνσης του αζώτου και των μικροοργανισμών είναι ανανεώσιμες και να εφαρμόζονται διηλεκώς, ενώ άλλα συστατικά, όπως τα μέταλλα και τα φωσφορικά, μπορεί να συγκεντρώνονται στο έδαφος και στην ακόρεστη ζώνη. Ωστόσο, ο ρυθμός συγκέντρωσης είναι μάλλον αργός και ίσως να απαιτούνται δεκαετίες ή και αιώνες για να επηρεάσουν το πορώδες και την υδραυλική αγωγιμότητα του εδάφους και επομένως την ικανότητα διήθησης της ακόρεστης ζώνης. Για αυτούς του λόγους τα συστήματα SAT έχουν συνήθως μακρά διάρκεια ζωής (Bouwer, 1991).

Οι λεκάνες διήθησης πληρούνται διακεκομμένα και καθαρίζονται περιοδικά. Ο ρυθμός διήθησης είναι τυπικά μερικά δέκατα του μέτρου ανά ημέρα κατά την διάρκεια της κατάκλισης, και σε ετήσια βάση ο μέσος ρυθμός διήθησης είναι περίπου 50-100 m<sup>3</sup> ανά έτος. Με αυτό τον ρυθμό διήθησης, μια λεκάνη διήθησης έκτασης ενός εκταρίου μπορεί να διηθήσει από 0,5 έως 1,0 Mm<sup>3</sup>/έτος (Bouwer, 1993).

Τα συστήματα SAT σχεδιάζονται και διαχειρίζονται έτσι ώστε ολόκληρη η ποσότητα του νερού που διηθείται σαν απόβλητο να ανακτάται με άντληση από γεωτρήσεις, μέσω στράγγισης ή μέσω διείσδυσης σε επιφανειακά νερά. Ένα τυπικό σχήμα συστήματος SAT και ανάκτησης του νερού φαίνεται στο σχήμα 3.24.

Όπως αναφέρθηκε προηγούμενα οι κυριότερες μέθοδοι τεχνητού εμπλουτισμού είναι η επιφανειακή διήθηση μέσω λεκανών και η απευθείας εισαγωγή μέσω γεώτρησης. Η απευθείας εισαγωγή απαιτεί υψηλή ποιότητα επεξεργασμένων αποβλήτων, επειδή είναι αδύνατη η φυσική διήθηση μέσω της ακόρεστης ζώνης.

Η λειτουργία ενός συστήματος SAT εξαρτάται από την περιοχή εφαρμογής και έχει σχέση με την ποιότητα που αποβλήτου, το έδαφος, την υδρογεωλογία και το κλίμα. Γι' αυτό σε περιοχές στις οποίες δεν έχει εφαρμοσθεί ποτέ ένα σύστημα SAT, είναι αναγκαία η εγκατάσταση πιλοτικών ή πειραματικών μονάδων πριν την εγκατάσταση των μονάδων ευρείας εφαρμογής, για να αξιολογηθεί η δυνατότητα εφαρμογής και να σχεδιαστεί το σύστημα SAT για optimum λειτουργία. Πολύ προσοχή πρέπει να δοθεί στο σωστό σχεδιασμό και λειτουργία του συστήματος επεξεργασίας των αποβλήτων.



Σχήμα 3.24. Σχηματική παράσταση συστήματος SAT με φυσική ανάκτηση του νερού σε χειμάρρο ή άλλο υδατόρεμα, λίμνη ή υδρολεκάνη χαμηλότερου υψομέτρου (Α), συλλογή του νερού με υπόγεια στράγγιση (Β), άντληση μέσω κεντρικού φρέατος (Γ) άντληση μέσω περιφερειακών φρεάτων (Bouwer, 1991).

Όταν τα συστήματα διήθησης SAT δεν είναι δυνατό να εφαρμοστούν επειδή τα επιφανειακά εδάφη δεν είναι κατάλληλα ή δεν υπάρχουν, ή υπάρχουν άλλοι περιοριστικοί παράγοντες στην ακόρεστη ζώνη ή στον υδροφορέα, ο εμπλουτισμός του υδροφορέα μπορεί να γίνει με εισαγωγή των επεξεργασμένων αποβλήτων μέσω γεωτρήσεων εισαγωγής. Ωστόσο, αν τα υλικά του υδροφορέα είναι σχετικά χονδρόκοκκα, τα οφέλη από την εφαρμογή της μεθόδου είναι μικρότερα από αυτά της μεθόδου των λεκανών διήθησης. Επιπλέον, για να προληφθούν οι αποφράξεις της ενδιάμεσης φάσης του υδροφορέα γύρω από τις γεωτρήσεις εισαγωγής, τα επεξεργασμένα απόβλητα θα πρέπει να έχουν υποστεί τέτοια επεξεργασία, ώστε να απομακρυνθούν όλα τα διαλυτά στερεά, ο οργανικός άνθρακας, τα θρεπτικά στοιχεία και οι μικροοργανισμοί. Μια ελάχιστη περιεκτικότητα χλωρίου είναι επίσης αναγκαία για να ελαχιστοποιήσει το βιολογικό φράξιμο των γεωτρήσεων εισαγωγής και του υδροφορέα. Γι' αυτό τα επεξεργασμένα απόβλητα που θα χρησιμοποιηθούν για εμπλουτισμό υδροφορέων δια μέσου γεωτρήσεων εισαγωγής θα πρέπει να πληρούν τα standards του πόσιμου νερού πριν την εισαγωγή τους. Επιπλέον, στις γεωτρήσεις εισαγωγής θα πρέπει να διενεργούνται περιοδικά αντλήσεις. Γι' αυτούς τους λόγους, ο εμπλουτισμός δια μέσου γεωτρήσεων εισαγωγής είναι πολύ πιο δαπανηρός από την εφαρμογή των συστημάτων SAT με λεκάνες διήθησης (Bouwer, 1993).

Οι δυνατές επιπτώσεις στην υγεία που μπορεί να έχει η χρήση των επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων που χρησιμοποιούνται για εμπλουτισμό των υπόγειων υδροφορέων, αξιολογήθηκαν σε μια έρευνα που έγινε στην Καλιφόρνια των ΗΠΑ τη δεκαετία του 80 με σκοπό να αναπτυχθούν κριτήρια για την επεξεργασία των αποβλήτων όταν χρησιμοποιούνται για εμπλουτισμό των υδροφορέων. Η έρευνα περιελάμβανε την ποιότητα του νερού, την διήθηση, την ύπαρξη δεδομένων από την έκθεση του πληθυσμού και την επιδημιολογία. Το κυριότερο συμπέρασμα από την



έρευνα ήταν ότι δεν αναφέρθηκαν μετρούμενες αρνητικές επιπτώσεις στα υπόγεια νερά ή στην υγεία του πληθυσμού, από την εφαρμογή επεξεργασμένων αποβλήτων για εμπλουτισμό (Asano and Levine, 1996).

Με βάση τα αποτελέσματα της έρευνας των επιδράσεων στην υγεία, έχει προταθεί για την Καλιφόρνια (ΗΠΑ) κανονισμός για την επαναχρησιμοποίηση των επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων ειδικά για εμπλουτισμό των υδροφορέων (Αγγελάκης κ.α. 1996). Ο προτεινόμενος κανονισμός αντιμετωπίζει το θέμα με βάση τις βραχυχρόνιες αλλά και τις μακροχρόνιες επιπτώσεις στην υγεία. Λεπτομερής αναφορά δίδεται σε μια σειρά αντικειμένων, όπως: (α) έλεγχος της πηγής, (β) διαδικασία επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων (γ) τα standards της μεθόδου επεξεργασίας (δ) τη μέθοδο εμπλουτισμού (ε) την περιοχή εμπλουτισμού (στ) την απόσταση διάνοιξης γεωτρήσεων και (ζ) τα φρεάτια ελέγχου ποιότητας. Ο κανονισμός καθορίζει ένα σύνολο συνθηκών που απαιτούνται για ένα αποδεκτό σχέδιο τεχνητού εμπλουτισμού με επεξεργασμένα υγρά απόβλητα. Το βασικό στοιχείο που κυριαρχεί στην εφαρμογή του εμπλουτισμού των υδροφορέων με επεξεργασμένα υγρά απόβλητα είναι οι πιθανές αρνητικές επιδράσεις στην υγεία από εισαγωγή παθογόνων ή ιχνοστοιχείων ή τοξικών στοιχείων στα υπόγεια νερά τα οποία καταναλώνονται ως πόσιμα από το κοινό (Asano and Levine, 1996).

Το έδαφος και τα χαρακτηριστικά του υδροφορέα είναι οι κυριότεροι παράγοντες που επηρεάζουν την επιβίωση των παθογόνων. Γι' αυτό η εκλογή της θέσης εφαρμογής ενός συστήματος SAT θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη ορισμένες συνθήκες κατάλληλες για το έδαφος και τον υδροφορέα.

### **Εδαφικές απαιτήσεις εφαρμογής του συστήματος SAT**

Τα συστήματα εμπλουτισμού απαιτούν διαπερατά εδάφη με υψηλή διηθητικότητα, ακόρεστη ζώνη χωρίς περιοριστικές στρώσεις ή άλλα προβλήματα, όπως ρυπασμένες ζώνες ή με ανεπιθύμητες χημικές ουσίες που είναι δυνατόν να υποστούν έκπλυση. Ο υδροφορέας πρέπει να είναι απεριόριστος με καλή ποιότητα νερού στην ανώτερη στάθμη. Μια ιδανική επιφάνεια εδάφους είναι ομοιόμορφη, με χονδρόκοκκο δομή ώστε να έχει υψηλή διηθητικότητα αλλά και με λεπτόκοκκα συστατικά για να έχει ικανοποιητική φίλτραση. Τιμές διηθητικότητας από 25 mm/h ή υψηλότερες είναι αναγκαίες για ταχεία διήθηση. Γι' αυτό επιφανειακά εδάφη από αμμώδη πηλό, πηλό ή λεπτόκοκκο άμμο και χαλίκια είναι προτιμότερα για τα συστήματα SAT. Πολύ χονδρόκοκκος άμμος και χαλίκια δεν είναι κατάλληλα, διότι επιτρέπουν τα απόβλητα να διέρχονται πολύ γρήγορα από το επιφανειακό στρώμα του εδάφους, στο οποίο υπάρχει η κύρια βιολογική και χημική δραστηριότητα. Ομοιόμορφα εδάφη με βάθος πάνω από 3 m είναι τα πλέον κατάλληλα (Reed et al., 1995). Οριζόντια ή υπο-οριζόντια εδάφη είναι επιθυμητά για χρήση στις λεκάνες διήθησης, διότι ανασκαφές-επιχώσεις μπορεί να επηρεάσουν αντίστροφα την διηθητικότητα του επιφανειακού εδάφους (συνιστάται η κλίση να είναι μικρότερη του 5%).

Η επιβεβαίωση εδαφικών παραμέτρων και κυρίως της διηθητικότητας στην υπό σχεδιασμό θέση με επιτόπιες μετρήσεις είναι υποχρεωτικά για τον ορθό σχεδιασμό των συστημάτων SAT. Για να είναι δυνατός ο έλεγχος του επεξεργασμένου αποβλήτου μετά την επιφανειακή διήθηση και διείσδυση δια μέσου του μητρικού εδάφους, η σύσταση του υπεδάφους και τα χαρακτηριστικά του υδροφορέα πρέπει να είναι γνωστά. Η γνώση των μηχανισμών κυκλοφορίας του νερού στο εδαφικό προφίλ και στον υδροφορέα είναι αναγκαία πριν από το σχεδιασμό του συστήματος διήθησης (Reed et al., 1995).

### **Επεξεργασία των αποβλήτων προ της εφαρμογής για εμπλουτισμό**

Αφού έχουν καθορισθεί οι απαιτήσεις της επεξεργασίας και η ικανότητα του συστήματος SAT θα πρέπει να επιλεγεί το επίπεδο της προ-επεξεργασίας, το οποίο ποικίλλει ανάλογα με το σκοπό του εμπλουτισμού, τη μέθοδο, τη τοποθεσία του έργου

και τη χρήση του ανακτούμενου νερού. Για αστικά απόβλητα, το κατάλληλο επίπεδο προ-επεξεργασίας είναι τυπικά η αρχική καθίζηση των στερεών. Σε ισοδύναμο επίπεδο απομάκρυνση του συνόλου των διαλυτών στερεών (TDS) μπορεί να επιτευχθεί με βραδεία παραμονή του αποβλήτου σε δεξαμενή καθίζησης. Τα πλεονεκτήματα της δεξαμενής είναι στην εξοικονόμηση στο χειρισμό των βιο-στερεών, την επεξεργασία και τη διάθεση τους. Μακράς διάρκειας παραμονή δεν είναι γενικά κατάλληλη σαν προ-επεξεργασία για συστήματα λεκανών SAT. Τα παραγόμενα άλγη στις δεξαμενές οξειδωσης θα μειώσουν σημαντικά το ρυθμό διήθησης. Η βιολογική επεξεργασία μπορεί να είναι οικονομικά εφικτή προ της μονάδας SAT σε αστικές εγκαταστάσεις (Reed et al., 1995). Στον Πίνακα 3.1 απεικονίζεται η ποιότητα του αποβλήτου πριν και μετά τον εμπλουτισμό με το σύστημα SAT.

Πίνακας 3.1. Χαρακτηριστικά ποιότητας αποβλήτου που ελήφθη από σύστημα SAT στο Salt River Floodplain West of Phoenix, Arizona, ΗΠΑ (Bouwer, 1993).

Παράμετρος	Απόβλητα δευτερογενούς επεξεργασίας (mg/l)	Νερά από άντληση του εμπλουτισμένου με SAT υδροφορέα (mg/l)
Ολικά διαλυτά στερεά	750	790
Αιωρούμενα στερεά	11	1
Αμμωνιακό άζωτο (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -H)	16	0,1
Νιτρικό άζωτο (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N)	0,5	5,3
Οργανικό άζωτο (-N)	1,5	0,1
Φωσφορικός φώσφορος (P)	5,5	0,4
Φθόριο (F)	1,2	0,7
Βόριο (B)	0,6	0,6
BOD	12	0
Ολικός οργανικός άνθρακας (TOC)	12	1,9
Ψευδάργυρος (Zn)	0,19	0,03
Χαλκός (Cu)	0,12	0,016
Κάδμιο (Kd)	0,008	0,007
Μόλυβδος (Pb)	0,082	0,066
Κοπρώδη κολοβακτηρίδια / 100 ml	3500	0,3
Ιοί, PFU/100 l	2118	0

### Σημαντικά σχετικά παραδείγματα

- ☑ Water Factory στην Πολιτεία της Καλιφόρνια των ΗΠΑ. Κατασκευάστηκαν 23 γεωτρήσεις σε έκταση 5,6 km (μέση απόσταση μεταξύ τους 183 m με δυναμικότητα 1,7 m<sup>3</sup>/m η καθεμία.
- ☑ Montebello Forebay στην Καλιφόρνια των ΗΠΑ. Σε λεκάνες διήθησης έχουν έκταση 2.635 στρέμματα, μέσο βάθος 1,2 m εφαρμόζονται 35-40 Mm<sup>3</sup>/έτος.
- ☑ Phoenix, στην Αριζόνα των ΗΠΑ. Οι λεκάνες έχουν έκταση 10,6 στρέμματα και δυναμικότητα 1 Mm<sup>3</sup>/έτος. Το υδραυλικό φορτίο είναι 100 m/έτος. Σε έκταση λεκανών 167,6 στρέμματα, μπορούν να εφαρμοσθούν περίπου 15 Mm<sup>3</sup>/έτος.
- ☑ El Paso, στο Texas των ΗΠΑ. Το υδραυλικό φορτίο είναι 13.815 Mm<sup>3</sup>/έτος και τροφοδοτείται σε 10 γεωτρήσεις εμπλουτισμού, δηλ. 1,38 Mm<sup>3</sup>/έτος σε κάθε γεώτρηση. Το κόστος του εμπλουτισμού είναι \$ 1,88 για κάθε 3.7785 m<sup>3</sup> ή \$ 0,5 ανά m<sup>3</sup> εκρών.
- ☑ Long Island, στη New York των ΗΠΑ. Το υδραυλικό φορτίο είναι 84 Mm<sup>3</sup>/έτος που εφαρμόζεται σε λεκάνες διήθησης έκτασης 12.893 στρεμμάτων ή 6.515 m<sup>3</sup>/στρ. το έτος. Χρησιμοποιούνται 2.124 λεκάνες διήθησης από 4 έως 8 στρέμματα η κάθε μία και μέσο βάθος 3,1 - 4,6 m.
- ☑ Orlando, στη Florida των ΗΠΑ. Χρησιμοποιούνται 310 γεωτρήσεις στράγγισης σε έκταση 320 km<sup>2</sup> διαμέτρου 10-16 m και βάθους 37-320 m. Το 50% του

εφαρμοζόμενου υδραυλικού φορτίου χρησιμοποιείται για εμπλουτισμό από νερά πλημμυρικά, 45% από νερά εκχύλισης λιμνών ή βιοτόπων και το 5% από επεξεργασμένα υγρά απόβλητα. Η συνολική ποσότητα εφαρμογής είναι 0,1 Mm<sup>3</sup>/ημέρα, δηλ. περίπου 35 Mm<sup>3</sup>/έτος δευτεροβάθμιας επεξεργασίας.

- ☒ Dan Region, του Tel Aviv (στο Ισραήλ). Το έργο εμπλουτισμού είναι σε δύο θέσεις: (α) 4 λεκάνες διήθησης έκτασης 390 στρ. και ακόρεστη ζώνη 27-36 m, και (β) 3 λεκάνες έκτασης 180 στρέμματα. Το κόστος λειτουργίας και συντήρησης του έργου είναι \$ 0,03 ανά m<sup>3</sup>.

Στη συνέχεια δίνονται αναλυτικά ορισμένα στοιχεία από το έργο του Tel Aviv.

Ένα σημαντικό μέρος των ποσοτήτων των υγρών αποβλήτων του Tel Aviv υφίστανται περαιτέρω καθαρισμό μέσω της διάθεσής του για τεχνητό εμπλουτισμό υπόγειων υδροφορέων δια μέσου συστήματος λεκανών διήθησης. Ο καθαρισμός αυτός επιτυγχάνεται με τις εξής διαδικασίες: αργό φιλτράρισμα από άμμο, χημική κατακρήμνιση, προσρόφηση, ιοντοανταλλαγή, βιολογική αποικοδόμιση, νιτροποίηση και απονιτροποίηση.

Τα εμπλουτιζόμενο νερό αντλείται από περίπου 100 περιφερειακές γεωτρήσεις. Η ποιότητα των νερών που στη συνέχεια χρησιμοποιείται είναι κατάλληλη για οποιαδήποτε αρδευτική χρήση, χωρίς κανένα πρόβλημα και περιορισμό.

Τα βιολογικώς επεξεργασμένα απόβλητα διοχετεύονται στις λεκάνες διήθησης, οι οποίες λειτουργούν μια ημέρα και αφήνονται για ξήρανση 2-4 ημέρες. Το 1997 διοχετεύτηκαν για τεχνητό εμπλουτισμό 103×10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> επεξεργασμένα απόβλητα, από το 1977 όπου λειτουργεί το έργο, έχουν διοχετευτεί στον υπόγειο υδροφόρο 851×10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> επεξεργασμένου νερού.

Η περιοχή του Dan Region που λειτουργεί το έργο (βιολογικός καθαρισμός και λεκάνες διήθησης) αποτελεί ένα μικρό τμήμα τοπικού υδροφορέα και είναι σε απόσταση 4 Km από τις ακτές της Μεσογείου. Στην περιοχή αυτή δεν υπάρχουν υδροληπτικά έργα ύδρευσης.

Το έδαφος που αποτελεί τον πυθμένα των λεκανών διήθησης συνίσταται από ομοιόμορφη λεπτή άμμο θινών με παρεμβολές ψαμμιτών. Τα επεξεργασμένα απόβλητα διεισδύουν στο υπέδαφος και διαπερνούν την ακόρεστη ζώνη που έχει πάχος 15-43 m, για να φθάσουν στον υδροφόρο ορίζοντα.

Σε μια ακτίνα 300-1500 m από τις λεκάνες διήθησης έχουν κατασκευαστεί 100 παραγωγικές γεωτρήσεις βάθους 100-120 m, από τις οποίες αντλείται ο εμπλουτιζόμενος υδροφόρος. Το αντλούμενο νερό μεταφέρεται σε άνυδρη περιοχή, στα νότια, με αγωγό 87 Km όπου χρησιμοποιείται χωρίς περιορισμούς για όλες τις αρδεύσεις.

Η βελτίωση της ποιότητας των νερών πραγματοποιείται, με τις διαδικασίες που προαναφέρθηκαν, κατά την ροή τους τόσο μέσα στην ακόρεστη ζώνη όσο και μέσα στον υδροφόρο. Ο χρόνος παραμονής του νερού στο υπέδαφος από τη στιγμή που διηθείται από τις λεκάνες μέχρι την άντλησή του από τις γεωτρήσεις είναι 100-300 ημέρες. Μεταξύ των λεκανών διήθησης και των παραγωγικών γεωτρήσεων, έχουν τοποθετηθεί γεωτρήσεις παρατήρησης σε μια ακτίνα 30-800 m από τις λεκάνες, με τις οποίες ελέγχεται η ποιότητα και η διεύθυνση ροής των υπόγειων νερών. Η βελτίωση της ποιότητας μέσω του τεχνητού εμπλουτισμού των επεξεργασμένων αποβλήτων φαίνεται στον Πίνακα 3.2.

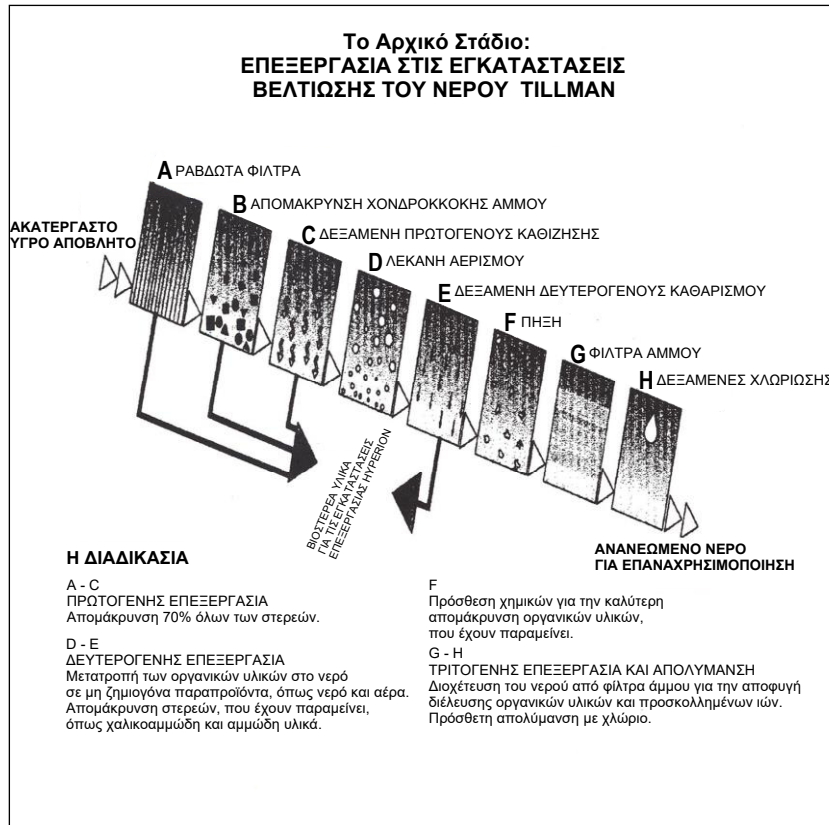
Πίνακας 3.2. Χαρακτηριστικά ποιότητας αποβλήτου που ελήφθη από σύστημα SAT στο Dan Region, του Tel Aviv.

Παράμετρος	Απόβλητα δευτερογενούς επεξεργασίας (mg/l)	Νερά από άντληση του εμπλουτισμένου υδροφορέα (mg/l)
Suspended Solids (105°),mg/l	8	0
BOD, mg/l	6	<5
COD, mg/l	53	6
COD (filtered), mg/l	42	6
Ammonia (filtered)-N, mg/l	7.3	0.07
Total N, mg/l	10.8	3.19
Phosphorus, mg/l	2.7	0.02
Total Bacteria, no/ml	290.300	4.430
Coliforms,MPN/100 ml	220.300	0
Fecal Coliforms, log conc.	19.500	0
Chloride, mg/l	289	266
Chromium, µg/l	7	<3
Boron, mg/l	0.55	0.54

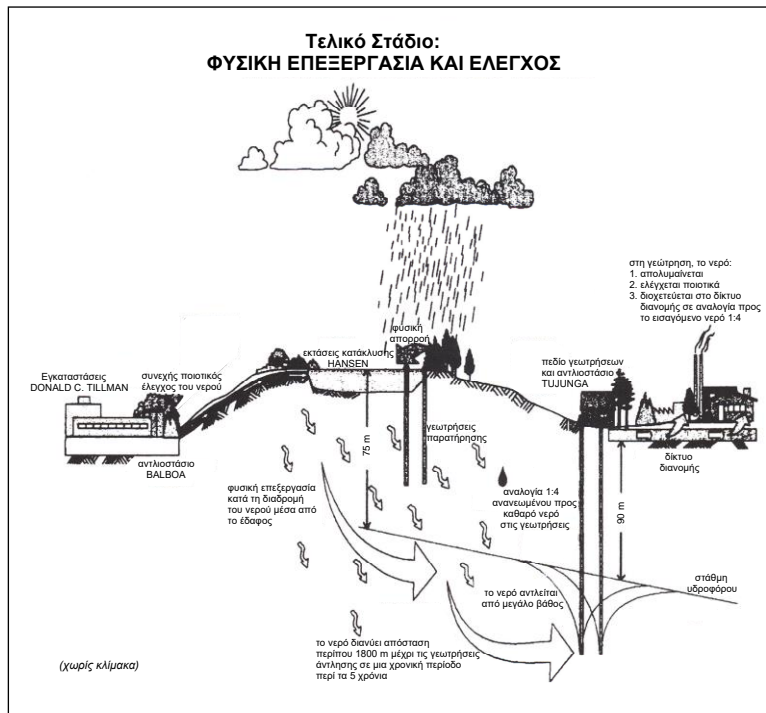
### Ο ρόλος του τεχνητού εμπλουτισμού στην επαναχρησιμοποίηση του νερού

Η σχεδιασμένη επαναχρησιμοποίηση του νερού αναμένεται να γίνει εξαιρετικά σημαντική, όχι μόνο σε περιοχές με έλλειψη νερού, όπου οι εκπομπές των υγρών αστικών αποβλήτων (sewage effluent) αποτελούν σημαντικό υδατικό πόρο αλλά και σε περιοχές όπου χείμαρροι ή άλλα επιφανειακά νερά (συμπεριλαμβανομένου και του θαλασσινού νερού σε παραλίες) πρέπει να προστατευτούν (Bouwer, 1993, 2000a) (σχ. 3.25, 3.26). Η επεξεργασία των αστικών λυμάτων για σχεδιασμένη επαναχρησιμοποίηση νερού είναι συχνά φθηνότερη από την επεξεργασία του απαιτούμενου επιφανειακού νερού που πρέπει να εκφορτιστεί για την προστασία των χρηστών του νερού των περιοχών κοντά και κατάντη χειμάρρων από ανεπιθύμητη ρύπανση. Η σχεδιασμένη επαναχρησιμοποίηση του νερού απαιτεί επεξεργασία της εκροής τέτοια ώστε να ικανοποιεί τις προδιαγραφές ποιότητας που απαιτούνται για την επαναχρησιμοποίηση.

Εξαιτίας του κόστους της επεξεργασίας, της οικονομικής σκοπιμότητας και του θέματος της αισθητικής, η εκροή του επεξεργασμένου λύματος συνήθως χρησιμοποιείται για την κάλυψη αναγκών σε μη πόσιμο νερό, όπως ή αγροτική και αστική άρδευση (γήπεδα του γκολφ και άλλων αθλημάτων, λίμνες αναψυχής και ανάπλασης), βιομηχανικές ανάγκες, τομέας κατασκευών, έλεγχος σκόνης, πυροπροστασία, καθαρισμός τουαλετών (κυρίως σε εμπορικά κτίρια αλλά επίσης όλο και περισσότερο και σε σπίτια ιδιωτών) και για περιβαλλοντικούς σκοπούς. Μη προσχεδιασμένη ή συμπτωματική χρήση της εκροής λυμάτων για πόση ή για δημόσια διάθεση νερού συμβαίνει παντού στον κόσμο καθώς υπάρχουν δήμοι, που μοιράζονται τους ίδιους ποταμούς για απόληψη πόσιμου νερού και για απόρριψη λυμάτων (Crook et al., 1999).



Σχήμα 3.25. Στάδια επεξεργασίας σε εγκατάσταση βελτίωσης νερού (ASCE, 2001).



Σχήμα 3.26. Σύστημα εμπλουτισμού με υγρά απόβλητα (ASCE, 2001).

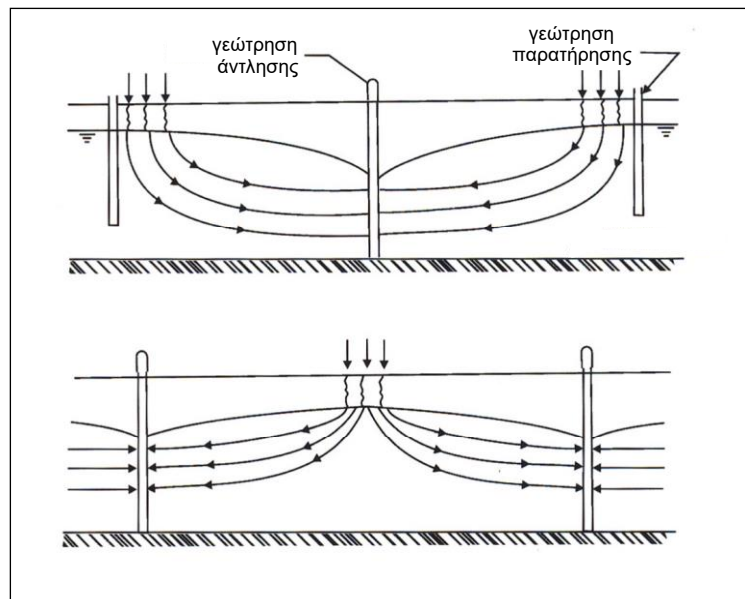
Η σχεδιασμένη επαναχρησιμοποίηση του νερού για πόση είναι ακόμα σπάνια αλλά αναμένεται να αυξηθεί στο μέλλον (National Research Council, 1994, McEwen and Richardson, 1996, Crook et al., 1999). Η επαναχρησιμοποίηση και η ανακύκλωση του νερού θα είναι στο μέλλον ένας σημαντικός παράγοντας των απαιτήσεων του σχεδιασμού όσον αφορά την ολοκληρωμένη διαχείριση του νερού (Bouwer, 2000a). Ο συνυπολογισμός του κύκλου του εμπλουτισμού του υπόγειου νερού και της ανάκτησης στη διαδικασία της επαναχρησιμοποίησης έχει αρκετά πλεονεκτήματα, όπως είναι η αποθήκευση, που έχει ως στόχο την απορρόφηση των εποχιακών ή μακράς διάρκειας διαφορών ανάμεσα στη διαθέσιμη εκπομπή υγρών αποβλήτων και στις απαιτήσεις για «ανανεωμένο»-«αναγεννημένο» νερό, η βελτιωμένη ποιότητα του υγρού αποβλήτου καθώς ρέει ή φιλτράρεται μέσω του εδάφους και του υδροφόρου (επεξεργασία μέσω του συστήματος εδάφους-υδροφόρου ή γεωκαθαρισμός), οικονομικά πλεονεκτήματα, τα αισθητικά οφέλη και η καλύτερη αποδοχή του επαναχρησιμοποιημένου νερού από το κοινό. Ο τελευταίος παράγοντας είναι ιδιαίτερα σημαντικός για την επαναχρησιμοποίηση του νερού για ύδρευση διότι η χρήση του εμπλουτισμού διαλύει την ανεπιθύμητη προδιάθεση για τη σχέση της πηγής προέλευσης του ανανεωμένου νερού και της τελικής διάθεσης του για πόση που αποτελεί την αιτία αποτυχίας αρκετών προτεινόμενων σχεδίων επαναχρησιμοποίησης για πόση (Crook et al., 1999). Ο εμπλουτισμός και η επεξεργασία μέσω του συστήματος υδροφόρου καθιστούν την επαναχρησιμοποίηση του νερού περισσότερο αποδεκτή σε χώρες όπου θρησκευτικές αντιλήψεις εναντιώνονται στη χρήση του «ακάθαρτου» νερού (Ishaq and Khan, 1997, Warner, 2000).

Αν ο εμπλουτισμός γίνει μέσω λεκανών ή άλλων επιφανειακών μεθόδων διήθησης, η εκπομπή του υγρού αποβλήτου θα πρέπει να υποστεί πρωτογενή και δευτερογενή επεξεργασία και απολύμανση με χλώριο (National Research Council 1994). Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί εκπομπή λύματος μετά από πρωτογενή επεξεργασία (Lance et al., 1980, Carlson et al., 1982, Rice and Bouwer, 1984), ενώ μερικές εφαρμογές χρησιμοποιούν εκπομπές λυμάτων όπου τα λύματα μετά τη δευτερογενή επεξεργασία φιλτράρονται μέσω της άμμου ή άλλων κοκκωδών υλικών και κατόπιν χλωριώνονται ή απολυμαίνονται με άλλο τρόπο. Η πρωτογενής επεξεργασία είναι μια μηχανική διεργασία που απομακρύνει οτιδήποτε επιπλέει ή είναι βυθισμένο στο νερό. Η δευτερογενής επεξεργασία είναι μια βιολογική διεργασία όπου βακτήρια υποβαθμίζουν οργανικά συστατικά σε αεριζόμενες δεξαμενές ή σε ειδικά φίλτρα. Η τριτογενής επεξεργασία αποτελείται από φιλτράρισμα μέσω της άμμου και απολύμανσης, ενώ η περαιτέρω επεξεργασία αφορά όλες τις άλλες βαθμίδες επεξεργασίας, όπως η νίτρωση-απονίτρωση, προσρόφηση με ενεργό άνθρακα και αντίστροφη όσμωση, κ.α.

Συχνά, η βελτίωση της ποιότητας του νερού είναι ο κύριος αντικειμενικός στόχος του εμπλουτισμού με υγρά απόβλητα. Για αυτόν το λόγο, αυτά τα συστήματα δεν λέγονται πλέον συστήματα εμπλουτισμού αλλά συστήματα επεξεργασίας μέσω συστήματος εδάφους-υδροφόρων SAT (Soil-Aquifer Treatment Systems) ή συστήματα γεωκαθαρισμού (geopurification systems) (Bouwer and Rice, 1984a). Το SAT ουσιαστικά απομακρύνει όλα τα αιωρούμενα στερεά και τους μικροοργανισμούς (μικρόβια, βακτήρια, διάφορα πρωτόζωα). Η συγκέντρωση αζώτου μειώνεται σημαντικά μέσω της απονίτρωσης και πιθανόν μέσω της διαδικασίας αναερόβιας οξειδωσης αμμωνίας που έχει προσφάτως ανακαλυφθεί (anammox; Van de Graaf et al., 1995, Kuenen and Jetten, 2001). Επίσης, μειώνεται ο διαλυμένος οργανικός άνθρακας, από 10-20 σε 2-5 mg/l. Επιπλέον, απομακρύνονται από το νερό μεγάλες ποσότητες φωσφορικού άλατος και μετάλλων, ειδικά σε ασβεστούχα εδάφη, αλλά συγκεντρώνονται στο υπόγειο περιβάλλον (Bouwer and Rice, 1984a).

Μετά την επεξεργασία του νερού με τη μέθοδο SAT μπορούν να εγκατασταθούν γεωτρήσεις άντλησης ώστε να αντλούν 100% ανανεωμένο (αναγεννημένο) νερό (σχ. 3.27 πάνω) και να αποφευχθεί η εξάπλωση του ανανεωμένου νερού στο φυσικό υπόγειο νερό, έξω από το τμήμα του υδροφόρου που προορίζεται για το σύστημα

SAT. Εναλλακτικά, οι γεωτρήσεις μπορούν να τοποθετηθούν έτσι ώστε να αντλούν μίγμα ανανεωμένου και φυσικού υπόγειου νερού (σχ. 3.27 κάτω).



Σχήμα 3.27. Συστήματα εμπλουτισμού και ανάκτησης νερού (SAT) με περιοχές εμπλουτισμού (κατακόρυφα βέλη) σε δυο παράλληλες σειρές και μια γραμμή από γεωτρήσεις άντλησης στο μέσον (πάνω), και στο κέντρο, περιοχή εμπλουτισμού περιβαλλόμενη από ένα κύκλο γεωτρήσεων άντλησης ή μια επιμήκης λωρίδα εμπλουτισμού με εκατέρωθεν γεωτρήσεις (κάτω) (Bouwer, 2002).

Το νερό από τις γεωτρήσεις όπως φαίνεται στο σχήμα 53 είναι ουσιαστικά ελεύθερο από παθογενείς παράγοντες με αποτέλεσμα να μπορεί να χρησιμοποιηθεί βασικά για πολλούς σκοπούς εκτός την πόση, όπως στην άρδευση κηπευτικών που καταναλώνονται ωμά, σε πάρκα, σε παιδικές χαρές, σε γήπεδα golf, για πυροπροστασία, στο καθάρισμα τουαλετών κ.α. Ο κύριος λόγος που αυτό το νερό δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για πόση, είναι η παρουσία υπολειμματος οργανικού άνθρακα, που αποτελείται από ευρύ φάσμα συνθετικών οργανικών χημικών (E.J.Bouwer et al., 1984), μερικά από τα οποία είναι καρκινογενή ή μπορεί να έχουν βλαβερές συνέπειες για την υγεία του καταναλωτή. Για την προστασία της δημόσιας υγείας, η πολιτεία της Καλιφόρνιας έθεσε ως ανώτερο όριο το 1mg/l για τη συνολική συγκέντρωση του οργανικού άνθρακα (TOC) στο νερό μετά την επεξεργασία SAT, που οφείλεται στην εκροή των αποβλήτων. Αυτή η διάκριση γίνεται γιατί μερικές ποσότητες φυσικού υπόγειου νερού ουσιαστικά έχουν φυσική συγκέντρωση TOC μεγαλύτερη του 1 mg/l, εξαιτίας της παρουσίας οξέων (humic and fulvic acids) ή άλλων «φυσικών» οργανικών συστατικών. Για να διατηρηθεί το επίπεδο του TOC στο νερό που αντλείται από συστήματα σαν αυτά που φαίνονται στο σχήμα 53 σε λιγότερο από 1 mg/l, το λύμα μπορεί να υποστεί αντίστροφη όσμωση ή προσρόφηση με άνθρακα, προτού γίνει ο υπόγειος εμπλουτισμός στα συστήματα όπως φαίνεται στο σχήμα 3.27. Άλλη λύση είναι να χρησιμοποιηθούν συστήματα όπως στο σχήμα 3.27 (κάτω), όπου υπάρχει μεγάλη ανάμειξη με το φυσικό υπόγειο νερό, που εισρέει στη γεώτρηση από την αντίθετη πλευρά της περιοχής όπου γίνεται η διήθηση ή από μεγαλύτερο βάθος, ώστε να μειωθεί η συγκέντρωση TOC στο νερό της γεώτρησης μέσω διάλυσης σε λιγότερο από 1 mg/l. Για να επιτευχθεί αυτό η πολιτεία της Καλιφόρνιας ανέπτυξε κατευθυντήριες οδηγίες για την πόσιμη χρήση του νερού από γεωτρήσεις σε υδροφόρους που εμπλουτίστηκαν με εκπομπές υγρών αποβλήτων, όπως φαίνεται στον Πίνακα 3.3.

Αυτές οι οδηγίες και τα ποσοστά του ανανεωμένου νερού στο νερό της γεώτρησης βασίζονται στην απομάκρυνση της συγκέντρωσης TOC στα συστήματα SAT για να διατηρηθεί η συγκέντρωση TOC στο νερό των γεωτρήσεων κάτω από 1 mg/l. Τα αποτελέσματα από δύο μεγάλες έρευνες σχετικά με τις επιπτώσεις στην υγεία όσον αφορά τη νοσηρότητα και τη θνησιμότητα στους πληθυσμούς που χρησιμοποιούν νερό από συστήματα όπως αυτά του σχήματος 3.27 (κάτω) στο δημόσιο δίκτυο νερού, έδειξαν ότι δεν υπάρχουν βλαβερές συνέπειες για την υγεία του ανθρώπου (Nellor et al., 1984, Sloss et al., 1996). Ένας προβληματισμός που προκύπτει, είναι η πιθανότητα ότι η συγκέντρωση TOC της εκροής των αποβλήτων περιλαμβάνει φαρμακευτικά σκευάσματα και ορμόνες ή ορμονικά ενεργά συστατικά (ενδοκρινή διαλύματα) των οποίων η υπόγεια καταστροφή και η σημασία τους για την υγεία είναι μέχρι στιγμής ελάχιστα κατανοητά (Daughton and Jones-Lepp, 2001).

Άλλη μορφή υπόγειου εμπλουτισμού με υγρά απόβλητα είναι ο συμπτωματικός εμπλουτισμός (incidental recharge) και συμβαίνει εκεί όπου χρησιμοποιούνται απόβλητα για άρδευση. Επειδή οι απαιτήσεις για την επαναχρησιμοποίηση του νερού που προορίζεται για άρδευση δεν είναι τόσο αυστηρές όσο αυτές για το επαναχρησιμοποιημένο νερό που προορίζεται για πόση, η άρδευση είναι πιθανόν να γίνει ένας αυξανόμενος σημαντικός «χρήστης» υγρών αποβλήτων, ειδικά σε ξηρά κλίματα, όπου η άρδευση είναι σημαντική για την αγροτική παραγωγή και σε αστικές περιοχές με πολύ πράσινο (φυσικό τοπίο, ψυχαγωγικοί και αθλητικοί χώροι κ.α.). Για τη βιώσιμη τα άλατα και άλλα χημικά στο νερό της άρδευσης δεν πρέπει να αφεθούν να συσσωρεύονται στη ριζική ζώνη των φυτών, αλλά πρέπει να εκπλύνονται μακριά από αυτήν τη ζώνη μέσω της φυσικής βροχόπτωσης, όπως, για παράδειγμα, μέσω των χειμερινών βροχών στις περιοχές με Μεσογειακό κλίμα, ή με επιπλέον νερό άρδευσης εκεί όπου η φυσική βροχόπτωση είναι ανεπαρκής. Η ποσότητα του απαραίτητου επιπλέον νερού άρδευσης που χρειάζεται για την έκπλυση, ρυθμίζεται από τα άλατα στο νερό της άρδευσης και την σχετική ανθεκτικότητα των φυτών (Tanji, 1990). Συνήθως, η απαίτηση της έκπλυσης είναι περίπου το 10 % της ποσότητας της άρδευσης που χρειάζεται για την κάλυψη των αναγκαίων καταναλώσεων (εξάτμιση από το έδαφος συν διαπνοή των φυτών ή εξατμισοδιαπνοή, ET). Αυτή η απαίτηση αντιστοιχεί σε μια αρδευτική ικανότητα της τάξης του 90%, που σημαίνει ότι από το νερό που διοχετεύεται, το 90% χρησιμοποιείται για τη διαδικασία της εξατμισοδιαπνοής (ET) και το 105% για την απόπλυση των αλάτων και των άλλων χημικών μακριά από τη ριζική ζώνη. Τόσο υψηλή αποδοτικότητα άρδευσης μπορεί να επιτευχθεί με συστήματα άρδευσης με καταιονισμό ή με στάγδην άρδευση. Τα περισσότερα συστήματα άρδευσης χρησιμοποιούν μεθόδους πλημμύρας όπως λωρίδες ή αυλάκια, που έχουν μικρότερη αποδοτικότητα άρδευσης, περίπου 50-60%. Αυτή η μέθοδος αφήνει ικανή ποσότητα νερού για απόπλυση και διατήρηση των χημικών ισορροπιών στη ριζική ζώνη. Η θεωρητική αποδοτικότητα άρδευσης των 100% θα μπορούσε να διατηρηθεί χωρίς βροχόπτωση μόνο αν γινόταν χρήση αποσταγμένου νερού για άρδευση.



Πίνακας 3.3. Προτεινόμενες οδηγίες από την πολιτεία της Καλιφόρνιας για τη χρήση υπόγειου νερού για πόση υδροφόρων που εμπλουτίζονται με υγρά απόβλητα (Crook et al., 2000 and California State Department of Health Services, 2000, Asano and Levine, 1998)

Τύπος ρυπαντή	Τύπος εμπλουτισμού	
	Επιφανειακή κατάκλυση	Υπόγεια έγχυση
<i>Παθογόνοι μικροοργανισμοί</i>		
- Δευτεροβάθμια επεξεργασία	SS ≤ 30 mg/l	
- Φιλτράρισμα	≤ 2NTU	
- Απολύμανση	4-log απενεργοποίηση ιού, ≤ 2,2, coliform ανά 100 ml	
- Χρόνος παραμονής στο υπέδαφος	6 μήνες	12 μήνες
- Οριζόντιος διαχωρισμός	150 m	600m
<i>Ρυθμισμένοι ρυπαντές (regulated contaminants)</i>	Σύμφωνα με τα ανώτερα επιτρεπτά όρια συγκέντρωσης ρυπαντών στο πόσιμο νερό για τις Η.Π.Α. (maximum contaminant level-MCL)	
<i>Μη ρυθμισμένοι ρυπαντές (regulated contaminants)</i>		
Δευτεροβάθμια επεξεργασία	BOD ≤ 30 mg/l, TOC ≤ 16 mg/l	
Αντίστροφη όσμωση	≤ 1 mg/l TOC του αρχικού λύματος στη γεώτρηση πόσιμου νερού	100% επεξεργασία για TOC ≤ 1 mg/l/RWC
Κριτήρια κατάκλυσης για SAT. Τιμή απομάκρυνσης 50%	Βάθος του υπόγειου νερού με αρχικό ρυθμό διήθησης: < 0,5 cm/min=3m, < 0,7 cm/min= 6m	
Παρακολούθηση υβώματος	Ένδειξη δυνατότητας υποχώρησης του υβώματος	
Συνεισφορά ανανεωμένου νερού στο νερό της γεώτρησης (reclaimed water contribution, RWC)	≤ 50%	

Σε αποδοτικότητα άρδευσης 80%, οι χημικές ουσίες που εισέρχονται με το νερό άρδευσης εκπλύνονται με το 20% του νερού άρδευσης. Έτσι, οι συγκεντρώσεις αλάτων και άλλων χημικών ουσιών δεν απορροφώνται από τα φυτά ή βιοδιασπώνται ή σταθεροποιούνται στο έδαφος, είναι πέντε φορές υψηλότερες στο προϊόν έκπλυσης από ότι στο νερό της άρδευσης. Αυτό το προϊόν έκπλυσης, λέγεται επίσης στράγγισμα (drainage) ή νερό βαθιάς διήθησης, κινείται τότε προς το υπόγειο νερό, όπου μακροπρόθεσμα είναι πιθανόν να δημιουργήσει σοβαρή υποβάθμιση του εδάφους (Bouwer, 2000b, Lemly, 1993). Παραδείγματος χάριν, υποθέστε ότι έξι μηνών θερινή συγκομιδή σε ένα θερμό, ξηρό κλίμα χρειάζεται 1 m νερό για εξατμισοδιαπνοή (ET). Σε αποδοτικότητα άρδευσης 80%, το ποσό άρδευσης πρέπει να είναι 1,25 m για την εποχή παραγωγής, από το οποίο ποσό 0,25 m εκπλύνονται μέσω της ριζικής ζώνης και κατευθύνονται προς το υπόγειο νερό. Υποθέτοντας μια περιεκτικότητα νερού 15% στην ακόρεστη ζώνη, η πραγματική κατακόρυφη ταχύτητα του νερού είναι περίπου

$0,25/0,15 = 1,7$  m ανά 6 μήνες (θεωρώντας ακινησία τον υπόλοιπο χρόνο). Έτσι, αν το υπόγειο νερό βρίσκεται σε βάθος 30 m, απαιτούνται περίπου  $30/0,85 = 35$  χρόνια για να κινηθεί το νερό προς το υπόγειο νερό. Υποθέτοντας ένα πορώδες (fillable porosity) 10% και μια κατακόρυφη συσσώρευση του βαθιά διηθημένου νερού πάνω από το υπόγειο νερό, αυτό το διηθούμενο νερό προσθέτει μια στρώση των 2,5 m το χρόνο χαμηλής ποιότητας νερού στον υδροφόρο. Αν το νερό της άρδευσης έχει περιεκτικότητα σε άλατα 500 mg/l, το διηθούμενο νερό θα έχει περιεκτικότητα σε άλατα 2.500 mg/l. Αν σημειωθεί σημαντική βροχόπτωση τότε αυτή θα μειώνει αυτό το νούμερο, κάτι που προϋποθέτει μηδενική βαθιά διήθηση από το νερό της βροχής. Αν χρησιμοποιούνται υγρά απόβλητα για άρδευση, τότε οι χημικές ουσίες στο προϊόν έκπλυσης μπορεί να παρελάμβαναν παραπροϊόντα απολύμανσης, φυσικά και συνθετικά οργανικά συστατικά όπως φαρμακευτικής προέλευσης ορμόνες και άλλα (Lim et al., 2000), νιτρικά, οξέα (humic and fulvic acids) ή άλλα «φυσικά» οργανικά συστατικά που προϋπήρχαν στα απόβλητα, μαζί με αυτά που δημιουργήθηκαν από την αποσύνθεση φυτικών υλικών. Αυτά τα οξέα και τα «φυσικά» οργανικά συστατικά είναι δυνατόν να δημιουργήσουν παραπροϊόντα απολύμανσης, όταν το νερό αντλείται και χλωριώνεται για να γίνει πόσιμο. Τελικά, ίσως χρειαστεί να χρησιμοποιηθεί μεμβρανική διήθηση, όπως η αντίστροφη όσμωση, ώστε να μειωθεί η περιεκτικότητα σε άλατα στο υπόγειο νερό που βρίσκεται ψηλά, σε αποδεκτά όρια ποσιμότητας. Η διαδικασία αυτή μπορεί επίσης να απομακρύνει άλλους ρυπαντές, όπως τα νιτρικά, φαρμακευτικής προέλευσης προϊόντα και άλλα συνθετικά οργανικά συστατικά.

Εξαιτίας αυτού του συμπωματικού εμπλουτισμού, η άρδευση με χρήση εκπομπών υγρών αποβλήτων προκαλεί χειρότερη ρύπανση των υδροφόρων σε μεγάλη διάρκεια χρόνου από ό,τι ο τεχνητός εμπλουτισμός με χρήση αποβλήτων. Στην τελευταία περίπτωση, ο ρυθμός της υδραυλικής φόρτισης είναι υψηλότερος από το ρυθμό εξάτμισης και έτσι, ουσιαστικά δεν υπάρχει αύξηση σε χημικές συγκεντρώσεις στο νερό που κατεισδύει προς το υπόγειο νερό. Εκεί όπου το έδαφος πάνω από έναν υδροφόρο, για εκμετάλλευση πόσιμου νερού, αρδεύεται με υγρά απόβλητα, πρέπει να εκτιμηθεί η ισορροπία ανάμεσα στο νερό και τα άλατα. Έτσι ώστε να προβλεφθούν πιθανές μακροχρόνιες επιπτώσεις στο υπόγειο νερό. Επίσης, θεωρείται απαραίτητη η παρακολούθηση του υπόγειου νερού για να παρατηρηθούν τα αποτελέσματα της άρδευσης στο υποκείμενο υπόγειο νερό ώστε να προσδιοριστούν τα μέτρα που πρέπει να ληφθούν για να μειωθούν ή να ελαχιστοποιηθούν οι αρνητικές συνέπειες.

### **Στοιχεία από την ΚΥΑ: ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΜΕΤΡΩΝ, ΟΡΩΝ ΚΑΙ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΑΝΑΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΣΗ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΜΕΝΩΝ ΥΓΡΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ΚΑΙ ΑΛΛΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ (2011)**

Στη συνέχεια ακολουθούν στοιχεία που αφορούν στον εμπλουτισμό των υπόγειων νερών με επεξεργασμένα υγρά απόβλητα, όπως προδιαγράφονται στις προδιαγραφές και οδηγίες της αριθμ. οικ.145116 απόφασης με τίτλο: Καθορισμός μέτρων, όρων και διαδικασιών για την επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων και άλλες διατάξεις (ΦΕΚ 354/Β/8-3- 2011). Παρατίθενται αποσπάσματα από τα σχετικά άρθρα 1, 2, 3, 5 (όπως αριθμούνται στην ΚΥΑ) και οι σχετικοί Πίνακες 3.4 (Πίνακας 1 – Παράρτημα Ι), 3.5 (Πίνακας 3 – Παράρτημα Ι), 3.6 (Πίνακας 4 – Παράρτημα ΙΙ), 3.7 (Πίνακας 6 – Παράρτημα ΙV) (στις παρενθέσεις οι αντίστοιχοι πίνακες της ΚΥΑ):

#### Άρθρο 1 - Σκοπός

Ο σκοπός της παρούσας απόφασης είναι:

α) η προώθηση της αξιοποίησης των επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων και η μέσω αυτής εξοικονόμηση υδατικών πόρων, η οποία θα συμβάλλει σημαντικά στην αντιμετώπιση των επιπτώσεων από:

ι) την προϊούσα λειψυδρία και ξηρασία στην περιοχή της Μεσογείου, καθώς και την αναμενόμενη επιδείνωση του προβλήματος λόγω της κλιματικής αλλαγής,

- ii) την έντονη ταπείνωση ή/και υφαλμύριση των υπόγειων υδροφορέων ορισμένων περιοχών της χώρας από την υπεράντληση, την προϊούσα λειψυδρία και την είσοδο του θαλάσσιου μετώπου σε παραλιακές περιοχές,
- β) η βελτίωση του υδατικού ισοζυγίου μέσω της τροφοδότησης των υπογείων υδροφορέων. Απαραίτητη προϋπόθεση για την επαναχρησιμοποίηση των επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων είναι η διασφάλιση της Δημόσιας Υγείας.

## Άρθρο 2 - Ορισμοί

1) Για την εφαρμογή της παρούσας απόφασης οι ακόλουθοι όροι έχουν την εξής έννοια:

α) Επαναχρησιμοποίηση υγρών αποβλήτων: Η εν γένει διαχείριση των υγρών αποβλήτων, έτσι ώστε να μπορούν να ανακτηθούν ως νερό με σκοπό την επαναχρησιμοποίησή τους.

β) Υγρά Απόβλητα: Τα οικιακά ή αστικά λύματα καθώς και τα βιομηχανικά υγρά απόβλητα, που αναφέρονται στην υπ. αριθ. 5673/400/1997 ΚΥΑ (Β'192), ανεξαρτήτως μεγέθους βιομηχανικής εγκατάστασης.

γ) Άμεση Επαναχρησιμοποίηση: Η επαναχρησιμοποίηση των επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων (ανακτημένο νερό), χωρίς να προηγηθεί αποθήκευση ή ανάμιξη με άλλα νερά.

δ) Έμμεση Επαναχρησιμοποίηση: Η αποθήκευση των επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων (ανακτημένο νερό) σε επιφανειακούς ή υπόγειους ταμιευτήρες πριν από την επαναχρησιμοποίησή τους και κατά κανόνα η ανάμιξη τους με άλλα νερά.

ε) Άμεση Επαναχρησιμοποίηση Υγρών Αποβλήτων για Πόση: Η αξιοποίηση ανακτημένου νερού το οποίο προορίζεται για άμεση πόση, μετά από προχωρημένη επεξεργασία των υγρών αποβλήτων και χωρίς ανάμιξη με άλλα νερά.

στ) Έμμεση Επαναχρησιμοποίηση Υγρών Αποβλήτων για Πόση: Η προγραμματισμένη αξιοποίηση ανακτημένου νερού για πόση, μετά από προχωρημένη επεξεργασία των υγρών αποβλήτων, αφού προηγουμένως έχουν αναμιχθεί με σημαντικές ποσότητες καθαρού νερού σε επιφανειακούς ή υπόγειους ταμιευτήρες. Συνήθως, σχετίζεται με τον τεχνητό εμπλουτισμό υπόγειων υδροφορέων που χρησιμοποιούνται και για πρόσληψη πόσιμου νερού.

ζ) Επαναχρησιμοποίηση για σκοπούς εκτός πόσης: Η αξιοποίηση του ανακτημένου νερού για άλλες χρήσεις, εκτός της πόσης.

η) Απρογραμματίστη Επαναχρησιμοποίηση: Η μη προγραμματισμένη αλλά εκ των πραγμάτων έμμεση και εν πολλοίς ανεξέλεγκτη επαναχρησιμοποίηση υγρών αποβλήτων, όπως υδροληψίες από ποτάμια, στα ανάντη των οποίων έχει γίνει διάθεση υγρών αποβλήτων ή από υπόγειους υδροφορείς, οι οποίοι δέχονται διηθήσεις λυμάτων από βόθρους ή από ιδιωτικά συστήματα επεξεργασίας.

θ) Προγραμματισμένη Επαναχρησιμοποίηση: Η σκόπιμη, προγραμματισμένη και ελεγχόμενη επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων.

ι) Επαναχρησιμοποίηση χωρίς περιορισμούς (απεριόριστη): Οι χρήσεις του ανακτημένου νερού κατά τις οποίες η πρόσβαση του ευρύτερου κοινού και η σωματική επαφή δεν περιορίζονται, όπως πάρκα ή άλλοι χώροι αναψυχής, χώροι πρασίνου σε πόλεις και λίμνες αναψυχής.

ια) Επαναχρησιμοποίηση με περιορισμούς (περιορισμένη): Οι χρήσεις του ανακτημένου νερού, κατά τις οποίες η πρόσβαση του ευρύτερου κοινού και η σωματική επαφή τελούν υπό έλεγχο ή απαγόρευση, όπως περιφραγμένες και ελεγχόμενες περιοχές, συνήθως από δημόσιους φορείς.

ιβ) Τροφοδότηση ή Εμπλουτισμός υπόγειου υδροφορέα: Η τροφοδότηση ή ο εμπλουτισμός των υπόγειων υδροφορέων με επεξεργασμένα υγρά απόβλητα μέσω επιφανειακής διήθησης ή απευθείας μέσω γεωτρήσεων. Για την εφαρμογή της παρούσας απόφασης, η επαναχρησιμοποίηση μέσω της τροφοδότησης ή του εμπλουτισμού υπόγειου υδροφορέα καλύπτει και την υπεδάφια ή επιφανειακή διάθεση των υγρών αποβλήτων.

- ιγ) Φορέας Παροχής Ανακτημένου Νερού: Το φυσικό ή νομικό πρόσωπο, το οποίο έχει την ευθύνη λειτουργίας της εγκατάστασης επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων, προκειμένου τα υγρά απόβλητα μετά από κατάλληλη επεξεργασία να καταστούν κατάλληλα για να επαναχρησιμοποιηθούν από τον ίδιο, τον φορέα διαχείρισης ή τον χρήστη ανακτημένου νερού, σύμφωνα με τους όρους της παρούσας απόφασης.
- ιδ) Χρήστης Ανακτημένου Νερού: Το φυσικό ή νομικό πρόσωπο, το οποίο χρησιμοποιεί το ανακτημένο νερό.
- ιε) Φορέας Διαχείρισης του ανακτημένου νερού: Το φυσικό ή νομικό πρόσωπο, το οποίο έχει την ευθύνη διαχείρισης του κατάλληλα επεξεργασμένου και ανακτημένου νερού με σκοπό την επαναχρησιμοποίησή του.
- ιστ) Ανακύκλωση βιομηχανικών υγρών αποβλήτων: Η εσωτερική ανάκτηση υγρών αποβλήτων μιας εγκατάστασης και η ανακύκλωση τους στην παραγωγική διαδικασία της εγκατάστασης αυτής.
- 2) Για τους όρους Αστικά Λύματα, ΟικιακάΛύματα, Βιομηχανικά Υγρά Απόβλητα, Οικισμοί, Μονάδα Ισοδύναμου Πληθυσμού (ΜΙΠ) και Διάθεση Λυμάτων, ισχύουν οι ορισμοί που προβλέπονται στις παραγράφους 1, 2, 3, 4, 6 και 10 αντίστοιχα, του άρθρου 2 της υπ. αριθ. 5673/400/1997 ΚΥΑ (Β'192).
- 3) Για τους λοιπούς όρους που απαντώνται στις διατάξεις της παρούσας απόφασης, ισχύουν οι αντίστοιχες έννοιες που προβλέπονται στις διατάξεις του άρθρου 2 του Ν.3199/2003 και του άρθρου 2 του Π.Δ. 51/2007.

### Άρθρο 3 - Πεδίο εφαρμογής

1. Η παρούσα απόφαση εφαρμόζεται:
- α) Στην προγραμματισμένη επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων, όπως ορίζονται στην παράγραφο 1(β) του άρθρου 2, αυτής. Η προγραμματισμένη επαναχρησιμοποίηση επιτρέπεται για γεωργική χρήση (άρδευση), για την τροφοδότηση υπόγειων υδροφορέων, για αστική και περιαστική χρήση, για βιομηχανική χρήση και για τα υδατικά συστήματα του άρθρου 7 του Π.Δ. 51/2007, σύμφωνα με τους ειδικότερους όρους που προβλέπονται κατά περίπτωση στα άρθρα 4, 5, 6, 7 και 8 της παρούσας απόφασης.
- β) Στην επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων βιομηχανικών υγρών αποβλήτων που προέρχονται από άλλες βιομηχανικές δραστηριότητες, ασχέτως μεγέθους βιομηχανικής εγκατάστασης, εκτός αυτών που υπάγονται στο πεδίο εφαρμογής της υπ. αριθ. 5673/400/1997 ΚΥΑ, τα οποία είναι μη επικίνδυνα απόβλητα ή έχουν καταστεί μη επικίνδυνα μετά από επεξεργασία σύμφωνα με τις σχετικές διατάξεις της κείμενης νομοθεσίας για τη διαχείριση των επικίνδυνων αποβλήτων. Και στις δύο ως άνω περιπτώσεις η επαναχρησιμοποίηση επιτρέπεται μόνον για βιομηχανική χρήση, για περιορισμένη άρδευση μέσω υπεδάφιου συστήματος άρδευσης και τροφοδότηση υπόγειων υδροφορέων που δεν εμπíπτουν στις διατάξεις του άρθρου 7 του ΠΔ 51/2007 και μόνο μέσω διήθησης απαγορευόμενων των γεωτρήσεων, με τους όρους που τίθενται για τους συγκεκριμένους τύπους επαναχρησιμοποίησης με την παρούσα απόφαση.
2. Δεν υπάγονται στο πεδίο εφαρμογής της παρούσας απόφασης: α) η ανακύκλωση βιομηχανικών αποβλήτων, β) η άμεση ή έμμεση επαναχρησιμοποίηση για πόση, με εξαίρεση τις περιπτώσεις που αναφέρονται στο άρθρο 8, γ) η επαναχρησιμοποίηση για χρήσεις κολύμβησης (πισίνες) και δ) άλλες οικιακές χρήσεις.
3. Η παρούσα απόφαση δεν εφαρμόζεται για διάθεση σε υδάτινους αποδέκτες.
4. Η παρούσα απόφαση εφαρμόζεται με την επιφύλαξη της υπ. αριθ.39626/2208/2009 ΚΥΑ (Β'2075), εφόσον δεν έρχεται σε αντίθεση με τις διατάξεις της.

### Άρθρο 5 - Τροφοδότηση ή εμπλουτισμός υπόγειων υδροφορέων

1. Η τροφοδότηση ή εμπλουτισμός υπόγειου υδροφορέα με επεξεργασμένα υγρά απόβλητα επιτρέπεται, με την επιφύλαξη του άρθρου 8, μόνο στις περιπτώσεις όπου

τα υπόγεια νερά δεν εμπίπτουν στις διατάξεις του άρθρου 7 του ΠΔ 51/2-3-2007 και εφόσον τηρούνται οι απαιτήσεις της υπ. αριθ. 39626/2208/2009 ΚΥΑ.

2. Για την αποφυγή συσσώρευσης οργανικών στα υπόγεια ύδατα, που ενδέχεται να παραβιάσουν μελλοντικές χρήσεις των υπογείων υδάτων του υδροφορέα, απαιτείται:

α) Στις περιπτώσεις άμεσου εμπλουτισμού μέσω γεωτρήσεων υπό πίεση ή με βαρύτητα σε επιλεγμένες

θέσεις γεωτρήσεων, επαρκής βαθμός επεξεργασίας για την απομάκρυνση οργανικών που περιλαμβάνει, εκτός από δευτεροβάθμια βιολογική και ενδεχόμενη τριτοβάθμια επεξεργασία, προχωρημένες μεθόδους κατάλληλες για την απομάκρυνση διαλυτού οργανικού υλικού, όπως μέσω μεμβρανών τουλάχιστον υπερδιήθησης ή ισοδύναμης αποτελεσματικότητας εναλλακτικής μεθόδου προχωρημένης επεξεργασίας.

β) Στις περιπτώσεις εμπλουτισμού με μέθοδο διήθησης δια μέσου στρώματος εδάφους με κατάλληλα χαρακτηριστικά και επαρκές βάθος, η αποφυγή των πρόσθετων προχωρημένων μεθόδων επεξεργασίας στο βαθμό που τεκμηριώνεται ότι επιτυγχάνεται επαρκής κατακράτηση οργανικών από το έδαφος.

3. Στις προαναφερόμενες περιπτώσεις της παραγράφου 2, ανεξάρτητα από τον ελάχιστο απαιτούμενο

βαθμό επεξεργασίας, απαιτείται η εκπόνηση ειδικής υδρογεωλογικής μελέτης, από την οποία τεκμαίρεται η διασφάλιση της αποφυγής της διείσδυσης υγρών αποβλήτων σε υπόγειους υδροφορείς τα ύδατα των οποίων χρησιμοποιούνται για απόληψη πόσιμου νερού. Με την υδρογεωλογική μελέτη, εξετάζεται μεταξύ των άλλων:

α) το βάθος του υδροφόρου ορίζοντα,

β) η ύπαρξη ή μη πολλαπλών γεωλογικών στρωμάτων και η υδραυλική αγωγιμότητα εκάστου στρώματος,

γ) το βάθος που θα πραγματοποιείται ο εμπλουτισμός.

4. Για τον εμπλουτισμό (τροφοδότηση) υπόγειου υδροφορέα με επεξεργασμένα υγρά απόβλητα, απαιτείται η εκπόνηση μελέτης σχεδιασμού και εφαρμογής του εμπλουτισμού, στην οποία θα προσαρτάται ως αναπόσπαστο παράρτημα η προαναφερόμενη υδρογεωλογική μελέτη. Η μελέτη σχεδιασμού και εφαρμογής περιλαμβάνει:

α) εξέταση των συγκεντρώσεων στα επεξεργασμένα υγρά απόβλητα των ουσιών που περιλαμβάνονται στην υπ. αριθ. 39626/2208/2009 ΚΥΑ (Β'2075),

β) εξειδίκευση των προβλεπόμενων στην ανωτέρω ΚΥΑ μέτρων και περιορισμών ανάλογα με τη μέθοδο

εφαρμογής του εμπλουτισμού, την ποιότητα των επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων και την κατάσταση του υπόγειου υδροφορέα,

γ) περιγραφή της ποσότητας και ποιότητας του εισαγόμενου ανακτημένου ύδατος,

δ) προγράμματα παρακολούθησης των ποιοτικών χαρακτηριστικών των επαναχρησιμοποιούμενων υγρών αποβλήτων και κατά περίπτωση τα απαιτούμενα από την υπ. αριθ. 39626/2208/2009 ΚΥΑ, προγράμματα παρακολούθησης των χαρακτηριστικών των υπογείων υδάτων,

ε) την επιτυγχανόμενη αραίωση με τα ύδατα του υπόγειου υδροφορέα.

5. Η τροφοδότηση (εμπλουτισμός) υπόγειων υδροφορέων με επεξεργασμένα υγρά απόβλητα αποβλέπει

κυρίως:

α) στη δημιουργία υδραυλικού φράγματος που θα παρεμποδίζει τη διείσδυση και ανάμιξη του θαλάσσιου

νερού με το γλυκό νερό παράκτιων υδροφορέων,

β) στην αποθήκευση επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων για μελλοντική χρήση ή για εξισορρόπηση των διακυμάνσεων της ζήτησης όπως για άρδευση που είναι συνήθως εποχιακή,

γ) στην ανύψωση της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα, που μπορεί να φθίνει λόγω υπερεκμετάλλευσης

- και επειδή η φυσική ανανέωση γίνεται με πολύ αργό ρυθμό,  
δ) στον έλεγχο πιθανών καθιζήσεων του εδάφους.
6. Στους πίνακες 1 και 3 του Παραρτήματος Ι, στον Πίνακα 4 του Παραρτήματος ΙΙ και στον Πίνακα 6 του Παραρτήματος ΙV παρατίθενται τα επιτρεπόμενα όρια για τις μικροβιολογικές, τις συμβατικές και άλλες χημικές παραμέτρους, καθώς και η εκάστοτε κατ' ελάχιστον απαιτούμενη επεξεργασία, το είδος και η ελάχιστη συχνότητα δειγματοληψιών και αναλύσεων, στην περίπτωση επαναχρησιμοποίησης επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων για τροφοδότηση ή εμπλουτισμό υπόγειων υδροφορέων.
7. Στην ειδική περίπτωση εγκαταστάσεων επεξεργασίας λυμάτων οικισμών με πληθυσμό μικρότερο από 2000 κατοίκους (Μονάδες Ισοδύναμου Πληθυσμού), καθώς και στις περιπτώσεις ιδιωτικών συστημάτων επεξεργασίας λυμάτων μεμονωμένων κατοικιών ή ομάδων κατοικιών ή ξενοδοχειακών μονάδων, η εφαρμογή υπεδάφιας διοχέτευσης των επεξεργασμένων λυμάτων, μέσω διήθησης, δια μέσου εδαφικού στρώματος σε υπόγειο υδροφόρα, επιτρέπεται μόνον εφόσον:
- α) εφαρμόζονται τα κατάλληλα συστήματα επεξεργασίας, σύμφωνα με τις απαιτήσεις που προβλέπονται στην υπ. αριθ. 5673/400/1997 ΚΥΑ, όπως ισχύει και
  - β) υποβληθεί μελέτη σχεδιασμού και εφαρμογής, στην οποία μεταξύ άλλων, γίνεται περιγραφή του εδαφικού στρώματος διήθησης, προσδιορίζεται η στάθμη των υπόγειων νερών και τεκμηριώνεται η αποφυγή διείσδυσης των λυμάτων σε υπόγειους υδροφορείς τα ύδατα των οποίων χρησιμοποιούνται για απόληψη πόσιμου νερού.
8. Τα προβλεπόμενα στο παρόν άρθρο δεν έχουν ισχύ στις περιπτώσεις στις οποίες λόγω ειδικών χαρακτηριστικών και συνθηκών ισχύει απαγορευτική διάταξη εμπλουτισμού συγκεκριμένου υδροφόρα με επεξεργασμένα υγρά απόβλητα.
9. Για το περιεχόμενο της μελέτης σχεδιασμού και εφαρμογής του εμπλουτισμού γνωμοδοτεί η Διεύθυνση Υδάτων της Αποκεντρωμένης Διοίκησης στο πλαίσιο της διαδικασίας έκδοσης της άδειας επαναχρησιμοποίησης που προβλέπεται στο άρθρο 9.

Πίνακας 3.4. (ΚΥΑ 145116 - ΦΕΚ 354/Β/8-3-2011). Όρια για μικροβιολογικές και συμβατικές παραμέτρους καθώς και η κατ' ελάχιστον απαιτούμενη επεξεργασία και συχνότητα δειγματοληψιών και αναλύσεων στην περίπτωση επαναχρησιμοποίησης επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων για περιορισμένη άρδευση, βιομηχανική χρήση νερού ψύξης μιας χρήσης και εμπλουτισμό υπόγειου υδροφορέα, που δεν χρησιμοποιείται για πόση και με διήθηση διαμέσου κατάλληλου εδαφικού στρώματος

Τύπος επαναχρησιμοποίησης	<i>Escherichia coli</i> (EC/100 ml)	BOD5 (mg/l)	SS (mg/l)	Θολότητα (NTU)	Κατ ελάχιστον απαιτούμενη επεξεργασία	Ελάχιστη συχνότητα δειγματοληψιών και αναλύσεων νερού προς επαναχρησιμοποίηση
<p><b>Περιορισμένη άρδευση</b> Περιοχές όπου δεν αναμένεται πρόσβαση του κοινού, καλλιέργειες ζωοτροφών, βιομηχανικές καλλιέργειες, λιβάδια, δένδρα (μη συμπεριλαμβανομένων των οπωροφόρων), με την προϋπόθεση ότι κατά τη συλλογή οι καρποί δεν βρίσκονται σε επαφή με το έδαφος, καλλιέργειες σπόρων και καλλιέργειες που παράγουν προϊόντα τα οποία υποβάλλονται σε περαιτέρω επεξεργασία πριν την κατανάλωσή τους. Άρδευση με καταιονισμό δεν θα εφαρμόζεται</p> <p><b>Βιομηχανική χρήση</b> Νερό ψύξης μιας χρήσης</p> <p>Τροφοδότηση υπόγειων υδροφορέων που δεν εμπίπτουν στις διατάξεις του άρθρου 7 του ΠΔ 51/2-3-2007, (με την επιφύλαξη των παραγράφων 4 και 5 του άρθρου 5 της παρούσας), με διήθηση διαμέσου εδαφικού στρώματος με επαρκές πάχος και κατάλληλα χαρακτηριστικά<sup>(δ)</sup></p>	≤ 200 διάμεση τιμή	Σύμφωνα με τις επιταγές της ΚΥΑ 5673/400/1997	Σύμφωνα με τις επιταγές της ΚΥΑ 5673/400/1997	-	Δευτεροβάθμια βιολογική επεξεργασία <sup>(α), (β)</sup> Απολύμανση <sup>(γ)</sup>	<p>BOD<sub>5</sub>, SS, N, P: σύμφωνα με τις επιταγές της ΚΥΑ 5673/400/5.3.97 (ΦΕΚ 192/Β/14.3.97)</p> <p>EC: μια ανά εβδομάδα</p> <p>Υπολειμματικό χλώριο: συνεχώς (εφόσον εφαρμόζεται χλωρίωση)</p>

Πίνακας 3.5. (ΚΥΑ 145116 - ΦΕΚ 354/Β/8-3-2011). Όρια για μικροβιολογικές και συμβατικές παραμέτρους καθώς και η κατ' ελάχιστον απαιτούμενη επεξεργασία και συχνότητα δειγματοληψιών και αναλύσεων στην περίπτωση επαναχρησιμοποίησης επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων για αστική και περιαστική και εμπλουτισμό υπόγειων υδροφορέων με γεωτρήσεις

Τύπος επαναχρησιμοποίησης	Ολικά κολοβακτηρίδια (TC/100 ml)	BOD5 (mg/l)	SS (mg/l)	Θολότητα (NTU)	Κατ ελάχιστον απαιτούμενη επεξεργασία	Ελάχιστη συχνότητα δειγματοληψιών και αναλύσεων νερού προς επαναχρησιμοποίηση
<p><b>Αστική χρήση</b> Μεγάλες εκτάσεις (νεκροταφεία, πραινή αυτοκινητόδρομων, γήπεδα γκόλφ, δημόσια πάρκα), εγκαταστάσεις αναψυχής, κατάσβεση πυρκαϊών, συμπύκνωση εδαφών, καθαρισμός οδών και πεζοδρόμων, διακοσμητικά σιντριβάνια Πότισμα με καταιονισμό απαγορεύεται.</p> <p><b>Εμπλουτισμός υπόγειων υδροφορέων</b> που δεν εμπίπτουν στις διατάξεις του άρθρου 7 του ΠΔ 51/2-3-2007 (ΦΕΚ54Α/8-3-2007), με γεωτρήσεις</p> <p><b>Περιαστικό πράσινο</b> συμπεριλαμβανομένων των αλσών και δασών<sup>(λ)</sup></p>	<p>≤ 2 για το 80% των δειγμάτων και ≤ 20 για το 95% των δειγμάτων</p>	<p>≤ 10 για το 80% των δειγμάτων</p>	<p>≤ 2 για το 80% των δειγμάτων</p>	<p>≤ 2 διάμεση τιμή</p> <p>-</p>	<p>Δευτεροβάθμια βιολογική επεξεργασία<sup>(θ)</sup></p> <p>ακολουθούμενη από Προχωρημένη επεξεργασία<sup>(ι)</sup> και Απολύμανση<sup>(κ)</sup></p>	<p>BOD<sub>5</sub>, SS, N, P: σύμφωνα με τις επιταγές της ΚΥΑ 5673/400/5.3.97 (ΦΕΚ 192/Β/14.3.97)</p> <p>Θολότητα και διαπερατότητα: για ανακτημένο νερό από εγκαταστάσεις επεξεργασίας με ισοδύναμο πληθυσμό μεγαλύτερο από 50000 κατοίκους τέσσερις ανά εβδομάδα και δύο ανά εβδομάδα στις υπόλοιπες περιπτώσεις</p> <p>TC: για ανακτημένο νερό από εγκαταστάσεις επεξεργασίας με ισοδύναμο πληθυσμό μεγαλύτερο από 50000 κατοίκους επτά ανά εβδομάδα και τρεις ανά εβδομάδα στις υπόλοιπες περιπτώσεις Κατ εξαίρεση για νησιωτικές περιοχές με τεκμηριωμένη έλλειψη κατάλληλης εργαστηριακής υποδομής δύο ανά εβδομάδα</p> <p>Υπολειμματικό Cl<sub>2</sub> συνεχώς (εφόσον εφαρμόζεται χλωρίωση)</p>



Πίνακας 3.6. (ΚΥΑ 145116 - ΦΕΚ 354/Β/8-3-2011). Μέγιστες επιτρεπόμενες συγκεντρώσεις μετάλλων και στοιχείων.

Μέταλλο	Μέγιστη συγκέντρωση (mg/l)
Al (αργίλιο)	5
As (αρσενικό)	0.1
Be (βηρύλλιο)	0.1
Cd (κάδμιο)	0.01
Co (κοβάλτιο)	0.05
Cr (χρώμιο)	0.1
Cu (χαλκός)	0.2
F (φθόριο)	1.0
Fe (σίδηρος)	3.0
Li (λίθιο)	2.5
Mn (μαγγάνιο)	0.2
Mo (μολυβδαίνιο)	0.01
Ni (νικέλιο)	0.2
Pb (μόλυβδος)	0.1
Se (σελήνιο)	0.02
V (βανάδιο)	0.1
Zn (ψευδάργυρος)	2.0
Hg (υδράργυρος)	0.002
B (Βόριο)	2

Πίνακας 3.7. (ΚΥΑ 145116 - ΦΕΚ 354/Β/8-3-2011). Μέγιστες επιτρεπόμενες συγκεντρώσεις ουσιών προτεραιότητας και τοξικότητας σε ανακτημένα υγρά απόβλητα.

Παράμετρος	CAS	Μέγιστη συγκέντρωση (µg/l)
Alachlor	15972-60-8	0,7
Ανθρακένιο	120-12-7	1
Ατραζίνη	1912-24-9	2
Βενζόλιο	71-43-2	5
Βρωμιούχος διφαινυλαιθέρας	32534-81-9	0,025
Ανθρακο-τετραχλωρίδιο	56-23-5	ΜΑ
C10-13 Χλωροαλκάνια	85535-84-8	1,4
Chlorfenvinphos	470-90-6	0,3
Chlorpyrifos (Chlorpyrifos-ethyl)	2921-88-2	0,1
Aldrin	309-00-2	ΜΑ
Dieldrin	60-57-1	ΜΑ
Endrin <sup>1</sup>	72-20-8	ΜΑ
Isodrin	465-73-6	0,01
DDT ολικό	Δεν	ΜΑ
para-para-DDT	50-29-3	ΜΑ
1,2 Διχλωροαιθάνιο	107-06-2	20
Διχλωρομεθάνιο	75-09-2	50
Φθαλικό δι(2-αιθυλεξίλιο) – (ΦΔΕΕ-DEHP)	117-81-7	10
Diuron	330-54-1	1.0
Ενδοσουλφάνιο	115-29-7	0,01
Φλουορανθένιο	206-44-0	1
Εξαχλωροβενζόλιο	118-74-1	ΜΑ
Εξαχλωροβουταδιένιο	87-68-3	0,6
Εξαχλωροκυκλοεξάνιο	608-73-1	ΜΑ
Isoproturon	34123-59-6	1
Ναφθαλένιο	91-20-3	2,4
Εννεύλοφαινόλη [4-εννεύλοφαινόλη]	104-40-5	2

Πίνακας 3.7. (ΚΥΑ 145116 - ΦΕΚ 354/Β/8-3-2011) (συνέχεια). Μέγιστες επιτρεπόμενες συγκεντρώσεις ουσιών προτεραιότητας και τοξικότητας σε ανακτημένα υγρά απόβλητα.

Παράμετρος	CAS	Μέγιστη συγκέντρωση (µg/l)
Οκτυλοφαινόλη [(4-(1,1', 3,3'-τετραμεθυλβουτυλική)-φαινόλη)]	140-66-9	1
Πενταχλωροβενζόλιο	608-93-5	0,1
Πενταχλωροφαινόλη	87-86-5	1
Βενζο(α)πυρένιο	50-32-8	0,1
Βενζο(β)φλουορανθένιο	205-99-2	Αθροιστικά=0,03
Βενζο(κ)φλουορανθένιο	207-08-9	
Βενζο(ζ,η,θ)-περιλένιο	191-24-2	Αθροιστικά=0,02
Ινδενο(1,2,3-γδ)πυρένιο	193-39-5	
Σιμαζίνη	122-34-9	1
Τετραχλωροαιθυλένιο	127-18-4	10
Τριχλωροαιθυλένιο	79-01-6	10
Ενώσεις τριβουτυλτίνης (κατιόν	36643-28-4	0,003
Τριχλωροβενζόλια (όλα ισομερή)	12002-48-1	0,4
Τριχλωρομεθάνιο	67-66-3	2,5
Τριφθοραλίνη	1582-09-8	0,03
Οξεία τοξικότητα στον οργανισμό δείκτη <i>Daphnia Magna</i> (πρίν από την απολύμανση)		1 Μονάδα Τοξικότητας (TU 50 ≤1

MA= Μη ανιχνεύσιμο

Τα όρια του Πίνακα 3.7 ισχύουν μόνο για ανακτημένα υγρά απόβλητα από εγκαταστάσεις επεξεργασίας αστικών λυμάτων με ισοδύναμο πληθυσμό μεγαλύτερο από 100,000 κατοίκους και για όλες τις περιπτώσεις υγρών βιομηχανικών αποβλήτων από βιομηχανίες που δεν περιλαμβάνονται στις κατηγορίες (ανεξαρτήτως μεγέθους βιομηχανικής δραστηριότητας) που αναφέρονται στην ΚΥΑ 5673/400/5.3.97. Η ελάχιστη συχνότητα δειγματοληψιών και αναλύσεων για τις παραμέτρους του Πίνακα 6 καθορίζεται σε 2 ανά έτος.

Ο Αριθμός μητρώου CAS (CAS registry number) είναι ένας μοναδικός αριθμός καταγραφής και ταυτοποίησης χημικών στοιχείων, χημικών ενώσεων, πολυμερών, βιολογικώνσκευασμάτων, μιγμάτων και κραμάτων. Αναφέρεται επίσης και ως CAS RNs ή CAS #s.

Σύμφωνα με την Ελληνική Εφημερίδα της Κυβέρνησης: ο αριθμός CAS είναι ο "Αριθμός Καταχώρησης της Υπηρεσίας *Chemical Abstract*", που είναι ενιαίος αναγνωριστικός αριθμός ειδικός για κάθε ουσία και τη δομή της. Ο αριθμός CAS είναι ειδικός για κάθε ισομερές και για κάθε άλας κάθε ισομερούς, εξυπακουσμένου ότι οι αριθμοί CAS για τα άλατα των ανωτέρω απαριθμούμενων ουσιών θα είναι διαφορετικοί από τους παρεχόμενους.

Η Υπηρεσία Χημικής Ταυτοποίησης, *Chemical Abstracts Service*, (CAS), τμήμα της Αμερικάνικης Χημικής Εταιρείας, αποδίδει αυτούς τους αριθμούς μητρώου σε κάθε χημική ουσία που έχει αναφερθεί στη βιβλιογραφία. Η πρόθεση είναι να γίνονται ευκολότερες οι έρευνες σε βάσεις δεδομένων, καθώς οι χημικές ουσίες έχουν συχνά πολλά ονόματα. Σχεδόν όλες οι βάσεις δεδομένων χημικών ουσιών σήμερα επιτρέπουν την αναζήτηση με βάση τον αριθμό CAS.

Μέχρι τις 15 Μαρτίου 2010 υπήρχαν 52.429.231 οργανικές και ανόργανες ουσίες και 61.688.865 αλληλουχίες καταγραφής του CAS. Κάθε εβδομάδα προστίθενται περίπου 50.000 νέοι αριθμοί.

Η CAS διατηρεί επίσης και πωλεί μια βάση δεδομένων με αυτές τις χημικές ουσίες, γνωστή ως *μητρώο CAS*, (CAS registry). Περιέχει επίσης πληροφορίες σχετικά με τις πολλές διαφορετικές μορφές των ουσιών που έχουν αναφερθεί κατά τη διάρκεια των ετών στην επιστημονική βιβλιογραφία: Κράματα, Ενώσεις συναρμογής (σύμπλοκα), Ορυκτά, Μείγματα, Πολυμερή, Άλατα.

#### **4. ΤΟ ΕΥΡΥΤΕΡΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΤΩΝ ΕΡΓΩΝ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΥ**

(κύριες βιβλιογραφικές πηγές: ASCE, 1987, Πλιάκας, 1998)

Για να αναπτυχθεί, να λειτουργήσει και να συντηρηθεί ένα έργο εμπλουτισμού οικονομικά και αποτελεσματικά, θα πρέπει να είναι σωστά σχεδιασμένο. Οι κοινωνικοπολιτικές, υδρογεωλογικές και γεωλογικές συνθήκες στις υποψήφιες περιοχές εφαρμογής θα πρέπει να ληφθούν σοβαρά υπόψη. Αυτές οι συνθήκες μπορεί να περιορίσουν τον αριθμό των κατάλληλων μεθόδων τεχνητού εμπλουτισμού που θα εφαρμοστούν και να επηρεάσουν την κατασκευή, λειτουργία και συντήρηση του έργου. Ένας σημαντικός παράγοντας που καθορίζει τη λειτουργία του έργου είναι η ικανότητα διήθησης. Αν και το ποσοστό της εξαρτάται πρωταρχικά από το έδαφος και τις γεωλογικές συνθήκες της συγκεκριμένης περιοχής, οι υδρολογικές και οι κοινωνικοπολιτικές συνθήκες έχουν μεγάλο ποσοστό επιρροής.

##### **4.1. Κοινωνικοπολιτικές συνθήκες**

Η κοινωνική ανάπτυξη στην περιοχή του έργου θα έχει αποφασιστική επιρροή στο κόστος του συγκεκριμένου έργου. Αυτό, με τη σειρά του είναι ανάλογο του οικονομικού προϋπολογισμού του έργου και της επιλογής μεθόδου εμπλουτισμού. Θα πρέπει να δοθεί βάρος στα δικαιώματα χρήσης νερού. Γενικά, όπου η περιοχή εμπλουτισμού είναι κοντά σε κατοικημένη περιοχή, θα πρέπει να αναπτυχθούν τεχνικές ελέγχου του διαθέσιμου νερού για κατάκλιση. Αυτές οι τεχνικές περιλαμβάνουν κατασκευή και λειτουργία γεωτρήσεων εμπλουτισμού, τάφρων και λεκανών. Τα αναχώματα, όπου χρησιμοποιούνται, θα πρέπει να σχεδιάζονται έτσι ώστε να εμποδίζονται οι διαφυγές νερού. Θα πρέπει να υπάρχει περίφραξη για την προστασία των ιδιοκτησιών και τον περιορισμό ανεξέλεγκτης εισόδου στο έργο (όπως παιδιών, με κίνδυνο πνιγμού). Επίσης θα πρέπει να υπάρχει συνεχής έλεγχος και συντήρηση για την μείωση της δυσοσμίας και των εντόμων. Σε κατοικημένες περιοχές θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και η σχετική χρήση του νερού εμπλουτισμού και για αναψυχή.

Στις αγροτικές περιοχές, οι τεχνικές πλημμύρας και η χρήση του επιφανειακού νερού κατά την διάρκεια του χειμώνα αποτελούν μια άλλη μέθοδο εμπλουτισμού. Άλλες μέθοδοι εμπλουτισμού που δεν χρησιμοποιούν κατασκευές ελέγχου, θα πρέπει να περιορίζονται μόνο σε απομακρυσμένες περιοχές, όπου οι ζημιές από ανεξέλεγκτη ροή δεν αποκτούν μεγάλο βάρος. Η διατήρηση περιοχών φυσικού εμπλουτισμού είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική σε περιπτώσεις που έτσι προλαμβάνεται κάποια επέκταση αστικής περιοχής ή άλλης μορφής ανάπτυξη στις περιοχές αυτές που μπορεί να μειώσει τους επιθυμητούς ρυθμούς εμπλουτισμού.

## 4.2. Επιφανειακές υδρολογικές συνθήκες

Η ποσότητα, η ποιότητα και ο χαρακτήρας του νερού εμπλουτισμού θα πρέπει να εξετάζονται προσεκτικά. Μαζί με την επιλογή της τοποθεσίας και της μεθόδου τεχνητού εμπλουτισμού, η ποσότητα που είναι διαθέσιμη για τον εμπλουτισμό είναι ένας ακόμα σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει το μέγεθος του έργου.

Ο όγκος του διαθέσιμου νερού μπορεί να παρουσιάζει αυξομειώσεις μέσα σε μια μικρή χρονική περίοδο ή να διατηρείται σταθερός για μεγάλο χρονικό διάστημα. Αυτό μπορεί να ελεγχθεί από τη μελέτη των καταγεγραμμένων παροχών της επιλεγμένης πηγής τροφοδοσίας. Γενικά, αυξομειώσεις στις απορροές από καταιγίδες δημιουργούν προβλήματα στην αποτελεσματική λειτουργία του έργου, αφού μεγάλοι όγκοι νερού που περιέχουν υψηλές συγκεντρώσεις ιλύος και φερτών θα πρέπει να διευθετηθούν σε ένα σχετικά μικρό χρονικό διάστημα. Παράγοντες καλής λειτουργίας ίσως να απαιτούν και παράκαμψη νερών κακής ποιότητας, αν έτσι διατηρούνται σταθερά τα ποσοστά διήθησης.

Στην περίπτωση αυξομειούμενης ροής, μπορούν να χρησιμοποιηθούν όλες οι μέθοδοι κατάκλυσης. Μεγάλες αυξομειώσεις διευθετούνται καλύτερα, με την αύξηση της ικανότητας αποθήκευσης του έργου. Οι τεχνικές της λεκάνης και των φρεάτων έχουν το πλεονέκτημα της προσωρινής αποθήκευσης νερού, που εξαρτάται φυσικά από την επιφάνεια κάλυψης και το βάθος του νερού. Αντίθετα, οι γεωτρήσεις εμπλουτισμού έχουν μικρή ικανότητα αποθήκευσης και απαιτούν μια σχετικά ομοιόμορφη τροφοδοσία νερού υψηλής χημικής, βιολογικής και φυσικής ποιότητας.

Η ποιότητα του νερού, και ιδιαίτερα η περιεκτικότητα σε ιλύ και άργιλο, έχει μεγάλη σημασία για την επιλογή της τοποθεσίας και της μεθόδου εμπλουτισμού. Και αυτό επαληθεύεται στις γεωτρήσεις εμπλουτισμού, όπου θα πρέπει να αφαιρείται σχεδόν όλη η ιλύς και η άργιλος για επιτυχημένη λειτουργία. Η ποιότητα του νερού που χρησιμοποιείται σε βαθιά φρέατα και ορύγματα, χωρίς κάποια πρόβλεψη απομάκρυνσης της ιλύος, θα πρέπει να είναι σχετικά καλή. Αρκετά καλή ποιότητα νερού προϋποθέτουν και τα έργα με λεκάνες. Αντίθετα, σε καλά σχεδιασμένα έργα με τάφρους και αύλακες μπορούν να χρησιμοποιούνται νερά με υψηλή περιεκτικότητα σε ιλύ και άργιλο.

## 4.3. Υδρογεωλογικές συνθήκες

Όπου πρόκειται να χρησιμοποιηθούν επιφανειακές μέθοδοι εμπλουτισμού, η επιλογή της θέσης ή η εκτίμηση της αποτελεσματικότητας κάποιας περιοχής θα πρέπει να βασίζονται στη λεπτομερή γνώση των γεωλογικών συνθηκών. Οι φυσικές ιδιότητες των επιφανειακών και υποεπιφανειακών αποθέσεων καθορίζουν, σε ένα μεγάλο βαθμό, τις ικανότητες διήθησης που μπορούν να επιτευχθούν και τους όγκους νερού που θα εμπλουτίσουν τους υδροφόρους. Επιπλέον, η θέση των γεωλογικών σχηματισμών και των υποεπιφανειακών αποθέσεων, οι οποίες μπορεί να σχηματίζουν ολικό ή μερικό εμπόδιο στην κίνηση του νερού και η θέση και η υδραυλική κλίση της υπάρχουσας στάθμης ή πιεζομετρικής επιφάνειας, επηρεάζουν την αποτελεσματικότητα και καταλληλότητα ενός έργου τεχνητού εμπλουτισμού.

Το νερό που κατεισδύει, πρέπει να περάσει μέσα από τις επιφανειακές αποθέσεις, πριν φτάσει στη στάθμη του υπόγειου νερού. Γι' αυτό το λόγο, οι ιδιότητες των διαφόρων εδαφών είναι κρίσιμες στον καθορισμό των αρχικών και υφιστάμενων ικανοτήτων διήθησης. Οι σημαντικότερες χημικές, φυσικές και βιολογικές ιδιότητες του εδάφους είναι: (1) δομή, (2) διαπερατότητα, (3) εμφανίσεις αργιλικών στρωμάτων ή άλλων αδιαπέρατων σχηματισμών στον υπεδαφικό ορίζοντα, (4) βάθος του εδαφικού προφίλ, (5) οργανικά υλικά, (6) βαθμός συμπύκνωσης από χρήση κατασκευαστικού εξοπλισμού (7) χημική αλληλεπίδραση ανάμεσα στο έδαφος και το νερό. Γενικά, όσο πιο χονδρόκοκκη είναι η δομή των επιφανειακών αποθέσεων, τόσο μεγαλύτερη είναι και η αρχική ικανότητα διήθησης. Σε πολλές περιπτώσεις, η ύπαρξη αργιλικών στρωμάτων είναι το μεγαλύτερο εμπόδιο στην επίτευξη μεγάλων ικανοτήτων διήθησης.

Στις δυτικές πολιτείες των Η.Π.Α, τεχνικές εμπλουτισμού εφαρμόζονται σε χαλαρούς αλλουβιακούς κώνους και αλλουβιακές πεδιάδες. Παρακάτω δίνονται σύντομες περιγραφές των φυσιογραφικών χαρακτηριστικών αυτών των εδαφών:

- Αλλουβιακοί κώνοι (ριπίδια): σχηματίζονται εκεί, όπου τα υδατορεύματα εγκαταλείπουν το κεκλιμένο ορεινό τμήμα τους και εισέρχονται στην πεδιάδα, όπου αποθέτουν το μεγαλύτερο μέρος των ιζημάτων που μεταφέρουν. Οι περιοχές της κορυφής των αλλουβιακών κώνων αποτελούνται από παλαιότερα υλικά ή ροές λάσπης και άλλα ελάχιστα διαβαθμισμένα υλικά, με αποτέλεσμα η μέση υδραυλική αγωγιμότητα να είναι σημαντικά μικρότερη από εκείνη των αποθέσεων του κατάντη τμήματος των αλλουβιακών κώνων. Το κατώτερο τμήμα των κώνων αποτελείται από λεπτομερή υλικά και η υδραυλική αγωγιμότητα είναι μικρή, το δε ενδιαμέσο, ανάμεσα στην κορυφή και το πόδι τους, είναι το πιο ενδιαφέρον από υδρογεωλογική άποψη (Καλλέργης, 1986).
- Υδρόρευμα αλλουβιακού ριπιδίου: το τμήμα του αλλουβιακού ριπιδίου, που περιέχει την πρόσφατη ή ενεργή κοίτη. Περιλαμβάνει επίσης το τμήμα του ριπιδίου, στο οποίο θα είχε σχηματιστεί η κοίτη εάν το ρεύμα δεν ήταν διευθετημένο από παρέμβαση του ανθρώπου.
- Παράκτια πεδιάδα: η ευρεία, σχετικά επίπεδη και ήπιας κλίσης περιοχή, που σχηματίζεται και ελέγχεται από ένα ρεύμα ή ποτάμι που την διασχίζει. Η παράκτια περιοχή χαρακτηρίζεται από μια επιφάνεια αποθέσεων που εξαρτάται από το επίπεδο της θάλασσας και τελειώνει στην αιγιαλίδα ζώνη.
- Ηπειρωτικές αλλουβιακές πεδιάδες: ευρείες κοιλάδες, που συχνά περιέχουν χαλαρά ιζήματα σε μεγάλο βάθος.

Πέρα από την επιρροή των γεωλογικών σχηματισμών, ο καθορισμός της ικανότητας διήθησης, της ικανότητας μέγιστης αποθήκευσης και του ρυθμού βέλτιστης μεταφοράς του υπόγειου νερού από το σημείο εμπλουτισμού στα υπόλοιπα μέρη του υδροφορέα, βασίζεται σε ποικίλα φυσικά και δομικά χαρακτηριστικά των αποθέσεων κάτω από την επιφάνεια. Τα σημαντικά αυτά χαρακτηριστικά που θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη είναι:

1. Ο φυσικός χαρακτήρας και η διαπερατότητα των αποθέσεων πάνω από την υπόγεια στάθμη. Αυτό καθορίζει την επιτρεπόμενη ικανότητα διήθησης.
2. Η διαπερατότητα, η ειδική απόδοση, η πυκνότητα των αποθέσεων, η θέση και η επιτρεπόμενη διακύμανση της υπόγειας στάθμης. Αυτοί οι παράγοντες καθορίζουν την ικανότητα αποθήκευσης στην περιοχή της μελέτης.
3. Η μεταβιβαστικότητα του υδροφορέα και οι υδραυλικές κλίσεις της υπόγειας στάθμης. Αυτοί οι παράγοντες επηρεάζουν την ταχύτητα κίνησης του υπόγειου νερού από τα σημεία εμπλουτισμού προς τους υπόγειους υδροφορείς.
4. Τα υπεδασικά δομικά και λιθολογικά όρια της περιοχής έρευνας, που μπορεί να αποτελέσουν εμπόδια τόσο στην οριζόντια όσο και στην κατακόρυφη κίνηση του υπόγειου νερού.
5. Η χημική σύσταση του υπάρχοντος υπόγειου νερού και αυτή του νερού εμπλουτισμού θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη, για να ελαχιστοποιούνται προβλήματα σχετικά με πιθανές χημικές αντιδράσεις και φαινόμενα ανταλλαγής ιόντων.

## 5. ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ ΔΙΗΘΗΣΗΣ

(κύριες βιβλιογραφικές πηγές: ASCE, 1987, Πλιάκας, 1998)

Ένα από τα σπουδαιότερα προβλήματα που έχει σχέση με την εκτίμηση μιας τεχνητά εμπλουτιζόμενης περιοχής είναι ο καθορισμός της ικανότητας διήθησης. Τέτοιες ικανότητες είναι κρίσιμες, γιατί το μέγεθός τους μπορεί να καθορίσει τη μέθοδο εμπλουτισμού, την έκταση της περιοχής εμπλουτισμού καθώς και τις τεχνικές λειτουργίας και συντήρησης του έργου εμπλουτισμού.

Πολλοί παράγοντες επηρεάζουν την ικανότητα διήθησης σε μια μελέτη τεχνητού εμπλουτισμού. Φυσικοί παράγοντες είναι η σύσταση του επιφανειακού εδαφικού υλικού, οι γεωλογικές και οι υπόγειες υδρολογικές συνθήκες που αναλύθηκαν παραπάνω. Η ποιότητα του νερού και οι διαδικασίες που ακολουθούνται στην κατασκευή, λειτουργία και συντήρηση των έργων εμπλουτισμού, επηρεάζουν επίσης την ικανότητα διήθησης, αν και μπορούν να ρυθμιστούν έτσι ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή ικανότητα.

Από τους παράγοντες που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο, ο πιο σημαντικός είναι αυτός που αφορά τις εδαφικές και γεωλογικές συνθήκες της περιοχής εμπλουτισμού. Για παράδειγμα, στο ανώτερο τμήμα των αλλουβιακών κώνων όπου οι επιφανειακές αποθέσεις αποτελούνται κυρίως από άμμο, χαλίκια και κροκάλες επιτυγχάνονται υψηλές έως μέτριες ικανότητες διήθησης. Παρόλα αυτά, οι μεγαλύτερες τιμές διήθησης δεν εμφανίζονται απαραίτητα στην κορυφή των αλλουβιακών κώνων, όπου τα χαλίκια και οι κροκάλες κυριαρχούν στις επιφανειακές αποθέσεις, αλλά εμφανίζονται συχνότερα στο κατώτερο τμήμα του αλλουβιακού στρώματος όπου κυριαρχεί άμμος ομοιόμορφης κοκκομετρικής διαβάθμισης και το ποσοστό των κενών προς τη συνολική μάζα των επιφανειακών αποθέσεων είναι μέγιστο. Το ενδιάμεσο τμήμα των αλλουβιακών στρωμάτων χαρακτηρίζεται από αμμώδη εδάφη με διάφορες προσχώσεις και άργιλο και δίνει μέτριες ή χαμηλές ικανότητες διήθησης.

Διηθήμετρα και εμπειρικά σχεδιαγράμματα έχουν χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά για τον καθορισμό των χαρακτηριστικών διήθησης στα επιφανειακά εδάφη μιας περιοχής. Για δεδομένη ποιότητα νερού και δεδομένο τύπο υλικού, η ικανότητα διήθησης εξαρτάται από τη διάρκεια της περιόδου του εμπλουτισμού, την κατάσταση του εδάφους, τη διάρκεια της περιόδου ξηρασίας της περιοχής. Ωστόσο, πρέπει να δίνεται μεγάλη προσοχή στην αναγωγή των πειραματικών μετρήσεων σε τιμές που θα χρησιμοποιηθούν στο έργο. Γενικά, έχει βρεθεί ότι η αρχική ικανότητα διήθησης θα μειωθεί ραγδαία, συνοδευόμενη με μια άνοδο κοντά στην αρχική της τιμή, μετά την οποία, μια σταδιακή συνεχής μείωση θα εμφανιστεί μέχρι οι λεκάνες να συντηρηθούν. Η γνωστή καμπύλη της ικανότητας διήθησης σχήματος (S) εξηγείται παρακάτω (Muckel, 1959):

1. Αρχικά, ο ρυθμός εμπλουτισμού μειώνεται με το χρόνο. Αυτό αποδίδεται στη διασπορά και διόγκωση των κόκκων του εδάφους.
2. Η αύξηση της διαπερατότητας που ακολουθεί την αρχική μείωση, οφείλεται στην εκδίωξη του παγιδευμένου στο έδαφος αέρα. Ο αέρας αυτός διαλύεται αργά στο νερό που περνά μέσα από το έδαφος.
3. Η σταδιακή μείωση της διαπερατότητας που ακολουθεί, οφείλεται κυρίως σε βιολογικές διεργασίες μέσα στο έδαφος.

Σημαντικές πληροφορίες για την ικανότητα διήθησης σε διάφορες μελέτες τεχνητού εμπλουτισμού ανά τον κόσμο είναι διαθέσιμες. Στις περισσότερες περιπτώσεις όμως, η συσχέτιση των ικανοτήτων είναι δύσκολη λόγω ελλειπών στοιχείων που έχουν σχέση με συγκεκριμένους παράγοντες, όπως γεωλογικές και υδραυλικές συνθήκες, τύπος και μέγεθος έργου, μέθοδος επεξεργασίας του νερού εμπλουτισμού και άλλα σχετικά στοιχεία. Ωστόσο, μια μελέτη που έγινε στην Καλιφόρνια, έχει υποδείξει ένα είδος συσχέτισης μεταξύ της ικανότητας διήθησης και της κλίσης του εδάφους, του επιφανειακού εδάφους και των υποεπιφανειακών γεωλογικών συνθηκών. Τα αποτελέσματα της μελέτης αυτής συνοψίζονται στην παρακάτω παράγραφο για χρήση

τους ως οδηγού για την εκτίμηση της πιθανής ικανότητας διήθησης για προτεινόμενα έργα τεχνητού εμπλουτισμού.

Αφού η ικανότητα διήθησης ποικίλλει με το χρόνο, η μεγάλης διάρκειας ικανότητα διήθησης έχει επιλεγεί για να εξηγή τις επιδράσεις της φυσικής κλίσης του εδάφους, της επιφάνειας του εδάφους και των φυσιογραφικών θέσεων. Η μεγάλης διάρκειας ικανότητα διήθησης (I) ορίζεται ως η ικανότητα που θα υπάρχει, μετά την κατάκλυση με νερό εμπλουτισμού για μια περίοδο δύο έως τεσσάρων εβδομάδων και εξαρτάται από τις επιφανειακές και υπεδαφικές συνθήκες της περιοχής. Ορίζοντας έτσι την ικανότητα, θεωρείται ότι η διήθηση δεν θα επηρεάζεται από τη δημιουργία υβώματος κάτω από την επιφάνεια κατάκλυσης. Πληροφορίες για τη μεγάλης διάρκειας ικανότητα διήθησης έχουν συλλεχθεί από περίπου 100 έργα τεχνητού εμπλουτισμού στην Καλιφόρνια των Η.Π.Α. Τα περισσότερα από αυτά τα έργα εντοπίζονται σε αλλουβιακά ριπίδια και αλλουβιακές πεδιάδες, όπου η δομή του εδάφους κυμαίνεται από λεπτόκοκκες έως πολύ χονδρόκοκκες άμμοις. Στοιχεία για τον υπολογισμό τιμών μεγάλης διάρκειας ικανότητας διήθησης έχουν συλλεχθεί επίσης από έργα εμπλουτισμού σε χαμηλές αλλουβιακές περιοχές κυρίως ιλυώδους έως αργιλοπηλώδους σύστασης.

Το είδος του εδαφικού υλικού μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως οδηγός για την εκτίμηση της ικανότητας διήθησης που αναμένεται στην περιοχή του έργου. Γενικά, έχει βρεθεί ότι όσο πιο χονδρόκοκκη είναι η δομή του εδάφους τόσο υψηλότερη είναι και η τιμή της ικανότητας διήθησης. Οι τύποι του εδάφους μπορούν να αναγνωριστούν από διαθέσιμους γεωλογικούς χάρτες ή από επί τόπου εδαφοτεχνική έρευνα.

Γενικά, για δεδομένη φυσική κλίση του εδάφους, η μεγάλης διάρκειας ικανότητα διήθησης είναι σχετικά μεγαλύτερη για έργα που γίνονται σε υδρορεύματα αλλουβιακών ριπιδίων, απ' ό,τι σε έργα πάνω σε άλλα τμήματα των αλλουβιακών ριπιδίων. Η μεγάλης διάρκειας ικανότητα διήθησης για έργα εμπλουτισμού σε πλημμυρικά πεδία είναι σχετικά υψηλή, πράγμα που μπορεί να σχετίζεται με τη συντήρηση υψηλών προδιαγραφών των συγκεκριμένων έργων.

Αφού το νερό περάσει την επιφανειακή ζώνη, οι υποεπιφανειακές υδρογεωλογικές συνθήκες είναι αυτές που επηρεάζουν την ικανότητα διήθησης και οι οποίες θα πρέπει να ερευνηθούν διεξοδικά, για να μπορέσουμε να ορίσουμε την ολική ικανότητα αποθήκευσης και την ταχύτητα της κίνησης του νερού, από το σημείο εμπλουτισμού στην ευρύτερη περιοχή.

Παράλληλα με την επίδραση του τύπου του εδάφους στη μεγάλης διάρκειας ικανότητα διήθησης, βρέθηκε ότι για έργα που βρίσκονται σε συγκεκριμένη γεωγραφική θέση, η ικανότητα γενικά αυξάνει αυξανόμενης της φυσικής κλίσης του εδάφους μέχρι μια μέγιστη τιμή, μετά από την οποία αυξανόμενες κλίσεις έχουν ως αποτέλεσμα τη μείωση της ικανότητας διήθησης. Η μεγαλύτερη τιμή μεγάλης διάρκειας ικανότητας διήθησης εμφανίζεται προφανώς σε αποθέσεις υδρορευμάτων αλλουβιακών ριπιδίων, όπου η φυσική κλίση του εδάφους είναι περίπου 3,5%. Όσο η κλίση αυξάνει πάνω από αυτή την τιμή, η μεγάλης διάρκειας ικανότητα διήθησης γενικά μειώνεται. Παρόμοια σχέση υπάρχει και σε άλλα τμήματα των αλλουβιακών κώνων, όπου οι μέγιστες ικανότητες διήθησης εμφανίζονται για φυσική κλίση εδάφους περίπου 4,5%. Οι ικανότητες διήθησης σε παράκτιες επίπεδες περιοχές αυξάνουν με την αύξηση της κλίσης και η μέγιστη ικανότητα εμφανίζεται για φυσική κλίση εδάφους περίπου 0,85%. Είναι αρκετά συχνές μέσες τιμές ικανότητας διήθησης, περίπου της τάξης των 150 mm ανά ημέρα για φυσικές κλίσεις εδάφους που κυμαίνονται μεταξύ 0,1% και 0,3%.

Μια άλλη μελέτη τεχνητού εμπλουτισμού στην ανατολική San Joaquin Valley στην Καλιφόρνια επεξεργάστηκε περιοχές με επιφανειακές κλίσεις εδάφους από 0,1% μέχρι 10% που είχαν ποικίλα φυσιογραφικά χαρακτηριστικά, και περιελάμβανε πολλούς από τους κοινούς τύπους εδαφών. Βρέθηκε ότι η σχέση μεταξύ ικανότητας διήθησης και εδαφικής κλίσης μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$I = 2,14 + 1,85 \log S \quad (5.1)$$



Έτσι, για μια κλίση S 10%, η μεγάλης διάρκειας ικανότητα διήθησης I θα είναι περίπου 1,2 m την ημέρα. Η μελέτη της Καλιφόρνια απέδειξε ότι όλες οι καμπύλες (που σχηματίστηκαν από τα δεδομένα) έχουν ως ανώτατο όριο:

$$I = 4,29 + 3,26 \log S \quad (5.2)$$

και ως κατώτατο όριο:

$$I = 0,67 + 0,78 \log S \quad (5.3)$$

Οι σχέσεις αυτές μπορούν να εφαρμοστούν και σε άλλες περιοχές, όμως οι συντελεστές πιθανώς να διαφέρουν.

## 6. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΕΡΓΩΝ ΤΕΧΝΗΤΟΥ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΥ

(κύριες βιβλιογραφικές πηγές: ASCE, 1987, Πλιάκας, 1998)

Τα έργα Τ.Ε. πρέπει να σχεδιάζονται και να κατασκευάζονται έτσι ώστε να ικανοποιούν τις κατά περίπτωση αναγκαίες απαιτήσεις σε σχέση με το ελάχιστο και λογικό δυνατό κόστος, παίρνοντας επίσης υπόψη και τις ανάλογες περιβαλλοντικές δεσμεύσεις και ιδιαιτερότητες της κάθε περιοχής εφαρμογής. Η έννοια των έργων αυτών μπορεί να ποικίλει από μια πολύπλοκη προσεχτικά καλοσχεδιασμένη και εφαρμόσιμη μελέτη έως ένα αρκετά απλό σχήμα εφαρμογής στην ύπαιθρο. Στις περισσότερες περιπτώσεις μια ή ένας συνδυασμός από τις βασικές μεθόδους Τ.Ε. επιλέγεται για την ικανοποίηση των εκάστοτε αναγκών (ASCE, 1987).

Γενικά, τα πλέον σύνθετα έργα Τ.Ε. θα μπορούσαν να είναι κατάλληλα για τη συλλογή, την παροχέτευση και την κατάκλυση ή τον εμπλουτισμό μέσα από πηγάδια νερού με σχετικά συνεχή παροχή σε πυκνοκατοικημένες περιοχές, ενώ πιο απλά σχήματα εφαρμογής Τ.Ε. ενδείκνυνται σε περιοχές αγροτικές ή αστικές μη αναπτυσσόμενες.

Το μέγεθος των έργων Τ.Ε. εξαρτάται από την ικανότητα διήθησης (infiltration capacity) και το ρυθμό κατείσδυσης του επιφανειακού νερού προς το υπέδαφος στην περιοχή εφαρμογής και την ταχύτητα παροχέτευσης του νερού εμπλουτισμού προς την περιοχή εφαρμογής. Παρόλα αυτά, σε μερικά έργα όπως με τις μεθόδους ορυγμάτων και εκσκαφών, το μέγεθος εξαρτάται από την έκταση των εκσκαφών, ενώ σε άλλες απλές εφαρμογές, το μέγεθος μπορεί να είναι τόσο μεγάλο όσο επιτρέπει η έκταση της περιοχής έρευνας (ASCE, 1987).

Η γενική σχέση που συνδέει την ικανότητα διήθησης και το μέγεθος των έργων Τ.Ε. είναι:

$$A = \frac{Q}{I} \quad (6.1)$$

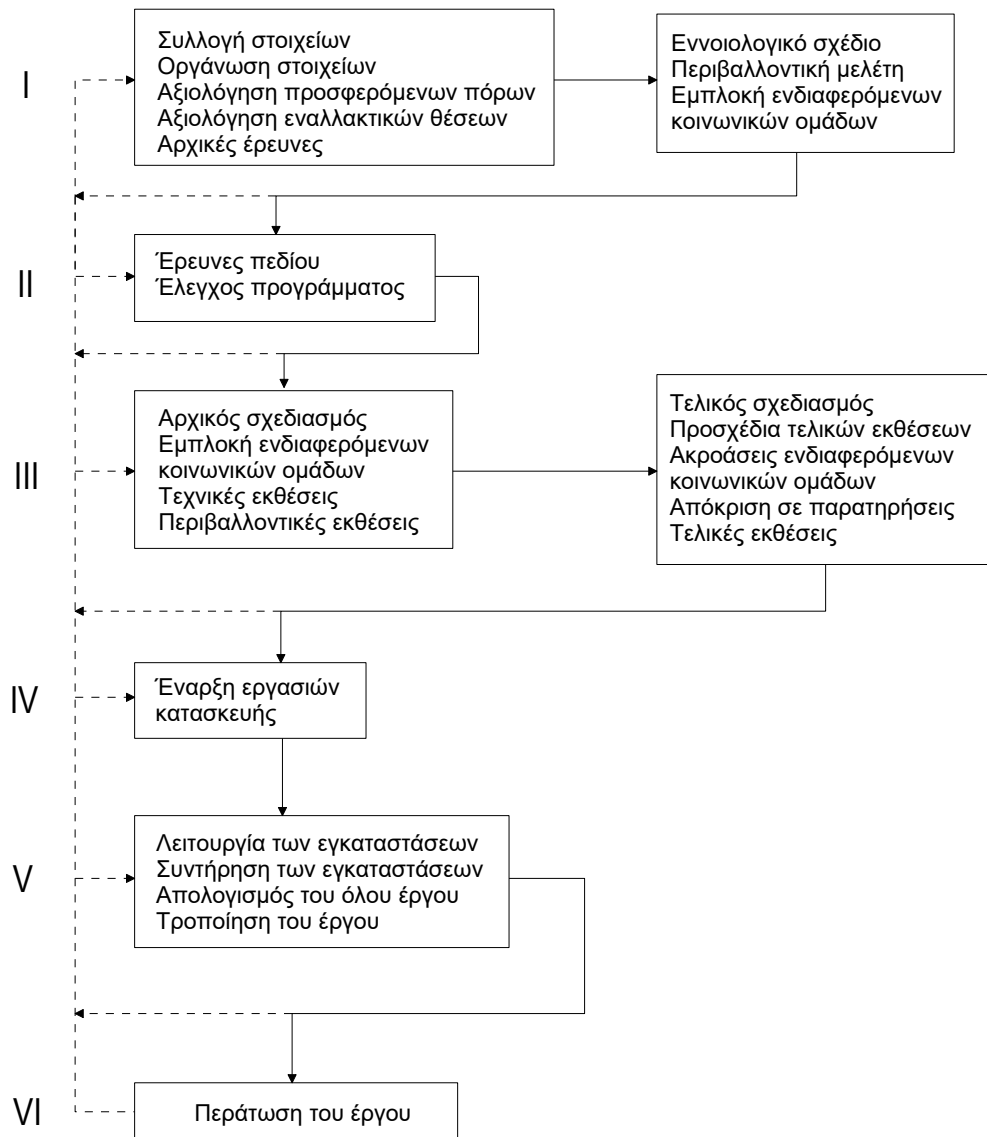
όπου:

A : η έκταση που διαβρέχεται από το νερό εμπλουτισμού [ $L^2$ ],

Q : η διαθέσιμη ποσότητα νερού που παροχετεύεται προς το έργο εμπλουτισμού [ $L^3T^{-1}$ ]

I : η μεγάλης διάρκειας ικανότητα διήθησης στην περιοχή του έργου εμπλουτισμού μετά από μια περίοδο κατάκλυσης 2-4 εβδομάδων (long-time infiltration capacity) [ $LT^{-1}$ ].

Η πορεία των εργασιών στο πλαίσιο του σχεδιασμού, της λειτουργίας και της συντήρησης ενός έργου Τ.Ε. παρουσιάζεται στο σχεδιάγραμμα του σχ. 6.1.

**ΦΑΣΗ****ΕΙΔΟΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ**

Σχήμα 6.1. Σχεδιάγραμμα εργασιών στο πλαίσιο του σχεδιασμού, της λειτουργίας και της συντήρησης ενός έργου τεχνητού εμπλουτισμού (ASCE, 2001).

Συνήθως κάποια παράλληλα με αυτά τα κύρια έργα του Τ.Ε. κατασκευάζονται με σκοπό (ASCE, 1987):

- την εκτροπή του νερού από την πηγή τροφοδοσίας,
- τη βελτίωση της ποιότητας του νερού,
- τη μεταφορά του νερού στην περιοχή εφαρμογής του εμπλουτισμού,
- τη διατήρηση και έλεγχο της συνεχούς ροής του νερού μέσα στην έκταση της περιοχής εμπλουτισμού,
- τη διατήρηση και λειτουργία του όλου έργου εμπλουτισμού σε επαρκή και ασφαλή επίπεδα,
- σε μερικές περιπτώσεις, τη μεταφορά του νερού που μπορεί να περισσεύει από τη διαδικασία εμπλουτισμού πίσω στην πηγή τροφοδοσίας.

Ο σχεδιασμός και η μελέτη των σύνδρομων αυτών έργων στηρίζεται σε υδραυλικές και υδρολογικές αρχές, και εξαρτάται από τις ιδιότητες των διαθέσιμων στην περίπτωση δομικών υλικών.

Οι λεπτομέρειες της οργάνωσης και λειτουργίας και διαχείρισης έργων Τ.Ε. ποικίλλουν ανάλογα με το είδος του έργου, το σκοπό του, την επιλεγμένη μέθοδο εφαρμογής, τα χαρακτηριστικά του νερού εμπλουτισμού και τη διαπερατότητα της περιοχής έρευνας. Επίσης ιδιαίτερη φροντίδα πρέπει να δίνεται στην πρόληψη προβλημάτων που έχουν σχέση με το φαινόμενο clogging, τα διάφορα ζιζάνια, τρωκτικά και κουνούπια, τη διατήρηση της ταχύτητα διήθησης σε επαρκή επίπεδα, τη συντήρηση των διαφόρων κατασκευών όπως και τα ζητήματα ασφάλειας.

Σε περιοχές όπου δεν υπάρχει προηγούμενη εμπειρία εφαρμογής τεχνητού εμπλουτισμού, θα πρέπει να προηγείται η κατασκευή ενός μικρού πιλοτικού έργου για να αποκτηθεί η σχετική εμπειρία και να συνταχθούν τα κατάλληλα κριτήρια για την πλήρη εφαρμογή και διαχείριση του έργου. Έτσι θα αποφευχθούν λάθη που στοιχίζουν χρήμα, χρόνο, και περικλείουν κινδύνους μόλυνσης του υδροφορέα (Bouwer, 1989).

Ακόμα και κάτω από ευνοϊκές συνθήκες για την κατασκευή και λειτουργία έργων τεχνητού εμπλουτισμού, είναι δύσκολο να προβλεφθεί πώς θα λειτουργήσουν, μακροπρόθεσμα, τα έργα αυτά. Γι' αυτό κρίνεται αναγκαία η εκτέλεση προσεκτικών πειραμάτων για την εξαγωγή των συμπερασμάτων εκείνων που θα βοηθήσουν στη σωστή επιλογή των κατάλληλων έργων που κρίνονται απαραίτητα για τη μόνιμη εφαρμογή του τεχνητού εμπλουτισμού (Price et al., 1965).

Ένα ερευνητικό πρόγραμμα Τ.Ε. κρίνεται σκόπιμο να διαρκεί περί τα πέντε χρόνια, στη διάρκεια των οποίων πρέπει να παρακολουθούνται τα πειράματα και να συλλέγονται και να διατυπώνονται όλα τα απαραίτητα στοιχεία για τις υδρογεωλογικές παραμέτρους του υδροφόρου, την ποιότητα του νερού του υδροφόρου, τα τεχνικά, οικονομικά και διαχειριστικά χαρακτηριστικά της εφαρμογής εμπλουτισμού (Diede, 1989).

Ο Βαφειάδης (1995) αναφέρει τα παρακάτω:

Κατά τον Foxworthy (1970), στην πρώτη φάση ενός ερευνητικού προγράμματος τεχνητού εμπλουτισμού των υδροφόρων στρωμάτων, πρέπει να εξετάζονται τα παρακάτω:

- συγκέντρωση και μελέτη της σχετικής βιβλιογραφίας
- η επάρκεια νερού για τον εμπλουτισμό,
- η ποιότητα των νερών εμπλουτισμού και υδροφόρου,
- η γεωλογία, στρωματογραφία, τεκτονική και μορφολογία της περιοχής,
- το υδρολογικό καθεστώς της ευρύτερης περιοχής,
- νομικά προβλήματα χρήσης ή μεταφοράς του νερού εμπλουτισμού,
- οι υδρογεωλογικές συνθήκες της περιοχής, όπως:
  - τύποι υδροφόρων (ελεύθεροι, υπό πίεση),
  - γεωμετρικά χαρακτηριστικά των υδροφόρων, κοκκομετρία, παροχές γεωτρήσεων κ.λ.π.,
  - μετρήσεις της υπόγειας στάθμης νερού και σύνταξη χαρτών ισοπιεζομετρικώνκαμπυλών,
  - προσδιορισμός των υδραυλικών παραμέτρων των υδροφόρων στρωμάτων,
  - κατάσταση εκμετάλλευσης των υπόγειων νερών,
  - συνθήκες τροφοδοσίας και μελέτη των αδιαπέρατων ορίων του υδροφόρου,
- επιλογή των ενδεικνυόμενων μεθόδων εμπλουτισμού και προϋπολογισμός κατασκευής ενός ή περισσότερων πιλοτικών έργων για εκτέλεση πειραμάτων εμπλουτισμού,
- διερεύνηση της τυχόν απαιτούμενης επεξεργασίας του νερού πριν χρησιμοποιηθεί για εμπλουτισμό, καθώς και υπόδειξη του τρόπου καθαρισμού του.

Τα αντικείμενα μελέτης της δεύτερης φάσης ενός ερευνητικού προγράμματος μπορεί να είναι:

- η εκτέλεση δοκιμαστικής άντλησης πριν από κάθε πείραμα εμπλουτισμού μέσω γεωτρήσεων για τον προσδιορισμό των υδραυλικών παραμέτρων του υδροφόρου, καθώς και μετά το πέρας του πειράματος εμπλουτισμού για τον προσδιορισμό τυχόν επίδρασης του εμπλουτισμού πάνω στη γεώτρηση και τον υδροφόρο,
- η εκτέλεση πειραμάτων τεχνητού εμπλουτισμού για τον προσδιορισμό:
  - των ποσοτήτων νερού εμπλουτισμού που δέχεται ο υδροφόρος χωροχρονικά,
  - της πορείας ανόδου της στάθμης νερού στη γεώτρηση εμπλουτισμού και στα πιεζόμετρα,
  - των μεταβολών της ειδικής παροχής εμπλουτισμού συναρτήσει του χρόνου και του όγκου του νερού εμπλουτισμού,
  - των προβλημάτων που μπορεί να προκύψουν, κυρίως λόγω clogging στο έργο εμπλουτισμού,
- πριν και μετά το πείραμα εμπλουτισμού, λήψη δειγμάτων νερού απ' τον υδροφόρο για να εξετασθεί πιθανή αλλαγή της ποιότητας του νερού του υδροφόρου λόγω εμπλουτισμού.

Οι λεπτομέρειες και η οργάνωση των έργων τεχνητού εμπλουτισμού, ποικίλλουν ανάλογα με το σκοπό του έργου, την τοποθεσία του, τη μέθοδο που χρησιμοποιείται και τα χαρακτηριστικά του νερού. Οπωσδήποτε, ένας αριθμός βασικών λειτουργικών προβλημάτων μπορεί να προβλεφθεί όπως η ιλύς, η βλάστηση, τα τρωκτικά ζώα, τα κουνούπια, η διατήρηση των ικανοτήτων διήθησης και η συντήρηση των κατασκευών. Μερικά από αυτά τα προβλήματα, οι εκδηλώσεις τους, και οι τρόποι αντιμετώπισης τους, συνοψίζονται στον Πίνακα 6.1.

Θα πρέπει να δίνονται οδηγίες για τη λειτουργία του έργου από το τμήμα μηχανικών της εταιρίας που ανέλαβε το έργο. Συγκεκριμένες οδηγίες λειτουργίας είναι πολύ χρήσιμες για το προσωπικό συντήρησης, ειδικά όταν το έργο είναι μεγάλο και περίπλοκο και όταν η τροφοδοσία είναι περιοδική όπως η διόδευση πλημμυρικής απορροής. Τέτοιες οδηγίες πρέπει να περιλαμβάνουν, εκτός των άλλων, το σκοπό του έργου, ένα ξεκάθαρο προσδιορισμό των καθηκόντων και των ευθυνών του προσωπικού λειτουργίας, οδηγίες σχετικές με τη ρύθμιση του ρυθμού εισροής και εκροής, απαρίθμηση των στοιχείων που θα μετρηθούν, λεπτομέρειες για τη χρήση των συσκευών μετρήσεων και οδηγίες για την χρήση του ειδικού εξοπλισμού. Επιπλέον οι οδηγίες πρέπει να περιλαμβάνουν τις ενέργειες εκείνες που πρέπει να γίνουν σε περιπτώσεις κινδύνου ή καταστροφών.

Σε μια περιοχή όπου η τροφοδοσία μελετάται συνεχώς, οι λειτουργίες για το σχεδιασμό και την κατασκευή του έργου προσδιορίζονται επαρκώς. Το προσωπικό που θα εργαστεί στον εμπλουτισμό συνήθως διορίζεται σε μόνιμη βάση και η λειτουργία συχνά είναι ρουτίνα. Κάτω από αυτές τις συνθήκες η συντήρηση ενός έργου είναι στενά συνδεδεμένη με τη λειτουργία του και ο σχεδιασμός πρέπει να περιλαμβάνει μια μικρή χρονική περίοδο όπου θα διακόπτεται η λειτουργία του έργου για να γίνει η απαραίτητη συντήρηση του εξοπλισμού και της κατασκευής, ώστε να διατηρηθούν έτσι οι τιμές τις ικανότητας διήθησης στο μέγιστο. Για μια τέτοια λειτουργία, είναι γενικά επιθυμητό να γίνεται μια επεξεργασία του νερού πριν τον εμπλουτισμό. Ο αριθμός και η διάρκεια των περιόδων διακοπής της τροφοδοσίας θα πρέπει να υπολογιστεί έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η μέγιστη ικανότητα διήθησης.

Πίνακας 6.1. Προβλήματα που εμφανίζονται κατά το σχεδιασμό, τη λειτουργία και τη διατήρηση έργων φυσικού εμπλουτισμού - επιφανειακού τύπου (ASCE, 1987).

ΠΡΟΒΛΗΜΑ (1)	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ (2)	ΔΙΟΡΘΩΤΙΚΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΕΣ (3)
Ιλύς	Συσσώρευση κόκκων σε μικρορωγμές σε μικρό βάθος από την επιφάνεια του εδάφους με αποτέλεσμα την μείωση της διαπερατότητας.	Χρήση νερού που να μην έχει μεγαλύτερη θολερότητα από 25 μονάδες Jackson. Χρήση λεκανών ή σύστημα λεκανών καθίζησης για απομάκρυνση της ιλύος. Παράκαμψη του νερού, μέχρι η συγκέντρωση ιλύος στο νερό να είναι κατάλληλη για τον συγκεκριμένο τύπο εδάφους. Οι τάφροι μπορούν γενικά να δεχτούν νερά με μεγαλύτερη συγκέντρωση σε ιλύ, αρκεί να διατηρείται ικανοποιητική ταχύτητα στο έργο για να μεταφέρεται η ιλύς πίσω στο κύριο κανάλι. Απόξεση ή σβάρνισμα μετά την αποξήρανση. Η περίοδος αποξήρανσης κυμαίνεται γύρω στις 1 με 7 μέρες και εξαρτάται από τις καιρικές συνθήκες και αυτές του εδάφους. Αφαίρεση της ιλύος μετά την αποξήρανση. Η ιλύς μπορεί να χρησιμοποιηθεί για κατασκευή αναχωμάτων στις λεκάνες και τις τάφρους. Διατήρηση της βλάστησης. Άδειασμα της ιλύος από τις τάφρους και τα αυλάκια για περιορισμό της διάβρωσης.
Ζιζάνια	Αύξηση του ρυθμού κατείδυσης και περιορισμός της περιόδου αποξήρανσης που απαιτείται για εργασίες αφαίρεσης ιλύος από τη λεκάνη. Κίνδυνος πυρκαγιάς από τη φυτική κάλυψη.	Έλεγχος με χημικά μέσα ή αφαίρεση τους όταν υπάρχει πιθανότητα πυρκαγιάς, ειδικά γύρω από την κατασκευή. Χρήση χειροκίνητων μέσων και όχι μηχανοκίνητων για τη συντήρηση της ικανότητας διήθησης. Διατήρηση της φυτικής κάλυψης σε βρεχόμενες περιοχές, αν αυτό είναι δυνατό. Παρατεταμένες συνθήκες έντονης πλημμύρας θα καταστρέψει τη βλάστηση.
Τρωκτικά	Διαρροές και κατάρρευση φραγμάτων και αναχωμάτων. Δημόσιος κίνδυνος κοντά σε κατοικημένη περιοχή.	Δηλητήριο δύο φορές το χρόνο. Χρήση παγίδων. Τοποθέτηση πινακίδων όταν χρησιμοποιούνται δηλητηριώδη χημικά.
Κουνούπια	Δημόσιος κίνδυνος.	Χρήση χημικών ή αποξήρανση για την καταπολέμησή τους.
Ασφάλεια	Αλλαγές στην ποιότητα του νερού που θα ήταν βλαβερές στην υγεία.	Περιοδικές χημικές αναλύσεις με ειδική και συχνή δειγματοληψία σε περιπτώσεις αλλαγής της ποιότητας του εισερχόμενου νερού και μετά από φυσικά και καταστροφικά γεγονότα, όπως διοχέτευση χημικών στα ανάντη. Χημικές αναλύσεις θα πρέπει να γίνονται για ανίχνευση επιβλαβών χημικών χαρακτηριστικών.
	Πιθανά ατυχήματα ατόμων. Η πιθανότητα ατυχήματος είναι μεγαλύτερη, όταν το βάθος του νερού είναι μεγάλο.	Περίφραξη της περιοχής. Περιπολία της περιοχής πριν και κατά την διάρκεια των εργασιών.

<p>Διατήρηση της ικανότητας διήθησης.</p>	<p>Μείωση της ικανότητας κατείσδυσης θα μειώσει την αποδοτικότητα του συστήματος, αυξάνοντας τη μονάδα κόστους του εμπλουτιζόμενου νερού.</p>	<p>Κατάλληλη επεξεργασία του νερού. Απολάσπωση του νερού μέχρι την επιθυμητή συγκέντρωση. Προγραμματισμός ενδιάμεσων περιόδων αποξήρανσης για να αποφευχθούν προβλήματα διόγκωσης στο έδαφος. Ανάπτυξη της βλάστησης για τη μείωση της περιόδου αποξήρανσης, μετατοπίζοντας το νερό στο ριζικό υπόστρωμα και χαλαρώνοντας το έδαφος. Μελέτες έδειξαν ότι το χόρτο bermuda χρησιμοποιήθηκε με επιτυχία στη διατήρηση του ποσοστού, ακόμα και σε παρατεταμένες συνθήκες πλυμμήρας. Αύξηση του φορτίου του νερού γενικά με την αύξηση του βάθους του. Χρήση χειροκίνητων μηχανημάτων, ώστε να αποφεύγεται ο βαρύς εξοπλισμός που θα συμπύκνωνε το έδαφος, ιδιαίτερα όταν αυτό είναι βρεγμένο. Απόξεση και σβάρνισμα μετά την απαραίτητη περίοδο αποξήρανσης. Διατήρηση της ταχύτητας σχεδιασμού, για τη μείωση της ποσότητας ιλύος που συσσωρεύεται στα κανάλια και τις τάφρους. Έλεγχος της πιθανότητας χημικών αντιδράσεων στη βάση. Το έδαφος μπορεί να αναδομηθεί, με τη χρήση οργανικών ουσιών ή χημικών στοιχείων.</p>
<p>Συντήρηση των έργων εκτροπής και έλεγχος.</p>	<p>Δυσμενείς επιπτώσεις στις εγκαταστάσεις και τις εργασίες κατάκλισης.</p>	<p>Συστηματική συντήρηση και περιπολία κατά τη διάρκεια των εργασιών. Έλεγχος των ξύλινων κατασκευών, αφού αυτές καταστρέφονται γρηγορότερα λόγω των συχνών κύκλων κατάκλισης και αποξήρανσης. Έλεγχος της καθίζησης των κατασκευών που αλλάζουν τις συνθήκες ροής. Έλεγχος για υποσκαφές των κατασκευών ιδιαίτερα στα κατάντη. Υδατοστεγές κανάλι για αφαίρεση ιλύος και μπαζών που συσσωρεύτηκαν κοντά στο έργο εκτροπής.</p>

Αντιθέτως, έργα εμπλουτισμού που χρησιμοποιούν ανεξέλεγκτα τα νερά των βροχοπτώσεων, αντιμετωπίζουν συνήθως περισσότερα λειτουργικά προβλήματα από έργα που λειτουργούν με ελεγχόμενη ροή. Το προσωπικό που εργάζεται σε τέτοιου είδους έργα δεν απαιτείται να βρίσκεται εκεί συνεχώς, παρά μόνο όταν υπάρξει βροχόπτωση και φυσικά απορροή. Συνήθως, η συντήρηση των εδαφών που χρησιμοποιήθηκαν για κατείσδυση βρόχινων νερών, δεν πρέπει να γίνεται σε περιόδους χρονικά κοντινές προς την περίοδο της λειτουργίας του έργου. Τα εδάφη αυτά είναι εκτός λειτουργίας το περισσότερο διάστημα του έτους, έτσι η αναγκαία από το σχέδιο συντήρηση μπορεί να γίνει κατά τις περιόδους αυτές.

Ένα πρόβλημα που παρουσιάζεται στα έργα τεχνητού εμπλουτισμού και προκαλεί μείωση της ικανότητας διήθησης, είναι η ιλύς. Το ποσοστό της ιλύος στο νερό τροφοδοσίας πρέπει να προσδιορίζεται και να ελέγχεται κατά τη διάρκεια του εμπλουτισμού. Έχει βρεθεί ότι η μέγιστη θολερότητα του νερού εμπλουτισμού δεν θα πρέπει να ξεπερνά τους 25 βαθμούς Jackson. Εάν είναι μεγαλύτερη, τότε θα πρέπει να μειωθεί με κάποιο μέσο το ποσοστό περιεκτικότητας σε ιλύ, διαφορετικά θα αναμένονται χαμηλές τιμές διήθησης. Η επιτρεπόμενη ποσότητα ιλύος στο νερό τροφοδοσίας ποικίλλει ανάλογα με τη μέθοδο κατάκλισης, την υπάρχουσα βλάστηση, την επιφάνεια του εδάφους και από το σχετικό κόστος για την απομάκρυνση της ιλύος από την περιοχή.

Κατά την εκτροπή νερού σε μια λεκάνη κατάκλισης για πρώτη φορά ή μετά από μεγάλη περίοδο μη λειτουργίας της, θα πρέπει να δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στο να γεμίζονται οι λεκάνες αργά, έτσι ώστε να αποτρέπονται οι καταστροφές σε κατασκευές του έργου. Επιπλέον, πρέπει να υπάρχει μια μόνιμη μονάδα, η οποία θα εντοπίζει και θα διορθώνει προβλήματα όπως διαρροή, διάβρωση, απόφραξη κ.α. Ενδεχόμενη αστοχία του έργου μπορεί να προκαλέσουν ακόμα και ζώα, τα οποία σκάβουν το έδαφος. Τα ζώα αυτά θα πρέπει να περιορίζονται εκτός των περιοχών αυτών.

## **7. ΟΙΚΟΝΟΜΟΤΕΧΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ ΤΕΧΝΗΤΟΥ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΥ**

(κύριες βιβλιογραφικές πηγές: ASCE, 1987, Πλιάκας, 1998)

Υπάρχουν σημαντικές και ποικίλες βιβλιογραφικές αναφορές που ασχολούνται με τα οικονομοτεχνικά στοιχεία της χρήσης του υπόγειου νερού (Brown et al., 1972, Burf, 1970, Cummings, 1970, 1971, 1974). Παρ' ότι το μεγαλύτερο μέρος αυτών των αναφορών ασχολείται με ειδικά προβλήματα της διαχείρισης των υπόγειων νερών, όπως για παράδειγμα τη διείσδυση αλμυρού νερού, εντούτοις προκύπτει ένας αριθμός κοινών αρχών που διέπουν τη χρήση και τη διαχείριση των υπόγειων νερών. Σαν γενικός κανόνας πάντως μπορεί να ειπωθεί ότι η βέλτιστη χρήση των υπόγειων νερών επιτελείται όταν έχουμε απόληψη νερού με ταχύτητες τέτοιες που τα καθαρά οφέλη (συνολικά οφέλη μείον το συνολικό κόστος) από τη χρήση αυξάνονται με το χρόνο (Vaux, 1985).

Το κόστος του εμπλουτισμού με επανεπεξεργασμένα απόβλητα ποικίλλει αρκετά, αφού οι ανάλογες εφαρμογές μπορεί να ποικίλουν από απλές εργασίες δευτερογενούς επεξεργασίας έως πολύπλοκα και προηγμένα συστήματα καθαρισμού, κυρίως σε εφαρμογές με πηγάδια εμπλουτισμού.

Σε μερικές περιπτώσεις εφαρμογής της ανάλογης μεθόδου, το κόστος αυτό φτάνει σε αρκετά ελκυστικά χαμηλά επίπεδα. Βέβαια αυτές οι περιπτώσεις είναι λίγες εξαιτίας του σοβαρού κόστους απαιτήσεων επεξεργασίας και μεταφοράς των αποβλήτων στην υποψήφια περιοχή εφαρμογής της μεθόδου (Asano, 1985, Vaux, 1985), όπως και το κόστος της γης και το κόστος λειτουργίας και συντήρησης των ανάλογων σύνδρομων έργων. Το κόστος ενός συστήματος φυσικής επεξεργασίας μέσω εδάφους-υδροφορέα, SAT (Soil-Aquifer Treatment System), είναι αρκετά πιο μικρό από το κόστος της φυσικής-χημικής επεξεργασίας αποβλήτων σε ένα προηγμένο σύστημα επεξεργασίας από το οποίο απολαμβάνεται νερό εφάμιλλης ποιότητας με την πρώτη περίπτωση (Bouwer, 1985).

Το κόστος εφαρμογής της μεθόδου με κατακλύσεις εξαρτάται από το πόσο μεγαλύτερη ταχύτητα διήθησης μπορεί να επιτευχθεί με τη λιγότερο δυνατή απαιτούμενη επιφάνεια

εφαρμογής. Άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν το κόστος λειτουργίας αποτελούν η αξία της γης, η αξία του νερού εμπλουτισμού, το κόστος των απαραίτητων κατασκευών και των έργων εκτροπής και το κόστος της επεξεργασίας του νερού για να καταστεί κατάλληλο για εμπλουτισμό. Ο καθαρισμός του νερού εμπλουτισμού με διήθηση στο υπέδαφος είναι σχετικά φτηνότερη διαδικασία αν συγκριθεί με τη διαδικασία καθαρισμού του νερού με άμεση απόληψη από την πηγή τροφοδοσίας όπως για παράδειγμα ένας ποταμός (Karanth, 1987). Επίσης η μέθοδος επιφανειακής κατάκλυσης είναι αρκετά πιο φτηνή από τη μέθοδο εμπλουτισμού με γεωτρήσεις (Bouwer, 1989)

Το συνολικό κόστος μιας εφαρμογής Τ.Ε. αποτελείται από τις δαπάνες για την απόκτηση ή χρήση της απαιτούμενης γης, για την κατασκευή των απαραίτητων έργων, την απόληψη νερού και τη λειτουργία και συντήρηση του όλου έργου. Το κόστος αυτό φαίνεται να ποικίλει ανάλογα με (United Nations Department of Economics and Social Affairs, 1975):

- το σκοπό του έργου,
- τη μέθοδο εμπλουτισμού που επιλέγεται,
- την ποσότητα και την ποιότητα του διαθέσιμου νερού για εμπλουτισμό, όπως και τις συνθήκες ροής του νερού,
- τις ιδιότητες του εδαφικού υλικού στην επιφάνεια και στο υπέδαφος,
- την τοποθεσία που επιλέγεται για εφαρμογή του εμπλουτισμού,
- τις δυνατότητες και τις απαιτήσεις των διαφόρων υπηρεσιών που εμπλέκονται στην όλη διαδικασία εφαρμογής.

Οι διάφορες μέθοδοι εμπλουτισμού παρουσιάζουν διαφορετικά οικονομικά στοιχεία. Στις μεθόδους εμπλουτισμού με πηγάδια το μεγαλύτερο ποσοστό του συνολικού κόστους οφείλεται:

- στο είδος των ανάλογων έργων παροχέτευσης του νερού,
- στο είδος των επιλεγμένων πηγαδιών,
- στο είδος του απαιτούμενου συνοδευτικού εξοπλισμού,
- στη λειτουργία και συντήρηση του όλου έργου, αφού η χρήση γεωτρήσεων εμπλουτισμού είναι από μόνη της αρκετά δαπανηρή διαδικασία.

Στις μεθόδους εμπλουτισμού με κατακλύσεις, το μεγαλύτερο ποσοστό του συνολικού κόστους οφείλεται:

- στη διαδικασία εκτροπής του νερού από τους ποταμούς,
- στη μεταφορά του νερού εμπλουτισμού από και προς την περιοχή εμπλουτισμού,
- στη μέτρηση της ποσότητας που εμπλουτίζεται,
- στη συγκράτηση του νερού εμπλουτισμού και στη ρύθμιση της ροής του στην περιοχή εμπλουτισμού,
- στην επαρκή και ασφαλή λειτουργία και συντήρηση των έργων εμπλουτισμού.

Κατά τη διαδικασία σχεδιασμού αλλά και της εφαρμογής των μεθόδων Τ.Ε. ανακύπτουν διάφορα ζητήματα σκοπιμότητας από νομική και οικονομική πλευρά. Συνήθως τα ερωτήματα που προκύπτουν και χρήζουν απάντησης είναι (O'Hare et al., 1986):

- Ποιος χρηματοδοτεί το έργο;
- Ποιος ωφελείται από την αποθήκευση του νερού;
- Ποιοι οργανισμοί ή υπηρεσίες έχουν τη δικαιοδοσία να κατασκευάσουν και να λειτουργήσουν το έργο; θα πρέπει ή όχι το νερό εμπλουτισμού να αναμιχτεί με το επιφανειακό νερό;
- Ποια είναι τα δικαιώματα και ποιες οι υποχρεώσεις αυτών που αποθηκεύουν υπόγεια το νερό;
- Η απαιτούμενη γη είναι διαθέσιμη και μέσα στα όρια των προδιαγραφών;
- Ποιες θα είναι οι επιπτώσεις του έργου στις συμφωνίες μεταξύ των αρμοδίων Δήμων ή Κοινοτήτων που αφορούν στη διάθεση του νερού και τον έλεγχο πιθανών πλημμυρών;



- Ποιες θα είναι οι επιπτώσεις στη χρήση γης, τον πληθυσμό και την τοπική οικονομία των περιοχών εμπλουτισμού;

## **8. ΥΔΡΑΥΛΙΚΑ, ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΑ, ΤΕΧΝΙΚΑ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΣΥΓΧΡΟΝΩΝ ΘΕΩΡΗΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΟΝ ΤΕΧΝΗΤΟ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟ**

(κύριες βιβλιογραφικές πηγές: Bouwer, 2002, ASCE, 2001, Πλιάκας, 2008)

### **8.1. Γενικά**

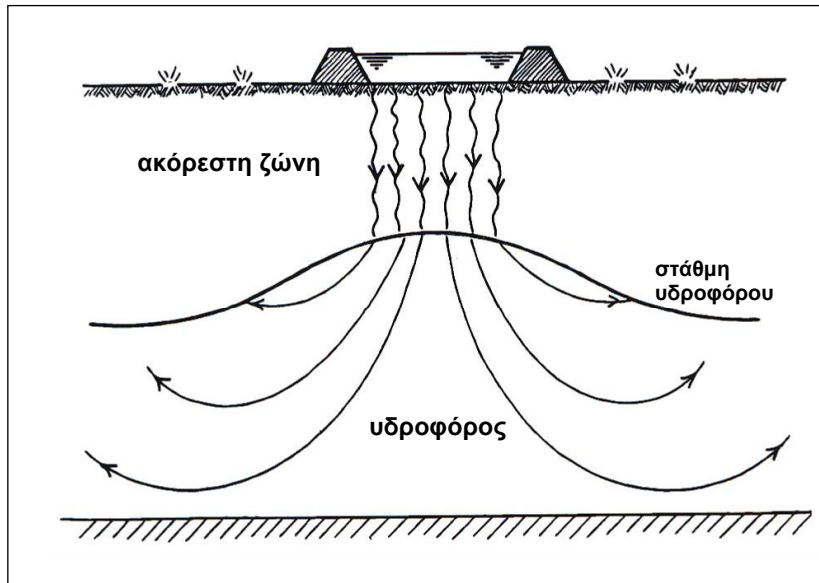
Ο τεχνητός εμπλουτισμός των υπόγειων νερών (Τ.Ε.) πετυχαίνεται διοχετεύοντας επιφανειακά νερά σε λεκάνες, αυλάκια, τάφρους ή άλλες εγκαταστάσεις, όπου το νερό διηθείται μέσα στο έδαφος και κινείται κατακόρυφα εμπλουτίζοντας τους υδροφόρους. Ο Τ.Ε. χρησιμοποιείται όλο και περισσότερο για βραχυπρόθεσμη ή μακροπρόθεσμη υπόγεια αποθήκευση, όπου υπερτερεί έναντι της επιφανειακής αποθήκευσης και της επαναχρησιμοποίησης του νερού. Ο Τ.Ε. απαιτεί διαπερατά επιφανειακά εδάφη. Όταν αυτά δεν υπάρχουν μπορούν να χρησιμοποιηθούν τάφροι ή φρεάτια στην ακόρεστη ζώνη ή το νερό μπορεί να εγχυθεί απευθείας στον υδροφόρο μέσω γεωτρήσεων. Για να σχεδιάσουμε ένα σύστημα Τ.Ε. των υπόγειων νερών πρέπει να προσδιορίσουμε τον ρυθμό διήθησης του νερού στο έδαφος και να ελέγξουμε αν η ακόρεστη ζώνη ανάμεσα στην επιφάνεια του εδάφους και στον υδροφόρο έχει ικανοποιητική διαπερατότητα και δεν υπάρχουν ρυπασμένες περιοχές. Ο υδροφόρος πρέπει να έχει την ικανότητα να μεταβιβάζει το επαρκώς νερό ώστε να μην δημιουργούνται εκτεταμένα υπόγεια υβώματα. Για να προσδιορίσουμε αυτές τις συνθήκες απαιτούνται έρευνες πεδίου και αν δεν έχουν εντοπισθεί σοβαρές ατέλειες, πρέπει να γίνονται έρευνες στις λεκάνες για να προβλέψουμε την απόδοση του συστήματος. Πρέπει επίσης να εξετάζεται η ποιότητα του νερού, ειδικά σε σχέση με το φαινόμενο της απόφραξης στον πυθμένα της λεκάνης ή σε άλλες επιφάνειες διήθησης, και τις γεωχημικές διεργασίες στον υδροφόρο. Η διαχειριστική αντιμετώπιση της απόφραξης πετυχαίνεται με απομάκρυνση των αιωρούμενων υλικών ή με άλλη επεξεργασία στο νερό και με διορθωτικές τεχνικές στο σύστημα της διήθησης, όπως ξήρανση, απόξεση, σβάρνισμα ή άροση. Οι γεωτρήσεις εμπλουτισμού πρέπει να αντλούνται περιοδικά για να απομακρύνονται τα υλικά της απόφραξης.

### **8.2. Εισαγωγή**

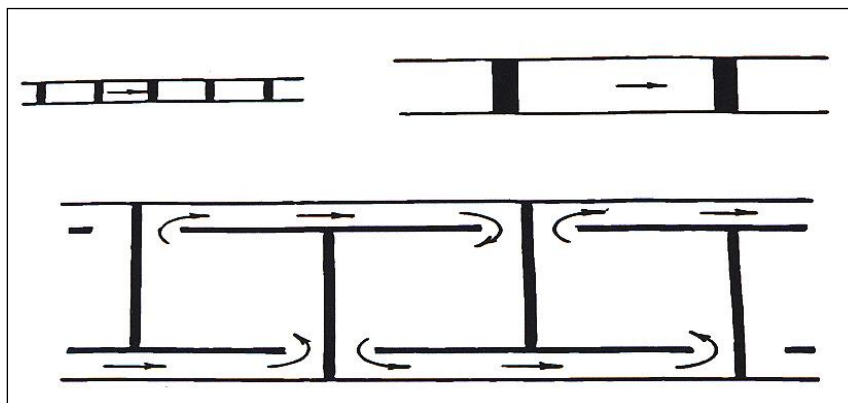
Τα συστήματα Τ.Ε. είναι εγκαταστάσεις όπου το επιφανειακό νερό διοχετεύεται επάνω ή μέσα στο έδαφος και κατεισδύοντας προς τον υδροφόρο εμπλουτίζει το υπόγειο νερό. Άλλοι σκοποί του Τ.Ε. είναι ο περιορισμός της διείσδυσης του θαλασσινού νερού ή της καθίζησης του εδάφους, η αποθήκευση του νερού, η βελτίωση της ποιότητας του νερού με φυσική επεξεργασία μέσω του συστήματος εδάφους-υδροφόρου, η χρήση του υδροφόρου ως συστήματος μεταφοράς νερού και η απόληψη υπόγειου νερού προερχόμενου από το επιφανειακό εκεί όπου το υπόγειο νερό παραδοσιακά προτιμάται από το επιφανειακό για ύδρευση. Η διήθηση και ο Τ.Ε. επιτυγχάνονται με την κατάκλυση ή τη ροή νερού στο έδαφος μέσω λεκανών, αυλακιών, τάφρων κ.α. (σχ. 8.1, 8.2), παροχετεύοντας νερό σε τάφρους ή φρεάτια στην ακόρεστη ζώνη (σχ. 8.3), ή διοχετεύοντας νερό σε γεωτρήσεις για απευθείας έγχυση νερού προς τον υδροφόρο. Άλλες μορφές Τ.Ε. των υπόγειων νερών περιλαμβάνουν φυσικό (natural recharge), επαυξημένο (enhanced recharge), επαγωγικό (induced recharge) και συμπτωματικό εμπλουτισμό (incidental recharge).

Ο φυσικός εμπλουτισμός (natural recharge) σχετίζεται με τις ποσότητες του υπόγειου νερού (μετεωρικού νερού) που προκύπτουν από το ισοζύγιο των εισροών νερού στο έδαφος (κατακρημνίσματα και διηθήσεις από ρέματα, λίμνες ή άλλα φυσικά σώματα

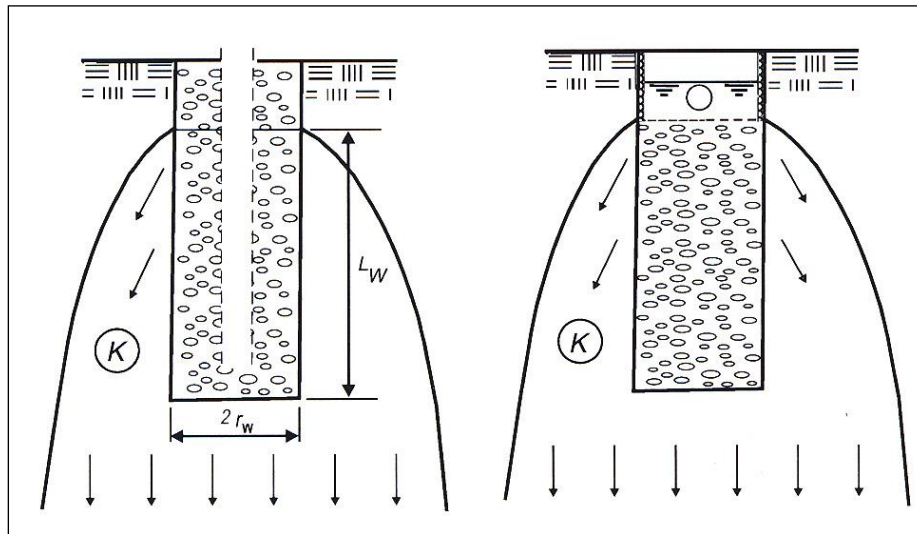
νερού) και εκροών (εξατμισοδιαπνοή και απορροή). Ο φυσικός εμπλουτισμός αποτελεί το 30–50% των κατακρημνισμάτων σε περιοχές με μέτριο υγρό κλίμα, 10-20% των κατακρημνισμάτων σε περιοχές με μεσογειακού τύπου κλίμα και περίπου 0-2% σε περιοχές με ξηρό κλίμα (Bouwer, 1989, 2000c, Tyler et al., 1996). Ο ρυθμός του φυσικού εμπλουτισμού εξαρτάται από την ηλικία του υπόγειου νερού, που μπορεί να είναι από μερικές ώρες ή μέρες σε πηγές με υγρά κλίματα ή σε πολύ ρηχούς υδροφόρους σε περιοχές με υψηλές βροχοπτώσεις, έως δεκάδες χιλιάδες χρόνια ή και παραπάνω σε περιοχές με ξηρό κλίμα και με υδροφόρους μεγάλου βάθους (Tyler et al., 1996) ή σε υπό πίεση υδροφόρους σε μεγάλες αποστάσεις από τις επιφανειακές πηγές εμπλουτισμού τους.



Σχήμα 8.1. Τομή ενός τυπικού συστήματος τεχνητού εμπλουτισμού με λεκάνη διήθησης (κατάκλυσης) και ύψωμα του υπόγειου νερού κάτω από τη λεκάνη (Bouwer, 2002).



Σχήμα 8.2. Κατόψεις συστημάτων διήθησης με κανάλια (in-channel infiltration systems) με χαμηλά μικρά φράγματα υπερχείλισης, κατασκευασμένα σε στενό κανάλι μεγάλης κλίσης (επάνω αριστερά), με μεγαλύτερα φράγματα σε πλατύτερο κανάλι πιο ήπιων κλίσεων (επάνω δεξιά) και με αναχώματα σχήματος T σε κανάλι μεγάλου πλάτους μηδαμινής κλίσης (κάτω) (Bouwer, 2002).



Σχήμα 8.3. Τομή φρεατίου εμπλουτισμού στην ακόρεστη ζώνη (αριστερά) (vadose-zone well) με αμμώδη ή χαλικώδη πλήρωση και κατακόρυφου διάτρητου σωλήνα παροχέτευσης νερού και τομή τάφρου εμπλουτισμού (δεξιά) (recharge trench) με επικάλυψη, πληρωμένη με αμμώδη ή χαλικώδη υλικά και σωλήνα παροχέτευσης νερού που επικάθεται της πλήρωσης. Τα βέλη απεικονίζουν τη ροή μέσα στη διαβρεγμένη ζώνη υδραυλικής αγωγιμότητας  $K$  (Bouwer, 2002).

Το υπόγειο νερό είναι ένας εξαιρετικά σημαντικός υδατικός πόρος, αφού αποτελεί παραπάνω από το 98% του καθαρού νερού παγκόσμια (Bouwer, 1978).

Ο επαυξημένος εμπλουτισμός (enhanced recharge) σχετίζεται με τη διαχείριση της βλάστησης ώστε να αντικατασταθούν τα φυτά με βαθιές ρίζες από φυτά με ρηχό ριζικό σύστημα ή με γυμνό έδαφος, ή να αντικατασταθούν με φυτά που συγκρατούν μικρότερη ποσότητα κατακρημνισμάτων με το φύλλωμά τους, ώστε να αυξηθεί η ποσότητα που κατεισδύει στο έδαφος. Σε δασώδεις περιοχές, για παράδειγμα, αυτό πετυχαίνεται αντικαθιστώντας τα κωνοφόρα δέντρα με φυλλοβόλα (Querner, 2000).

Ο επαγωγικός εμπλουτισμός (induced recharge) πετυχαίνεται μέσω γεωτρήσεων σχετικά κοντά σε ρέματα ή ποτάμια, έτσι ώστε περισσότερο νερό του ρέματος να 'έλκεται' προς τον υδροφόρο, καθώς η επιφάνεια του υπόγειου νερού χαμηλώνει κοντά στα ποτάμια λόγω της άντλησης των γεωτρήσεων. Ο κύριος στόχος αυτού του συστήματος (διήθησης μέσω όχθης – bank infiltration) είναι συχνά η προεπεξεργασία του νερού καθώς κινείται μέσα από τα υλικά του πυθμένα και τον υδροφόρο πριν αντληθεί και γίνει η συμβατική επεξεργασία του για να χρησιμοποιηθεί για ύδρευση. Αυτό το σύστημα χρησιμοποιείται όταν το νερό είναι μολυσμένο ή όταν οι πολίτες προτιμούν το υπόγειο από το επιφανειακό νερό (Kühn, 1999).

Ο συμπτωματικός εμπλουτισμός (incidental recharge) προκαλείται από ανθρώπινες ενέργειες που δεν έχουν ως αυτό καθαυτό στόχο τους τον εμπλουτισμό του υπόγειου νερού. Αυτές οι δραστηριότητες περιλαμβάνουν την απόθεση λυμάτων με διάφορους τρόπους και την αποστράγγιση ή βαθιά διήθηση νερού από τα αρδευόμενα εδάφη. Αυτή η αποστράγγιση του αρδευόμενου νερού είναι απαραίτητη για να αποφευχθεί η συσσώρευση αλάτων στη ριζική ζώνη. Στα ξηρά κλίματα, η αποστράγγιση πετυχαίνεται με τη διοχέτευση μεγαλύτερης ποσότητας νερού από αυτήν που απαιτείται για άρδευση (εξατμισοδιαπνοή ή αναγκαίες καταναλώσεις). Επειδή τα άλατα και οι χημικές προσμίξεις στο νερό άρδευσης αποπλένονται από τη ριζική ζώνη με αρκετά λιγότερο νερό από το διοχετευόμενο νερό άρδευσης, η περιεκτικότητα σε άλατα στο νερό αποστράγγισης είναι πολύ μεγαλύτερη από ό,τι στο νερό άρδευσης. Το γεγονός αυτό,

καθώς και η παρουσία γεωργικών και άλλων χημικών στο βαθιά διηθούμενο νερό που προέρχεται από τα αρδευόμενα εδάφη, υποβαθμίζει την ποιότητα του υπόγειου νερού (Bouwer et al., 1999a, Bouwer, 2000b).

Άλλη μορφή του συμπωματικού εμπλουτισμού σχετίζεται με την αστικοποίηση, όπου το μεγαλύτερο ποσοστό του εδάφους καλύπτεται από δρόμους, αυτοκινητόδρομους, κατοικίες και άλλες στεγανές επιφάνειες που δημιουργούν μεγαλύτερη απορροή και παρουσιάζουν εξατμισοδιαπνοή από τις φυσικές επιφάνειες. Αυτό το είδος του εμπλουτισμού είναι σημαντικό στις ξερές περιοχές, όπου η βροχή πέφτει σε μικρές ποσότητες που δεν κατεισδύουν στο έδαφος πολύ βαθιά και τελικά το περισσότερο νερό εξατμίζεται. Με την αστικοποίηση ωστόσο δημιουργείται μεγαλύτερη απορροή που μπορεί να συλλεχθεί για επί τόπου αποθήκευση και Τ.Ε. ή το νερό κινείται προς προσωρινά ρέματα όπου διηθούνται στο έδαφος και κατεισδύουν στο υπόγειο νερό (Lerner, 2002).

Ο Τ.Ε. αναμένεται να είναι ολοένα και περισσότερο απαραίτητος στο μέλλον καθώς ο συνεχώς αυξανόμενος πληθυσμός απαιτεί περισσότερο νερό και προκύπτει η ανάγκη αποθήκευσης του νερού σε περιόδους που πλεονάζει ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε περιόδους έλλειψης. Ο παραδοσιακός τρόπος αποθήκευσης νερού είναι με τα φράγματα. Εν τούτοις όμως οι καλές θέσεις για την κατασκευή φραγμάτων σπανίζουν. Επιπλέον τα φράγματα έχουν αρκετά μειονεκτήματα, όπως η απώλεια από εξάτμιση (σχεδόν 2 m το χρόνο σε ζεστά, ξηρά κλίματα), συσσώρευση ιζημάτων, πιθανότητα κατασκευαστικής αστοχίας, αύξηση της ελνοσίας, της σχιστοσωμίας και άλλων ανθρώπινων ασθενειών όπως και αρνητικές επιπτώσεις στο περιβάλλον, την οικολογία και τον πολιτισμό ενός τόπου (Devine, 1995, Knoppers and van Hulst 1995, Pearce, 1992). Καινούρια φράγματα είναι πλέον δύσκολο να κατασκευαστούν εξαιτίας του υψηλού κόστους και την αντίδραση των πολιτών. Γίνονται σκέψεις να καταστραφούν ορισμένα φράγματα, κάτι που δεν είναι εύκολο να πραγματοποιηθεί ιδιαίτερα αν το φράγμα είναι αρκετά μεγάλο και έχει πολλά παρελκόμενα, όπως υδροληψίες, παρόχθιες διαμορφώσεις κ.α (Tatro, 1999). Τα φράγματα εμπλέκονται με την οικολογία του ποταμού, και μπορούν να πλημμυρίσουν ευαίσθητες περιοχές θρησκευτικού, αρχαιολογικού, πολιτιστικού, περιβαλλοντικού, αναπλαστικού ενδιαφέροντος και σημασίας, όπως και φυσικού κάλλους. Οι κάτοικοι που ζουν στην περιοχή του ταμειυτήρα νέων φραγμάτων πρέπει να μετεγκατασταθούν. Τα φράγματα δεν μπορούν να διατηρηθούν για πολύ γιατί τα περισσότερα, αν όχι όλα, φράζονται από ιζήματα και εξαιτίας της εξάτμισης δεν είναι αποδοτικά για μακροχρόνια αποθήκευση νερού (χρόνια ή δεκαετίες). Αυτή η μακροχρόνια αποθήκευση νερού είναι εξαιρετικά χρήσιμη αφού η αύξηση του διοξειδίου του άνθρακα και άλλων αερίων της ατμόσφαιρας προκαλεί κλιματικές αλλαγές σε παγκόσμια κλίμακα που αυξάνουν τις πιθανότητες δημιουργίας ακραίων καιρικών φαινομένων, όπως πιο συχνές ξηρασίες και ακραίες βροχοπτώσεις. Οι παραπάνω συνθήκες καθώς και η αύξηση του πληθυσμού κάνουν πιο έντονη την ανάγκη για αποθήκευση νερού στις υγρές περιόδους ώστε να καλυφθούν οι ανάγκες σε νερό κατά τις ξηρές περιόδους.

Η υπόγεια αποθήκευση νερού μέσω του Τ.Ε. έχει το πλεονέκτημα της ουσιαστικά μηδενικής εξάτμισης από τον υδροφόρο. Συχνά οικονομικοί και άλλοι παράγοντες καθιστούν αυτή τη μέθοδο προτιμητέα. Για αυτούς τους λόγους η εφαρμογή του Τ.Ε. παρουσιάζει ραγδαία αύξηση σε πολλά μέρη του κόσμου.

Οι πηγές διάθεσης για τον τεχνητό εμπλουτισμό περιλαμβάνουν νερό από χείμαρρους μόνιμης ή εφήμερης ροής, που μπορεί να σχετίζονται ή όχι με φράγματα, απορροή καταιγίδων (περιλαμβάνονται νερά από αστικές περιοχές), υδραγωγεία, ή άλλα συστήματα μεταφοράς νερού, αρδευόμενες εκτάσεις, συστήματα επεξεργασίας πόσιμου νερού, όπως και συστήματα επεξεργασίας λυμάτων. Ο Τ.Ε. των υπόγειων νερών αναμένεται να παίξει σημαντικό ρόλο στην επαναχρησιμοποίηση του νερού με τη δυνατότητα φυσικής επεξεργασίας μέσα από το φυσικό σύστημα εδάφους-υδροφόρου. Η χρήση των συστημάτων αυτών κάνει το πόσιμο νερό αισθητικά πιο αποδεκτό στο κοινό σε περιπτώσεις χρήσης επεξεργασμένων αστικών λυμάτων για ενίσχυση των παροχών πόσιμου νερού. Ο εμπλουτισμός επίσης κάνει δυνατή την χρησιμοποίηση του

νερού σε περιπτώσεις όπου θρησκευτικοί περιορισμοί απαγορεύουν κάποιες χρήσεις “ακάθαρτου” νερού, όπως σε Ισλαμικές χώρες (Ishaq and Khan, 1997) και στη Νέα Ζηλανδία όπου οι Μαορί απαιτούν τα απόβλητα να περνούν μέσα από το έδαφος προτού καταλήξουν σε ποτάμια ή σε λίμνες.

Σε παγκόσμια κλίμακα το θαλασσινό νερό αποτελεί το 97 % ‘όλου του νερού στη γη (Bouwer, 1978). Από το υπόλοιπο γλυκό νερό τα δύο τρίτα είναι σε μορφή πάγου στην αρκτική και σε ορεινές τοποθεσίες. Από το υπόλοιπο ένα τρίτο, λιγότερο από το 2% είναι επιφανειακό νερό σε ποτάμια και λίμνες και αρκετό από αυτό τροφοδοτεί το υπόγειο νερό. Περισσότερο από το 98% του γλυκού νερού παγκόσμια είναι υπόγειο νερό. Το υπόγειο νερό όχι μόνο είναι ο κυρίαρχος υδατικός πόρος, αλλά και οι υδροφόροι προσφέρουν τεράστιες δυνατότητες υπόγειας αποθήκευσης νερού.

### **8.3. Συστήματα τεχνητού εμπλουτισμού**

#### **Συστήματα επιφανειακής διήθησης (surface infiltration)**

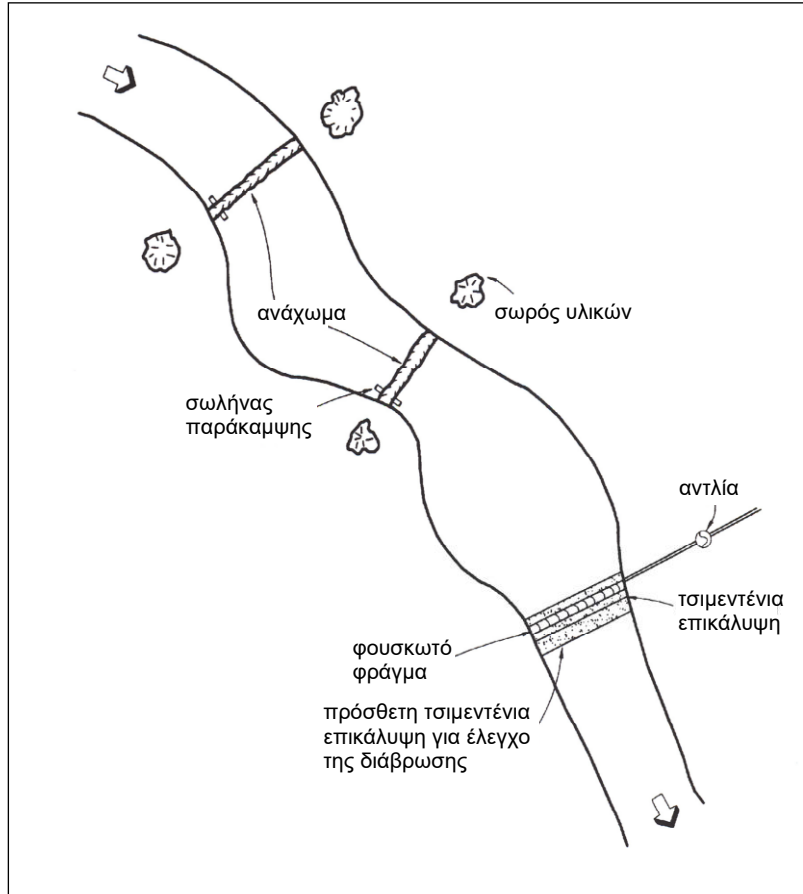
Τα συστήματα T.E. επιφανειακής διήθησης διακρίνονται σε συστήματα με κανάλια (in-channel) και συστήματα χωρίς κανάλια (off-channel). Τα συστήματα in channel αποτελούνται από φράγματα εγκάρσια σε χείμαρρους μόνιμης ή εφήμερης ροής για να συγκρατήσουν το νερό ώστε να αυξήσουν την υγρή περιοχή της κοίτης και να διηθείται περισσότερο νερό στο έδαφος και να κατεισδύει προς το υπόγειο νερό (σχ. 8.2, 8.4). Μερικά φράγματα είναι μικρά χαμηλά φράγματα σε μικρή απόσταση μεταξύ τους ή είναι μεγαλύτερα φράγματα που απέχουν περισσότερο (σχ. 26 επάνω). Τα μεγαλύτερα φράγματα συχνά χρειάζονται μεγαλύτερη ικανότητα υπερχειλίσης για τη διοχέτευση μεγάλων ροών. Συνήθως έχουν ένα τμήμα που παρασύρεται όταν υπάρχει μεγάλη ροή και αντικαθίσταται όταν περάσει ο κίνδυνος της πλημμύρας. Χρησιμοποιούνται μεταλλικά φράγματα, χωμάτινα, σκυροδέματος ή φουσκωτά ελαστικά. Τα τελευταία πληρώνονται με νερό ή αέρα, που συνήθως είναι προτιμότερος (σχ. 8.5). Η πίεση του αέρα είναι χαμηλή (σχεδόν 1,5 KPa). Όταν φουσκώνουν, κάποια ποσότητα νερού μπορεί να περάσει πάνω από το φράγμα, αλλά στις μεγάλες πλημμύρες ξεφουσκώνουν μέχρι το επίπεδο της θεμελίωσης. Εκεί όπου το κανάλια έχουν μικρή κλίση και μικρό βάθος νερού το νερό κατακλύζει ολόκληρο το εύρος του καναλιού αφού έχουμε τοποθετήσει αναχώματα σε σχήμα “T” ή “L” σε ύψος 1m μέσα στο κανάλι (σχ. 8.5, κάτω). Αυτά τα αναχώματα κατασκευάζονται με μπουλντόζες χρησιμοποιώντας φυσικά αμμώδη υλικά της κοίτης. Όταν τα αναχώματα παρασύρονται από μεγάλες ροές, μπορούν να επιδιορθωθούν με τις μπουλντόζες. Το σύστημα off-channel αποτελείται από ειδικά κατασκευασμένες λεκάνες διήθησης (σχ. 8.1), στέρνες, παλιά ορύγματα από χαλίκια, αρδευόμενες πλημμυρισμένες εκτάσεις, διάτρητους σωλήνες ή άλλες εγκαταστάσεις όπου το νερό τοποθετείται ή κατακλύζει το έδαφος ώστε να διηθηθεί σε αυτό και να κατεισδύσει προς το υπόγειο νερό.

Οι πηγές διάθεσης νερού για αυτά τα συστήματα πρέπει να είναι επαρκούς ποιότητας ώστε να αποφεύγεται η αδικαιολόγητη απόφραξη (clogging) της περιοχής που διηθείται, με απόθεση και συσσώρευση αιωρούμενων υλικών (ίζημα, φύκια και λάσπη), με το σχηματισμό βιοφίλμ και βιομάζας επάνω και μέσα στο έδαφος, με την καθίζηση του ανθρακικού ασβεστίου ή άλλων αλάτων μέσα και πάνω στο έδαφος και με το σχηματισμό αερίων που παγιδεύονται στο έδαφος, όπου φράζουν τους πόρους και μειώνουν την υδραυλική αγωγιμότητα. Τα αέρια πολλές φορές συσσωρεύονται κάτω από το στρώμα της απόφραξης όπου σχηματίζουν ένα στρώμα αέρα που εμποδίζει την ροή προς τα κάτω. Μία πηγή αυτών των αερίων είναι ο διαλυμένος αέρας στο νερό που διηθείται. Ο αέρας εξέρχεται από το διάλυμα:

1. καθώς η πίεση του νερού πέφτει από ένα πιεζομετρικό φορτίο ίσο με το βάθος του νερού πάνω από την επιφάνεια του εδάφους σε ένα αρνητικό πιεζομετρικό φορτίο στην ακόρεστη ζώνη κάτω από την ζώνη της απόφραξης, ή

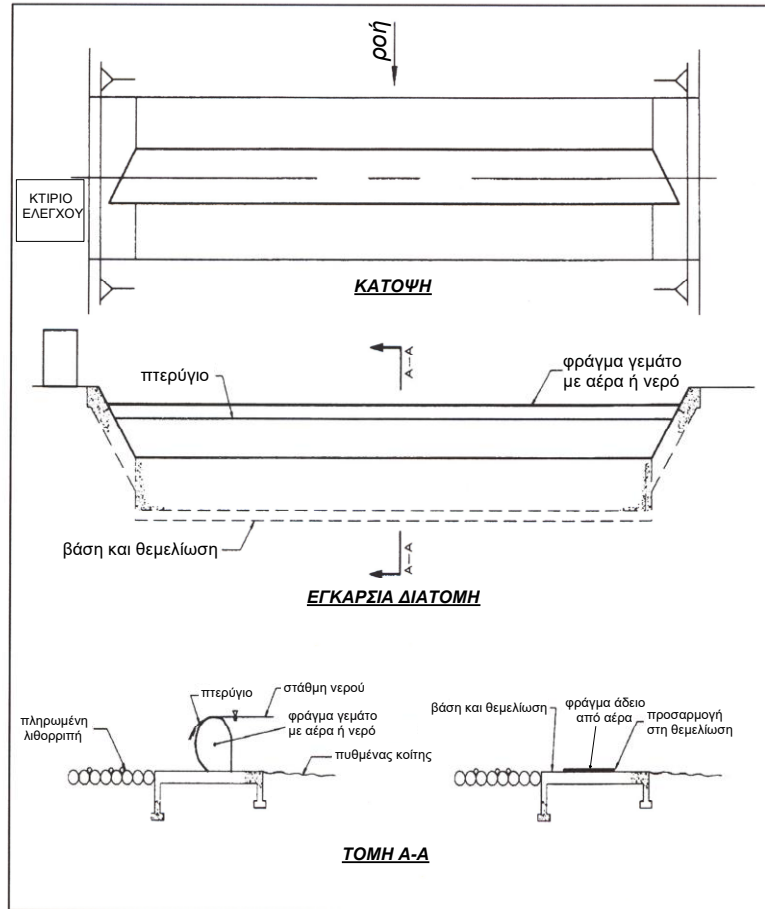
2. εκεί όπου το έδαφος ή ο υδροφόρος είναι πιο θερμός από το ίδιο το νερό που διηθείται.

Επίσης αέρια σχηματίζονται από μικροβιολογικές διεργασίες στο έδαφος, όπως αέριο αζώτου και μεθάνιο.



Σχήμα 8.4. Εφαρμογή τεχνητού εμπλουτισμού σε χείμαρρο (ASCE, 2001).

Το φαινόμενο της απόφραξης στην περιοχή της διήθησης και η συνέπεια του που είναι η ελάττωση του ρυθμού διήθησης είναι η αιτία καταστροφής όλων των συστημάτων Τ.Ε. (Baveye et al., 1998, Bouwer et al., 2001, Bower and Rice, 2001). Η προεργασία του νερού ώστε να μειωθούν τα αιωρούμενα υλικά, νιτρικά και ο οργανικός άνθρακας καθώς και η συστηματική αποξήρανση του συστήματος ώστε να αποξηρανθεί θρυμματιστεί το στρώμα απόφραξης όπως και να αφαιρεθεί το στρώμα αυτό είναι απαραίτητα για να μειωθούν οι συνέπειες της απόφραξης. Ωστόσο, ακόμα και αν απομακρυνθούν από το νερό τα παραπάνω υλικά το φαινόμενο της απόφραξης είναι πιθανό να συμβεί εξαιτίας της μικροβιολογικής ανάπτυξης στο νερό που διηθείται (Baveye et al., 1998). Για παράδειγμα, τέτοιου είδους απόφραξη έχει παρατηρηθεί σε εργαστηριακές μελέτες διήθησης στο σκοτάδι, με υψηλής ποιότητας νερό βρύσης (Bouwer and Rice, 2001).



Σχήμα 8.5. Φουσκωτό φράγμα σε κάτοψη, εγκάρσια διατομή και σε κατάσταση γεμάτο με νερό και αέρα, όπως και σε κατάσταση άδειο από αέρα (ASCE, 2001).

Τα επιφανειακά συστήματα διήθησης απαιτούν διαπερατά επιφανειακά εδάφη ώστε να αυξηθεί ο ρυθμός διήθησης και να μειωθούν οι απαιτήσεις σε διαθέσιμη γη. Όταν το διαπερατό υλικό βρίσκεται χαμηλότερα και το υπερκείμενο λιγότερο διαπερατό υλικό δεν έχει μεγάλο πάχος, το υπερκείμενο υλικό μπορεί να απομακρυνθεί, ώστε η βάση της λεκάνης να βρίσκεται στο πιο διαπερατό υλικό. Η ακόρεστη ζώνη δεν πρέπει να έχει στρώσεις αργίλου ή άλλα λεπτόκοκκα υλικά που μπορούν να περιορίσουν την κατείσδυση του νερού και να σχηματίσουν κρεμαστούς υδροφόρους αποστραγγίζοντας την περιοχή εμπλουτισμού και μειώνοντας έτσι το ρυθμό διήθησης. Οι κρεμαστοί υδροφόροι μπορούν να σχηματισθούν επάνω σε βραδυδροφόρα στρώματα (aquitards) όπου οι υδροφόροι είναι μερικώς υπό πίεση. Οι υδροφόροι πρέπει να είναι ελεύθεροι και με ικανοποιητική μεταβιβαστικότητα ώστε να διοχετεύσουν την πλευρική ροή του διηθούμενου νερού μακριά από την εμπλουτιζόμενη ζώνη χωρίς να σχηματίζονται μεγάλα υβώματα υπόγειου νερού που θα παρεμποδίζει τη διαδικασία διήθησης. Επίσης, το έδαφος, η ακόρεστη ζώνη και οι υδροφόροι πρέπει να είναι απαλλαγμένοι από ρυπαντές που μπορούν να μεταφερθούν με το νερό και να κινηθούν προς τον υδροφόρο ή σε άλλες περιοχές όπου είναι ανεπιθύμητοι.

### Συστήματα διήθησης στην ακόρεστη ζώνη (vadose-zone infiltration)

Σε περιπτώσεις όπου τα εδάφη δεν είναι αρκετά διαπερατά ή η περιοχή δεν είναι κατάλληλη για συστήματα επιφανειακής διήθησης (surface infiltration systems), ο εμπλουτισμός του υπόγειου νερού μπορεί να επιτευχθεί με σύστημα κατακόρυφης

διήθησης, όπως με τάφρους διήθησης ή εμπλουτισμού (infiltration or recharge trenches) ή φρεάτια διήθησης στην ακόρεστη ζώνη (vadose-zone wells). Οι τάφροι ανοίγονται με σκαπτικές μηχανές και συνήθως έχουν πλάτος μικρότερο από 1 m και βάθος περίπου 5 m (σχ. 8.3) Πληρώνονται με χονδρόκοκη άμμο ή με μικρά χαλίκια. Το νερό διοχετεύεται μέσω διάτρητων σωλήνων στην επιφάνεια της πλήρωσης και η τάφρος καλύπτεται για να ταιριάζει με το περιβάλλοντα χώρο. Για παράδειγμα, μια στρώση από επιφανειακό έδαφος για γρασίδι ή άλλα φυτά τοποθετείται στην κορυφή του γεμίματος για να ταιριάζει με το περιβάλλον τοπίο, ή πλάκες από σκυρόδεμα ή άλλη λιθόστρωση προστίθεται όπου η ευρύτερη περιοχή είναι πλακοστρωμένη. Οι τάφροι που γεμίζονται με άμμο έχουν ελεγχθεί σε αγροτικές περιοχές στην Ιορδανία για να συλλέγουν την επιφανειακή απορροή για βαθύτερη διήθηση στην ακόρεστη ζώνη (Abu-Zreif et al., 2000).

Τα φρεάτια στην ακόρεστη ζώνη (vadose-zone wells, ονομάζονται επίσης φρεάτιο-εμπλουτισμό-recharge shaft ή στεγνές γεωτρήσεις-dry wells) συνήθως κατασκευάζονται με τη βοήθεια εδαφολύπτη bucket auger και έχουν διάμετρο 1 m και βάθος μέχρι 60 m. Τα φρεάτια επίσης γεμίζονται με χονδρόκοκη άμμο ή λεπτά χαλίκια. Το νερό διοχετεύεται μέσω διάτρητων σωλήνων ή σωλήνων με φίλτρο στο κέντρο. Η ελεύθερη πτώση νερού σε αυτόν τον σωλήνα πρέπει να αποφεύγεται για να μην εισέλθει αέρας και παγιδευτεί στην πλήρωση και στο έδαφος γύρω από τη γεώτρηση. Για να γίνει αυτό το νερό διοχετεύεται από ένα μικρότερο σωλήνα μέσα στον διάτρητο σωλήνα που εκτείνεται σε ασφαλές βάθος κάτω από την επιφάνεια του νερού μέσα στο φρεάτιο. Μπορούν, επίσης, να εγκατασταθούν σωλήνες με διαφορετικές διαμέτρους. Το νερό σε αυτήν την περίπτωση διοχετεύεται μέσα από το σωλήνα όπου παρατηρείται ικανοποιητική απώλεια φορτίου για να αποφευχθεί η ελεύθερη πτώση νερού. Επίσης, μπορεί να τοποθετηθεί μια βαλβίδα με ειδικό στόμιο στον πυθμένα του σωλήνα παροχέτευσης νερό που μπορεί να ρυθμιστεί κατάλληλα ώστε να περιορίσει αρκετά τη ροή και να αποφευχθεί η ελεύθερη πτώση νερού.

Το κύριο πλεονέκτημα του εμπλουτισμού με τάφρους ή φρεάτια στην ακόρεστη ζώνη είναι ότι είναι σχετικά μικρού κόστους. Το μειονέκτημα είναι ότι σταδιακά φράζουν την περιοχή της διήθησης εξαιτίας της συσσώρευσης αιωρούμενων υλικών ή/και βιομάζας. Επειδή βρίσκονται στην ακόρεστη ζώνη δεν μπορούν να αντληθούν για να «ξεπλυθεί» η φραγμένη στρώση, ούτε να ανορυχθούν εκ νέου ή να καθαριστούν για να επανέλθει ο κανονικός ρυθμός διήθησης. Για να ελαχιστοποιηθεί η απόφραξη πρέπει να γίνεται προεργασία του νερού ώστε να απομακρυνθούν τα αιωρούμενα υλικά. Στην περίπτωση των τάφρων, η προεργασία πετυχαίνεται μέσα στην ίδια την τάφρο τοποθετώντας ένα φίλτρο από άμμο και ένα φίλτρο γεωυφάσματος στην κορυφή της πλήρωσης. Αν η παραπάνω εργασία μειώσει πολύ τη ροή μέσα στη πλήρωση, η τάφρος πρέπει να διευρυνθεί στην κορυφή ώστε να δημιουργήσει μια τάφρο-T με μια μεγαλύτερη περιοχή φιλτραρίσματος από ότι η ίδια η επιφάνεια της τάφρου. Από οικονομικής άποψης, οι επιλογές είναι ανάμεσα στο να κάνουμε την προεργασία ώστε να μεγαλώσει ο χρόνος ζωής της τάφρου ή της γεώτρησης στην ακόρεστη ζώνη ή να κατασκευάσουμε καινούριες. Στην τελευταία περίπτωση οι παλιές τάφροι ή γεωτρήσεις εγκαταλείπονται ή συνεχίζουμε να τις χρησιμοποιούμε ώστε να εκμεταλλευτούμε τον όποιον απομένοντα εμπλουτισμό που πιθανόν μπορούν να δώσουν. Αν η απόφραξη είναι κυρίως οργανική προέλευσης τότε μπορούμε να πετύχουμε κάποια ανάκαμψη στην ικανότητα διήθησης με μεγάλες περιόδους ξηρασίας ή αγρανάπαυσης, συνήθως για ένα χρόνο περίπου.

## **Γεωτρήσεις εμπλουτισμού**

Οι γεωτρήσεις έγχυσης ή γεωτρήσεις άμεσου εμπλουτισμού (injection or direct recharge wells) χρησιμοποιούνται εκεί όπου δεν είναι διαθέσιμα διαπερατά εδάφη ή/και δεν υπάρχει κατάλληλη περιοχή για επιφανειακή διήθηση, ούτε η ακόρεστη ζώνη είναι κατάλληλη για την κατασκευή τάφρων ή φρεατίων διήθησης και οι υδροφόροι είναι σε μεγάλο βάθος ή είναι υπό πίεση. Οι πραγματικά υπό πίεση υδροφόροι μπορεί να είναι κατάλληλοι για εμπλουτισμό, γιατί τέτοιου είδους υδροφόροι δέχονται και αποδίδουν



νερό μέσω διαστολής και συμπίεσης του ίδιου του υδροφόρου και ειδικά εξαιτίας της παρουσίας παρεμβαλλόμενων στρώσεων αργίλου και βραδυδροφόρων στρωμάτων που είναι περισσότερο συμπιεστά από την άμμο και τα χαλίκια ή τα συνεκτικά υλικά του υδροφόρου. Εν τούτοις, η υπερβολική συμπίεση των υλικών του υδροφόρου λόγω υπεράντλησης είναι συνήθως μη αναστρέψιμη (Bouwer, 1978). Ο εμπλουτισμός, επίσης, μπορεί να είναι δυνατόν να γίνει μέσω μερικώς υπό πίεση υδροφόρων στρωμάτων. Ωστόσο, αυτή η κατάσταση προκαλεί υποβάθμιση της ποιότητας στον κατώτερο υδροφόρο σε περίπτωση που το υπόγειο νερό πάνω από το υπερκείμενο βραδυδροφόρο στρώμα είναι χαμηλής ποιότητας λόγω άρδευσης, διήθησης από στυπτικούς βόθρους ή άλλων συμπυκνωματικών μορφών εμπλουτισμού.

Στις Η.Π.Α. στο νερό που χρησιμοποιείται στις γεωτρήσεις έγχυσης συνήθως γίνεται επεξεργασία για να φτάσει η ποιότητά του σταθερότυπα του πόσιμου νερού για δύο λόγους. Ο ένας είναι για να μειωθεί η απόφραξη στην περιοχή μεταξύ της γεώτρησης και του υδροφόρου και ο άλλος είναι για να προστατευθεί η ποιότητα του νερού στον υδροφόρο, ειδικά εκεί όπου αντλείται από άλλες γεωτρήσεις και χρησιμοποιείται για ύδρευση. Σε περιπτώσεις όπου το υπόγειο νερό δεν χρησιμοποιείται για ύδρευση μπορεί να διοχετευτεί νερό χαμηλότερης ποιότητας στον υδροφόρο. Στην Αυστραλία, για παράδειγμα, η απορροή καταιγίδων και τα επεξεργασμένα αστικά λύματα εγχέονται σε υφάλμυρους υδροφόρους για να παράγουν νερό για άρδευση μετά από άντληση από τις ίδιες γεωτρήσεις. Το πρόβλημα της απόφραξης τότε μετριάζεται συνδυάζοντας την επεξεργασία νερού χαμηλού κόστους και την ανάπτυξη εκ νέου της γεώτρησης, με συνέπεια η ποιότητα του υπόγειου νερού να είναι προστατευόμενη για προδιαγραμμένες ευεργητικές του χρήσεις (Dillon and Pavelic, 1996, Dillon et al., 1997). Αυτές οι διαδικασίες αποθήκευσης στον υδροφόρο και ανάκτησης του νερού εφαρμόζονται με επιτυχία από το 1993 στη Νότια Αυστραλία και ο αριθμός και το μέγεθος των εφαρμογών αυξάνονται σε ασβεστόλιθους, ρωγματοωμένα πετρώματα και αλλουβιακούς υδροφόρους.

Με συνεκτικοί υδροφόροι τείνουν να έχουν σχετικά χονδρόκοκη δομή (άμμος και χαλίκια) και είναι κορεσμένοι. Αυτά τα υλικά δεν συντελούν το ίδιο στη βελτίωση της ποιότητας του νερού εμπλουτισμού με τα πλέον λεπτόκοκκα ακόρεστα εδαφικά υλικά που βρίσκονται κάτω από συστήματα επιφανειακής και στην ακόρεστη ζώνη διήθησης (surface and vadose-zone infiltration systems). Επίσης, το νερό που χρησιμοποιείται για έγχυση σε γεωτρήσεις έγχυσης στις Η.Π.Α. συνήθως χλωριώνεται και παρουσιάζει υπολειπόμενο χλώριο της τάξης των 0.5 mg/l όταν διοχετεύεται στις γεωτρήσεις εμπλουτισμού. Για αυτό το λόγο, όπου λύματα δευτερογενούς επεξεργασίας μπορούν άμεσα να χρησιμοποιηθούν σε επιφανειακά συστήματα διήθησης για επεξεργασία μέσω του φυσικού συστήματος εδάφους υδροφόρου (soil-aquifer treatment-SAT) και τελικά να επαναχρησιμοποιηθούν για ύδρευση, τότε θα πρέπει τα λύματα προς έγχυση στις γεωτρήσεις τουλάχιστον να υποστούν τριτογενή επεξεργασία (φιλτράρισμα μέσω άμμου και χλωρίωση). Αυτή η επεξεργασία απομακρύνει εναπομείναντα αιωρούμενα στερεά υλικά και πρωτόζωα και παράσιτα με φιλτράρισμα και βακτήρια και μικρόβια με χλωρίωση με υπεριώδη ακτινοβολία ή με κάποιου άλλου είδους απολύμανση. Στις Η.Π.Α. η τριτογενής επεξεργασία βελτιώνεται περαιτέρω με φιλτράρισμα με μεμβράνες (με μικροφίλτρα και αντίστροφη ώσμωση) για να απομακρυνθούν πιθανοί παθογενείς μικροοργανισμοί που ίσως δεν εντοπίστηκαν από την τριτογενή επεξεργασία με άζωτο, φώσφορο, οργανικό άνθρακα και άλλα χημικά. Επίσης, απομακρύνονται τελείως τα άλατα που βρίσκονται διαλυμένα στο νερό. Παρά τις παραπάνω ενέργειες, το φαινόμενο της απόφραξης συνεχίζει να εμφανίζεται όταν το υπόγειο νερό χρησιμοποιείται για εμπλουτισμό μέσω γεωτρήσεων. Ακόμα, πρέπει να ληφθεί υπ' όψη η γεωχημική συμβατότητα ανάμεσα στο νερό εμπλουτισμού και στο ήδη υπάρχον υπόγειο νερό. Στην Αυστραλία, εκεί όπου οι απορροές από καταιγίδα εγχέονται στους υδροφόρους, η μείωση των παθογόνων παραγόντων είναι ικανοποιητική ώστε να είναι κατάλληλο το ανακτημένο νερό για άρδευση και για πόση, σύμφωνα με τα τοπικά σταθερότυπα (Dillon and Pavelic, 1996)

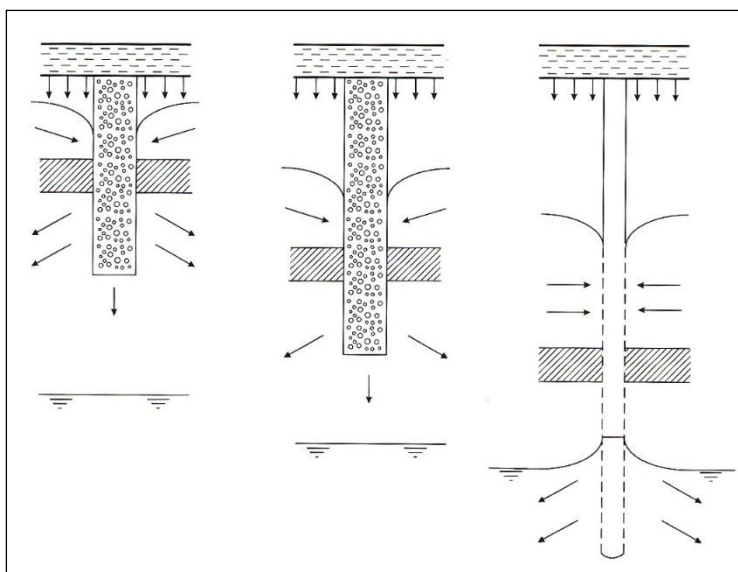
Παρά το γεγονός ότι οι γεωτρήσεις εμπλουτισμού που έχουν πάθει απόφραξη μπορούν να αναπτυχθούν εκ νέου και να αποκατασταθεί η λειτουργία τους με συμβατικές τεχνικές, μια καλύτερη προσέγγιση είναι να αποφεύγεται η απόφραξη με συχνές αντλήσεις της γεώτρησης, για παράδειγμα περίπου 15 λεπτά άντληση μία, δύο ή τρεις φορές τη μέρα. Αυτή η συχνή αντίστροφη απόπλυση (backwashing) της στρώσης απόφραξης που απαιτεί μία μόνιμη αντλία στη γεώτρηση, συνήθως αποτρέπει την εμφάνιση σοβαρής απόφραξης., ενώ μπορεί να περιορίσει την ανάγκη φιλτραρίσματος με μεμβράνες. Σε μια εφαρμογή. Στο Phoenix, στην Αριζόνα στις Η.Π.Α., για παράδειγμα, ο εμπλουτισμός των γεωτρήσεων με λύματα μετά από πρωτογενή και δευτερογενή επεξεργασία, αζωτοποίηση και αφαίρεση αζώτου, φιλτράρισμα και η απολύμανση με UV έδειξε πως δεν υπάρχουν σημάδια απόφραξης στα 3 χρόνια χρήσης των γεωτρήσεων εμπλουτισμού που αντλούνταν για 30 λεπτά τρεις φορές την μέρα (Fred Goldman, GTA Engineering, Inc., Phoenix, AZ, personal communication, 2001). Όμοια, στην Αυστραλία η σχετική διαδικασία ανάπτυξης εκ νέου γεώτρησης εμπλουτισμού είχε πολύ θετικά αποτελέσματα (Dillon and Pavelic, 1996). Έτσι, η συχνή άντληση των γεωτρήσεων άντλησης ίσως να είναι πιο αποτελεσματική από την επεξεργασία με φιλτράρισμα με μεμβράνες ώστε να αποτραπεί η δημιουργία της απόφραξης.

### **Συνδυαστικά συστήματα**

Όταν είναι δυνατόν, τα συστήματα επιφανειακής διήθησης προτιμούνται, γιατί έχουν την μεγαλύτερη πιθανότητα ελέγχου της απόφραξης και την καλύτερη επεξεργασία του εδαφικού υλικού του υδροφόρου αν κρίνεται σημαντική η ποιοτική βελτίωση του νερού. Αν το διαπερατό έδαφος βρίσκεται στην επιφάνεια του εδάφους ή σε βάθος που μπορεί να προσεγγίσει εκσκαπτικό μηχάνημα, το νερό μπορεί να κινηθεί απευθείας στα πιο χονδρόκοκα υλικά. Εν τούτοις, όταν βαθύτερες, λεπτόκοκες στρώσεις εμποδίζουν την κατείσδυση του νερού προς τον υδροφόρο και η στάθμη του κρεμαστού υπόγειου νερού έχει αυξηθεί αρκετά, η επιφανειακή διήθηση μπορεί και εδώ να εφαρμοστεί εφόσον τα κατακόρυφα συστήματα διήθησης τοποθετηθούν έτσι ώστε να διαπερνούν τις στρώσεις αυτές (σχ. 8.6). Σε αυτήν την περίπτωση τα ανώτερα μέρη του συστήματος λειτουργούν ως συστήματα αποστράγγισης του κρεμαστού υπόγειου νερού, ενώ τα κατώτερα μέρη λειτουργούν ως συστήματα για κατείσδυση προς τον υδροφόρο και εμπλουτισμού του.

Αν ο πυθμένας της στρώσης παρεμπόδισης δεν είναι πολύ βαθιά (λιγότερο από 3 m, για παράδειγμα), τότε τάφροι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να αποστραγγιστεί το κρεμαστό υπόγειο νερό και να το στείλει προς τον υδροφόρο (σχ. 8.6, αριστερά). Για πιο βαθιές ενστρώσεις (μέχρι 40 m) μπορούν να χρησιμοποιηθούν φρεάτια στην ακόρεστη ζώνη (σχ. 8.6, μέσον), ενώ συμβατικές γεωτρήσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν όπου οι ενστρώσεις είναι σε βάθος που δεν μπορεί να φτάσει ο εδαφολήπτης (bucket auger). Στις γεωτρήσεις τότε τοποθετείται φίλτρο για τα τμήματα πάνω και κάτω από τη στρώση παρεμπόδισης.

Το πλεονέκτημα των συστημάτων που φαίνονται στο σχ. 8.6 είναι ότι το νερό έχει προφιλτραριστεί μέσω του εδάφους και τη ζώνη του κρεμαστού υπόγειου νερού και έτσι η πιθανότητα να παρουσιαστεί απόφραξη έχει μειωθεί αισθητά. Ακόμα και τότε αν το χαμηλότερο μέρος του συστήματος εκτείνεται μέχρι τον υδροφόρο, όπως στο σχ. 8.6 (δεξιά) θα είναι καλή πρακτική το να αντλείται τακτικά η γεώτρηση. Πρέπει, επίσης, να εξετάζεται το θέμα της ποιότητας του νερού, ειδικά εκεί όπου το νερό πάνω από τη στρώση παρεμπόδισης είναι χαμηλότερης ποιότητας από ότι το νερό στον ίδιο τον υδροφόρο.



Σχήμα 8.6. Τομές όπου παρουσιάζονται συστήματα επιφανειακής διήθησης με ενστρώσεις παρεμπόδισης (με γραμμοσκίαση) και κρεμάμενο υπόγειο νερό να αποστραγγίζεται προς υποκείμενο ελεύθερο υδροφόρο διαμέσου τάφρου (αριστερά), διαμέσου φρεατίου στην ακόρεστη ζώνη (στο μέσο) και διαμέσου γεώτρησης (δεξιά) (Bouwer, 2002).

Οι αρχές που αφορούν τη διαδικασία στράγγισης κρεμαστού υπόγειου νερού που χρησιμοποιείται για τον εμπλουτισμό υποκείμενων υδροφόρων με μεθόδους όπως αυτές που παρουσιάζονται στο σχ. 8.6 δεν έχουν δοκιμαστεί επαρκώς στην ύπαιθρο. Για αυτό το λόγο τέτοιου είδους συστήματα πρέπει πάντα να εφαρμόζονται πειραματικά (πιλοτικά), ώστε να διαπιστωθεί ότι λειτουργούν ικανοποιητικά και για να κριθεί ο καλύτερος τρόπος διαχείρισης του πριν τη τελική εγκατάστασή τους και επενδυθούν σημαντικά κεφάλαια. Επίσης η πειραματική (πιλοτική) εφαρμογή είναι χρήσιμο να γίνεται και σε πιο απλά συστήματα λεκανών, τάφρων, φρεατίων στην ακόρεστη ζώνη και συμβατικών γεωτρήσεων γιατί ο τρόπος που αποδίδουν, σχεδιάζονται και διαχειρίζονται αυτά τα συστήματα εξαρτάται από τις τοπικές συνθήκες του εδάφους, τις υδρογεωλογικές συνθήκες, το κλίμα και την ποιότητα του νερού. Ο χρυσός κανόνας στον Τ.Ε. είναι να ξεκινάς με μικρές εφαρμογές, να μαθαίνεις καθώς προχωράς και να επεκτείνεσαι όσο χρειάζεται.

#### **8.4. Σχεδιασμός και διαχείριση**

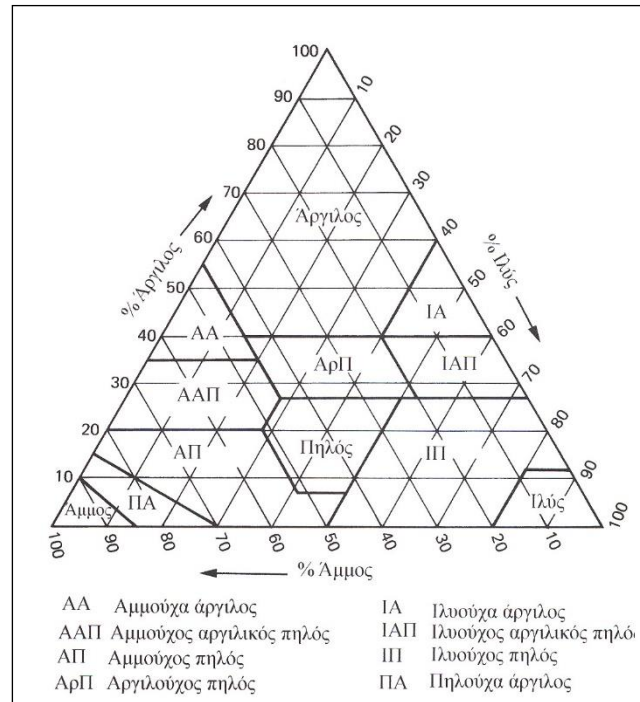
##### **Ρυθμός διήθησης**

Τα συστήματα επιφανειακής διήθησης απαιτούν διαπερατά εδάφη και ακόρεστες ζώνες για να διοχετευτεί το νερό στο έδαφος και να κατεισδύσει προς τον υδροφόρο και ελεύθερος και με ικανοποιητική μεταβιβαστικότητα υδροφόρους για να απομακρύνουν την πλευρική ροή μακριά από το σύστημα χωρίς τη δημιουργία μεγάλου υβώματος. Έτσι, χάρτες εδάφους και υδρογεωλογικές αναφορές χρησιμοποιούνται για την πρώτη εξέταση και να επιλέξουν τις σωστές θέσεις. Εξαρτώμενη από την σχετική ποσότητα αργίλου (< 2μm), ιλύος (2-50 μm) και άμμου (>50 μm) η κατάταξη του εδάφους μπορεί να εκτιμηθεί από το τρίγωνο υψής του εδάφους (soil texture triangle) του σχήματος 8.7.

Τυπικές τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας για διάφορα εδάφη είναι (Bouwer, 1999):

αργιλικά εδάφη: <0.1m/ημέρα

πηλός: 0.2m/ημέρα  
 αμμούχος πηλός: 0.3m/ημέρα  
 πηλούχος άμμος: 0.5m/ημέρα  
 λεπτόκκοκη άμμος: 1m/ημέρα  
 μεσόκκοκη άμμος: 5m/ημέρα  
 χονδρόκκοκη άμμος: >10m/ημέρα



Σχήμα 8.7. Τρίγωνο σύστασης εδάφους για την περιγραφή διαφόρων προσμίξεων άμμου, ιλύος και αργίλου (Καλλέργης, 1999).

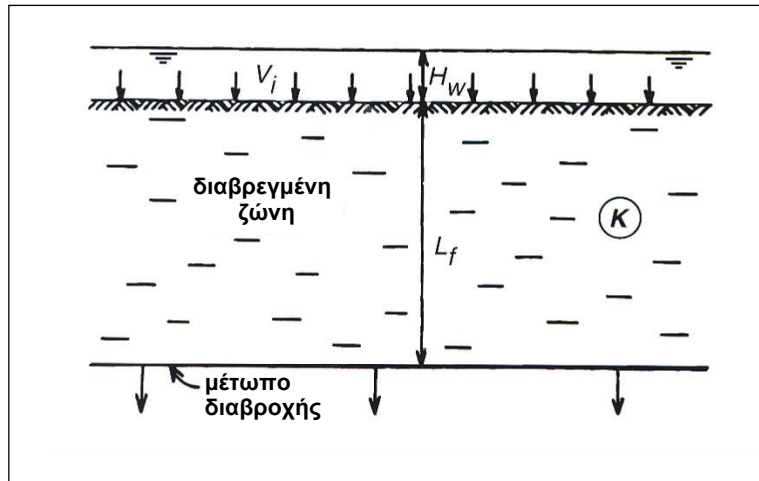
Αν το έδαφος περιέχει χαλίκια, η μέση υδραυλική αγωγιμότητα του μείγματος του εδάφους με τα χαλίκια μπορεί εμπειρικά να προσδιοριστεί από (Bouwer and Rice, 1984b):

$$K_b = K_s \cdot e_b / e_s \quad (8.1)$$

όπου  $K_b$  είναι η μέση υδραυλική αγωγιμότητα του μίγματος,  $K_s$  η υδραυλική αγωγιμότητα του εδαφικού μέρους μόνο,  $e_b$  ο μέσος όγκος των κενών του μίγματος και  $e_s$  ο λόγος των κενών για το εδαφικό μέρος. Αυτή η εξίσωση εφαρμόζεται σε συνεχή εδαφικά μέσα με παρεμβαλλόμενες στρώσεις λίθων. Οι λίθοι είναι στεγανά σώματα μέσα στο εδαφικό περιβάλλον, που μειώνουν την υδραυλική αγωγιμότητα σε σχέση με αυτή που έχει χωρίς τους λίθους. Εφαρμόζοντας την εξίσωση του Darcy σε έδαφος που έχει πλημμυρίσει με νερό (σχ. 8.8) καταλήγουμε στη σχέση (Bouwer, 1978):

$$V_i = K \cdot \frac{H_w + L_f - h_{we}}{L_f} \quad (8.2)$$

όπου  $V_i$  είναι ο ρυθμός διήθησης,  $K$  η υδραυλική αγωγιμότητα της διαβρεγμένης ζώνης,  $H_w$  το βάθος του νερού πάνω από το έδαφος,  $L_f$  το βάθος του διαβρεγμένου μετώπου και  $h_{we}$  η τριχοειδής αναρρόφηση (capillary suction) ή το αρνητικό πιεζομετρικό φορτίο στο διαβρεγμένο μέτωπο.



Σχήμα 8.8.. Τομή με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά μια τους σχετικούς συμβολισμούς για το μοντέλο διήθησης Green και Ampt (Bouwer, 2002).

Αυτή είναι η εξίσωση των Green και Ampt για τη διήθηση σε πλημμυρισμένο έδαφος, που έχει διατυπωθεί σχεδόν 100 χρόνια πριν (Green and Ampt, 1911). Έχουν επίσης διατυπωθεί και εξισώσεις βασισμένες στη διάχυση όπως και άλλες εμπειρικές (Bouwer, 1978). Ο όρος  $V_i$  είναι ο ογκομετρικός ρυθμός διήθησης ανά μονάδα επιφάνειας και μπορεί να θεωρηθεί ως ο ρυθμός πτώσης της επιφάνειας του νερού σε μια λεκάνη διήθησης αν σταματήσει η εισροή και αγνοηθεί η εξάτμιση. Επειδή η διαβρεγμένη ζώνη δεν είναι εντελώς κορεσμένη αλλά περιέχει εγκλωβισμένο αέρα, το  $K$  είναι μικρότερο από το  $K_s$  στον κορεσμό, περίπου  $0,5 K_s$  για αμμώδη εδάφη και  $0,25 K_s$  για αργίλους και πηλούς (Bouwer, 1978). Η τιμή του  $h_{we}$  θεωρείται η τιμή του νερού εισόδου του εδάφους.

Τυπικές τιμές του  $h_{we}$  σε cm είναι:

χονδρόκοκη άμμος:	-5
μεσόκοκη άμμος:	-10
λεπτόκοκη άμμος:	-15
πηλούχος άμμος-αμμούχος πηλός:	-25
πηλός:	-35
άργιλος:	-35
άργιλος :	-100

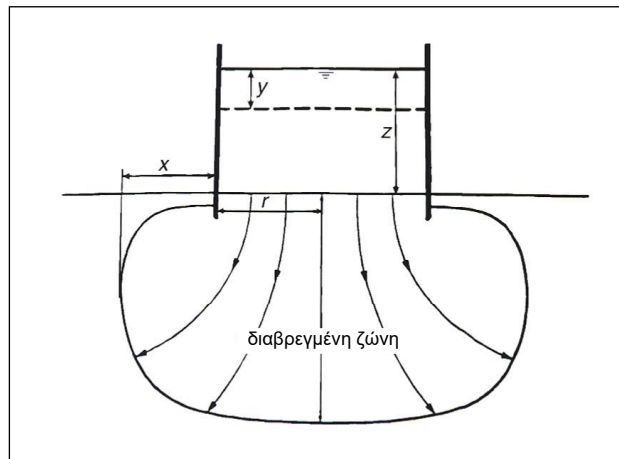
Η εξίσωση (8.2) δείχνει ότι όταν το έδαφος πλημμυρίζει για πρώτη φορά, το  $L_f$  είναι μικρό και το  $V_i$  μεγάλο. Εν τούτοις, καθώς το υγρό μέτωπο μετακινείται προς τα κάτω και το  $L_f$  αυξάνει, ο ρυθμός στην εξίσωση (8.2) πλησιάζει σε μια τιμή σύγκλισης και ο ρυθμός διήθησης γίνεται αριθμητικά ίσος με το  $K$  της διαβρεγμένης ζώνης.

### Διηθήμετρα

Μετά τον εντοπισμό κατάλληλων θέσεων για Τ.Ε. του υπόγειου νερού με τα συστήματα επιφανειακής διήθησης, που έγινε μετά από εδαφολογικές και υδρογεωλογικές έρευνες, πρέπει να γίνουν δοκιμές «διαβρεγμένης» διήθησης για να υπολογιστεί ο αναμενόμενος ρυθμός διήθησης, ώστε να εκτιμηθεί η περιοχή που απαιτείται για έναν συγκεκριμένο ογκομετρικό ρυθμό εμπλουτισμού, ή να εκτιμηθεί ο ρυθμός εμπλουτισμού που μπορεί να επιτευχθεί για μια συγκεκριμένη περιοχή εδάφους. Οι δοκιμές διήθησης γίνονται με μεταλλικά, κυλινδρικά διηθήμετρα με διάμετρο 30 cm. Εν τούτοις, η χρήση τόσο μικρών διηθήμετρων συχνά οδηγεί σε υπερεκτίμηση του

ρυθμού διήθησης μιας μεγάλης περιοχής εξαιτίας πλευρικής ροής κάτω και γύρω από τον κύλινδρο που οφείλεται στην τριχοειδή αναρρόφηση στο έδαφος. Τα διηθήμετρα με διπλού δακτυλίου (double-ring) λύνουν το πρόβλημα γιατί επιπλέον παρατηρείται υπερεκτίμηση της διήθησης και στο κέντρο του κυλίνδρου. Η προφανής αντιμετώπιση είναι να χρησιμοποιηθούν μεγαλύτερες περιοχές διήθησης, 3Χ3 m για παράδειγμα. Ωστόσο, αυτές οι δοκιμές είναι επίπονες και απαιτούν μεγάλες ποσότητες νερού, γιατί ίσως χρειαστεί περισσότερος χρόνος από μια μέρα για να προσεγγιστεί ο τελικός ρυθμός διήθησης. Μια καλύτερη προσέγγιση είναι η χρήση συμβατικών, απλών κυλίνδρων με σημαντικό ύψος νερού, ώστε να επιταχυνθεί η διαδικασία της διήθησης με αποτέλεσμα να ολοκληρώνονται οι δοκιμές σε σχετικά μικρό χρονικό διάστημα (5 ώρες, για παράδειγμα). Η έκταση της πλευρικής διαβροχής μετρείται χρησιμοποιώντας ένα φτυάρι και το βάθος του υγρού μετώπου μετρείται χρησιμοποιώντας επίσης ένα φτυάρι ή εδαφολήπτη auger ή εκτιμάται από την τελική συσσωρευμένη διήθηση και το πορώδες (fillable porosity).

Τα διηθήμετρα που έχουν χρησιμοποιηθεί για αυτήν τη διαδικασία είναι απλοί μεταλλικοί κύλινδροι με διάμετρο 60 cm και ύψος 30 cm με λοξά άκρα (σχ. 8.9). Ένα κομμάτι ξύλου 5x10 cm τοποθετείται στην κορυφή του κυλίνδρου και ο κύλινδρος βυθίζεται με βαριά σε βάθος 3 με 5 cm στο έδαφος. Το έδαφος συμπιέζεται έναντι του εσωτερικού και του εξωτερικού του κυλίνδρου με ένα κομμάτι ξύλου διαστάσεων 2,5x5 cm που στηρίζεται σε μια γωνία του εδάφους έναντι του κυλίνδρου και χτυπιέται με ελαφρύ σφυρί για να επιτευχθεί καλή επαφή ανάμεσα στο έδαφος και τον κύλινδρο.



Σχήμα 8.9. Τομή με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και τους σχετικούς συμβολισμούς διηθήμετρου απλού δακτυλίου (Bouwer, 2002).

Αν το έδαφος περιέχει άργιλο, το νερό που θα χρησιμοποιηθεί στη δοκιμή πρέπει να έχει την ίδια χημική σύσταση με το νερό που θα χρησιμοποιηθεί κατά τον εμπλουτισμό, ώστε να αποφευχθούν πιθανές δυσμενείς συνέπειες της ποιότητας του νερού στις ιδιότητες της αργίλου (coagulated or dispersed; Bouwer, 1978). Τοποθετείται μια επίπεδη πέτρινη πλάκα στο έδαφος μέσα στον κύλινδρο για την αποφυγή διάβρωσης όταν θα προστεθεί το νερό. Ο κύλινδρος γεμίζεται μέχρι πάνω και σημειώνεται η ώρα έναρξης της διαδικασίας. Το νερό αφήνεται να κατέβει προς τα κάτω για 5-10 cm. Η πτώση της στάθμης μετρείται με χάρακα, σημειώνεται η συγκεκριμένη χρονική στιγμή και ο κύλινδρος γεμίζεται ξανά μέχρι πάνω. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται για 6 ώρες περίπου ή μέχρι η συγκεντρωμένη διήθηση να πλησιάσει τα 50 cm. Η τελευταία πτώση  $y_n$  μετρείται και σημειώνεται η χρονική στιγμή ώστε να καταγραφεί το χρονικό διάστημα  $\Delta t_n$  για την  $y_n$ . Ένα φτυάρι χρησιμοποιείται για εκσκαφή εξωτερικά του κυλίνδρου ώστε να προσδιοριστεί η απόσταση  $x$  της πλευρικής εδαφικής διαβροχής ή της απόκλισης (σχ. 8.9).

Ο ρυθμός διήθησης  $i_n$  στο εσωτερικό του κυλίνδρου της τελευταίας πτώσης του νερού προσδιορίζεται ως  $y_n/\Delta t_n$ . Θεωρώντας κατακόρυφη τη ροή στο εσωτερικό της διαβρεγμένης ζώνης, ο ρυθμός ροής, ή η ροή  $i_w$  στη διαβρεγμένη περιοχή κάτω από τον κύλινδρο ακτίνας  $r$ , προσδιορίζεται ως εξής:

$$i_w = \frac{i_n \pi r^2}{\pi(r+x)^2} \quad (8.3)$$

όπου  $x$  είναι η απόσταση της πλευρικής ύγρανσης από το τοίχωμα του κυλίνδρου (σχ. 8.9).

Το βάθος  $L$  του υγρού μετώπου στο τέλος της δοκιμής προσδιορίζεται από την πτώση  $y_i$  της στάθμης του νερού στον κύλινδρο:

$$L = \frac{y_i \pi r^2}{n \pi (r+x)^2} \quad (8.4)$$

όπου το  $n$  είναι το πορώδες του εδάφους (fillable porosity). Η τιμή του  $n$  μπορεί να εκτιμηθεί από την υφή του εδάφους και από την αρχική περιεχόμενη υγρασία. Για παράδειγμα, το  $n$  είναι συνήθως 0,3 για ξηρά, ομοιόμορφα εδάφη, 0,2 για μετρίως υγρά εδάφη, 0,1 για σχετικά υγρά εδάφη. Καλοδιαβαθμισμένα εδάφη έχουν χαμηλότερες τιμές  $n$  από ότι ομοιόμορφα εδάφη. Η τιμή του  $L$  μπορεί επίσης να προσδιοριστεί με άμεση εκσκαφή μετά την δοκιμή όπου θα φανεί πόσο βαθιά έχει βραχεί το έδαφος. Αυτή η μέθοδος λειτουργεί καλύτερα αν το έδαφος είναι αρχικά αρκετά διαβρεγμένο και δεν υπάρχουν πολλοί βραχώδεις σχηματισμοί έτσι ώστε να υπάρχει σαφής διάκριση ανάμεσα στο υγρό και ξηρό έδαφος. Εφαρμόζοντας την εξίσωση του Darcy στην προς τα κάτω ροή μέσα στην υγρή ζώνη, έχουμε:

$$i_w = \frac{K(z+L-h_{we})}{L} \quad (8.5)$$

όπου το  $z$  είναι το μέσο βάθος νερού στον κύλινδρο στη διάρκεια της τελευταίας πτώσης της στάθμης του νερού. Ο όρος  $h_{we}$  μπορεί να εκτιμηθεί από τις τιμές της λίστας που ακολουθεί μετά την εξίσωση (8.2). Επειδή το  $K$  είναι ο μοναδικός άγνωστος στην παραπάνω εξίσωση, μπορεί να μετασχηματιστεί σε:

$$K = \frac{i_w L}{z+L-h_{we}} \quad (8.6)$$

Αυτή η τιμή του  $K$ , που υπολογίστηκε παραπάνω, χρησιμοποιείται ως εκτίμηση του ρυθμού μακροπρόθεσμης διήθησης σε βαθιές και ρηχές περιοχές κατάκλυσης, που δεν υφίστανται απόφραξη στην επιφάνεια, ούτε υπάρχουν βαθύτερα στρώματα σχετικά αδιαπέρατα. Εξαιτίας του παγιδευμένου αέρα, το  $K$  της υγρής ζώνης είναι μικρότερο από το  $K$  της κορεσμένης, π.χ. περίπου 0,5 $K$  στην κορεσμένη περιοχή, όπως αναφέρθηκε παραπάνω.

Αν οι τιμές του  $K$  που υπολογίζονται από την εξίσωση (8.6) είναι ικανά μεγάλες για ένα σύστημα διήθησης, το επόμενο βήμα είναι να εγκατασταθούν κάποιες δοκιμαστικές λεκάνες περίπου 0,2 εκτάρια για μακροπρόθεσμη κατάκλυση νερού, ώστε να εκτιμηθούν οι επιπτώσεις πιθανής απόφραξης και το ενδεχόμενο της μείωσης της διήθησης από τα βαθύτερα αδιαπέρατα στρώματα και για να είμαστε σίγουροι για τη μεταφορά των αποτελεσμάτων από τις ουσιώδεις μετρήσεις του ρυθμού διήθησης με κυλίνδρους σε μεγάλης κλίμακας εφαρμογές με λεκάνες εμπλουτισμού έκτασης 10-100 εκταρίων. Έχει επιτευχθεί ικανοποιητική σύγκλιση ανάμεσα στους προβλεπόμενους

ρυθμούς διήθησης (K στην εξ. 8.6) και σε αυτούς μεγαλύτερων λεκανών. Για παράδειγμα, έξι διηθήμετρα που εγκαταστάθηκαν σε περιοχή δυτικά του Phoenix, στην Αριζόνα στις Η.Π.Α., έδωσαν μέση τιμή του K 40 cm/μέρα, όπως υπολογίστηκε από την εξ. (8.6). Δύο δοκιμαστικές λεκάνες των 0,3 εκταρίων η καθεμία στην ίδια περιοχή σημείωσαν τελικό ρυθμό διήθησης 30 και 35 cm/μέρα. Αν τα δοκιμαστικά διηθήμετρα δώσουν ρυθμό διήθησης πολύ μικρό για επιφανειακό σύστημα διήθησης μπορούν να μελετηθούν εναλλακτικά συστήματα, όπως λεκάνες εκσκαφής, τάφροι εμπλουτισμού, φρεάτια εμπλουτισμού ή φρεάτια στην ακόρεστη ζώνη, ή γεωτρήσεις έγχυσης στον υδροφόρο.

Η διαδικασία κυλινδρικών διηθημέτρων που περιγράφηκε παραπάνω δεν είναι απολύτως ακριβείς. Εν τούτοις, λαμβάνοντας υπ' όψη τη χωρική ποικιλία των εδαφικών ιδιοτήτων (τόσο καθέτως όσο και οριζοντίως) δεν απαιτούνται ακριβείς διαδικασίες και μετρήσεις της πτώσης του επιπέδου του νερού με ειδικά όργανα. Για το λόγο αυτό οι δοκιμές κυλινδρικής διήθησης πρέπει να γίνονται σε διαφορετικές περιοχές συγκεκριμένης τοποθεσίας.

Εκεί όπου τα εδάφη είναι πετρώδη, τα κυλινδρικά διηθήμετρα ίσως είναι δύσκολο να εγκατασταθούν. Σε μερικές περιπτώσεις είναι δυνατή η κονιοποίηση του εδάφους με την απομάκρυνση των λίθων έξω από τον κύλινδρο με ένα αιχμηρό αντικείμενο (π.χ. σκαπάνη). Αν δεν μπορεί να γίνει αυτό, μπορούν εναλλακτικά να χρησιμοποιηθούν μεγαλύτερες, περιοχές τουλάχιστον 2x2 m για την μέτρηση της διήθησης ή να εξαχθεί ένα διαταραγμένο δείγμα εδάφους ανάμεσα στο πέτρωμα και να μετρηθεί η υδραυλική αγωγιμότητα στο εργαστήριο. Κατόπιν, εκτιμάται ή υπολογίζεται ο λόγος των κενών του εδάφους χωριστά για το έδαφος και το μείγμα εδάφους και πετρώματος, ώστε να υπολογιστεί το  $K_b$  του μίγματος από την εξ.(8.1) και να πάρουμε μια πρώτη εκτίμηση για τον ρυθμό διήθησης σε λεκάνη (Bouwer and Rice, 1984b).

### **Απόφραξη (clogging)**

Το βασικό πρόβλημα στα συστήματα διήθησης για τεχνητό εμπλουτισμό του υπόγειου νερού είναι η απόφραξη (clogging) της επιφάνειας διήθησης (πυθμένες λεκανών, τοιχώματα τάφρων και φρεατίων στην ακόρεστη ζώνη, τοιχώματα γεωτρήσεων εμπλουτισμού) που έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του ρυθμού διήθησης (Baveye et al., 1998). Η απόφραξη προκαλείται με φυσικές, βιολογικές και χημικές διεργασίες. Οι φυσικές διεργασίες είναι η συσσώρευση των ανόργανων και οργανικών αιωρούμενων υλικών του νερού εμπλουτισμού, όπως η άργιλος και σωματίδια ιλύος, άλγη, μικροοργανισμοί και άλλα υλικά στην εκροή αποβλήτων. Άλλη φυσική διεργασία είναι η κατακόρυφη κίνηση λεπτών σωματιδίων εδάφους που ήταν στο νερό διήθησης ή στο ίδιο το εδαφικό υλικό και η συσσώρευση αυτών των σωματιδίων σε κάποιο βάθος όπου το έδαφος είναι πιο πυκνό ή πιο λεπτό και εκεί δημιουργούν ένα λεπτό στρώμα απόφραξης κάτω από την επιφάνεια. Το βάθος αυτού του στρώματος κυμαίνεται από λίγα mm και λίγα cm ή περισσότερο. Στη βιβλιογραφία, αυτή η κίνηση των υλικών και η συσσώρευση σε βαθύτερα στρώματα λέγεται «wash out-wash in» (Summer and Stewart, 1992). Επίσης, λεπτά σωματίδια εδάφους δημιουργούν επιφανειακές κρούστες όταν οι λεκάνες διήθησης είναι ξηρές και το έδαφος εκτίθεται σε βροχή.

Οι διεργασίες βιολογικής απόφραξης περιλαμβάνουν:

1. Την συσσώρευση φυκιών και βακτηριακών συγκεντρώσεων στο νερό της επιφανειακής διήθησης

2. Την ανάπτυξη μικροοργανισμών πάνω και μέσα στο έδαφος ώστε να δημιουργούνται βιοφίλμ και βιομάζες, που κλείνουν τους πόρους και/ή μειώνουν το μέγεθος τους.

Οι χημικές διεργασίες περιλαμβάνουν την καθίζηση του ανθρακικού ασβεστίου, της γύψου, του φωσφορικού άλατος και άλλων χημικών πάνω και μέσα στο έδαφος. Μερικές φορές, αυτές οι καθιζήσεις προκαλούνται από την αύξηση του pH που προκαλείται από τα άλγη, καθώς απομακρύνουν το διαλυμένο διοξείδιο του άνθρακα από το νερό για τη φωτοσύνθεση. Τα βακτήρια επίσης παράγουν αέρια (άζωτο, μεθάνιο) που φράζουν

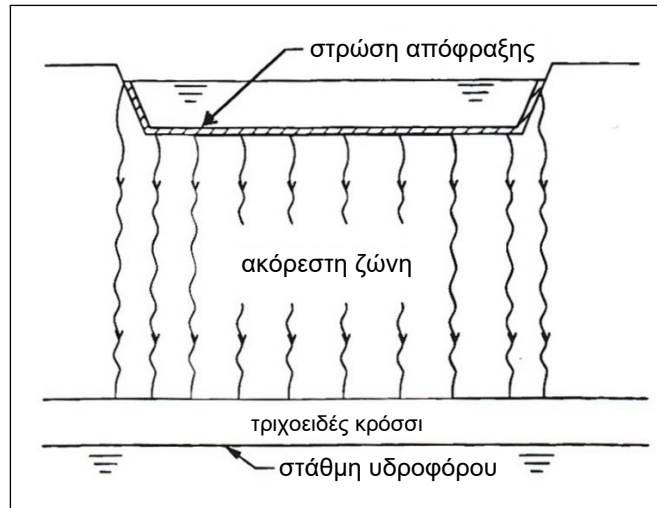


τους πόρους και συγκεντρώνονται κάτω από τις ζώνες της απόφραξης ώστε να δημιουργηθούν εμπόδια αέρος στη διήθηση. Αέρια επίσης αναπτύσσονται σε εδάφη κάτω από τις λεκάνες εμπλουτισμού ή μέσα σε τάφρους ή γεωτρήσεις όταν το νερό εμπλουτισμού περιέχει παγιδευμένο ή διαλυμένο αέρα και/ή είναι ψυχρότερο από το έδαφος ή τον ίδιο τον υδροφόρο. Το νερό, σε αυτήν την περίπτωση, θερμαίνεται στο έδαφος ή στον υδροφόρο ενώ ο αέρας εξέρχεται από το διάλυμα και δημιουργείται παγιδευμένος αέρας, που μειώνει την υδραυλική αγωγιμότητα. Στις γεωτρήσεις έγχυσης αυτή η διαδικασία δεσμεύει αέρα (air binding). Ο παγιδευμένος αέρας, επίσης, δημιουργείται σε απόκριση της μείωσης της πίεσης του νερού, π.χ. όταν το νερό κινείται μέσω της ζώνης της απόφραξης σε μια λεκάνη εμπλουτισμού και το πιεζομετρικό φορτίο μειώνεται από το βάθος του νερού πάνω από τη ζώνη της απόφραξης σε αρνητική πίεση ή αυτοαναρρόφηση στην ακόρεστη ζώνη κάτω από το στρώμα απόφραξης. Ο εμπλουτισμός με γεωτρήσεις μπορεί, επίσης, να προκαλέσει διείσδυση σιδήρου και οξειδίου του μαγγανίου ή υδροξειδίων καθώς αλλάζουν τα επίπεδα του διαλυμένου οξυγόνου, καθώς και διάλυση και καθίζηση του ανθρακικού ασβεστίου εξαιτίας της αλλαγής του pH και των επιπέδων του διαλυμένου διοξειδίου του άνθρακα. Αντιστρόφως, είναι γνωστό ότι η διάλυση του ασβεστίτη από εγχυόμενο νερό αυξάνει την υδραυλική αγωγιμότητα των ασβεστολιθικών υδροφόρων που χρησιμοποιούνται σε διαδικασίες εμπλουτισμού-άντλησης υδροφόρων (Dillon and Pavelic, 1996).

Επειδή οι ρυθμοί της διήθησης ποικίλλουν αντιστρόφως ανάλογα με το ιξώδες του νερού, η θερμοκρασία επίσης επηρεάζει αυτόν τον ρυθμό. Σε περιοχές με μεγάλες διαφορές στη θερμοκρασία ανάμεσα στο χειμώνα και το καλοκαίρι, η επιρροή του ιξώδους έχει ως αποτέλεσμα οι χειμερινοί ρυθμοί διήθησης να φτάνουν τόσο χαμηλά όσο περίπου το μισό των καλοκαιρινών ρυθμών. Έτσι, αν απαιτείται να κατασκευαστεί το σύστημα εμπλουτισμού με βάση συγκεκριμένη ικανότητα απόδοσης, τότε αυτό πρέπει να σχεδιαστεί με βάση τις χειμερινές συνθήκες, όταν το νερό είναι ψυχρότερο και οι ρυθμοί διήθησης μικρότεροι. Αντιθέτως, η βιολογική δραστηριότητα και η απόφραξη που δημιουργεί ίσως είναι μεγαλύτερη τους θερινούς μήνες. Όλες αυτές οι παράμετροι είναι δύσκολο να προβλεφτούν και ο καλύτερος τρόπος για έναν επαρκή σχεδιασμό και μια σωστή διαχείριση πληροφοριών για μια ολοκληρωμένη εφαρμογή Τ.Ε. είναι η εγκατάσταση πιλοτικών λεκανών διαστάσεων τουλάχιστον 20x20 m και η παρακολούθηση της λειτουργίας τους για διάρκεια τουλάχιστον ενός έτους ώστε να προσδιοριστούν οι εποχιακές επιπτώσεις.

Επειδή τα στρώματα απόφραξης είναι αρκετά λιγότερο διαπερατά από ότι το φυσικό εδαφικό υλικό, αυτά μειώνουν τον ρυθμό διήθησης και γίνονται ο ρυθμιστικός παράγοντας στη διαδικασία της διήθησης (σχ. 8.10).

Εκεί όπου ο ρυθμός διήθησης στα επιφανειακά συστήματα είναι μικρότερος από την υδραυλική αγωγιμότητα του εδαφικού υλικού κάτω από το στρώμα απόφραξης, αυτό το υλικό γίνεται ακόρεστο σε αναλογία νερού, όπου η υδραυλική αγωγιμότητα του ακόρεστου υλικού είναι αριθμητικά ίση με τον ρυθμό διήθησης (Bouwer, 1982). Η ροή προς τα κάτω που ακολουθεί στην ακόρεστη ζώνη που ακολουθεί είναι αποτέλεσμα της βαρύτητας με υδραυλική κλίση ίση με τη μονάδα. Το πάχος των στρωμάτων με απόφραξη κυμαίνεται ανάμεσα σε 1 mm ή λιγότερο (βιοφιλμ, στρώματα λεπτά αργιλικά και πηλούχα) έως μερικά cm και dm ή παραπάνω για αποθέσεις μεγαλύτερου πάχους. Επειδή τα στρώματα με απόφραξη είναι ο κανόνας παρά η εξαίρεση, τα συστήματα ροής κάτω από τα συστήματα επιφανειακής διήθησης τυπικά είναι όπως φαίνονται στο σχ. 34, για τις ακόρεστες ζώνες χωρίς παρεμβαλλόμενα σχετικά αδιαπέρατα στρώματα, που ενδεχομένως θα ωθούσαν το κρεμαστό νερό να πλησιάσει πολύ κοντά στον πυθμένα της λεκάνης.



Σχήμα 8.10. Ακόρεστη ροή προς υδροφόρο κάτω από λεκάνη διήθησης με στρώμα απόφραξης, και τριχοειδές κρόσσι πάνω από την επιφάνεια του νερού (Bouwer, 2002).

Ο ρυθμός διήθησης  $V_i$  για τη λεκάνη του σχήματος 8.10, μπορεί να υπολογιστεί εφαρμόζοντας το νόμο του Darcy για τη ροή μέσα από το στρώμα με απόφραξη:

$$V_i = K_c \frac{H_w - h_{ae}}{L_c} \quad (8.7)$$

όπου  $K_c$  είναι η υδραυλική αγωγιμότητα του στρώματος απόφραξης,  $L_c$  το πάχος του στρώματος απόφραξης,  $H_w$  το βάθος του νερού πάνω από το στρώμα απόφραξης και  $h_{ae}$  η τιμή του αέρα που εισέρχεται στο έδαφος της ακόρεστης ζώνης.

Επειδή το πάχος του στρώματος απόφραξης είναι συνήθως αρκετά μικρό, λιγότερο από 1 mm μέχρι 1 cm, το πραγματικό του πάχος και η υδραυλική αγωγιμότητα είναι δύσκολο να προσδιοριστούν. Για αυτόν το λόγο το  $K_c$  και το  $L_c$  συγχωνεύονται σε μια παράμετρο  $L_c/K_c$ , με διαστάσεις χρόνου (συνήθως σε μέρες) και ονομάζεται υδραυλική αντίσταση,  $R_c$ , και πρόκειται για τον αριθμό των ημερών που χρειάζεται μια μοναδιαία ποσότητα διήθησης να κινηθεί μέσα από το στρώμα της απόφραξης για μοναδιαία πτώση φορτίου. Για ένα δοσμένο σύστημα το  $R_c$  υπολογίζεται από την εξ. (8.7), αφού μετρηθούν οι τιμές  $V_i$  και οι απώλειες φορτίου μέσα στο στρώμα απόφραξης, χρησιμοποιώντας ένα τενσιόμετρο για να μετρηθεί το  $h_{ae}$ . Επίσης, το  $h_{ae}$  εκτιμάται ως  $2 h_{we}$  χρησιμοποιώντας τις τιμές που βρίσκονται κάτω από την εξίσωση (8.2). Η τιμή του εισαγόμενου αέρα είναι περισσότερο κατάλληλη από την τιμή του εισαγόμενου νερού, σε αυτήν την περίπτωση, γιατί η διήθηση συνήθως ξεκινάει με καθαρές συνθήκες πυθμένα, κάτι που οδηγεί την ψηλότερη υγρή ζώνη να έχει θετικές τιμές φορτίου πίεσης και ως επακόλουθο, να βρίσκεται κοντά στον κορεσμό. Καθώς αναπτύσσεται η απόφραξη και μειώνεται το  $V_i$ , η υγρή ζώνη γίνεται σταδιακά ακόρεστη καθώς το ποσοστό περιεχόμενου νερού μειώνεται ώστε να παραχθεί υδραυλική αγωγιμότητα ίση με το ρυθμό διήθησης. Έτσι, σε αυτήν την περίπτωση, ο αέρας αντικαθιστά το νερό και η τιμή του εισαγόμενου αέρα είναι η πιο κατάλληλη τιμή για να χρησιμοποιηθεί το πιεζομετρικό φορτίο κάτω από τη ζώνη απόφραξης (Bouwer, 1982).

Η απόφραξη ελέγχεται μειώνοντας τις παραμέτρους που την προκαλούν. Για το επιφανειακό νερό, αυτό τυπικά σημαίνει προεργασία για να κατακαθίσουν η άργιλος, η ιλύς και άλλα αιωρούμενα υλικά. Αυτό το αποτέλεσμα πετυχαίνεται με φράγματα στον ποταμό ή σύστημα υδραγωγείου (που θα μπορούσε επίσης να ελέγξει τη ροή) ή διοχετεύοντας το νερό μέσα σε λεκάνες καθίζησης πριν τον εμπλουτισμό. Πηκτικά και οργανικά πολυμερή χρησιμοποιούνται για να επιταχυνθεί η καθίζηση. Στις γεωτρήσεις εμπλουτισμού, ίσως χρειαστούν επίσης φίλτρα άμμου ή μεμβράνης. Η ανάπτυξη των

αλγών και η βιολογική απόφραξη σε λεκάνες μειώνονται απομακρύνοντας το άζωτο και τον φωσφόρο όπως και τον οργανικό άνθρακα από το νερό. Αυτή η μείωση είναι επίσης σημαντική όταν οι τάφροι ή οι γεωτρήσεις χρησιμοποιούνται για εμπλουτισμό με επεξεργασμένα υγρά απόβλητα. Η απολύμανση με χλώριο ή άλλα απολυμαντικά μειώνει τη βιολογική δραστηριότητα πάνω και δίπλα στα τοιχώματα των τάφρων ή των γεωτρήσεων με συνέπεια να μειώνεται η απόφραξη. Ο ρυθμός της απόφραξης αυξάνεται με την αύξηση του ρυθμού διήθησης, εξαιτίας του αυξανόμενου ρυθμού καθίζησης των αιωρούμενων υλικών, των νιτρικών και του οργανικού άνθρακα στην επιφάνεια. Εξαιτίας αυτού, η αύξηση της πίεσης της έγχυσης στις γεωτρήσεις εμπλουτισμού, που δείχνουν σημάδια απόφραξης, ουσιαστικά επιταχύνουν τη διαδικασία της απόφραξης. Η συχνή άντληση των γεωτρήσεων εμπλουτισμού και η περιοδική ανάπτυξη εκ νέου των γεωτρήσεων έχουν ως αποτέλεσμα τον έλεγχο και την καθυστέρηση της απόφραξης, αλλά συνήθως όχι για πάντα. Αυξάνοντας το βάθος του νερού στις λεκάνες εμπλουτισμού ή την πίεση της έγχυσης στις γεωτρήσεις, συμπιέζεται το στρώμα της απόφραξης κάτι που οδηγεί σε μείωση της διαπερατότητας και ως εκ τούτου και στη μείωση του ρυθμού διήθησης. Παρά την προεργασία που υφίσταται το νερό του εμπλουτισμού, το φαινόμενο της απόφραξης συνεχίζει να εμφανίζεται εξαιτίας της ανάπτυξης των αλγών και άλλων αυτότροφων βακτηρίων, της σκόνης που εκτοξεύεται στη λεκάνη και άλλων παραγόντων.

Όσον αφορά τα επιφανειακά συστήματα διήθησης, η απόφραξη ελέγχεται επίσης με περιοδική ξήρανση των λεκανών ή των άλλων εγκαταστάσεων διήθησης, αφήνοντας έτσι το στρώμα απόφραξης ξηρό, σε αποσύνθεση, συρρικνωμένο και ρηγματωμένο. Αυτή η διαδικασία είναι γενικά ικανή να επαναφέρει το ρυθμό διήθησης σε ικανοποιητικά επίπεδα. Αν τα υλικά της απόφραξης συνεχίζουν να συσσωρεύονται, πρέπει περιοδικά να απομακρύνονται στο τέλος μιας ξηρής περιόδου. Αυτή η απομάκρυνση γίνεται μηχανικά με εκσκαφείς, αποξέστες ή χειρονακτικά με τσουγκράνα. Μετά την απομάκρυνση του υλικού της απόφραξης, το έδαφος πρέπει να οργωθεί ή να σβάρνιστεί, ώστε να σπάσουν τυχόν κρούστες που έχουν δημιουργηθεί πάνω ή κοντά στην επιφάνεια. Το σβάρνισμα των στρώσεων της απόφραξης χωρίς πρώτα να έχουν απομακρυνθεί αυτές οι στρώσεις, προκαλεί προσωρινή ανακούφιση στο φαινόμενο, αλλά τελικά λεπτόκοκα και άλλα υλικά απόφραξης συσσωρεύονται στην κορυφή του εδάφους και τελικά όλη η στρώση που οργώθηκε πρέπει να απομακρυνθεί. Το σβάρνισμα πρέπει να ακολουθείται από την εξομάλυνση και ελαφρή συμπύκνωση του εδαφικού υλικού ώστε να αποφευχθεί η κίνηση και η συσσώρευση λεπτών σωματιδίων στο υποκείμενο, αδιατάραχο έδαφος, όταν το έδαφος ξαναπλημμυρίσει με νερό. Όταν το νερό είναι καλής ποιότητας με χαμηλή περιεκτικότητα σε αιωρούμενα και χονδρόκοκα υλικά στη λεκάνη εμπλουτισμού, ξήρανση και καθαρισμός απαιτείται μόνο μερικές φορές το χρόνο ή ακόμα λιγότερο συχνά. Εκεί όπου το έδαφος είναι λεπτόκοκκο ή πετρώδες, ο έλεγχος της απόφραξης αποτελεί πρόκληση. Εκεί όπου το νερό είναι πολύ λασπώδες ή εκεί που χρησιμοποιούνται μη ικανοποιητικά επεξεργασμένα υγρά απόβλητα, ξήρανση και καθαρισμός ίσως απαιτείται μετά από κάθε περίοδο πλημμύρισης και από εκεί και μετά ίσως να πρέπει να γίνεται κάθε λίγες μέρες.

Η προηζυματοποίηση είναι εξαιρετικά σημαντική εκεί όπου το νερό του εμπλουτισμού προέρχεται από χειμάρρους με ποικίλη ροή και χρειάζεται να χρησιμοποιηθεί για εμπλουτισμό όσο περισσότερο νερό γίνεται. Τότε, πρέπει να δεσμευτούν μεγάλες ποσότητες νερού κατά τις περιόδους μεγάλης ροής. Για αυτόν το σκοπό κατασκευάζονται βαθύτερες από το κανονικό λεκάνες διήθησης ώστε να συγκεντρώσουν και να αποθηκεύσουν όσο περισσότερο νερό γίνεται με σκοπό τη διήθηση και τον επακόλουθο υπόγειο εμπλουτισμό. Εν τούτοις, το νερό της κατάκλισης μεταφέρει μεγάλες ποσότητες ιζήματος που συγκεντρώνεται στις βαθύτερες λεκάνες. Εξαιτίας του διαχωρισμού των σωματιδίων, σύμφωνα με το νόμο του Stoke, η στρώση του ιζήματος εμπεριέχει τα πλέον χονδρόκοκα υλικά στον πυθμένα και τα πλέον λεπτόκοκα στην κορυφή. Αυτή η διάταξη των υλικών μειώνει αισθητά το ρυθμό διήθησης, ειδικά αν έχουν εμφανιστεί επαναλαμβανόμενες εισροές λάσπης στη λεκάνη. Τέτοιες εισροές τείνουν να δημιουργήσουν ζώνες απόφραξης με πολλαπλά επίπεδα

στον πυθμένα της λεκάνης με διαχωρισμό των υλικών ανά μέγεθος και ανά ζώνη (Bouwer et al., 2001).

Συνεπώς, ο καλύτερος τρόπος αξιοποίησης του νερού κατάκλυσης για τεχνητό εμπλουτισμό είναι η συλλογή και αποθήκευση αυτού του νερού σε βαθιές λεκάνες ή ταμιευτήρες που εξασφαλίζουν προιζηματοποίηση αλλά δεν αναμένεται να δώσουν υψηλούς ρυθμούς διήθησης. Το καθαρό νερό, τότε, αποσύρεται από αυτούς τους ταμιευτήρες και τοποθετείται σε λεκάνες διήθησης που έχουν ήδη ξηραθεί και καθαριστεί ώστε να διατηρήσουν υψηλούς ρυθμούς διήθησης και έτσι πρέπει να είναι ρηχές (Bouwer and Rice, 2001).

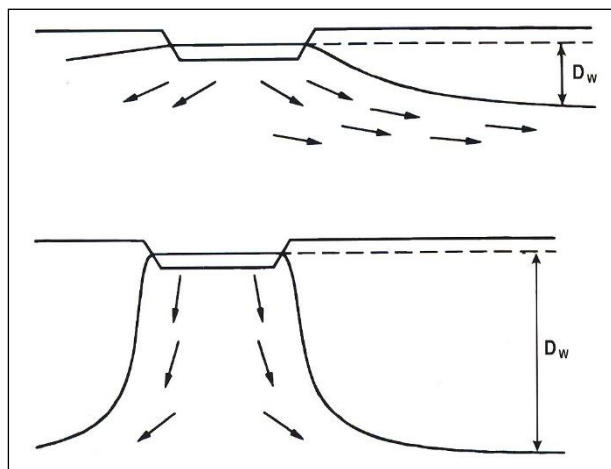
### **Υδραυλικά φορτία και ρυθμοί διήθησης**

Εξαιτίας της ανάγκης για συχνή ξήρανση και περιοδικό καθάρισμα των λεκανών εμπλουτισμού ή άλλων επιφανειακών συστημάτων διήθησης, η υδραυλική ικανότητα εκφράζεται καλύτερα με μέσους, μακράς διάρκειας ρυθμούς διήθησης ή με ρυθμούς υδραυλικής φόρτισης λαμβάνοντας υπ' όψιν το χρόνο ξήρανσης. Για παράδειγμα, αν τα διηθήμετρα δίνουν ρυθμό διήθησης 1 m/ημέρα και η απόφραξη προκαλεί το ρυθμό σε μια λεκάνη σε βαθμιαία μείωση σε 0,5 m/ημέρα μετά από 2 εβδομάδες κατάκλυσης και αν μετά χρειαστεί μια περίοδος ξήρανσης 2 εβδομάδων για να στεγνώσει και να καθαριστεί η λεκάνη ώστε να επανέλθει ο ρυθμός διήθησης στην αρχική τιμή 1 m/ημέρα, η λεκάνη θα έχει μείνει ξηρή το μισό χρόνο και θα έχει ένα μέσο ρυθμό διήθησης 0,75 m/ημέρα στη διάρκεια της κατάκλυσης. Αυτή η τιμή δίνει έναν μακράς διάρκειας ρυθμό υδραυλικής φόρτισης  $182,5 \times 0,75 = 138$  m/χρόνο ή 0,37 m/ημέρα. Με αυτόν το ρυθμό ένα εκτάριο μπορεί να συγκρατήσει 3700 m<sup>3</sup>/μέρα. Έτσι, αν απαιτούνται 10000m<sup>3</sup>/μέτρα για εμπλουτισμό, τότε χρειάζεται μια λεκάνη έκτασης 2,7 εκταρίων. Επίσης, πρέπει να ληφθούν υπ' όψη οι εποχικές συνθήκες, γιατί οι ρυθμοί του υδραυλικής φόρτισης το χειμώνα είναι χαμηλότερες από ό,τι το καλοκαίρι, εξαιτίας του υψηλότερου ιξώδους του κρύου νερού και της βραδύτερης ξήρανσης και αποκατάστασης της διήθησης. Αντιθέτως, η βιολογική δραστηριότητα και η βιοαπόφραξη μπορεί να είναι πιο έντονη το καλοκαίρι. Αυτή η δραστηριότητα μειώνει το ρυθμό διήθησης. Οι ρυθμοί διήθησης και υδραυλικής φόρτισης είναι συγκεκριμένοι για κάθε θέση και είναι προτιμότερο να εκτιμούνται σε δοκιμαστικές λεκάνες ή σε πραγματικά συστήματα. Το σχέδιο της κατάκλυσης, της ξήρανσης, του καθαρισμού και του σβανίσματος ή της άρωσης για να πετύχουμε τη μέγιστη υδραυλική φόρτιση δημιουργείται με τη διαδικασία των δοκιμών και των λαθών. Οι έμπειροι χειριστές γνωρίζουν ότι διαφορετικές λεκάνες διήθησης εμφανίζουν διαφορετική απόφραξη και συμπεριφορά διήθησης και διαφορετική απόκριση στην ξήρανση και στον καθαρισμό, ακόμα και αν έχει εφαρμοστεί η ίδια μέθοδος εμπλουτισμού. Για αυτόν το λόγο πρέπει να σχεδιάζονται εφαρμογές με πολλαπλές λεκάνες έτσι ώστε η κάθε λεκάνη να είναι υδραυλικά ανεξάρτητη και να μπορεί να λειτουργήσει με βάση τον καλύτερο δυνατό σχεδιασμό για αυτήν. Ο ρυθμός της υδραυλικής φόρτισης για συστήματα σε ζεστά, σχετικά ξηρά κλίματα με καλής ποιότητας εισερχόμενο νερό και με χρονική βάση το έτος συνήθως είναι περίπου 30 m/χρόνο για λεπτόκοκα αμμοαργιλώδη υλικά, 100 m/χρόνο για αργιλοαμμώδη υλικά, 300 m/χρόνο για μεσόκοκη άμμο και 500 m/χρόνο για χονδρόκοκη άμμο.

Επειδή ο ετήσιος ρυθμός εξάτμισης από υγρές επιφάνειες εδάφους και ελεύθερες επιφάνειες νερού συνήθως κυμαίνεται από 0,4 m/χρόνο για υγρά, ψυχρά κλίματα σε 2,4 m/χρόνο για ζεστά, ξηρά κλίματα οι απώλειες λόγω εξάτμισης είναι μικρές συγκρινόμενες με ρυθμούς υδραυλικής φόρτισης. Αυτή η διαφορά κάνει τον υπόγειο εμπλουτισμό ελκυστικό για αποθήκευση νερού, συμπεριλαμβανομένου μακράς διάρκειας αποθήκευση νερού, επειδή η εξάτμιση του υπόγειου νερού από τον υδροφόρο είναι ουσιαστικά μηδενική, εκτός αν έρχεται σε επαφή με ρίζες δένδρων ή φυτών (Bouwer 1975, 1978).

### **Η επιρροή του βάθους στη διήθηση**

Αν δεν υπάρχει στρώση απόφραξης στον πυθμένα μιας λεκάνης διήθησης και η λεκάνη είναι καθαρή, η υπόγεια στάθμη νερού μπορεί να φτάσει τη στάθμη νερού στη λεκάνη ενώ το νερό στη λεκάνη και στον υδροφόρο θα είναι τότε σε άμεση υδραυλική σχέση (σχ. 8.11). Αν το βάθος  $D_w$  του υπόγειου νερού κάτω από το επίπεδο του νερού στη λεκάνη, σε μικρή απόσταση από τη λεκάνη είναι σχετικά μικρό (σχ. 8.11 πάνω), τότε η ροή μακριά από τη λεκάνη θα είναι σχετικά πλευρική και θα ελέγχεται από την κλίση της επιφάνειας του υπόγειου νερού. Αν όμως το υπόγειο νερό είναι βαθύ και το  $D_w$  είναι σχετικά μεγάλο (σχ. 8.11 κάτω), τότε η ροή από τη λεκάνη θα είναι σχεδόν κατακόρυφη και θα ελέγχεται από την βαρύτητα. Έτσι, αν το βάθος του νερού στη λεκάνη αυξάνεται και το  $D_w$  θα αυξάνεται επίσης. Αν, λοιπόν, το  $D_w$  είναι μικρό, η επιρροή στη διήθηση είναι σημαντική, ενώ αν είναι ήδη μεγάλο η επιρροή θεωρείται αμελητέα. Για παράδειγμα, αν το  $D_w$  στο σύστημα του σχ. 8.11 είναι 3 m και το βάθος του νερού στη λεκάνη έχει αυξηθεί κατά 1 m, η ροή διήθησης θα αυξηθεί κατά 33%. Αν όμως, το  $D_w$  είναι 30 m η ίδια αύξηση του 1 m στο βάθος του νερού της λεκάνης θα επιφέρει αύξηση στη διήθηση μόνο κατά 3,3 %.



Σχήμα 8.11. Λεκάνη εμπλουτισμού με ρηχή επιφάνεια υπόγειου νερού και πλευρική ροή μέσα στον υδροφόρο, που ελέγχεται από την κλίση της επιφάνειας του νερού (πάνω), και με βαθιά επιφάνεια υπόγειου νερού και ροή κάτω από τη λεκάνη, που ελέγχεται από τη βαρύτητα (κάτω) (Bouwer, 2002).

Αν η λεκάνη ήταν αποφραγμένη, η ροή της διήθησης θα ελεγχόταν από το στρώμα της απόφραξης και η ακόρεστη ζώνη κάτω από τη λεκάνη είναι ακόρεστη, όπως φαίνεται στο σχ. 8.10 (Bouwer, 1982). Σε αυτήν την περίπτωση, ο ρυθμός διήθησης αυξάνει σχεδόν γραμμικά με το βάθος του νερού, όπως διαπιστώνεται και από την εξίσωση (7), αν δεν αλλάξει τίποτα άλλο. Εν τούτοις, μια αύξηση στο βάθος του νερού συμπιέζει τη στρώση απόφραξης, η οποία τότε γίνεται λιγότερο διαπερατή. Σε αυτήν την περίπτωση, ο ρυθμός διήθησης όχι μόνο δεν αυξάνει γραμμικά με το βάθος του νερού, αλλά συνήθως μειώνεται, όπως έχει διαπιστωθεί στην πράξη (Bouwer and Rice, 1989). Αυτή η συμπίεση συμβαίνει γιατί η αύξηση του βάθους του νερού στη λεκάνη με ακόρεστη ροή κάτω από τη στρώση της απόφραξης, αυξάνει την πίεση των κόκκων στη στρώση απόφραξης, γεγονός που οδηγεί σε συμπίεση της στρώσης, σύμφωνα με τη θεωρία της στερεοποίησης εδαφών (Bouwer and Rice, 1989). Συμπιεστές στρώσεις απόφραξης, όπως οργανικές αποθέσεις (λάσπη, άγλη) ή χαλαρές αργιλώδεις στρώσεις έχουν μεγαλύτερη συμπίεστικότητα και μεγαλύτερη μείωση στη διαπερατότητα από ότι λιγότερο συμπιεστά, αποφρακτικά υλικά όπως ιλυώδη ή λεπτόκκοκα αμμώδη υλικά.

Δευτερεύοντες παράγοντες αυξάνουν επίσης την απόφραξη. Για παράδειγμα, αν το βάθος του νερού αυξηθεί χωρίς να συνοδεύεται από αντίστοιχη αύξηση στο ρυθμό διήθησης, ο ρυθμός ανανέωσης του νερού στη λεκάνη θα μειωθεί. Το γεγονός αυτό οδηγεί τα αιωρούμενα, μονοκύτταρα άγλη, όπως το *Carteria Klebsi*, να εκτείνονται στο

ηλιακό φως για μεγαλύτερο διάστημα κάτι που συντελεί στη γρήγορη ανάπτυξη τους και κατ' επέκταση αυξάνει τη κρούστα των αλγών ή τη στρώση της απόφραξης στον πυθμένα, καθώς περισσότερα άλγη στραγγίζονται από το έδαφος. Επίσης, η υψηλή περιεκτικότητα σε άλγη στον πυθμένα και στο νερό αυξάνει το pH του νερού εξαιτίας της χρησιμοποίησης του διαλυμένου διοξειδίου του άνθρακα για φωτοσύνθεση από τα άλγη. Αυτή η αύξηση είναι η αιτία για να διαχωριστεί το ανθρακικό ασβέστιο από το διάλυμα και να συγκεντρωθεί στον πυθμένα, γεγονός που επιδεινώνει το πρόβλημα της απόφραξης και οδηγεί το ρυθμό της διήθησης σε ακόμα μεγαλύτερη πτώση. Οι παραπάνω διαδικασίες εξηγούν γιατί η αύξηση του βάθους του νερού σε λεκάνες διήθησης, που έχει ως στόχο την αποφυγή της μείωσης της διήθησης λόγω του φαινομένου της απόφραξης, ουσιαστικά επιφέρει επιπλέον μείωση στο ρυθμό διήθησης σε έκπληξη των χειριστών, που θεωρούν ότι τροφοδοτώντας με περισσότερο νερό τη στρώση απόφραξης θα υπερνικούσαν τη μείωση. Για αυτόν και άλλους λόγους, όπως η ευκολότερη και γρηγορότερη ξήρανση των λεκανών για την αποκατάσταση του ρυθμού διήθησης, προτιμούνται οι ρηχές λεκάνες εμπλουτισμού με βάθος νερού περίπου 0,5 m ή λιγότερο παρά οι πιο βαθιές λεκάνες.

### Επίδραση του τεχνητού εμπλουτισμού στη στάθμη των υπόγειων νερών

Τα κύρια υδραυλικά στοιχεία που χαρακτηρίζουν την επίδραση του τεχνητού εμπλουτισμού (Τ.Ε.) στο υπόγειο νερό, είναι ο σχηματισμός του υβώματος που δημιουργείται από το επιπρόσθετο φορτίο και η αυξημένη αποθήκευση που οφείλεται στο επιπρόσθετο νερό στον υδροφόρο.

Το επιπρόσθετο φορτίο προκαλεί ανύψωση της στάθμης του νερού στους ελεύθερους υδροφόρους ή της πιεζομετρικής επιφάνειας στους υπό πίεση υδροφόρους. Με την εισαγωγή του νερού, η πιεζομετρική επιφάνεια σχηματίζεται σε μια μορφή που είναι συνάρτηση των υδραυλικών παραμέτρων και των οριακών συνθηκών του υδροφόρου. Η δημιουργία του υβώματος έχει σχέση με την υδραυλική διάχυση (T/S), την ποσότητα εμπλουτισμού και τη διάρκεια της εφαρμογής του Τ.Ε..

Η αύξηση του αποθηκευμένου νερού του υδροφόρου έχει σχέση με το συντελεστή υδροχωρητικότητας (ή εναποθήκευσης) S, τη μεταβιβαστικότητα T, την ποσότητα επαναπλήρωσης και τις οριακές συνθήκες του υδροφόρου (Roscoe Moss Comp., 1990).

Τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά του υβώματος, που σχηματίζεται κάτω από επιφάνειες κατάκλυσης νερού, έχουν υπολογιστεί από διάφορους ερευνητές (Baumann, 1965, Bittinger and Trelease, 1965, Hantush, 1967) και βασίζονται σε πολύπλοκες μαθηματικές αναλύσεις που πηγάζουν από τις γενικές διαφορικές εξισώσεις της μη μόνιμης δισδιάστατης ροής του υπόγειου νερού, κατά την οριζόντια διεύθυνση (Bear, 1979, Τερζίδης και Καραμούζης, 2001):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( T_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( T_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) = S \frac{\partial h}{\partial t} \quad (\text{για υπό πίεση - αρτεσιανό - υδροφόρο}) \quad (8.8)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_x h \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y h \frac{\partial h}{\partial y} \right) = S_y \frac{\partial h}{\partial t} \quad (\text{για ελεύθερο υδροφόρο}) \quad (8.9)$$

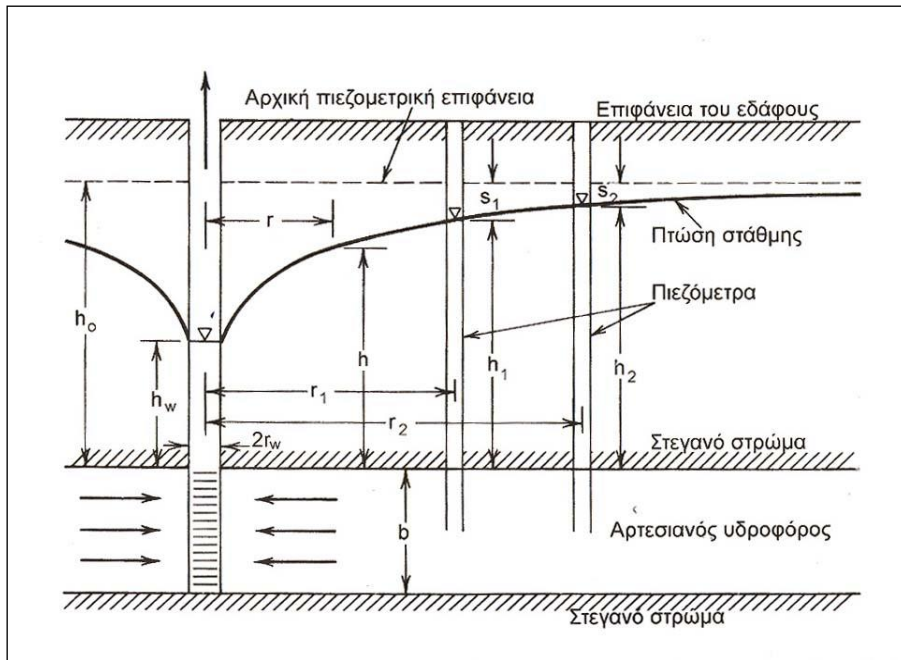
Ειδικά οι γενικές εξισώσεις δισδιάστατης ροής προς αντλούμενη γεώτρηση είναι:

1. Σε ομοιογενή και ισότροπο αρτεσιανό υδροφόρο (σχ. 8.12)

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t}, \quad \frac{\partial^2 h}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial h}{\partial r} = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (8.10)$$

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0 \quad (\text{εξίσωση Laplace, για σταθερή ροή}) \quad (8.11)$$

$$\frac{\partial^2 s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 s}{\partial y^2} = \frac{S}{T} \frac{\partial s}{\partial t}, \quad \frac{\partial^2 s}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial s}{\partial r} = \frac{S}{T} \frac{\partial s}{\partial t} \quad (8.12)$$



Σχήμα 8.12. Ακτινωτή ροή προς αντλούμενη γεώτρηση σε αρτεσιανό υδροφόρο (Todd and Mays, 2005).

2. Σε ομοιογενή και ισότροπο ελεύθερο υδροφόρο (σχ. 8.13)

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( h \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( h \frac{\partial h}{\partial y} \right) = \frac{S_y}{K} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (\text{Εξίσωση Boussinesq}) \quad (8.13)$$

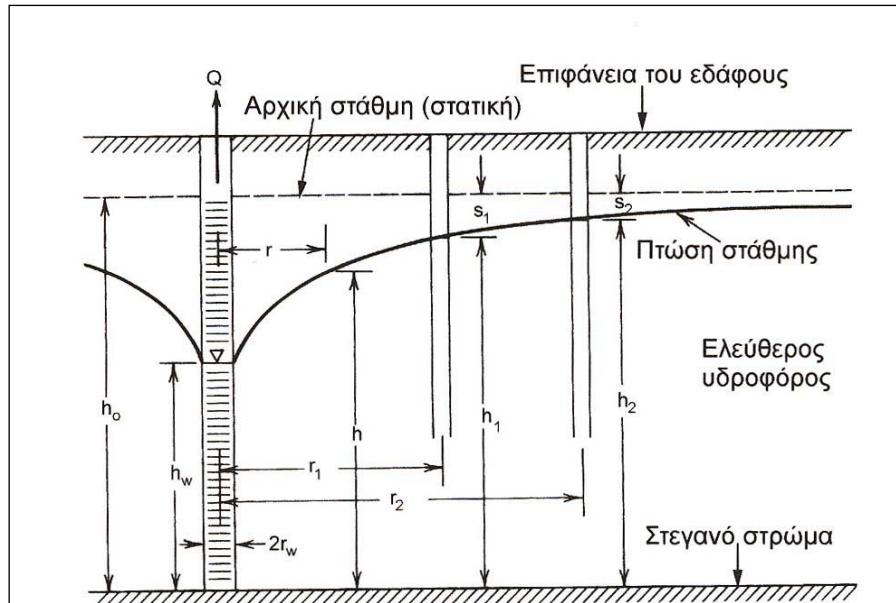
(για  $s \ll h_0 \Rightarrow h \cong b$ :  $\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = \frac{S_y}{Kb} \frac{\partial h}{\partial t}$ ,  $b$ : πάχος υδροφόρου)

$$\frac{\partial^2 h^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial h^2}{\partial r} = \frac{2S_y}{K} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (8.14)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ (h_0 - s) \frac{\partial s}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ (h_0 - s) \frac{\partial s}{\partial y} \right] = \frac{S_y}{K} \frac{\partial s}{\partial t} \quad (8.15)$$

$$\frac{\partial^2 s}{\partial r^2} - \frac{1}{h_0 - s} \left( \frac{\partial s}{\partial r} \right)^2 + \frac{1}{r} \frac{\partial s}{\partial r} = \frac{S_y}{K(h_0 - s)} \frac{\partial s}{\partial t} \quad (8.16)$$

(για  $s \ll 0,02h_0$ :  $\frac{\partial^2 s}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial s}{\partial r} = \frac{S_y}{Kh_0} \frac{\partial s}{\partial t}$ )



Σχήμα 8.13. Ακτινωτή ροή προς αντλούμενη γεώτρηση σε ελεύθερο υδροφόρο (Todd and Mays, 2005).

3. Σε ομοιογενή και ισότροπο υδροφόρο με διαρροές (σχ. 8.14)

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{h_0 - h}{\lambda^2} = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t}, \quad \frac{\partial^2 h}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial h}{\partial r} + \frac{h_0 - h}{\lambda^2} = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (8.17)$$

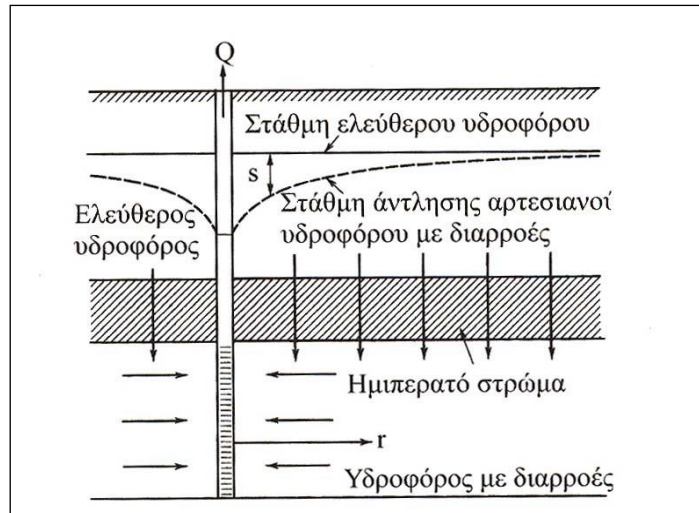
$$\frac{\partial^2 s}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 s}{\partial y^2} - \frac{s}{\lambda^2} = \frac{S}{T} \frac{\partial s}{\partial t}, \quad \frac{\partial^2 s}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial s}{\partial r} - \frac{s}{\lambda^2} = \frac{S}{T} \frac{\partial s}{\partial t} \quad (8.18)$$

όπου:  $\lambda = (Kbc)^{1/2}$  (παράγοντας διαρροής, [L]),  $c = b'/K'$  (υδραυλική αντίσταση, [T]),  $K'$ : υδραυλική αγωγιμότητα του ημιπερατού στρώματος,  $b'$ : πάχος του ημιπερατού στρώματος.

Οι παραδοχές των λύσεων που ακολουθούν είναι ότι (Haskell et al., 1965):

- ο υδροφόρος είναι ομοιογενής και ισότροπος,
- ο εμπλουτισμός γίνεται κατά την κατακόρυφη διεύθυνση και με ομοιόμορφο ρυθμό,
- η κορυφή του υβώματος δεν έρχεται σε επαφή με τη βάση της επιφάνειας κατάκλισης,
- το ύψος του υβώματος είναι μικρό σε σχέση με το αρχικό κορεσμένο πάχος.



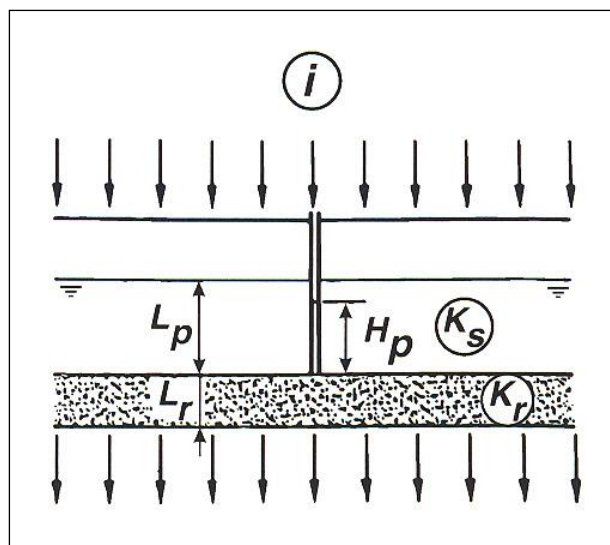


Σχήμα 8.14. Ακτινωτή ροή προς αντλούμενη γεώτρηση σε υδροφόρο με διαρροές (Todd and Mays, 2005).

Η ανύψωση της στάθμης των υπόγειων νερών κάτω από ένα επιφανειακό σύστημα διήθησης (π.χ. μια λεκάνη κατάκλυσης) ή η δημιουργία υβώματος μπορεί να συμβεί με δύο τρόπους, με τη δημιουργία κρεμαστού υβώματος (perched mounding) ή υβώματος στον υδροφόρο (aquifer mounding). Αν στην ακόρεστη ζώνη υπάρχουν στρώσεις με υδραυλική αγωγιμότητα μικρότερη από το ρυθμό διήθησης που προέρχεται από τη λεκάνη εμπλουτισμού, τότε το νερό συγκεντρώνεται πάνω από αυτές τις κρεμαστές στρώσεις και διαμορφώνεται το κρεμαστό (ή κρεμάμενο) υπόγειο νερό (perched groundwater). Τότε, αυτό το νερό ανυψώνεται μέχρι να δημιουργηθεί αρκετό φορτίο στην κρεμαστή στρώση ώστε η ροή του μέσω της κρεμαστής στρώσης να αποκτήσει τον ίδιο ρυθμό με τον οποίο κατεβαίνει από πάνω και η υπόγεια στάθμη του κρεμαστού νερού να βρεθεί σε θέση ισορροπίας. Για μεγάλες εκτάσεις υπόγειου εμπλουτισμού, αυτή η διαδικασία θεωρείται ροή μιας διάστασης (σχ. 8.15). Εφαρμόζοντας το νόμο του Darcy για την κατακόρυφη ροή στο κρεμαστό υπόγειο νερό πάνω από την παρεμβαλλόμενη στρώση και μέσα στην ίδια τη στρώση, έχουμε δύο εξισώσεις με δύο αγνώστους (Bouwer et al., 1999), που η επίλυση τους δίνει τη σχέση υπολογισμού του ύψους ισορροπίας του κρεμαστού υβώματος:

$$L_p = L_r \frac{\frac{V_i}{K_r} - 1}{1 - \frac{V_i}{K_s}} \quad (8.19)$$

όπου  $L_p$  είναι το ύψος ισορροπίας του κρεμαστού υβώματος πάνω από την περιορισμένη ζώνη (equilibrium height of perched mound),  $L_r$  το πάχος της παρεμβαλλόμενης στρώσης,  $V_i$  ο ρυθμός διήθησης και κατακόρυφης ροής διαμέσου του εδάφους και της στρώσης,  $K_r$  η υδραυλική αγωγιμότητα της στρώσης και  $K_s$  η υδραυλική αγωγιμότητα του εδάφους πάνω από τη στρώση.



Σχήμα 8.15. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά και σχετικοί συμβολισμοί σε σύστημα διήθησης με κρεμάμενο υπόγειο νερό (perched groundwater) πάνω από παρεμβαλλόμενη στρώση με υδραυλική αγωγιμότητα  $K$  (Bouwer, 2002).

Συχνά, το  $V_i$  είναι αρκετά μικρότερο από το  $K_s$  επειδή τα επιφανειακά εδάφη είναι συνήθως περισσότερο λεπτόκοκκα από ότι τα βαθύτερα εδάφη ή γιατί μια στρώση απόφραξης βρίσκεται στον πυθμένα του συστήματος διήθησης και μειώνει το ρυθμό διήθησης. Επίσης, το  $V_i$  είναι συνήθως αισθητά μεγαλύτερο από το  $K_r$ . Για αυτές τις συνθήκες, η εξ. 8.19 μπορεί να απλοποιηθεί σε:

$$L_p = V_i \frac{L_r}{K_r} \quad (8.20)$$

Σε διαστρωματωμένα εδάφη, τα κρεμαστά στρώματα συνήθως αποτελούνται από μη συνεχείς στρώσεις ή φακούς, κάτι που προκαλεί παράπλευρη ροή προς τα κάτω. Επίσης, για μεγάλες στενές λεκάνες εμπλουτισμού ή λωρίδες γης, είναι σημαντική η πλευρική επέκταση του κρεμαστού υβώματος πάνω από την παρεμβαλλόμενη στρώση (Bouwer, 1962). Έτσι, η κατακόρυφη ροή είναι μικρότερη και το νερό διαπερνά τη στρώση μέσω μιας μεγαλύτερης έκτασης, από ό,τι αυτής του συστήματος διήθησης. Αυτή η κατάσταση επίσης μειώνει το ύψος του κρεμαστού υβώματος. Σε αυτές τις συνθήκες, ο προσδιορισμός του ύψους κρεμαστών υβωμάτων υπόγειου νερού από την εξ. 8.19 ή 8.20 κρίνονται ως υπερεκτιμημένες.

Αρκετές επιστημονικές δημοσιεύσεις έχουν αναφερθεί στην ανύψωση του υβώματος του υπογείου νερού στον υδροφόρο σε απόκριση προς τη διήθηση από σύστημα εμπλουτισμού και μερικές άλλες στην πτώση του υβώματος αφού η διήθηση τελειώσει (Glover, 1964, Hantush, 1967, Marino, 1975a, 1975b, Warner et al., 1989). Η συνηθισμένη παραδοχή είναι ότι ο υδροφόρος είναι ομοιογενής και ισότροπος με απεριόριστη έκταση χωρίς άλλους εμπλουτισμούς ή εκφορτίσεις. Μια από τις δυσκολίες στο να πάρουμε αξιόπιστα αποτελέσματα από τις εξισώσεις είναι να έχουμε αντιπροσωπευτική τιμή της μεταβιβαστικότητας του υδροφόρου. Οι πιο αξιόπιστες τιμές της μεταβιβαστικότητας προέρχονται από ρυθμισμένα μοντέλα. Επόμενες σε αξιοπιστία είναι οι τιμές που προέρχονται από δοκιμαστικές αντλήσεις διαφόρων τύπων. Οι δοκιμές στιγμιαίας φόρτισης (slug tests) (Butler, 1997), παρά το ότι είναι εύκολο να εξαχθούν, αντιμετωπίζουν το πρόβλημα της εξαγωγής αντιπροσωπευτικών τιμών για μεγάλες εκτάσεις από σημειακές μετρήσεις (το σύννηδες πρόβλημα της κλίμακας). Οι μέσοι όροι από πολλαπλές δοκιμές ουσιαστικά αποδίδουν μικρότερες τιμές από τις πραγματικές

τιμές για μεγάλες εκτάσεις (Bouwer, 1996). Επίσης, τα αποτελέσματα από τις slug δοκιμές σε πρόσφατα ανοιγμένες γεωτρήσεις (μερικές φορές έχουν ανορυχθεί μόνο για τις slug δοκιμές και για μελλοντική παρακολούθηση) συχνά επηρεάζονται από τα υπολείμματα λάσπης στο φίλτρο της γεώτρησης και αυτό έχει ως αποτέλεσμα την υποτίμηση της υδραυλικής αγωγιμότητας. Η τοποθέτηση πιεζόμετρων σε δύο διαφορετικά βάθη στο κέντρο ενός υβώματος, επιτρέπει τον προσδιορισμό και της κάθετης και της οριζόντιας υδραυλικής αγωγιμότητας ενός υδροφόρου που έχει ήδη εμπλουτιστεί με συστήματα διήθησης, με τη βοήθεια προσομοιωμένου μοντέλου (Bouwer et al., 1974).

Σε βαθύ ή μεγάλου πάχους ελεύθερο υδροφόρο, οι γραμμές ροής του εμπλουτισμού συγκεντρώνονται στο πάνω ή «ενεργό» τμήμα του υδροφόρου, ενώ στο βαθύτερο ή «παθητικό» τμήμα του υδροφόρου η ροή είναι σχεδόν στάσιμη. Η χρήση της μεταβιβαστικότητας ολόκληρου του υδροφόρου ανάμεσα στην υπόγεια στάθμη νερού και στο κατώτερο στεγανό όριο για τους υπολογισμούς του υβώματος οδηγεί σε σίγουρη υποτίμηση της ανύψωσης του υβώματος. Παλαιότερη εργασία (Bouwer, 1962) με τη χρήση αναλογικού μοντέλου δικτύου αντίστασης, έδειξε ότι για μεγάλες ορθογώνιες εκτάσεις εμπλουτισμού ή για στενές λωρίδες εμπλουτισμού και έναν πολύ παχύ υδροφόρο το πάχος του ενεργού, ανώτερου τμήματος του υδροφόρου είναι σχεδόν ίσο με το πλάτος της περιοχής εμπλουτισμού. Αυτό το πάχος πρέπει να πολλαπλασιαστεί με το  $K$  του ανώτερου υδροφόρου. έτσι ώστε να πάρουμε την «ενεργή» μεταβιβαστικότητα για τους υπολογισμούς του υβώματος. Επίσης, αν χρησιμοποιηθεί η εξίσωση Hantush ή κάποια άλλη για τον υπολογισμό της μακράς διάρκειας δημιουργίας υβώματος, όπως αποθήκευση του νερού της κοίτης σε περιοχές με βαθιά στάθμη υπόγειου νερού, μεγαλύτερες τιμές μεταβιβαστικότητας πρέπει να χρησιμοποιηθούν ώστε να αντισταθμίσουν την αύξηση στη μεταβιβαστικότητα, καθώς το επίπεδο του υπόγειου νερού ανυψώνεται. Διαφορετικά, η εξίσωση Hantush θα υπερεκτιμήσει την ανύψωση του υβώματος.

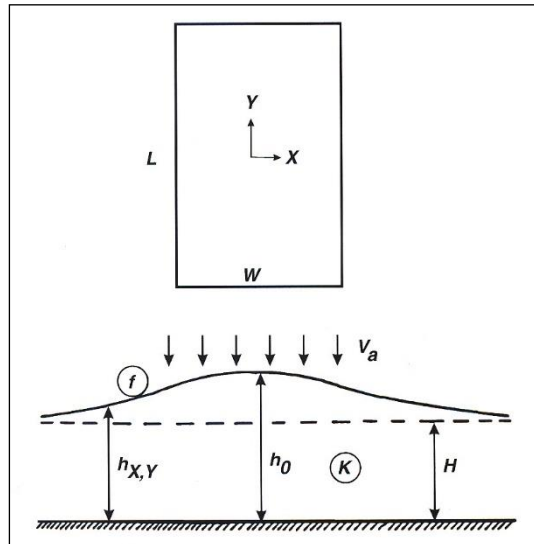
Ο καλύτερος τρόπος για να εξαχθούν αντιπροσωπευτικές τιμές μεταβιβαστικότητας για τα συστήματα Τ.Ε. είναι να υπάρχει μια ικανοποιητικά μεγάλη δοκιμαστική περιοχή διήθησης ή ένα πιλοτικό πρόγραμμα που να δημιουργεί ύβωμα υπόγειου νερού και κατόπιν να υπολογίσουμε τη μεταβιβαστικότητα από το ύψος αυτό του υβώματος χρησιμοποιώντας για παράδειγμα την εξίσωση Hantush (εξ. 8.21). Το πορώδες (fillable porosity) που θα χρησιμοποιηθεί στις εξισώσεις για την ανύψωση του υβώματος, είναι συνήθως μεγαλύτερο από την ειδική απόδοση του υδροφόρου, επειδή οι ακόρεστες ζώνες συνήθως είναι σχετικά ξηρές, ειδικά σε ξηρά κλίματα και αποτελούνται από χονδρόκοκκα υλικά όπως άμμος και χαλίκια. Το ακόρεστο πορώδες πρέπει να λαμβάνεται ως η διαφορά ανάμεσα στο υπάρχον και στο κορεσμένο περιεχόμενο νερό που περιέχει το υλικό έξω από τη διαβρεγμένη ζώνη, κάτω από το σύστημα διήθησης. Η εξίσωση του Hantush είναι:

$$h_{x,y,t} - H = \frac{V_a t}{4f} \left\{ \begin{array}{l} F[(W/2 + x)h, (L/2 + y)h] \\ + F[(W/2 + x)h, (L/2 - y)h] \\ + F[(W/2 - x)h, (L/2 + y)h] \\ + F[(W/2 - x)h, (L/2 - y)h] \end{array} \right\} \quad (8.21)$$

όπου  $h_{x,y,t}$  είναι το ύψος της στάθμης του υπόγειου νερού πάνω από τη στεγανή στρώση κατά  $x, y$ , και  $t$  ο χρόνος (σχ. 8.16),  $H$  το αρχικό ύψος της στάθμης του υπόγειου νερού πάνω από τη στεγανή στρώση,  $V_a$  ο ρυθμός άφιξης του νερού στην επιφάνεια του υπόγειου νερού από τη λεκάνη ή τις λεκάνες διήθησης,  $t$  χρόνος από την έναρξη του εμπλουτισμού,  $f$  το πορώδες της ακόρεστης ζώνης (fillable porosity) ( $1 > f > 0$ ),  $L$  το μήκος της λεκάνης εμπλουτισμού ή της υπό εξέταση περιοχής εμπλουτισμού (κατά τη διεύθυνση  $y$ ) και  $W$  το πλάτος της λεκάνης εμπλουτισμού (κατά  $x$ ),  $n = (4t T / f)^{-1/2}$ , και

$$F(\alpha, \beta) = \int_0^1 \operatorname{erf}(\alpha \tau^{-1/2}) \cdot \operatorname{erf}(\beta \tau^{-1/2}) d\tau, \quad \text{όπου} \quad \alpha = (W/2 + x)h \quad \text{ή} \quad (W/2 - x)h \text{ και}$$

$$\beta = (L/2 + y)h \quad \text{ή} \quad (L/2 - y)h.$$
 Τιμές της  $F(\alpha, \beta)$  έχουν πινακοποιηθεί από τον Hantush και παρουσιάζονται στον Πίνακα 8.1.



Σχήμα 8.16. Κάτοψη (πάνω) και τομή (κάτω) ενός συστήματος διήθησης – εμπλουτισμού, όπου φαίνονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και οι σχετικοί συμβολισμοί για την εξίσωση Hantush (Bouwer, 2002).

Αν στην ακόρεστη ζώνη προκύψει εκτεταμένη κρεμαστή και πλευρική ροή, τότε το  $V_a$  είναι μικρότερο από το μέσο ρυθμό διήθησης της περιοχής εμπλουτισμού και το  $L$  και το  $W$  είναι μεγαλύτερα από τις πραγματικές διαστάσεις του συστήματος διήθησης. Συνήθως, ωστόσο, το  $V_a$  θεωρείται ως ο ρυθμός διήθησης ολόκληρης της περιοχής εμπλουτισμού (συμπεριλαμβανομένων των ξηρών περιοχών ανάμεσα στις λεκάνες) και το  $L$  και το  $W$  θεωρούνται οι διαστάσεις ολόκληρης της εφαρμογής εμπλουτισμού. Η εξίσωση του Hantush επίσης χρησιμοποιείται για να υπολογίσουμε την ανύψωση του υβώματος αρκετά μακρύτερα από την περιοχή εμπλουτισμού, σε απόσταση περίπου  $0,5 W$  και  $0,5 L$  για να αποφύγουμε αρνητικές τιμές στη συνάρτηση σφάλματος της εξ. (10). Για να προβλέψουμε τις επιδράσεις στην επιφάνεια του υπόγειου νερού αρκετά μακριά από την εφαρμογή του Τ.Ε., χρησιμοποιούμε την εξίσωση Theis. Προγράμματα υπολογιστή όπως το Modflow (McDonald and Harbaugh, 1988) χρησιμοποιούνται για να περιλάβουν άλλες περιφερειακές εισροές εμπλουτισμού και εκροές από αντλήσεις γεωτρήσεων για τον υδροφόρο.

Μεγάλο ενδιαφέρον για τους υπεύθυνους της διαχείρισης και της λειτουργίας έργων Τ.Ε. έχει η μακροπρόθεσμη επίδραση του εμπλουτισμού στα υπόγεια νερά. Οι συνηθισμένες ερωτήσεις είναι:

- Που θα βρίσκεται το ύψωμα του υπόγειου νερού σε 10, 20 ή 50 χρόνια από τώρα;
- Πόση ποσότητα νερού μπορεί να αποθηκευτεί υπόγεια;
- Θα κατακλυστεί όλη η περιοχή;
- Πως πρέπει να ανακτηθεί το νερό από τον υδροφόρο ώστε να αποφευχθεί ο κατακλυσμός ή η υπερβολική ανύψωση της στάθμης του νερού στην περιοχή εμπλουτισμού και σε παρακείμενες περιοχές.

Πίνακας 8.1. Τιμές της συνάρτησης  $f(\alpha, \beta)$  στην εξίσωση (10), για διάφορες τιμές των  $\alpha$  και  $\beta$  (Hantush, 1967, Todd and Mays, 2005).

$\beta$																		
$\alpha$	0.02	0.04	0.06	0.08	0.10	0.14	0.18	0.22	0.26	0.30	0.34	0.38	0.42	0.46	0.50	0.54	0.58	0.62
0.02	0.0041	0.0073	0.0101	0.0125	0.0146	0.0184	0.0216	0.0243	0.0267	0.0288	0.0306	0.0322	0.0337	0.0349	0.0361	0.0371	0.0380	0.0387
0.04	0.0073	0.0135	0.0188	0.0236	0.0278	0.0353	0.0416	0.0470	0.0518	0.0559	0.0596	0.0628	0.0657	0.0683	0.0705	0.0725	0.0743	0.0759
0.06	0.0101	0.0188	0.0266	0.0335	0.0398	0.0509	0.0602	0.0684	0.0754	0.0817	0.0871	0.0920	0.0963	0.1001	0.1035	0.1065	0.1091	0.1115
0.08	0.0125	0.0236	0.0335	0.0425	0.0508	0.0652	0.0776	0.0884	0.0978	0.1060	0.1133	0.1197	0.1254	0.1305	0.1350	0.1389	0.1425	0.1456
0.10	0.0146	0.0278	0.0398	0.0508	0.0608	0.0786	0.0939	0.1072	0.1188	0.1290	0.1381	0.1461	0.1532	0.1595	0.1650	0.1700	0.1744	0.1783
0.14	0.0184	0.0353	0.0509	0.0652	0.0786	0.1025	0.1232	0.1414	0.1573	0.1714	0.1839	0.1941	0.2048	0.2135	0.2212	0.2281	0.2343	0.2397
0.18	0.0216	0.0416	0.0602	0.0776	0.0939	0.1232	0.1490	0.1716	0.1916	0.2094	0.2251	0.2391	0.2515	0.2626	0.2724	0.2812	0.2890	0.2959
0.22	0.0243	0.0470	0.0684	0.0884	0.1072	0.1414	0.1716	0.1984	0.2222	0.2433	0.2621	0.2789	0.2938	0.3071	0.3189	0.3295	0.3389	0.3472
0.26	0.0267	0.0518	0.0754	0.0978	0.1188	0.1573	0.1916	0.2222	0.2494	0.2737	0.2954	0.3147	0.3320	0.3474	0.3612	0.3735	0.3844	0.3941
0.30	0.0288	0.0559	0.0817	0.1060	0.1290	0.1714	0.1994	0.2433	0.2737	0.3009	0.3252	0.3470	0.3665	0.3839	0.3995	0.4134	0.4257	0.4368
0.34	0.0306	0.0596	0.0871	0.1133	0.1391	0.1839	0.2251	0.2621	0.2954	0.3252	0.3520	0.3761	0.3976	0.4169	0.4341	0.4495	0.4633	0.4756
0.38	0.0322	0.0628	0.0920	0.1197	0.1461	0.1949	0.2391	0.2789	0.3147	0.3470	0.3761	0.4022	0.4256	0.4466	0.4654	0.4823	0.4973	0.5108
0.42	0.0377	0.0657	0.0963	0.1254	0.1532	0.2048	0.2515	0.2938	0.3320	0.3665	0.3976	0.4256	0.4508	0.4734	0.4937	0.5119	0.5281	0.5427
0.46	0.0349	0.0683	0.1001	0.1305	0.1595	0.2135	0.2626	0.3071	0.3474	0.3839	0.4169	0.4466	0.4734	0.4975	0.5161	0.5385	0.5559	0.5715
0.50	0.0361	0.0705	0.1035	0.1350	0.1650	0.2212	0.2724	0.3189	0.3612	0.3995	0.4341	0.4654	0.4937	0.5191	0.5420	0.5626	0.5810	0.5975
0.54	0.0371	0.0725	0.1065	0.1389	0.1700	0.2281	0.2812	0.3295	0.3735	0.4134	0.4495	0.4823	0.5119	0.5385	0.5626	0.5842	0.6036	0.6209
0.58	0.0380	0.0743	0.1091	0.1425	0.1744	0.2343	0.2890	0.3389	0.3844	0.4257	0.4633	0.4973	0.5281	0.5559	0.5810	0.6036	0.6238	0.6420
0.62	0.0387	0.0759	0.1115	0.1456	0.1783	0.2397	0.2959	0.3472	0.3941	0.4368	0.4756	0.5108	0.5427	0.5715	0.5975	0.6209	0.6420	0.6609
0.66	0.0394	0.0773	0.1136	0.1484	0.1718	0.2445	0.3020	0.3547	0.4027	0.4466	0.4865	0.5227	0.5556	0.5854	0.6122	0.6364	0.6582	0.6778
0.70	0.0401	0.0785	0.1154	0.1509	0.1849	0.2488	0.3075	0.3612	0.4104	0.4553	0.4962	0.5334	0.5672	0.5977	0.6254	0.6503	0.6728	0.6929
0.74	0.0406	0.0796	0.1117	0.1531	0.1876	0.2526	0.3123	0.3671	0.4172	0.4630	0.5048	0.5429	0.5774	0.6087	0.6371	0.6627	0.6857	0.7064
0.78	0.0411	0.0806	0.1185	0.1550	0.1900	0.2559	0.3166	0.3722	0.4232	0.4699	0.5125	0.5513	0.5865	0.6185	0.6475	0.6736	0.6972	0.7184
0.82	0.0415	0.0814	0.1198	0.1567	0.1921	0.2589	0.3203	0.3768	0.4286	0.4760	0.5192	0.5587	0.5946	0.6272	0.6567	0.6834	0.7074	0.7291
0.86	0.0419	0.0822	0.1209	0.1582	0.1940	0.2615	0.3237	0.3808	0.4333	0.4813	0.5252	0.5653	0.6017	0.6348	0.6648	0.6920	0.7165	0.7386
0.90	0.0422	0.0828	0.1219	0.1595	0.1957	0.2638	0.3266	0.3844	0.4374	0.4860	0.5305	0.5711	0.6080	0.6416	0.6721	0.6996	0.7245	0.7469
0.94	0.0425	0.0834	0.1228	0.1607	0.1971	0.2658	0.3292	0.3875	0.4411	0.4902	0.5351	0.5762	0.6136	0.6476	0.6784	0.7063	0.7316	0.7543
0.98	0.0428	0.0839	0.1236	0.1617	0.1984	0.2676	0.3314	0.3902	0.4442	0.4938	0.5392	0.5807	0.6184	0.6528	0.6840	0.7123	0.7378	0.7608
1.00	0.0429	0.0842	0.1239	0.1622	0.1990	0.2684	0.3324	0.3914	0.4457	0.4955	0.5410	0.5827	0.6206	0.6552	0.6865	0.7150	0.7406	0.7638
1.20	0.0437	0.0858	0.1263	0.1654	0.2030	0.2740	0.3396	0.4001	0.4558	0.5070	0.5540	0.5969	0.6362	0.6719	0.7044	0.7339	0.7605	0.7846
1.40	0.0441	0.0866	0.1275	0.1669	0.2049	0.2767	0.3431	0.4043	0.4608	0.5127	0.5603	0.6039	0.6438	0.6801	0.7132	0.7432	0.7704	0.7949
1.80	0.0444	0.0871	0.1283	0.1680	0.2062	0.2785	0.3454	0.4071	0.4641	0.5165	0.5645	0.6086	0.6489	0.6856	0.7190	0.7494	0.7769	0.8018
2.00	0.0444	0.0871	0.1284	0.1681	0.2064	0.2787	0.3457	0.4075	0.4645	0.5169	0.5651	0.6092	0.6495	0.6863	0.7198	0.7502	0.7778	0.8027
2.20	0.0444	0.0872	0.1284	0.1682	0.2065	0.2788	0.3458	0.4076	0.4646	0.5171	0.5653	0.6094	0.6497	0.6865	0.7200	0.7505	0.7781	0.8030
2.50	0.0444	0.0872	0.1284	0.1682	0.2065	0.2788	0.3458	0.4077	0.4647	0.5172	0.5653	0.6095	0.6498	0.6867	0.7202	0.7506	0.7782	0.8032
3.00	0.0444	0.0872	0.1284	0.1682	0.2065	0.2789	0.3458	0.4077	0.4647	0.5172	0.5654	0.6095	0.6499	0.6867	0.7202	0.7506	0.7782	0.8032

Πίνακας 8.1 (συνέχεια). Τιμές της συνάρτησης  $f(\alpha, \beta)$  στην εξίσωση (10), για διάφορες τιμές των  $\alpha$  και  $\beta$  (Hantush, 1967, Todd and Mays, 2005).

$\beta$ $\alpha$	0.62	0.66	0.70	0.74	0.78	0.82	0.86	0.90	0.94	0.98	1.00	1.20	1.40	1.80	2.00	2.20	2.50	3.00
0.02	0.0387	0.0394	0.0401	0.0406	0.0411	0.0415	0.0419	0.0422	0.0425	0.0428	0.0429	0.0437	0.0441	0.0444	0.0444	0.0444	0.0444	0.0444
0.04	0.0759	0.0773	0.0785	0.0796	0.0806	0.0814	0.0822	0.0828	0.0834	0.0839	0.0842	0.0858	0.0866	0.0871	0.0871	0.0872	0.0882	0.0882
0.06	0.1115	0.1136	0.1154	0.1171	0.1185	0.1198	0.1209	0.1219	0.1228	0.1236	0.1239	0.1263	0.1275	0.1283	0.1284	0.1284	0.1284	0.1284
0.08	0.1456	0.1484	0.1509	0.1531	0.1550	0.1567	0.1582	0.1595	0.1606	0.1617	0.1622	0.1654	0.1669	0.1680	0.1681	0.1682	0.1682	0.1682
0.10	0.1783	0.1818	0.1849	0.1876	0.1900	0.1921	0.1940	0.1957	0.1971	0.1984	0.1990	0.2030	0.2049	0.2062	0.2064	0.2065	0.2065	0.2065
0.14	0.2397	0.2445	0.2488	0.2526	0.2559	0.2589	0.2615	0.2638	0.2658	0.2676	0.2684	0.2740	0.2777	0.2785	0.2787	0.2788	0.2788	0.2788
0.18	0.2959	0.3020	0.3075	0.3123	0.3166	0.3203	0.3237	0.3266	0.3292	0.3314	0.3224	0.3396	0.3431	0.3454	0.3457	0.3454	0.3454	0.3454
0.22	0.3472	0.3547	0.3612	0.3671	0.3722	0.3768	0.3808	0.3844	0.3875	0.3902	0.3914	0.4001	0.4043	0.4071	0.4075	0.4076	0.4077	0.4077
0.26	0.3941	0.4027	0.4104	0.4172	0.4232	0.4286	0.4333	0.4374	0.4411	0.4442	0.4457	0.4558	0.4608	0.4641	0.4645	0.4646	0.4647	0.4647
0.30	0.4368	0.4466	0.4553	0.4630	0.4699	0.4760	0.4813	0.4860	0.4902	0.4938	0.4955	0.5070	0.5127	0.5165	0.5159	0.5171	0.5172	0.5172
0.34	0.4756	0.4865	0.4962	0.5048	0.5125	0.5192	0.5252	0.5305	0.5351	0.5392	0.5410	0.5540	0.5603	0.5645	0.5651	0.5653	0.5653	0.5654
0.38	0.5108	0.5227	0.5334	0.5429	0.5513	0.5587	0.5653	0.5711	0.5762	0.5807	0.5827	0.5969	0.6039	0.6086	0.6092	0.6094	0.6095	0.6095
0.42	0.5427	0.5556	0.5672	0.5774	0.5865	0.5946	0.6017	0.6080	0.6136	0.6184	0.6206	0.6362	0.6438	0.6489	0.6495	0.6497	0.6498	0.6499
0.46	0.5715	0.5854	0.5977	0.6087	0.6185	0.6272	0.6348	0.6416	0.6476	0.6528	0.6552	0.6719	0.6801	0.6856	0.6863	0.6865	0.6867	0.6867
0.50	0.5975	0.6122	0.6254	0.6371	0.6475	0.6567	0.6648	0.6721	0.6784	0.6840	0.6865	0.7044	0.7132	0.7190	0.7198	0.7200	0.7202	0.7202
0.54	0.6209	0.6364	0.6503	0.6627	0.6736	0.6834	0.6920	0.6996	0.7063	0.7123	0.7150	0.7379	0.7432	0.7494	0.7502	0.7505	0.7506	0.7506
0.58	0.6420	0.6482	0.6728	0.6857	0.6972	0.7074	0.7165	0.7245	0.7316	0.7378	0.7406	0.7605	0.7704	0.7799	0.7778	0.7781	0.7782	0.7782
0.62	0.6609	0.6778	0.6929	0.7064	0.7184	0.7291	0.7386	0.7469	0.7543	0.7608	0.7638	0.7846	0.7949	0.8018	0.8027	0.8030	0.8032	0.8032
0.66	0.6778	0.7953	0.7110	0.7250	0.7375	0.7486	0.7584	0.7671	0.7748	0.7816	0.7846	0.8064	0.8171	0.8243	0.8252	0.8255	0.8257	0.8257
0.70	0.6929	0.7110	0.7272	0.7417	0.7546	0.7660	0.7762	0.7852	0.7932	0.8002	0.8034	0.8259	0.8370	0.8445	0.8454	0.8458	0.8460	0.8460
0.74	0.7064	0.7250	0.7414	0.7566	0.7698	0.7816	0.7921	0.8014	0.8096	0.8168	0.8201	0.8434	0.8549	0.8627	0.8636	0.8640	0.8642	0.8642
0.78	0.7184	0.7375	0.7546	0.7698	0.7834	0.7956	0.8063	0.8159	0.8243	0.8317	0.8351	0.8591	0.8710	0.8789	0.8799	0.8803	0.8805	0.8805
0.82	0.7291	0.7486	0.7660	0.7816	0.7956	0.8080	0.8190	0.8288	0.8374	0.8450	0.8485	0.8731	0.8853	0.8935	0.8945	0.8949	0.8951	0.8951
0.86	0.7386	0.7584	0.7762	0.7921	0.8063	0.8190	0.8302	0.8402	0.8491	0.8569	0.8604	0.8855	0.8980	0.9065	0.9075	0.9079	0.9081	0.9081
0.90	0.7469	0.7671	0.7852	0.8014	0.8159	0.8288	0.8402	0.8504	0.8594	0.8674	0.8710	0.8966	0.9094	0.9180	0.9191	0.9195	0.9187	0.9187
0.94	0.7543	0.7748	0.7932	0.8096	0.8243	0.8374	0.8491	0.8594	0.8686	0.8767	0.8803	0.9064	0.9195	0.9282	0.9294	0.9298	0.9300	0.9300
0.98	0.7608	0.7816	0.8002	0.8168	0.8317	0.8450	0.8569	0.8674	0.8767	0.8849	0.8886	0.9151	0.9284	0.9373	0.9384	0.9389	0.9391	0.9391
1.00	0.7638	0.7846	0.8034	0.8201	0.8351	0.8485	0.8604	0.8710	0.8803	0.8886	0.8924	0.9191	0.9324	0.9414	0.9426	0.9430	0.9432	0.9433
1.20	0.7846	0.8064	0.8259	0.8434	0.8591	0.8731	0.8855	0.8966	0.9064	0.9151	0.9191	0.9472	0.9614	0.9709	0.9722	0.9726	0.9728	0.9729
1.40	0.7949	0.8171	0.8370	0.8549	0.8710	0.8853	0.8980	0.9094	0.9195	0.9284	0.9324	0.9614	0.9759	0.9858	0.9871	0.9875	0.9878	0.9878
1.80	0.8018	0.8243	0.8445	0.8627	0.8789	0.8935	0.9065	0.9180	0.9282	0.9373	0.9414	0.9709	0.9858	0.9959	0.9972	0.9972	0.9979	0.9980
2.00	0.8027	0.8252	0.8454	0.8636	0.8799	0.8945	0.9075	0.9191	0.9294	0.9384	0.9426	0.9722	0.9871	0.9972	0.9985	0.9990	0.9992	0.9994
2.20	0.8030	0.8255	0.8458	0.8640	0.8803	0.8949	0.9079	0.9195	0.9298	0.9389	0.9430	0.9726	0.9875	0.9977	0.9990	0.9995	0.9997	0.9998
2.50	0.8032	0.8257	0.8460	0.8642	0.8805	0.8951	0.9081	0.9197	0.9300	0.9391	0.9432	0.9728	0.9878	0.9979	0.9992	0.9997	1.0000	1.0000
3.00	0.8032	0.8257	0.8460	0.8642	0.8805	0.8951	0.9081	0.9197	0.9300	0.9391	0.9433	0.9729	0.9878	0.9980	0.9993	0.9998	1.0000	1.0000

Μερικές εφαρμογές Τ.Ε. με τη διαδικασία αποθήκευσης όχθης (water banking) έχουν δοκιμαστεί σε ερημικές κοιλάδες της ερήμου στη Νότια Καλιφόρνια και στην Αριζόνα, στις Η.Π.Α. Επειδή αυτές οι περιοχές θα έχουν τότε λεκάνες για εμπλουτισμό και γεωτρήσεις για άντληση υπόγειου νερού, είναι ενδιαφέρον να συλλεχθεί ο φυσικός εμπλουτισμός που συμβαίνει σε αυτές τις περιοχές, έτσι ώστε περισσότερο να αντλείται από τον υδροφόρο από ό,τι εισέρχεται μέσω του τεχνητού εμπλουτισμού. Αυτό το σχέδιο έχει δημιουργήσει έντονο ενδιαφέρον στην εκτίμηση των ρυθμών του φυσικού εμπλουτισμού, που σε αυτά τα ξηρά κλίματα είναι αρκετά μικρός, (Tyler et al., 1996) και μόνο ένα κλάσμα (ίσως το 1%) από μια μικρή κατακρήμνιση (σχεδόν 10 cm/χρόνο ή ακόμα λιγότερο). Για να αποφύγουμε την εξάντληση του υπόγειου νερού, η υπερβολική άντλησή του δεν πρέπει να υπερβαίνει το φυσικό ρυθμό εμπλουτισμού. Η παρακολούθηση της στάθμης του υπόγειου νερού είναι απαραίτητη για να βεβαιωθούμε ότι δεν συμβαίνουν ανεπιθύμητες εξαντλήσεις ή άλλες αντιδράσεις στη στάθμη του.

Μια γρήγορη γνώμη για το τελικό ύψος του νερού ή για το σχετικό ύψος στο οποίο θα ισορροπήσει το νερό του υβώματος σε κάποια εφαρμογή εμπλουτισμού, μπορεί να αποκτηθεί από μια άντληση σταθερής κατάστασης, όπου το ύβωμα θεωρείται ότι βρίσκεται σε ισορροπία με σταθερή τη στάθμη του υπόγειου νερού σε κάποιο βάθος και σε μεγάλη απόσταση από το σύστημα διήθησης. Η σταθερή στάθμη νερού μπορεί να επιτευχθεί με άντληση του υπόγειου νερού, με εκφόρτιση σε επιφανειακό νερό όπως ποτάμια ή λίμνες ή μέσω κάποιας άλλης μεθόδευσης. Επίσης, όσο πιο μακριά βρίσκεται το νερό από την περιοχή εμπλουτισμού, τόσο πιο αργά ανυψώνεται η υπόγεια στάθμη του νερού. Έτσι, όταν η υπόγεια στάθμη νερού βρίσκεται αρκετά μακριά από την περιοχή εμπλουτισμού, μπορεί να θεωρηθεί σταθερή.

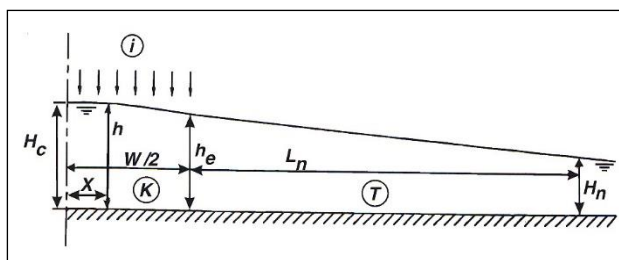
Συνήθως, τα συστήματα εμπλουτισμού αποτελούνται από αρκετές λεκάνες ή άλλες εγκαταστάσεις εμπλουτισμού. Εξισώσεις μόνιμης ή σταθερής ροής (steady-state) έχουν αναπτυχθεί για δύο γενικά γεωμετρικά σχήματα περιοχών εμπλουτισμού:

1. οι λεκάνες διαμορφώνουν μια επιμήκη λωρίδα με μήκος τουλάχιστον πέντε φορές το πλάτος, έτσι ώστε μετά από καιρό να λειτουργεί σαν μια άπειρη επιμήκης λωρίδα (Glover, 1964), και
2. οι λεκάνες βρίσκονται σε στρογγυλή, τετράγωνη ή ακανόνιστου σχήματος περιοχή που μπορεί να προσομοιωθεί με μια ισοδύναμη κυκλική περιοχή (Bouwer et al., 1999).

Για την περίπτωση της επιμήκους λωρίδας (μήκους τουλάχιστον πενταπλάσιου του πλάτους) (σχ. 8.17), η ροή του υπόγειου νερού μακριά από την εδαφική λωρίδα θεωρείται ως γραμμική οριζόντια ροή (Dupuit-Forchheimer flow). Κάτω από την περιοχή διήθησης, η πλευρική ροή θεωρείται ότι αυξάνει γραμμικά με την απόσταση από το κέντρο. Η πλευρική ροή, τότε, θεωρείται σταθερή ανάμεσα στο άκρο του συστήματος εμπλουτισμού σε απόσταση  $W/2$  από το κέντρο και στην σταθερού ελέγχου υπόγεια στάθμη σε απόσταση  $L_n$  από το άκρο (σχ. 8.17). Με βάση τις συνθήκες αυτές οδηγούμαστε στην εξίσωση:

$$H_c - H_n = \frac{iW}{2T} \left( \frac{W}{4} + L_n \right) \quad (8.22)$$

για την τελική ανύψωση του υβώματος του υπόγειου νερού κάτω από το κέντρο της λωρίδας εμπλουτισμού όταν υπάρχει ισορροπία ανάμεσα στον εμπλουτισμό και στην άντληση του υδροφόρου (Bouwer et al., 1999). Στην εξίσωση (8.22) το  $H_c$  είναι το ύψος του υβώματος του υπόγειου νερού στο κέντρο της περιοχής εμπλουτισμού,  $H_n$  το ύψος του υπόγειου νερού στην περιοχή ελέγχου, (i) ο μέσος ρυθμός διήθησης στην περιοχή εμπλουτισμού (ο συνολικός εμπλουτισμός διαιρεμένος με τη συνολική έκταση),  $W$  το πλάτος της περιοχής εμπλουτισμού,  $L_n$  η απόσταση μεταξύ της άκρης της περιοχής εμπλουτισμού και της περιοχής ελέγχου και  $T$  η μεταβιβαστικότητα του υδροφόρου (σχ. 8.17).

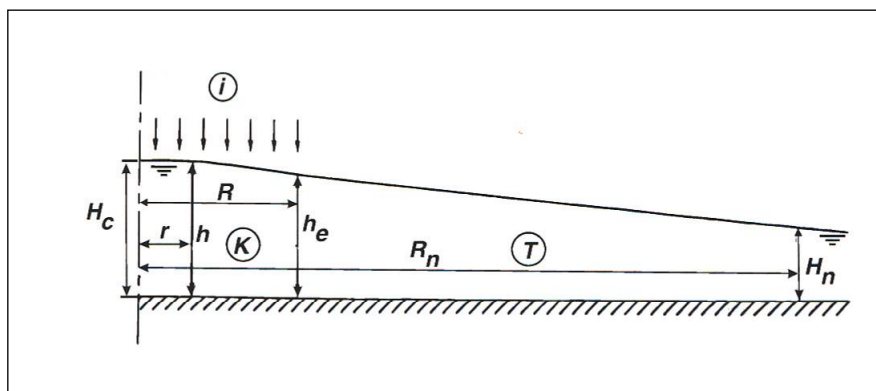


Σχήμα 8.17. Τομή με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και τους σχετικούς συμβολισμούς υβώματος του υπόγειου νερού κάτω από επιμήκη περιοχή εμπλουτισμού πλάτους  $W$  (Bouwer, 2002).

Για μια κυκλική ή τετραγωνική περιοχή εμπλουτισμού (σχ. 8.18) η ροή του υπόγειου νερού είναι ακτινικά μακριά από την περιοχή. Το ύψος ισορροπίας του υβώματος κάτω από το κέντρο του συστήματος εμπλουτισμού, πάνω από τη σταθερή στάθμη του νερού σε απόσταση  $R_n$  από το κέντρο του συστήματος εμπλουτισμού μπορεί να υπολογιστεί με τη θεωρία της κυκλικής ροής (Bouwer et al., 1999), ως:

$$H_c - H_n = \frac{iR^2}{4T} \left( 1 + 2 \ln \frac{R_n}{R} \right) \quad (8.23)$$

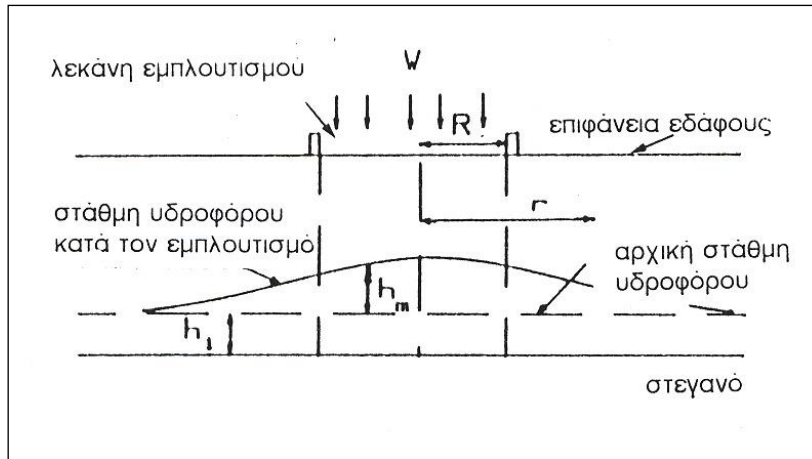
όπου το  $R$  είναι η ακτίνα ή η ισοδύναμη ακτίνα της περιοχής εμπλουτισμού,  $R_n$  είναι η απόσταση από το κέντρο της περιοχής εμπλουτισμού μέχρι την περιοχή ελέγχου (σχ. 8.18) και τα υπόλοιπα σύμβολα είναι όπως έχουν οριστεί παραπάνω.



Σχήμα 8.18. Τομή με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και τους σχετικούς συμβολισμούς υβώματος του υπόγειου νερού κάτω από κυκλική περιοχή εμπλουτισμού ακτίνας  $R$  (Bouwer, 2002).

Η ανύψωση της στάθμης του υπόγειου νερού που παρατηρείται κάτω από μια κυκλική επιφάνεια κατάκλισης (σχ. 8.19) περιγράφεται επίσης από τις εξισώσεις (Hantush, 1967):





Σχήμα 8.19. Διάγραμμα ανύψωσης της στάθμης του υδροφόρου κάτω από κυκλική επιφάνεια εμπλουτισμού (από Walton, 1991).

$$h_m = \left\{ \frac{WR^2}{2P_h} \left\{ W(u_0) - \left( \frac{r}{R} \right)^2 \exp(-u_0) + \frac{1}{u_0} [1 - \exp(-u_0)] \right\} + h_i^2 \right\}^{0.5} \quad (8.24)$$

όταν  $t \geq \frac{r^2 S_y}{2P_h m_a}$  και  $r \leq R$ ,

$$h_m = \left\{ \frac{WR^2}{2P_h} [W(u) + 0.5u_0 \exp(-u)] + h_i^2 \right\}^{0.5} \quad (8.25)$$

όταν  $t \geq \frac{r^2 S_y}{2P_h m_a}$  και  $r \geq R$ ,

με

$$u = \frac{R^2 S_y}{4P_h m_a t}, \quad u_0 = \frac{r^2 S_y}{4P_h m_a t}, \quad m_a = 0,5(h_i + h_m) \quad (8.26)$$

όπου

$h_m$ : το ύψος του υβώματος,

$W$ : η παροχή εμπλουτισμού,

$R$ : η ακτίνα της κυκλικής επιφάνειας κατάκλυσης,

$P_h$ : η οριζόντια υδραυλική αγωγιμότητα του υδροφόρου,

$r$ : η απόσταση μεταξύ του κέντρου της κυκλικής επιφάνειας κατάκλυσης και της γεώτρησης παρατήρησης,

$h_i$ : το ύψος της αρχικής στάθμης από τη βάση του υδροφόρου,

$t$ : ο χρόνος μετά την έναρξη της άντλησης,

$S_y$ : η ειδική απόδοση του υδροφόρου,

$W(u)$  και  $W(u_0)$ : οι συναρτήσεις της γεώτρησης που προσδιορίζονται από:

$$W(u) = -0,577216 - \ln(u) + u - \frac{u^2}{2,2!} + \frac{u^3}{3,3!} - \frac{u^4}{4,4!} + \dots, \quad \text{με: } u = \frac{r^2 S}{4Tt} \quad (8.27)$$

που περιέχονται στην εξίσωση "μη ισορροπίας" ή "ασταθούς ροής" ή "μη μόνιμης ροής" (non equilibrium equation) που περιγράφει τον κώνο κατάπτωσης σε άντληση αρτεσιανού υδροφόρου (Theis, 1935):

$$s = \frac{QW(u)}{4\pi T} \quad (8.28)$$

όπου

$s$  : η πτώση στάθμης σε χρόνο  $t$ ,

$Q$  : η σταθερή παροχή άντλησης,

$W(u)$ : εκθετικό ολοκλήρωμα γνωστό ως "συνάρτηση γεωτρήσεων" ή "χαρακτηριστική συνάρτηση", μερικές φορές αναφέρεται ως  $-Ei(-u)$ , οι δε τιμές του έχουν υπολογιστεί από τον Wenzel (1942) (για τιμές του μεταξύ  $10^{-15}$  και 9,9 δίνονται από Πίνακα 2α, Παράρτημα II, Τερζίδη και Καραμούζη, 2001).

$T$  : η μεταβιβαστικότητα του υδροφόρου,

$r$  : η ενεργή ακτίνα του πηγαδιού (effective radius),

$S$ : ο συντελεστής εναποθήκευσης του υδροφόρου,

$t$ : ο χρόνος μετά την έναρξη της άντλησης.

Οι εξισώσεις (8.22) και (8.23) χρησιμοποιούνται στον υπολογισμό του τελικού ύψος του υβώματος κάτω από μια περιοχή εμπλουτισμού για δεδομένη ανύψωση του νερού ελέγχου σε απόσταση  $R_n$  ή  $L_n$  από την περιοχή εμπλουτισμού. Όπως φαίνεται στην εξίσωση Hantush, οι τιμές του  $T$  στις εξ. (8.22) και (8.23) πρέπει να αποδίδουν τη μέση μεταβιβαστικότητα του υδροφόρου στο απόλυτο ύψος ισορροπίας του υβώματος.

Αν το απόλυτο ύψος του υβώματος που έχει υπολογιστεί είναι πολύ μεγάλο, τότε το  $R_n$  ή  $L_n$  πρέπει να μειωθεί με άντληση του υπόγειου νερού από γεωτρήσεις που βρίσκονται κοντά στην περιοχή εμπλουτισμού ή το  $H_n$  πρέπει να μειωθεί με άντληση περισσότερου νερού. Οι εξισώσεις (8.22) και (8.23), τότε, δείχνουν πού πρέπει να ανακτηθεί το νερό και σε ποιο βάθος πρέπει το νερό να αντληθεί ώστε να αποφευχθεί η υπερβολική ανύψωση του υπόγειου νερού κάτω από την περιοχή εμπλουτισμού. Το απόλυτο ύψος του υβώματος μπορεί επίσης να μειωθεί κατασκευάζοντας τη λεκάνη εμπλουτισμού μακρύτερη και πιο στενή ή μειώνοντας το ρυθμό διήθησης χρησιμοποιώντας λιγότερο νερό για εμπλουτισμό ή διασκορπίζοντας τις εγκαταστάσεις διήθησης σε μεγαλύτερη περιοχή.

Οι εξισώσεις του Hantush είναι εφαρμόσιμες στην περίπτωση που η ανύψωση της στάθμης του υπόγειου νερού σε σχέση με το αρχικό βάθος κορεσμού δεν υπερβαίνει το 50%. Επίσης δεχόμαστε ότι ο υδροφόρος είναι ομοιογενής και ισότροπος, ομοιόμορφου πάχους και άπειρης έκτασης, όπως και ότι η στάθμη του υπόγειου νερού παραμένει πάντα κάτω από τη βάση της επιφάνειας κατάκλυσης.

Η μορφή του υβώματος που σχηματίζεται κάτω από μία τετραγωνική επιφάνεια κατάκλυσης (σχ. 8.20) μπορεί επίσης να περιγραφεί με τη χρήση των αδιάστατων παραμέτρων  $\frac{x}{L}$  και

$\frac{L}{\sqrt{4Tt/S}}$  και του διαγράμματος του σχ. 8.21, όπου:

$h$  : το ζητούμενο ύψος του υβώματος,

$S$ : ο συντελεστής εναποθήκευσης του ελεύθερου υδροφόρου,

$W$  : η παροχή εμπλουτισμού,

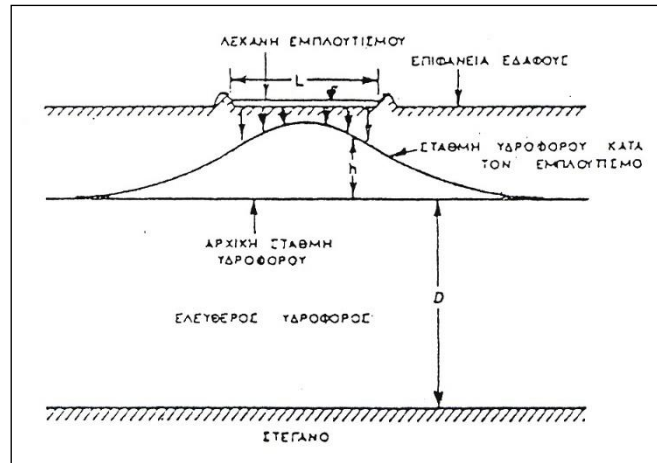
$t$  : ο χρόνος μετά την έναρξη του εμπλουτισμού,

$L$ : η μία διάσταση της επιφάνειας εμπλουτισμού,

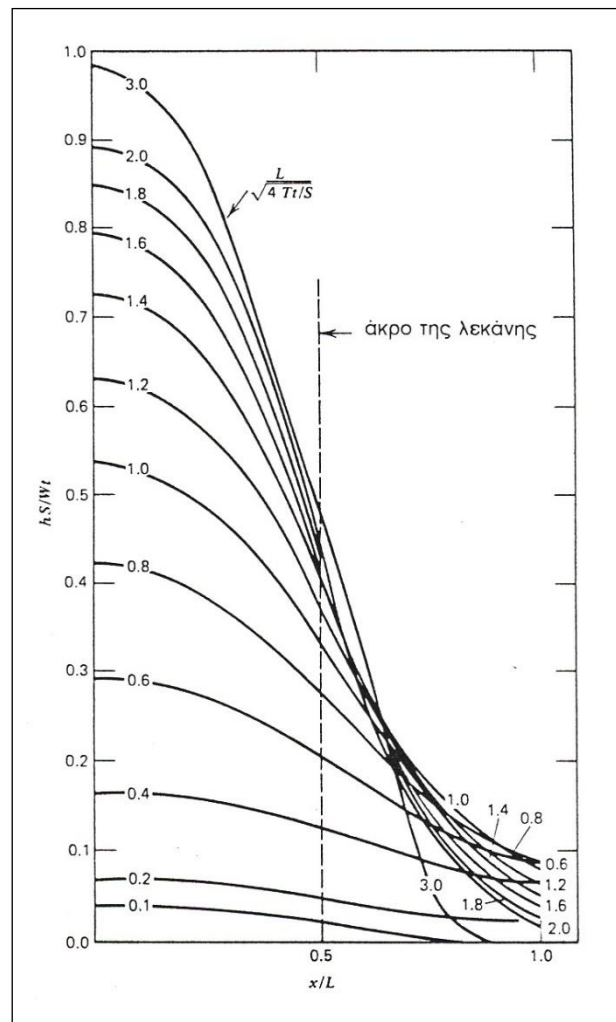
$T$  : η μεταβιβαστικότητα του υδροφόρου ( $= K \times D$ ),

$x$  : η απόσταση από το κέντρο της επιφάνειας εμπλουτισμού,

$D$ : το βάθος του υδροφόρου.



Σχήμα 8.20. Διάγραμμα ανύψωσης της υδροστατικής επιφάνειας κάτω από μία τετραγωνική επιφάνεια εμπλουτισμού (από Καλλέργη 2001, Todd 1980).



Σχήμα 8.21. Αδιάστατο γράφημα, που προσδιορίζει την ανύψωση και την οριζόντια εξάπλωση της στάθμης νερού του υβώματος, που σχηματίζεται κάτω από μία τετραγωνική επιφάνεια εμπλουτισμού (από Bianchi and Muckel, 1970).

Ο σχηματισμός του υβώματος που οφείλεται στον ομοιόμορφο εμπλουτισμό από τη διήθηση του νερού ενός ποταμού προς τον υποκείμενο υδροφόρο (σχ. 8.22), μπορεί να περιγραφεί από τις εξισώσεις που σύνταξε ο Hantush (Maasland et al., 1963):

$$h_1^2(x,t) = h_0^2 + \frac{2Wkt}{K} \left\{ 1 - \frac{1}{2} \left[ 4i^2 \operatorname{erfc} \left( \frac{L-x}{\sqrt{4kt}} \right) + 4i^2 \operatorname{erfc} \left( \frac{L+x}{\sqrt{4kt}} \right) \right] \right\} \quad (8.29)$$

και

$$h_2^2(x,t) = h_0^2 + \frac{Wkt}{K} \left[ 4i^2 \operatorname{erfc} \left( \frac{x-L}{\sqrt{4kt}} \right) - 4i^2 \operatorname{erfc} \left( \frac{x+L}{\sqrt{4kt}} \right) \right] \quad (8.30)$$

όπου

$h_0$ : αρχικό κορεσμένο βάθος του υδροφόρου, [L],

$h_1, h_2$ : το ύψος του υβώματος από τη βάση του ελεύθερου υδροφόρου, μετά την έναρξη της διήθησης, στα τμήματα 1 και 2 αντίστοιχα, [L],

$K$ : υδραυλική αγωγιμότητα του υδροφόρου, [LT<sup>-1</sup>],

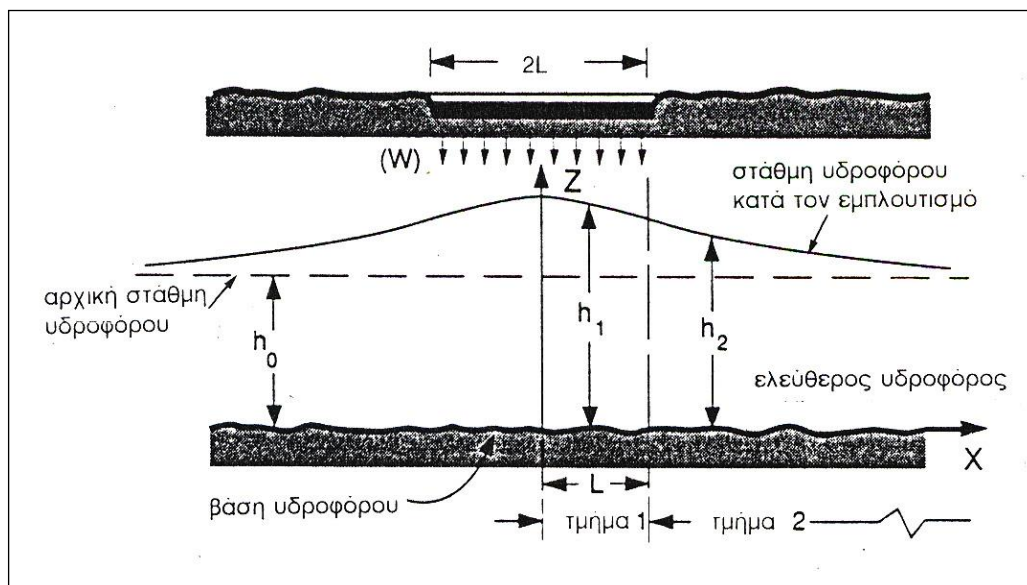
$L$ : η οριζόντια απόσταση του τμήματος 2 από την αρχή του τμήματος 1, [L],

$t$ : ο χρόνος από την έναρξη της διαδικασίας ροής, [T],

$W$ : η ομοιόμορφη παροχή εμπλουτισμού από τη διήθηση ανά μονάδα επιφάνειας, [LT<sup>-1</sup>],

$\kappa = \frac{Kh_0}{\theta}$ : η υδραυλική διάχυση, [L<sup>2</sup>T<sup>-1</sup>], όπου  $\theta$  είναι το ενεργό πορώδες,

$4i^2 \operatorname{erfc}(x)$ : ολοκλήρωμα της συνάρτησης σφάλματος που δίνεται από σχετικούς πίνακες (Roscoe Moss Company, 1990, Κεφάλαιο 2, Πίνακας 2.2).



Σχήμα 8.22. Διάγραμμα ανύψωσης της στάθμης του ελεύθερου υδροφόρου κάτω από ποταμό (από Roscoe Moss Comp., 1990).

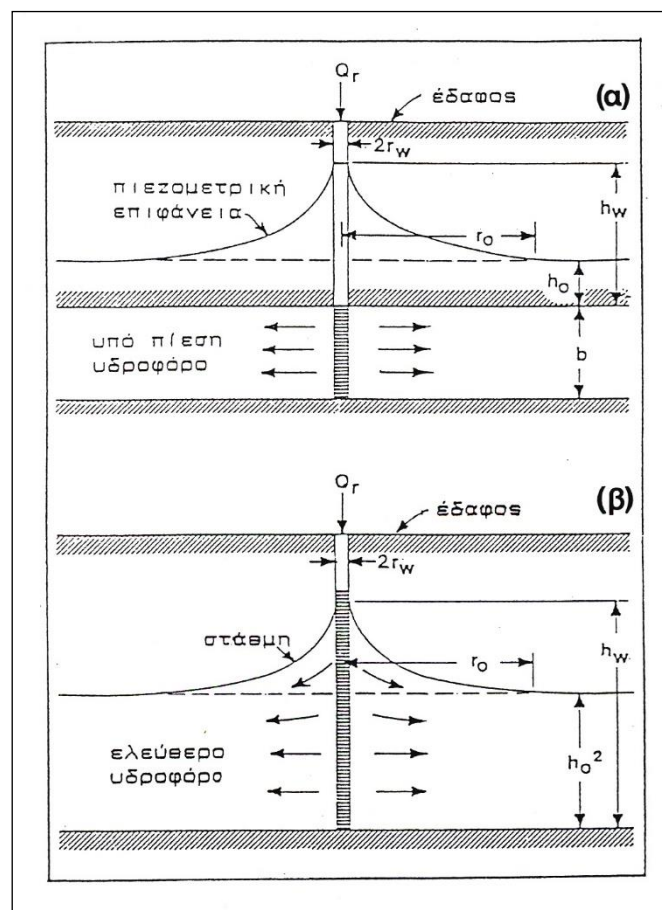
Κάτω από ομοιόμορφες συνθήκες εμπλουτισμού, το ύψωμα που σχηματίζεται κάτω από την επιφάνεια κατάκλισης, θα συνεχίσει να αναπτύσσεται μέχρι να συναντήσει κάποιους περιορισμούς που αποτελούν και ένα είδος ορίων. Δύο τύποι περιορισμών αναγνωρίζονται, ο δυναμικός (potential) και ο πλευρικός (lateral) (Baumann, 1965). Ο πρώτος συμβαίνει όταν το ύψωμα φθάνει στη βάση της επιφάνειας εμπλουτισμού, όπου με καθορισμένο μέγιστο ύψος υβώματος, η κλίση και επομένως η παροχή εμπλουτισμού πρέπει να μειώνεται με το χρόνο.

Ο δεύτερος περιορισμός συμβαίνει όταν το ύψωμα τέμνει κάποια σταθερή επιφάνεια νερού όπως ένα ποτάμι ή μία λίμνη, όπου για μεγάλη οριζόντια έκταση, το ύψωμα πλησιάζει σε μια ισορροπία διατηρώντας μια σταθερή ταχύτητα εμπλουτισμού.

Όταν διαβιβαστεί νερό σε γεώτρηση εμπλουτισμού (recharge well), δημιουργείται ένας κώνος εμπλουτισμού που έχει το ίδιο σχήμα αλλά είναι αντίστροφος από τον κώνο κατάπτωσης που δημιουργείται κατά την άντληση (σχ. 8.23). Σε αρτεσιανούς (σχ. 8.23α) και ελεύθερους υδροφόρους (σχ. 8.23β), όταν ο εμπλουτισμός γίνεται με "τέλεια" γεώτρηση, η παροχή εμπλουτισμού δίνεται αντίστοιχα από τις σχέσεις (Καλλέργης, 2001):

$$Q_r = \frac{2\pi kb(h_w - h_0)}{\ln(r_0/r_w)} \quad (8.31)$$

$$Q_r = \frac{\pi k(h_w^2 - h_0^2)}{\ln(r_0/r_w)} \quad (8.32)$$



Σχήμα 8.23. Διάγραμμα ακτινωτής ροής σε γεώτρηση εμπλουτισμού, σε (α) υπό πίεση και σε (β) ελεύθερο υδροφόρο (από Βαφειάδη, 1995, Espina, 1980).

Θεωρητικά, η ποσότητα νερού που μπορεί να δεχθεί μια γεώτρηση εμπλουτισμού είναι ίση με την ποσότητα που μπορεί να αντληθεί από την ίδια γεώτρηση, όταν ο κώνος εμπλουτισμού έχει τις ίδιες διαστάσεις με τον κώνο κατάπτωσης. Στην πράξη όμως τα πράγματα είναι διαφορετικά (Rahmann et al., 1969, Rebhun et al., 1968) και αυτό οφείλεται στη μείωση της περατότητας του φίλτρου και του υδροφόρου γύρω από τη γεώτρηση, λόγω απόθεσης

αιωρούμενης ιλύος που περιέχει το νερό εμπλοτισμού (clogging effect) και τη μεταφορά στον υδροφόρο, από το νερό εμπλοτισμού, μεγάλων ποσοτήτων διαλυμένου αέρα (Καλλέργης, 2001).

Οι γεωτρήσεις έγχυσης (injection wells) χρησιμοποιούνται για να εμπλουτίσουν υδροφόρους αλμυρού νερού με τοξικά βιομηχανικά απόβλητα, αλμυρά ή αλατούχα γενικά ρευστά (Καλλέργης, 2001). Στις γεωτρήσεις αυτές παρατηρούνται απώλειες φορτίου παρόμοιες με αυτές των γεωτρήσεων άντλησης, όπως περιγράφεται από τη γενική εξίσωση (Roscoe Moss Company, 1990):

$$P = BQ + B'Q + CQ^2 \quad (8.33)$$

όπου

$P$ : το φορτίο έγχυσης, [L],

$Q$ : η παροχή έγχυσης, [ $L^3T^{-1}$ ],

$B$ : συντελεστής απωλειών φορτίου του σχηματισμού (formation loss), [ $L(L^3T^{-1})^{-1}$ ],

$B'$ : συντελεστής απωλειών φορτίου που έχουν σχέση με αστοχίες της διάτρησης ή άλλους παράγοντες μείωσης της περατότητας στη ζώνη κοντά στο φίλτρο της γεώτρησης, [ $L(L^3T^{-1})^{-1}$ ],

$C$ : συντελεστής απωλειών φορτίου της γεώτρησης, [ $L(L^3T^{-1})^{-2}$ ].

Ο λόγος  $\frac{Q}{P}$  ορίζεται ως ειδική ικανότητα έγχυσης (specific injection capacity) ή απλώς ειδική έγχυση (specific injection).

Η απόδοση (efficiency) μιας γεώτρησης έγχυσης ορίζεται ως ο λόγος:

$$E = \frac{Q/P_a}{Q/P_t} \times 100 = \frac{P_t}{P_a} \times 100 \quad (23), \quad \text{ή} \quad E = \frac{100}{1 + (CQ/B)} \quad (8.34)$$

όπου

$Q$ : η παροχή έγχυσης, [ $L^3T^{-1}$ ],

$P_a$ : το πραγματικό (actual) (μετρημένο στο πεδίο) φορτίο έγχυσης, [L],

$P_t$ : το θεωρητικό (theoretical) φορτίο έγχυσης, [L].

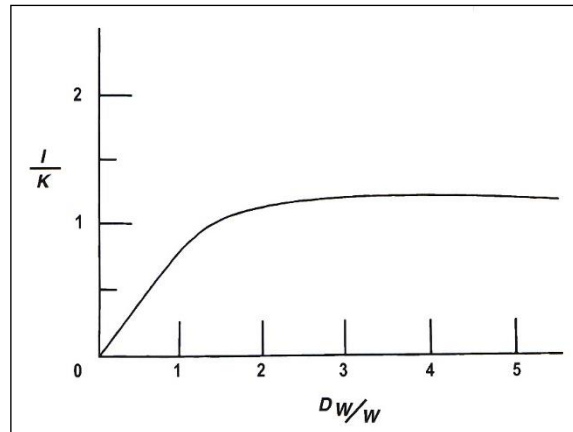
### Επίδραση της στάθμης των υπόγειων νερών στους ρυθμούς διήθησης

Συχνά, ο πυθμένας και τα τοιχώματα των λεκανών διήθησης καλύπτονται από ένα στρώμα απόφραξης που ελέγχει και μειώνει το ρυθμό διήθησης έτσι ώστε το υποκείμενο εδαφικό στρώμα να γίνεται ακόρεστο (σχ. 8.10). Η περιεκτικότητα σε νερό στην ακόρεστη ζώνη παραμένει σε μια τιμή τέτοια, όπου η υδραυλική αγωγιμότητα είναι αριθμητικά ίση με το ρυθμό διήθησης, επειδή η προς τα κάτω ροή οφείλεται στη βαρύτητα μόνο και η υδραυλική κλίση είναι ενιαία (Bouwer, 1982). Η ακόρεστη ζώνη διαταράσσει τη συνέχεια ανάμεσα στη λεκάνη και τον υδροφόρο, έτσι ώστε ο ρυθμός διήθησης είναι ανεξάρτητος του βάθους του υπόγειου νερού, αρκεί η στάθμη του νερού να είναι αρκετά βαθιά ώστε η κορυφή των τριχοειδούς κροσσιού πάνω από τη στάθμη του νερού να είναι κάτω από τον πυθμένα της λεκάνης. Αυτό το τριχοειδές κρόσσι είναι συνήθως 30 cm. παχύ για μεσόκκοκες άμμους, περισσότερο για λεπτόκκοκα εδάφη, και λιγότερο για χονδρόκκοκες άμμους. Έτσι, ένα συντηρητικό συμπέρασμα είναι ότι όσο το υπόγειο νερό είναι περισσότερο από 1 m κάτω από τον πυθμένα της λεκάνης, όπου η διήθηση ελέγχεται από το στρώμα της απόφραξης του πυθμένα, ο ρυθμός διήθησης μένει ανεπηρέαστος από τις αλλαγές στη στάθμη του υπόγειου νερού. Αν η στάθμη του νερού ανέβει, τότε ο ρυθμός διήθησης αρχίζει να μειώνεται μόνο όταν το τριχοειδές κρόσσι φτάσει τον πυθμένα της λεκάνης. Τότε, ο ρυθμός συνεχίζει να μειώνεται γραμμικά με το μειούμενο βάθος του υπόγειου νερού κάτω από τη στάθμη του νερού στη λεκάνη, μέχρι να γίνει μηδέν όταν η στάθμη του νερού έχει ανέλθει στο ίδιο ύψος με το επιφανειακό νερό της λεκάνης. Η μετάβαση από τις υδραυλικά, μη συνδεόμενες συνθήκες της

στάθμης των υπόγειων νερών (σχ. 8.10) σε υδραυλικά συνεχείς (σχ. 8.11) μοντελοποιήθηκε από τους Dillon και Liggett (1983), που παρατήρησαν ότι ο ρυθμός διήθησης μειώνεται σημαντικά εξαιτίας της υδραυλικής συνέχειας ως αποτέλεσμα της διήθησης προκαλώντας την επιφάνεια του νερού να ανυψωθεί και να τμήσει τη λεκάνη ή το χείμαρρο.

Εκεί όπου το νερό του εμπλουτισμού είναι εξαιρετικά καθαρό και απαλλαγμένο από άζωτο και φωσφόρο όπως και οργανικό άνθρακα, η θερμοκρασία του είναι χαμηλή, και το εδαφικό υλικό είναι σχετικά χονδρόκοκο, τότε η διαδικασία της διήθησης κρατάει αρκετή ώρα χωρίς να σχηματιστεί στρώμα απόφραξης στον πυθμένα. Σε αυτήν την περίπτωση υπάρχει άμεση υδραυλική συνέχεια ανάμεσα στην καθαρή λεκάνη και στον υδροφόρο και η στάθμη του υπογείου νερού συναντάει το επιφανειακό νερό στη λεκάνη (σχ. 8.11). Η στάθμη του υπογείου νερού χαρακτηρίζεται, τότε, από το βάθος  $D_w$  του υπογείου νερού κάτω από το ύψος του επιφανειακού νερού της λεκάνης. Το  $D_w$  πρέπει να μετριέται σε ικανοποιητική απόσταση από την περιοχή εμπλουτισμού έτσι ώστε η στάθμη του υπογείου νερού να παραμένει σχετικά ανεπηρέαστη από τη ροή εμπλουτισμού από το σύστημα εμπλουτισμού (σχ. 8.11). Σε σχετικές έρευνες, αυτή η απόσταση θεωρήθηκε αυθαίρετα δέκα φορές το πλάτος της λεκάνης ή του συστήματος εμπλουτισμού (Bouwer, 1969). Αν το  $D_w$  είναι σχετικά μεγάλο, η ροή κάτω από το σύστημα εμπλουτισμού είναι κυρίως κατακόρυφη και ελέγχεται από τη βαρύτητα (σχ. 8.11 κάτω), (Bouwer 1969, 1978). Σε αυτήν την περίπτωση ο ρυθμός διήθησης ουσιαστικά μένει ανεπηρέαστος από το βάθος του υπογείου νερού. Εν τούτοις, αν η στάθμη του υπογείου νερού ανυψωθεί και το  $D_w$  μειωθεί, η ροή από τη λεκάνη εμπλουτισμού γίνεται ολοένα και περισσότερο επικλινή μέχρι να ελέγχεται πλήρως από την κλίση της στάθμης του υπογείου νερού μακριά από τη λεκάνη (σχ. 8.11 πάνω, Bouwer, 1969, 1978). Από την προσομοίωση αυτών των συστημάτων ροής με αναλογικά μοντέλα ηλεκτρικής αντίστασης δίκτυα έχει δείξει ότι η αλλαγή της ροής που ελέγχεται από τη βαρύτητα σε ροή που ελέγχεται από την κλίση της στάθμης του υπογείου νερού, συμβαίνει όταν το  $D_w$  είναι δύο φορές το πλάτος  $W$  (ή τη διάμετρο) του συστήματος διήθησης (Bouwer 1990). Αυτή η σχέση φαίνεται στο σχήμα 8.24, όπου  $I$  είναι ο ρυθμός διήθησης ανά μονάδα επιφάνειας του επιφανειακού νερού της λεκάνης και  $K$  είναι η υδραυλική αγωγιμότητα της διαβρεγμένης ζώνης ή του υδροφόρου. Έτσι, ισχύει  $D_w < 2W$ , ο ρυθμός διήθησης μειώνεται σχεδόν γραμμικά με το μειούμενο  $D_w$  και πλησιάζει το μηδέν όταν  $D_w = 0$  (σχ. 8.24). Όμως, αν  $D_w > 2W$ , τότε ο ρυθμός διήθησης είναι ουσιαστικά σταθερός και περίπου ίσος με τη θεωρητικά μέγιστη τιμή όταν  $D_w = \infty$ , ανεξάρτητα από την πραγματική τιμή του  $D_w$ . Αυτές οι εξισώσεις εφαρμόζονται σε ομοιογενείς, ισότροπους υπόγειους σχηματισμούς. Ανισότροποι ή διαστρωματωμένοι σχηματισμοί πρέπει να αντιμετωπίζονται κατά περίπτωση. Στις Η.Π.Α., οι νομικές απόψεις που αφορούν την αλληλεπίδραση των υπόγειων και των επιφανειακών νερών δεν συμμορφώνονται πάντα με τις σχετικές υδρογεωλογικές θεωρήσεις (Bouwer and Maddock, 1997).

Ο ρυθμός διήθησης σε καθαρές λεκάνες (χωρίς στρώσεις απόφραξης) είναι περισσότερο ευαίσθητος στο βάθος του υπογείου νερού από ό,τι ο ρυθμός διήθησης σε αποφραγμένες λεκάνες. Οι λεκάνες που παρουσιάζουν απόφραξη είναι ο κανόνας παρά η εξαίρεση και το ύψωμα του υπογείου νερού μπορεί να ανυψωθεί πολύ περισσότερο σε αυτές τις λεκάνες παρά κάτω από καθαρές λεκάνες προτού να αρχίσει να ελαττώνεται ο ρυθμός διήθησης. Μερικές φορές, το επιτρεπόμενο μέγιστο ύψος του υβώματος μπορεί να καθοριστεί από άλλους παράγοντες πέρα από τις επιδράσεις του στο ρυθμό διήθησης, όπως η ύπαρξη ΧΥΤΑ, υπόγειων υπονόμων ή άλλων σωλήνων, υπογείων (ειδικά υπόγεια σε μεγάλο βάθος εμπορικών κτιρίων), νεκροταφείων και βλάστηση με βαθιές ρίζες όπως γερασμένα δέντρα που ξεραίνονται όταν η στάθμη του υπογείου νερού ανέβει αρκετά.



Σχήμα 8.24. Αδιάστατο διάγραμμα της διήθησης (εκφρασμένης ως  $I/K$ ) και του βάθους του υπόγειου νερού (εκφρασμένου ως  $D_w/W$ ) σε καθαρή κοίτη χειμάρρου ή επιμήκη λεκάνη διήθησης χωρίς στρώση απόφραξης στον πυθμένα (Bouwer, 2002).

### Φρεάτια στην ακόρεστη ζώνη

Τα φρεάτια (πηγάδια) στην ακόρεστη ζώνη (vadose-zone wells), που αλλιώς λέγονται ξηρά φρεάτια (dry wells) ή φρεάτια εμπλουτισμού (recharge shafts) είναι οπές στην ακόρεστη ζώνη, συνήθως 10–15 m βαθιά και 1-2 m σε διάμετρο (σχ. 8.3). Συνήθως χρησιμοποιούνται για διήθηση και απόθεση των απορροών από καταιγίδες κατακρημνισμάτων σε περιοχές με χαμηλή σχετικά βροχόπτωση όπου δεν υπάρχει κάποιο αποχετευτικό σύστημα ομβρίων υδάτων. Αυτά τα φρεάτια ανοίγονται σε διαπερατούς σχηματισμούς στην ακόρεστη ζώνη που μπορούν να δεχτούν την απορροή της βροχής με ικανοποιητικό ρυθμό. Εκεί όπου το υπόγειο νερό είναι βαθύ (για παράδειγμα 100-300 m ή παραπάνω) τα ξηρά φρεάτια είναι αρκετά φθηνότερα από τα φρεάτια εμπλουτισμού και έτσι είναι δελεαστικό να χρησιμοποιούνται ξηρά φρεάτια για τον εμπλουτισμό του υπόγειου νερού αντί για γεωτρήσεις εμπλουτισμού. Για να επιτύχουμε επαρκή εμπλουτισμό, τα φρεάτια της ακόρεστης ζώνης πρέπει να διαπερνούν τους διαπερατούς σχηματισμούς ως ένα ικανοποιητικό βάθος. Από την άλλη μεριά, εκεί όπου οι γεωτρήσεις άντλησης αντλούν το νερό από τον υδροφόρο, αυτές θα μπορούσαν επίσης να χρησιμοποιηθούν για εμπλουτισμό, έτσι ώστε τα πηγάδια στην ακόρεστη ζώνη να μην είναι απαραίτητα (περίπτωση γεωτρήσεων αποθήκευσης-άντλησης, ASR: Aquifer Storage and Recovery wells). Επίσης, εκεί όπου το επίπεδο του υπόγειου νερού είναι αρκετά βαθύ και η ακόρεστη ζώνη σχετικά ξηρή, απαιτούνται μεγάλες ποσότητες νερού για να διαβρέξουν την ακόρεστη ζώνη προτού το νερό φτάσει στον υδροφόρο.

Το βασικό πρόβλημα με τα φρεάτια στην ακόρεστη ζώνη είναι φυσικά, η απόφραξη των τοιχωμάτων του φρεατίου και η αδυναμία αποκατάστασης της απόφραξης μέσω άντλησης ή ανάπτυξη εκ νέου του φρεατίου, επειδή το φρεάτιο βρίσκεται στην ακόρεστη ζώνη και το υπόγειο νερό δεν μπορεί να ρέει μέσα στο πηγάδι και να ξεπλύνει το υλικό της απόφραξης. Επίσης, οι μέθοδοι καθαρισμού που βασίζονται στην ενέργεια (surging and jetting) δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν γιατί τα φρεάτια στην ακόρεστη ζώνη είναι γεμάτα με άμμο ή χαλίκι. Έτσι, η απόφραξη πρέπει να αποφευχθεί ή να μειωθεί στο ελάχιστο. Αυτός ο στόχος πετυχαίνεται προστατεύοντας το νερό στο φρεάτιο από την παρουσία αργιλικών υλικών στην ακόρεστη ζώνη που θα μπορούσαν να κάνουν το νερό λασπώδες, προκαλώντας την συσσώρευση της λάσπης και το σχηματισμό ενός στρώματος απόφραξης στο περισσότερο διαπερατό εδαφικό υλικό, όπου λαμβάνει χώρα η μεγαλύτερη διήθηση. Αυτός ο στόχος πετυχαίνεται γεμίζοντας το φρεάτιο με άμμο και χρησιμοποιώντας έναν διάτρητο σωλήνα ή ένα φίλτρο στο κέντρο για να διοχετεύσουμε το νερό του εμπλουτισμού. Η τοποθέτηση πλαστικών φύλλων ή γεωφασμάτων στο πηγάδι ενάντια στις ζώνες με τις αργιλικές στρώσεις μπορεί επίσης να είναι αποτελεσματική. Επίσης το νερό πρέπει να υποστεί



επεξεργασία πριν τον εμπλουτισμό, έτσι ώστε να απομακρυνθούν όσο το δυνατό περισσότερο παράγοντες απόφραξης, συμπεριλαμβανομένων αιωρούμενων στερεών, αφομοιώσιμο οργανικό άνθρακα, άζωτο και φωσφόρο και μικροοργανισμών. Επιπλέον, είναι χρήσιμη η απολύμανση ώστε να διατηρηθεί το παραμένον επίπεδο χλωρίου. Αν η απόφραξη παραμένει (είναι πάντα πιθανή η μακροπρόθεσμη απόφραξη), αυτό οφείλεται κυρίως στα βακτηριακά κύτταρα και στα οργανικά μεταβολικά προϊόντα, όπως τα πολυμερή στα τοιχώματα του φρεατίου. Έτσι, εκεί όπου η απόφραξη δεν μπορεί να αντιμετωπιστεί μέσω άντλησης, καθαρισμού ή ανάπτυξης εκ νέου, μια μακρά περίοδος αποξήρανσης θα μπορούσε να οδηγήσει σε ικανοποιητική βιο-υποβάθμιση του υλικού της απόφραξης ώστε να αποκατασταθούν τα φρεάτια στην ακόρεστη ζώνη για τον επόμενο εμπλουτισμό, καίτοι σε μειωμένους ρυθμούς.

Επειδή ο εμπλουτισμός με γεωτρήσεις ή φρεάτια στην ακόρεστη ζώνη είναι πολύ περισσότερο ακριβός από ό,τι με συστήματα επιφανειακής διήθησης, ακριβής οικονομικές αναλύσεις είναι απαραίτητες για να αναπτυχθεί το καλύτερο σύστημα. Οι παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη περιλαμβάνουν το κόστος των φρεατίων στην ακόρεστη ζώνη συγκριτικά με τις γεωτρήσεις εμπλουτισμού, η ικανότητα τους εμπλουτισμού και ο αριθμός γεωτρήσεων ή φρεατίων που απαιτούνται, ο χρόνος ζωής τους, το κόστος συντήρησης και/ή αντικατάστασης, και το κόστος της απαραίτητης προεπεξεργασίας του νερού. Η χρήση των φρεατίων στην ακόρεστη ζώνη αποκλείεται ως πιθανή λύση, όταν η ακόρεστη ζώνη είναι ρυπασμένη.

Ο ρυθμός διήθησης για τα φρεάτια στην ακόρεστη ζώνη σε ομοιόμορφα εδάφη υπολογίζεται από την εξίσωση του Zangar για αντίστροφη ροή σε γεώτρηση (Bouwer, 1978). Για ένα φρεάτιο της ακόρεστης ζώνης, τυπικών γεωμετρικών χαρακτηριστικών, με τη στάθμη του υπόγειου νερού σημαντικά πιο κάτω από τον πυθμένα του φρεατίου και με βάθος νερού στο πηγάδι τουλάχιστον πέντε φορές τη διάμετρο του πηγαδιού, αυτή η εξίσωση μπορεί να απλοποιηθεί σε:

$$Q = \frac{2\pi K L_w^2}{\ln\left(\frac{2L_w}{r_w}\right) - 1} \quad (8.35)$$

όπου Q είναι ο ρυθμός διήθησης, K η υδραυλική αγωγιμότητα του εδαφικού υλικού, L<sub>w</sub> το βάθος του νερού μέσα στο πηγάδι και r<sub>w</sub> η ακτίνα του πηγαδιού (σχ. 8.3). Για να ισχύει η εξίσωση πρέπει L<sub>w</sub> ≥ 10 r<sub>w</sub>. Η ακριβής τιμή του K είναι δύσκολο να αποτιμηθεί, γιατί η υγρή ζώνη δεν είναι πάντα κορεσμένη και οι γραμμές ροής έχουν οριζόντιες και κατακόρυφες συνιστώσες, κάτι που περιπλέκει τους υπολογισμούς για ανισότροπα εδάφη. Ο καλύτερος τρόπος για να εκτιμηθεί το K, ώστε να χρησιμοποιηθεί στην εξίσωση (8.35), είναι από σχετικές δοκιμές στην ακόρεστη ζώνη.

Απαιτείται μεγαλύτερη έρευνα στα φρεάτια εμπλουτισμού της ακόρεστης ζώνης για να αναπτυχθεί ο βέλτιστος σχεδιασμός σε σχέση με την χωρητικότητα του πηγαδιού, τον έλεγχο της απόφραξης (συμπεριλαμβανομένης της προεργασίας), το χρόνο ζωής, και το ελάχιστο μακροπρόθεσμο κόστος του εμπλουτισμού ανά μονάδα όγκου του νερού. Η απολύμανση περιλαμβάνει τη διατήρηση τόσο υψηλού επιπέδου απολύμανσης στο νερό του εμπλουτισμού, ώστε να μην μπορεί να υπάρξει μικροβιολογική δραστηριότητα στο ίδιο το πηγάδι, αλλά να συμβαίνει αρκετά πιο μακριά στην ακόρεστη ζώνη ή στον υδροφόρο, όπου οι απολυμαντές είναι πλέον εξασθενημένοι και μπορεί να λάβει χώρα βιολογική δραστηριότητα. Το επιθυμητό είναι αυτή η δραστηριότητα να αναπτύσσεται αρκετά μακριά από το πηγάδι ώστε να συμβαίνει σε αρκετά μεγάλη περιοχή για να αποφευχθεί έτσι η δημιουργία ζώνης απόφραξης. Αντ' αυτού, αυτή η δραστηριότητα μπορεί να αναπτύξει μια ζώνη βιοφίλτρου που ίσως και να βελτιώσει την ποιότητα του νερού εμπλουτισμού που τη διαπερνά. Επιπλέον έρευνες απαιτούνται για να διαπιστωθεί αν αυτή η προσέγγιση είναι εφικτή και πως μπορεί να γίνει η διαχείριση της ώστε να πετύχουμε τη βέλτιστη ικανότητα εμπλουτισμού και τη βελτίωση της ποιότητας του νερού. Τελικά, η χρησιμότητα των πηγαδιών

στην ακόρεστη ζώνη εξαρτάται από το χρόνο ζωής τους και το κόστος του εμπλουτισμού ανά μονάδα όγκου νερού που προστίθεται στον υδροφόρο.

## Τάφροι διήθησης

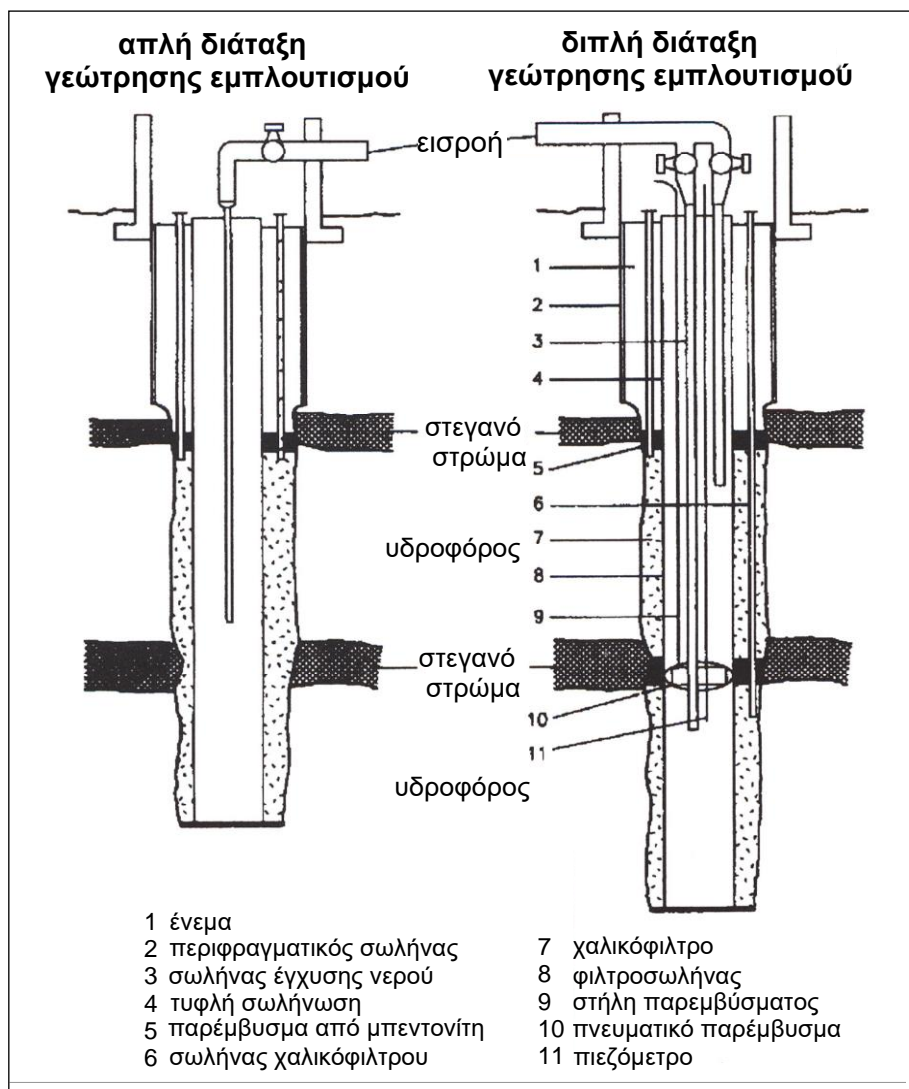
Εκεί όπου δεν υπάρχουν διαθέσιμα διαπερατά επιφανειακά εδάφη αλλά διαπερατά στρώματα σε βάθος που μπορούν να προσεγγισθούν με εκσκαφή (π.χ. σε βάθος 2-5 m), δεν είναι απαραίτητα τα φρεάτια στην ακόρεστη ζώνη αλλά περισσότερο αποτελεσματικές, λόγω κόστους είναι οι τάφροι διήθησης (seepage or infiltration trenches). Οι τάφροι πληρώνονται με χονδρόκοκκη άμμο ή λεπτό χαλίκι, διοχετεύεται νερό στην επιφάνεια αυτού του υλικού πλήρωσης και κατόπιν η τάφος σκεπάζεται για να μην έρθει σε επαφή με το φως, τα ζώα και τους ανθρώπους (Hantke, 1983) και να γίνει με αυτόν τον τρόπο «αόρατη», αφού θα παρουσιάζει τις ίδιες εδαφικές συνθήκες στην επιφάνεια της με τη γύρω περιοχή. Το φαινόμενο της απόφραξης μειώνεται με τη χρήση γεωφασμάτων πάνω ή μέσα στο υλικό πλήρωσης της τάφρου τα οποία φιλτράρουν το νερό και με την τοποθέτηση πλαστικών φύλλων στις αργιλικές ζώνες στην τάφρο για να αποφευχθεί η αποκόλληση αργιλικών υλικών και η είσοδος λάσπης στην τάφρο. Όπως συμβαίνει στα πηγάδια της ακόρεστης ζώνης και στις γεωτρήσεις εμπλουτισμού, το νερό που θα χρησιμοποιηθεί στις τάφρους πρέπει να έχει χαμηλή περιεκτικότητα σε αιωρούμενα στερεά. Κάνοντας μια απλή μετατροπή από ακτινική ροή από μια κατακόρυφη γραμμική πηγή σε παράλληλη ροή από μια κατακόρυφη επίπεδη πηγή, ο ρυθμός διήθησης για τις τάφρους εκτιμάται ότι είναι το 20% περίπου του Q που έχει υπολογιστεί στην εξίσωση (8.35) για τα πηγάδια στην ακόρεστη ζώνη. Αυτός ο ρυθμός διήθησης τότε εφαρμόζεται σε μια τάφρο πλάτους και μήκους ίσο με τη διάμετρο της γεώτρησης (π.χ.  $2r_w$ ) και με βάθος νερού στη τάφρο ίσο με το βάθος νερού στο φρεάτιο. Έτσι, αν ένα ξηρό φρεάτιο με διάμετρο 1 m, βάθος 10 m, γεμάτο με νερό μέχρι πάνω, διηθεί  $1.000\text{m}^3/\text{ημέρα}$ , μια τάφος με βάθος 10 m, μήκος 1 m, γεμάτη με νερό διηθεί περίπου  $200\text{m}^3/\text{ημέρα}$  ανά m μήκους της τάφρου. Όσον αφορά τα συστήματα επιφανειακής διήθησης, πρέπει να εγκαθίστανται πειραματικά πηγάδια ή τάφροι στην ακόρεστη ζώνη σε καινούργιες περιοχές, όπου δεν υπάρχει προηγούμενη εμπειρία σε αυτά τα συστήματα, για να διαπιστωθεί η επίδοσή τους, ο απαιτούμενος σχεδιασμός και η διαχείριση τους (περιλαμβάνεται και η προεπεξεργασία του νερού) και να επιτευχθεί έτσι η μέγιστη δυνατή (βέλτιστη) απόδοση σε συστήματα κανονικής κλίμακας.

## Γεωτρήσεις

Για να προβλεφτεί η δυνατότητα του νερού να δημιουργήσει απόφραξη στις γεωτρήσεις έγχυσης (σχ. 8.25), υπάρχουν τρεις παράμετροι που πρέπει να προσδιοριστούν (Peters and Castell-Exner, 1993): ο δείκτης φίλτρου μεμβράνης, η περιεκτικότητα αφομοίωσιμου οργανικού άνθρακα (assimilable organic carbon content, AOC) και ο δείκτης παράλληλου φίλτρου (parallel filter index, PFI). Αυτές οι παράμετροι μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν για να αξιολογηθεί το νερό που θα χρησιμοποιηθεί στα πηγάδια στην ακόρεστη και στους τάφρους. Ο δείκτης MFI περιγράφει την περιεκτικότητα σε αιωρούμενα στερεά υλικά και εκφράζεται με την κλίση του τμήματος ευθείας στο διάγραμμα χρόνου/όγκου και σε δοκιμή φίλτρου μεμβράνης, χρησιμοποιώντας για παράδειγμα ένα Millipore φίλτρο  $0,45\ \mu\text{m}$ . Έτσι, οι διαστάσεις του δείκτη MFI είναι χρόνος/όγκος<sup>2</sup>, π.χ.  $\text{s}/\text{l}^2$ .

Το AOC προσδιορίζεται μικροβιολογικά σε δείγμα νερού με την καλλιέργεια του βακτηρίου *Pseudomonas fluorescense*, μετρώντας τις αποικίες των βακτηρίων και εκφράζοντας τα αποτελέσματα με τη συγκέντρωση άνθρακα σε διάλυμα οξικού άλατος που παράγει την ίδια βακτηριακή παραγωγή. Το AOC είναι δυνατόν να είναι λιγότερο από 1% του διαλυμένου οργανικού άνθρακα (DOC). Το επίπεδο του AOC στο νερό του εμπλουτισμού πρέπει να είναι μικρότερο από  $10\ \mu\text{g}/\text{l}$  για να αποφευχθεί η σημαντική απόφραξη της γεώτρησης, αν δεν προστεθεί χλώριο στο νερό. Αν παραμείνει χλώριο πριν τον εμπλουτισμό, τότε είναι ανεκτά υψηλότερα επίπεδα AOC. Περισσότερο από το AOC, βιοδιασπόμενος οργανικός άνθρακας ή BDOC (biodegradable organic carbon) είναι συνήθως προτιμότερος ως βιολογική

παράμετρος της απόφραξης, ειδικά για υψηλές περιεκτικότητες σε οργανικό άνθρακα. Είναι ευκολότερο να εκτιμηθεί το BDOC παρά το AOC, επειδή το BDOC βασίζεται στη βιοδιάσπαση του οργανικού άνθρακα διοχετεύοντας το νερό μέσα από εργαστηριακές εδαφικές στήλες ή με σχετικές δοκιμές με εδαφική υδαρή κονία.



Σχήμα 8.25. Απλή και διπλή διάταξη γεώτρησης εμπλουτισμού (ASCE, 2001).

Ο δείκτης PFI προσδιορίζεται διοχετεύοντας το νερό του εμπλουτισμού μέσα σε δοκίμια (στήλες) γεμάτα με το ανάλογο εδαφικό υλικό του υδροφόρου. Ο ρυθμός διήθησης ανά μονάδα επιφάνειας μέσω των δοκιμίων διατηρείται τότε σε υψηλότερες τιμές από ό,τι ο ρυθμός διήθησης ανά μονάδα επιφάνειας του υδροφόρου γύρω από τη γεώτρηση. Έτσι, η απόφραξη γίνεται πιο γρήγορα στο δοκίμιο παρά στη γεώτρηση, και ο δείκτης PFI αποτελεί μια πρώιμη ειδοποίηση για την απόφραξη της γεώτρησης εμπλουτισμού, έτσι ώστε να μπορούν να ληφθούν προληπτικά μέτρα ή μέτρα αποκατάστασης.

Η εμπειρία έχει δείξει ότι οι δείκτες MFI, AOC και ο PFI είναι χρήσιμες παράμετροι για τη σύγκριση των σχετικών δυναμικών απόφραξης διαφόρων ποιοτήτων νερού, αλλά δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να προβλεφτεί η απόφραξη και η πτώση στο ρυθμό έγχυσης σε πραγματικές γεωτρήσεις εμπλουτισμού, κάτι που εξαρτάται και από την κατασκευή της γεώτρησης και τα χαρακτηριστικά του υδροφόρου. Έτσι έρευνες σε πραγματική κλίμακα σε πειραματικές γεωτρήσεις εμπλουτισμού, παραμένουν απαραίτητες

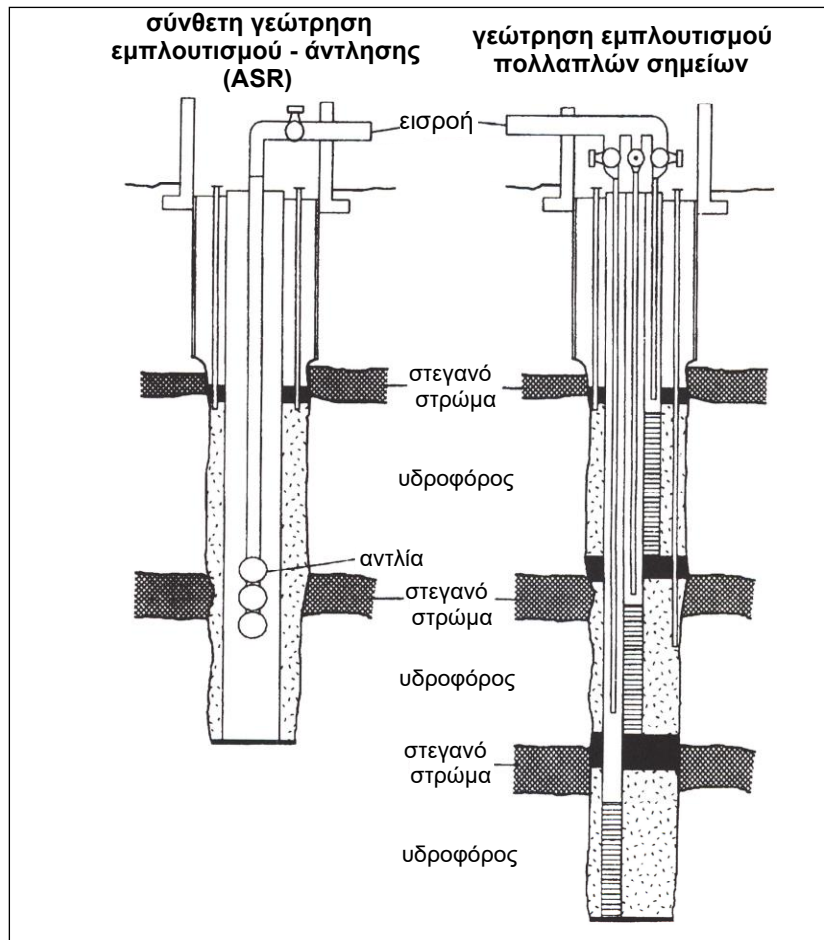
για να προσδιοριστούν κριτήρια σκοπιμότητας σχεδιασμού και διαχείρισης για τη λειτουργικότητα των γεωτρήσεων εμπλουτισμού. Πρακτικές θεωρήσεις, όπως η εναλλασσόμενη ροή στους σωλήνες που διοχετεύουν το νερό στην εφαρμογή εμπλουτισμού και η σχετική πιθανότητα της διακύμανσης της περιεκτικότητας σε αιωρούμενα στερεά στο νερό, παίζουν επίσης σημαντικό ρόλο στην απόφραξη της γεώτρησης. Η διακύμανση των αιωρούμενων στερεών μπορεί να προκληθεί από το σχηματισμό βιοφίλμ στους σωλήνες κατά τη διάρκεια μικρής ροής, και από τη διάβρωση των βιοφίλμ κατά τη διάρκεια μεγάλης ροής. Μπορεί, τότε να είναι απαραίτητη η επεξεργασία του νερού στη θέση του εμπλουτισμού ώστε να απομακρυνθούν τα αιωρούμενα στερεά προτού γίνει η έγχυση στη γεώτρηση.

Η αύξηση στην πίεση της έγχυσης, που έχει ως στόχο να ξεπεραστούν οι επιπτώσεις της απόφραξης, είναι γενικά αναποτελεσματική και συχνά ουσιαστικά επιταχύνει την εξέλιξη της απόφραξης συμπιέζοντας το στρώμα της απόφραξης, όπως έχει αναλυθεί σε προηγούμενα κεφάλαια. Ακόμα και αν το στρώμα της απόφραξης δεν συμπιεστεί από την υψηλή πίεση της έγχυσης του νερού και αν ακόμα ο ρυθμός έγχυσης είναι ουσιαστικά αυξημένος, τότε ο υψηλός ρυθμός έγχυσης στη γεώτρηση αυξάνει την παραγωγή της βιομάζας στους πόρους της απόφραξης, που οφείλεται στους υψηλούς ρυθμούς φορτίου αζώτου, φωσφόρου και οργανικού άνθρακα. Επίσης, αυξάνουν τη φυσική απόφραξη μέσω των υψηλών ρυθμών συγκέντρωσης αιωρούμενων στερεών. Ο αυξημένος ρυθμός έγχυσης που επιτυγχάνεται μέσω της αυξημένης πίεσης έγχυσης συνήθως δεν έχει μεγάλη διάρκεια.

## **ASR γεωτρήσεις**

Μια σχετικά καινούρια και ραγδαίως διαδιδόμενη μέθοδος T.E. είναι η χρήση των γεωτρήσεων ASR (Pyne, 1995) (σχ. 8.26), που είναι συνδυασμός εμπλουτισμού και άντλησης γεωτρήσεων. Χρησιμοποιούνται για εμπλουτισμό όταν υπάρχει περίσσεια νερού και για άντληση όταν παρουσιάζεται ανάγκη για νερό.

Συνήθως οι γεωτρήσεις ASR χρησιμοποιούνται για εποχική αποθήκευση πόσιμου νερού με υπολειμματικό χλώριο σε περιοχές όπου οι απαιτήσεις για νερό είναι αρκετά ψηλότερες το καλοκαίρι από ό,τι το χειμώνα ή αντίθετα, και εκεί όπου η επιφανειακή αποθήκευση του νερού δεν είναι δυνατή ή είναι πολύ ακριβή. Η περίσσεια νερού του χειμώνα, τότε, αποθηκεύεται υπόγειο στις ASR γεωτρήσεις, οι οποίες αντλούνται το καλοκαίρι (ή αντίστροφα) για να αυξηθεί η παραγωγή από την εγκατάσταση επεξεργασίας νερού. Η μόνη επεξεργασία που υφίσταται το νερό που αντλείται από τις γεωτρήσεις είναι η χλωρίωση. Με τις γεωτρήσεις ASR είναι εφικτό να γίνει η σχεδίαση και η διαχείριση εγκατάστασης επεξεργασίας νερού για μέση ημερήσια κατανάλωση. Η χρήση των γεωτρήσεων ASR για αποθήκευση εποχιακού πλεονάζοντος νερού και για την αντιμετώπιση των εποχιακών απαιτήσεων αιχμής είναι συχνά φθηνότερη από ό,τι η χρήση εγκαταστάσεων επεξεργασίας νερού και επιφανειακών δεξαμενών με χωρητικότητα που βασίζεται στις ανάγκες αιχμής χωρίς τις γεωτρήσεις ASR. Οι γεωτρήσεις ASR χρησιμοποιούνται επίσης για την αποθήκευση καλής ποιότητας, μη επεξεργασμένου νερού όταν υπάρχει σε περίσσεια και αντλούνται για να γίνει η επεξεργασία του νερού όταν αυτό χρειαστεί. Αυτή η δυνατότητα είναι ιδιαίτερης σημασίας σε περιοχές της Ευρώπης, της Αυστραλίας και άλλων χωρών όπου οι άνθρωποι χρειάζονται το υπόγειο νερό αλλά αυτό εξαντλείται το καλοκαίρι και πρέπει να επαναπληρωθεί το χειμώνα, όταν δεν παρατηρείται ροή στους χειμάρρους.



Σχήμα 8.26. Γεώτρηση εμπλουτισμού – άντλησης (ASR) και γεώτρηση πολλαπλών σημείων σε αρτεσιανούς υδροφόρους (ASCE, 2001).

## 9. ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΤΙΚΑ ΖΗΤΗΜΑΤΑ ΠΟΥ ΑΦΟΡΟΥΝ ΣΤΗΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΤΕΧΝΗΤΟΥ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΥ

(κύρια βιβλιογραφική πηγή: British Geological Survey, 2002)

### 9.1. Φυσικοί περιβαλλοντικοί παράγοντες που επηρεάζουν την αποτελεσματικότητα του τεχνητού εμπλουτισμού

#### **Κλιματικά, υδρολογικά, υδρογεωλογικά και τοπογραφικά κριτήρια**

Η αποτελεσματικότητα των εφαρμογών Τ.Ε. επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες που έχουν σχέση με το κλίμα, τη γεωλογία και την υδρογεωλογία, τη μορφολογία, τη διαθεσιμότητα και την ποιότητα του νερού, ζητήματα λειτουργίας και συντήρησης, ρυθμιστικούς ελέγχους και περιβαλλοντικές και κοινωνικοοικονομικές θεωρήσεις. Η πολύπλοκη αλληλοεπίδραση μεταξύ μερικών από αυτούς τους παράγοντες ή μεταξύ όλων, καθορίζει το βαθμό επιτυχίας, η οποία μπορεί να κριθεί με βάση μια ποικιλία θεωρήσεων. Παρακάτω δίνεται μια λεπτομερής περιγραφή τεχνικών χαρακτηριστικών που επηρεάζουν την αποτελεσματικότητα των εφαρμογών του Τ.Ε. Στον Πίνακα 9.1 γίνεται μια προσπάθεια διευκρίνισης και απλοποίησης αυτών των χαρακτηριστικών, όπου οι παράμετροι που θεωρούνται σημαντικές περιγράφονται αναφορικά με μια ευρύτερη υδρογεωλογική ταξινόμηση.

Πίνακας 9.1. Παράγοντες που επηρεάζουν την τεχνική αποτελεσματικότητα των εφαρμογών του τεχνητού εμπλουτισμού σε σχέση με το περιβάλλον

	ΑΛΛΟΥΒΙΑΚΟΙ ΥΔΡΟΦΟΡΟΙ	ΑΛΛΟΥΒΙΑ ΥΠΕΡΚΕΙΜΕΝΑ ΥΔΡΟΦΟΡΩΝ ΜΕΣΑ ΣΕ ΡΩΓΜΑΤΩΜΕΝΑ ΣΚΛΗΡΑ ΠΕΤΡΩΜΑΤΑ	ΡΩΓΜΑΤΩΜΕΝΟΙ ΒΡΑΧΩΔΕΙΣ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΙ ΜΕ ΛΕΠΤΗ ΕΔΑΦΙΚΗ ΖΩΝΗ ΑΠΟΣΑΘΡΩΣΗΣ	ΣΥΝΕΚΤΙΚΟΙ ΨΑΜΜΙΤΙΚΟΙ ΥΔΡΟΦΟΡΟΙ	ΑΝΘΡΑΚΙΚΟΙ ΥΔΡΟΦΟΡΟΙ
ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ Τ.Ε.	Περιοχή Terai, Nepal και γύρω περιοχές στο Uttar Pradesh στην Ινδία. Phoenix, Arizona, Η.Π.Α. Atlantis, Ν. Αφρική	Alwar, Rajasthan, Ινδία Meshana District, Gujarat, Ινδία	Saurashtra, Gujarat, Coimbatore, Tamil Nadu Andhra Pradesh, Ινδία Karnataka, Ινδία Maharashtra, Ινδία	Loftsom Bridge, Yorkshire, Ην. Βασίλειο (U.K.)	Lytchett Minster, England, Ην. Βασίλειο (U.K.) Ισραήλ
ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗ- ΡΙΣΤΙΚΑ	Ποτάμια, θαλάσσιες και λιμναίες αποθέσεις κλιμακούμενες σε πάχος από μερικές δεκάδες μέτρα έως χιλιόμετρα. Αλληλουχία στρώσεων αργίλου, άμμου και χαλικιών καθώς και ασβεστούχων στρωμάτων. Χαμηλότερες απολήξεις ποταμών που διαμορφώνουν πλημμυρικά πεδία αρκετά χαμηλής μορφολογίας	Ποτάμια και διουβιακές αποθέσεις σε ανάντη τμήματα ποταμών. Οι αποθέσεις είναι αμμώδεις έως χονδρόκοκκες και σχηματίζουν υδροφόρους πάχους μερικών δεκάδων μέτρων. Οι υποκείμενοι υδροφόροι εμφανίζονται σε ρωγματωμένα, εκρηξιγενή ή και μεταμορφωμένα πετρώματα, συνήθως σε υδραυλική σύνδεση με τους υπερκείμενους αλλουβιακούς σχηματισμούς.	Ο υδροφόρος εμφανίζεται σε ρωγματωμένο βραχώδες υπόβαθρο που αποτελείται από εκρηξιγενή μεταμορφωμένα ή και ηφαιστειακά πετρώματα. Η εδαφική αποσαθρωμένη ζώνη είναι πολύ λεπτή για να αποθηκεύσει νερό παρά μόνο πολύ λίγο κατά τόπους.	Υδροφόροι που το εδαφικό τους υλικό αποτελείται από μείγμα κόκκων άμμου που συγκρατούνται μεταξύ τους με κάποιο υλικό (π.χ. πυρίτιο του ασβεστίου) ή έχουν σχηματιστεί μέσω μεταμορφωσιγενούς διαδικασίας. Αυτό οδηγεί σε ένα ευρύ φάσμα των αναλογιών πορώδους /σπασίματος και ως εκ τούτου υδραυλικές ιδιότητες.	Υδροφόροι με υδραυλικές ιδιότητες που ελέγχονται από τη διαλυτότητα του πετρώματος. Φαινόμενα έντονης διάλυσης μπορεί να οδηγήσουν σε καρστική ροή.

ΦΡΕΑΤΙΟΣ Ή ΥΠΟ ΠΙΕΣΗ ΥΔΡΟΦΟΡΟΣ

Φρεάτιος αν υπάρχει περατή στρώση στην επιφάνεια, που γίνεται υπό πίεση καθώς εμφανίζεται σε μεγαλύτερα βάθη. Διαστρωματωμένοι υδροφορείς με ποικίλη επικοινωνία μεταξύ τους.

Τα χονδρόκοκα αλλούβια οδηγούν σε φρεατικές συνθήκες με τον βραχώδη υδροφόρο να είναι σε υδραυλική επικοινωνία.

Συνήθως φρεατικοί υδροφόροι σε σκληρά πετρώματα με εξάρτηση από την αλληλοσυνδέση των ασυνεχειών.

Φρεατικοί εφόσον δεν υπάρχει αλλουβιακή επικάλυψη ή στρώση αργίλου.

Φρεατικοί εφόσον δεν υπάρχει αλλουβιακή επικάλυψη ή στρώση αργίλου.

ΠΟΡΩΔΕΣ ΚΑΙ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ

Υψηλό πορώδες αλλά περιορισμένη αποτελεσματική αποθήκευση σε στρώσεις άμμου και χονδρόκοκκων υλικών.

Υψηλό πορώδες και αποθήκευση στα αλλούβια που περιορίζεται μόνο από το πάχος των υλικών. Χαμηλή ικανότητα αποθήκευσης στις ασυνέχειες σε σκληρά πετρώματα αλλά η αποστράγγιση των αλλουβίων μπορεί να διατηρήσει καλές αποδόσεις.

Χαμηλή ικανότητα αποθήκευσης στις ασυνέχειες. Αν η αποθήκευση εξαντληθεί μέσω υπεράντλησης, τότε μπορεί να δημιουργηθεί επιπλέον αποθήκευση ώστε να πληρώσει τον υδροφόρο στην επόμενη περίοδο.

Μέρος της αποθήκευσης στο εδαφικό υλικό αυτών των υδροφόρων θα καθορίζεται από το πορώδες, το βαθμό συνεκτικότητας και ρωγμάτωσης.

Μέρος της αποθήκευσης στο εδαφικό υλικό αυτών των υδροφόρων θα καθορίζεται από το πορώδες, το βαθμό συνεκτικότητας και διάλυσης.

ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΡΟΗ

Ροή κυρίως σε χονδρόκοκκες στρώσεις ώστε η αλληλοσύνδεση όπως και η σύνδεση με τη ζώνη εμπλουτισμού να καθορίζει την πορεία ροής. Χαμηλές υδραυλικές κλίσεις οδηγούν σε αργή ροή υπόγειου νερού.

Η ροή στα αλλούβια θα αποστραγγίζεται προς τα ρεύματα γρήγορα, εξαντλώντας τα αποθέματα. Οι υδροφόροι θα έχουν γενικά χαμηλή διαπερατότητα ρωγμών με εξαίρεση τις ζώνες με μεγάλες ασυνέχειες.

Η ροή στις γεωτρήσεις των σκληρών πετρωμάτων θα γίνεται μέσα από τις ασυνέχειες, ενώ όσο μεγαλύτερος ο αριθμός, τόσο μεγαλύτερη η απόδοση και η ταχύτητα επαναπλήρωσης των γεωτρήσεων.

Η διαπερατότητα και η ροή καθορίζονται από το πορώδες και το βαθμό συνεκτικότητας και ρηγμάτωσης.

Η διαπερατότητα και η ροή καθορίζονται από το πορώδες, το βαθμό συνεκτικότητας και το βαθμό διάλυσης.

ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΕΙΣ ΤΗΣ  
ΣΤΑΘΜΗΣ ΤΟΥ  
ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΝΕΡΟΥ

Εξαιτίας της υψηλής ικανότητας αποθήκευσης η διακύμανση θα είναι μικρή, μερικά μέτρα. Αν η στάθμη του υπόγειου νερού είναι κοντά στην επιφάνεια, τότε υπάρχει περιορισμένο περιθώριο για εμπλουτισμό. Η πτώση στάθμης λόγω άντλησης μπορεί να δημιουργήσει επιπρόσθετη αποθήκευση εάν γίνει η κατάλληλη διαχείριση.

Αν η στάθμη του υπόγειου νερού είναι στον υδροφόρο του σκληρού πετρώματος, τότε αυτή θα αποκριθεί γρήγορα στην άντληση και στον εμπλουτισμό, αλλά σε περιορισμένη ακτίνα εξαιτίας της χαμηλής διαπερατότητας. Όταν η στάθμη του υπόγειου νερού είναι μέσα στα αλλούβια, τότε ισχύουν όσα γράφονται στους αλλουβιακούς υδροφόρους (αριστερά).

Η στάθμη του υπόγειου νερού αυξάνεται και μειώνεται γρήγορα αποκρινόμενη άμεσα στον εμπλουτισμό και την άντληση.

Εκεί όπου το πορώδες του υδροφόρου είναι υψηλό, οι διακυμάνσεις της στάθμης του υπόγειου νερού είναι σχετικά ήπιες αποκρινόμενες στην άντληση και τον εμπλουτισμό.

Εκεί όπου οι ασυνέχειες συνεισφέρουν στο κύριο πορώδες, οι διακυμάνσεις του υπόγειου νερού είναι γρήγορες.

ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ  
ΔΙΗΘΗΣΗΣ

Υψηλή, αν η επιφανειακή στρώση είναι αμμώδης, αλλά χαμηλή αν υπάρχει υψηλή περιεκτικότητα σε άργιλο. Απαιτούνται χονδρόκοκα υλικά για την πλήρωση της ζώνης εμπλουτισμού. Η άργιλος, ή άλλο στρώμα χαμηλής διαπερατότητας, σε μικρό βάθος θα περιορίσει τον εμπλουτισμό.

Καλή σε αμμώδεις αλλουβιακούς σχηματισμούς που μπορούν να αποθηκεύσουν νερό και έτσι να διευκολυνθεί η διήθηση προς το υποκείμενο ρωγματούμενο πέτρωμα.

Ικανότητα διήθησης που περιορίζεται από τον αριθμό των ανοιχτών διακλάσεων και έτσι η απορροή μπορεί να είναι μεγάλη.

Πολύ υψηλή εκεί όπου δεν υπάρχει επικάλυψη και το εδαφικό υλικό έχει δημιουργηθεί από τον ψαμμίτη.

Πολύ υψηλή εκεί όπου δεν υπάρχει επικάλυψη. Η ανάπτυξη του εδάφους είναι συνήθως πολύ λεπτή και η επιφανειακή απορροή είναι ελάχιστη.



## ΘΕΜΑΤΑ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ

Η ποιότητα του υπόγειου νερού είναι καλή σε ζώνες ενεργής ροής αλλά υποβαθμίζεται εκεί όπου η ροή είναι αργή ή λόγω της θαλάσσιας διείσδυσης. Εκεί όπου υπάρχει μικρή κίνηση του φυσικού υπόγειου νερού, οι περιεκτικότητες στοιχείων όπως σίδηρος, μαγνήσιο, αρσενικό και φθόριο πιθανόν να υπερβούν τα αποδεκτά όρια. Ο T.E. μπορεί να βελτιώσει την ποιότητα του υπόγειου νερού μέσω διαδικασιών αραίωσης ή απομάκρυνσης. Η τρωτότητα στη ρύπανση εξαρτάται από τη διαπερατότητα των επιφανειακών στρωμάτων.

Η ποιότητα του υπόγειου νερού είναι καλή σε ζώνες ενεργής ροής. τα διαπερατά αλλούβια είναι τρωτά σε ρύπανση.

Η ποιότητα του υπόγειου νερού είναι καλή σε ζώνες ενεργής ροής αλλά τρωτή σε ραγδαία ρύπανση από ροή ρωγμών. Η λεπτή εδαφική επικάλυψη προσδίδει μόνο περιορισμένη προστασία.

Πολύ καλή ποιότητα υπόγειου νερού έχει όπου υπάρχει έντονος εμπλουτισμός αλλά ευάλωτη σε μόλυνση, ειδικά εκεί όπου η εδαφική επικάλυψη είναι λεπτή.

Πολύ καλή ποιότητα υπόγειου νερού έχει όπου υπάρχει έντονος εμπλουτισμός αλλά ευάλωτη σε μόλυνση.

ΕΝΤΑΣΗ  
ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗΣ

Θα εμφανιστεί επιφανειακή ροή εάν ξεπεραστεί ο ρυθμός διήθησης ή το έδαφος είναι κορεσμένο. Εκτεταμένη πλημμύρα θα προκύψει σε πεδία πλημμυρικών αποθέσεων.

Ραγδαία απορροή από παρακείμενο βραχώδες υπόβαθρο στη διάρκεια έντονης βροχόπτωσης πιθανόν να προκαλέσει διάβρωση των αλλουβιακών και εδαφικών σχηματισμών.

Ραγδαία απορροή στη διάρκεια έντονης βροχόπτωσης πιθανόν να προκαλέσει διάβρωση του εδαφικού υλικού.

Πιθανόν η ικανότητα διήθησης να είναι υψηλή, οπότε και ο εμπλουτισμός να είναι υψηλός. Ακραία φαινόμενα ίσως προκαλέσουν διάβρωση του εδάφους και προσδώσουν νερό για Τ.Ε.

Όλα εκτός από τα ακραία φαινόμενα θα προκαλέσουν διήθηση. Λεπτά εδαφικά στρώματα διαβρώνονται εύκολα.

ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗ

Η βροχόπτωση και η εξάτμιση ποικίλλουν αρκετά τόσο στο χρόνο όσο και στο χώρο. Η ετήσια μεταβλητότητα στις βροχοπτώσεις είναι υψηλή, έτσι οι μέσες τιμές πρέπει να χρησιμοποιούνται ανάλογα. Παρακάτω ακολουθούν οι συνιστώσες του υδατικού ισοζυγίου σε τρεις λεκάνες απορροής στην Καρνατάκα (Ινδία), που μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως υπόδειγμα και όχι να εφαρμοστούν ευρέως (Batchelor et al, 2000).

Η μακροπρόθεσμη ετήσια μέση βροχόπτωση είναι 520mm και η δυνητική εξατμισοδιαπνοή είναι 1750mm. Ενδεικτικά οι τιμές του υδατικού ισοζυγίου σε κλίμακα πεδίου σε μη αρδευτικές περιοχές είναι: Ε/Δ από το έδαφος: 45%, Ε/Δ από καλλιεργούμενες εκτάσεις: 25% , επιφανειακή απορροή: 10% και εμπλουτισμός του Υ.Ν.: 10%. Η εξάτμιση ανοιχτής επιφάνειας νερού θα συμβεί σε δυνητικά μέγιστο ρυθμό για στατικά σώματα νερού, περίπου 2000 mm/χρόνο (5,5 mm/μέρα). Οι απώλειες λόγω εξάτμισης από τις δεξαμενές μπορούν να μειωθούν με την αύξηση του βάθους του νερού με αποτέλεσμα να μειωθεί η αναλογία της επιφάνειας της περιοχής προς όγκο. Η υπόγεια αποθήκευση μέσω του τεχνητού εμπλουτισμού προφανώς θα εξαλείψει τις απώλειες λόγω εξάτμισης, μετά τη διήθηση.

## Μεθοδολογίες για την εκτίμηση της αποτελεσματικότητας του τεχνητού εμπλουτισμού

### Εισαγωγή

Γενικά, ο στόχος του Τ.Ε. είναι η αύξηση των υπόγειων υδατικών πόρων αλλά η αποτελεσματικότητα του ποικίλλει αισθητά ανάλογα με το σύστημα Τ.Ε. Αν η μέθοδος του Τ.Ε. είναι αποτελεσματική, πρέπει να παρατηρηθεί αύξηση στη στάθμη του υπόγειου νερού ή μείωση στο ρυθμό της πτώσης της. Οι εποχιακές γεωτρήσεις πρέπει να είναι ικανές να παρέχουν νερό για μεγαλύτερες περιόδους και έτσι να μειώνεται η κατανάλωση ενέργειας για την άντληση του νερού.

Αν τα συστήματα του Τ.Ε. συνεισφέρουν στην υπόγεια αποθήκευση, στη βασική ροή και συνεπώς στην διαθεσιμότητα του επιφανειακού νερού, τότε μια αυξανόμενη φυτική επικάλυψη θα μπορούσε να οδηγήσει σε μείωση της εδαφικής διάβρωσης και σε γενικότερη βελτίωση της χλωρίδας και πανίδας π.χ. εισροή αποδημητικών πουλιών, άγρια φύση κ.α.

Εν τούτοις, η επιπλέον άντληση του υπόγειου νερού για άρδευση που βασίζεται σε λάθος εκτίμηση της ποσότητας του τεχνητού εμπλουτισμού, θα οδηγήσει σε επιδείνωση του υποβιβασμού της στάθμης του υπογείου νερού. Μικροί ταμιευτήρες, για παράδειγμα, που έχουν υψηλή αναλογία επιφάνειας προς όγκο, μπορεί να παρουσιάσουν μεγάλες απώλειες λόγω εξάτμισης. Σε αυτές τις περιπτώσεις, το νερό του ταμιευτήρα εξασφαλίζει μια σημαντική πηγή για ψάρεμα, πλύση, πότισμα ζώων κ.α., αλλά η συνεισφορά στην αύξηση του υπόγειου νερού μάλλον θα είναι μειωμένη.

Γι' αυτό το λόγο, στο πλαίσιο της βιώσιμης διαχείρισης του υπόγειου νερού, είναι σημαντικό να εκτιμάται η αποτελεσματικότητα των συστημάτων τεχνητού εμπλουτισμού αναφορικά με την ικανότητα τους να εμπλουτίζουν τους υδροφόρους. Παρ' όλα αυτά, η αποτελεσματικότητα είναι δύσκολο να μετρηθεί απ' ευθείας. Η μελέτη ενός λεπτομερούς υδρολογικού ισοζυγίου είναι η μοναδική προσέγγιση που θα αποφέρει ποσοτική εκτίμηση της συνεισφοράς του συστήματος του Τ.Ε. στον εμπλουτισμό του υπόγειου νερού. Το υδρολογικό ισοζύγιο αναφέρεται διεξοδικά στην παρακάτω ενότητα. Συμπληρωματικά με τη μελέτη του ποσοτικού υδρολογικού ισοζυγίου υπάρχουν μέθοδοι που είναι ενδεικτικές της αποτελεσματικότητας των συστημάτων Τ.Ε., στην κλίμακα τόσο του ταμιευτήρα όσο και της λεκάνης απορροής.

### Στην κλίμακα της λεκάνης απορροής

Οι συνιστώσες του μέσου ετήσιου υδρολογικού ισοζυγίου σε κλίμα λεκάνης απορροής είναι τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα, η εξατμισοδιαπνοή, η απορροή (επιφανειακή και υπόγεια) και οι μεταβολές στα αποθέματα του υπόγειου νερού. Αυτό μπορεί να γενικευτεί ως εξής:

Ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα = εξατμισοδιαπνοή + επιφανειακή απορροή + υπόγεια απορροή +/- μεταβολή στα αποθέματα (1). Έτσι η ποσότητα του νερού που εισρέει στη λεκάνη απορροής σε δοσμένο χρόνο εξισορροπείται από την ποσότητα του νερού που εκρέει από την λεκάνη στο ίδιο χρονικό διάστημα προσθέτοντας ή αφαιρώντας τις μεταβολές των αποθεμάτων της λεκάνης στην ίδια περίοδο.

Η εξίσωση (1) δείχνει ότι η αύξηση στον εμπλουτισμό του υπόγειου νερού, και συνεπώς στην υπόγεια αποθήκευση, μπορεί να επιτευχθεί μέσω της μείωσης της εξάτμισης ή της μείωσης της απορροής από τη λεκάνη, θεωρώντας ότι δεν υπάρχει μεταβολή στις ετήσιες μέσες κατακρημνίσεις. Συνεπώς η μέση ετήσια απορροή από μια λεκάνη απορροής προσδιορίζει το περιθώριο για την ανάπτυξη επιπρόσθετων συστημάτων Τ.Ε. και δίνει μια ποσοτική εκτίμηση των ποσοτήτων νερού που είναι διαθέσιμες για εμπλουτισμό.

Η συλλογή της επιφανειακής απορροής με συστήματα Τ.Ε. αυξάνει τη δυνατότητα για μεταβίβαση νερού που θα εμπλουτίσει τον υδροφόρο και μειώνει την ποσότητα που είναι διαθέσιμη για επιφανειακή απορροή. Εκεί όπου η απορροή είναι εποχική, η επιφανειακή απορροή μπορεί να είναι όχι μόνο καταστρεπτική αλλά και να χαθεί μεγάλο ποσό μέσω της εξάτμισης μετά από πλημμυρικά γεγονότα. Η καλή διαχείριση μπορεί να καταλήξει σε αύξηση

του νερού που αποθηκεύεται υπόγεια, με αποτέλεσμα την αύξηση της βασικής ροής στους χειμάρρους. Αυτό ίσως προκαλέσει την αλλαγή των εφήμερων ρευμάτων σε μόνιμα.

Για την επίτευξη ενός υδρολογικού ισοζυγίου των υπόγειων νερών μιας λεκάνης απορροής, απαιτούνται καλής ποιότητας υδρολογικές και υδρογεωλογικές πληροφορίες. Αναφορικά με την εξίσωση του υδρολογικού ισοζυγίου, δεδομένα για τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα και την απορροή μπορούν να μετρηθούν κατευθείαν, χρησιμοποιώντας βροχόμετρα και παροχόμετρα αντίστοιχα. Κατόπιν, μέσω του υδρογραφήματος μπορεί να διαχωριστεί ποσοτικά η βασική ροή και η επιφανειακή απορροή. Αν είναι διαθέσιμα υδρογραφήματα πριν και μετά την εγκατάσταση του συστήματος του Τ.Ε., ο ποσοτικός προσδιορισμός του επιφανειακού νερού και της βασικής ροής ως συστατικά της ετήσιας απορροής, μπορούν να δώσουν μια εκτίμηση της αποτελεσματικότητας των εφαρμογών του Τ.Ε. στη λεκάνη απορροής.

Η εξάτμιση είναι πιο δύσκολο να προσδιοριστεί και περιλαμβάνει πιο πολύπλοκα όργανα όπως κλιματολογικούς σταθμούς και εξατμισήμετρα. Λεπτομερείς πληροφορίες αναφέρονται στους Show, 1996 και Gunston, 1998.

Η μεταβολή στην υπόγεια αποθήκευση μετριέται με την άνοδο ή πτώση της υπόγειας στάθμης νερού στη λεκάνη απορροής. Η εκτίμηση της ειδικής απόδοσης ή του ενεργού πορώδους μπορεί να γίνει με δοκιμές στον υδροφόρο ή εφαρμόζοντας γνωστές τιμές ή εκτιμήσεις, με αποτέλεσμα να μπορεί να υπολογιστεί η μεταβολή στην αποθήκευση. Στην περίπτωση ενός υδροφόρου υπό πίεση η μεταβολή στην πιεζομετρική στάθμη πρέπει να καταγραφεί και να πολλαπλασιαστεί με τον συντελεστή υδροχωρητικότητας του υπό πίεση υδροφόρου για να προκύψει η μεταβολή στην αποθήκευση.

Είναι δυνατόν να εφαρμοστεί, με βάση τις γνωστές συνιστώσες του υδρολογικού ισοζυγίου, αριθμητικό μοντέλο του υδρογεωλογικού καθεστώτος. Οι εισροές, όπως κατακρημνίσματα και οι εκροές, όπως εξατμισοδιαπνοή, βασική ροή και αντλήσεις, πρέπει να μετρηθούν ή να εκτιμηθούν για να γίνει η προσομοίωση της στάθμης του υπόγειου νερού με το μοντέλο. Το μοντέλο πρέπει να επαληθευτεί με σύγκριση των υπολογισμένων τιμών στάθμης του νερού με αυτών που έχουν παρατηρηθεί και μετά πρέπει να χρησιμοποιηθεί για να προσομοιώσει την απόκριση του υδροφόρου σε διαφορετικές ποσότητες και τοποθεσίες Τ.Ε. Κατόπιν αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εργαλείο διαχείρισης του υδροφόρου.

Εν τούτοις, πρέπει να σημειωθεί ότι οι εκτιμήσεις των συνιστωσών του υδρολογικού ισοζυγίου από ανεξάρτητες τεχνικές παρουσιάζουν σχεδόν πάντα κάποιου είδους σφάλμα. Αυτό οφείλεται σε κάποιους παράγοντες, μεταξύ των οποίων είναι:

- Η μεγάλη χωρική διακύμανση των βροχοπτώσεων και των απορροών, ειδικά σε περισσότερο ξηρές περιοχές,
- Η εκτεταμένη διακύμανση των εδαφικών και υδρογεωλογικών συνθηκών,
- Η ανεπάρκεια των βάσεων των υδρογεωλογικών δεδομένων.

### Στην κλίμακα του ταμιευτήρα

Το υδρολογικό ισοζύγιο μιας μεμονωμένης κατασκευής πρέπει να συμπεριλάβει την παροχή προς και την εκροή από τον ταμιευτήρα καθώς και τις μεταβολές των αποθεμάτων και στον ταμιευτήρα και στον υποκείμενο υδροφόρο. Το υδρολογικό ισοζύγιο μπορεί να συμπτυχθεί σε:

Ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα + επιφανειακή (και υπόγεια) εισροή = Εξάτμιση + Εμπλουτισμός + Επιφανειακή εκροή (υπερχειλίση, διαρροή, άντληση) +/- μεταβολή στον όγκο του νερού στον ταμιευτήρα.

Το υδρολογικό ισοζύγιο ενός ταμιευτήρα μπορεί να απλοποιηθεί κατά τις περιόδους όπου δεν παρατηρούνται ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα και σε περιόδους που οι επιφανειακές εισροές και εκροές μπορούν να αγνοηθούν. Μια επιπρόσθετη απλοποίηση μπορεί να γίνει αν

οι απώλειες λόγω διαρροής, άντλησης κ.α. αγνοηθούν και αν ο ταμιευτήρας είναι υπό συνθήκες εκροής σε σχέση με τον υδροφόρο, τότε το υδρολογικό ισοζύγιο μπορεί να γίνει:

Υπόγειος Εμπλουτισμός = μεταβολή του όγκου του νερού στον ταμιευτήρα – εξάτμιση

Η προηγούμενη εξίσωση καταδεικνύει ότι ο καταμερισμός ανάμεσα στην εξάτμιση και στον υπόγειο εμπλουτισμό καθορίζει την αποτελεσματικότητα του συστήματος του Τ.Ε. Αν η εξάτμιση είναι θεωρητικά μηδέν, τότε η μεταβολή του όγκου του νερού στον ταμιευτήρα θα εξισορροπήσει τον υπόγειο εμπλουτισμό. Αυτό μπορεί να παρατηρηθεί από τη μεταβολή στη στάθμη του νερού του ταμιευτήρα. Σε μια άλλη ακραία περίπτωση, ο ταμιευτήρας μπορεί να έχει φραχθεί με ιλύ, οπότε η πτώση της στάθμης του νερού να οφείλεται στην εξάτμιση π.χ. υπόγειος εμπλουτισμός θα είναι μηδέν και το σύστημα θα είναι αναποτελεσματικό.

Για να προσδιοριστεί ποσοτικά η εξάτμιση και ο υπόγειος εμπλουτισμός, διαφορετικοί μέθοδοι ποικίλης πολυπλοκότητας μπορούν να υιοθετηθούν. Οι μέθοδοι που θα επιλεγούν για την εκτίμηση της αποτελεσματικότητας του συστήματος του Τ.Ε. εξαρτώνται από την απαιτούμενη ακρίβεια και το διαθέσιμο κεφάλαιο. Παρακάτω περιγράφονται συνοπτικά μερικές μέθοδοι που εφαρμόζονται συχνότερα. Περισσότερες και πλέον λεπτομερείς πληροφορίες περιλαμβάνουν οι αναφορές των Kraatz, 1971, Lerner et al, 1990, Huisman Olsthoorn, 1983.

### 1. Μέτρηση της στάθμης στον ταμιευτήρα

Μια απλή και άμεση προσέγγιση είναι η περιοδική καταγραφή της στάθμης του νερού στον ταμιευτήρα. Οι μετρήσεις μετατρέπονται σε όγκο νερού με μια υπολογιστική σχέση βάθους-όγκου. Ο όγκος του νερού που εξατμίζεται από την ανοικτή επιφάνεια του νερού αφαιρείται από τον υπολογισμένο όγκο και έτσι λαμβάνεται ο όγκος του νερού που κατεισδύει για ένα ορισμένο χρονικό διάστημα. Η εξάτμιση υπολογίζεται είτε από διαθέσιμα μετεωρολογικά δεδομένα ή εκτιμάται από μετρήσεις που προκύπτουν από εγκατεστημένο εξατμισήμετρο σε μετεωρολογικό σταθμό. Η ακρίβεια των εκτιμήσεων του εμπλουτισμού του ταμιευτήρα εξαρτάται από την ακρίβεια της εκτίμησης ή των μετρήσεων του εξατμισήμετρου. Οι μετρήσεις της εξάτμισης μπορούν να έχουν μεγάλα σφάλματα και αυτή η απόκλιση πρέπει να προσδιοριστεί συγκρινόμενη με το ρυθμό πτώσης της στάθμης του νερού.

### 2. Παρακολούθηση της στάθμης του υπόγειου νερού

Παρακολουθώντας τη στάθμη του υπόγειου νερού σε γεωτρήσεις παρακείμενες (ή υποκείμενες) του ταμιευτήρα, μπορεί να εκτιμηθεί το μέγεθος και η μορφή του υβώματος που προκύπτει από τον εμπλουτισμό. Αν η ειδική απόδοση του υδροφόρου μετρηθεί ή εκτιμηθεί τότε ο όγκος του εμπλουτισμού μπορεί να υπολογιστεί. Αυτή η μέθοδος χωλαίνει στην απαιτούμενη επεξεργασία των εκτιμήσεων που προέρχονται από περιορισμένα δεδομένα και στο γεγονός ότι το ύβωμα είναι δυναμικό και μπορεί να αυξάνει ή να μειώνεται με διάφορους ρυθμούς που εξαρτώνται από το υδραυλικό φορτίο του, ανάλογα με τη στάθμη της ευρύτερης επιφάνειας του υπόγειου νερού.

### 3. Ισοζύγιο μάζας χλωρίου (chloride mass balance)

Η μέθοδος του ισοζυγίου μάζας χλωρίου βασίζεται στη θεώρηση ότι δεν υπάρχουν πηγές ή εστίες χλωρίου στον ταμιευτήρα εκτός από φυσικές εισροές από τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα και την απορροή και ότι δεν υπάρχουν απώλειες νερού από τη δεξαμενή παρά μόνο μέσω των διαδικασιών της εξάτμισης και του εμπλουτισμού. Η ολική συγκέντρωση χλωρίου στο νερό του ταμιευτήρα σε οποιοδήποτε χρόνο, εκτιμάται από τον όγκο του νερού στον ταμιευτήρα και τη συγκέντρωση του σε χλώριο, η οποία μετριέται τακτικά (Sukhija et al., 1917). Δεν υπάρχει απώλεια χλωρίου μέσω εξατμισοδιαπνοής και έτσι η συγκέντρωση αυξάνει καθώς προχωρά η εξάτμιση. Έτσι μετρώντας τον όγκο του νερού και τη συγκέντρωση

χλωρίου στη διάρκεια του χρόνου και εκτιμώντας την εξάτμιση από τον ταμιευτήρα, μπορεί να υπολογιστεί το ποσοστό του εμπλουτισμού.

#### 4. Τεχνική διείσδυσης άλατος (*salt penetration technique*)

Η μέθοδος αναπτύχθηκε από τους Bouwer and Rice, 1968 και χρησιμοποιεί άλας ως ιχνηθέτης που απλώνεται στον πυθμένα του ταμιευτήρα σε μορφή κρυστάλλων. Κατόπιν καταγράφεται με αγωγιμόμετρο θέση του υφάλμυρου μετώπου χρονικά και χωρικά και έτσι μπορεί να υπολογιστεί ο ρυθμός αλμύρισης. Είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν και άλλοι ιχνηθέτες όπως τα ραδιοϊσότοπα (Lerner et al., 1990).

#### 5. Μέθοδος σταθερών ισοτόπων (*stable isotope method*)

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί τον εμπλουτισμό του δευτέρου και του οξυγόνου  $^{18}\text{O}$  στο νερό του ταμιευτήρα που συμβαίνει λόγω της εξάτμισης. Αυτό το εμπλουτισμένο νερό μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ιχνηθέτης απεικονίζοντας την περιοχή που επηρεάζεται από το σύστημα T.E. Αυτή η μέθοδος είναι σχετικά περίπλοκη και ακριβή.

#### 6. Διηθήμετρα (*infiltrimeters*)

Δυο ομόκεντροι χαλύβδινοι δακτύλιοι οδηγούνται στη μέση του εδαφικού υλικού του άδειου ταμιευτήρα. Κατόπιν, νερό γνωστού όγκου διοχετεύεται στο προεξέχον μέρος των δακτυλίων και καταγράφεται ο ρυθμός πτώσης της στάθμης του νερού. Η επεξεργασία των δεδομένων που προκύπτουν από τα διηθήμετρα απαιτεί σωστή κρίση και δεν είναι παντελώς αξιόπιστη.

#### 7. Μετρητές Διαρροής (*seepage meters*)

Οι μετρητές διαρροής έχουν αναπτυχθεί έτσι ώστε να μετρούν τις απώλειες του ταμιευτήρα απευθείας. Αποτελούνται από ένα κυλινδρικό χαλύβδινο δοχείο, κλειστό στην οροφή και ανοιχτό στη βάση, το οποίο πιέζεται ώστε να εισχωρήσει 2-3 cm στον πυθμένα του πληρωμένου ταμιευτήρα. Ο ρυθμός διήθησης μετρείται με την τεχνική του σταθερού ή του μεταβαλλόμενου φορτίου. Στην πρώτη τεχνική το δοχείο έχει συνδεθεί με πλαστικό σωλήνα σε πλαστικό δοχείο γνωστού όγκου, που επιπλέει ακριβώς κάτω από την επιφάνεια. Ο ρυθμός διαρροής μπορεί να προσδιοριστεί από την μεταβολή του όγκου στο πλαστικό δοχείο συναρτήσει του χρόνου. Η τεχνική του μεταβαλλόμενου φορτίου περιλαμβάνει ένα κιβώτιο που τροφοδοτεί με νερό το δοχείο. Η στάθμη του νερού στο κιβώτιο είναι στο ύψος  $\Delta$  πάνω από τη στάθμη του νερού της δεξαμενής. Ο ρυθμός της κατείσδυσης στο δοχείο μπορεί να μετρηθεί από τη μείωση του  $\Delta$  με το χρόνο. Οι μεταβολές της στάθμης νερού, στο κιβώτιο και στον ταμιευτήρα, σημειώνονται και σχεδιάζονται συναρτήσει του χρόνου. Η σύγκριση ανάμεσα στις δυο καμπύλες σε κοινό διάγραμμα που προκύπτουν θα αποδώσουν το ρυθμό διαρροής για τον ταμιευτήρα στο σημείο τομής των δύο καμπυλών. Οι μετρητές διαρροής εγκαθίστανται γρήγορα και εύκολα, αλλά η διαταραχή του εδάφους που θα προκαλέσει η εγκατάσταση του μετρητή προκαλεί μεγαλύτερο ρυθμό διαρροής από τον πραγματικό.

#### 8. Εμπειρικοί τύποι

Υπάρχουν πολλοί εμπειρικοί τύποι που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να υπολογίσουν την απώλεια διαρροής από ταμιευτήρες, όμως είναι κυρίως ειδικές για κάθε θέση, αφού βασίζονται σε παρατηρήσεις σε συγκεκριμένη περιοχή. Έτσι, ίσως να μην είναι χρήσιμες για ταμιευτήρες σε άλλες περιοχές με διαφορετικές εδαφικές συνθήκες (Lerner et al., 1990). Μια σύνοψη των εμπειρικών τύπων που χρησιμοποιήθηκαν σε διαφορετικά μέρη ανά τον κόσμο για τον υπολογισμό της διαρροής από τους ταμιευτήρες δίνεται από τον Kraatz, 1971.

#### 9. Μοντέλα

Η διαρροή από ταμιευτήρα μέσα σε υδροφόρο μπορεί να προσομοιωθεί με αριθμητικά μοντέλα. Πρέπει να χρησιμοποιηθούν διαφορετικές τεχνικές προσομοίωσης σύμφωνα με την επικρατούσα εδαφική κατάσταση π.χ. η στάθμη του υπόγειου νερού βρίσκεται σε αρκετά μεγάλο βάθος κάτω από τον ταμιευτήρα και η ροή μέσω της ακόρεστης ζώνης πρέπει να ληφθεί υπόψη ή ο ταμιευτήρας συνδέεται υδραυλικά με τη στάθμη του υπόγειου νερού οπότε και επικρατούν συνθήκες κορεσμένης ροής. Κάποιοι εύκολα διαθέσιμοι υπολογιστικοί κώδικες υπολογιστή όπως το 3D πεπερασμένων διαφορών μοντέλο για υπόγειο νερό, MODFLOW (McDonald και Harbaugh, 1988) περιλαμβάνουν υπορουτίνες για να προσομοιώσουν τη διαρροή ανάμεσα σε ταμιευτήρα και στο υποκείμενο σύστημα υπόγειου νερού (Pfenske et al., 1996).

Τα αριθμητικά μοντέλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να προβλεφτεί ο ρυθμός διήθησης σε σχέση με το βάθος του νερού στον ταμιευτήρα, τη διαφορά ανάμεσα στη στάθμη του νερού στον ταμιευτήρα και στον υδροφόρο ή τις διάφορες αγωγιμότητες στον πυθμένα του ταμιευτήρα. Παρόλα αυτά, απαιτούνται ακριβείς γνώσεις των επιφανειακών συνθηκών και των υδραυλικών παραμέτρων καθώς και των παραμέτρων του υδρολογικού ισοζυγίου του ταμιευτήρα ώστε να εξαχθούν αξιόπιστα αποτελέσματα.

### Επιλογή μεθόδου

Τα καλύτερα αποτελέσματα προκύπτουν από τη συνδυαστική χρήση μεθόδων που προσεγγίζουν το πρόβλημα από διαφορετικές πλευρές δίνοντας αποτελέσματα που μπορούν να συγκριθούν αναλυτικά. Αν απαιτούνται εκτιμήσεις της αποτελεσματικότητας πολλών ταμιευτήρων, τότε η καλύτερη προσέγγιση είναι η ανάληψη μεγάλου αριθμού σχετικά φθηνών και απλών μετρήσεων που μπορούν να συσχετισθούν με λεπτομερείς μελέτες μιας ή δύο θέσεων.

Η επιλογή της πιο κατάλληλης μεθόδου, από αυτές που περιγράφηκαν παραπάνω, εξαρτάται από τις συγκεκριμένες θέσεις, τους πόρους και τις δεξιότητες που διατίθενται. Η χρήση οργάνων ποικίλλει σε πολυπλοκότητα από ένα απλό μετρητή στο ποτάμι ή στον ταμιευτήρα μέχρι μια ψηφιακή συσκευή καταγραφής που στέλνει τα δεδομένα που καταγράφει στο γραφείο του αναλυτή μέσω τηλεμετρίας. Οποιοσδήποτε μπορεί να διαβάσει τα δεδομένα χωρίς προηγούμενη υδρολογική εμπειρία αλλά η εγκατάσταση των μετρητών και η ερμηνεία των αποτελεσμάτων πρέπει να γίνει από επαγγελματία επιβλέποντα. Η εγκατάσταση περισσότερο πολύπλοκης τεχνολογίας που θα καταγράφει τις στάθμες του νερού και τις μετεωρολογικές παραμέτρους απαιτεί περισσότερο εξειδικευμένη γνώση. Οι πυκνοκατοικημένες όπως και οι απόμακρες περιοχές προκαλούν σοβαρά προβλήματα στην καταγραφή των δεδομένων συμπεριλαμβανομένων της πρόσβασης, της βλάβη οργάνων, της ασφάλειας των μετρήσεων ή της καταστροφής της εγκατάστασης από φυσικά αίτια. Η καλύτερη λύση για μεμονωμένες περιπτώσεις εξαρτάται από το σχετικό κόστος του εξοπλισμού και του προσωπικού, το διαθέσιμο προσωπικό με το απαιτούμενο επίπεδο εκπαίδευσης, τη διαθεσιμότητα του εξοπλισμού και τη συντήρηση του κ.α. Η παραγωγή μεθοδολογίας που μπορεί να εφαρμοσθεί ευρέως ως χρήσιμο κριτήριο για την αποτελεσματικότητα του Τ.Ε. πρέπει να είναι φθηνή, απλή και εμφανώς πολύτιμη στους χρήστες.

## **9.2. Κοινωνικοοικονομικοί παράγοντες που επηρεάζουν την αποτελεσματικότητα του τεχνητού εμπλουτισμού**

### **Κίνητρα για διαχειριστικές ενέργειες**

Κάθε αποτίμηση του Τ.Ε. πρέπει να αναγνωρίζει τις σημαντικές δοκιμές αλλαγές που συμβαίνουν στην κοινωνία και τα κίνητρα που αυτές δημιουργούν για διαχείριση κάθε είδους. Κάποια από τα αρχικά σημεία-κλειδιά που γενικά λαμβάνουμε υπόψη στον Τ.Ε. σε ξηρές περιοχές, μέσω των πρωτοβουλιών που βασίζονται στην κοινότητα περιλαμβάνουν:

- Σταθερή κοινωνία: μια αρχική υπόθεση στις περισσότερες απόπειρες που γίνονται στην έναρξη της διαχείρισης είναι ότι οι κοινότητες είναι σταθερές και έχουν ισχυρά κίνητρα για τη διαχείριση των υδατικών πόρων γιατί αποτελούν τη βάση για την τρέχουσα ποιότητα ζωής και τα οικονομικά συστήματα. Αυτή η υπόθεση μπορεί να επισκιαστεί από ποικίλους υπέρθετες θεωρήσεις που περιλαμβάνουν:
  - Δημογραφική μεταβολή
  - Οικονομική διαφοροποίηση
  - Οικονομική διακύμανση / παγκοσμιοποίηση
- Έμπρακτα οφέλη που προκύπτουν σε αυτούς που επενδύουν στον Τ.Ε.: Πολλά από τα οφέλη του Τ.Ε. είναι μακροπρόθεσμα και προκύπτουν σε όλους αυτούς που εκμεταλλεύονται έναν υδροφόρο σε αντίθεση με τις μικρότερες ομάδες που συνεισφέρουν απευθείας σε ένα σύστημα Τ.Ε. Αυτή είναι η περίπτωση, για παράδειγμα, όπου υψηλές στάθμες νερού μειώνουν το κόστος άντλησης σε τοπικό επίπεδο αλλά ουσιαστικά δεν διαφοροποιούν την οικονομική κατάσταση των αγροτών. Επιπλέον, πολλά οφέλη όπως η αύξηση της βασικής ροής κατάντη του φυσικού περιβάλλοντος της άγριας φύσης κ.α. ίσως να είναι ακατάλληλα ή χωρίς ιδιαίτερη αξία για τον υδροφόρο. Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι η περίπτωση των αποδημητικών πουλιών όπου η παγκόσμια περιβαλλοντική κοινότητα παρουσιάζει έντονο ενδιαφέρον για το θέμα αλλά δεν κάνουν το ίδιο και οι τοπικές κοινότητες.
- Ασυμφωνία κλιμάκων: Η κοινότητα αναμφίβολα θεωρείται το διαχειριστικό κέντρο αλλά τα οφέλη του Τ.Ε. συνήθως προκύπτουν σε κλίμακα υδροφόρου ή περιοχής. Μικρότερες ομάδες, επίσης, μπορούν να διαμορφωθούν στην κοινότητα ενός χωριού για να φτιάξουν κατασκευές που θα εμπλουτίσουν τον υδροφόρο. Οι κλίμακες ταιριάζουν καλά σε περιβάλλοντα χαμηλής διαπερατότητας, όπου ο εμπλουτισμός επηρεάζει άμεσα τη στάθμη του υπόγειου νερού ή τη διαθεσιμότητα του νερού στις τοπικές γεωτρήσεις. Η πιθανότητα ασυμφωνίας κλιμάκων συνήθως αυξάνει σε υδροφόρους με μεγάλη μεταβιβατικότητα όπου οι ρυθμοί πλευρικής ροής αποδυναμώνουν την επίδραση του εμπλουτισμού.

Οι παραπάνω συλλογισμοί δεν εμπλέκονται σε όλες τις περιπτώσεις όπου ο Τ.Ε. αντιπροσωπεύει μια ουσιαστική λύση στην υπερεκμετάλλευση του υπόγειου νερού σε αγροτικές περιοχές. Εν τούτοις, πρέπει να εκτιμούνται σε τέτοιες περιοχές, γιατί τα κίνητρα που δημιουργούν επηρεάζουν αρκετά τη βιωσιμότητα των διαφορετικών θεσμικών προσεγγίσεων του Τ.Ε. Εκεί όπου οι αγροτικές κοινωνίες είναι σχετικά σταθερές και η κύρια απασχόληση είναι η γεωργία, υπάρχουν έντονα κίνητρα για συνεισφορά σε δραστηριότητες σχετικές με τον Τ.Ε. Σε περιοχές όπου ο πληθυσμός είναι σε στάδιο μετάβασης σε περισσότερο αστικό τρόπο ζωής, ίσως απαιτούνται διαφορετικές θεσμικές ρυθμίσεις. Οι αστικές περιοχές συχνά έχουν σταθερές διοικητικές δομές (όπως είναι οι δημοτικές αρχές). Αυτές παρέχουν πολύ διαφορετική βάση διαχείρισης σε σχέση με τη δομή που βασίζεται στην κοινότητα που συναντάται σε αγροτικές περιοχές. Σε αντίθεση με τους μεμονωμένους αγρότες, για παράδειγμα, οι θεσμικοί χρήστες (εταιρίες και δημοτικές αρχές) είναι συχνά κυρίαρχοι παράγοντες. Επίσης, οι στόχοι της διαχείρισης είναι συχνά διαφορετικοί, εκτός από



την παροχή νερού μπορεί να συμπεριλαμβάνουν τη βελτίωση και τον έλεγχο της ποιότητας του νερού, την αντιμετώπιση καθιζήσεων κ.α.

Οι θεσμικές και κοινοτικές διαστάσεις του Τ.Ε. σε αστικές και μεταβατικές περιοχές είναι, εν τούτοις, ένα σημαντικό πεδίο για περαιτέρω έρευνα. Το σημαντικό σημείο που πρέπει να επισημανθεί είναι το πόσο διαφορετικές είναι. Επίσης, είναι βασικό να αναγνωριστεί η αναγκαιότητα για έρευνα σε μεταβατικές περιοχές. Σε τέτοιες αστικές περιοχές οι ανάγκες και οι χρήσεις αλλάζουν, τα κίνητρα για διαχείριση είναι ρευστά και η θεσμική υποδομή για τη διαχείριση δεν έχει αναπτυχθεί. Η ζώνη επιρροής της αστικής περιοχής συχνά εκτείνεται σε εκατοντάδες χιλιόμετρα και στην ευρύτερη περιοχή που θεωρείται αγροτική. Αυτή η επιρροή μπορεί να είναι άμεση (αναφορικά με τη μεταβίβαση του νερού) ή έμμεση αναφορικά με τα οικονομικά κίνητρα και τις ευκαιρίες εργασίας που παρουσιάζονται. Οι μεταβατικές περιοχές είναι πιθανό μερικές από τις πιο σημαντικές και τις λιγότερο γνωστές, από την άποψη της διαχείρισης του νερού, στις οποίες ο Τ.Ε. μπορεί να παίξει σημαντικό ρόλο.

### **Θεσμικές διευθετήσεις**

Αρκετές προσεγγίσεις έχουν αναπτυχθεί για την υλοποίηση δραστηριοτήτων σχετικών με τη διαχείριση των φυσικών πόρων όπως είναι ο Τ.Ε., όπου οι υπευθυνότητες (σε διαβαθμούμενο επίπεδο) έχουν δοθεί στην πολιτεία, στην τοπική αυτοδιοίκηση, υπηρεσίες αναπτυξιακές και ιδιώτες. Ένα καθοριστικό θεσμικό θέμα που προέκυψε τις τελευταίες δύο δεκαετίες στη διαχείριση φυσικών πόρων είναι η αποκέντρωση σε συνδυασμό με τις προσπάθειες που γίνονται για την προώθηση διαδικασίας σχεδιασμού συμμετοχική προερχόμενη από τα κάτω (Carney and Farrington, 1998). Καθώς οι οικονομικά αδύνατοι είναι δυσανάλογα εξαρτημένοι από κοινούς μικρούς πόρους, βελτιώσεις στην αποκεντρωμένη διαχείριση είτε με τη μορφή δίκαιων δικαιωμάτων και ευθυνών στην παραγωγικότητα των πόρων είτε στη βιωσιμότητά τους – μπορούν να συνεισφέρουν ουσιαστικά στην ποιότητα ζωής τους. Τρεις διακριτές προσεγγίσεις έχουν ποικίλη νομιμότητα και πιθανή δυνατότητα να συνεισφέρουν σε τέτοιες βελτιώσεις (Farrington et al., 1999):

- Ανεπίσημες, συνήθεις ομάδες παραδοσιακών χρηστών, που γενικά απολαμβάνουν εκ των πραγμάτων δικαιώματα πρόσβασης μόνο. Σε μερικές χώρες έχουν γίνει βήματα για να κωδικοποιηθούν εθιμικά δικαιώματα πρόσβασης από τοπικές κοινότητες ή ιδιώτες. Από την οπτική της δυσκολίας εφαρμογής επίσημων κανονισμών και την οικονομική προσέγγιση της διαχείρισης των φυσικών πόρων, οι προσπάθειες που έγιναν για την προώθηση ή την επανεγκαθίδρυση συστημάτων κοινής διαχείρισης έχουν προσλάβει αξιοσημείωτη προσοχή.
- Δημόσια διοίκηση, σε συνεργασία με τοπικές κοινότητες. Σε πολλές χώρες έχουν γίνει κινήσεις προς την κατεύθυνση σύμπραξης με τη μορφή συνεταιρισμού με κοινότητες ή ομάδες χρηστών για τη διαχείριση κάποιων φυσικών πόρων.
- Τοπική αυτοδιοίκηση, που λειτουργεί ανεξάρτητα από την κεντρική κυβέρνηση, αλλά σε συνεργασία με αυτή. Σε πολλές χώρες της Αφρικής οι τοπικές αυτοδιοικήσεις λαμβάνουν υπευθυνότητες στην παροχή νερού και στο πρόβλημα της εξασφάλισης υγιεινής, όχι ως χορηγός αλλά ως μεσάζων σε μια βασισμένη στη ζήτηση διαδικασία.

Γιατί δίνεται έμφαση στην αποκέντρωση; Σε πολλές χώρες, οι κρατικές προσεγγίσεις σε ζητήματα διαχείρισης φυσικών πόρων έχουν μονολιθικά κατηγορηθεί για υποβάθμιση των φυσικών πόρων. Ως αποτέλεσμα, η πολιτεία είναι προτιμότερο να υιοθετεί ένα ρόλο διευκόλυνσης παρά έναν ηγετικό ρόλο. Όπως η παραπάνω ταξινόμηση της (αποκεντρωτικής προσέγγισης) αφήνει να εννοηθεί, η πολιτεία κατόπιν γίνεται μέρος μιας ακόμα μεγαλύτερης ετερογενούς διαδικασίας ανάπτυξης στην οποία εμπλέκεται ένας συνασπισμός διαφορετικών δρώντων και ιδρυμάτων,

Η αποκέντρωση και η συμμετοχική διαχείριση συνδέονται καθαρά μεταξύ τους. Η συμμετοχική διαχείριση μπορεί να οριστεί ως η διαδικασία όπου αυτοί με νόμιμο ενδιαφέρον

στο έργο και επηρεάζουν τις αποφάσεις που τους αφορούν και απολαμβάνουν το μερίδιο του οφέλους που προκύπτει (ODA, 1995). Είναι γενικά αποδεκτό ότι για την ενδυνάμωση και τη διατήρηση της παραγωγικότητας των φυσικών πόρων πρέπει αυτοί που εμπλέκονται και επηρεάζονται από τη διαχείριση των πόρων να συμμετέχουν στο σχεδιασμό της αποκατάστασης και της διαχείρισης. Όπως οι Farrington et al. (1999) σημειώνουν, αυτό υπονοεί νέους τρόπους δράσης διευθέτησης οικονομικών πόρων, διαχείριση έργων, λήψη αποφάσεων κ.α - για τις κοινότητες, τους ιδιώτες, τις κυβερνητικές και αναπτυξιακές υπηρεσίες που εμπλέκονται στη δημιουργία των νέων συνασπισμών (συνεταιρισμών). Επίσης, υπονοεί αλλαγές στο αναγνωρισμένο δικαίωμα της δύναμης της λήψης αποφάσεων και στην πρόσβαση στους πόρους. Παρά τη θετική πλευρά του ζητήματος, η συμμετοχή δεν είναι μια ουδέτερη ιδέα: κεκτημένα ενδιαφέροντα και σχέσεις δύναμης διακυβεύονται, ενώ οι νέοι τρόποι δράσης συχνά αμφισβητούνται.

### **Προσέγγιση της εκτίμησης των επιπτώσεων από δραστηριότητες σχετικές με τον τεχνητό εμπλουτισμό**

Σε αυτή την ενότητα περιγράφεται σε γενικές γραμμές μια προσέγγιση της εκτίμησης των επιπτώσεων των δραστηριοτήτων του Τ.Ε. Η βασική πρόκληση είναι να ανιχνευθούν ανάμεσα στις επιπτώσεις του Τ.Ε. σε τοπικά υδρογεωλογικά συστήματα, οι επιπτώσεις στην παραγωγικότητα των φυσικών πόρων και οι επιπτώσεις στην ποιότητα ζωής των ανθρώπων, αφού οι παραδοσιακές προσεγγίσεις είχαν την τάση να αγνοούν αυτόν τον τελευταίο παράγοντα.

Η επιτυχία των δραστηριοτήτων του Τ.Ε. πρέπει να οριστεί σε σχέση με τα οφέλη στους ανθρώπους – στηρίζοντας και ενισχύοντας την αγροτική ζωή - και σε σχέση με τα οφέλη στο περιβάλλον. Το πρωταρχικό ενδιαφέρον είναι οι άνθρωποι, η ποιότητα ζωής και οι περιβαλλοντικές αξίες παρά οι ίδιοι οι υδατικοί πόροι. Αυτά τα οφέλη προκύπτουν μόνο εκεί όπου οι δραστηριότητες του Τ.Ε. έχουν ως αποτέλεσμα τη μεταβολή στη διαθεσιμότητα και/ή την προσβασιμότητα των υδατινών πόρων. Ως αποτέλεσμα, είναι σημαντικό να εκτιμούμε και τις κλιματικές, υδρογεωλογικές, τοπογραφικές συνθήκες καθώς και τη χρήση γης που θα επηρεάσουν τις επιπτώσεις στην εδαφική υγρασία και τις συνθήκες του υπόγειου νερού, όπως και τα κοινωνικά χαρακτηριστικά (συμπεριλαμβανομένων της φύσης, του επιπέδου και της κατανομής περιουσιακών στοιχείων και των τύπων της στρατηγικής εξοικονόμησης των βιοτικών πόρων) που θα καθορίσουν αυτούς που είναι ικανοί να συμμετέχουν σε δραστηριότητες Τ.Ε. καθώς και τη φύση, το επίπεδο και την κατανομή του κόστους και του οφέλους.

Προκειμένου να εκτιμηθούν οι επιπτώσεις αρκετές προσεγγίσεις είναι πιθανές. Μια προσέγγιση είναι να προσδιοριστούν αρχικά αυτές οι αλλαγές στο καθεστώς των υδατικών πόρων (βάθος της στάθμης του υπόγειου νερού, διαθεσιμότητας αποθέματος στη διάρκεια ξηρασίας, αυξημένη αποθήκευση υγρασίας στο έδαφος κ.α.), που άμεσα προσδιορίζουν τις δραστηριότητες του Τ.Ε. και κατόπιν να διερευνηθούν οι επιπτώσεις στον τρόπο ζωής του ανθρώπου. Μπορούν να γίνουν συγκρίσεις με παρακείμενες περιοχές (π.χ. λεκάνες απορροής) στις οποίες δεν έχει εφαρμοστεί ο Τ.Ε. Μια εναλλακτική ή συμπληρωματική προσέγγιση είναι να δουλέψουμε προς τα πίσω: ρωτάμε τους ντόπιους χρήστες τι οφέλη έχουν από τον Τ.Ε. και μετά α) καταγράφουμε αν πράγματι από τον τεχνητό εμπλουτισμό προκύπτουν τα παρατηρούμενα αποτελέσματα στους υδατικούς πόρους και β) αποτιμούμε και τεκμηριώνουμε τα οφέλη. Οποιαδήποτε και αν είναι η προσέγγιση, είναι σημαντικό να αναγνωριστεί η δυνατότητα πολλαπλών επιπτώσεων άμεσων και διάχυτων. Για παράδειγμα, τα αναχώματα στις καλλιέργειες ίσως αυξήσουν την απόδοση της συγκομιδής στο χωράφι ενός αγρότη, αλλά ίσως να αυξήσουν επίσης την ποιότητα της βοσκής στις παρακείμενες εκτάσεις, με θετικές επιπτώσεις στην παραγωγή γάλακτος, τη διαθεσιμότητα καυσόξυλων και τη σταθερότητα του εδάφους. Οι συνδυασμένες επιπτώσεις του Τ.Ε. ίσως, εναλλακτικά, επηρεάσουν στρατηγικές τρόπου ζωής σε ευρύτερες εκτάσεις και τα σχέδια μετανάστευσης. Επίσης, είναι σημαντικό να σημειωθεί η πιθανότητα για αρνητικές επιπτώσεις: (α) οι δραστηριότητες του Τ.Ε. μπορούν να διευρύνουν τις υπάρχουσες ανισότητες αν οι λίγοι

πλουσιότεροι ιδιοκτήτες γης καρπώνονται τα οφέλη, (β) οι άνθρωποι που ζουν κατάντη του ποταμού μπορεί να επηρεαστούν αρνητικά εάν τα ανάντη ποτάμια και ρεύματα έχουν φραχθεί, (γ) η παρουσία στάσιμου νερού από τις κατασκευές Τ.Ε. μπορεί να αυξήσουν τον κίνδυνο ελονοσίας σε μερικές περιοχές.

Αυτά που αναφέρθηκαν παραπάνω εισάγουν την ανάγκη για ολιστική σκέψη σχετικά με την «αποτελεσματικότητα» (effectiveness) του Τ.Ε. Η εφαρμογή μιας προσέγγισης των βιοτικών πόρων μπορεί να βοηθήσει, συσχετίζοντας δραστηριότητες του Τ.Ε. με το εισόδημα των πολιτών, συμπεριλαμβανομένου (αλλά όχι περιορισμένο μόνο σε αυτό) μιας ανάλυσης των επιδράσεων στους πόρους. Αυτό σημαίνει να επικεντρωθούμε στους ανθρώπους, τις προτεραιότητες τους και τις απόψεις τους για τις αλλαγές. Αυτό υπονοεί την ανάγκη για τοπική συμμετοχή σε κάθε αποτίμηση του Τ.Ε., συμπεριλαμβανομένου του ορισμού, της καταγραφής και της αποτίμησης των επιπτώσεων. Η κοινότητα ίσως διακρίνει κάποιες επιπτώσεις, για παράδειγμα, που δεν είχαν προβλεφτεί ούτε θεωρούνται αναμενόμενες (π.χ. επιπτώσεις στην άγρια φύση, στο κόστος γης, στον αριθμό των παιδιών που πηγαίνουν στο σχολείο). Αυτή η ανοιχτή σε διευθετήσεις εξέταση ίσως να μην βοηθήσει απαραίτητα να οριστεί ο καλύτερος τύπος συστήματος Τ.Ε., ή οι γενικοί δείκτες επιτυχίας, αφού οι τοπικά καθορισμένες ανησυχίες, προτεραιότητες και δείκτες επιτυχίας μπορεί να ποικίλλουν από μέρος σε μέρος.

Η υιοθέτηση μιας προσέγγισης των βιοτικών πόρων ίσως επίσης να είναι χρήσιμη στην ενημέρωση του ευρύτερου πλαισίου στο οποίο τα συστήματα Τ.Ε. σχεδιάζονται και υλοποιούνται, π.χ. καθορίζοντας ή αποσαφηνίζοντας δραστηριότητες και σκοπούς και επανεξετάζοντας και αναθεωρώντας προτεραιότητες των σχετικών υπηρεσιών. Επίσης, κοιτώντας πίσω και διερευνώντας πως το σύστημα επηρεάζει τους βιοτικούς πόρους και κατά πόσο εκπληρώνει τοπικές, αναγνωρισμένες ανάγκες, υπάρχει μια πιθανότητα σκέψης σχετικά με το πόσα θετικά αποτελέσματα θα προκύψουν.

Ένας καλός τρόπος για να ξεκινήσουμε να σκεφτόμαστε τις επιπτώσεις στα νοικοκυριά είναι με απλές λίστες. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, είναι σημαντικό να είμαστε ανοιχτοί σχετικά με το ποιες θα είναι οι επιπτώσεις, αποφεύγοντας τον πειρασμό να κάνουμε πρόωρες κρίσεις για το τι είναι σπουδαίο και κατ' επέκταση τι πρέπει να ερευνηθεί.

Η λίστα παρακάτω κατηγοριοποιεί πιθανές επιπτώσεις σε τέσσερις αλληλοεπικαλυπτόμενες ομάδες: (1) απόδοση και εισόδημα (2) τρωτότητα (3) προστασία νερού και φαγητού και (4) κοινωνικές μεταβολές. Η λίστα δεν είναι η τελική αναφορικά με τις επιπτώσεις των δραστηριοτήτων Τ.Ε. σε διαφορετικές φυσικές και κοινωνικοοικονομικές συνθήκες. Αντιθέτως, η πρόθεση είναι να προκληθούν συζητήσεις μεταξύ των εμπλεκόμενων σε δραστηριότητες Τ.Ε., που μπορεί να αποτελέσει βάση για την ανάπτυξη δεικτών και το σχεδιασμό ερευνών πεδίου στις περιοχές της κάθε κατά περίπτωση εφαρμογής.

### 1. Απόδοση και εισόδημα

Διερεύνηση του εάν και πώς οι αλλαγές στη διαθεσιμότητα και την πρόσβαση των υδατικών πόρων έχουν επιπτώσεις στην απόδοση των ανθρώπων και στο εισόδημα τους, και πως αυτές οι επιπτώσεις κατανέμονται ανάμεσα σε διαφορετικές κοινωνικές ομάδες και σε περιοχές (ανάντη-κατάντη):

- Απόδοση: επίπεδα, τύποι, αλλαγές, κατανομή ανάμεσα σε διαφορετικές ομάδες και περιοχές
- Πηγές και επίπεδα εισοδημάτων: διατήρηση υπαρχόντων πηγών και /ή παραγωγή νέου εισοδήματος
- Ποικιλία/αξιοπιστία εισοδήματος: μικρές, μεσαίες και μακροπρόθεσμες αλλαγές στη συντήρηση του εισοδήματος, σύνδεσμοι με Τ.Ε. έναντι επιρροών από εξωτερικές περιβαλλοντικές αλλαγών.
- Μακροπρόθεσμη επένδυση σε πόρους: πόσο μακριά κοιτούν οι πολίτες; σε τι είδους πόρους επενδύουν οι άνθρωποι (π.χ. γη, τεχνολογία, υποδομές, εκπαίδευση, υγεία).

## 2. Τρωτότητα

Διερεύνηση του εάν και πώς οι αλλαγές στη διαθεσιμότητα και την πρόσβαση των υδατικών πόρων έχουν επηρεάσει την ικανότητα των ανθρώπων να αντιμετωπίζουν τον κίνδυνο – και το φυσικό (ξηρασία, πλημμύρες) και οικονομικό (π.χ. διακύμανση των τιμών των καλλιεργειών)-και σε ποια έκταση οι διαφορετικές ομάδες έχουν ωφεληθεί ή όχι σε σχέση με την έκθεσή τους.

- Τρωτότητα στην ξηρασία: π.χ. επιπτώσεις στις αναγκαίες καταναλώσεις νερού ανάμεσα σε καλές και κακές χρονιές (π.χ. οι γεωτρήσεις παραμένουν γεμάτες ακόμα και σε χρονιές ξηρασίας;)
- Εποχικότητα: επιπτώσεις στις αναγκαίες καταναλώσεις νερού στη διάρκεια των εποχών (π.χ. οι γεωτρήσεις παραμένουν γεμάτες ακόμα και σε ξηρή εποχή;)
- Πλημμύρες: έντονες ή όχι; ποιόν επηρεάζουν; ποιος έχει ωφεληθεί ποια είναι η φύση των ζημιών λόγω πλημμύρας;
- Στρατηγικές αντιμετώπισης: ποιες ήταν/είναι (π.χ. διαφοροποίηση εισοδήματος); Αποδείξεις αλλαγών (π.χ. λιγότερες πωλήσεις παραγωγικών πόρων σε κακές χρονιές )
- Ορίζοντες σχεδιασμού/επένδυσης
- Διαφοροποίηση των εισοδημάτων

## 3. Ασφάλεια νερού και τροφής

Διερεύνηση του εάν και πώς οι αλλαγές στη διαθεσιμότητα και την πρόσβαση των υδατικών πόρων έχουν επηρεάσει τα τρόφιμα και την ασφάλεια του νερού καθώς και τη σύνδεση μεταξύ τους (ισχυρές συνδέσεις με την τρωτότητα ανωτέρω)

- Επίπεδα κατανάλωσης και πόροι: διαιτητικές αλλαγές
- Σχέδια κατανάλωσης-κυκλική έναντι των πιο μακροπρόθεσμων αλλαγών. Σταθερότητα;
- Ισοζύγιο μεταξύ παραγωγής τροφίμων για ίδια κατανάλωση και του εισοδήματος μετρητών για αγορά τροφίμων
- Επίπεδο καταστημάτων τροφίμων πέρα από το έτος
- Σύνδεση της ασφάλειας μεταξύ τροφίμων και νερού π.χ. μέσω του μειωμένου χρόνου να συλλεχθεί το νερό, διαθεσιμότητα νερού, χρήσεις όπως η παραγωγή ζωικού κεφαλαίου, μικρές αγροτικές βιομηχανίες.
- Ποιότητα των υδατικών πόρων που χρησιμοποιούνται.

## 4. Κοινωνικές αλλαγές

Διερεύνηση του εάν και πώς οι αλλαγές στη διαθεσιμότητα και την πρόσβαση των υδατικών πόρων έχουν επηρεάσει την κοινωνική συμπεριφορά και τη λήψη αποφάσεων:

- Αλλαγές στη δυνατότητα/προθυμία για συμμετοχή στη λήψη αποφάσεων που σχετίζονται με τον Τ.Ε. και στα ευρύτερα φόρουμ (πολιτική δραστηριότητα γενικά).
- Αλλαγές στη δυνατότητα/δύναμη των ανθρώπων να διατυπώσουν αιτήματα στο χώρο της ευρύτερης πολιτικής π.χ. διαπραγμάτευση με το τι επιτρέπουν οι αρχές.
- Κοινωνική κατάσταση των διαφόρων ομάδων (αυτό το ζήτημα πρέπει να είναι πρωταρχικής προτεραιότητας).
- Απόψεις στη διαδικασία, στα κόστη, στα οφέλη και στις επιπτώσεις του Τ.Ε. στις διάφορες κοινωνικές ομάδες, συμμετέχοντες έναντι στους μη συμμετέχοντες, διαμάχες μεταξύ αυτών που ζουν ανάντη και κατόντη κ.α.

- Αίσθηση ελέγχου, συνυπολογισμού και αυτοσεβασμού.
- Προσδοκίες: να διερευνηθούν κατά πόσο οι προσδοκίες εμποδίζονται, πραγματοποιούνται κ.α. εσκεμμένες ή μη επιπτώσεις.
- Εργασία: σχέδια χρήσης στη διάρκεια εποχών και επιπτώσεις των αλλαγών στη διαθεσιμότητα, σχέδια μετανάστευσης (βραχυπρόθεσμα και μακροπρόθεσμα), ικανότητα διαφορετικών νοικοκυριών να ελέγχουν την εργασία πέρα της ίδιας άμεσης συνεισφοράς τους.
- Δικαίωμα πρόσβασης στους πόρους.
- Ενδείξεις της διαμάχης/συνεργασίας.

### **9.3. Οφέλη, περιορισμοί και αβεβαιότητες**

#### **Οφέλη από την εφαρμογή τεχνητού εμπλουτισμού**

Τα οφέλη της αξιοποίησης του υπόγειου νερού στις αναπτυσσόμενες χώρες έχουν φανεί καθαρά (Tsur, 1990, Moench, 2001), αφού οι υδροφόροι παρέχουν απόθεμα υπογείου νερού, το οποίο αν αξιοποιηθεί και διαχειριστεί αποδοτικά, μπορεί να παίξει σημαντικό ρόλο σε:

- Στη μείωση της φτώχειας και στη σταθερότητα των βιοτικών πόρων
- Στη μείωση της οικονομικής και υγειονομικής επικινδυνότητας.
- Στην αύξηση αποδόσεων που απορρέουν από αξιόπιστη άρδευση
- Στις αυξημένες οικονομικές επιστροφές
- Σε δίκαιη κατανομή (υψηλότερες στάθμες νερού σημαίνει αυξημένη πρόσβαση για όλους)
- Στη μειωμένη τρωτότητα (ξηρασία, διακυμάνσεις στα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα)

Η συλλογή του νερού της βροχής και ο Τ.Ε. συνεισφέρουν στη διατήρηση των παραπάνω οφελιών, ειδικά αν αποτελούν μέρος μιας ευρύτερης προσέγγισης στη διαχείριση των υδατικών πόρων.

Γενικά, ο στόχος των εγκαταστάσεων του Τ.Ε. είναι η αύξηση του υπόγειου υδατικού δυναμικού. Αν το σύστημα του Τ.Ε. είναι αποτελεσματικό, θα παρατηρηθεί αύξηση στη στάθμη του υπόγειου νερού ή μείωση στο ρυθμό της πτώσης της. Η βασική ροή προερχόμενη από την αποθήκευση του υπόγειου νερού θα εξασφαλίσει ότι επιφανειακά σώματα νερού ρέουν για μεγαλύτερες περιόδους και σε μερικές τοποθεσίες, εποχιακά ρεύματα ίσως αναπτύξουν σταθερή ροή. Οι γεωτρήσεις πρέπει να είναι ικανές να αναπτύξουν υψηλότερες αποδόσεις και η ενέργεια που καταναλώνεται για την άντληση του νερού θα πρέπει να μειωθεί. Αν τα συστήματα του Τ.Ε. συνεισφέρουν στη διαθεσιμότητα του υπόγειου νερού, μια αυξανόμενη φυτική επικάλυψη μπορεί να είναι ενδεικτική της επιπλέον υγρασίας εδάφους που ίσως να οδηγήσει σε μείωση της εδαφικής διάβρωσης και σε γενικότερη βελτίωση της χλωρίδας και πανίδας, π.χ. αύξηση εισροής αποδημητικών πουλιών, άγρια ζωή κ.α.

Πιο ειδικά οικονομικά οφέλη από τον Τ.Ε. συχνά συνδέονται με τη γεωργία. Τα οφέλη που συνήθως αναφέρονται περιλαμβάνουν τη δυνατότητα αυξήσεων σε ολόκληρη την περιοχή που αρδεύεται εξαιτίας της αυξημένης διαθεσιμότητας σε νερό, ή αύξηση στην απόδοση της συγκομιδής ανά εκτάριο που συνδέεται με βελτιώσεις στην παραγωγικότητα του εδάφους ή στις πολλαπλές συγκομιδές. Το σημείο αφετηρίας για την αποτίμηση τέτοιων οφελών είναι η αναγνώριση ότι αυτά είναι, στις περισσότερες περιπτώσεις, ίσα με τα οφέλη που σχετίζονται με τα υπόγεια νερά γενικά. Ο Τ.Ε. ενισχύει είτε διατηρεί αυτά τα γενικά οφέλη.

Οι περισσότερες αναφορές των οφελών που προκύπτουν από τον Τ.Ε., όπως οι παραπάνω, προκύπτουν από αναλύσεις σε βιομηχανοποιημένες χώρες. Τα οφέλη σε αγροτικά τμήματα λιγότερο βιομηχανοποιημένων περιοχών έτυχαν σχετικά μικρότερης

σημασίας. Ως αποτέλεσμα, η αναφορά παρακάτω υπογραμμίζει τα οφέλη που σχετίζονται με τα υπόγεια νερά γενικά και ειδικά με τον Τ.Ε. κάτω από αυτές τις συνθήκες.

Σε αγροτικές περιοχές, ένα δυνατό επιχείρημα είναι ότι η αύξηση της πρόσβασης σε υπόγειο νερό μπορεί να συνεισφέρει ουσιαστικά στη μείωση της φτώχειας. Όσον αφορά στις αρδεύσεις, το υπόγειο νερό είναι περισσότερο ασφαλές από τους επιφανειακούς πόρους και μπορεί να χρησιμοποιηθεί με υψηλότερο επίπεδο ελέγχου. Ως αποτέλεσμα, η συνολική ποιότητα των υπηρεσιών άρδευσης είναι πιο υψηλή από ότι στην περίπτωση των δεξαμενών ή των συστημάτων με κανάλια (Shah, 1993). Αυτό είναι σημαντικό γιατί επιφέρει τη χρήση επιπρόσθετων εισροών(εργασία, σπόροι, λίπασμα) και μειώνει τον κίνδυνο των απωλειών (Kahnert και Levine, 1989), (Seckler και Amarasinghe, 1999). Επιπλέον, όπως έχει καταγραφεί εδώ και δύο δεκαετίες, ο έλεγχος του νερού μπορεί να γεφυρώσει το κενό ανάμεσα στις δυναμικές και τις πραγματικές αποδόσεις περίπου σε ποσοστό 20% (Herdt και Wickham, 1978). Η σημασία των παραπάνω δεν πρέπει να υποτιμάται, αφού πολλές καλλιέργειες είναι αρκετά ευαίσθητες στην υγρασία σε κρίσιμες στιγμές στην ανάπτυξη των φυτών (Perry και Narayanamurthy, 1998). Οι αποδόσεις μπορεί να μειωθούν κατά 40% εξαιτίας του νερού στο στάδιο άνθησης και παρόμοια αποτελέσματα παρατηρήθηκαν σε κρεμμύδια, ντομάτες και ρύζι (Meinzen-Dick, 1996). Ως αποτέλεσμα, οι αγροτικές αποδόσεις σε περιοχές της Ινδίας που αρδεύονται με υπόγειο νερό είναι γενικά το 1/3 με 1/2 υψηλότερες από ό,τι σε περιοχές που αρδεύονται με νερό από άλλες πηγές (Dhawan, 1995). Πρόσφατες έρευνες στην Ανδαλουσία της Ισπανίας, για παράδειγμα, έδειξαν ότι οι καλλιέργειες που αρδεύονται με υπόγειο νερό είναι οικονομικά πέντε φορές πιο αποδοτικές (σε πεσέτες/m<sup>3</sup>) και επιφέρουν περισσότερο από τρεις φορές απασχόληση συγκριτικά με καλλιέργειες που αρδεύονται από επιφανειακές πηγές (Hernander Mora et al., 2001).

Ενώ η πιθανότητα αύξησης της απόδοσης είναι μια σημαντική διάσταση στην προσπάθεια εξάλειψης της ανέχειας, η μείωση της διακινδύνευσης είναι εξίσου σημαντική. Για τους αγρότες, οι ξηρασίες μπορεί να είναι καταστροφικά γεγονότα που οδηγούν στην απώλεια ή στην υποθήκευση γης. Υπάρχουν αγρότες που συχνά αναγκάζονται να διαθέτουν ουσιαστικά όλη τους την ιδιοκτησία σε τιμές χαμηλότερης της πραγματικής για να πληρώσουν πιστωτές και να επιβιώσουν όταν έρθει η ξηρασία. Αυτό δημιουργεί έναν φαύλο κύκλο ξηρασίας και ανέχειας. Πόροι που συγκεντρώνονται στη διάρκεια καλών ετών εξατμίζονται όταν χαθούν οι συγκομιδές και οι αγρότες μένουν βαλτωμένοι στην ανέχεια. Η άρδευση, ειδικά η άρδευση από αρκετά αξιόπιστες πηγές υπόγειου νερού, συντελούν στη μείωση αυτών των κινδύνων. Ανάλυση που διεξήχθη για έντεκα μεγάλες πολιτείες της Ινδίας για την περίοδο 1971-84 αποκαλύπτει, για παράδειγμα, ότι ο βαθμός της αστάθειας στην αρδευόμενη καλλιέργεια είναι μικρότερος του μισού από αυτόν στις μη αρδευόμενες (Rao et al., 1988). Έρευνες στην έρημο Negev και στη Καλιφόρνια απέδειξαν την ουσιαστικά υψηλότερη αξία του υπόγειου νερού συγκριτικά με τις επιφανειακές πηγές εξαιτίας της αξιοπιστίας του (Tsur, 1990), (Tsur, 1993). Το αποτέλεσμα αυτής της αξιοπιστίας ήταν ότι οι οικονομικές επιπτώσεις της ξηρασίας στη Καλιφόρνια στη διάρκεια της δεκαετίας του '90 ήταν ελάχιστες κυρίως γιατί οι αγρότες είχαν πρόσβαση στο υπόγειο νερό και ήταν σε θέση να απομακρυνθούν από τις λιγότερο αξιόπιστες επιφανειακές πηγές (Gleick και Nash, 1991). Η πρόσβαση στο υπόγειο νερό παρέχει στην ουσία την ασφάλεια ότι άλλες επενδύσεις που εξαρτώνται από το νερό δεν θα χαθούν.

Περίληπτικά, η πρόσβαση στο υπόγειο νερό, από την αγροτική πλευρά, έχει σημαντικά πλεονεκτήματα με έμφαση:

- Στην αύξηση των αποδόσεων,
- Στη μείωση του κινδύνου και στη μειωμένη τρωτότητα στην ξηρασία ή στις διακυμάνσεις των κατακρημνισμάτων,
- Στην αύξηση οικονομικών επιστροφών.
- Στην μείωση της μεταβλητότητας του εισοδήματος.

Η υπεράντληση του υπόγειου νερού και η πτώση της στάθμης του, έχει σημαντικές συνέπειες. Η στάθμη του υπόγειου νερού είναι ο κύριος παράγοντας που επηρεάζει την

πρόσβαση από τους φτωχούς αγρότες στο υπόγειο νερό (Burke και Moench, 2000). Καθώς η στάθμη του υπόγειου νερού πέφτει, οι φτωχοί αγρότες τείνουν να είναι προοδευτικά αποκλεισμένοι από την πρόσβαση. Οικονομικότερες τεχνικές απόληψης υπόγειου νερού δεν λειτουργούν όταν η στάθμη του υπόγειου νερού πέφτει σημαντικά με αποτέλεσμα να μπορούν να διατηρήσουν την πρόσβαση στο υπόγειο νερό μόνο οι εύποροι αγρότες, αυτοί που έχουν τους οικονομικούς πόρους να χρησιμοποιήσουν βαθιές γεωτρήσεις με υποβρύχιες αντλίες και ηλεκτρική σύνδεση. Εκεί όπου δραστηριότητες σχετικές με τον Τ.Ε. αυξάνουν τη στάθμη του υπόγειου νερού επιτρέπουν προοδευτικά και τις λιγότερο εύπορες ομάδες του αγροτικού πληθυσμού να έχει πρόσβαση σε πηγές αξιόπιστου νερού. Ως αποτέλεσμα ο Τ.Ε. είναι αρκετά ευνοϊκός για τις ευπαθείς ή τις περιθωριακές ομάδες ανθρώπων στις αγροτικές περιοχές.

Τα οφέλη στην υγεία από την αξιόπιστη πρόσβαση στο υπόγειο νερό, συμπεριλαμβανομένης και αυτής που επιτυγχάνεται με τον Τ.Ε., ίσως να έχει εξαιρετικά σημαντικά σε αγροτικές περιοχές των αναπτυσσόμενων χωρών. Σε αυτές τις χώρες, οι χειροκίνητες αντλίες και οι ρηχές γεωτρήσεις αντιπροσωπεύουν την πρωταρχική πηγή του πόσιμου νερού. Αυτό το νερό γενικά περιέχει λιγότερους παθογόνους οργανισμούς από ό,τι οι επιφανειακοί πόροι. Όπως και οι ρηχές γεωτρήσεις για την άρδευση, η πτώση της στάθμης του υπόγειου νερού έχει σημαντικό αντίκτυπο στη δυνατότητα του πληθυσμού να έχει πρόσβαση σε πόσιμο νερό μέσω γεωτρήσεων ή χειροκίνητων αντλιών. Ακόμα και οι δραστηριότητες του Τ.Ε. που αυξάνουν τη στάθμη του υπόγειου νερού σε τοπική βάση (π.χ. μέσω της δημιουργίας τοπικού υβώματος) μπορεί να επιβεβαιώσουν ότι τέτοιοι πόροι λειτουργούν σε συνεχή βάση. Σε αυτές τις περιπτώσεις, οι όγκοι που εμπλέκονται μπορεί να μην είναι μεγάλοι ή να αντιπροσωπεύουν μια σημαντική αύξηση στη δικτυακή διαθεσιμότητα του νερού, αλλά, σε τοπικό επίπεδο, μπορεί να είναι πολύ σημαντικοί. Σπουδαία οφέλη επίσης προκύπτουν επειδή η διαδικασία της διήθησης εξ ολοκλήρου φιλτράρει το νερό και απομακρύνει τα αιωρούμενα υλικά, τις μολυσματικές ουσίες, τους παθογόνους οργανισμούς μέσω βιολογικών και φυσικών διαδικασιών.

Η διήθηση μέσω κατασκευών κατάκλισης νερού μπορεί να μειώσει τη διάβρωση και την απομάκρυνση του εδαφικού υλικού των λεκανών απορροής. Εκεί όπου η φυτική επικάλυψη μειώνεται λόγω π.χ. αυξημένης υλοτομίας, συνοδευόμενη από εκτεταμένες περιόδους ξηρασίας, η διάβρωση του εδάφους προκαλεί σημαντική ανησυχία όταν σημειωθούν έντονες βροχοπτώσεις. Η κυριότερη ιδιοκτησία των αγρωτών, η γη τους, εξαφανίζεται σταδιακά και αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη σταδιακή μείωση ή απώλεια των αναγκαίων αγαθών για τη ζωή τους. Η καταστροφική δύναμη των ραγδαίων πλημμυρών μπορεί να αντιμετωπιστεί με τη λήψη κάποιων μέτρων, που περιλαμβάνουν όργωμα κατά μήκος των ισοϋψών και κατασκευή χωμάτινων φραγμάτων και άλλων κατασκευών κατά μήκος των ρευμάτων. Αυτά τα μέτρα επιδιώκουν να μειώσουν τη ροή στις ρεματιές και στα εφήμερα ρεύματα. Σχηματίζονται μικρά προσωρινά αναχώματα που επιτρέπουν την καθίζηση του φορτίου ιζημάτων και σε μερικές περιπτώσεις το σχηματισμό καλού γεωργικού εδάφους που είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί ανάμεσα σε πλημμυρικά γεγονότα. Αυτές οι τεχνικές διατήρησης του εδάφους δεν διατηρούν μόνο το έδαφος, αλλά επίσης καθυστερούν τη ροή του νερού από τη λεκάνη απορροής και έτσι αυξάνουν την πιθανότητα για διήθηση και επομένως εμπλουτισμό του υποκείμενου σώματος υπόγειου νερού. Η κατανόηση του διπλού οφέλους αυτών των πρακτικών επιτρέπει τη θετική διαχείριση του συστήματος με στόχο την επιτυχία του βασικού σκοπού: διατήρηση του εδάφους, Τ.Ε., ή συνδυασμός και των δύο.

Άλλου είδους οφέλη περιλαμβάνουν τη διατήρηση της διαθεσιμότητας του νερού σε τοπικές γεωτρήσεις που μπορούν να μειώσουν αρκετά την απαιτούμενη εργασία, ειδικά των γυναικών που πρέπει να συλλέγουν νερό για οικιακές χρήσεις. Αυτό μπορεί να έχει επιπτώσεις σε όλα, από το διαθέσιμο χρόνο για άλλες παραγωγικές δραστηριότητες μέχρι το γενικό επίπεδο καθαριότητας και ολόκληρο το σύστημα υγείας των κοινοτήτων. Υπάρχει, για παράδειγμα, η αναμενόμενη κοινή ομολογία ότι το ποσό νερού που είναι διαθέσιμο για προσωπική και οικιακή υγιεινή είναι τόσο σημαντικό για την υγεία μιας κοινότητας όσο και η ποιότητα του νερού. (Esrey και Habicht, 1986).

Συνολικά, ο Τ.Ε. συνεισφέρει στη διατήρηση των παραπάνω οφελών, ειδικά αν λαμβάνει χώρα ως μέρος μιας ευρύτερης προσέγγισης στη διαχείριση του νερού σε σχέση με τη ζήτηση του και την ποιότητα του και τη δυνατότητα παροχής του. Τα συστήματα Τ.Ε. είναι κυρίως χαμηλής τεχνολογίας κατασκευές που μπορούν να κατασκευαστούν και να συντηρηθούν από τις κοινότητες που άμεσα ωφελούνται, με λίγες εξωτερικές συμβουλές και περιορισμούς

### **Περιορισμοί στην αποτελεσματικότητα του τεχνητού εμπλουτισμού**

Μια ευρεία ποικιλία περιορισμών ίσως περιορίσουν τις επιπτώσεις του Τ.Ε. και σχετικά με στις συνθήκες του υπόγειου νερού και στα οφέλη που απολαμβάνουν οι κοινότητες. Η κατανόηση αυτών των περιορισμών είναι σημαντική ώστε να επικεντρωθούν οι δραστηριότητες του Τ.Ε. σε συνθήκες συγκεκριμένης περιοχής ώστε να προκύψουν εμφανή οφέλη. Οι περιορισμοί στην αποτελεσματικότητα του Τ.Ε. υπάγονται σε δυο μεγάλες κατηγορίες, τεχνικές και κοινωνικοοικονομικές.

#### 1. Τεχνικοί περιορισμοί

Οι κυριότεροι τεχνικοί περιορισμοί στις δραστηριότητες του Τ.Ε. περιλαμβάνουν:

- Διαθεσιμότητα νερού: αυτό ίσως φαίνεται αυταπόδεικτο. Έχουν γίνει πολλές προσπάθειες για να λυθεί το πρόβλημα της υπεράντλησης του υπόγειου νερού μέσω του Τ.Ε., εν τούτοις ξεκινούν σε περιοχές που τα επίπεδα της βροχόπτωσης είναι χαμηλά και οι περισσότεροι διαθέσιμες πηγές ήδη χρησιμοποιούνται. Σε αυτή την περίπτωση, το σύστημα Τ.Ε. μπορεί να συλλέξει νερό που έχει ήδη χρησιμοποιηθεί – στην ουσία μεταφέρει το νερό ανάμεσα στους χρήστες με μικρό, αν υπάρχει κέρδος. Η συλλογή νερού και η υπόγεια αποθήκευση μέσω Τ.Ε. στην ανώτερη λεκάνη απορροής ίσως στερήσει το νερό σε αυτούς που βρίσκονται κατάντη της λεκάνης. Εν τούτοις, οι επιπτώσεις πρέπει να εξεταστούν ολοκληρωμένα καθώς η ανάντη συλλογή νερού ίσως μειώσει τη διάβρωση του εδάφους και άλλες ζημιές και ίσως επεκτείνει την περίοδο ροής στα ρεύματα ως αποτέλεσμα της επιπλέον συνεισφοράς της βασικής ροής.
- Συχνότητα, ένταση και διάρκεια βροχόπτωσης: σε αρκετές ξηρές περιοχές, οι βροχοπτώσεις σημειώνονται σε μη κανονική βάση και είναι σύντομες με υψηλή ένταση. Κάτω από αυτές τις συνθήκες, είναι συνήθως αδύνατο να συλλεγθεί νερό χρησιμοποιώντας σχετικά μικρές κατασκευές ή φράγματα που συνήθως κατασκευάζονται για εμπλουτισμό σε αγροτικές περιοχές. Τα φράγματα υπερχειλίζουν γρήγορα στη διάρκεια σύντομων καταιγίδων αλλά παραμένουν στεγνά το μεγαλύτερο μέρος του χρόνου. Τα μέσα επίπεδα των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων, από την οπτική γωνία του εμπλουτισμού, είναι συνήθως μικρής σημασίας. Αυτό που είναι σημαντικό είναι κατά πόσο η βροχή κατανέμεται με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι δυνατή η σύλληψη και η διήθηση προς τους υδροφόρους. Με αυτές τις συνθήκες, ο σχεδιασμός του συστήματος σύλληψης νερού και εμπλουτισμού είναι το κλειδί για την επιτυχία του.
- Εδαφικό υλικό χαμηλής περατότητας ή συνθήκες υδροφόρου: Ο Τ.Ε. είναι συνήθως δύσκολο να εφαρμοστεί σε περιοχές όπου τα εδάφη έχουν υψηλή περιεκτικότητα σε άργιλο ή τείνουν να σχηματίσουν αδιαπέρατες κρούστες. Σε τέτοιες καταστάσεις τα συστήματα εμπλουτισμού συχνά εμφανίζουν υψηλά επίπεδα εξάτμισης και ίσως τελικά να οδηγήσουν σε καθαρές απώλειες νερού παρά σε συνεισφορά στη διαθεσιμότητα του νερού. Αυτό επίσης μπορεί να είναι εμπόδιο σε περιπτώσεις όπου αποθέσεις χαμηλής περατότητας επικάθονται σε υδροφόρους με υψηλή περατότητα. Ο εμπλουτισμός υπό αυτές τις συνθήκες, απαιτεί εγκαταστάσεις περισσότερο πολύπλοκες τεχνικά, για απευθείας έγχυση νερού απευθείας στον υδροφόρο.



- Περιορισμοί στην ποιότητα του νερού: Σε καταστάσεις υδροφόρων με νερό χαμηλής ποιότητας με στάθμη σε χαμηλά βάθη, το κέρδος από τη διήθηση φρέσκου νερού ίσως χαθεί κατά την ανάμιξη του με το φυσικό υπόγειο νερό. Εν τούτοις, η έγκυρη κατανόηση της υδραυλικής αυτής της κατάστασης ίσως επιτρέψει την αποτελεσματική διαχείριση ενός «φακού» καλής ποιότητας νερού, για παράδειγμα όπου υπάρχουν υψηλά επίπεδα φθορίου, αλατότητας ή νιτρικών. Στην εγγύτητα των κατασκευών εμπλουτισμού ίσως είναι πιθανό να βελτιωθεί η ποιότητα του υπόγειου νερού. Σε άλλες περιπτώσεις, οι υδροφόροι που περιέχουν υψηλής ποιότητας νερό αλληλοσυμπλέκονται με σώματα χαμηλής ποιότητας νερού. Ενώ αυτού του είδους ο περιορισμός μπορεί να ξεπεραστεί μέσω τεχνικών έγχυσης, η καλή γνώση της υδρογεωλογίας και της υδραυλικής είναι απαραίτητα για την ελαχιστοποίηση των απωλειών του συλλεγμένου φρέσκου νερού κατά την ανάμιξη του με νερό χαμηλής ποιότητας. Επίσης, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η ποιότητα του νερού (και της διακύμανσής της) ειδικά εκεί όπου εφαρμόζεται άμεσος εμπλουτισμός σε μεγάλες ανοιχτές γεωτρήσεις. Τα οφέλη της διήθησης και απομάκρυνσης των αιωρούμενων συστατικών, των παθογόνων οργανισμών, των νιτρικών και άλλων ρυπαντών μέσω διήθησης από λεκάνες χάνονται όταν χρησιμοποιείται άμεση έγχυση σε γεωτρήσεις.
- Ισορροπία ανάμεσα στον εμπλουτισμό και την εξάτμιση: Οι μικροί ταμιευτήρες είναι συνήθως ρηχοί και έχουν μεγάλη αναλογία επιφάνειας προς όγκο. Αυτό οδηγεί σε σχετικά μεγάλες απώλειες λόγω εξάτμισης, που ίσως και να υπερβούν τη συνεισφορά του εμπλουτισμού στο υπόγειο νερό. Η ποσοτικοποίηση και κατανόηση του ελέγχου αυτών των ροών επιτρέπει καλύτερη διαχείριση των συστημάτων, κάνοντας, για παράδειγμα, πιο βαθύ τον ταμιευτήρα, με πιο συχνό καθαρισμό για να αυξηθεί η διήθηση, κατασκευάζοντας λεκάνες καθίζησης, ή αλλάζοντας τη μέθοδο χρήσης του νερού από το επιφανειακό ταμιευτήρα. Μια απλή μέθοδος για την κατανόηση της αποτελεσματικότητας των συστημάτων Τ.Ε., ακόμα και αν μόνο προσδίδει μια σχετική αποτίμηση, θα είναι σημαντική βοήθεια για τη διαμόρφωση αποφάσεων διαχείρισης.

## 2. Κοινωνικοοικονομικοί περιορισμοί

Τα εμπόδια-κλειδιά σε αυτήν την περιοχή περιλαμβάνουν:

- Η ικανότητα παραγωγής αισθητών ωφελειών σε εύλογη κλίμακα χρόνου: Σε πολλές περιπτώσεις τα οφέλη του Τ.Ε. προκύπτουν σε μεγάλες περιοχές παρά σε τοπικό επίπεδο, όπου εφαρμόζεται εμπλουτισμός. Η ποσότητα του νερού που αποθηκεύεται μπορεί να είναι μεγάλη χωρίς να οδηγήσει σε διαφοροποίηση της στάθμης του νερού ή σε άλλη μεταβολή που να είναι άμεσα ορατή σε αυτούς που υλοποιούν τον Τ.Ε. Σε άλλες περιπτώσεις, τα οφέλη του εμπλουτισμού ίσως προκύψουν βαθμιαία σε μεγάλες χρονικές περιόδους. Σε αυτήν την περίπτωση, πολίτες και κοινότητες είναι πρόθυμοι να επενδύσουν χρόνο ή κόπο στον Τ.Ε.
- Την ικανότητα συσχέτισης ωφελειών με την ομάδα που επενδύει στον Τ.Ε.: Εκεί όπου οι υδροφόροι υποστηρίζονται από πολλές ξεχωριστές κοινότητες, τα οφέλη του εμπλουτισμού τα αποκομίζονται πολλοί περισσότεροι χρήστες από ό,τι είναι αυτοί που θέτουν σε εφαρμογή τα συστήματα του Τ.Ε. Σε αυτές τις περιπτώσεις τα οφέλη της τοπικής συμμετοχής χρειάζονται να χρησιμοποιηθούν για να πείσουν όλες τις κοινότητες να συμμετέχουν.
- Οικονομικά: Τα συστήματα Τ.Ε. ίσως να μην παράγουν οικονομικά οφέλη που θα αποκομίσουν αυτοί που έχουν επενδύσει στην υλοποίησή τους. Αυτή είναι, για παράδειγμα, η περίπτωση όπου η άνοδος της στάθμης του υπόγειου νερού μειώνει την κατανάλωση ενέργειας, αλλά οι αγρότες δεν πληρώνουν για την ενέργεια που χρησιμοποιούν. Η χρέωση της ενέργειας (ηλεκτρικής), όχι μόνο θα προωθούσε την

πιο αποτελεσματική χρήση του νερού αλλά θα υποκινούσε ευρύτερες εφαρμογές Τ.Ε.

- Σχέδια ιδιοκτησίας γης και νερού: Μικρές, διάσπαρτες ιδιοκτησίες συχνά περιορίζουν τη διαθεσιμότητα του χώρου ιδιωτικής ιδιοκτησίας, όπου μπορούν να γίνουν οι εγκαταστάσεις του Τ.Ε. Σε αρκετές περιοχές, ο μοναδικός διαθέσιμος χώρος είναι δημόσιας ιδιοκτησίας, που ίσως είναι υπό τον έλεγχο διαφόρων περιοχών. Η διαδικασία χορήγησης άδειας για εφαρμογή Τ.Ε. σε δημόσια ιδιοκτησία είναι συνήθως πολύπλοκη.
- Κίνητρα: Η υπόθεση που κρύβεται πίσω από τα κίνητρα του Τ.Ε. σε επίπεδο κοινότητας, είναι ότι η κοινότητα έχει άμεσο ενδιαφέρον στη βιώσιμη διαχείριση των υδατικών πόρων στους οποίους βασίζεται η τοπική γεωργία και άλλες οικονομικές δραστηριότητες. Αυτή δεν είναι η περίπτωση όπου η κοινότητα επικεντρώνεται στην ανάδειξη ευκαιριών σε αστικές ή μη αγροτικές οικονομίες. Σε αυτήν την περίπτωση, οι αγρότες προσπαθούν να αυξήσουν τα έσοδα με στόχο την επένδυση στην παιδεία ή στην ανάπτυξη μη αγροτικών δραστηριοτήτων, ανεξάρτητα από το αν τα σχέδια χρήσης πόρων είναι βιώσιμα.
- Αδυναμία ελέγχου των αντλήσεων: Σε αρκετές περιπτώσεις, ο εμπλουτισμός ίσως είναι τεχνικά ή κοινωνικά εφικτός αλλά ο έλεγχος της υπεράντλησης είναι δύσκολο να επιτευχθεί. Ίσως γίνει επιπλέον άντληση υπόγειου νερού για αρδευτικούς σκοπούς που θα οδηγήσει σε επιδείνωση της μείωσης της στάθμης του υπόγειου νερού παρά στην αντιμετώπιση του αρχικού προβλήματος. Παρά το ότι με την άντληση γίνεται υπέρβαση της επιπλέον συνεισφοράς στον εμπλουτισμό, οι ταμειυτήρες εμπλουτισμού μπορούν να συνεχίσουν να αποτελούν μια σημαντικούς πόρους για ψάρεμα, κολύμπι, πότισμα ζώων κ.α.

## Αβεβαιότητες αξίες επισήμανσης

Έχει γίνει μικρή, συστηματική αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας του Τ.Ε. σε διαφορετικά φυσικά και κοινωνικοοικονομικά πλαίσια και τα οφέλη είναι συχνά μικρής αξίας. Απαιτείται επομένως μια ισορροπημένη και ενημερωμένη οπτική στη συνεισφορά του Τ.Ε. σχετικά με τους βιοτικούς πόρους, σε μια σειρά διαφορετικών φυσικών και κοινωνικοοικονομικών συνθηκών.

Η κύρια απαίτηση για την ανάπτυξη αποτελεσματικής διαχειριστικής προσέγγισης στο θέμα του υπόγειου νερού, χρησιμοποιώντας τεχνικές Τ.Ε., είναι ο προσδιορισμός κριτηρίων που θα χρησιμοποιηθούν ως οδηγοί από τους πολίτες, τις κοινότητες, τις κυβερνήσεις, τις σχετικές υπηρεσίες στην προσπάθειά τους να προσδιορίσουν που είναι πιθανόν ο Τ.Ε. να συνεισφέρει ουσιαδώς στην επίλυση των προβλημάτων νερού και που όχι. Τα κριτήρια που πρέπει να προσδιορισθούν είναι τα εξής:

- 1) Φυσικοί παράγοντες που συντελούν στην αποτελεσματικότητα των συστημάτων Τ.Ε.
  - Τύπος εδάφους (ικανότητα διήθησης και κατανομή)
  - Πηγή προέλευσης του νερού (ποτάμια, κατανομή ένταση βροχόπτωσης, υγρά απόβλητα κ.α.)
  - Ικανότητα υπόγειας αποθήκευσης (γεωλογία, τύπος υδροφόρου, διαπερατότητα, ροή και ποιότητα υπόγειου νερού κ.α.)
- 2) Κοινωνικοοικονομικοί παράγοντες, που περιλαμβάνουν:
  - Την απαίτηση για επιπλέον υπόγειο νερό είτε από τον άνθρωπο είτε από το περιβάλλον
  - Τα οικονομικά του Τ.Ε.
  - Τα κίνητρα που μπορεί να έχουν οι κοινότητες για την εφαρμογή και συντήρηση των συστημάτων Τ.Ε.
  - Τη δυνατότητα να εφαρμοστεί ο Τ.Ε. στο πλαίσιο ενός ευρύτερου πακέτου των διαχειριστικών επεμβάσεων

Έτσι, στο πλαίσιο της βιώσιμης διαχείρισης του υπόγειου νερού, είναι σημαντικό να γίνει αποτίμηση της αποτελεσματικότητας των συστημάτων Τ.Ε. αναφορικά με την ικανότητά τους να εμπλουτίσουν τους υδροφόρους και να συνταχθούν κριτήρια για να καθοριστεί η αποτελεσματικότητα του κόστους των συστημάτων σε μια ποικιλία κλιμάκων, από μεμονωμένες κατασκευές μέχρι λεκάνες απορροής και σε τοπικό επίπεδο. Οι κοινωνικές επιπτώσεις πρέπει επίσης να αποτιμηθούν σε σχέση με τις διάφορες πρακτικές διαχείρισης και τα συνολικά οφέλη, για τις υπάρχουσες και τις προσχεδιασμένες χρήσεις και χρήστες.

Οι αβεβαιότητες-κλειδιά είναι:

- Η υδραυλική αποτελεσματικότητα των συστημάτων εμπλουτισμού. Απλές μέθοδοι για την αποτίμηση της σχετικής αποτελεσματικότητας σε διαφορετικές υδρολογικές συνθήκες, οδηγούν σε καλύτερη διαχείριση και σε χρήση περιορισμένων πηγών νερού. Εξαιτίας των αρκετών εκατοντάδων χιλιάδων των κατασκευών που ήδη υπάρχουν και αυτών που είναι υπό κατασκευή, θα πρέπει να υπάρχουν τεχνικές, για τη μέτρηση ή την παρακολούθηση της αποτελεσματικότητάς τους ή για την παροχή οδηγιών για καλύτερη διαχείριση, που να είναι προσβάσιμες, κατανοητές και αποδεκτές από τις κοινότητες, τις σχετικές υπηρεσίες, τις κυβερνήσεις και όσους άλλους εμπλέκονται.
- Οι επιπτώσεις των διαφορετικών κατασκευαστικών σχεδιασμών και τεχνικών διαχείρισης στην αποτελεσματικότητα των συστημάτων Τ.Ε. Οι τομείς που χρήζουν περαιτέρω έρευνα, περιλαμβάνουν περιοδική απομάκρυνση της ιλύος, κυκλικές εναλλαγές διαβροχής-ξήρανσης, βάθος νερού, μέγεθος και αριθμό κατασκευών, λεκάνες καθίζησης κ.α. Μια καλύτερη κατανόηση της σημασίας αυτών των παραγόντων θα είχε θετικές επιπτώσεις στη χρήση των οικονομικών πόρων και του ανθρώπινου δυναμικού.
- Επιπτώσεις στα νοικοκυριά και τους βιοτικούς τους πόρους.
- Μέχρι σήμερα, ο Τ.Ε. έχει επιχειρηθεί στο πλαίσιο της διάθεσης πόσιμου νερού και γεωργικής χρήσης σε αγροτικές περιοχές. Τα δυνητικά οφέλη και οι περιορισμοί στη συλλογή του νερού σε αστικά περιβάλλοντα πρέπει επίσης να ερευνηθούν. Εκτός από τα υδρογεωλογικά και άλλα τεχνικά ζητήματα που εμφανίζονται σε αστικές συνθήκες, πρέπει να ερευνούνται οι επιπτώσεις από μεγάλες επικαλυμμένες περιοχές και ανάντη λεκάνες απορροής καθώς και από την απόθεση βιομηχανικών και αστικών αποβλήτων και την ρύπανση από αυτά. Βαθιές θεμελιώσεις κτιρίων και άλλες υπόγειες κατασκευές καθώς και υπόγεια δίκτυα ύδρευσης, υπόνομοι, ηλεκτρισμός και τηλεπικοινωνίες πρέπει να ληφθούν υπόψη όταν γίνεται ο σχεδιασμός του Τ.Ε. σε αστικές περιοχές.

Αυτά τα θέματα πρέπει να αντιμετωπίζονται μέσω συστηματικής μελέτης του υδατικού ισοζυγίου των συστημάτων Τ.Ε. σε διάφορα περιβάλλοντα με στόχο να παρέχουν οδηγίες για την αποτελεσματικότητα και βιωσιμότητά τους. Επίσης πρέπει να καθοριστεί η σημασία των διαφορετικών στρατηγικών διαχείρισης αναφορικά με τις επιπτώσεις που έχουν στους βιοτικούς πόρους και τον τρόπο ζωής.

Τα κριτήρια που σχεδιάζονται για την αποτελεσματική εφαρμογή και διαχείριση των μεμονωμένων συστημάτων, τόσο στις λεκάνες απορροής όσο και σε τοπική κλίμακα, πρέπει να αναπτύσσονται σε συνεργασία με τους ανθρώπους που θα υλοποιήσουν το έργο, με τους χρηματοδότες και τους πολιτικούς. Το υλικό των οδηγιών θα παραχθεί από αυτήν τη συνεργασία πρέπει να προσαρμόζεται στις ανάγκες των χρηστών και αφού διαδοθεί και γίνει κτήμα πολλών άλλων με αποτελεσματικό και σωστό τρόπο, τότε θα μπορεί να συνεισφέρει στον εμπλουτισμό της γνώσης σε σχετικά θέματα Τ.Ε.

## **10. ΔΙΕΘΝΕΙΣ ΚΑΙ ΕΛΛΗΝΙΚΕΣ ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΕΣ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΕΣ ΣΕ ΖΗΤΗΜΑΤΑ ΤΕΧΝΗΤΟΥ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΥ**

(κύρια βιβλιογραφική πηγή: Διαμαντής και Πλιάκας, 2011)

### **10.1. Διεθνής Επιτροπή MAR (της IAH)**

Η Εκτελεστική Επιτροπή της IAH (International Association of Hydrogeologists), στη συνεδρίασή της στη Βαρκελώνη τον Ιανουάριο του 2002, ενέκρινε τη μετονομασία της Ομάδας Εργασίας Τεχνητού Εμπλουτισμού (IAH Artificial Recharge Working Group), σε Επιτροπή Διαχείρισης Εμπλουτισμού Υδροφόρων (IAH-MAR, IAH Commission on the Management of Aquifer Recharge). Η IAH-MAR έχει τις ρίζες της στην Ομάδα Εργασίας Τεχνητού Εμπλουτισμού (IAH Artificial Recharge Working Group), που ιδρύθηκε το 1998 από τον Ivan Johnson της AIJ Consultants στο Denver και παλαιότερα της USGS (US Geological Survey), ειδικευμένος για περισσότερο από 30 χρόνια στην έρευνα και εφαρμογή του τεχνητού εμπλουτισμού και προεδρεύων της ASCE/EWRI Standards Committee for Artificial Recharge (ASCE: American Society of Civil Engineers, EWRI: Environment & Water Resources Institute).

Η Ομάδα Εργασίας Τεχνητού Εμπλουτισμού (IAH Artificial Recharge Working Group) είχε την πρώτη της συνεδρίαση το Νοέμβριο του 2000 στο Cape Town (IAH XXX Congress) και τη δεύτερη στο Μόναχο, το Σεπτέμβριο του 2001. Η IAH λαμβάνοντας υπόψη ότι η UNESCO έθεσε τον εμπλουτισμό ως τομέα προτεραιότητας στο 6<sup>ο</sup> Διεθνές Υδρολογικό Πρόγραμμα (6<sup>th</sup> International Hydrological Program), 2002-2007, επισημαίνει την πρόθεσή της να ενισχύσει αυτήν την πρωτοβουλία με την μετονομασία της IAH Ομάδας Εργασίας Τεχνητού Εμπλουτισμού σε Επιτροπή Διαχείρισης Εμπλουτισμού Υδροφόρων. Η IAH καθιερώνει τη συγκρότηση Επιτροπών που θα επιτηρούν σχετικές δραστηριότητες σε ευρύτερο χρονικό ορίζοντα και θα αγκαλιάζουν γενικά ευρύτερους στόχους που απαιτούν συνεχή προσπάθεια.

Η IAH-MAR στοχεύει να διευρύνει τους διαθέσιμους υδατικούς πόρους και να βελτιώσει την ποιότητα νερού με τρόπους που είναι κατάλληλοι, περιβαλλοντικά και τεχνικά βιώσιμοι, οικονομικοί, και κοινωνικά επιθυμητοί, με την ενθάρρυνση της ανάπτυξης και της υιοθέτησης βελτιωμένων πρακτικών για τη διαχείριση του εμπλουτισμού υδροφόρων. Αυτό θα επιτευχθεί με την αυξανόμενη πληροφόρηση της MAR προς τα μέλη της IAH, των σχετικών επαγγελματιών και της επιστημονικής κοινότητας, με τη διευκόλυνση της διεθνούς ανταλλαγής των πληροφοριών μεταξύ των μελών, με τη διάδοση των αποτελεσμάτων σχετικών ερευνών και της πρακτικής εμπειρίας και με την ανάληψη κοινών προγραμμάτων και σημαντικών δραστηριοτήτων.

Ακολουθούν οι κυριότεροι στόχοι της επιτροπής IAH-MAR στο πλαίσιο της δράσης της στο διεθνή χώρο:

- Όλα τα νέα προγράμματα ενίσχυσης του εμπλουτισμού θα είναι κατάλληλα και βιώσιμα σε αναπτυσσόμενες και αναπτυσσόμενες χώρες, ειδικά:
  - Ο τεχνητός εμπλουτισμός θα είναι μέρος ενός ολοκληρωμένου σχεδίου συμπεριλαμβανομένης της μειωμένης απαίτησης εκεί όπου οι υδροφόροι γίνονται αντικείμενο υπερεκμετάλλευσης.
  - Ο σχεδιασμός, η κατασκευή, η λειτουργία και η συντήρηση έργων T.E. θα λαμβάνουν υπόψη τη βιωσιμότητα του έργου τεχνικά, περιβαλλοντικά, κοινωνικά.
- Θα υπάρχει συνεχής βελτίωση στο σχεδιασμό και τη διαχείριση όλων των τύπων των προγραμμάτων του εμπλουτισμού κατά τη διάρκεια της θητείας της επιτροπής.
- Η ποσοτική και ποιοτική διασφάλιση διάθεσης νερού θα αυξηθεί ως συνέπεια της αποτελεσματικής διαχείρισης του εμπλουτισμού των υδροφόρων.

- Θα συγκεντρωθεί η γνώση από τη διαχείριση του εμπλουτισμού υδροφόρων στο διεθνή χώρο, ώστε να εκτιμηθεί η αποτελεσματικότητά της.
- Η επιτροπή IAH-MAR θα διαδραματίσει επιτελικό ρόλο στη συγκέντρωση των διεθνών και εθνικών προσπαθειών σε αυτόν τον τομέα, και θα παρέχει αποτελεσματική επικοινωνία μέσω ιστοσελίδων, ηλεκτρονικού ταχυδρομείου και συνδέσεων με άλλες οργανώσεις με κοινούς στόχους.
- Η επιτροπή IAH-MAR θα θεσπίζει και θα προωθεί προγράμματα κατάρτισης και εκπαίδευσης, διασκέψεις και συνέδρια (διεθνή, εθνικά ή και τοπικά) προκειμένου να εξασφαλιστεί αποτελεσματική επικοινωνία σε όλους που απαιτείται να γνωρίζουν, και με ιδιαίτερο ενδιαφέρον στις αναπτυσσόμενες χώρες.
- Η επιτροπή IAH-MAR θα έχει την ικανότητα να αποκριθεί σε ανάγκες σε αυτήν τον τομέα, ιδιαίτερα για τις αναπτυσσόμενες χώρες και όπου αλλού οι ανάγκες είναι σοβαρές.

## **10.2. IGRAC και Acacia Institute**

Η International Groundwater Resources Assessment Centre (IGRAC) και το Acacia Institute έχουν εφαρμόσει από το 2006 στο πλαίσιο του προγράμματος: "Artificial Recharge of Groundwater in the World", σε συνεργασία με την IAH-MAR Commission και την UNESCO-IHP, δραστηριότητες για τη βελτίωση της δομής, της προβολής, της διάδοσης και της επναχρησιμοποίησης πληροφοριών και γνώσεων που αφορούν σε ζητήματα MAR. Μια ευρεία απογραφή πηγών πληροφόρησης που περιλαμβάνει πληροφορίες από ανθρώπους και οργανισμούς, έγγραφα, ιστοσελίδες κ.λ.π., είναι διαθέσιμη μέσα από μια βάση δεδομένων στο <https://www.un-igrac.org>, μαζί με επεξεργασμένη ταξινόμηση και περιγραφή όλων των τεχνικών MAR.

## **10.3. Επιτροπή ARGW SC (της EWRI/ASCE)**

Από το Ινστιτούτο EWRI (Environmental & Water Resources Institute) της ASCE (American Society of Civil Engineers) έχει συσταθεί επιτροπή πρότυπων οδηγιών τεχνητού εμπλουτισμού των υπόγειων νερών (ARGW SC, Artificial Recharge of Groundwater Standards Committee), η οποία απαρτίζεται από 3 υποεπιτροπές:

- Υποεπιτροπή για τις καθιζήσεις του εδάφους (Land Subsidence Sub-committee), που έχει σκοπό να συλλέξει πληροφορίες για τις θέσεις και τους τύπους καθιζήσεων, τις τεχνικές και τα όργανα μέτρησης.
- Υποεπιτροπή για τον εμπλουτισμό με αποθήκευση και άντληση υδροφόρων (ASR, Aquifer Storage and Recovery Sub-committee), που έχει στόχο να καταγράψει θέσεις και λεπτομέρειες εγκαταστάσεων ASR, συνθήκες κάτω από τις οποίες οι εφαρμογές ASR είναι κατάλληλες ή όχι, όπως και να αναλύσει σχετικά ζητήματα ποιότητας νερού.
- Υποεπιτροπή για την εκπαίδευση (Sub-committee on training), που έχει στόχο να ανανεώσει το σχετικό υπάρχον υλικό με την καταγραφή, την περιγραφή και την ανάλυση τεχνικών και μεθόδων από παλιές και νέες εφαρμογές T.E., όπως και να βοηθήσει να εκσυγχρονισθούν παλιές τεχνικές εφαρμογών T.E. ή και να αναπτυχθούν νέες.

Η ASCE/EWRI Artificial Recharge of Groundwater Standards Committee προσκαλεί (με σχετική ανακοίνωση το καλοκαίρι του 2003) μηχανικούς, υδρογεωλόγους και άλλους ειδικούς σχετικούς με το αντικείμενο να μοιραστούν τις γνώσεις, την εμπειρία, τις ικανότητές τους και τα ενδιαφέροντά τους με στόχο τη βελτίωση της γνώσης σε αντικείμενα όπως είναι ο επιφανειακός εμπλουτισμός, ο εμπλουτισμός μέσω γεωτρήσεων, ο εμπλουτισμός με αποθήκευση και άντληση υδροφόρων (ASR), καθιζήσεις τους εδάφους προκαλούμενες από αντλήσεις, ζητήματα ποιότητας νερού, θέματα ανάλογων ερευνών, σχεδιασμού, λειτουργίας και συντήρησης έργων T.E. στις ΗΠΑ και διεθνώς. Τα μέλη της επιτροπής θα πρέπει να

ετοιμάσουν προτάσεις νέων προτύπων (standards), προτάσεις ανανέωσης των ήδη υπαρχόντων προτύπων και συμμετέχουν σε προγράμματα εκπαίδευσης (σεμινάρια) και άλλες ανάλογες δραστηριότητες. Ένα τέτοιου είδους σεμινάριο για παράδειγμα προγραμματίζεται από την ASCE για τις 26-27 Φεβρουαρίου του 2004, στην πόλη Scottsdale της Arizona στις ΗΠΑ, στο πλαίσιο της συνεχούς εκπαίδευσης της ASCE (Continuing Education, ASCE), με τίτλο: Artificial Recharge of Ground Water, με κύριους εισηγητές τους H. Bouwer και D. Pyne (από τους πλέον ειδικούς σε θέματα T.E. διεθνώς) και επιμέρους θέματα:

- επιφανειακά συστήματα διήθησης,
- εμπλουτισμός με γεωτρήσεις,
- επαναχρησιμοποίηση νερού,
- επεξεργασία μέσω συστήματος εδάφους-υδροφόρου (SAT, Soil Aquifer Treatment),
- γεωτρήσεις αποθήκευσης-άντλησης υδροφόρων (ASR, Aquifer Storage and Recovery Wells).

Το σεμινάριο απευθύνεται σε μηχανικούς, υδρογεωλόγους, στελέχη υπηρεσιών δημόσιας υγείας, συμβούλους και μελετητές, ειδικούς σε ζητήματα διαχείρισης νερού και υγρών αποβλήτων σε δημοτικές, πολιτειακές - νομαρχιακές ή και κρατικές υπηρεσίες.

#### **10.4. Έκδοση πρότυπων οδηγιών για τον τεχνητό εμπλουτισμό των υπόγειων νερών της ASCE**

Standard Guidelines for Artificial Recharge of Groundwater EWRI/ASCE 34-01 (ASCE, 2001).

Οι οδηγίες αυτές περιγράφουν τα απαραίτητα βήματα για τη μελέτη, το σχεδιασμό, την κατασκευή, τη λειτουργία και τη συντήρηση έργων T.E. Το εγχειρίδιο χωρίζεται σε δύο μέρη. Τα πρώτα 7 κεφάλαια είναι γραμμένα σε γενική μορφή και μπορούν να διαβαστούν χωρίς την απαίτηση ειδικού τεχνικού υπόβαθρου. Στα κεφάλαια αυτά αναλύονται οι βασικές αρχές της διαχείρισης των υπόγειων νερών και του τεχνητού εμπλουτισμού και οι απαιτούμενες σχετικές έρευνες και μεθοδολογίες σχεδιασμού, ενώ περιέχονται και περιλήψεις με περιβαλλοντικές, κοινωνικές και οικονομικές θεωρήσεις (1. Γενικά περί διαχείρισης των υπόγειων νερών και περί T.E. και σχετικών μεθόδων, 2. Αρχικός προγραμματισμός, 3. Απαιτούμενες έρευνες υπαίθρου, 4. Σχεδιασμός έργων T.E., 5. Ζητήματα θεσμικά, 6. Ζητήματα περιβαλλοντικά, 7. Ζητήματα οικονομικά).

Τα υπόλοιπα 3 κεφάλαια έχουν να κάνουν με πιο τεχνικά θέματα και ειδικότερα με ζητήματα που αφορούν στην κατασκευή, τη λειτουργία και συντήρηση επιφανειακών συστημάτων διήθησης, συμπεριλαμβανομένων των SAT και ASR (8. Κατασκευή έργων T.E., 9. Ζητήματα λειτουργίας έργων T.E., 10. Ζητήματα συντήρησης έργων T.E. και αντιμετώπιση πιθανών προβλημάτων). Σε κάποια σημεία των κεφαλαίων παρατίθενται και συγκεκριμένα παραδείγματα, όπως και αντίστοιχες βιβλιογραφικές αναφορές.

Ο Dr Peter Dillon, διευθυντικό στέλεχος του οργανισμού CSIRO (Commonwealth Scientific Industrial Research Organisation) Land and Water της Αυστραλίας, σε κριτική ανασκόπηση που κάνει στις οδηγίες, κρίνει θετικό το γεγονός ότι οι οδηγίες, εκτός των άλλων, συμπεριλαμβάνουν τη διαχείριση του εμπλουτισμού με νερό καταιγίδων και επεξεργασμένων εκπομπών υγρών αποβλήτων, αν και δεν υπάρχουν ανάλογες αναφορές στην Ευρώπη και στην Αυστραλία. Η άποψη ότι το νερό έγχυσης στις εφαρμογές ASR χρειάζεται να απολυμανθεί είναι αδιαμφισβήτητη σ' αυτές τις οδηγίες, παρά το γεγονός ότι ανάλογες οδηγίες στην Ευρώπη αποθαρρύνουν παρόμοιες πρακτικές και αποτελεί ουσιώδη απόδειξη ότι στους υδροφόρους συντελείται φυσικά η αδρανικοποίηση των παθογενών συστατικών. Επίσης ο Dr. Dillon διαπιστώνει ότι οι οδηγίες είναι ελλιπείς ως προς τη μελέτη της παρουσίας φαρμακευτικά ενεργών χημικών/διαλυμάτων ορμονικών στον εμπλουτισμό με αναγεννημένο (reclaimed) νερό, εξαιτίας της περιορισμένης σημερινής γνώσης στο θέμα και αυτό αποτελεί ένα ζήτημα που χρήζει περαιτέρω ανάλυση όταν θα έχει προχωρήσει αντίστοιχα και η ανάλογη έρευνα. Επίσης δεν αναφέρονται μερικά βασικά και σημαντικά γεωχημικά θέματα, όπως η παρουσία

αρσενικού, φθοριούχων ενώσεων και ραδονίου στο αντλούμενο νερό (recovered water). Εντούτοις αυτά τα θέματα μπορούν να καλυφθούν ικανοποιητικά εάν τηρηθούν ακριβώς οι κατά περίπτωση αρχές των οδηγιών. Ένα άλλο ζήτημα που δεν αναλύεται στις οδηγίες είναι οι συνέπειες στην επιλογή εναλλακτικών μεθόδων από μελλοντικές αλλαγές στο ενεργειακό κόστος. Η πιθανότητα της συνδυασμένης αποθήκευσης ενέργειας (θερμότητας) και νερού δεν αναφέρεται καθόλου στις οδηγίες.

Ο Dr Dillon κλίνει την ανασκόπησή του αναφέροντας ότι οι οδηγίες συνοψίζουν διάφορες προσεγγίσεις στο θέμα της *διαχείρισης του εμπλουτισμού των υδροφόρων* (managed aquifer recharge). Ο όρος "τεχνητός εμπλουτισμός" (artificial recharge) αποτελεί μια ανεπιτυχή ιστορική ορολογία, εξάλλου αποκαλούμε τις παραγωγικές γεωτρήσεις "τεχνητή εκφόρτιση" (artificial discharge);

Το εγχειρίδιο των οδηγιών συνεισφέρει στην προσέγγιση (διαπίστωση) ότι επιτυχείς εφαρμογές T.E. προκύπτουν από ορθολογική διερεύνηση των κατάλληλων θέσεων, των απαιτούμενων τεχνικών και τεχνολογιών, των κοινωνικοοικονομικών και περιβαλλοντικών θεωρήσεων, που μπορούν να αξιοποιηθούν με συστηματικό τρόπο. Τέλος το τεύχος προτρέπει σε περαιτέρω επένδυση σε έργα και γνώση, με στόχο την αποφυγή αστοχιών και ζημιών, αυξάνοντας την εμπιστοσύνη του κοινού και των επενδυτών σ' αυτόν τον διαρκώς διευρυνόμενο τομέα, περιβαλλοντικά ευαίσθητο, της διαχείρισης των υδατικών πόρων.

### **10.5. Διεθνή Συμπόσια για τον τεχνητό εμπλουτισμό των υπόγειων νερών**

#### **1<sup>ο</sup> Διεθνές Συμπόσιο: ARTIFICIAL RECHARGE OF GROUND WATER**

Το 1<sup>ο</sup> Διεθνές Συμπόσιο για τον T.E. διοργανώθηκε από την ASCE (American Society of Civil Engineers) στο Anaheim, στην Καλιφόρνια των ΗΠΑ στις 23-27 Αυγούστου 1988. Οι θεματικές ενότητες του Συμποσίου, όπως παρουσιάζονται στα αντίστοιχα πρακτικά (63 εργασίες, 644 σελίδες), είναι (Johnson and Finlayson, 1989):

- Εισαγωγή
- Οικονομικές και θεσμικές θεωρήσεις
- Κατείσδυση και υπόγεια υδραυλική
- Ανακτημένο νερό και ποιότητα νερού
- Σχεδιασμός, λειτουργία και διαχείριση
- Συνδυασμένη χρήση
- Περιπτώσεις εφαρμογών τεχνητού εμπλουτισμού στις Η.Π.Α (Νότια Καλιφόρνια, San Joaquin Valley)
- Περιπτώσεις εφαρμογών τεχνητού εμπλουτισμού σε άλλες χώρες (Αυστραλία, Γερμανία, Φιλανδία, Ιαπωνία, Ολλανδία, Νέα Ζηλανδία, Τυνησία)

#### **2<sup>ο</sup> Διεθνές Συμπόσιο: ARTIFICIAL RECHARGE OF GROUND WATER, II**

Το 2<sup>ο</sup> Διεθνές Συμπόσιο για τον T.E. διοργανώθηκε από την ASCE (American Society of Civil Engineers) στο Orlando, στη Φλόριντα, στις 17-22 Ιουλίου 1994. Οι θεματικές ενότητες του Συμποσίου, όπως παρουσιάζονται στα αντίστοιχα πρακτικά (93 εργασίες, 913 σελίδες), είναι (Johnson and Pyne, 1995):

- Ανασκόπηση
- Εφαρμοσμένες έρευνες
- μέθοδοι εμπλουτισμού απ' ευθείας στην επιφάνεια
- Εμπλουτισμός με γεωτρήσεις
- Γεωτρήσεις εμπλουτισμού και άντλησης (ASR)
- Εμπλουτισμός με υγρά απόβλητα
- Εμπλουτισμός με νερά καταιγίδας

- Έλεγχος της διείσδυσης αλμυρού νερού
- Επιπτώσεις στην ποιότητα του νερού
- Μοντέλα
- Το φαινόμενο της απόφραξης των γεωτρήσεων
- Εμπλουτισμός σε υδροφόρους βραχωδών πετρωμάτων
- Περιπτώσεις εφαρμογών τεχνητού εμπλουτισμού

☑ 3° Διεθνές Συμπόσιο: ARTIFICIAL RECHARGE OF GROUND WATER, TISAR 98

Το 3° Διεθνές Συμπόσιο για τον Τ.Ε. διοργανώθηκε από τον Ολλανδικό οργανισμό Kiwa Research and Consultancy στο Άμστερνταμ της Ολλανδίας, στις 21-25 Σεπτεμβρίου 1998. Οι θεματικές ενότητες του Συμποσίου, όπως παρουσιάζονται στα αντίστοιχα πρακτικά (82 εργασίες, 474 σελίδες), είναι (Peters et al., 1998):

- Λειτουργία εμπλουτισμού με λεκάνες
- Διαχείριση νερού σε ξηρές περιοχές
- Απόφραξη
- Εμπλουτισμός με επεξεργασμένα υγρά απόβλητα
- Ρυπαντές και διήθηση όχθης
- Μικροβιολογικοί παράγοντες
- Υδρολογικά θέματα
- Περιπτώσεις εφαρμογών εμπλουτισμού με γεωτρήσεις
- Ρυπαντές και εμπλουτισμός με λεκάνες
- Άλλες μέθοδοι τεχνητού εμπλουτισμού
- Ικανότητα αποθήκευσης και ανάκτησης
- Χημικές αντιδράσεις και εμπλουτισμός με γεωτρήσεις
- Έρευνες υπαίθρου και γραφείου, σχεδιασμοί και σχετικές περιπτώσεις
- Τεχνητός εμπλουτισμός στη Στοκχόλμη της Σουηδίας
- Συμπεριφορά των ρυπαντών
- Πρόβλεψη και μοντελοποίηση της ποιότητας του υπόγειου νερού
- Το πρόβλημα της απόφραξης στα συστήματα εμπλουτισμού
- βιολογική επεξεργασία και απομάκρυνση οργανικών συστατικών

☑ 4° Διεθνές Συμπόσιο: MANAGEMENT OF AQUIFER RECHARGE FOR SUSTAINABILITY, ISAR-4

Το 4° Διεθνές Συμπόσιο για τον Τ.Ε. διοργανώθηκε στην Adelaide της Αυστραλίας στις 22-26 Σεπτεμβρίου 2002. Οι θεματικές ενότητες του Συμποσίου, όπως παρουσιάζονται στα αντίστοιχα πρακτικά (110 εργασίες, 567 σελίδες), είναι (Dillon, 2002):

- Βιωσιμότητα του εμπλουτισμού
- Αλλαγές στην ποιότητα του νερού στο υπέδαφος
- Γεωχημεία στις διαδικασίες εμπλουτισμού
- Αντιμετώπιση της παρουσίας παθογενών συστατικών
- Αντιμετώπιση της παρουσίας οργανικών συστατικών
- Διαχείριση της απόφραξης
- Υδραυλική των υπόγειων νερών και θέματα αποθήκευσης-άντλησης υδροφόρων
- Εμπλουτισμός σε ρωγματωμένα πετρώματα
- Επαναχρησιμοποίηση του νερού μέσω υδροφόρων
- Περιβαλλοντικές εφαρμογές σε προγράμματα εμπλουτισμού
- Διαχείριση του νερού σε ξηρές περιοχές
- Θέματα έγχυσης σε γεωτρήσεις και λύσεις



- Θέματα λεκανών διήθησης και διήθησης όχθης και λύσεις
- Ολιστική διαχείριση του νερού σε αστικές περιοχές
- Αγροτικές πρακτικές και εμπλουτισμός
- Θέματα επιλογής θέσης εφαρμογής τεχνητού εμπλουτισμού

5<sup>ο</sup> Διεθνές Συμπόσιο: MANAGEMENT OF AQUIFER RECHARGE: RECHARGE SYSTEMS FOR PROTECTING AND ENHANCING GROUNDWATER RESOURCES, ISMAR-5

Το 5<sup>ο</sup> Διεθνές Συμπόσιο για τον Τ.Ε. διοργανώθηκε στο Βερολίνο της Γερμανίας στις 11-16 Ιουνίου 2005. Οι θεματικές ενότητες του Συμποσίου, όπως παρουσιάζονται στα αντίστοιχα πρακτικά (134 εργασίες, 914 σελίδες), είναι (UNESCO, 2006):

- Εμπλουτισμός με λεκάνες, γεωτρήσεις, γεωτρήσεις ASR, σύγχρονες εναλλακτικές τεχνικές
- Γεωχημεία κατά την κατείσδυση και τη ροή του υπόγειου νερού
- Προσομοίωση και υδραυλική των υπόγειων νερών
- Απόφραξη
- Βιωσιμότητα της διαχείρισης συστημάτων εμπλουτισμού
- Επαναχρησιμοποίηση νερού στη γεωργία
- Θέματα υγείας και αντιμετώπιση παθογόνων και οργανικών ρυπαντών

6<sup>ο</sup> Διεθνές Συμπόσιο: MANAGEMENT OF AQUIFER RECHARGE FOR SUSTAINABILITY, ISMAR-6

Το 6<sup>ο</sup> Διεθνές Συμπόσιο για τον Τ.Ε. διοργανώθηκε στο Phoenix της Arizona στις ΗΠΑ, στις 28/10 – 2/11 2007. Οι θεματικές ενότητες του Συμποσίου, όπως παρουσιάζονται στα αντίστοιχα πρακτικά (54 εργασίες, 657 σελίδες), είναι (Fox, 2007):

- Εμπλουτισμός με λεκάνες
- Ποιότητα του υπόγειου νερού κατά τον Τ.Ε.
- Ο ρόλος του Τ.Ε. στην ολοκληρωμένη διαχείριση των υδατικών πόρων
- Η υδραυλική των υπόγειων νερών και η αποθήκευσή τους
- Γεωχημεία του εμπλουτισμού των υδροφόρων
- Αντιμετώπιση παθογόνων και οργανικών ρυπαντών
- Εμπλουτισμός ρωγματωμένα σκληρά πετρώματα
- Ζητήματα διοικητικά, οικονομικά και κανονισμοί

7<sup>ο</sup> Διεθνές Συμπόσιο: MANAGEMENT OF AQUIFER RECHARGE: ACHIEVING WATER SUPPLY SUSTAINABILITY AND RELIABILITY THROUGH MANAGED AQUIFER RECHARGE, ISMAR-7

Το 7<sup>ο</sup> Διεθνές Συμπόσιο για τον Τ.Ε. διοργανώθηκε στο Abu Dhabi των Ενωμένων Αραβικών Εμιράτων στις 9-13 Οκτωβρίου 2010. Οι θεματικές ενότητες του Συμποσίου είναι ([www.ismar7.org/](http://www.ismar7.org/)):

- Ολοκληρωμένη διαχείριση υδατικών πόρων και στρατηγικές
- Προσομοίωση και υδραυλική των υπόγειων νερών
- Ζητήματα διοικητικά, οικονομικά και κανονισμοί
- Γεωχημεία κατά την κατείσδυση και τη ροή του υπόγειου νερού
- Εξασθένιση παθογόνων και οργανικών ρυπαντών
- Ζητήματα λειτουργίας και διαχείρισης

- Εναλλακτικά συστήματα εμπλουτισμού
- Επαναχρησιμοποίηση νερού και διαχείριση εμπλουτισμού υδροφόρων
- Διαχείριση εμπλουτισμού υδροφόρων σε ξηρά περιβάλλοντα
- Διαχείριση και καταγραφή δεδομένων
- Ο ρόλος της διαχείρισης του εμπλουτισμού των υδροφόρων στην κλιματική αλλαγή
- Αξιολόγηση επικινδυνότητας και αβεβαιότητα

8<sup>ο</sup> Διεθνές Συμπόσιο: MANAGED AQUIFER RECHARGE: MEETING THE WATER RESOURCE CHALLENGE, SMAR-8

Το 8<sup>ο</sup> Διεθνές Συμπόσιο για τον Τ.Ε. διοργανώθηκε στο Πεκίνο, Κίνα, στις 15-19 Οκτωβρίου 2013 . Διοργανωτές ήταν το Tsinghua University, το University of Jinan, China και το Ministry of Water Resource and China Geological Survey (ismar8.org):

- Σχεδιασμός και κατασκευή συστήματος MAR (εναλλακτικά συστήματα εμπλουτισμού, κόστος αποτελεσματικότητας MAR, καινοτομία σε εφαρμογές MAR, προχωρημένες μέθοδοι για την επιλογή υδροφορέων, κατάλληλων τοποθεσιών και τεχνικών)
- Λειτουργία και συντήρηση συστημάτων MAR (παρακολούθηση και προσομοίωση συστημάτων MAR, διαχείριση του clogging, ζητήματα γεωχημείας, μικροβιολογικής οικολογίας, υδραυλικής και υδρογεωλογίας, καινοτομίες σε τεχνικές συλλογής και αποθήκευσης πλημμυρικών απορροών)
- Διαχείριση συστημάτων MAR (ολοκληρωμένη διαχείριση υδατικών πόρων, πολιτικές, στρατηγικές και κανονισμοί εμπλουτισμού, ανάλυση κινδύνου και σχέδια ασφάλειας, εμπλοκή και επαγρύπνηση κοινοτήτων, επιπτώσεις σε κατάντη ποταμούς, MAR και ζήτηση υπόγειου νερού)
- Εφαρμογές MAR στο πλαίσιο της διαχείρισης υδατικών πόρων (επαναχρησιμοποίηση ανακυκλωμένου νερού, συστήματα συλλογής νερού βροχής και καταιγίδων και MAR, MAR για τη βελτίωση της ποιότητας του πόσιμου νερού, MAR σε βιομηχανικές εφαρμογές, MAR και γεωθερμικές εφαρμογές, εφαρμογή MAR στην αντιμετώπιση θαλάσσιας δειύδωσης και εδαφικών καθιζήσεων, MAR και διάθεση νερού για αστικές και αγροτικές χρήσεις, οφέλη και κόστος εφαρμογών MAR, MAR και συνδυασμένη χρήση επιφανειακών και υπόγειων νερών)
- Άλλα ζητήματα MAR (MAR και κλιματική αλλαγή, εφαρμογές MAR σε καρστικούς υδροφορείς, εφαρμογές MAR σε αστικές περιοχές, χρηματοδότηση εφαρμογής MAR για υδατική και επισιτιστική ασφάλεια, εκπαιδευτικές και περιβαλλοντικές θεωρήσεις αναφορικά με τη λειτουργία συστημάτων MAR)

9<sup>ο</sup> Διεθνές Συμπόσιο: SUSTAINABLE WATER MANAGEMENT SOLUTIONS TO SCARCITY AND CLIMATE CHANGE, ISMAR-9

Το 9<sup>ο</sup> Διεθνές Συμπόσιο για τον Τ.Ε. διοργανώθηκε στην πόλη του Μεξικό, στις 20-24 Ιουνίου 2016. Διοργανωτές ήταν το UNAM (National Autonomous University of Mexico) και το CONAGUA (National Water Commission) (<http://www.ismar9.org>):

- Στρατηγικές ολοκληρωμένης διαχείρισης υδατικών πόρων
- Κανονισμοί, οδηγίες, διαχείριση, οικονομικά στοιχεία που αφορούν σε εφαρμογές MAR
- Προσομοίωση συστημάτων MAR
- Ζητήματα γεωχημείας, μικροβιολογίας, δημόσιας υγείας σε εφαρμογές MAR
- MAR και κλιματική αλλαγή
- MAR σε αναπτυσσόμενες χώρες
- MAR σε σκληρά πετρώματα και σε συστήματα καρστ
- Συστήματα διήθησης, συστήματα SAT
- Καινοτομία σε γεωτρήσεις έγχυσης και ανάκτησης

- Σχεδιασμός και λειτουργία φραγμών σε θαλάσσια διείσδυση
- MAR και επαναχρησιμοποίηση νερού
- Συστήματα συλλογής νερού από βροχόπτωση και καταιγίδες και MAR
- Συλλογή πλημμυρικών απορροών μέσω MAR
- Ποιότητα νερού και επιλογή μεθόδων επεξεργασίας
- MAR και υδροφορείς υπό εξάντληση και προστασία οικοσυστημάτων εξαρτώμενων από υπόγειο νερό

10<sup>ο</sup> Διεθνές Συμπόσιο, ISMAR-10

Το 10<sup>ο</sup> Διεθνές Συμπόσιο για τον Τ.Ε. διοργανώθηκε στη Μαδρίτη, Ισπανία, στις 20-24 Μαΐου 2019. Διοργανωτές: Tragsa Group, Instituto Geológico y Minero de España (IGME) και International Water Resources Association (IWRA) (<http://ismar10.net/>):

- MAR και ολοκληρωμένη διαχείριση υδατικών πόρων
- MAR και κλιματική αλλαγή
- MAR και επαναχρησιμοποίηση νερού
- MAR σε αναπτυσσόμενες χώρες
- Κανονισμοί, διαχείριση, οικονομικά στοιχεία που αφορούν σε εφαρμογές MAR
- Προσομοίωση συστημάτων MAR
- Ζητήματα υγείας - απομάκρυνση και απο μείωση μικροοργανισμών και οργανικών ενώσεων
- Ζητήματα γεωχημείας σε εφαρμογές MAR
- Λειτουργία και διαχείριση εναλλακτικών συστημάτων εμπλουτισμού
- Ανάλυση κινδύνου, δείκτες και συγκριτική αξιολόγηση
- Ζητήματα υγείας
- Μέθοδοι και στρατηγικές MAR
- SMARTS: Sustainable Managed aquifer Recharge Technical Solutions
- Κυκλική οικονομία MAR

11<sup>ο</sup> Διεθνές Συμπόσιο, ISMAR-11

Το 11<sup>ο</sup> Διεθνές Συμπόσιο για τον Τ.Ε. διοργανώθηκε στο Long Beach, στην Καλιφόρνια, ΗΠΑ, στις 11-15 Απριλίου 2022. Διοργανωτής: The Groundwater Resources Association of CA (<http://ismar11.net/>):

- ASR
- MAR - Γεωφυσικά
- MAR - Αναδυόμενοι ρύποι
- MAR - Πλημμύρες
- MAR στον διεθνή χώρο
- MAR - Ολοκληρωμένη Διαχείριση Υδατικών Πόρων
- MAR - Περιβάλλον
- MAR - Τεχνικές και σχεδιασμός
- MAR - Αγορές νερού
- Ο ρόλος της MAR Διακυβέρνησης και Πολιτικής

**10.6. Ημερίδα: Τεχνητός Εμπλουτισμός υπόγειων υδροφορέων (Ελληνική Επιτροπή Υδρογεωλογίας – Ελληνική Γεωλογική Εταιρεία, 1999)**

Η Ελληνική Επιτροπή Υδρογεωλογίας της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρείας (Ε.Γ.Ε.) σε συνεργασία με το Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης και το Νομαρχιακό Διαμέρισμα Ξάνθης,

διοργάνωσε Ημερίδα με θέμα: “Τεχνητός Εμπλουτισμός Υπόγειων Υδροφορέων” στην Ξάνθη, στο Αμφιθέατρο της Πολυτεχνικής Σχολής του Δημοκρίτειου Πανεπιστημίου Θράκης, στις 28 Μαΐου 1999, όπου παρουσιάστηκαν 15 εργασίες με θέματα σχετικά με τον ΤΕ στην Ελλάδα και την Κύπρο.

## **11. ΕΡΕΥΝΕΣ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΕΧΝΗΤΟΥ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΥ ΣΤΟ ΔΙΕΘΝΗ ΧΩΡΟ ΚΑΙ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ**

(κύρια βιβλιογραφική πηγή: Διαμαντής και Πλιάκας, 2011)

### **11.1. Διεθνής εμπειρία**

Ο Τ.Ε. άρχισε να εφαρμόζεται στην Ευρώπη, στις αρχές του 19ου αιώνα με τη μορφή του επαγωγικού εμπλουτισμού για την υδροδότηση πόλεων (Γλασκώβη - Σκωτία 1810, Τουλούζη - Γαλλία 1820) (Huisman and Olsthoorn, 1983) και στις Η.Π.Α., τη τελευταία δεκαετία του ίδιου αιώνα (στο Denver με λεκάνες κατάκλισης, στην Καλιφόρνια με άρδευση) (Pettyjohn, 1981). Η εφαρμογή του Τ.Ε. έχει σταθερά αυξηθεί σε ολόκληρο τον κόσμο από τότε και κυρίως από τις δεκαετίες του '50 και του '60 και μετά, όταν η "δεύτερη βιομηχανική επανάσταση" συνέβαλε στην όλο και μεγαλύτερη με το χρόνο ρύπανση των επιφανειακών νερών των ποταμών, με συνέπεια το πόσιμο νερό να αποτελεί σε πολλές περιοχές δυσεύρετο και ακριβό αγαθό (Huisman and Olsthoorn, 1983).

Η μεγαλύτερη χρήση του Τ.Ε. αποσκοπεί στην επαναπλήρωση μειωμένων διαθέσιμων ποσοτήτων υπόγειων νερών για την κάλυψη αστικών, βιομηχανικών και αρδευτικών αναγκών ή στη βελτίωση της ποιότητάς τους. Προχωρημένες τεχνικές εφαρμόζονται στη Γερμανία, Σουηδία, Ισραήλ, Αίγυπτο, Αλγερία, Ιράν, Λιθουανία, Τουρκμενιστάν, Ουζμπεκιστάν, Ουκρανία. Ο Τ.Ε. εφαρμόζεται, επίσης, ευρέως για τον έλεγχο της διείσδυσης της θάλασσας σε παράκτιες περιοχές της Αυστραλίας, των Κάτω Χωρών, του Ισραήλ, του Μαρόκο, της Σενεγάλης, των Η.Π.Α., της Ιαπωνίας. Στην Ιαπωνία ο Τ.Ε. χρησιμοποιείται και στην αντιμετώπιση προβλημάτων καθίζησης σε περιοχές υπερβολικής άντλησης. Στη Ρουμανία, Βουλγαρία και Γαλλία ο Τ.Ε. συμβάλλει στη συμπλήρωση του νερού άρδευσης που προέρχεται από υπόγειες τροφοδοσίες (Pettyjohn, 1981).

Στις Η.Π.Α., από το 1950 κυρίως και μέχρι σήμερα, ο Τ.Ε. εφαρμόζεται σε όλες σχεδόν τις πολιτείες με μια μεγάλη ποικιλία μεθόδων και στόχων. Οι μεγάλες εγκαταστάσεις αποσκοπούν κυρίως στον περιορισμό της διείσδυσης της θάλασσας σε παράκτιες περιοχές ή στην επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων αποβλήτων. Η μεγαλύτερη σε έκταση προσπάθεια εφαρμογής Τ.Ε. συντελείται στην Καλιφόρνια (Pettyjohn, 1981).

Η χρήση αποβλήτων για εμπλουτισμό εφαρμόστηκε στην Αθήνα των προχριστιανικών χρόνων, ενώ η χρήση λυμάτων στον εμπλουτισμό με άρδευση έγινε στη Γερμανία, τον 16ο αιώνα (Pettyjohn, 1981). Η μέθοδος αυτή διαδόθηκε σε όλη την Ευρώπη και συνεχίστηκε στις αποικίες, όπως τη Ν.Αφρική, την Αυστραλία, το Μεξικό, όπου πολλές από τις μεγάλες φάρμες εφήρμοσαν υπόγεια στραγγιστήρια για να μεταφέρουν το πλεόνασμα του υπόγειου νερού του Τ.Ε. σε γειτονικούς χειμάρρους. Σε ημίξερους περιοχές των Η.Π.Α. (Καλιφόρνια, Αριζόνα, Φλόριδα κ.α.) αλλά και στο Ισραήλ (Τελ-Αβίβ) εφαρμόζεται με επιτυχία επί σειρά ετών εμπλουτισμός με τη μέθοδο της φυσικής επεξεργασίας υγρών αποβλήτων μέσω του εδάφους - υδροφορέα, γνωστή διεθνώς με την ονομασία "Soil Aquifer Treatment", (S.A.T.) και με αποτέλεσμα την ικανοποίηση αναγκών διάφορων χρήσεων, κυρίως της άρδευσης. Στο Ορλάντο της Φλόριδας (Η.Π.Α.) λειτουργεί, από το 1987, το μεγαλύτερο σύστημα επαναχρησιμοποίησης επεξεργασμένων αστικών υγρών αποβλήτων των Η.Π.Α. για άρδευση και εμπλουτισμό του υπόγειου υδροφορέα μέσω λεκανών διήθησης (Παπαδόπουλος, et al., 1995).

Στις περισσότερες χώρες - κράτη μέλη της Ε.Ε. ο Τ.Ε. εφαρμόζεται με μια μεγάλη ποικιλία και εύρος εφαρμογών, ενώ υπάρχουν σχέδια για μελλοντική και συστηματικότερη ανάπτυξή του. Στην Ιρλανδία, Ιταλία, Λουξεμβούργο και Πορτογαλία, δεν εφαρμόζεται Τ.Ε. και δεν

υπάρχουν σχέδια εφαρμογής του στο άμεσο μέλλον. Η Σουηδία, οι Κάτω Χώρες και η Γερμανία, σε εθνικό επίπεδο, βασίζονται σημαντικά στις εφαρμογές του Τ.Ε., ο οποίος συμμετέχει με 15-20% στο συνολικό όγκο των υδατικών πόρων κυρίως στις δύο πρώτες χώρες. Στη Γερμανία, το αντίστοιχο ποσοστό κυμαίνεται στο 10%, αλλά ποικίλλει αισθητά από πόλη σε πόλη. Είναι άξιο αναφοράς ότι στην κοιλάδα Ruhr, ο Τ.Ε. έχει εφαρμοστεί συστηματικά ήδη για μεγάλο χρονικό διάστημα (περίπου έναν αιώνα). Στο Βέλγιο, Δανία, Γαλλία, Ελλάδα, Αγγλία, Ισπανία, Ελβετία, ο Τ.Ε. αντιπροσωπεύει ελάχιστο μόνο ποσοστό του νερού που διατίθεται από εταιρείες εθνικές ή δημοτικές, χωρίς βέβαια να εξαιρούνται περιπτώσεις καθαρά τοπικού χαρακτήρα, όπου έχουμε σημαντική ανατροπή του ποσοστού αυτού. Τρεις είναι οι βασικοί σκοποί εφαρμογής του Τ.Ε. σε όλες τις χώρες που προαναφέρθηκαν. Ο πρώτος και κυριότερος είναι η παροχή δημόσιου νερού. Ο δεύτερος είναι να προκύψουν έμμεσα περιβαλλοντικά οφέλη (Βέλγιο, Κάτω Χώρες, Αγγλία). Ο τρίτος είναι η διατήρηση ή βελτίωση της ποιότητας του νερού. Η πιο κοινή μέθοδος εφαρμογής Τ.Ε. (πιθανόν πάνω από 90%) είναι εκείνη της λεκάνης κατάκλισης κοντά στις όχθες μεγάλων ποταμών, απ' όπου προέρχεται και το νερό εμπλουτισμού. Σε μικρότερη έκταση χρησιμοποιούνται τα κανάλια, οι λίμνες και οι λιμνοδεξαμενές. Μέθοδοι με επεξεργασμένα λύματα εφαρμόζονται στη Δανία, ενώ υπάρχουν σχέδια για ανάλογη εφαρμογή και στην Ελλάδα στην περιοχή του Ηρακλείου Κρήτης. Η οικονομική ενθάρρυνση για την ανάπτυξη του Τ.Ε. στην Ευρώπη είναι περιορισμένη και παρουσιάζεται με δύο μορφές: α) την άμεση οικονομική υποστήριξη (Δανία, Γαλλία) και β) τη μείωση του κόστους χρέωσης της απόληψης νερού (Κάτω Χώρες, Αγγλία) (Connorton and McIntosh, 1995).

Στην Κύπρο, από το 1982, έχει εφαρμοστεί συστηματικά ο Τ.Ε. με μεθόδους κυρίως κατάκλισης (λιμνοδεξαμενές σε αλλουβιακές αποθέσεις) σε μεγάλους υδροφορείς του νησιού (Γερμασόγειας, Ακρωτηρίου, Ξεροποτάμου και Μαρωνίου), με στόχο την κάλυψη αναγκών ύδρευσης και άρδευσης αλλά και την αντιμετώπιση της θαλάσσιας διείσδυσης. Οι υδροφορείς αυτοί έχουν στερηθεί το φυσικό τους εμπλουτισμό λόγω κατασκευής ανάντη ταμιευτήρων (Γεωργίου, 1992). Σε πειραματική βάση έχουν διεξαχθεί και γεωτρήσεις εμπλουτισμού με όχι όμως μέχρι στιγμής ενθαρρυντικά αποτελέσματα. Το 1993 άρχισε να λειτουργεί ένα σύστημα 120 απορροφητικών έργων (17 γεωτρήσεις και 103 πηγάδια) εμπλουτίζοντας με όμβρια νερά τον παράκτιο υδροφόρα των Κοκκινοχωρίων. Οι διάφορες μέθοδοι τεχνητού εμπλουτισμού που έχουν εφαρμοστεί είναι: εμπλουτιστικά φράγματα, κατασκευή μικρών εμπλουτιστικών φραγμάτων κατά μήκος της κοίτης των χειμάρρων, ετήσια διαμόρφωση και καλλιέργεια της κοίτης των χειμάρρων, κατασκευή εμπλουτιστικών δεξαμενών παραπλεύρως της κοίτης, τεχνητός εμπλουτισμός με ελεγχόμενη ροή νερού στην κοίτη, κατάντη φραγμάτων, τεχνητός εμπλουτισμός μέσω εξω-ποτάμιων δεξαμενών, τεχνητός εμπλουτισμός μέσω γεωτρήσεων (Κωνσταντίνου και Γεωργίου, 1999).

### **Περιπτώσεις εφαρμογής τεχνητού εμπλουτισμού στο διεθνή χώρο**

(κύρια βιβλιογραφική πηγή: Κουμαντάκης, 1999)

☑ Στις Η.Π.Α., από το 1950 κυρίως και μέχρι σήμερα, ο Τ.Ε. εφαρμόζεται σε όλες σχεδόν τις πολιτείες με μια μεγάλη ποικιλία μεθόδων και στόχων. Οι μεγάλες εγκαταστάσεις αποσκοπούν κυρίως στον περιορισμό της διείσδυσης της θάλασσας σε παράκτιες περιοχές ή στην επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων αποβλήτων. Η μεγαλύτερη σε έκταση προσπάθεια εφαρμογής Τ.Ε. συντελείται στην Καλιφόρνια, όπου η εφαρμογή τεχνητού εμπλουτισμού στην παραλιακή πεδιάδα Oknard της Κεντρικής Καλιφόρνιας (Berger and Gientke, 1998) αποτελεί ένα ενθαρρυντικό παράδειγμα αντιμετώπισης της υφαλμύρισης.

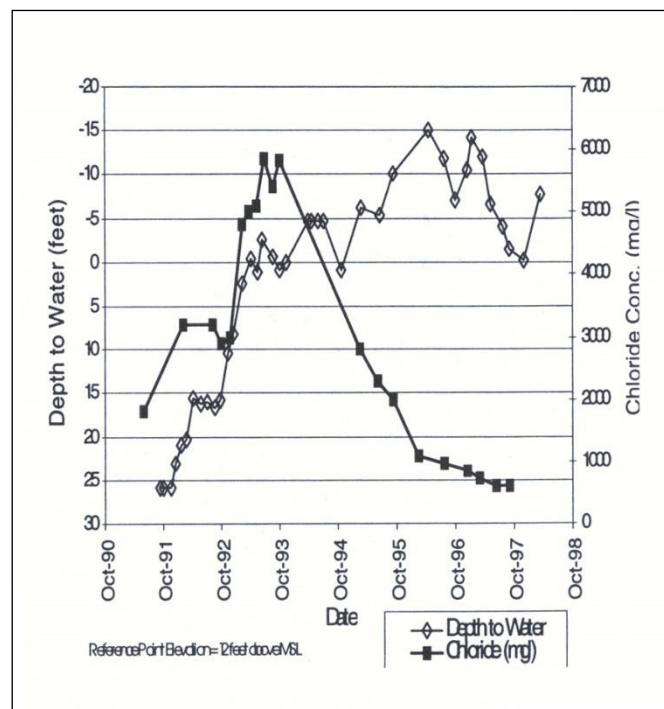
Πρόκειται για μια αλλουβιακή πεδινή παραθαλάσσια έκταση 142 Km<sup>2</sup> με πλούσια αγροτική δραστηριότητα. Οι αρδευτικές ανάγκες καλύπτονται από την πλούσια υπόγεια υπό πίεση υδροφορία η οποία αναπτύσσεται κάτω από τα επιφανειακά αργιλικά στρώματα. Η αυτόματη αρτεσιανή ροή από τις γεωτρήσεις έφθανε πριν από ένα αιώνα, έως το 2<sup>ο</sup> όροφο των κατοικιών.

Από το 1940 η στάθμη των υπόγειων νερών προοδευτικά μειωνόταν και από το 1950 άρχισε να εμφανίζεται το φαινόμενο της διείσδυσης της θάλασσας, η οποία σύντομα έγινε αισθητή στα πηγάδια και γεωτρήσεις της παραθαλάσσιας ζώνης. Τα 35 χρόνια που ακολούθησαν η προώθηση του μετώπου υφαλμύρισης προς το εσωτερικό υπήρξε συνεχής και εκατοντάδες υδροληπτικά έργα υπόγειων νερών αχρηστεύτηκαν.

Για να αντιμετωπισθεί η κατάσταση αυτή, άρχισαν από το 1955 να λαμβάνονται διάφορα μέτρα. Μεταξύ αυτών περιλαμβάνεται η κατασκευή φράγματος και δημιουργία ταμιευτήρα χωρητικότητας  $107 \times 10^6 \text{ m}^3$ , με ελεγχόμενη διάθεση του νερού για τεχνητό εμπλουτισμό των υπόγειων υδροφόρων, μέσω της κοίτης του ποταμού Santa Clara κατάντη του φράγματος και μέσω λεκανών κατάκλυσης-διήθησης στην πεδιάδα. Η κατασκευή του ταμιευτήρα επέδρασε και άμεσα ευνοϊκά περιορίζοντας τις ετήσιες αντλούμενες ποσότητες υπόγειων νερών μια και τα νερά του χρησιμοποιούνταν απ' ευθείας για αρδεύσεις και ύδρευση.

Τα ανωτέρω και άλλα επιπρόσθετα μέτρα που ελήφθησαν τη 10ετία του '80 (ελάττωση των αντλήσεων, απαγόρευση διάνοιξης γεωτρήσεων, δημιουργία φορέα διαχείρισης των υπόγειων νερών κ.τ.λ.) οδήγησαν σε σημαντική ανύψωση της στάθμης (σχ. 54). Μέχρι το 1996 αποκαταστάθηκε σε μεγάλη έκταση το καθεστώς της αυτόματης αρτεσιανής ροής.

Στην παραλιακή ζώνη ο αρτεσιανισμός είχε αποκατασταθεί από τις αρχές του 1993. Παρά το γεγονός όμως ότι η ανύψωση της στάθμης από το 1991 έως το 1993 ήταν συνεχής και έφθασε περί τα 17μ., η περιεκτικότητα των υπόγειων νερών σε χλωριόντα συνέχισε να αυξάνεται μέχρι το τέλος του 1993, για να ελαττωθεί έκτοτε σημαντικά και από 6.000 mg/l να φθάσει σε 500 mg/l το τέλος του 1997 (σχ. 11.1)



Σχήμα 11.1. Διάγραμμα μεταβολής στάθμης υπόγειων νερών και συγκέντρωσης χλωριόντων (10/1990 – 10/1998) στην παράκτια πεδιάδα Oxnard Καλιφόρνιας (Κουμαντάκης, 1999).

Πέρασαν δηλαδή περισσότερο από 40 χρόνια από την έναρξη εφαρμογής μέτρων προστασίας και αποκατάστασης για να γίνει αισθητή η βελτίωση της ποιότητας των υφαλμυρισμένων υπόγειων νερών.

Στην κατεύθυνση της περαιτέρω βελτίωσης της ποιότητας αποσκοπεί και το σχέδιο που βρίσκεται σε στάδιο μελέτης και πιλοτικής εφαρμογής και αφορά την εισπίεση-διοχέτευση στον

υδροφορέα  $25 \times 10^6 \text{ m}^3$  ετησίως προερχομένων από υψηλής επεξεργασίας υγρά απόβλητα της πόλης Oxnard.

Μια ακόμη χαρακτηριστική περίπτωση που αφορά απώθηση του μετώπου υφαλμύρισης μέσω τεχνητού εμπλουτισμού, προέρχεται από το Ομάν (Al Battashi and Ali, 1998). Συγκεκριμένα μετά από το 1992 όπου λειτούργησε το φράγμα εμπλουτισμού Al Fulayi, η στάθμη του παραλιακού υδροφόρου ανυψώθηκε κατά 4-7 m, λόγω μέσης ετήσιας τεχνητής φόρτισης του με  $2,5 \times 10^6 \text{ m}^3$ . Η αλλαγή αυτή επέφερε βελτίωση της ποιότητας των νερών κατά 40% περίπου. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα στα παραλιακά πηγάδια από 10.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  μειώθηκε κάτω των 6.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

Ως γνωστόν μια από τις βασικές απαιτήσεις του τεχνητού εμπλουτισμού είναι η χρησιμοποίηση νερού καλής ποιότητας για τη διοχέτευση και αποθήκευσή του σ' ένα υδροφόρο ορίζοντα. Σε αντίθετη περίπτωση απαιτούνται παρεμβάσεις και έργα βελτίωσης της ποιότητας.

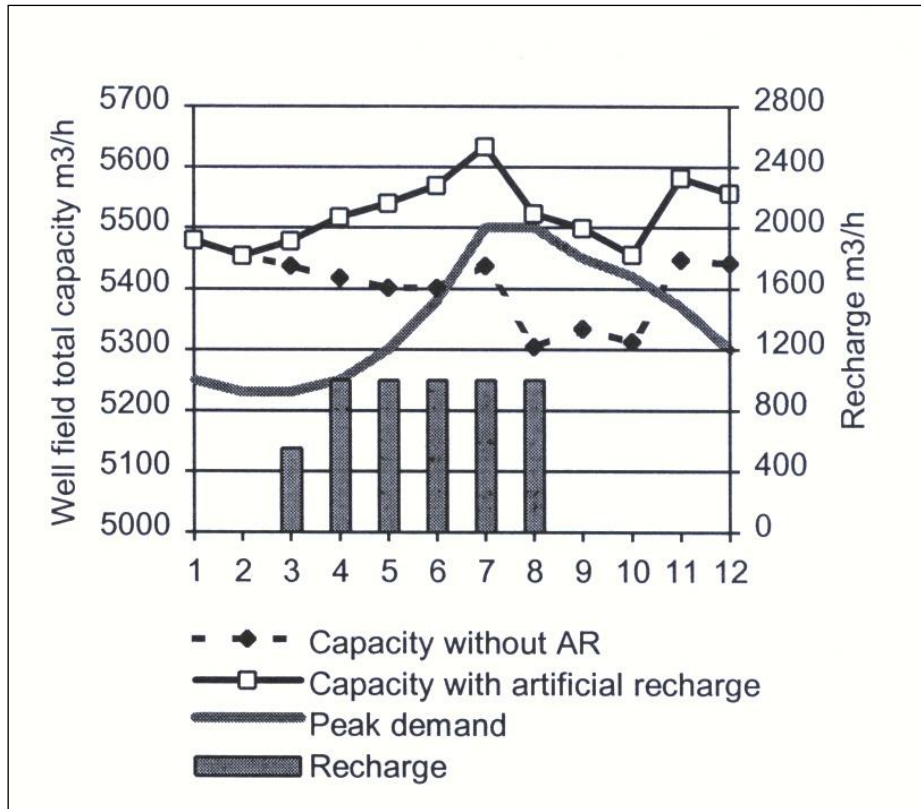
Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η εφαρμογή τεχνητού εμπλουτισμού στην περιοχή Παρισίων με νερά του Σηκουάνα (Haefner et al., 1998). Περισσότερο από 35 χρόνια η "Lyonnaise des Eaux" έχει εφαρμόσει τεχνικές τεχνητού εμπλουτισμού στα δύο μεγαλύτερα πεδία που προμηθεύουν το Δυτικό Παρίσι με υπόγεια νερά του αλλουβιακού υδροφόρου. Πρόκειται για τις περιοχές Croissy-sur-Seine ( $300.000 \text{ m}^3$  ημερησίως) και Flins-Aubergenville (σχ. 11.2) ( $150.000 \text{ m}^3$  ημερησίως).

Κάθε χρόνο 54 εκατομμύρια  $\text{m}^3$  νερού εμπλουτίζουν τον υδροφόρο, προερχόμενα από τον Σηκουάνα. Αφού υποστούν μια σειρά από διαδικασίες καθαρισμού (clarification, settling, filtration), οδηγούνται σε μια περιοχή 150 στρεμμάτων με λεκάνες διήθησης και υδατοπτώσεις αερισμού.

Προϋπόθεση για τη διατήρηση και καλή λειτουργία των λεκανών διήθησης είναι η μη έμφραξη των πόρων (clogging) των εδαφικών υλικών του πυθμένα και των πλευρών τους. Ο καθαρισμός τους συνίσταται στη διακοπή της τροφοδοσίας με νερό, την αναμονή επί μια εβδομάδα περίπου, την αφαίρεση του οργανικού στρώματος, των μακροφύτων και των φυκών και στη συνέχεια στην αναμόχλευση της ανώτερης ζώνης, πάχους 30 cm, για την καταστροφή της δομής που έχει προκύψει από την απόφραξη.

Οι περίοδοι πλήρωσης των λεκανών διήθησης κυμαίνονται από πέντε (5) εβδομάδες έως ένα (1) χρόνο. Ο συντελεστής διήθησης, ο οποίος αντιστοιχεί στην ποσότητα του διηθούμενου νερού ανά  $\text{m}^2$  επιφάνειας ημερησίως, κυμαίνεται από 0,1 έως 3 m ημερησίως. Η τιμή του εξαρτάται από το ύψος του νερού μέσα στη λεκάνη (υδραυλικό φορτίο), από την υδροπερατότητα των εδαφικών υλικών του πυθμένα και των πρανών της (η οποία ελαττώνεται με το χρόνο λόγω έμφραξης) και από την μέση θερμοκρασία αέρα και νερού η αύξηση της οποίας ευνοεί την ανάπτυξη υδρόβιων φυτικών οργανισμών.

Για όλες τις λεκάνες διήθησης, διαπιστώθηκε ότι σε μια αρχική χρονική φάση, ο συντελεστής διήθησης έχει μικρές τιμές εξ αιτίας της υφιστάμενης ανάγκης εκδίωξης του αέρα από τους πόρους της ακόρεστης ζώνης και της προκύπτουσας μείωσης της διηθητικής ικανότητάς της. Η χρονική αυτή φάση διαρκεί από 1 έως 4 εβδομάδες.



Σχήμα 11.2. Παράδειγμα εφαρμογής Τ.Ε. υδροφόρου πεδίου (Flins – Aubergenville Παρίσι) ως μεθόδου βέλτιστης διαχείρισης για αντιμετώπιση της αιχμής της ζήτησης νερού (Κουμαντάκης, 1999).

Δεχόμενοι ότι η απόφραξη μιας λεκάνης διήθησης εξαρτάται από το χρόνο και τον διηθούμενο όγκο νερού, ο μέγιστος διηθούμενος όγκος επιτυγχάνεται με το μέγιστο ύψος νερού μέσα στη λεκάνη.

Διαπιστώθηκε ότι η ικανότητα διήθησης των λεκανών, μένει σχεδόν σταθερή το χειμώνα, ενώ την άνοιξη και το καλοκαίρι μια μείωσή της μεγαλύτερη του 50% μπορεί να πραγματοποιηθεί σε μερικές εβδομάδες, λόγω της κυρίαρχης δράσης των φυκών (που αναπτύσσονται τις εποχές αυτές) στην διαδικασία της έμφραξης (clogging).

Δεδομένου όμως ότι, όπως διαπιστώθηκε, κυρίαρχη είναι η δράση των φυκών και στη βελτίωση της ποιότητας των νερών (π.χ. μείωση νιτρικών, φωσφορικών κ.ά.), πρέπει να αναζητείται και να επιτυγχάνεται ο βέλτιστος χρονικός κύκλος καθαρισμού των λεκανών διήθησης, αλλά ταυτόχρονα και ένα καλό επίπεδο βελτίωσης της ποιότητας των νερών.

Σημαντική επίσης είναι η διαπίστωση που αφορά την απομάκρυνση επιβλαβών μετάλλων και παθογόνων (ιοί, βακτήρια και παράσιτα), καθώς και φυτοφαρμάκων-ζιζανιοκτόνων με προσθήκη, σ' αυτή την περίπτωση, σκόνης ενεργού άνθρακα κατά τη διαδικασία προεπεξεργασίας καθαρισμού.

Νερό υποβαθμισμένης ποιότητας, χωρίς επεξεργασία καθαρισμού, χρησιμοποιήθηκε επίσης στο Buston, περί τα 150 Km βορειοδυτικά του Καίρου, προερχόμενο από τον Νείλο (Attia et al., 1998). Τρία πειράματα που έγιναν το 1996 σε μια λεκάνη διήθησης 135×155 m, βάθους 2,5 m, έδειξαν διακύμανση του συντελεστή διήθησης 0,35 m/d έως 0,08 m/d (μέση τιμή 0,13 m/d).

Διαπιστώθηκε βαθμιαία έμφραξη (clogging) του πυθμένα της λεκάνης, οφειλόμενη κυρίως σε καθίζηση των αιωρούμενων σωματιδίων του νερού, η οποία ευνοήθηκε από το μεγάλο



ύψος της στήλης νερού μέσα σ' αυτήν. Για την αποφυγή πλήρους απόφραξης απαιτείται καθαρισμός του πυθμένα.

Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων αυτών, ο υδροφόρος ορίζοντας εμπλουτίστηκε με 240.000 m<sup>3</sup> νερού. Άλλα τρία πειράματα την περίοδο 1997-98 εμπλούτισαν τον υδροφόρο με 800.000 m<sup>3</sup>.

Η μέγιστη ανύψωση που παρατηρήθηκε στο κέντρο της λεκάνης στον εμπλουτισμένο υδροφόρο, κυμάνθηκε μεταξύ 0,35 και 0,55 m, πραγματοποιήθηκε δε μέσα στις πρώτες πέντε (5) μέρες των πειραμάτων.

Στην αρχή των πειραμάτων διαπιστώθηκε αύξηση του TDS των εμπλουτιζόμενων υπόγειων νερών, λόγω απόπλυσης των συσσωρευμένων αλάτων της ακόρεστης ζώνης.

Με βάση τα δεδομένα των πειραμάτων προτάθηκε ένα σχέδιο ελεγχόμενης χρήσης του υδροφόρου συστήματος του Δέλτα του Νείλου ως υπόγειου ταμιευτήρα και ταυτόχρονα ως μέσου βελτίωσης της ποιότητας του νερού του ποταμού που θα χρησιμοποιείται για τον τεχνητό εμπλουτισμό του υδροφορέα (στρατηγική ανακύκλωσης).

Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποθήκευσης στο υπέδαφος με τεχνητό εμπλουτισμό, επιφανειακών ποτάμιων νερών, που μεταφέρονται από μεγάλη απόσταση, για να καλύψουν τη ζήτηση σε περιοχή με ημερημικό κλίμα, αποτελεί το Granite Reef Underground Storage Project (GRUSP) στο Phenix της Αριζόνας των Η.Π.Α. (Lluria, 1998).

Πρόκειται για την ταχύτερα αναπτυσσόμενη περιοχή των Η.Π.Α., στην οποία η μέση ετήσια βροχόπτωση αντιστοιχεί σε 180 mm. Τα διαθέσιμα στην ευρεία περιοχή νερά προς χρήση αποτελούν οι περιορισμένες επιφανειακές απορροές δύο μικρών υδατορευμάτων και τα υπόγεια νερά.

Αποτέλεσμα της έντονης αγροτικής δραστηριότητας από παλαιότερα και της πρόσφατης γρήγορης αστικοποίησης, υπήρξε η υπεράντληση του τοπικού υδροφόρου. Στο τέλος της δεκαετίας του 80 μεταφέρθηκαν νερά στην περιοχή από το ποταμό Colorado, με τον υδαταγωγό της κεντρικής Αριζόνας, μήκους 550 Km. Μέρος των νερών αυτών χρησιμοποιήθηκε για τεχνητό εμπλουτισμό του εξαντλημένου τοπικού υδροφόρου των αλλουβίων.

Ο υδροφόρος αυτός έχει ικανότητα ετήσιας επαναφόρτισης 240×10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>. Η ποσότητα αυτή αποτελεί μεγάλο μέρος του "εισαγόμενου" νερού του π. Colorado, το οποίο αποθηκεύεται υπογείως, για να αποληφθεί στις ξηρές περιόδους αιχμής της ζήτησης με γεωτρήσεις, δεδομένου ότι η επιφανειακή αποθήκευσή του αποδείχθηκε μέθοδος οικονομικώς, περιβαλλοντικώς και φυσικώς μη αποδεκτή.

Ο αλλουβιακός υδροφόρος έχει μεγάλη αποθηκευτική ικανότητα και η ακόρεστη ζώνη είναι πολύ υδροπερατή, με αποτέλεσμα την διαμόρφωση μεγάλου συντελεστή διήθησης, η τιμή του οποίου διατηρήθηκε σταθερή στο 1 m ημερησίως, χωρίς να παρατηρηθεί μετρήσιμη μείωσή της, παρά το γεγονός ότι αναπτύχθηκαν κατά τους ζεστούς θερινούς μήνες φύκη. Ταυτόχρονα αναπτύχθηκε ένας βιολογικός μηχανισμός αυτοκαθαρισμού, βοηθούμενος και από την χρήση λευκών ψαριών τα οποία ελάττωναν τα φύκη και το φορτίο του νερού σε βρύα. Έτσι δεν γίνεται αναγκαία η διαδικασία ξήρανσης των λεκανών διήθησης, απόξεσης και αναμόχλευσης του πυθμένα τους.

Ο σχεδιασμός των έργων τεχνητού εμπλουτισμού έγινε με τρόπο που να αξιοποιεί πλήρως τις τοπικές συνθήκες και τη βαρύτητα του νερού και να ελαχιστοποιεί το κόστος λειτουργίας τους, με αποτέλεσμα να επιτευχθεί πολύ χαμηλό κόστος αποθήκευσης νερού.

Πρόσφατα έχουν εγκατασταθεί αυτογραφικοί σταθμοί μέτρησης της παροχής του διοχετευόμενου νερού στις λεκάνες τεχνητού εμπλουτισμού, καθώς και της στάθμης μέσα σ' αυτές καθώς και στον εμπλουτιζόμενο υδροφόρο. Οι αυτόματες συνεχείς καταγραφές, μεταδίδονται τηλεματικά μέσω Internet σε προκαθορισμένα τερματικά και καθίσταται δυνατή η βέλτιστη διαχείριση του όλου συστήματος.

Οι συντελεστές διήθησης διαπιστώθηκε ότι επηρεάζονται από την θερμοκρασία του νερού και το βάθος των υπόγειων νερών.

Κατά την τριετή χρήση διαπιστώθηκε ότι η καλύτερη λειτουργία επιτυγχάνεται με ύψος νερού μέσα στις λεκάνες διήθησης 0,6 m. Μεγαλύτερο ύψος νερού ελαττώνει τον συντελεστή διήθησης, πιθανόν λόγω συμπύκνωσης των ιζημάτων του πυθμένα. Διαπιστώθηκε επίσης ότι το μέγιστο βάθος στάθμης των υπόγειων νερών κάτω από τις λεκάνες δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 15 m.

Για τη μεγιστοποίηση της απόδοσης του έργου, του ελέγχου του τεχνητού εμπλουτισμού και της ορθολογικής διαχείρισης των νερών, δημιουργείται ένα μοντέλο βελτιστοποίησης της λειτουργίας του. Το πλήθος των πληροφοριών που έχουν συγκεντρωθεί κατά τα τρία χρόνια λειτουργίας του θα χρησιμοποιηθούν για τη ρύθμισή του.

Σε περιοχές του κόσμου φτωχές σε διαθέσιμους υδατικούς πόρους, η ανάπτυξη και ένταξη σε διάφορες χρήσεις νέων υδατικών πόρων, αποτελεί πρωταρχικό εθνικό μέλημα.

Ετσι σε περιοχές με περιορισμένες βροχοπτώσεις και υψηλές θερμοκρασίες, σύνθετα έργα που οδηγούν τις φτωχές, πλημμυρικές συνήθως, επιφανειακές απορροές, σε προφυλαγμένη από την έντονη εξάτμιση υπόγεια αποθήκευση με τεχνητό εμπλουτισμό, αποτελούν ένα πολύ καλό “εργαλείο” δημιουργίας και διαχείρισης υδατικών πόρων.

Πολύ ενδιαφέρον σχετικό παράδειγμα προέρχεται από το Σουλτανάτο του Ομάν (Al Battashi and Ali, 1998) στη νοτιοανατολική γωνία της Αραβικής χερσονήσου, όπου η μέση ετήσια βροχόπτωση είναι 100 mm και ο συντελεστής εξάτμισης πολύ υψηλός. Ταξινομείται μεταξύ των ξηρών ημιορημικών περιοχών και δεν έχει υδατορέματα μόνιμης ροής.

Οι απαιτήσεις σε νερό του Σουλτανάτου καλύπτονται, με πολλές βεβαίως ελλείψεις, από τα υπόγεια νερά, ο τεχνητός εμπλουτισμός των οποίων είναι απολύτως απαραίτητος, λόγω της ανεπάρκειας της φυσικής επανατροφοδοσίας των υδροφόρων οριζόντων η οποία καλύπτει μόνο το 70% της ζήτησης.

Η υπεράντληση των περισσοτέρων υδροφόρων οριζόντων έχει προκαλέσει αρνητικό ισοζύγιο, πτώση της στάθμης των υπόγειων νερών και υποβάθμιση της ποιότητάς των. Στους παραλιακούς υδροφόρους έχει προκληθεί σημαντική υφαλμύριση.

Το σχέδιο τεχνητού εμπλουτισμού στο Ομάν, βασίζεται στην κατασκευή φραγμάτων με σκοπό τη δημιουργία μη στεγανών ταμιευτήρων που “συγκεντρώνουν” τις σπάνιες χειμαρρώδεις απορροές που παρατηρούνται κατά τις έντονες βροχοπτώσεις και τις βροχοπτώσεις διάρκειας πολλών ημερών. Η εμφάνιση πλημμυρικών απορροών παρατηρείται 4-5 φορές ετησίως στο βόρειο Ομάν και σπανιότατα στις ερημικές ζώνες. Οι εκτιμώμενες απώλειες πλημμυρικών απορροών προς τη θάλασσα ή την ερημική ζώνη κατά τα υγρά έτη είναι της τάξης των  $260 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{έτος}$ .

Περισσότερο από το 1/5 των απορροών αυτών κατακρατείται σήμερα και “αποθηκεύεται” σε 17 τεχνητούς ταμιευτήρες εμπλουτισμού που κατασκευάστηκαν μετά το 1985, χωρητικότητας κυμαινόμενης από 0,13 έως  $11,5 \times 10^6 \text{ m}^3$  (συνολική χωρητικότητα  $56,3 \times 10^6 \text{ m}^3$ ).

Μέσω των ταμιευτήρων αυτών πραγματοποιείται τεχνητός εμπλουτισμός των υπόγειων υδροφόρων με ποσότητες νερού που αντιστοιχούν στο 75% της χωρητικότητάς των. Οι στάθμες ανεβαίνουν πολλά μέτρα και ταυτόχρονα επέρχεται βελτίωση της ποιότητας των υπόγειων νερών, καθώς και απώθηση του μετώπου υφαλμύρισης στους παραλιακούς υδροφόρους.

Κατά την περίοδο μιας δετίας που οι ταμιευτήρες βρίσκονται σε χρήση, έχουν κατακρατηθεί σ’ αυτούς  $437 \times 10^6 \text{ m}^3$ . Επισημαίνεται ότι λόγω των κλιματικών συνθηκών παρατηρούνται χρονιές χωρίς εισροή νερού στους ταμιευτήρες. Στον ταμιευτήρα π.χ. Al Kabir τα τρία πρώτα χρόνια, οι ποσότητες νερών που συγκρατήθηκαν ήταν ελάχιστες, ενώ σε μια πλημμύρα τον Δεκ. 1995 συγκρατήθηκαν από το φράγμα  $13 \times 10^6 \text{ m}^3$  και πραγματοποιήθηκε και υπερχείλιση.

Το πιο χαρακτηριστικό παράδειγμα επιτυχούς λειτουργίας φραγμών στη θαλάσσια διείδυση με γεωτρήσεις εμπλουτισμού αποτελεί το σύστημα παρεμπόδισης των Alamitos and Dominguez Barrier Projects (Καλιφόρνια, ΗΠΑ). Τρεις φραγμοί (Alamitos, Dominguez Gap και West Coast Basin) προστατεύουν από τη θαλάσσια διείδυση γλυκό υπόγειο νερό όγκου

$39,471 \times 10^9 \text{ m}^3$ , διασφαλίζουν την παροχή νερού σε δύο εκατομμύρια κατοίκους, αποτελούν την πιο φθηνή λύση και διασφαλίζουν την παρουσία ενός στρατηγικού αποθέματος για περιπτώσεις ξηρασίας ή φυσικών καταστροφών. Συνολικά χρησιμοποιούνται 229 γεωτρήσεις εμπλουτισμού (με ικανότητα  $10,2\text{-}153 \text{ m}^3/\text{h}$ ). Ετησίως χρησιμοποιούνται για εμπλουτισμό  $37 \times 10^6 \text{ m}^3$  εισαγόμενου και ανακτημένου νερού αξίας  $0,5 \text{ €/m}^3$ . Πρόκειται για ένα περιβαλλοντικό σχέδιο διεθνούς σημασίας και για το μεγαλύτερο σύστημα παρεμπόδισης της θαλάσσιας διείσδυσης σε όλη τη Β. Αμερική (Lipshie and Larson, 1995). Το 80% του νερού εμπλουτισμού επαναχρησιμοποιείται. Οι απώλειες σε νερό για τη συντήρηση των φραγμών κυμαίνονται μεταξύ  $7,389 \times 10^6$  έως  $8,631 \times 10^6 \text{ m}^3$  το έτος. Η επιβεβαιωμένη μέγιστη ποσότητα που μπορεί να αντληθεί ετησίως φθάνει τα  $347,5 \times 10^6 \text{ m}^3$ .

Το Water Factory 21 στην California, ΗΠΑ, αποτελεί ένα άλλο παράδειγμα εφαρμογής τεχνητού εμπλουτισμού (Wicks and Herman, 1996). Το Water Factory 21 είναι μονάδα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων που παράγει ημερησίως  $1.627.772 \text{ m}^3$  ανακτημένου νερού για τη συντήρηση του υδραυλικού φραγμού Talbert, που παρεμποδίζει τη θαλάσσια διείσδυση στην υδρογεωλογική λεκάνη της Orange County στην California. Για τη δημιουργία του φραγμού χρησιμοποιούνται 23 γεωτρήσεις εμπλουτισμού πολλαπλών σημείων με συνολικά 81 ιδιαίτερα σημεία εμπλουτισμού. Η μέθοδος στηρίζεται στη δημιουργία υβώματος γλυκού νερού ανάμεσα στην υδρογεωλογική λεκάνη και στον ωκεανό, που επιτρέπει την ασφαλή άντληση υπόγειου νερού κάτω από το επίπεδο της θάλασσας. Το κόστος του νερού, που αποτελείται κατά 62% από ανακτημένο και κατά 38% από βαθύ υπόγειο νερό, είναι  $0,28 \text{ € / m}^3$ . Από τους βαθιές υδροφόρους αντλούνται ημερησίως  $32.554 \text{ m}^3$ , ενώ  $18.502.500 \text{ m}^3$  ανακτημένου νερού, σήμερα, διασφαλίζουν την παρεμπόδιση της θαλάσσιας διείσδυσης και την ικανοποίηση του 75% των αναγκών σε νερό μέσω αντλήσεων από την υπόγεια υδρογεωλογική λεκάνη της περιοχής. Σήμερα, μελετάται η χρησιμοποίηση της τηλεμετρίας στην αυτόματη ενεργοποίηση των φραγμών.

Στην περιοχή της Florida, ΗΠΑ, (Sherwood and Grantham, 1966) επιτεύχθηκε σημαντική αξιοποίηση αβαθών παράκτιων ελεύθερων υδροφόρων μέσω της δημιουργίας υδραυλικού υβώματος με τη χρησιμοποίηση κατασκευών ελέγχου αλατότητας σε κανάλια αποστράγγισης κοντά στην ακτή. Το σύστημα αυτό είναι πιο ευέλικτο, με λιγότερα μειονεκτήματα και επιτρέπει απολήψεις μεγαλύτερες κατά το 1/3 αυτών που απαιτούνται για τη δημιουργία ενός κοιλώματος άντλησης καθώς και μικρότερη συνολικά ποσότητα γλυκού νερού από αυτήν που απαιτείται για τη δημιουργία υδραυλικού υβώματος.

Η PWN Water Supply Company, στη βόρεια Ολλανδία, έθεσε σε λειτουργία από τις αρχές του 1990 ένα σύστημα παρεμπόδισης της θαλάσσιας διείσδυσης με βαθιές γεωτρήσεις εμπλουτισμού με προεπεξεργασμένα επιφανειακά νερά, στο πλαίσιο του προγράμματος DWAT, που αποτελείται από 20 γεωτρήσεις εμπλουτισμού, 12 παραγωγικές γεωτρήσεις άντλησης και 10 γεωτρήσεις παρακολούθησης (Stakelbeek, 1999). Η ικανότητα εμπλουτισμού του συστήματος είναι  $5 \text{ Mm}^3/\text{έτος}$ . Ο εμπλουτισμός και η ταυτόχρονη άντληση πραγματοποιούνται σ' έναν αμμώδη υδροφορέα σε βάθος 50 – 100 m κάτω από το επίπεδο της θάλασσας, με λεπτό αργιλικό υπόβαθρο, κάτω από το οποίο το υπόγειο νερό είναι υφάλμυρο. Η μέθοδος αυτή εκτιμάται ότι πλεονεκτεί λόγω του μικρής απαιτούμενης έκτασης εφαρμογής της και των σχετικά μικρών υδρολογικών και οικολογικών επιπτώσεών της.

Προσπάθειες παρεμπόδισης της θαλάσσιας διείσδυσης έγιναν και σε άλλες χώρες του κόσμου. Ο Favor (1967) αναφέρεται στην προστασία του υπόγειου νερού με τη χρησιμοποίηση τεχνητού εμπλουτισμού και φραγμάτων στην πρώην Σοβιετική Ένωση. Οι Aurelli et al. (1986) αναφέρονται στον έλεγχο της θαλάσσιας διείσδυσης μέσω τεχνητού εμπλουτισμού στην Ιταλία. Οι Al Battashi et al. (1998) αναφέρονται στην κατασκευή φραγμάτων εμπλουτισμού σε ένα Wadis του Oman για την προστασία παράκτιων

υδροφόρων από τη θαλάσσια διείσδυση. Οι Das Gupta et al. (1999) εξέτασαν την κατασκευή υπόγειου φράγματος για αποθήκευση βρόχινου νερού και εμπλουτισμό του νησιωτικού παράκτιου υδροφόρου στην Ταϊλάνδη.

### **Εφαρμογές τεχνητού εμπλουτισμού στην Κύπρο – Προβλήματα**

(κύρια βιβλιογραφική πηγή: Κωνσταντίνου και Γεωργίου, 1999)

Στην Κύπρο επικρατούν ξηρές έως ημίξηρες κλιματικές συνθήκες, με ανομοιογενή κατανομή των βροχοπτώσεων και με σύνθητες το φαινόμενο ύπαρξης συνεχόμενων άνομβρων χρόνων. Από το 1982, έχει εφαρμοστεί συστηματικά ο Τ.Ε. με μεθόδους κυρίως κατάκλισης (λιμνοδεξαμενές σε αλλουβιακές αποθέσεις) σε μεγάλους υδροφορείς του νησιού (Γερμασόγειας, Ακρωτηρίου, Ξεροποτάμου και Μαρωνίου), με στόχο την κάλυψη αναγκών ύδρευσης και άρδευσης αλλά και την αντιμετώπιση της θαλάσσιας διείσδυσης. Οι υδροφορείς αυτοί έχουν στερηθεί το φυσικό τους εμπλουτισμό λόγω κατασκευής ανάντη ταμιευτήρων (Γεωργίου, 1992). Σε πειραματική βάση έχουν διεξαχθεί και γεωτρήσεις εμπλουτισμού με όχι όμως μέχρι στιγμής ενθαρρυντικά αποτελέσματα.

Ο εμπλουτισμός των πεδινών και παράκτιων υδροφορέων της Κύπρου γίνεται κυρίως μέσω των ποταμών που αποστραγγίζουν τον ορεινό όγκο του Τροόδους. Συνεπώς η κατασκευή των επιφανειακών ταμιευτήρων στέρησε ένα σημαντικό μέρος από τον εμπλουτισμό των υδροφορέων αυτών. Επίσης, η έντονη γεωργική δραστηριότητα και συγκεκριμένα η κατακόρυφη αύξηση των αρδευόμενων εκτάσεων που έγινε κατά τα τελευταία 40 χρόνια, προκάλεσε αύξηση στη ζήτηση νερού, με αποτέλεσμα να δημιουργηθεί αρνητική υδατικό ισοζύγιο σε αρκετούς υδροφορείς, ενώ στους παράκτιους υδροφορείς παρατηρήθηκαν φαινόμενα υφαλμύρινσης.

Γρήγορα διαφάνηκε η ανάγκη για ενίσχυση των υδροφορέων με τεχνικές μεθόδους. Οι πρώτες προσπάθειες τεχνητού εμπλουτισμού ξεκίνησαν από τους ίδιους του γεωργούς, με κατασκευή εμπλουτιστικών δεξαμενών και εκτροπή μέρους της ροής των ποταμών. Το κράτος συνέχισε την προσπάθεια αυτή με πιο συστηματικές μεθόδους, κατασκευάζοντας μικρά εμπλουτιστικά φράγματα και αναχώματα κατά μήκος της κοίτης των ποταμών και διαμορφώνοντας τις κοίτες. Στόχος ήταν να αυξηθεί η επιφάνεια διήθησης και να βελτιωθεί η απορροφητική ικανότητα των επιφανειακών αποθέσεων.

Η ομαδοποίηση των μεθόδων τεχνητού εμπλουτισμού γίνεται επίσης ανάλογα με την προέλευση του νερού εμπλουτισμού. Στην συνέχεια παρατίθενται συνοπτικά οι διάφοροι μέθοδοι τεχνητού εμπλουτισμού που έχουν εφαρμοστεί:

#### Εμπλουτιστικά έργα σε χείμαρρους χωρίς φράγματα

Η βασική αρχή των έργων αυτών είναι η αύξηση της ποσότητας διήθησης, αυξάνοντας το χρόνο και την επιφάνεια διήθησης.

##### A) Εμπλουτιστικά Φράγματα

Στην Κύπρο έχουν κατασκευαστεί τρία εμπλουτιστικά φράγματα, με στόχο να αποφευχθεί η ροή νερού προς τη θάλασσα και να βοηθηθεί ο εμπλουτισμός των αλουβιακών υδροφορέων. Δύο από τα φράγματα αυτά έχουν κατασκευαστεί στον Ποταμό Σερράχη (Φράγμα Μόρφου και Φράγμα Μάσσαρι) και το τρίτο στον Ποταμό Τρέμιθο, στο Κίτι. Η χωρητικότητα των φραγμάτων αυτών κυμαίνεται από 1,5 έως 3 εκατομμύρια m<sup>3</sup>.

Η κατασκευή σχετικά μεγάλου μεγέθους εμπλουτιστικών φραγμάτων κρίνεται αποτελεσματική αλλά παρουσιάζει αυξημένο κόστος. Σημειώνεται επίσης ότι παρατηρείται προοδευτική μείωση της διηθητικής ικανότητας του φράγματος λόγω της στερεοπαροχής, για αυτό θα πρέπει να γίνεται αφαίρεση των υλικών αυτών μετά την ξήρανση της λεκάνης κατάκλισης.

##### B) Κατασκευή μικρών εμπλουτιστικών φραγμάτων κατά μήκος της κοίτης των χείμαρρων.

Σε αρκετούς χειμάρρους έχουν κατασκευαστεί μικρά φράγματα-αναχώματα που το ύψος τους δεν ξεπερνά συνήθως τα 5 μέτρα. Η κατασκευή των φραγμάτων αυτών γίνεται στις περιοχές που οι χειμάρροι διασχίζουν πεδινούς, αλουβιακούς υδροφορείς. Τα φράγματα αυτά κατασκευάζονται διαδοχικά, το ένα μετά το άλλο και ο αριθμός τους εξαρτάται από τη ροή του χειμάρρου, τη στερεοπαροχή του και τη διηθητική ικανότητα των αποθέσεων της κοίτης του χειμάρρου. Το πρώτο φράγμα θα πρέπει να κατασκευάζεται σε περιοχές που η μεταφορική ικανότητα του χειμάρρου είναι μειωμένη (μικρή κλίση), για να αποφεύγονται έντονα προβλήματα στερεοπαροχής. Η κατασκευή των φραγμάτων-αναχωμάτων γίνεται με λιθοδομή από υλικά της κοίτης τα οποία τοποθετούνται σε μεταλλικά δίκτυα. Με την έναρξη της ροής οι λεκάνες κατάκλισης γεμίζουν με νερό και προκαλείται διαδοχική υπερχείλιση τους. Με τον τρόπο αυτό επιβραδύνεται η ροή του χειμάρρου, ενώ ταυτόχρονα αυξάνει η επιφάνεια διήθησης.

Η μέθοδος αυτή κρίνεται αρκετά αποτελεσματική και εφαρμόζεται ευρέως στους ποταμούς Περιστερώνας, Πεδιαίου και Γιαλλιά. Οι λεκάνες κατάκλισης θα πρέπει να συντηρούνται ετησίως με απομάκρυνση των υλικών που αποτίθενται σε αυτά.

#### Γ) Ετήσια διαμόρφωση και καλλιέργεια της κοίτης των χειμάρρων

Με τη μέθοδο αυτή επιτυγχάνεται αύξηση της διηθητικής ικανότητας της κοίτης ενώ αυξάνει επίσης και η επιφάνεια διήθησης. Η μέθοδος αυτή είναι η πλέον αποτελεσματική και εφαρμόζεται σε αρκετές περιοχές, με χαρακτηριστικό παράδειγμα τον ποταμό Ακάκι το δε κόστος εφαρμογής της είναι πολύ μικρό.

Το μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι παρατηρείται γρήγορη διάβρωση (εκβάθυνση) της κοίτης, μετά από έντονες βροχοπτώσεις. Συστήνεται η διαμόρφωση της κοίτης να γίνεται μετά από γέφυρες, όπου συνήθως γίνεται διαμόρφωση της ροής του χειμάρρου με μόνιμες κατασκευές και συνεπώς η κοίτη είναι λιγότερο ευάλωτη σε διάβρωση. Θα πρέπει επίσης να επιλέγονται περιοχές που η μεταφορική ικανότητα του χειμάρρου είναι μικρή, ενώ οι αποθέσεις της κοίτης θα πρέπει να αποτελούνται από υλικά με μεγάλη απορροφητική ικανότητα.

#### Δ) Κατασκευή εμπλουτιστικών δεξαμενών παραπλεύρως της κοίτης

Στις περιπτώσεις που η κοίτη δεν προσφέρεται για σκοπούς εμπλουτισμού μπορούν να κατασκευάζονται εμπλουτιστικές δεξαμενές παραπλεύρως της κοίτης. Η διοχέτευση του νερού γίνεται με μικρά φράγματα μερικής εκτροπής τα οποία κατασκευάζονται με τέτοιο τρόπο ώστε η στερεοπαροχή να είναι η ελάχιστη δυνατή.

Τα φράγματα εκτροπής χρησιμοποιούνται επίσης από τους γεωργούς για άρδευση των αγροτεμαχίων τους κατά την περίοδο που υπάρχουν ροές. Η άρδευση την περίοδο αυτή γίνεται με τη μέθοδο της κατάκλισης. Οι αρδεύσεις με κατάκλιση σε συνδυασμό με το γεγονός ότι το νερό μεταφέρεται σε ανοικτούς, μη στεγανούς αγωγούς, βοηθούν στον εμπλουτισμό του υδροφορέα. Φυσικά στην περίπτωση αυτή υπάρχουν σημαντικές απώλειες σε εξάτμιση.

### Εμπλουτιστικά έργα με χρήση νερού από επιφανειακούς ταμειυτήρες

#### Α) Τεχνητός εμπλουτισμός με ελεγχόμενη ροή νερού στη κοίτη, κατάντη φραγμάτων

Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην ελεγχόμενη απελευθέρωση νερού σε διάφορα σημεία της κοίτης, κατάντη των φραγμάτων, με στόχο τη φυσική λειτουργία της κοίτης και την εκμετάλλευση των καλών υδραυλικών χαρακτηριστικών των αποθέσεων της. Η μεταφορά του νερού από τα ανάντη φράγματα γίνεται συνήθως με κλειστούς αγωγούς.

Η μέθοδος αυτή είναι αρκετά αποτελεσματική ενώ το κόστος εφαρμογής της είναι μικρό. Ευρεία εφαρμογή της μεθόδου έγινε στον υδροφορέα Γερμασόγειας και Ακρωτηρίου, όπου οι υδροφορείς λειτούργησαν σαν φυσικά διυλιστήρια. Ειδικά όσο αφορά τον υδροφορέα Γερμασόγειας, η συμμετοχή του στην κάλυψη των υδρευτικών αναγκών της πόλης της Λεμεσού ήταν καθοριστική αφού το 50% των υδρευτικών αναγκών της πόλης προέρχονταν από νερό του φράγματος Γερμασόγειας, το οποίο εμπλούτιζε τεχνητά τον υδροφορέα και στην συνέχεια αντλείτο μέσω γεωτρήσεων. Σημειώνεται εμφαντικά ότι ο ετήσιος τεχνητός

εμπλουτισμός του υδροφορέα είναι δυόμισι φορές μεγαλύτερος από τα μόνιμα αποθέματα του υδροφορέα (Γεωργίου, 1992). Σημαντικός είναι επίσης ο τεχνητός εμπλουτισμός που γίνεται κατά μήκος της κοίτης του ποταμού Κούρρη, κατάντη του ομώνυμου φράγματος.

Ιδιαίτερη προσοχή χρειάζεται στη ρύθμιση της ποσότητας του νερού που απελευθερώνεται από κάθε σημείο εμπλουτισμού. Στόχος πρέπει να είναι η εξεύρεση της βέλτιστης παροχής εμπλουτισμού, ούτως ώστε να μην προκαλούνται μεγάλες υδραυλικές κλίσεις, με κίνδυνο απωλειών νερού προς τη θάλασσα. Οι παροχές θα πρέπει να γίνονται για μεγάλα χρονικά διαστήματα και εάν είναι δυνατό να είναι σταθερές.

Το νερό που εμπλουτίζει τον υδροφορέα Γερμασόγειας αντλείται από 20 γεωτρήσεις που βρίσκονται στην δελταϊκή περιοχή. *Ο τεχνητός εμπλουτισμός βοήθησε επίσης στη βελτίωση της ποιότητας του υπόγειου νερού, αφού μετά την εφαρμογή του υποχώρησε η ζώνη υπαλμύρινσης του υδροφορέα.*

## B) Τεχνητός εμπλουτισμός μέσω εξω-ποτάμιων δεξαμενών

Ο υδροφορέας Ακρωτηρίου είναι ο τρίτος σε δυναμικότητα υδροφορέας της Κύπρου. Ανάντη του υδροφορέα κατασκευάστηκε το μεγαλύτερο φράγμα της Κύπρου, χωρητικότητας 115 εκατομμυρίων κυβικών μέτρων. Η κατασκευή του ταμειυτήρα αποστέρησε το μεγαλύτερο μέρος του εμπλουτισμού του υδροφορέα, με αποτέλεσμα να καταστεί αναγκαίος ο τεχνητός εμπλουτισμός του. Στις περιοχές του υδροφορέα που βρίσκονται μακριά από την κοίτη του ποταμού, ο υδροφορέας εμπλουτίζεται με διοχέτευση νερού σε εξω-ποτάμιες εμπλουτιστικές δεξαμενές. Οι δεξαμενές εξυπηρετούν δύο σκοπιμότητες. Η δεξαμενή Κολοσσίου εμπλουτίζει το μέρος του υδροφορέα που χρησιμοποιείται για σκοπούς ύδρευσης της πόλης της Λεμεσού, ενώ οι δεξαμενές Φασουρίου και Λανίτη εμπλουτίζουν το μέρος του υδροφορέα που χρησιμοποιείται για αρδευτικούς σκοπούς. Οι αρδευτικές εμπλουτιστικές δεξαμενές κατασκευάστηκαν και διαχειρίζονται από τα αγροκτήματα της περιοχής. Το νερό εμπλουτισμού διατίθεται στις δεξαμενές μέσω κλειστών αγωγών από τα φράγματα Κούρρη και Γερμασόγειας, κυρίως σε χρονιές πολυομβρίας. Αντίθετα σε χρονιές ολιγοομβρίας αντλείται νερό από τον υδροφορέα της αστικής περιοχής Λεμεσού (Γαρύλλης), και εμπλουτίζει το μέρος του υδροφορέα που χρησιμοποιείται για αρδευτικούς σκοπούς. Η συνολική ποσότητα τεχνητού εμπλουτισμού στον υδροφορέα Ακρωτηρίου ανέρχεται στα πέντε περίπου εκατομμύρια κυβικά μέτρα ετησίως, ενώ η συνολική μέση ετήσια άντληση είναι 14 περίπου εκατομμύρια κυβικά μέτρα.

Στον υδροφορέα Ξεροπόταμου (Πάφος), κατάντη του φράγματος Ασπρόκρεμμο, πραγματοποιείται τεχνητός εμπλουτισμός από το 1996. Με τον τεχνητό εμπλουτισμό προστατεύεται η ζώνη άντληση του υδροφορέα, η οποία χρησιμοποιείται για κάλυψη των υδρευτικών αναγκών της πόλης της Πάφου, από θαλάσσια διείσδυση. Ο τεχνητός εμπλουτισμός γίνεται μέσω δεξαμενών, κοντά στην περιοχή του φράγματος, αφού η διηθητική ικανότητα των αποθέσεων της κοίτης είναι μικρή στο μεγαλύτερο της μέρος. Ο τεχνητός εμπλουτισμός ανέρχεται στο ένα περίπου εκατομμύριο κυβικά μέτρα ετησίως.

Μικρότερου μεγέθους εμπλουτιστικές δεξαμενές – κατασκευές, έγιναν εντός των αλουβιακών αποθέσεων του ποταμού Βασιλικού (επαρχία Λάρνακας), κατάντη του φράγματος Καλαβασού. Στόχος των δεξαμενών ήταν ο εμπλουτισμός του γυψούχου υδροφορέα της περιοχής, με νερό από την υπερχειλίση του Φράγματος Καλαβασού και από τη ροή του χειμάρρου Ασγάτας. Οι αποθέσεις της κοίτης βρίσκονται πάνω σε γύψο, με έντονα καρστικά φαινόμενα (μικρές καταβόθρες καλυμμένες με κλαστικά υλικά). Με την κατασκευή των εμπλουτιστικών έργων παρατηρήθηκε ανάκαμψη του υδροφορέα, η στάθμη του οποίου κατήλθε στο παρελθόν μέχρι και 100 μέτρα κάτω από τη στάθμη της θάλασσας. Ο υδροφορέας προστατεύεται υδραυλικά από τη θάλασσα με μαργαϊκές αποθέσεις (Κωνσταντίνου, 1994). Κατά τον εμπλουτισμό παρατηρήθηκαν προβλήματα εξαερισμού του υδροφορέα τα οποία αντιμετωπίστηκαν με τη τοποθέτηση αγωγών εξαερισμού. Ο εμπλουτισμός του υδροφορέα είναι της τάξεως του 1,5 εκατομμυρίων m<sup>3</sup>.

### Τεχνητός εμπλουτισμός μέσω γεωτρήσεων

Με την κατασκευή των επιφανειακών ταμειυτήρων υπήρξε προβληματισμός για τη διάθεση του νερού που πιθανόν θα υπερχειλίζει σε περιπτώσεις παρατεταμένης πολυομβρίας, παρά το γεγονός ότι το φαινόμενο αυτό δεν είναι συνηθισμένο για τα κυπριακά δεδομένα. Έχοντας υπόψη ότι ο υδροφορέας της Νοτιο-Ανατολικής Μεσαορίας έχει υπεραντληθεί σε μεγάλο βαθμό και με δεδομένο ότι ο υδροφορέας αυτός διασχίζεται από το Νότιο Αγωγό, εκπονήθηκε σχετική έρευνα για να διαπιστωθεί εάν ο υδροφορέας αυτός προσφέρεται για σκοπούς τεχνητού εμπλουτισμού. Η έρευνα αφορούσε πειραματικό εμπλουτισμό σε δύο γεωτρήσεις, στην περιοχή Ξυλοφάγου και Ορμίδειας.

Με την κατασκευή επίσης των πρώτων μεγάλων σταθμών τριτοβάθμιας βιολογικής επεξεργασίας των οικιστικών λυμάτων, κατέστη ακόμη πιο αναγκαία η διερεύνηση της πιθανότητας υπόγειας διάθεσης του ανακυκλωμένου νερού, για σκοπούς τεχνητού εμπλουτισμού των υδροφορέων. Για το σκοπό αυτό ανορύχθηκαν 16 εμπλουτιστικές και παραγωγικές γεωτρήσεις στον υδροφορέα Ακρωτηρίου ενώ επίσης έγιναν δύο πειράματα μακροχρόνιου τεχνητού εμπλουτισμού σε γεωτρήσεις.

Γενικά αναφέρεται ότι η επιτυχής εφαρμογή της μεθόδου τεχνητού εμπλουτισμού μέσω γεωτρήσεων προϋποθέτει η στάθμη του υπόγειου νερού να είναι σε ικανοποιητικό βάθος και η λιθολογία της ακόρεστης και ειδικά της κορεσμένης ζώνης να είναι ευνοϊκή (χονδρόκοκκα κλαστικά υλικά ή μακροπερατοί λιθολογικοί σχηματισμοί). Ταυτόχρονα η ποιότητα του νερού εμπλουτισμού θα πρέπει να είναι άριστη. Η μέθοδος αυτή μειονεκτεί γενικά των επιφανειακών μεθόδων, αλλά έχει δύο ουσιαστικά πλεονεκτήματα. Πρώτο μπορεί να εφαρμοστεί στις περιπτώσεις που οι επιφανειακές μέθοδοι δεν μπορούν να εφαρμοστούν λόγω του ότι η λιθολογία των επιφανειακών αποθέσεων δεν είναι ευνοϊκή, και δεύτερον μπορεί να εφαρμοστεί σε περιοχές που δεν υπάρχει ικανοποιητική έκταση για εφαρμογή επιφανειακών μεθόδων τεχνητού εμπλουτισμού.

Θα ανέμενε κανείς ότι η συμπεριφορά του υδροφορέα κατά την άντληση και τον εμπλουτισμό θα ήταν ανάλογη. Δυστυχώς όμως κατά την πρακτική εφαρμογή του τεχνητού εμπλουτισμού σε γεωτρήσεις έχει διαπιστωθεί ότι παρουσιάζονται προβλήματα πολύ μεγαλύτερης ανύψωσης της στάθμης από ότι θα αναμένετο με βάση τις δοκιμαστικές αντλήσεις, γεγονός που είναι γνωστό από τη διεθνή βιβλιογραφία. Το κυριότερο πρόβλημα που παρουσιάζεται είναι ή άμεση ή, η προοδευτική απόφραξη των πόρων του υδροφορέα, που οφείλεται κυρίως στον εγκλωβισμό αέρα, στα αιωρούμενα στερεά σωματίδια που περιέχει το νερό εμπλουτισμού, στη διόγκωση των αργιλικών ορυκτών της ακόρεστης ζώνης, σε χημικές αντιδράσεις μεταξύ του νερού εμπλουτισμού, του υπόγειου νερού και του υδροφορέα (καθίζηση ιζημάτων, ανταλλαγή ιόντων κλπ), σε διαφορά θερμοκρασίας (απελευθέρωση αερίων), καθώς και στην ανάπτυξη και δράση μικροοργανισμών. Επίσης η μείωση της ικανότητας εμπλουτισμού μπορεί να αποδοθεί σε μείωση του ενεργούς πορώδους που παρατηρείται λόγω αναδιάταξης των κόκκων, μετά από διαδοχικούς κύκλους εμπλουτισμού και άντλησης (φόρτιση – αποφόρτιση του υδροφορέα). Σημειώνεται ότι τα μεγαλύτερα προβλήματα απόφραξης παρουσιάζονται στα λεπτόκοκκα υλικά.

### Συμπεράσματα από την εφαρμογή τεχνητού εμπλουτισμού μέσω γεωτρήσεων στην περιοχή Κοκκινοχωριών. Ξυλοφάγου – Ορμίδεια.

Μετά την ολοκλήρωση των πειραματικών εφαρμογών στα Κοκκινοχώρια προκύπτει ότι υπάρχει σημαντική διαφορά μεταξύ της ειδικής παροχής άντλησης και εμπλουτισμού, όπου κατά τον εμπλουτισμό είναι μειωμένη κατά 2 έως 10 φορές, γεγονός που οφείλεται κατά κύριο λόγο στο φράξιμο των πόρων από φυσαλίδες αέρα.

Η αύξηση της πίεσης (στάθμης) δεν προσφέρει καμία αύξηση στην ποσότητα εμπλουτισμού. Αντίθετα, λόγω των πιέσεων δυνατόν να προκαλείται μείωση του ενεργούς πορώδους με αναδιάταξη των πόρων.

Η διάμετρος της γεώτρησης διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στη διατήρηση σχετικά σταθερής ικανότητας εμπλουτισμού, αφού υπάρχουν καλύτερες συνθήκες εξαερισμού και

καλύτερες συνθήκες ροής. Επίσης λόγω της μεγάλης επιφάνειας των πλευρικών τοιχωμάτων της γεώτρησης – πηγαδιού, προκαλούνται λιγότερες αποφράξεις λόγω των αιωρούμενων στερεών σωματιδίων. Το θέμα της διαμέτρου χρίζει περαιτέρω διερεύνησης.

#### Δοκιμή τεχνητού εμπλουτισμού για υπόγεια διάθεση επεξεργασμένων αστικών, υγρών αποβλήτων (Υδροφορέας Ακρωτηρίου)

Πρόσφατα έχει υιοθετηθεί η πολιτική για επεξεργασία όλων των αστικών υγρών αποβλήτων και η χρήση τους στην γεωργία, αφού αυτά θεωρούνται πλέον μέρος των υδατικών αποθεμάτων. Έχει ήδη ολοκληρωθεί το σύστημα επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων της Λεμεσού και Λάρνακας, ενώ βρίσκεται υπό εκτέλεση το σύστημα επεξεργασίας της τουριστικής περιοχής Παραλίμνι – Αγία Νάπα. Οι σταθμοί αυτού παράγουν ή θα παράγουν νερό τριτοβάθμιας βιολογικής επεξεργασίας. Στην Λευκωσία λειτουργεί εδώ και αρκετά χρόνια σταθμός δευτεροβάθμιας βιολογικής επεξεργασίας.

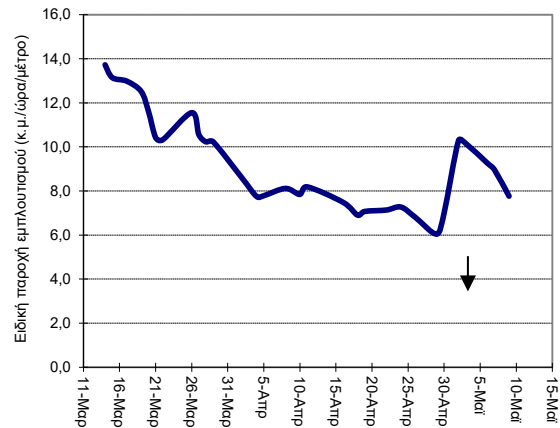
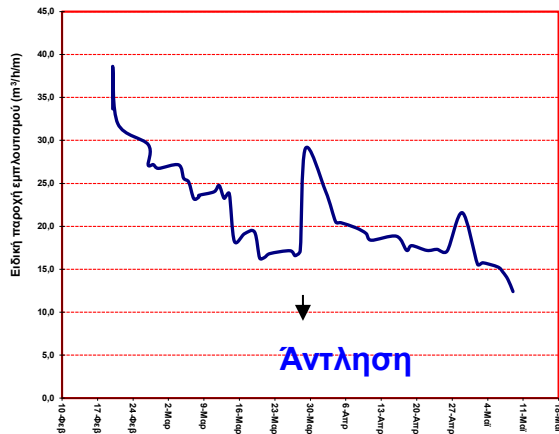
Όσο αφορά το ανακυκλωμένο νερό από το σταθμό επεξεργασίας της πόλης της Λεμεσού, αποφασίστηκε να διερευνηθεί η δυνατότητα υπόγεια χρήσης του για σκοπούς τεχνητού εμπλουτισμού του υδροφορέα Ακρωτηρίου. Με τον τεχνητό εμπλουτισμό θα μειωνόταν το έλλειμμα του υδροφορέα και θα περιοριζόταν η διαδικασία της θαλάσσιας διείσδυσης. Η μεταφορά του νερού στην περιοχή του υδροφορέα γίνεται με αγωγό μήκους 10 περίπου km.

Η πιο πάνω διάθεση κρίθηκε εφικτή λόγω της λιθολογίας και του βάθους της στάθμης του υδροφορέα, ενώ παρουσίαζε επίσης το πλεονέκτημα της καλύτερης διαχείρισης του εμπλουτισμού. Το μειονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι δεν θα γίνεται χρήση της ακόρεστης ζώνης του υδροφορέα, για περαιτέρω επεξεργασία του ανακυκλωμένου νερού. Έχοντας όμως υπόψη την άριστη ποιότητα του ανακυκλωμένου νερού (τριτοβάθμια επεξεργασία), κρίνεται ότι αυτό δεν αποτελεί ουσιαστικό μειονέκτημα.

Η περιοχή αποτελείται από αδρομερή υλικά με σχετικά μικρό ποσοστό λεπτόκοκκων υλικών και σε αυτή ανορύχθηκαν 16 γεωτρήσεις εμπλουτισμού και άντλησης.

Στην περιοχή αυτή έγιναν δύο δοκιμές μακροχρόνιου εμπλουτισμού σε δύο γεωτρήσεις και τα αποτελέσματα δύνονται γραφικά στα διαγράμματα 11.3 και 11.4. Όπως φαίνεται στα πιο πάνω διαγράμματα, παρά το γεγονός ότι επιτεύχθηκαν μεγάλες παροχές εμπλουτισμού κατά τον μακροχρόνιο εμπλουτισμό, δεν έχει επιτευχθεί σταθεροποίηση της στάθμης. Η ενδιάμεση δοκιμαστική άντληση προκάλεσε μόνον μερική ανάπτυξη και επαναφορά της απορροφητικής ικανότητας της γεώτρησης. Για τον εμπλουτισμό χρησιμοποιήθηκε υπόγειο νερό από τον υδροφορέα Γαρύλλη και η διοχέτευση του στις γεωτρήσεις έγινε μέσω του υφιστάμενου αντλητικού συγκροτήματος, αφού αφαιρέθηκε η βαλβίδα επιστροφής.





Σχήμα 11.3. Τεχνητός Εμπλουτισμός μέσω γεωτρήσεων - Αρ. Γεώτρ. 1236 Ακρωτήρι Περίοδος 19/2 - 10/5/96 - Παροχή εμπλουτισμού 70 m<sup>3</sup>/ώρα

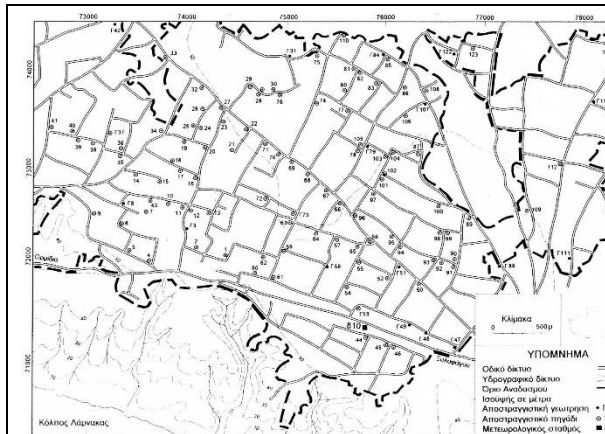
Σχήμα 11.4. Τεχνητός Εμπλουτισμός γεώτρηση 1235, Ακρωτήρι Παροχή εμπλουτ. 83 m<sup>3</sup>/ώρα - Περίοδος 14/3 - 10/5/96

Αποστράγγιση όμβριων υδάτων από καλλιέργειες με ταυτόχρονο τεχνητό εμπλουτισμό του υδροφορέα.

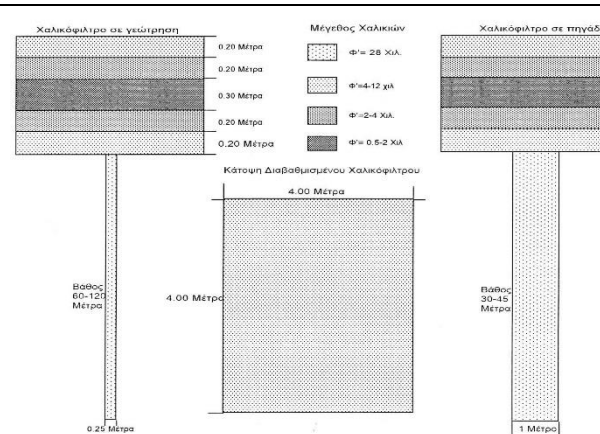
Στην περιοχή Κοκκινοχωριών, η οποία παρουσιάζει μικρή έως μηδενική τοπογραφική κλίση και καλύπτεται από μικρή διηθητικής ικανότητας εδαφικό κάλυμμα, έγινε αναδασμός γης με ταυτόχρονη κατασκευή πυκνού υπερευρωμένου οδικού δικτύου (σχ. 11.5). Το υπερευρωμένο αυτό οδικό δίκτυο λειτούργησε σαν φυσικό ανάχωμα, προκαλώντας προβλήματα στη φυσική αποστράγγιση της περιοχής, κυρίως μετά από έντονες βροχοπτώσεις. Στη ίδια περιοχή αναπτύσσεται μέρος του υδροφορέα της Νοτιο-Ανατολικής Μεσαορίας, ο οποίος όπως έχει προαναφερθεί υπεραντλείται και έχει υφαλμυρίσει.

Η επίλυση του προβλήματος αποστράγγισης των καλλιεργειών έγινε με το σχεδιασμό και ανόρυξη 120 περίπου απορροφητικών πηγαδιών και γεωτρήσεων, για τη διοχέτευση των όμβριων υδάτων στον υδροφορέα της περιοχής, με στόχο τη γρήγορη αποστράγγιση των καλλιεργειών μετά από έντονες βροχοπτώσεις, ενώ ταυτόχρονα να προκαλείται τεχνητός εμπλουτισμός του υδροφορέα. Στο ανώτερο μέρος των πηγαδιών-γεωτρήσεων, σχεδιάστηκε και ανορύχθηκε όρυγμα το οποίο πληρώθηκε με διαβαθμισμένο χαλκικό φίλτρο για έλεγχο της ροής του νερού προς τα πηγάδια και συγκράτηση των αιωρούμενων στερεών σωματιδίων (σχ. 11.6). Η λύση των επιφανειακών αποστραγγιστικών έργων (κανάλια), δεν έγινε δεκτή γιατί λόγω της μικρής εδαφικής κλίσης απαιτούσε μεγάλων διαστάσεων στραγγιστήρια, με συνεπακόλουθο τη χρήση μεγάλου ποσοστού γης για την κατασκευή του έργου.

Με βάση την ανάλυση των βροχομετρικών, υδρολογικών και μετεωρολογικών δεδομένων προέκυψε ότι η μέγιστη αναμενόμενη ημερήσια βροχόπτωση ήταν 50 mm και οι παραγόμενες ποσότητες νερού 500 m<sup>3</sup> ανά εκτάριο (καθορίστηκε συντελεστής ασφάλειας 80%). Η πυκνότητα των γεωτρήσεων και των πηγαδιών καθορίστηκε με βάση την αναμενόμενη μέγιστη ποσότητα όμβριου νερού σε κάθε αγροτεμάχιο. Ο σχεδιασμός των απορροφητικών φίλτρων έγινε με δεδομένο ότι η αναμενόμενη, βραχυπρόθεσμη απορροφητική ικανότητα των γεωτρήσεων και πηγαδιών θα ήταν 100 m<sup>3</sup>/h, αριθμός που υπολογίστηκε από τα υδρογεωλογικά δεδομένα της περιοχής.



Σχήμα 11.5. Τοποθέτηση στραγγιστηριών πηγαδιών και γεωτρήσεων στην περιοχή Ξυλοφάγου Ορμίδειας (Κωνσταντίνου Κ. 1995).



Σχήμα 11.6. Σχεδιασμός απορροφητικών φίλτρων στην περιοχή Ξυλοφάγου Ορμίδειας (Κωνσταντίνου Κ. 1995).

Για το σχεδιασμό των φίλτρων λήφθηκαν υπόψη τα ακόλουθα:

1. Η ταχύτητα διήθησης θα πρέπει να είναι σχετικά αργή για να δίνεται χρόνος στα αιωρούμενα σωματίδια να καθιζάνουν, παρατείνοντας έτσι το χρόνο ζωής του έργου.
2. Θα πρέπει να αναμένεται μείωση της υδραυλικής αγωγιμότητας του φίλτρου με το χρόνο για αυτό θα πρέπει η παροχή του φίλτρου να είναι μεγαλύτερη από δυνατότητα απορρόφησης των πηγαδιών. Με χρήση του αυθαίρετου συντελεστή 25%, η επιθυμητή παροχή των φίλτρων έχει καθοριστεί στα 125 m<sup>3</sup>/h περίπου.
3. Το χαλικόφιλτρο θα πρέπει να είναι διαβαθμισμένο και συμμετρικό (σχ. 59). Καθορίστηκε η χρήση τριών διαφορετικών υλικών σε πέντε στρώσεις. Η ενδιάμεση στρώση θα έχει τη μικρότερη υδραυλική αγωγιμότητα και θα περιβάλλεται από στρώσεις μεγαλύτερης υδραυλικής αγωγιμότητας. Οι υπερκείμενες στρώσεις σκοπό έχουν τη συγκράτηση του μεγαλύτερου μέρους των αιωρούμενων στερεών σωματιδίων και ταυτόχρονα την αύξηση του υδραυλικού φορτίου μέσα στη ενδιάμεση στρώση. Με την αύξηση του υδραυλικού φορτίου έπεται αύξηση της υδραυλικής κλίσης και συνεπώς η αύξηση της παροχής του φίλτρου. Οι δύο υποκείμενες στρώσεις σκοπό έχουν να προστατεύσουν την ενδιάμεση στρώση από εσωτερική διάβρωση.
4. Κρίθηκε σκόπιμο ότι η στάθμη του νερού κατά τη διάρκεια λειτουργίας του φίλτρου θα πρέπει να είναι 20 cm πάνω από την ανώτερη επιφάνεια του φίλτρου. Με τον τρόπο αυτό θα επιτυγχάνεται η καθίζηση του μεγαλύτερου μέρους των στερεών αιωρούμενων σωματιδίων εκτός της επιφάνειας του φίλτρου.

Έχοντας υπόψη τα πιο πάνω έγιναν υποθετικές κοκκομετρικές καμπύλες για τον καθορισμό της βέλτιστης διαμέτρου της ενδιάμεσης και πιο λεπτόκοκκης στρώσης. Για σκοπούς προστασίας του φίλτρου από εσωτερική διάβρωση, με ταυτόχρονη επίτευξη του μέγιστου δυνατού φιλτραρίσματος, κρίθηκε ότι η ταχύτητα ροής θα πρέπει να είναι της τάξεως των  $2 \times 10^{-3}$  m/sec. Η ταχύτητα αυτή μπορεί να επιτευχθεί με συνδυασμό τιμών υδραυλική κλίση και υδραυλικής αγωγιμότητα. Προκαταρκτικά επιλέχτηκε υδραυλική κλίση της τάξεως του 2,5 και υδραυλικής αγωγιμότητα  $8 \times 10^{-4}$  m/sec ( $u=i \times K$ ).

Με χρήση των υποθετικών κοκκομετρικών καμπύλων και διάφορων εμπειρικών εξισώσεων καθορίστηκε η βέλτιστη διάμετρος του υλικού της ενδιάμεσης στρώσης. Στη συνέχεια βρέθηκαν διάφορα υλικά στο εύρος της χονδρόκοκκης άμμου, των οποίων η περατότητα καθορίστηκε στο εργαστήριο με περατόμετρο σταθερού φορτίου. Για το δείγμα άμμου από 0,5

έως 2 mm και με  $d_{10}=0,55$  mm και  $d_{50}=1$  mm η υδραυλική αγωγιμότητα  $K$  υπολογίστηκε σε  $6,7 \times 10^{-4}$  m/sec και επιλέχθηκε για την κατασκευή της ενδιάμεσης στρώσης του φίλτρου. Στη συνέχεια με βάση την επιθυμητή ταχύτητα ροής ( $v=2 \times 10^{-3}$  m/sec) και την παροχή αποστράγγισης ( $125$  m<sup>3</sup>/h), υπολογίστηκε η ανάλογη υδραυλική κλίση ( $i=3$ ), το εμβαδόν του φίλτρου ( $16$  m<sup>2</sup>) και το πάχος της ενδιάμεσης στρώσης ( $L=30$  cm με φορτίο  $H = 90$  cm).

Με βάση τα πιο πάνω έχει καθοριστεί ότι το συνολικό πάχος του φίλτρου θα είναι 110 cm και οι επιμέρους στρώσεις του φίλτρου 20, 20, 30, 20 και 20 cm (σχ. 59). Η κοκκομετρία της δεύτερης και τέταρτης στρώσεις καθορίστηκε σε 2 - 4 mm (πολύ μικρά χαλίκια). Όσον αφορά την πρώτη και την τελευταία στρώση, η κοκκομετρία τους καθορίστηκε στα 4 - 12 mm (μικρού έως μέσου μεγέθους χαλίκια). Προτιμήθηκε η διάμετρος 4 - 12 mm γιατί τα χαλίκια αυτά είναι διαθέσιμα στην αγορά και με μικρό κόστος, (παρατεταμένη πλύση), μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο μέλλον για σκοπούς συντήρησης του φίλτρου. Η συντήρηση συνίσταται στην αφαίρεση των πρώτων 10 cm της πρώτης στρώσης και την αντικατάστασή του με νέο υλικό. Η εξασφάλιση άμμου απαλλαγμένης από τα λεπτόκοκκα υλικά για την κατασκευή της ενδιάμεσης στρώσης, μεγέθους 0,5 - 2 mm (χονδρόκοκκη έως πολύ χονδρόκοκκη άμμος), ήταν αρκετά δύσκολη.

Τοποθετήθηκαν 120 απορροφητικά έργα, 17 εκ των οποίων είναι γεωτρήσεις και τα υπόλοιπα πηγάδια. Το βάθος των γεωτρήσεων ήταν 50 έως 120 m και η διάμετρος ανόρυξης 20 cm, ενώ η διάμετρος ανόρυξης των πηγαδιών ήταν ένα μέτρο και το βάθος τους 30 m. Σε μερικές περιπτώσεις με δυσμενείς λιθολογικές συνθήκες το βάθος των πηγαδιών αυξήθηκε κατά 15 m. Η τοποθέτηση των γεωτρήσεων έγινε στις περιοχές που υπήρχε ελλιπή γεωλογική γνώση και στις περιοχές που η αναμενόμενη απορροφητικότητα ήταν μικρή ενώ ταυτόχρονα η στάθμη του υπόγειου νερού βρισκόταν σε μεγαλύτερο βάθος. Τόσο τα πηγάδια όσο και οι γεωτρήσεις πληρώθηκαν με χαλίκια διαμέτρου 25 mm (μεγάλου μεγέθους χαλίκια), με στόχο να συγκρατηθούν τα τοιχώματά τους. Τα υλικά αυτά είναι διαθέσιμα στην αγορά και έτσι μπορούν να αποκτηθούν με μικρό κόστος.

Με την κατασκευή του έργου έγιναν δοκιμές σε τρία απορροφητικά έργα. Τα αποτελέσματα των δοκιμών απέδειξαν ότι η παροχή του φίλτρου είναι 120 περίπου m<sup>3</sup>/h. Ταυτόχρονα διεφάνη ότι στις περιοχές με δυσμενείς υδρογεωλογικές συνθήκες (βορειοανατολικά και ανατολικά), η απόδοση του έργου εξαρτάται από τη δυνατότητα της γεώτρησης και όχι από την παροχή του φίλτρου.

Η μέθοδος της υπόγειας διάθεσης όμβριων νερών μπορεί να εφαρμοστεί με επιτυχία δεδομένου όμως ότι υπάρχουν οι κατάλληλες υδρογεωλογικές συνθήκες. Με τη μέθοδο αυτή εξυπηρετούνται ταυτόχρονα τρεις σκοπιμότητες. Η γρήγορη αποστράγγιση καλλιεργημένων εκτάσεων από όμβρια νερά, ο τεχνητός εμπλουτισμός των υποκείμενων υπόγειων υδροφορέων και η αποφυγή καταστροφής των εδαφών από αλμύριση λόγω εξάτμισης.

Η υπόγεια διάθεση όμβριων νερών μπορεί να εφαρμοστεί όταν ισχύουν οι εξής προϋποθέσεις:

1. Στην περιοχή υπάρχει υπόγειος υδροφόρος ικανός να απορροφήσει τις ποσότητες νερού που συσσωρεύονται μετά από έντονες βροχοπτώσεις.
2. Στην επιφάνεια υπάρχει αδιαπέρατο ή ημι-διαπερατό εδαφικό κάλυμμα που δεν επιτρέπει τη γρήγορη διήθηση των όμβριων νερών.
3. Η περιοχή παρουσιάζει μικρή τοπογραφική κλίση με αποτέλεσμα το νερό να έχει μικρή διαβρωτική ικανότητα και όχι μεγάλες ποσότητες στερεών αιωρούμενων σωματιδίων.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η μέθοδος αυτή θα πρέπει να εφαρμόζεται με σκεπτικισμό στις περιπτώσεις υδροφορέων που χρησιμοποιούνται για ύδρευση. Ο λόγος είναι ότι με την άμεση διάθεση των επιφανειακών νερών σε τέτοιους υδροφορείς αυξάνεται ο κίνδυνος ρύπανσής τους, αφού παρακάμπτονται οι βιο-φυσικοχημικές διαδικασίες που λειτουργούν στην εδαφική και ακόρεστη ζώνη.

Το έργο ολοκληρώθηκε το Φθινόπωρο του 1993 και λειτουργεί με επιτυχία μέχρι σήμερα.

## **11.2. Έρευνες, εφαρμογές και προτάσεις διαχείρισης εμπλουτισμού στην Ελλάδα**

Στο Αργολικό Πεδίο έχουμε μια σειρά από προσπάθειες εφαρμογής Τ.Ε., με πρώτη εκείνη του Υπουργείου Γεωργίας (ΥΕΒ), την περίοδο 1963-1966, με τη μέθοδο των φρεάτων. Χρησιμοποιήθηκαν περί τα 60 φρέατα εμπλουτισμού και αξιοποιήθηκαν τα χειμερινά νερά των πηγών Κεφαλαρίου και Λέρνης. Ο εμπλουτισμός συνεχίστηκε και τις χρονιές 1967, 1968, όταν εγκαταλείφθηκε πλέον η προσπάθεια λόγω έλλειψης συστηματικού δικτύου μεταφοράς του επιφανειακού νερού και ανόρυξης πολλών βαθιών γεωτρήσεων στην περιοχή. Η συνολική ποσότητα νερού, που διοχετεύθηκε στα υδροφόρα στρώματα κατά την τριετία 1965, 1966, 1967, ανέρχεται σε  $3,29 \times 10^6 \text{m}^3$ . Η δεύτερη προσπάθεια ξεκίνησε με την πρόταση του Εργαστηρίου Γεωργικής Υδραυλικής του Γεωργικού Πανεπιστημίου Αθηνών μέσω ερευνητικού προγράμματος, που του ανατέθηκε από το Υπουργείο Γεωργίας το 1984, με θέμα την υφαλμύρωση των υδροφορέων του Αργολικού Πεδίου, για εφαρμογή Τ.Ε. με τα νερά των πηγών Κεφαλαρίου και Λέρνης, με στόχο την αναπλήρωση και την ποιοτική αναβάθμιση των υπόγειων νερών όπως επίσης και την παρεμπόδιση της θαλάσσιας διείσδυσης. Το έλλειμμα στα υπόγεια νερά εκτιμήθηκε σε  $1000 \times 10^6 \text{m}^3$  και η δυνατότητα των πηγών για παροχή νερού εμπλουτισμού υπολογίστηκε στα  $50 \times 10^6 \text{m}^3$  περίπου, κάθε χρόνο, κατά τους χειμερινούς μήνες. Το 1986-1987, εφαρμόστηκε Τ.Ε. σε δύο χειμάρρους του πεδίου με την κατασκευή λεκανών διήθησης και 5 γεωτρήσεων εμπλουτισμού για εκμετάλλευση των χειμερινών ροών, χωρίς όμως να υπάρξει σημαντικό αποτέλεσμα λόγω των περιορισμένων έως ασήμαντων ροών των χειμάρρων αυτών. Η τρίτη προσπάθεια έγινε το 1993 με την κατασκευή της προσαγωγού διώρυγας Αναβάλου. Έτσι το 1994 άρχισε ο Τ.Ε. μέσω πηγαδιών, 80 γεωτρήσεων και 11 γεωτρήσεων εμπλουτισμού, καλύπτοντας μια έκταση 40.000 στρεμμάτων (Βαφειάδης, 1995, Ζυμής, 1994, Θάνος, 1994). Περισσότερες υδρογεωλογικές λεπτομέρειες και σχετικές πρόσφατες έρευνες παρατίθενται στις εργασίες των Πουλοβασίλη κ.ά., 2002, Γιαννουλόπουλος, 2002 και Γιαννουλόπουλος, κ.ά., 2002.

Στην περιοχή Απεράθου της Νάξου, από το 1987, ξεκίνησε μια προσπάθεια εφαρμογής Τ.Ε. με την κατασκευή 98 μικρών χαμηλών φραγμάτων ανάσχεσης της χειμαρρικής ροής για τον εμπλουτισμό των υδροφόρων στρωμάτων της περιοχής (Γλέζος, 1994).

Στη Βιομηχανική Περιοχή Πατρών (ΒΙΠΕΠ), το 1993, εφαρμόστηκε πειραματικά ο Τ.Ε. μέσω μιας γεώτρησης στα πλειοπλειστοκαινικά ιζήματα της λεκάνης του Πείρου ποταμού (Fleet και Βουδούρης, 1995), στο πλαίσιο ερευνητικού προγράμματος της Αθηναϊκής Ζυθοποιίας που εκτελέστηκε από το Water Research Center σε συνεργασία με το Εργαστήριο Υδρογεωλογίας του Πανεπιστημίου Πατρών.

Στην περιοχή Καλοχωρίου Ν. Θεσ/νίκης προτάθηκε το 1995 (Παπαδόπουλος, et al., 1995) μια διαδικασία εφαρμογής Τ.Ε. με επεξεργασμένα αστικά λύματα με στόχο την αντιμετώπιση φαινομένων καθίζησης της ευρύτερης περιοχής, την επαναχρησιμοποίηση του νερού για βιομηχανική και γεωργική χρήση και την ανάπλαση του Γαλλικού ποταμού.

Το ΕΘ.Ι.ΑΓ.Ε. (Ινστιτούτο Εγγείων Βελτιώσεων- Ινστιτούτο Υγιεινής Τροφίμων), σε συνεργασία με το Α.Π.Θ. (Τομέας Εγγείων Βελτιώσεων, Εδαφολογίας και Γεωργικής Μηχανικής, Τμήματος Γεωπονίας), εκπόνησε ερευνητικό πρόγραμμα Τ.Ε. των υδροφόρων στρωμάτων της περιοχής Ριζού - Πετραίας - Αρσενίου Ν. Πέλλης (νότια της Σκύδρας), για λογαριασμό του Τοπικού Οργανισμού Εγγείων Βελτιώσεων Εδεσσαίου (Βαφειάδης, et al., 1995).

Είναι γεγονός πάντως ότι σε εθνικό επίπεδο δεν έχει γίνει ποτέ καμμία συστηματική προσπάθεια εφαρμογής του Τ.Ε. στη χώρα μας, με εξαίρεση βέβαια τις περιπτώσεις που αναφέρονται εδώ και ίσως κάποιες άλλες αρκετά μικρότερες εφαρμογές καθαρά τοπικού χαρακτήρα σε άλλα μέρη της Ελλάδας. Το Υπουργείο Γεωργίας έχει χρηματοδοτήσει ερευνητικά προγράμματα Τ.Ε. (Βαφειάδης και Πανώρας, 1994), όπως είναι οι περιπτώσεις του Γεωργικού Πανεπιστημίου Αθηνών για το Αργολικό Πεδίο και του Δημοκριτείου Πανεπιστημίου Θράκης για περιοχές της Θράκης.

Τον τελευταίο καιρό το Υπουργείο Γεωργίας έχει αρχίσει να χρηματοδοτεί ερευνητικά προγράμματα Τ.Ε., όπως είναι οι περιπτώσεις:

- του Αργολικού Πεδίου, όπου εκπονεί σχετικό πρόγραμμα το Γεωργικό Πανεπιστήμιο Αθηνών (Βαφειάδης κ.α., 1994),
- περιοχών της Θράκης, όπου εκπονείται σχετικό ερευνητικό πρόγραμμα από τα Εργαστήρια Τεχνικής Γεωλογίας και Υδραυλικών Έργων της Πολυτεχνικής Σχολής του Δ.Π.Θ. για λογαριασμό του Υπουργείου Γεωργίας με θέμα τη μελέτη δυνατότητας εφαρμογής τεχνητού εμπλουτισμού υδροφορέων Ξάνθης – Ροδόπης,
- του Ν. Κορινθίας, όπου εκπονείται σχετικό πρόγραμμα υδρογεωλογικής μελέτης Τ.Ε. υπόγειων υδροφορέων βόρειας παραλιακής έως ημιλοφώδους ζώνης του νομού, με υπεύθυνο τον Καθηγητή Ε.Μ.Π. κ. Ι. Κουμαντάκη,
- της περιοχής Υπέρειας – Ορφανών Θεσσαλίας, όπου εκπονείται σχετικό πρόγραμμα υδρογεωλογικής μελέτης Τ.Ε. του καρστικού συστήματος της περιοχής με υπεύθυνο τον Καθηγητή του Πανεπιστημίου Αθηνών κ. Η. Μαριωλάκο.

Συγκεκριμένα στη Θράκη, από το 1993, στο πλαίσιο ερευνητικού προγράμματος που ανατέθηκε από το Υπουργείο Γεωργίας και εκπονήθηκε από τα εργαστήρια Υδραυλικών Έργων και Τεχνικής Γεωλογίας της Πολυτεχνικής Σχολής του Δ.Π.Θ., μελετήθηκε η δυνατότητα εφαρμογής Τ.Ε. σε επιλεγμένες περιοχές των νομών Ξάνθης και Ροδόπης (Σακκάς et al., 1998). Οι περιοχές αυτές είναι: μια από τις πολλές παλιές διάσπαρτες κοίτες του Νέστου στο ανατολικό τμήμα του Δέλτα του (Διαμαντής κ.α., 1999), όπου έχουμε κυρίως φαινόμενα υφαλμύρινσης του υπόγειου νερού) (Πλιάκας et al., 2001), η περιοχή της παλιάς κοίτης του χειμάρρου Κόσυνθου που διερχόταν ΝΑ του χωριού Βαφέικα Ξάνθης (, η κοίτη-τάφρος του ποταμού Λίσσου Ν. Ροδόπης (φαινόμενα και ποιοτικής επιβάρυνσης του υπογείου νερού), η περιοχή της παλιάς κοίτης του ίδιου ποταμού Λίσσου, η περιοχή απόθεσης φερτών υλικών του χειμάρρου Κομφάτου Ν. Ροδόπης, κατά την έξοδό του από την ορεινή ζώνη (Πλιάκας, κ.α., 2001). Στις περιοχές αυτές ο Τ.Ε. μπορεί να συμβάλει θετικά και ουσιαστικά στην επαναφορά του όλου διαταραγμένου καθεστώτος των υπόγειων νερών τους στη φυσική του λειτουργία. Η έρευνα περιέλαβε ένα πακέτο απαραίτητων ερευνητικών εργασιών που έχουν συστηματοποιηθεί και τυποποιηθεί κατά περίπτωση και περιοχή και μια σειρά προτάσεων για τα κριτήρια επιλογής της κατάλληλης μεθόδου τεχνητού εμπλουτισμού και την τεχνική της εφαρμογής της.

Για την αντιμετώπιση του φαινομένου της υφαλμύρινσης της παράκτιας περιοχής του Δήμου Ορφανού του Νομού Καβάλας, αλλά και της ικανοποίησης μεγαλύτερων αρδευτικών αναγκών, διερευνήθηκε από Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας της Πολυτεχνικής Σχολής του Δ.Π.Θ., η εφαρμογή Τ.Ε. των υδροφόρων, με την κατασκευή λεκανών κατάκλισης και αναβαθμών ανακοπής της ροής σε επιλεγμένους χειμάρρους της περιοχής και τροφοδοσία τους από τον ποταμό Στρυμόνα με την κατασκευή ανάλογου αγωγού μεταφοράς του νερού εμπλουτισμού (Πλιάκας και Διαμαντής, 1998, Πλιάκας κ.α., 1999).

Στην περιοχή Πολυσίτου του νομού Ξάνθης, το Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας της Πολυτεχνικής Σχολής του Δ.Π.Θ. έχει προχωρήσει, από το 1994, στο στάδιο της εφαρμογής του Τ.Ε. με αρκετά αξιόλογα και αισιόδοξα αποτελέσματα ως προς την αποτελεσματικότητα του εμπλουτισμού (Πλιάκας, 1998, Πλιάκας κ.α., 1999). Για την περιοχή αυτή, μετά από προκαταρκτική έρευνα και λαμβάνοντας υπόψη και οικονομοτεχνικά κριτήρια, προέκυψε ότι η αποτελεσματικότερη μέθοδος εφαρμογής τεχνητού εμπλουτισμού είναι εκείνη της ενεργοποίησης παλιών αδρανοποιημένων κοιτών.

## **Εφαρμογή τεχνητού εμπλουτισμού στο Αργολικό πεδίο**

(κύρια βιβλιογραφική πηγή: Πουλοβασίλης, κ.α., 2002)

### Ιστορικά – Υδρογεωλογικά στοιχεία

Η υποβάθμιση των υπόγειων νερών στις αρχές της δεκαετίας του 1960, ιδιαίτερα στις ανατολικές περιοχές του Αργολικού πεδίου, Άρια, Λευκάκια Ασίνη, Δρέπανο κλπ., προσέκλυσε το ενδιαφέρον των αρμόδιων φορέων και υπηρεσιών οι οποίοι, μετά από προκαταρκτικές έρευνες κατέληξαν σε μια δέσμη ερευνητικών εργασιών και προτάσεων που

είχαν ως αντικειμενικό στόχο την αντιμετώπιση της εισβολής της θάλασσας και την εξασφάλιση των απαραίτητων αρδευτικών αναγκών της περιοχής.

Η κατάσταση που επικρατούσε στις αρχές της δεκαετίας του 1960 οδηγούσε σαφώς στην υιοθέτηση του τεχνητού εμπλουτισμού στην αντιμετώπιση του προβλήματος τη υπαλμύρωση

Στη συνέχεια η ΥΕΒ του ΥΠ.ΓΕ (Στασινόπουλος και Πουλοβασίλης, 1965) έχοντας υπόψη όλα τα χαρακτηριστικά των υδατικών συστημάτων της περιοχής, έθεσε τις βάσεις ενός σχεδιασμού αξιοποίησής τους έτσι ώστε να καλύπτονται οι αρδευτικές ανάγκες της περιοχής αλλά παράλληλα να εξασφαλίζεται και μια βιώσιμη αρδευόμενη γεωργία. Ο σχεδιασμός αυτός προέβλεπε ότι τα υπόγεια νερά με κατάλληλη διαχείριση και εμπλουτισμό από τις χειμερινές παροχές των πηγών, θα εξακολουθούσαν να είναι η βασική πηγή νερού άρδευσης. Προέβλεπε επίσης τη χρησιμοποίηση εαρινών και θερινών παροχών των πηγών Λέρνης και Κεφαλαρίου για άρδευση καθώς και την περιορισμένη χρήση του νερού Κιβερίου λόγω της αμφίβολης ποιότητάς του.

Ο εμπλουτισμός των υπόγειων νερών θα γινόταν με τα χειμερινά νερά του Κεφαλαρίου και η μεταφορά τους στην πεδιάδα θα γινόταν με ελεύθερη ροή αφού η πηγή εκβάλλει σε υψόμετρο 24m περίπου, και δευτερευόντως με χειμερινά νερά της Λέρνης που η μεταφορά τους απαιτεί ανύψωσή τους με άντληση. Τα πρώτα πειράματα τεχνητού εμπλουτισμού έγιναν το 1964 στις περιοχές Πολύγωνου, Αγ. Αδριανού, Λευκακίων, Ασίνης και Δρέπανου όπου η υπαλμύρωση των υπόγειων νερών ήταν εντονότερη με καταστρεπτικές συνέπειες στις φυτείες εσπεριδοειδών. Για το σκοπό αυτό κατασκευάστηκε σωληνωτός αγωγός για τη μεταφορά νερών του Κεφαλαρίου και δευτερεύοντα δίκτυα παροχέτευσης του νερού σε υπάρχοντα φρέατα και γεωτρήσεις των παραπάνω περιοχών. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων αυτών ήταν πολύ ενθαρρυντικά ενώ η άμεση βελτίωση της ποιότητας των υπόγειων νερών είχε ευεργετική επίδραση στα εσπεριδοειδή. Αργότερα όμως, επικράτησε η αντίληψη ότι η κύρια πηγή νερού άρδευσης θα ήταν οι πηγές Κιβερίου και σχεδιάστηκε η διώρυγα μεταφοράς των νερών τους στην Αργολική πεδιάδα. Ο αρχικός σχεδιασμός της διώρυγας δεν προέβλεπε τη διασύνδεσή της με την πηγή του Κεφαλαρίου. Στη συνέχεια όμως εξασφαλίστηκε η διασύνδεση των πηγών Κεφαλαρίου με τη διώρυγα αυτή και κατέστη δυνατή η μεταφορά προς την πεδιάδα και νερών άριστης ποιότητας.

Από το 1990 και μετά άρχισαν και πάλι πειράματα εμπλουτισμού με νερά του Κεφαλαρίου που μεταφέρονταν στην πεδιάδα με τη διώρυγα της Νέας Κίου. Οι λεπτομερείς εργασίες καθώς και τα αποτελέσματα από την εφαρμογή των δύο αυτών φάσεων εμπλουτισμού περιγράφονται στις επόμενες παραγράφους.

Από υδρογεωλογικής πλευράς σύμφωνα με τους παραπάνω ερευνητές το Αργολικό πεδίο αποτελεί ένα αλλουβιακό υδρογεωλογικό περιβάλλον το οποίο δομείται από ποικίλης σύστασης Τεταρτογενή ιζήματα, όπου αναπτύσσονται επάλληλοι υδροφόροι σχηματισμοί στους οποίους παρεμβάλλονται αργιλικά και αργιλώδη ιζήματα. Σε γενικές γραμμές οι υδροφόροι σχηματισμοί που διακρίνονται είναι:

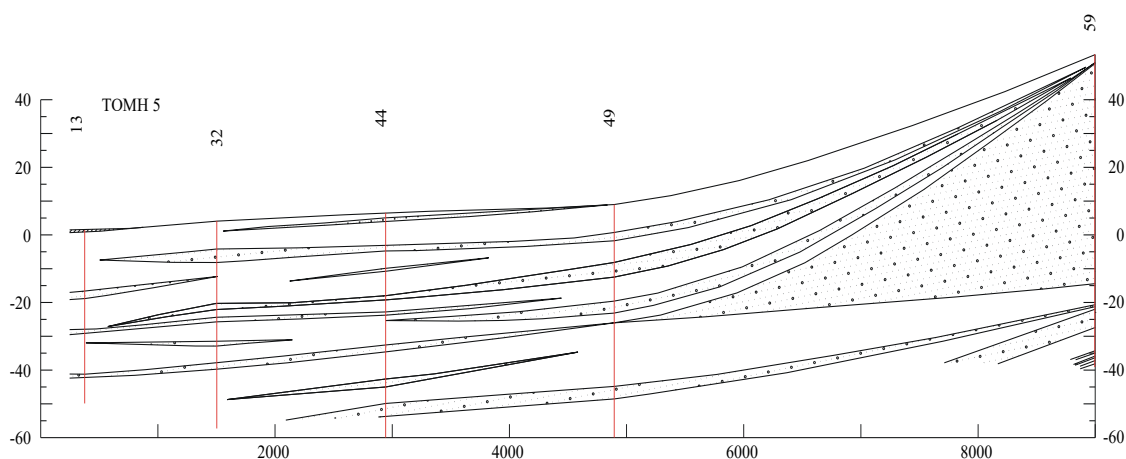
**Φρεάτιος υδροφόρος:** αναπτύσσεται σε μια στενή λωρίδα κατά μήκος της παραλιακής ζώνης από την ακτή μέχρι και 200-300 m προς την πεδιάδα και εκτείνεται από το Ναύπλιο μέχρι το μέσο περίπου των ακτών του Αργολικού κόλπου. Συνίσταται κυρίως από λεπτόκοκκες άμμους με ποικίλη συμμετοχή αργιλικών υλικών. Το μέγιστο βάθος στην παράκτια ζώνη φτάνει τα 7-8m και αναπτύσσεται πάνω από το αργιλικό κάλυμμα. Ο υδροφόρος αυτός από άποψη υδροληπτικής δυνατότητας είναι πρακτικά ασήμαντος.

Το κεντρικό και νότιο τμήμα της πεδιάδας καλύπτεται επιφανειακά από ένα στρώμα ερυθράς μαργαίικης αργίλου το οποίο έχει χαρακτηριστεί και ως "*αργιλικό κάλυμμα*". Εκτείνεται σε βάθος έως 15-20 μέτρα και αποτελεί την οροφή των υποκειμένων υδροφόρων σχηματισμών.

Κάτω από το αργιλικό κάλυμμα μέχρι το υπόβαθρο των υδροφόρων σχηματισμών ακολουθεί ένα αριθμός επάλληλων υδροφόρων στρωμάτων που ποικίλει από θέση σε θέση. Παλαιότερες ερευνητικές γεωτρήσεις (Γαλέος, 1967) συνάντησαν από 2 έως 5 υδροφόρα στρώματα μέχρι το βάθος των 60 m. Άλλοτε σχηματίζουν διακριτά υδροφόρα στρώματα ενώ σε μερικές περιπτώσεις αποτελούν ένα πολύπλοκο δίκτυο, που έχει διαμορφωθεί από τις εκάστοτε συνθήκες ιζηματογένεσης. Ο αριθμός τους μειώνεται από την παραλία προς το

εσωτερικό της πεδιάδας, ενώ προς τα περιθώριά της σταδιακά ενοποιούνται σε ένα ελεύθερο υδροφόρο σχηματισμό (σχ. 11.7).

Σε γενικές γραμμές προκύπτει ότι στο κεντρικό και νότιο τμήμα της πεδιάδας αναπτύσσονται, κάτω από το αργιλικό κάλυμμα, υπό πίεση ή μερικώς υπό πίεση υδροφόροι σχηματισμοί. Σε περιοχές όπου παρεμβάλλονται εκτεταμένα αργιλικά στρώματα μπορούν να χαρακτηριστούν ως υπό πίεση, αλλά εκεί όπου μεσολαβούν αδρομερέστερα υλικά χαρακτηρίζονται ως μερικώς υπό πίεση έως ελεύθεροι. Συμβατικά μπορεί να λεχθεί ότι η ανάπτυξη των υπό πίεση υδροφόρων εκτείνεται μέχρι τα όρια του αργιλικού καλύμματος) όπου σταδιακά αντικαθίστανται από ελεύθερους. Οι ελεύθεροι υδροφόροι εκτείνονται στη ζώνη μεταξύ των ορίων του αργιλικού καλύμματος και των περιθωρίων της πεδιάδας όπου αναπτύσσονται αλπικοί σχηματισμοί και Νεογενή ιζήματα. Η βάση τους είναι ο φλύσχος ή εκτεταμένα αργιλικά στρώματα και η οροφή τους προσεγγίζεται από τις ανώτερες διακυμάνσεις της ελεύθερης επιφάνειας του υπόγειου νερού.



Σχήμα 11.7. Απλοποιημένη υδροστρωματογραφική τομή του Αργολικού πεδίου, διεύθυνσης Β-Ν

#### 1<sup>η</sup> Φάση εμπλουτισμού

Συστηματικά πειράματα τεχνητού εμπλουτισμού, έγιναν για πρώτη φορά στην Αργολίδα αλλά και στην Ελλάδα, την περίοδο 1964 έως 1968. Πιο συγκεκριμένα τα πειράματα αυτά έγιναν στις περιοχές Πολυγώνου, Αγίου Αδριανού, Λευκακίων, Ασίνης και Δρέπανου, όπου είχε παρατηρηθεί η εντονότερη υφαλμύρωση των υπόγειων νερών με καταστρεπτικές συνέπειες στα εσπεριδοειδή των περιοχών αυτών. Τα πειράματα αυτά, σχεδιάστηκαν από τον κ. Α. Πουλοβασίλη, ο οποίος παρακολούθησε και την επιτόπου εφαρμογή τους υποβοηθούμενος από το γεωλόγο κ. Θάνο. Από τα πειράματα αυτά προέκυψαν πολύτιμα συμπεράσματα όσον αφορά στις δυνατότητες απορρόφησης των νερών εμπλουτισμού, στη βελτίωση της ποιότητας των υπόγειων νερών και στην ανύψωση της στάθμης τους. Ο Θάνος (1994), περιγράφει τις διάφορες φάσεις του εμπλουτισμού κατά την περίοδο εκείνη. Για την εφαρμογή του κατασκευάστηκε σωληνωτός αγωγός μεταφοράς νερών της πηγής Κεφαλαρίου στις παραπάνω περιοχές. Ο αγωγός αυτός τροφοδοτούσε υπάρχοντα αρδευτικά δίκτυα από τα οποία το νερό με πλαστικούς σωλήνες κατέληγε πάντα κάτω από την υπάρχουσα στάθμη των φρεάτων για να αποφεύγεται η δημιουργία φουσαλίδων αέρα οι οποίες θα ήταν δυνατό να εμφράζουν τους πόρους των υδροφόρων σχηματισμών στο άμεσο περιβάλλον των φρεάτων μειώνοντας έτσι την απορροφητική τους ικανότητα.

Ο τεχνητός εμπλουτισμός της περιόδου 1964 άρχισε από το Μάιο και ήταν μικρής διάρκειας λόγω έλλειψης νερού, εξ αιτίας της χρησιμοποίησης των εαρινών παροχών του Κεφαλαρίου για αρδεύσεις. Επαναλήφθηκε το Φεβρουάριο του 1965 σε ευρύτερη κλίμακα και ήταν

διάρκειας τριών μηνών περίπου. Το δίκτυο εμπλουτισμού περιελάμβανε 22 φρέατα στην περιοχή Πολυγώνου - Άριας, 6 φρέατα στα Λευκάκια και 25 φρέατα στην Ασίνη και Δρέπανο.

Το 1966 ο εμπλουτισμός άρχισε πάλι το Φεβρουάριο και ήταν διάρκειας 60 ημερών. Τα εμπλουτιζόμενα φρέατα ήταν καταμεμημένα στις περιοχές Πολυγώνου - Άριας (5 φρέατα), Λευκακίων (11 φρέατα) και Ασίνης-Δρέπανου (36 φρέατα). Το νερό και στην περίπτωση αυτή δεν επαρκούσε για να καλύψει την απορροφητική ικανότητα των φρεάτων.

Από το Δεκέμβριο του 1966 μέχρι τον Απρίλιο του 1967 ο εμπλουτισμός επαναλήφθηκε για 120 ημέρες σε στάδιο πλέον πρακτικής εφαρμογής, με δαπάνες του ΤΟΕΒ υπό τις οδηγίες της ΥΕΒ του ΥΠΓΕ, στις περιοχές Άριας, Αγ. Αδριανού, Λευκακίων, Ασίνης και Δρέπανου. Στην περίπτωση αυτή τα φρέατα εμπλουτισμού δεν ήταν σταθερά αλλά πολλά από αυτά άλλαζαν συνέχεια.

Τέλος την Άνοιξη του 1968 ο ΤΟΕΒ επαναλαμβάνει τον Τ.Ε. σε επίπεδο πρακτικής εφαρμογής με οδηγίες της ΥΕΒ του ΥΠΓΕ.

Πριν από την έναρξη του εμπλουτισμού μετρήθηκαν οι στάθμες και η συγκέντρωση των χλωριόντων σε όλα τα φρέατα εμπλουτισμού και παρατηρήσεων. Κατά τη διάρκεια του εμπλουτισμού καταγραφόταν επίσης τακτικά η παροχή εμπλουτισμού σε κάθε φρέαρ καθώς και οι στάθμες και η συγκέντρωση των χλωριόντων σε όλο το δίκτυο εμπλουτισμού και παρατηρήσεων.

Οι συνολικές ποσότητες νερού που εφαρμόστηκαν για Τ.Ε. τα έτη 1965, 1966 και 1967 ήταν αντίστοιχα 1.160.000, 745.000 και 1.400.000 m<sup>3</sup>.

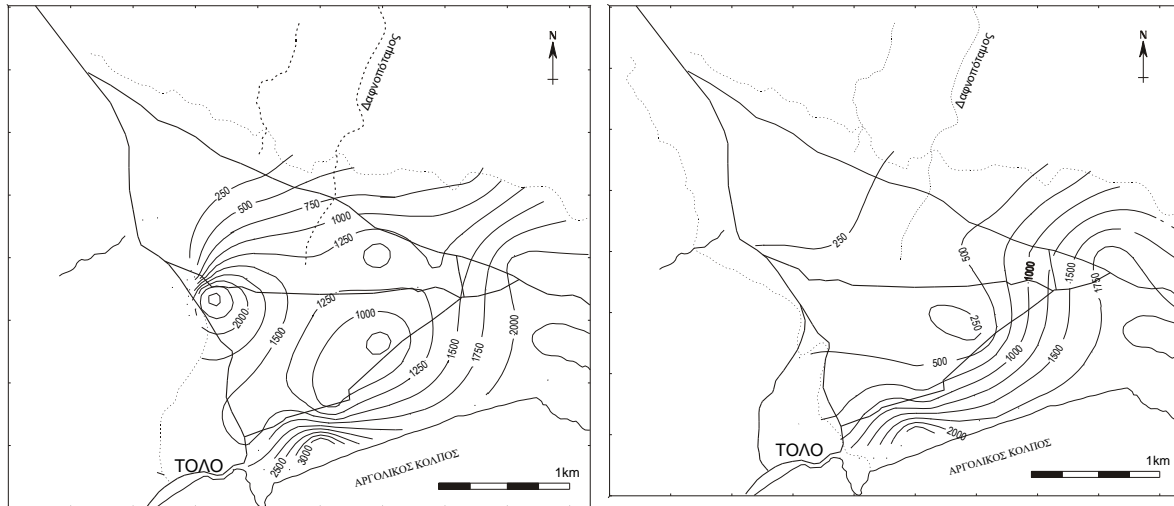
Τα αποτελέσματα των πειραμάτων αυτών ήταν πράγματι θεαματικά. Στο σχήμα 11.8 παρουσιάζονται ισοχλώριες καμπύλες πριν και μετά από την εφαρμογή του εμπλουτισμού στην περιοχή της Ασίνης - Δρέπανου - Τολού (ΥΠ.ΓΕ, 1963-75). Η αποκατάσταση της ποιότητας των υπόγειων νερών συνέβαλε επίσης ουσιαστικά και στην ανάκαμψη των εσπεριδοειδών της περιοχής.

Η μέση απορροφητική ικανότητα των φρεάτων κυμάνθηκε από 10m<sup>3</sup>/h στις περισσότερες περιοχές μέχρι 30m<sup>3</sup>/h στην περιοχή της Ασίνης και ιδιαίτερα κατά μήκος του χείμαρρου Δαφνοπόταμου. Παρατηρήθηκε λοιπόν ότι τα φρέατα εμπλουτισμού στην περιοχή της Ασίνης και ιδιαίτερα στις αδρομερείς αποθέσεις του Δαφνοπόταμου, στις παρυφές της πεδιάδας, είχαν πολύ μεγαλύτερη απορροφητική ικανότητα από αυτά της περιοχής του Πολύγωνου. Ακόμη παρατηρήθηκε ότι ο ρυθμός απορρόφησης σε φρέατα κοντά στην παραλία ήταν μικρότερος από αυτόν που επιτεύχθηκε σε άλλα κείμενα μακρύτερα.

Επίσης παρατηρήθηκε ότι με την πάροδο του χρόνου η απορροφητική ικανότητα των φρεάτων μειωνόταν. Το γεγονός αυτό αποδόθηκε στην άνοδο της στάθμης των υπόγειων νερών η οποία έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της διαφοράς δυναμικού μεταξύ της στάθμης του φρεάτος και αυτής του υδροφόρου ορίζοντα και όχι σε πιθανή απόφραξη των πόρων.

Στα πλαίσια αυτού του πειράματος αξίζει να αναφερθεί ότι υπήρξαν και ορισμένα προβλήματα. Αυτά σχετίζονται με τη δυσπιστία και άρνηση των ιδιοκτητών φρεάτων εμπλουτισμού καθώς και με υποκλοπή νερού κατά μήκος της ενωτικής διώρυγας Κεφαλαρίου-Γλυκιάς για αρδεύσεις όπως επίσης και με συνεχή αλλαγή ορισμένων φρεάτων εμπλουτισμού δυσκολεύοντας έτσι τη συλλογή αξιόπιστων και συγκριτικών δεδομένων. Παραβίαση βάνας σε πηγάδι εμπλουτισμού από τον ιδιοκτήτη του είχε ως αποτέλεσμα την απότομη άνοδο της στάθμης του νερού στο φρέαρ ενώ στη συνέχεια η απότομη πτώση της στάθμης του προκάλεσε και την κατάρρευση των τοιχωμάτων του πηγαδιού.





α) Φθινόπωρο 1963

β) Φθινόπωρο 1965

Σχήμα 11.8. Ισοχλώριες καμπύλες (mg/l) της περιοχής Ασίνης - Δρέπανου - Τολού πριν και μετά από τα πειράματα εμπλουτισμού της περιόδου 1965

#### 2<sup>η</sup> Φάση εμπλουτισμού

Λόγω της υπεράντλησης που εφαρμόστηκε, από το 1960 και μετέπειτα, το μέτωπο της υπαλμύρωσης, κατά τα τελευταία έτη της δεκαετίας του 1980, προωθήθηκε μέχρι των περιοχών Κουρτακίου, Πυργέλας, Ηραίου και Αγίας Τριάδας ενώ μέτωπα υπαλμύρωσης εμφανίστηκαν και στο βορειοανατολικό άκρο της πεδιάδας. Παράλληλα, η στάθμη των υπόγειων νερών, στο κεντρικό και βόρειο τμήμα της πεδιάδας, έφτασε να είναι ακόμη και πενήντα μέτρα κάτω από τη στάθμη της θάλασσας, ενώ η ολική πτώση της στάθμης μεταξύ των ετών 1964 και 1990 έφτασε να είναι ακόμη και 70 έως 80 μέτρα. Η πτώση αυτή, είχε ως αποτέλεσμα την αποξήρανση ενός μεγάλου αριθμού γεωτρήσεων και την ως εκ τούτου αδυναμία εφαρμογής αρδεύσεων. Η ποσοτική και ποιοτική αυτή υποβάθμιση των υπόγειων νερών, οδήγησε το 1990 το Νομαρχιακό Συμβούλιο Αργολίδας να καταφύγει στον τεχνητό εμπλουτισμό, τα άμεσα ευεργετικά αποτελέσματα του οποίου, ήταν ήδη γνωστά στην περιοχή. Αρχικά εμπλουτισμός εφαρμόστηκε σε σύνολο 130 ιδιωτικών γεωτρήσεων και φρεάτων σε ευρύτερη πλέον ζώνη από αυτή της πρώτης φάσης που κάλυπτε όχι μόνο τις περιοχές της Ασίνης - Δρέπανου - Λευκακίων αλλά κυρίως όλη τη χαμηλή περιοχή του Αργολικού πεδίου από το Ναύπλιο και την Νέα Τίρυνθα μέχρι τη Νέα Κίο και προς βορρά μέχρι τις περιοχές Πυργέλας, Δαλαμανάρας και Λάλουκα (σχ. 11.9).

Η τροφοδοσία των γεωτρήσεων αυτών γινόταν αποκλειστικά μέσω της διώρυγα της Νέας Κίου με νερό άριστης ποιότητας της πηγής Κεφαλαρίου. Η προώθηση του νερού από τη διώρυγα στις γεωτρήσεις και στα φρέατα εμπλουτισμού γινόταν με λειτουργία αντλιοστασίων. Το πρόγραμμα αυτό του εμπλουτισμού συνεχίστηκε, στους χειμερινούς μήνες, μέχρι και το 1994. Στη συνέχεια με την περάτωση των εργασιών κατασκευής της νέας διώρυγας Κιβερίου, την Άνοιξη του 1994 κατέστη δυνατή η εφαρμογή του τεχνητού εμπλουτισμού σε ιδιωτικές γεωτρήσεις εκατέρωθεν της διώρυγας αυτής με ποσότητες νερού μεγαλύτερες από αυτές που εφαρμόζονταν τα προηγούμενα έτη. Έτσι από το 1994, ο εμπλουτισμός άρχισε να γίνεται κυρίως από τη νέα διώρυγα Κιβερίου σε παρακείμενες γεωτρήσεις με φυσική ροή και αναρρόφηση νερού από τη διώρυγα, ενώ η τροφοδοσία γεωτρήσεων και φρεάτων από τη διώρυγα της Νέας Κίου περιορίστηκε στην περιοχή της Ασίνης - Δρέπανου. Το γεγονός αυτό είχε ως αποτέλεσμα την μετατόπιση της ζώνης εμπλουτισμού βορειότερα, και την δυνατότητα εφαρμογής μεγαλύτερης ποσότητας νερού χωρίς κατανάλωση ενέργειας και συνεπώς με

ελαχιστοποίηση του κόστους. Ας σημειωθεί ότι η δραματική πτώση της στάθμης στο κεντρικό και βόρειο τμήμα της πεδιάδας, πέραν της εξάντλησης των υπόγειων νερών και του νέου μετώπου εισβολής της θάλασσας από βορρά, περιέκλειε και άλλους πιθανούς κινδύνους όπως η εκδήλωση καθιζήσεων.

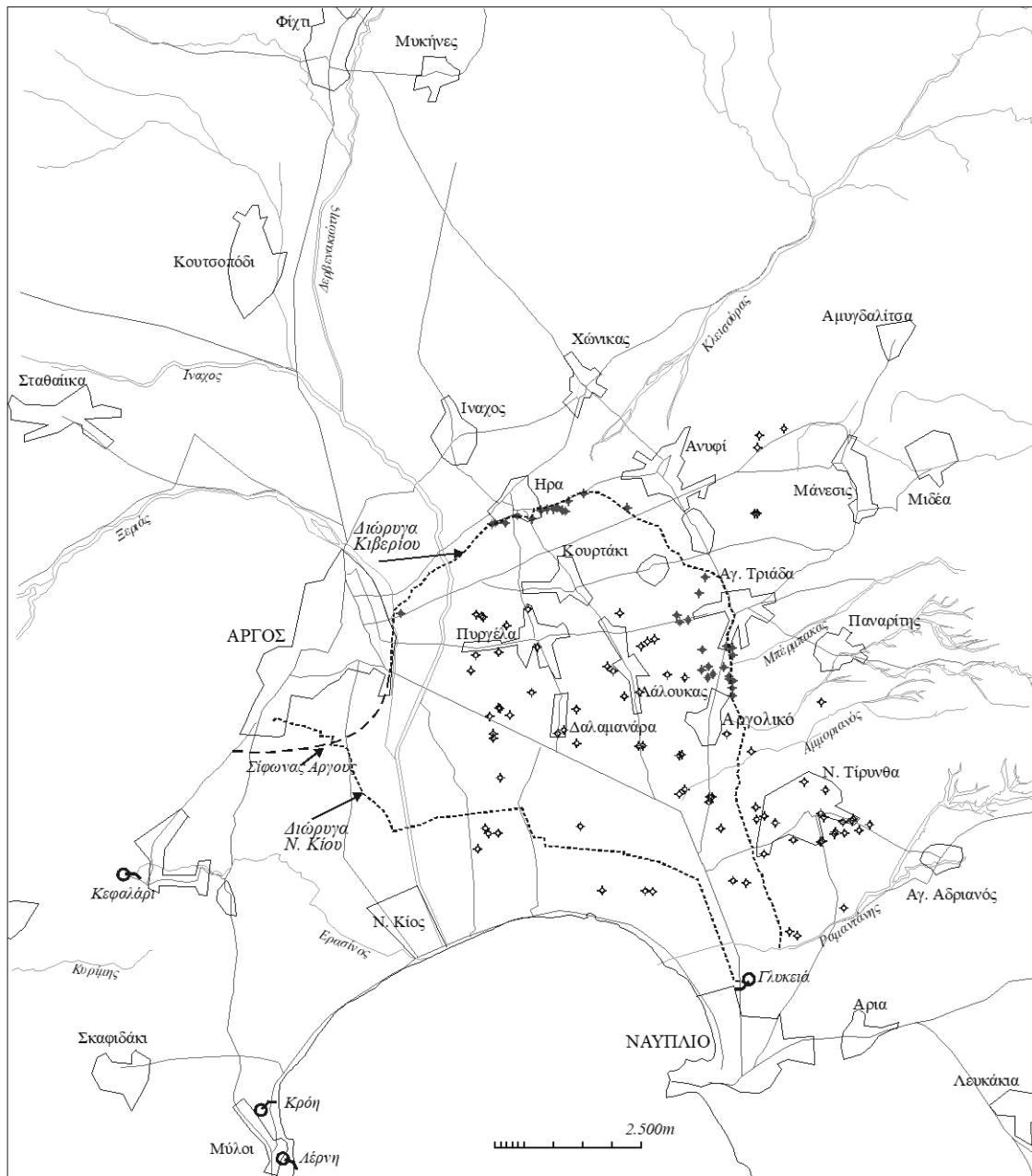
Η αναγκαιότητα για άμεση αύξηση της δυναμικότητας των υπόγειων νερών της περιοχής καθώς και τα πρώτα ικανοποιητικά αποτελέσματα του τεχνητού εμπλουτισμού στη φάση αυτή, ενθάρρυνε τοπικούς συνεταιρισμούς οι οποίοι προέβηκαν στη διάνοιξη 10 γεωτρήσεων εμπλουτισμού, σε τρεις περιοχές κατά μήκος της νέας διώρυγας Κιβερίου, στους οικισμούς Ήρας, Κουρτακίου και Αγ. Τριάδας. Έτσι αυξήθηκε σημαντικά η δυνατότητα τεχνητής τροφοδοσίας των υδροφόρων σχηματισμών. Η μεταβολή της στάθμης και της ποιότητας των υπόγειων νερών καταγραφόταν σε ένα ευρύ δίκτυο γεωτρήσεων παρατήρησης. Οι μετρήσεις αυτές επέτρεπαν την παρακολούθηση του ρυθμού ποιοτικής και ποσοτικής αποκατάστασης των υπόγειων νερών καθώς επίσης και τη διεξαγωγή συμπερασμάτων σε ότι αφορά σε υδραυλικές ιδιότητες των υδροφόρων σχηματισμών. Η παρουσία του πιεζομετρικού χαμηλού που είχε διαμορφωθεί στο κεντρικό και βόρειο τμήμα της πεδιάδας δείχνει ότι το προστιθέμενο νερό εμπλουτισμού κινείτο κυρίως προς βορά. Οι ποσότητες νερού που εφαρμόστηκαν την περίοδο 1990-98 για τεχνητό εμπλουτισμό μετρήθηκαν τόσο με χρήση υδρομετρητών που είχαν τοποθετηθεί σε αντιπροσωπευτικές γεωτρήσεις όσο και με μετρήσεις της συνολικής παροχής που διοχετευόταν στην πεδιάδα από τη διώρυγα Κιβερίου.

Παραδείγματα μετρήσεων παροχών στις παραπάνω γεωτρήσεις καθώς και η μεταβολή τους με το χρόνο παρουσιάζονται γραφικά στο σχήμα 11.10 (Πουλοβασίλης κ.α 1996). Ανάλογες διακυμάνσεις στην παροχή εμπλουτισμού παρατηρήθηκαν και τα επόμενα έτη, γεγονός που επιβεβαιώνει και σε αυτή την περίπτωση ότι η μείωση της παροχής εμπλουτισμού αποδίδεται όχι στην έμφραξη των πόρων στο άμεσο περιβάλλον των τοιχωμάτων των γεωτρήσεων αλλά στη μείωση της υδραυλικής κλίσης μεταξύ της στάθμης του νερού στη διώρυγα και της στάθμης του υδροφόρου σχηματισμού στο άμεσο περιβάλλον της γεώτρησης. Επισημαίνεται ότι σε μερικές γεωτρήσεις (π.χ. στη 2<sup>η</sup> της Ήρας) οι παροχές εμπλουτισμού δεν αντιπροσωπεύουν τις μέγιστες δυνατές παροχές αλλά τις παροχές που επέτρεπε η διατομή του αγωγού τροφοδοσίας. Με βάση τα μετρήσεις αυτές, οι ποσότητες νερού που εφαρμόστηκαν από το 1990 μέχρι το 2002 για εμπλουτισμό στο Αργολικό πεδίο υπολογίζονται συνολικά στα 70.617.290 m<sup>3</sup> (διώρυγα Ν. Κίου 27.885.290 m<sup>3</sup> και διώρυγα Κιβερίου 47.732.000 m<sup>3</sup>).

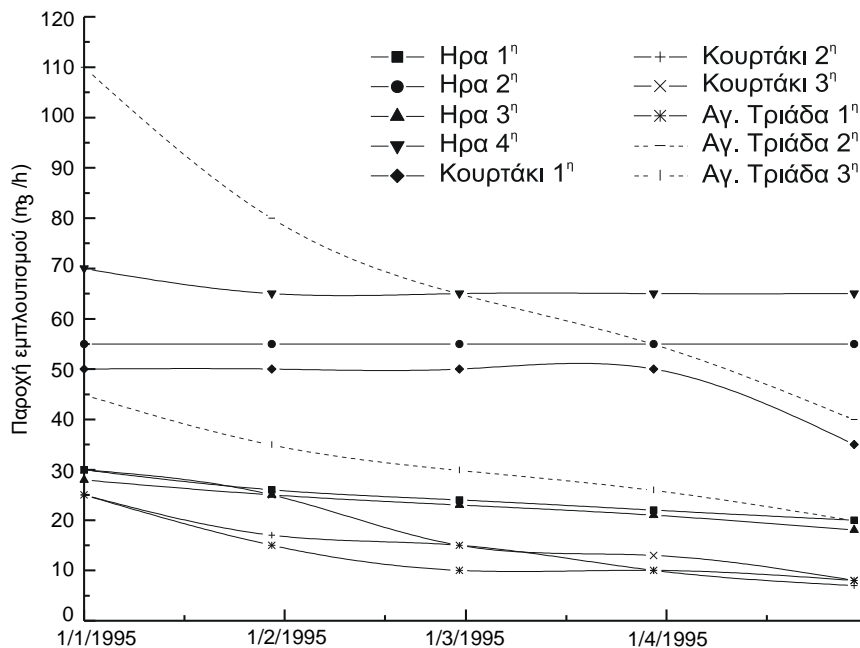
Η επεξεργασία όλων των μέχρι τώρα μετρήσεων στάθμης και ποιότητας των υπόγειων νερών, σε συνδυασμό με το διαθέσιμα στρωματογραφικά στοιχεία, επιτρέπουν τη διεξαγωγή αξιόπιστων συμπερασμάτων σχετικά με την ροή και κίνηση του υπόγειου νερού τόσο κατά τη διάρκεια των αντλήσεων όσο και στις διάφορες φάσεις του εμπλουτισμού.

### Συμπεράσματα

Ο τεχνητός εμπλουτισμός στο Αργολικό πεδίο την τελευταία δεκαετία αναμφισβήτητα επέφερε ευεργετικά αποτελέσματα στα ποιοτικά και ποσοτικά χαρακτηριστικά των υπόγειων νερών. Πριν από την εφαρμογή του εμπλουτισμού μεγάλο τμήμα των υδροφόρων σχηματισμών στις Β και ΒΔ περιοχές της πεδιάδας συνήθιζε να εξαντλείται, ιδιαίτερα κατά τους τελευταίους καλοκαιρινούς μήνες (Πουλοβασίλης κ.α 1996).



Σχήμα 11.9. Θέσεις γεωτρήσεων εμπλουτισμού περιόδου 1990-98



Σχήμα 11.10. Παροχές γεωτρήσεων εμπλουτισμού

### Έρευνες και προτάσεις εφαρμογής τεχνητού εμπλουτισμού σε υδροφόρους πεδινών τμημάτων της ανατολικής Μακεδονίας και της Θράκης

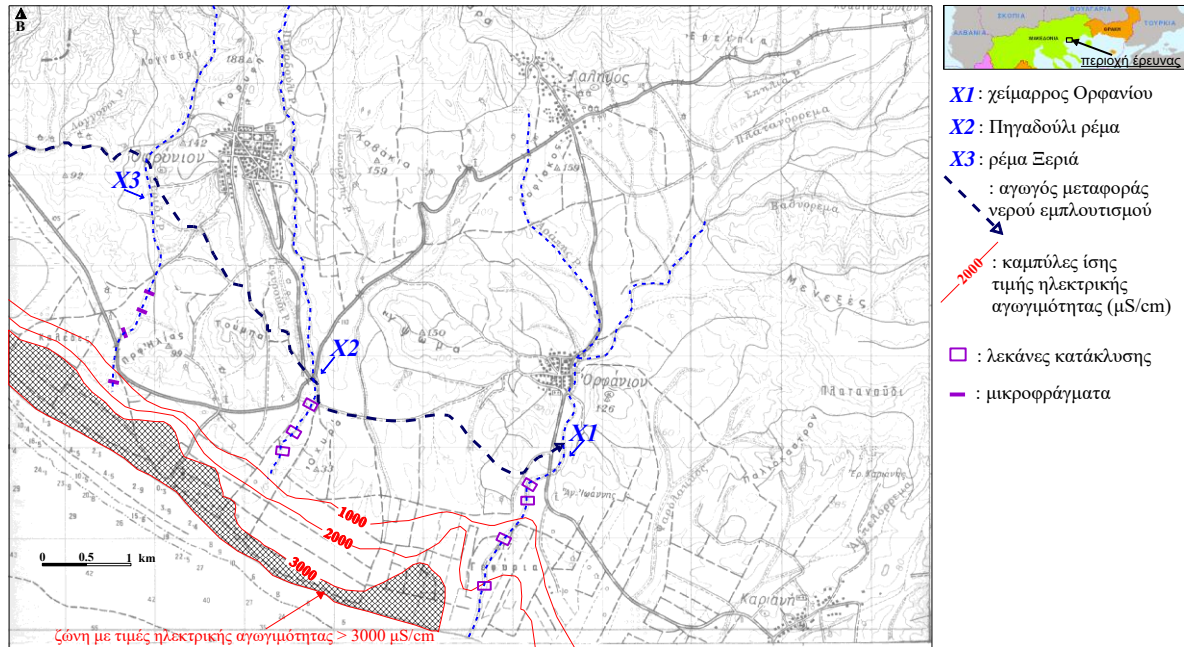
Η απρογραμμάτιστη υπερεκμετάλλευση των υπόγειων νερών των πεδινών τμημάτων στην ευρύτερη περιοχή της Ανατολικής Μακεδονίας και της Θράκης έχει προκαλέσει μείωση του υπόγειου υδατικού δυναμικού στους υπόγειους αλλουβιακούς και νεογενείς υδροφορείς, με κύρια χαρακτηριστικά τη συνεχή πτώση της υδροστατικής στάθμης των γεωτρήσεων, τη μεγάλη μείωση της εκμεταλλεύσιμης παροχής των παραγωγικών γεωτρήσεων και τη συνεχή ποιοτική υποβάθμιση των υπόγειων νερών, συνήθως στα παράκτια πεδία, από τη διείσδυση της θάλασσας.

Το εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας του Τομέα Γεωτεχνικής Μηχανικής του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Δ.Π.Θ., στο πλαίσιο ανάλογων ερευνητικών προγραμμάτων που εκπόνησε για διάφορους φορείς, αλλά και δικών του ερευνητικών δραστηριοτήτων με θέμα τη διερεύνηση κατάλληλων έργων Τ.Ε. των υδροφόρων σε διάφορες περιοχές της Αν. Μακεδονίας και Θράκης, συνέλεξε και μελέτησε όλα τα απαραίτητα στοιχεία και προέβη στις απαραίτητες ερευνητικές εργασίες για να καταλήξει σε χρήσιμες προτάσεις για την ορθολογική διαχείριση του υπόγειου υδατικού δυναμικού της περιοχής.

#### Παράκτια περιοχή Δήμου Ορφανού του Νομού Καβάλας

Για την αντιμετώπιση του φαινομένου της υφαλμύρισης της περιοχής, αλλά και της ικανοποίησης μεγαλύτερων αρδευτικών αναγκών, διερευνήθηκε από το Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Δ.Π.Θ. η εφαρμογή Τ.Ε. των υδροφόρων της περιοχής με τη μέθοδο της επανενεργοποίησης παλιών κοιτών (Πλιάκας και Διαμαντής, 1998). Η περιοχή έρευνας αποτελεί μέρος των εκτάσεων των οικισμών Ορφανίου και Οφρυνίου και κατέχει το τελευταίο νοτιοδυτικό τμήμα του νομού Καβάλας (σχ. 11.11). 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 ένα αριθμό μικρών σχετικά

χειμάρρων και ρεμάτων, καταλαμβάνοντας μια έκταση 104 km<sup>2</sup>. Η ευρύτερη περιοχή έρευνας εντοπίζεται γεωλογικά στο δυτικό όριο της γεωτεκτονικής ζώνης της Ροδόπης που συμπίπτει με τον ποταμό Στρυμόνα και φιλοξενεί κυρίως μεταμορφωμένα πετρώματα (μάρμαρα, γνεύσιους, μαρμαρυγιακούς και πράσινους σχιστόλιθους) και πυριγενή πετρώματα (γνευσιοειδείς γρανίτες και γρανοδιορίτες).



Σχήμα 11.11. Χάρτης με την περιοχή έρευνας στο Ορφανό Καβάλας, τα προτεινόμενα έργα τεχνητού εμπλουτισμού και τις καμπύλες ίσης τιμής ηλεκτραγωγιμότητας (μS/cm).

Οι βροχοπτώσεις στην περιοχή είναι περιορισμένες (για την περίοδο 1979-1995, μέσο ετήσιο ύψος 430 mm), ενώ το θερμομετρικό εύρος κυμαίνεται από 17° έως 20° C (κλίμα θαλάσσιο μεταβατικό) με μέση ετήσια θερμοκρασία 13,4° C. Ελάχιστες έως σπάνιες είναι οι απορροές στις κοίτες των χειμάρρων για μεγάλα χρονικά διαστήματα, που πολλές φορές ξεπερνούν κατά πολύ και το έτος.

Οι κύριοι σχηματισμοί της περιοχής έρευνας, που ενδιαφέρει η υδρογεωλογική τους συμπεριφορά, είναι: (α) οι τεταρτογενείς αποθέσεις, που διακρίνονται στις ποταμοχειμάρριες παλαιοτεταρτογενείς και πρόσφατες αποθέσεις (με κατά θέσεις πλούσιο ως μέσου δυναμικού φρεάτιο ή μερικώς υπό πίεση οριζόντα 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), και (β) οι 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 τις βροχοπτώσεις 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 N και ΝΔ του Ορφανίου, ενώ διακρίνονται προνομιακοί άξονες συγκλίνουσας και αποκλίνουσας υπόγειας ροής με τελική κατεύθυνση τη θάλασσα. Ορισμένοι άξονες υπόγειας τροφοδοσίας δημιουργούνται σε θέσεις που δέχονται εμπλουτισμό από διηθήσεις της επιφανειακής απορροής. Αξίζει να αναφερθεί ιδιαίτερα ότι η στάθμη του υδροφόρου οριζόντα βρίσκεται κάτω από την επιφάνεια 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. 11.11).

Η διαδικασία εφαρμογής Τ.Ε. περιλαμβάνει την κατασκευή είτε λεκανών κατάκλισης είτε αναβαθμών ανακοπής της ροής σε επιλεγμένους χειμάρρους της περιοχής και τροφοδοσία τους από τον ποταμό Στρυμόνα με την κατασκευή ανάλογου αγωγού μεταφοράς του νερού εμπλουτισμού. Κατά το στάδιο λειτουργίας των έργων κρίνεται απαραίτητη η συστηματική παρακολούθηση της μεταβολής της στάθμης πιεζομετρικών γεωτρήσεων, που για την εδώ περίπτωση προτείνεται η κατασκευή τριών (μια σε κάθε πεδίο χειμάρρου) βάθους μέχρι 40 m και εγκατάσταση σ' αυτές αυτογραφικού συστήματος καταγραφής της στάθμης. Τα προτεινόμενα έργα εμπλουτισμού, αφορούν στην: α) κατασκευή λεκανών μέσα στις κοίτες των χειμάρρων Ορφανίου και στο ρέμα ανατολικά του Οφρυνίου (Πηγαδούλι ρέμα) και β) κατασκευή μικροφραγμάτων στο ρέμα Ξεριά του Οφρυνίου.

Πιο συγκεκριμένα για κάθε ένα από τους χειμάρρους που έχουν επιλεγεί για την εφαρμογή του Τ.Ε., προβλέπονται τα εξής (σχ. 11.11): 1. Χείμαρρος Ορφανίου. Πρόκειται για το χείμαρρο με την ευνοϊκότερη δομή (μεγάλου πάχους αδρόκοκκα υλικά) και ο οποίος τροφοδοτεί τη μεγαλύτερη υδρογεωλογική λεκάνη, που σήμερα αντλείται από ένα αρκετά μεγάλο αριθμό υδρογεωτρήσεων. Στο χείμαρρο αυτό προτείνεται η κατασκευή 4 λεκανών κατάκλισης, με στόχο τη δημιουργία πιεζομετρικού φορτίου και κυρίως την αύξηση των επιφανειών διήθησης του νερού και την παραμονή του στις λεκάνες για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Το μέγεθος των λεκανών ποικίλλει ανάλογα με το διαθέσιμο χώρο. Οι διαστάσεις τους είναι 50 m × 50 m, 30 m × 50 m, 10 m × 50 m και 10 m × 50 m αντίστοιχα, ενώ το βάθος τους φτάνει τα 2 m. Η τροφοδοσία με νερό θα γίνεται μόνο στην πρώτη λεκάνη, από διακλάδωση του αγωγού μεταφοράς. Οι υπόλοιπες λεκάνες θα δέχονται νερό μετά την υπερχειλίση της προηγούμενης λεκάνης. 2. Πηγαδούλι ρέμα (ρέμα ανατολικά του Οφρυνίου). Φιλοξενεί και αυτό ένα σημαντικό πάχος κροκαλών, οι οποίες στην περιοχή νότια της Εγνατίας Οδού βυθίζονται υπόγεια και σχηματίζουν ένα σημαντικό υδροφορέα. Όμως η μικρή τροφοδοσία και οι σχετικά μεγάλες ποσότητες που αντλούνται από ένα αριθμό αβαθών γεωτρήσεων, έχουν προκαλέσει και εδώ το φαινόμενο της υφαλμύρισης. Τα έργα που προτείνονται εδώ είναι η κατασκευή 3 λεκανών κατάκλισης διαστάσεων 50 m × 50 m και βάθος 2 m, ενώ η τροφοδοσία τους θα γίνεται όπως και στο προηγούμενο χείμαρρο. 3. Ρέμα Ξεριά (ρέμα δυτικά του Οφρυνίου). Προτείνεται η κατασκευή 4 μικροφραγμάτων (αναβαθμών) τραπεζοειδούς μορφής κατασκευασμένων από σκυρόδεμα με διαστάσεις κάτω βάσης 3 m × 2 m, στέψης 3 m × 1,5 m και ύψους 1,3 m, με στόχο την ανακοπή της ταχύτητας ροής και την αύξηση του πιεζομετρικού φορτίου, για τη διευκόλυνση έτσι της κατείσδυσης λόγω της διαφορετικής κοκκομετρικής διαβάθμισης των υλικών της κοίτης (πλέον λεπτόκοκκα υλικά).

Σε περιοχές όπου δεν υπάρχει προηγούμενη εμπειρία εφαρμογής Τ.Ε. θα πρέπει να προηγηθεί η κατασκευή ενός μικρού πιλοτικού έργου για να αποκτηθεί η σχετική εμπειρία και να συνταχθούν τα κατάλληλα κριτήρια για την πλήρη εφαρμογή και διαχείριση του έργου. Έτσι θα αποφευχθούν λάθη που στοιχίζουν χρήμα, χρόνο και περικλείουν κινδύνους μόλυνσης του υδροφορέα (Bouwer, 1989). Ένα ερευνητικό πρόγραμμα Τ.Ε. κρίνεται σκόπιμο να διαρκεί περί τα πέντε χρόνια, στη διάρκεια των οποίων πρέπει να παρακολουθούνται τα πειράματα και να συλλέγονται ώστε να διατυπώνονται όλα τα απαραίτητα στοιχεία για τις υδρογεωλογικές παραμέτρους του υδροφόρου, την ποιότητα του νερού του υδροφόρου, τα τεχνικά, οικονομικά και διαχειριστικά χαρακτηριστικά της εφαρμογής εμπλουτισμού (Diede, 1989). Από τις έρευνες που προηγήθηκαν στην περιοχή έρευνας προέκυψε ότι το κύριο μέτωπο εμπλουτισμού, λόγω ευνοϊκότερης δομής αναμένεται στην ευρύτερη περιοχή του χειμάρρου Ορφανίου. Έτσι στο χείμαρρο αυτό εφαρμόστηκε ένα μικρό χρονικό διαστήματος (20 ημέρες) πειραματικό στάδιο εμπλουτισμού. Σε όλη τη διάρκεια του πειραματικού σταδίου και για 10 ημέρες επιπλέον, παρακολουθήθηκε ένας αριθμός γεωτρήσεων (μετρήσεις μεταβολής της στάθμης, μετρήσεις της ηλεκτραγωγιμότητας). Το πειραματικό στάδιο είχε ως στόχο να δείξει την κατεύθυνση και την έκταση του εμπλουτισμού των υδροφόρων προς διάφορες κατευθύνσεις με βάση τις διαθέσιμες ποσότητες νερού για εμπλουτισμό. Η άνοδος της στάθμης των γεωτρήσεων παρακολούθησης κατά τη διάρκεια του πειραματικού σταδίου σε σύγκριση με τη

διακύμανση της στάθμης των ίδιων γεωτρήσεων προηγούμενων ετών για την ίδια περίοδο οδήγησε σε καταρχήν αισιόδοξες εκτιμήσεις όσον αφορά την αποτελεσματικότητα της εφαρμογής του Τ.Ε. με κύριο στόχο την άμεση ενίσχυση του υπόγειου υδατικού δυναμικού της περιοχής (Πλιάκας et al., 1997). Η έρευνα προβλέπεται να συνεχιστεί με την εφαρμογή του προβλεπόμενου από ανάλογες εφαρμογές Τ.Ε. πακέτου εργασιών για τα επόμενα χρόνια, ενώ αναμένεται μακροχρόνια και με αργούς ρυθμούς η βελτίωση της ποιότητας των υπαλμυρισμένων υπόγειων νερών της περιοχής αν αναλογισθεί κανείς αντίστοιχες περιπτώσεις μεγαλύτερης βέβαια κλίμακας σε περιοχές όπως για παράδειγμα της Καλιφόρνια των Η.Π.Α. όπου πέρασαν ακόμη και 40 χρόνια για να γίνει αισθητή αυτή η βελτίωση (Berger et al., 1998, Κουμαντάκης, 1999).

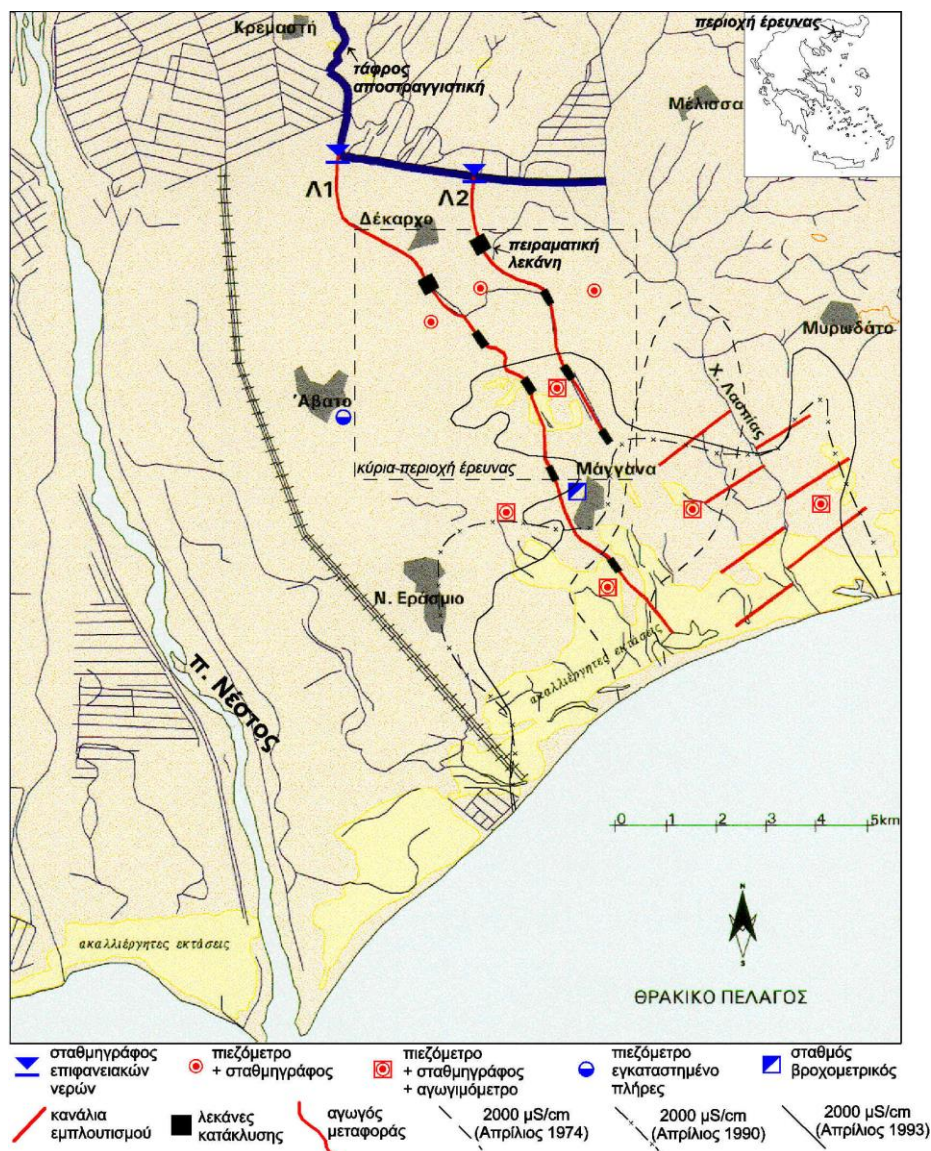
Η μεταφορά νερού προβλέπεται να γίνει με την κατασκευή νέου αγωγού μεταφοράς νερού μετά από άντληση, από τον ποταμό Στρυμόνα στην πεδινή περιοχή Οφρυνίου παροχής περί τα 500 m<sup>3</sup>/h, πέρα από τον ήδη υφιστάμενο αγωγό ο οποίος εξυπηρετεί ένα μικρό μέρος των σημερινών αρδευτικών αναγκών της περιοχής. Ο νέος αγωγός, που ήδη είναι υπό κατασκευή, θα εξυπηρετεί δύο στόχους. Ο πρώτος στόχος είναι η μεταφορά νερού κατά τη διάρκεια του χειμώνα για τον εμπλουτισμό του υπόγειου υδροφορέα όχι μόνο της περιοχής Οφρυνίου αλλά και της ευρύτερης περιοχής. Ο δεύτερος στόχος είναι η μερική κάλυψη των αναγκών της περιοχής σε αρδευτικό νερό κατά τη θερινή περίοδο εφ' όσον υπάρχει διαθέσιμο νερό καλής ποιότητας στο Στρυμόνα. Στο πλαίσιο του ερευνητικού προγράμματος που αναφέρθηκε στα προηγούμενα έγινε η μελέτη του αγωγού που αποτελείται από δύο τμήματα, ενός καταθλιπτικού αγωγού και ενός βαρύτητας και περιλαμβάνει την χάραξη του, την επιλογή της διαμέτρου, του είδους και της αντοχής του υλικού των σωλήνων, αντιπληγμιακό έλεγχο του καταθλιπτικού αγωγού, υπολογισμό των στοιχείων του αντλιοστασίου, υπολογισμό του κόστους του αντλούμενου νερού, υπολογισμό της ρυθμιστικής δεξαμενής, μελέτη της αντιδιαβρωτικής προστασίας των χαλυβδοσωλήνων και διαστασιολόγηση των απαιτούμενων εκσκαφών (Πλιάκας et al., 1997).

#### Ανατολικό τμήμα του Δέλτα του Ποταμού Νέστου

Στην περιοχή του Ανατολικού τμήματος του Δέλτα προτάθηκε από το Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Δ.Π.Θ. (Σακκάς et al., 1998), ως λύση αντιμετώπισης του φαινομένου της υπαλμύρισης του ανατολικού πεδινού τμήματος του Δέλτα του ποταμού Νέστου, αλλά και της ικανοποίησης μεγαλύτερων αρδευτικών αναγκών, η εφαρμογή Τ.Ε. των υδροφόρων της περιοχής.

Η κατασκευή των εγγειοβελτιωτικών έργων κατά το τέλος της δεκαετίας του '50 στο Δέλτα του ποταμού Νέστου (διευθέτηση της κοίτης του Νέστου και συμμάζεμα των διάσπαρτων κοιτών) και η απρογραμμάτιστη υπερεκμετάλλευση των υπόγειων νερών της περιοχής των τελευταίων δεκαετιών, έχει προκαλέσει μείωση του υπόγειου υδατικού δυναμικού στους υπόγειους αλλουβιακούς και νεογενείς υδροφορείς, με κύρια χαρακτηριστικά τη συνεχή πτώση της στάθμης των γεωτρήσεων, τη μεγάλη μείωση της εκμεταλλεύσιμης παροχής των παραγωγικών γεωτρήσεων και τη συνεχή ποιοτική υποβάθμιση των υπόγειων νερών από τη διείσδυση της θάλασσας. Το μεγαλύτερο τμήμα των επιβαρημένων (υφάλμυρων) περιοχών του ανατολικού Δέλτα εντοπίζεται στην ευρύτερη περιοχή Δεκάρχου – Μαγγάνων (σχ. 11.12). Η πεδινή περιοχή Δεκάρχου – Μαγγάνων αποτελεί μέρος του προσχωματικού πεδίου του ποταμού Νέστου, το οποίο μετά από την έξοδό του από την ορεινή μάζα απλώνεται προς τα νότια, μέχρι τη θάλασσα, υπό μορφή μεγάλου ριπιδίου. Χαρακτηριστικό του τμήματος είναι γενικά οι μικρές κλίσεις και η διαμόρφωση προς τα Ν και ΝΑ αβαθών τμημάτων, που δημιουργούν κατά καιρούς λιμνάζουσες επιφάνειες, που αποτελούν μέρος των φυσικών βιότοπων του Δέλτα. Στα ανατολικά όρια της κύριας περιοχής έρευνας διέρχεται ο χείμαρρος Λασπίας, ενώ βόρεια, σε απόσταση περίπου 2 km, εντοπίζεται αποστραγγιστική τάφρος, η οποία μεταφέρει τα περισσεύματα του νερού άρδευσης στο χείμαρρο Λασπία (σχ. 11.12). Η τάφρος αυτή προβλέπεται να αποτελέσει την πηγή τροφοδοσίας των έργων εμπλουτισμού.

Από τις σχετικές εργασίες, που περιέλαβαν την ανόρυξη και μελέτη δειγματοληπτικών και πιεζομετρικών γεωτρήσεων, τη σχετική γεωφυσική έρευνα με διασκοπήσεις και διαγραφίες (logging) και τη μελέτη λιθολογικών τομών παραγωγικών υδρογεωτρήσεων της περιοχής, προέκυψε ότι στο βόρειο τμήμα της κύριας περιοχής έρευνας, όπου στοχεύει ο τεχνητός εμπλουτισμός, μέχρι βάθος 30 m, επικρατούν εναλλαγές άμμων και αργίλων με επικράτηση των άμμων, ενώ στη συνέχεια παρεμβάλλεται ένα στρώμα μαργαϊκού υλικού πάχους πάνω από 50 m και ακολουθούν και πάλι εναλλαγές στρώσεων αργίλων και άμμων (Σακκάς et al., 1998).



Σχήμα 11.12. Χάρτης με την περιοχή έρευνας στο ανατολικό δέλτα του ποταμού Νέστου, τις προτεινόμενες εγκαταστάσεις τεχνητού εμπλουτισμού και τις καμπύλες ίσης τιμής ηλεκτραγωγιμότητας (2000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ).

Οι αλλουβιακές αποθέσεις της ευρύτερης 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 στρώματα, 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 ανάπτυγμα 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 μεταγγίσεις από τα υδροφόρα της παρακείμενης λεκάνης Βιστωνίδας. Η κύρια περιοχή έρευνας αντλείται από 50 βαθιές γεωτρήσεις, που το βάθος τους φτάνει τα 200 m.

Παρακολουθήθηκε η διακύμανση των τιμών ηλεκτραγωγιμότητας των υπόγειων νερών της περιοχής για μια σειρά ετών. Στο σχήμα 11.12 σχεδιάστηκαν καμπύλες ίσης τιμής ηλεκτραγωγιμότητας (2.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) από ανάλογες μετρήσεις κατά το μήνα Απρίλιο των ετών 1974, 1990 και 1993. Αρχικά (Απρίλιος 1974) διαφαίνεται ένας σχετικός επηρεασμός σε μια ζώνη ανατολικά των Μαγγάνων με κατεύθυνση N-B, ενώ είναι σαφής η σημαντική εξάπλωση των επιβαρημένων περιοχών κατά τα έτη 1990 και 1993, αλλά και η μικρή διαφοροποίηση μεταξύ των δύο τελευταίων που οφείλεται στην αδρανοποίηση των περισσοτέρων γεωτρήσεων, λόγω ακαταλληλότητας του νερού. Υπάρχει όμως μια αξιοσημείωτη αλλαγή όσο αφορά τις τιμές. Στο κεντρικό τμήμα εμφανίζονται σήμερα πλέον αρκετά μεγάλες τιμές που σε ορισμένες θέσεις ξεπερνούν και τα 5.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , όπου φαίνεται πλέον πως το φαινόμενο έχει ενταθεί.

Η ερευνούμενη περιοχή Δεκάρχου – Μαγγάνων παρείχε εξαρχής τα στοιχεία εκείνα που καθιστούσαν αναγκαία την εφαρμογή Τ.Ε., όπως: αρνητικό υδρολογικό ισοζύγιο, σταδιακή εξαφάνιση της φρεάτιας υδροφορίας, μεγάλη πτώση στάθμης στις βαθιές γεωτρήσεις, επέκταση της πορείας της υφαλμύρινσης των υπόγειων νερών προς την ενδοχώρα, ευνοϊκές υδρογεωλογικές συνθήκες (παρουσία σε μεγάλη έκταση φρεάτιας υδροφορίας, η σύνδεσή της με την βαθιά υδροφορία κ.λ.π.) καθώς και ύπαρξη παλιών αδρανοποιημένων κοιτών που έχουν αποθέσει ανάλογα με την παροχετευτικότητά τους περατά υλικά τόσο επιφανειακά (σε ορισμένες θέσεις) όσο και σε βάθος, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως αγωγοί για την υπόγεια τροφοδοσία των υδροφορέων της περιοχής. Με βάση το παραπάνω κριτήριο επιλέχθηκε μια μικρή περιοχή του αγροκτήματος του Δεκάρχου, η οποία περιλαμβάνει θέσεις όπου εμφανίζονται τμήματα παλιάς κοίτης του Νέστου, κατάλληλα για εφαρμογή Τ.Ε.

Η προσπάθεια εφαρμογής Τ.Ε. περιέλαβε ένα προκαταρκτικό ερευνητικό στάδιο εξακρίβωσης της δυνατότητας της περιοχής έρευνας να δεχτεί εμπλουτισμό και στη συνέχεια ένα πειραματικό στάδιο που έδωσε τα απαραίτητα στοιχεία για τον τελικό σχεδιασμό των έργων.

Το προκαταρκτικό στάδιο στην κύρια περιοχή έρευνας περιέλαβε τις παρακάτω εργασίες (Σακκάς et al., 1998):

- *Προσδιορισμός των υδραυλικών παραμέτρων* των υδροφόρων της περιοχής, όπου προέκυψε ότι ο συντελεστής μεταβιβασιμότητας (T) καταλαμβάνει ένα ευρύ φάσμα τιμών από  $4,0 \times 10^{-4}$  έως  $1,1 \times 10^{-2}$   $\text{m}^2/\text{sec}$ , ενώ οι τιμές του συντελεστή εναποθήκευσης (S) κυμαίνονται στο  $10^{-3}$  έως και μικρότερες κατά θέσεις, η διακύμανση των οποίων αντιστοιχεί σε υπό πίεση (κυρίως στα δυτικά της περιοχής) και κατά τόπους ημιελεύθερα υδροφόρα στρώματα.
- *Προσδιορισμός των κοκκομετρικών χαρακτηριστικών και της υδραυλικής αγωγιμότητας* των επιφανειακών εδαφικών στρωμάτων, όπου προέκυψε ότι το επιφανειακό τμήμα, βάθους μέχρι περίπου τα 85 cm, παρουσιάζει τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας (K) της τάξης του  $10^{-5}$  έως  $10^{-7}$   $\text{m}/\text{sec}$  (μέτρια έως μικρή περατότητα), ενώ στα βαθύτερα στρώματα, μέχρι τα 4,6 m, η υδραυλική αγωγιμότητα είναι της τάξης του  $10^{-4}$   $\text{m}/\text{sec}$  (μέτρια έως μεγάλη περατότητα).
- *Γεωφυσική έρευνα*. Από τα δεδομένα των γεωηλεκτρικών τομών που προέκυψαν από 11 διασκοπήσεις και λαμβάνοντας υπόψη και τα γεωτρητικά αποτελέσματα των γεωτρήσεων που εκτελέσθηκαν στο πλαίσιο της γεωλογικής έρευνας, διακρίνονται 4

κύριοι γεωηλεκτρικοί σχηματισμοί οι οποίοι με βάση την περατότητα (ASCE, 1987, Καλλέργης, 2000) ομαδοποιούνται σε δύο κατηγορίες (Σακκάς et al., 1998): (α) περατοί – ημιπερατοί σχηματισμοί μεγάλης έως μέσης περατότητας, που αντιστοιχούν σε χαλικοαμμώδη υλικά (μέχρι βάθος περίπου 18 m), άμμους (μέχρι βάθος περίπου 25 m) και αργιλοαμμώδη υλικά (μέχρι βάθος περίπου 30 m) και (β) αδιαπέρατοι σχηματισμοί που αντιστοιχούν στο αργιλικό υπόβαθρο της περιοχής (σε βάθη > 25-30 m).

- *Παρακολούθηση της μεταβολής της στάθμης 21 επιλεγμένων γεωτρήσεων στην κύρια περιοχή έρευνας σε τακτά χρονικά διαστήματα για την περίοδο 1993 – 1998 και σύνταξη και ερμηνεία 12 αντίστοιχων πιεζομετρικών χαρτών*, όπου προέκυψε ότι ο κύριος άξονας υπόγειας τροφοδοσίας σχεδόν ταυτίζεται με ένα τμήμα της παλιάς κοίτης, ενώ η περιοχή δέχεται πλευρικές υπόγειες τροφοδοσίες από την ανάντη ΒΔ περιοχή.

Το μικρής διάρκειας πειραματικό στάδιο εμπλουτισμού περιέλαβε τη μεταφορά νερού με άντληση από την ανάντη αποστραγγιστική τάφρο, βόρεια της κύριας περιοχής έρευνας, με παροχή 90 m<sup>3</sup>/h σε λεκάνη κατάκλυσης διαστάσεων 50 m × 50 m × 2 m (σχ. 11.12). Η λεκάνη κατασκευάστηκε σε επιλεγμένο και κατάλληλης κοκκομετρικής εδαφικής σύστασης τμήμα της παλιάς κοίτης του Νέστου. Το πείραμα διήρκεσε από 2-9/6/1997 διοχετεύοντας στη λεκάνη περίπου 10.000 m<sup>3</sup> νερό εμπλουτισμού. Επίσης πριν, κατά τη διάρκεια του πειράματος και λίγο μετά (25/5/1997–26/6/1997) παρακολουθήθηκε συστηματικά η πορεία μεταβολής επιλεγμένων γεωτρήσεων στην ευρύτερη περιοχή της λεκάνης, όπου χαρακτηριστική ήταν η άνοδος της στάθμης των γεωτρήσεων παρακολούθησης κατά τη διάρκεια του πειραματικού σταδίου σε σύγκριση με τη διακύμανση της στάθμης των ίδιων γεωτρήσεων προηγούμενων ετών για την ίδια περίοδο (Σακκάς et al., 1998).

Η *εφαρμογή του Τ.Ε.*, που προτείνεται στην περιοχή έρευνας, αφορά σε έργα τα οποία περιλαμβάνουν την κατασκευή 2 σειρών λεκανών κατάκλυσης (σχ. 11.12, Λ1 και Λ2) και ανατολικότερα ενός συστήματος καναλιών εμπλουτισμού (σχ. 11.12):

- Η πρώτη σειρά λεκανών (Λ1), συνολικού μήκους περί τα 12 km και μέγιστου εύρους περίπου 5m, θα δέχεται νερό από την αποστραγγιστική τάφρο και με ένα ανοικτό αγωγό διαστάσεων 2×1 m ο οποίος θα ακολουθεί μια ΝΑ κατεύθυνση, θα συναντάει την παλιά κοίτη, ενώ νότια του Δεκάρχου θα κατασκευαστεί η *πρώτη κύρια λεκάνη* διαστάσεων 50m × 50 m και βάθους 1,5 m. Στη συνέχεια ακολουθώντας τα ίχνη της παλιάς κοίτης η σειρά θα καταλήγει στη θάλασσα ΝΔ των Μαγγάνων. Σε απόσταση ανά 1,5 Km από την κύρια λεκάνη θα κατασκευαστούν στη σειρά 4 *μικρότερες λεκάνες*, επιμήκεις, διαστάσεων 10×50×1 m.
- Η δεύτερη σειρά λεκανών (Λ2), συνολικού μήκους περί τα 6 km και μέγιστου εύρους περίπου 5m, θα ξεκινάει από το αποστραγγιστικό ΒΑ του Δεκάρχου (η ακριβής θέση θα προσδιοριστεί από τη σχετική οριστική μελέτη) και με αγωγό ανοικτό ή κλειστό θα μεταφέρεται το νερό του αποστραγγιστικού στην *πρώτη κύρια λεκάνη* 50 m × 50 m × 2 m (πρόκειται για τη λεκάνη του πειράματος). Μετά τη λεκάνη αυτή ανοικτός αγωγός με ΝΑ κατεύθυνση θα συναντάει το ίχνος κλάδου της παλιάς κοίτης και θα σταματάει περίπου 2 km ΒΑ των Μαγγάνων. Μετά την πρώτη κύρια λεκάνη θα κατασκευαστούν 3 *ακόμα λεκάνες*, επιμήκεις, διαστάσεων 10 m × 50 m × 1 m.
- Σύστημα καναλιών εμπλουτισμού, εκατέρωθεν του χειμάρρου Λασπία. Τα κανάλια υπολογίζονται καταρχήν σε 7, διαστάσεων 2 m × 1 m και μήκους 1–2 km το καθένα, ενώ στο χειμάρρο θα πρέπει να προβλεφθεί η κατασκευή κατάλληλων αναβαθμών ανάσχεσης της ροής του στις θέσεις που η κοίτη συναντά τα κανάλια.

Κατά το τελικό στάδιο εφαρμογής του Τ.Ε. με την κατασκευή των οριστικών έργων εμπλουτισμού, η συνολική επιφάνεια των έργων θα εξαρτηθεί, τόσο από τις διαθέσιμες εκτάσεις (αφού προηγηθεί ο αναδασμός της περιοχής) όσο και από τα διαθέσιμα κονδύλια, από την ποσότητα του διαθέσιμου νερού και από τις απαιτήσεις για αύξηση της ποσότητας

του διηθούμενου νερού. Το νερό εμπλουτισμού θα πρέπει να εξασφαλίζεται από την αποστραγγιστική τάφρο του Νέστου. Το σύστημα απόληψης νερού και μεταφοράς του στις λεκάνες θα πρέπει να γίνεται χωρίς την παρεμβολή αντλιών γιατί το κόστος άντλησης θεωρείται υπερβολικά μεγάλο και το έργο αποβαίνει αντιοικονομικό. Το νερό από την αποστραγγιστική τάφρο θα οδηγείται με ελεγχόμενη παροχή (με τη χρήση μεταλλικών θυροφραγμάτων) στις λεκάνες με ένα αγωγό μεταφοράς χωρίς επένδυση η διατομή του οποίου θα εξαρτάται από τις ποσότητες που θα απαιτηθούν για τον πλήρη σχεδιασμό των έργων, με ιδιαίτερη φροντίδα για την πρόληψη και αντιμετώπιση του φαινομένου clogging (απόφραξη των εδαφικών πόρων), παρότι το νερό της αποστραγγιστικής τάφρου μεταφέρει ελάχιστα φερτά υλικά.

Στην περιοχή έρευνας απαιτείται συνεχής έλεγχος της αποτελεσματικότητας των έργων εμπλουτισμού με σκοπό αυτά να μπορούν να επεκταθούν όπου κριθεί σκόπιμο αλλά και να βελτιώνονται με διάφορες παρεμβάσεις. Για αυτόν το λόγο θα πρέπει να αναπτυχθεί καταρχήν ένα δίκτυο γεωτρήσεων μέσα από τις οποίες θα καταγράφονται οι ποσοτικές και ποιοτικές μεταβολές του υπόγειου νερού σε διάφορες θέσεις της περιοχής εφαρμογής. Το δίκτυο αυτό θα περιλαμβάνει ένα αριθμό πιεζομετρικών γεωτρήσεων καταμετρημένων σε ορισμένες θέσεις στο πεδίο και στις οποίες θα εγκατασταθούν αυτογραφικά όργανα καταγραφής της στάθμης. Σε επιλεγμένες από αυτές θα εγκατασταθούν και αυτογραφικά όργανα μεταβολής της ποιότητας του υπόγειου νερού (αισθητήρες αγωγιμότητας). Για την ολοκλήρωση του συστήματος παρακολούθησης κρίνεται σκόπιμη η εγκατάσταση κατάλληλων σταθμηγράφων επιφανειακών νερών για τον υπολογισμό της παροχής του υδατορεύματος που τροφοδοτεί τα έργα εμπλουτισμού όπως και η εγκατάσταση σε χαρακτηριστικές θέσεις τηλεμετρικών μετεωρολογικών σταθμών (σχ. 11.12).

#### Περιοχή Βαφείκων του Νομού Ξάνθης

Κατά το τέλος της δεκαετίας του '50 έγιναν ορισμένες επεμβάσεις στο υδρογραφικό δίκτυο του πεδινού τμήματος της λεκάνης Βιστωνίδας. Οι επεμβάσεις αυτές αφορούσαν στην εκτροπή του ποταμού Κόσυνθου, ο οποίος πριν την επέμβαση διέσχιζε τον κάμπο της Ξάνθης και μετά την επέμβαση διέρχεται περιφερειακά του κάμπου καταλήγοντας στον βόρειο μυχό της Λίμνης Βιστωνίδας (σχ. 11.13). Επίσης εγκιβωτίστηκαν οι χείμαρροι των κρασπέδων της βόρειας ορεινής ζώνης, οι οποίοι πριν την επέμβαση διέρχονταν και αυτοί από τον κάμπο της Ξάνθης, ενώ σήμερα καταλήγουν στην νέα κοίτη του Κόσυνθου. Πριν την εκτροπή (απομάκρυνση από το πεδινό τμήμα) και τον εγκιβωτισμό των χειμάρρων των κρασπέδων, κατά τους χειμερινούς μήνες το νερό του Κόσυνθου αλλά και των χειμάρρων, σε όλη τους τη διαδρομή στον κάμπο, διηθείτο και έτσι υπήρχε μια συνεχής τροφοδοσία τουλάχιστον προς τους αβαθείς υπό πίεση υδροφόρους περίπου μέχρι το βάθος των 20m. Οι βαθύτεροι υδροφόροι δέχονταν και δέχονται τροφοδοσία σε ένα ποσοστό από τους ίδιους χειμάρρους και από τον Κόσυνθο αλλά μόνο από τις διηθήσεις νερών στην περιοχή της εξόδου τους στον κάμπο. Η φυσική αυτή διαδικασία (της τροφοδοσίας σε όλο τον κάμπο) έχει σήμερα διακοπεί και κατά συνέπεια η τροφοδοσία των προηγούμενων υδροφοριών γίνεται, κατά ένα μικρό ποσοστό, μόνο από τις απευθείας κατεισδύσεις της βροχής που πέφτει στο ανάπτυγμα του κάμπου. Το γεγονός αυτό έχει ήδη προκαλέσει προβλήματα με τη συνεχή μείωση μέχρι εξαφάνιση των αβαθών υδροφοριών που αποτελούσαν ένα σημαντικό βοήθημα τουλάχιστον για τις πρώιμες καλλιέργειες. Η στέρση αυτών των νερών έχει εξαναγκάσει τους κατοίκους σε απεγνωσμένες και δαπανηρές προσπάθειες κάλυψης των αναγκών τους με την ανόρυξη ενός υπερβολικά μεγάλου αριθμού υδρογεωτρήσεων.

Σήμερα οι ζώνες απόθεσης χονδρόκοκκων υλικών που παρατηρούνται στις περιοχές των εξόδων των χειμάρρων από την ορεινή ζώνη προς τον κάμπο σε συνδυασμό με τη συνεχή ροή για αρκετούς μήνες στους διάφορους κλάδους του υδρογραφικού δικτύου με επικεφαλής τον Κόσυνθο, προσφέρονται για την εφαρμογή ορισμένων μεθόδων τεχνητού εμπλουτισμού. Επίσης οι παλιές αδρανοποιημένες κοίτες του υδρογραφικού δικτύου που διέσχιζαν τον κάμπο, και οι οποίες σήμερα φιλοξενούν σε μεγάλο ποσοστό χονδρόκοκκα υλικά κατά μήκος της

διαδρομής τους, μπορούν και αυτές να χρησιμοποιηθούν για την εφαρμογή τεχνητού εμπλουτισμού.

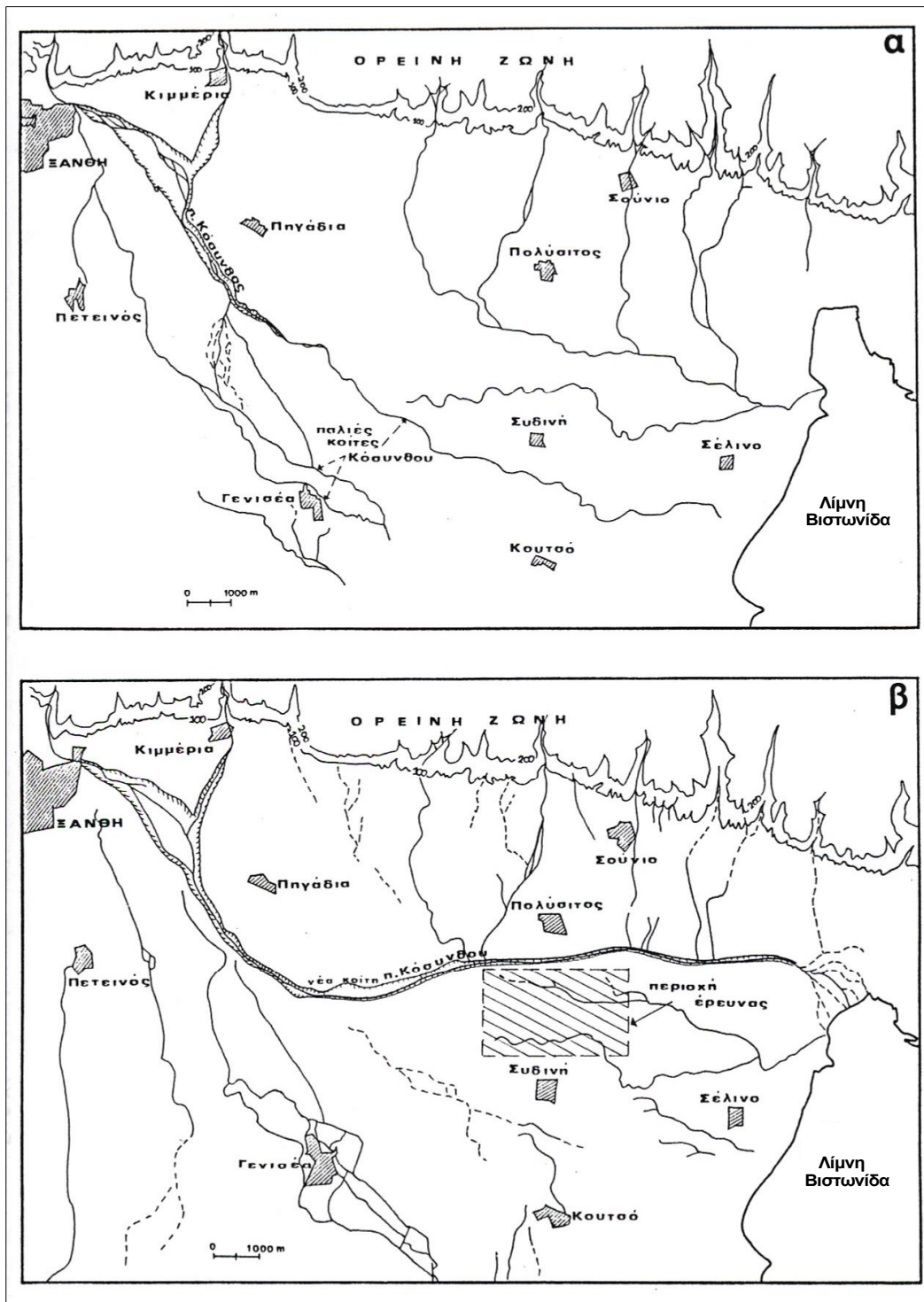
Στο πλαίσιο εκπόνησης του ερευνητικού προγράμματος για λογαριασμό του Υπουργείου Γεωργίας με θέμα τη μελέτη Τ.Ε. σε υδροφόρους πεδινών περιοχών της Ξάνθης και της Ροδόπης, μετά την εφαρμογή Τ.Ε., σε ένα καταρχήν πειραματικό στάδιο, στην περιοχή Βαφέικων του Νομού Ξάνθης, προτάθηκε από το Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Δ.Π.Θ. ένα σχέδιο εγκαταστάσεων Τ.Ε. και ενός δικτύου παρακολούθησης στην περιοχή (Διαμαντής et al., 1999, Σακκάς et al., 1998). Η διαδικασία του πειραματικού εμπλουτισμού περιέλαβε την άντληση νερού από τον παρακείμενο ποταμό Κόσυνθο και τη μεταφορά του σε διευθετημένες λεκάνες κατάκλυσης σε παλιά κοίτη του Κόσυνθου (σχ. 11.14).

Η περιοχή των Βαφέικων εντοπίζεται γεωγραφικά στο δυτικό πεδινό τμήμα της λεκάνης Βιστωνίδας, νότια της πόλης της Ξάνθης και σε απόσταση περίπου 8 km από αυτή, αποτελώντας πεδινό τμήμα πολύ μικρών κλίσεων, περίπου 2,4‰. Οι αρδευτικές ανάγκες της περιοχής ικανοποιούνται από ένα μεγάλο αριθμό γεωτρήσεων βάθους μέχρι 50 m και ένα μικρότερο μέχρι βάθους 120 m. Υπάρχουν επίσης και ελάχιστες αβαθείς γεωτρήσεις μέχρι βάθους 20 m, οι οποίες λειτουργούν κατά διαστήματα.

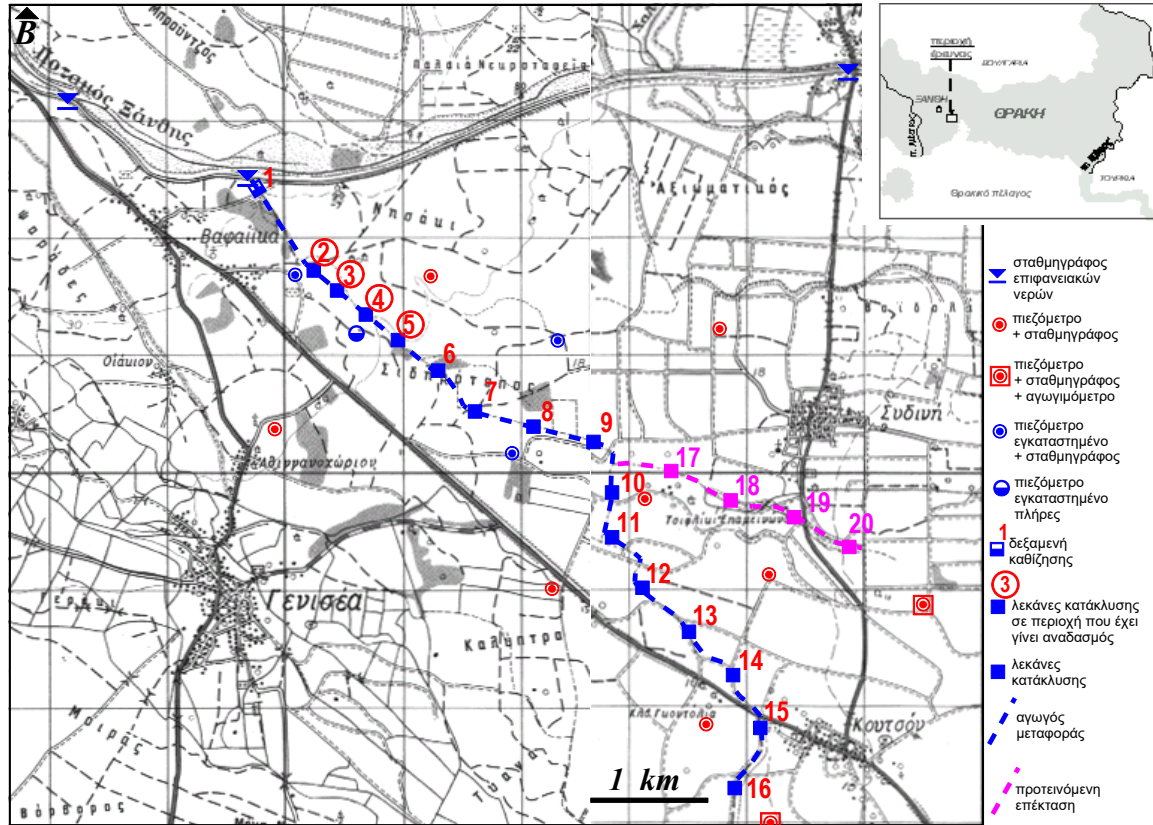
Γεωλογικά η περιοχή εντοπίζεται στις πρόσφατες αλλουβιακές αποθέσεις του πεδινού τμήματος της λεκάνης Βιστωνίδας. Στην περιοχή αυτή φιλοξενούνται εναλλαγές στρωμάτων χαλικών, άμμων, ιλύος και αργίλου ποικίλου πάχους και έκτασης. Τα υπόγεια υδροφόρα στρώματα της περιοχής ταξινομούνται σε δύο ευδιάκριτες ζώνες: (α) στα αβαθή μερικώς υπό πίεση υδροφόρα στρώματα (πρόσφατες αλλουβιακές αποθέσεις), που κατά θέσεις θεωρούνται ελεύθερα υδροφόρα στρώματα, αφού στην περιοχή των κοιτών εμφανίζονται στην επιφάνεια φθάνοντας μέχρι ένα βάθος περίπου 30 m, δεν είναι ενιαία σε όλο το βάθος τους αλλά εναλλάσσονται με άλλα λιγότερο περατά ή παρεμβάλλονται υπό μορφή φακών ιλυώδη ή αργιλώδη στρώματα, ενώ βυθίζονται προς τα νοτιοανατολικά ή τα ανατολικά κάτω από τα αργιλώδη ή ιλυώδη στρώματα, και (β) στα επάλληλα υπό πίεση βαθιά υδροφόρα στρώματα (πλειοπλειστοκαινικές αποθέσεις), που φτάνουν σε βάθος μέχρι τα 150 m περίπου.

Το πρώτο υδροφόρο σύστημα δέχεται τροφοδοσία κυρίως από τις απευθείας κατεισδύσεις των βροχοπτώσεων και ελάχιστα από τις διηθήσεις των νερών του Κόσυνθου (ανάντη ζώνη αδρόκοκκων αποθέσεων). Η υπόγεια ροή του υδροφόρου συστήματος έχει, αμέσως μετά τα Βαφέϊκα, ροή ανατολική και νοτιοανατολική, που σχεδόν ταυτίζεται με τις παλιές κοίτες εκείνης της περιοχής. Το δεύτερο υδροφόρο σύστημα (βαθιά υδροφορία) τροφοδοτείται στο μεγαλύτερο ποσοστό από τις διηθήσεις του νερού του Κόσυνθου (ανάντη ζώνη αδρόκοκκων υλικών), ενώ ένα μέρος της τροφοδοσίας εξασφαλίζεται έμμεσα από το πρώτο υπερκείμενο σύστημα.

Η ερευνούμενη περιοχή Βαφέικων – Κουτσού του Νομού Ξάνθης παρείχε εξαρχής τα στοιχεία εκείνα που καθιστούσαν αναγκαία την εφαρμογή τεχνητού εμπλουτισμού, όπως αρνητικό ισοζύγιο, σταδιακή εξαφάνιση της φρεάτιας υδροφορίας, μεγάλη πτώση στάθμης στις βαθιές γεωτρήσεις κ.α.. Επίσης οι ευνοϊκές υδρογεωλογικές συνθήκες (παρουσία σε μεγάλη έκταση φρεάτιας υδροφορίας, η σύνδεσή της με την βαθιά υδροφορία κ.λ.π.) καθώς και η ύπαρξη παλιών αδρανοποιημένων κοιτών που διέρχονταν από την περιοχή έρευνας, προσδιόρισαν την περιοχή των έργων και εξασφάλισαν καταρχήν ευνοϊκές προϋποθέσεις για την αποτελεσματικότητα της εφαρμογής του Τ.Ε. Για τη διερεύνηση της δομής και των υδρογεωλογικών συνθηκών της περιοχής έρευνας κρίθηκαν απαραίτητες οι παρακάτω εργασίες (Σακκάς et al., 1998):



Σχήμα 11.13. Υδρογραφικό δίκτυο πεδινού τμήματος Ξάνθης πριν (α) και μετά (β) την εκτροπή του ποταμού Κόσυνθου, (α): από χαρτογράφηση 1948, (β): από χαρτογράφηση 1970.



Σχήμα 11.14. Η περιοχή έρευνας στα Βαφέικα Ξάνθης και οι προτεινόμενες εγκαταστάσεις τεχνητού εμπλουτισμού.

- *Σύνταξη και μελέτη πιεζομετρικών χαρτών*, όπου κύρια διακρίνεται ένας άξονας υπόγειας τροφοδοσίας στο μέσο περίπου της περιοχής έρευνας που σχεδόν συμπίπτει με την παλιά κοίτη στην περιοχή των Βαφέικων και έχει διεύθυνση ΒΔ - ΝΑ.
- *Κοκκομετρικές αναλύσεις* για τη διερεύνηση της διανομής του εδαφικού υλικού στην ευρύτερη περιοχή των παλιών κοιτών και *υπολογισμός της υδραυλικής αγωγιμότητας*, όπου τα αποτελέσματα των κοκκομετρικών αναλύσεων δείχνουν ότι η περιοχή έρευνας είναι κατάλληλη για να φιλοξενήσει τα έργα Τ.Ε. αφού το επιφανειακό στρώμα στην μεγαλύτερη έκτασή του αποτελείται από αμμώδη υλικά, τα οποία εμφανίζονται πιο χονδρόκοκκα με το βάθος. Ως προς την κατανομή των τιμών υδραυλικής αγωγιμότητας στο πεδίο έρευνας, προκύπτει ότι στα επιφανειακά τμήματα (βάθους μέχρι 50 cm) παρατηρείται μια ζώνη ποικίλου πάχους που φιλοξενεί υλικά με τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας από  $1,0 \times 10^{-4}$  έως  $9,0 \times 10^{-6}$  m/sec (υλικά μεγάλης έως μέτριας περατότητας), ενώ έξω από τα όρια της ζώνης, η αγωγιμότητα του υλικού μειώνεται μέχρι το  $8,5 \times 10^{-9}$  m/sec (υλικά μικρής έως μέτριας περατότητας). Στα βαθύτερα στρώματα (βάθος 60-180 cm) η εικόνα σχεδόν παραμένει η ίδια όσον αφορά τη συγκέντρωση των πλέον περατών υλικών. Αυτά είναι συγκεντρωμένα σε μια ζώνη που σχεδόν ταυτίζεται με αυτή των επιφανειακών υλικών. Η υδραυλική αγωγιμότητα στη ζώνη αυτή κυμαίνεται από  $10^{-4}$  έως  $10^{-6}$  m/sec και εκτός ζώνης τα υλικά εμφανίζουν μικρότερη περατότητα της τάξης των  $10^{-7}$  m/sec.
- *Γεωφυσική έρευνα* της περιοχής έρευνας, όπου από τα δεδομένα των γεωηλεκτρικών τομών που σχεδιάστηκαν και λαμβάνοντας υπόψη και τα γεωτρητικά αποτελέσματα των γεωτρήσεων που εκτελέστηκαν στην περιοχή, διακρίνονται 4 κύριοι γεωηλεκτρικοί

σχηματισμοί οι οποίοι με βάση την περατότητα (ASCE, 1987, Καλλέργης, 2000) ομαδοποιούνται σε δύο κατηγορίες (Σακκάς et al., 1998): α) *Περατοί-ημιπερατοί σχηματισμοί*, μέχρι το βάθος των 30-40 m (χαλικοαμμώδη, άμμοι και αργιλοαμμώδη υλικά) και β) *Αργιλικό υπόβαθρο*, που εμφανίζεται κάτω από το βάθος των 30-40 m.

- *Δοκιμαστικές αντλήσεις και υπολογισμός των υδραυλικών παραμέτρων της περιοχής*, όπου προκύπτει ότι ο συντελεστής εναποθήκευσης (S), για τη στενή περιοχή του εμπλουτισμού, κυμαίνεται στο  $10^{-2}$ , ενώ στις απομακρυσμένες περιοχές (ανεπηρέαστες από τον εμπλουτισμό) και ιδιαίτερα προς τα ανατολικά στην κατεύθυνση προς την λίμνη Βιστωνίδα, ο συντελεστής είναι μικρότερος ( $10^{-4}$ ). Ο συντελεστής μεταβιβαστικότητας (T) ποικίλλει και πολλές φορές σημαντικά από θέση σε θέση, από  $10^{-2}$  έως  $10^{-4}$  m<sup>2</sup>/sec, με τις περισσότερες τιμές να κυμαίνονται στο  $10^{-3}$  m<sup>2</sup>/sec.

Στην περιοχή των Βαφέικων επιλέχθηκε ως μέθοδος εφαρμογής T.E. των υδροφόρων η μέθοδος των λεκανών κατάκλυσης (Σακκάς et al., 1998). Για την κατασκευή των πειραματικών λεκανών εμπλουτισμού στην περιοχή έρευνας επιλέχθηκαν δυο τμήματα της παλιάς κοίτης του ποταμού Κόσυνθου και κατασκευάστηκαν δυο λεκάνες εμπλουτισμού διαστάσεων περίπου 40 m × 40 m και 20 m × 75 m αντίστοιχα και βάθους 1,5 m (σχ. 11.14, θέσεις λεκανών 2, 5). Στις θέσεις αυτές, με βάση τις έρευνες που προηγήθηκαν, το υλικό είναι αρκετά περατό και κατάλληλο από μια πρώτη άποψη για να φιλοξενήσει τις λεκάνες εμπλουτισμού. Η μεταφορά του νερού έγινε από τον παρακείμενο ποταμό Κόσυνθο μέσα από ένα διπλό αγωγό με παροχή νερού περίπου 150 m<sup>3</sup>/h. Στις 26/2/1997 ξεκίνησε η διοχέτευση νερού στις λεκάνες και παράλληλα, καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος (μέχρι τις 5/5/97), παρακολουθήθηκε συστηματικά η στάθμη 41 γεωτρήσεων της περιοχής (συντάχθηκαν και ερμηνεύτηκαν ανάλογοι πιεζομετρικοί χάρτες και έγιναν παρατηρήσεις στη μεταβολή της στάθμης). Συνολικά η αντλία δούλεψε 647 ώρες μεταφέροντας 45989 m<sup>3</sup> νερού. Το νερό του ποταμού Κόσυνθου που χρησιμοποιήθηκε αλλά και πρόκειται να χρησιμοποιηθεί και στο μέλλον για τον εμπλουτισμό στην περιοχή, όπως προέκυψε από ανάλογες χημικές αναλύσεις, είναι πολύ καλής ποιότητας και απαλλαγμένο από χημικά στοιχεία τέτοια που μπορούν να δημιουργήσουν προβλήματα κατά τη διαδικασία εφαρμογής του εμπλουτισμού. Οι γεωτρήσεις που παρουσίασαν τη μεγαλύτερη ανταπόκριση στο πείραμα ήταν αυτές που βρίσκονται σχετικά κοντά στις λεκάνες και προς τα ΝΑ. Ίδια κατεύθυνση είχαν και οι άξονες υπόγειας τροφοδοσίας όπως φαίνονται στους πιεζομετρικούς χάρτες κατά τη διάρκεια του πειράματος.

Η εφαρμογή ενός πλήρους συστήματος T.E. απαιτεί περισσότερες από μια λεκάνες κατάκλυσης, διαστάσεων 30 m × 100 m και βάθους 1-1,5 m, που θα συνδέονται μεταξύ τους με κανάλια πλάτους 2-3m και βάθους 50 cm (σχ. 11.14). Γενικά κατά το τελικό στάδιο εφαρμογής η συνολική τους επιφάνεια θα εξαρτηθεί από τα διαθέσιμα κονδύλια, από την ποσότητα του διαθέσιμου νερού αλλά και από τις απαιτήσεις για αύξηση της ποσότητας του διηθούμενου νερού. Το σύστημα απόληψης νερού από τον Κόσυνθο και μεταφοράς του στις λεκάνες θα πρέπει να γίνεται χωρίς την παρεμβολή αντλιών γιατί το κόστος άντλησης θεωρείται υπερβολικά μεγάλο και το έργο αποβαίνει αντικοινωνικό.

Στην εδώ περίπτωση πιστεύουμε ότι το σημαντικότερο πρόβλημα που προέκυψε ήταν η απόφραξη των πόρων (clogging). Το φαινόμενο της απόφραξης στην περιοχή ήταν περισσότερο έντονο από το αναμενόμενο. Ο λόγος ήταν η πηγή διάθεσης του νερού δηλαδή ο ποταμός Κόσυνθος. Η περιοχή βρίσκεται σχετικά κοντά στην έξοδο του ποταμού από την ορεινή ζώνη, όπου ο Κόσυνθος εκεί έχει σε μεγάλο βαθμό χειμαρρική ροή. Αυτό σημαίνει ότι σε μικρό χρονικό διάστημα από ομαλή ροή μπορεί να εξελιχθεί σε τυρβώδη παρασύροντας έτσι και μεταφέροντας μεγάλες ποσότητες λεπτομερών υλικών. Την εποχή της μεταφοράς νερού από τον Κόσυνθο στις λεκάνες συνέπεσαν να εκδηλωθούν έντονες βροχοπτώσεις με αποτέλεσμα τη γρήγορη μεταφορά πολλών λεπτόκοκκων υλικών. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα την απόφραξη των υλικών του πυθμένα με τη δημιουργία μιας επίστρωσης με τη μορφή μεμβράνης, που κατέλαβε λίγα μόνο εκατοστά, και τον περιορισμό της ταχύτητας διήθησης, η οποία πραγματοποιείτο στη συνέχεια σχεδόν αποκλειστικά από τα πλευρικά τοιχώματα. Χαρακτηριστικό αυτού του γεγονότος ήταν η μετατόπιση της αρχικής υδραυλικής

αγωγιμότητας, όπως αναφέρθηκε προηγούμενα, που είχε μετρηθεί στον πυθμένα της λεκάνης κατά δυο περίπου λογαριθμικές μονάδες.

Η ομαλή κλίση του πυθμένα της λεκάνης δημιούργησε ευνοϊκές προϋποθέσεις έτσι ώστε, στην αρχή, οι μεγαλύτερες ποσότητες του νερού εμπλουτισμού να διηθούνται από τον πυθμένα (κεντρική περιοχή) και όχι από τις πλευρές της λεκάνης. Αυτό είχε σαν συνέπεια την εμφάνιση γρήγορα του φαινομένου της απόφραξης στον πυθμένα.

Οι ποσότητες νερού που θα χρησιμοποιηθούν για τον εμπλουτισμό είναι μεγάλες. Οπότε οι ενέργειες που πρέπει να γίνουν προκειμένου να αντιμετωπιστεί όσο το δυνατόν καλύτερα το πρόβλημα της απόφραξης με ανάλογη αύξησης της αποτελεσματικότητας του εμπλουτισμού είναι:

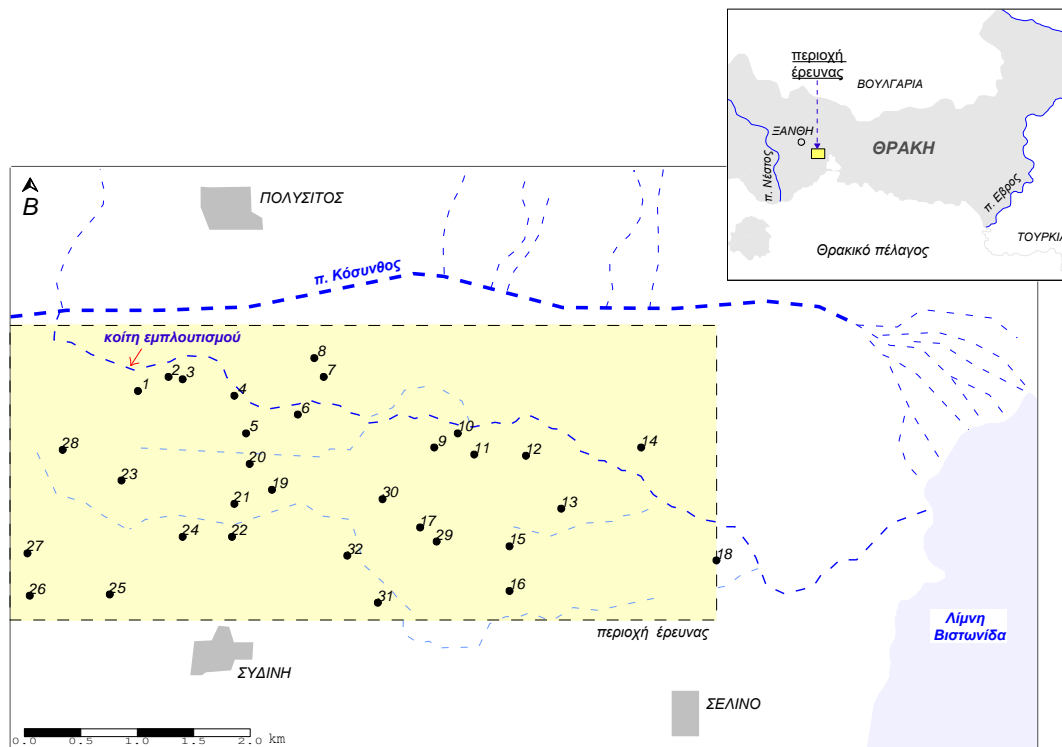
- Απλή μηχανική επεξεργασία του νερού, αμέσως μετά την έξοδό του από το ποτάμι με τη διέλευσή του από λεκάνη πληρωμένη με χαλίκια και άμμους για την καλύτερη δυνατή συγκράτηση των αιωρούμενων υλικών. Το σώμα αυτό των χονδρόκοκκων υλικών πρέπει να ανανεώνεται σε κάθε περίοδο.
- Επίστρωση του πυθμένα των λεκανών εμπλουτισμού με στρώμα χονδρόκοκκης άμμου πάχους μέχρι 30 cm. Το στρώμα αυτό πρέπει να καθαρίζεται σε κάθε περίοδο και στη συνέχεια το έδαφος των λεκανών μετά την αφαίρεση της άμμου να οργώνεται και να σβαρνίζεται με στόχο την αύξηση του πορώδους.
- Διαδοχική κατάκλυση και αποξήρανση της λεκάνης που αποτελεί την πλέον οικονομική διαδικασία για την περίπτωση εξουδετέρωσης των διαφόρων μικροοργανισμών.

#### Περιοχή Πολυσίτου του Νομού Ξάνθης

Στην περιοχή Πολυσίτου του Νομού Ξάνθης (σχ. 11.15), το Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Δ.Π.Θ., κατά την περίοδο 1994-1997, είχε διερευνήσει τη δυνατότητα της εφαρμογής του Τ.Ε. με αρκετά αξιόλογα και αισιόδοξα αποτελέσματα ως προς την αποτελεσματικότητα του εμπλουτισμού. Στην περιοχή αυτή, μετά από μελέτη και ανάλυση των σχετικών παραμέτρων, προέκυψε ότι η αποτελεσματικότερη μέθοδος εφαρμογής τεχνητού εμπλουτισμού είναι η επανενεργοποίηση παλιών αδρανοποιημένων κοιτών, με εφαρμογή σε μια παλιά κοίτη της περιοχής Πολυσίτου Ξάνθης, νότια της τεχνητής κοίτης του ποταμού Κόσυνθου (Διαμαντής, κ.α., 1994, Πλιάκας, 1998, Πλιάκας, κ.α., 1995, Πλιάκας, κ.α., 1999). Η τελευταία έχει προκύψει μετά τις επεμβάσεις στο υδρογραφικό δίκτυο του πεδινού τμήματος της λεκάνης Βιστωνίδας κατά τη δεκαετία του '50 με την εκτροπή του Κόσυνθου και τον εγκιβωτισμό των χειμάρρων των κρασπέδων της βόρειας ορεινής ζώνης.

Η διαδικασία ενεργοποίησης της κοίτης που μελετήθηκε, περιελάμβανε κατ' αρχήν ένα προκαταρκτικό πείραμα, τον Ιούνιο του 1990, διάρκειας μιας εβδομάδας και τέσσερις φάσεις εφαρμογής Τ.Ε., που πραγματοποιήθηκαν κατά τις περιόδους αντίστοιχα: 1η Φάση: 2/3/1994 έως 30/5/1994, διάρκειας 89 ημερών, 2η Φάση: 20/2/1995 έως 7/6/1995, διάρκειας 107 ημερών, 3η Φάση: 22/3/1996 έως 21/6/1996, διάρκειας 91 ημερών, 4<sup>η</sup> Φάση: 25/2/1997 έως 5/6/1997, διάρκειας 101 ημερών. Κατά τη διάρκεια των δύο πρώτων φάσεων διοχετεύθηκε νερό από τον παρακείμενο ποταμό Κόσυνθο με άντληση, απευθείας στην υπό ενεργοποίηση κοίτη χωρίς να έχουν προηγηθεί κάποιες επεμβάσεις σε αυτή. Στην τρίτη και τέταρτη φάση διοχετεύθηκε νερό από τον Κόσυνθο, με ελεγχόμενη πλέον παροχή, απευθείας στην κοίτη μέσω αγωγού, αφού προηγήθηκε παράκαμψη του Κόσυνθου και διευθετήθηκε η κοίτη εμπλουτισμού. Το όλο έργο κατασκευάστηκε το φθινόπωρο του 1995 με επίβλεψη της Τεχνικής Υπηρεσίας της Νομαρχίας Ξάνθης. Κατά το έτος 1998 ήταν αδύνατη η εφαρμογή Τ.Ε. λόγω σοβαρού προβλήματος του αγωγού που αποκαταστάθηκε το φθινόπωρο του 1998 για να μπορεί να λειτουργήσει απρόσκοπτα η διαδικασία εφαρμογής Τ.Ε. κατά το έτος 1999. Η συνολική έκταση (E) της περιοχής έρευνας ανέρχεται σε  $E=16,4065 \text{ Km}^2$ , ενώ υπολογίστηκε το συνολικό μήκος της κοίτης εμπλουτισμού σε 7,68 km. Η ροή του νερού στη κοίτη ήταν συνεχής με μέση παροχή  $150 \text{ m}^3/\text{h}$ .



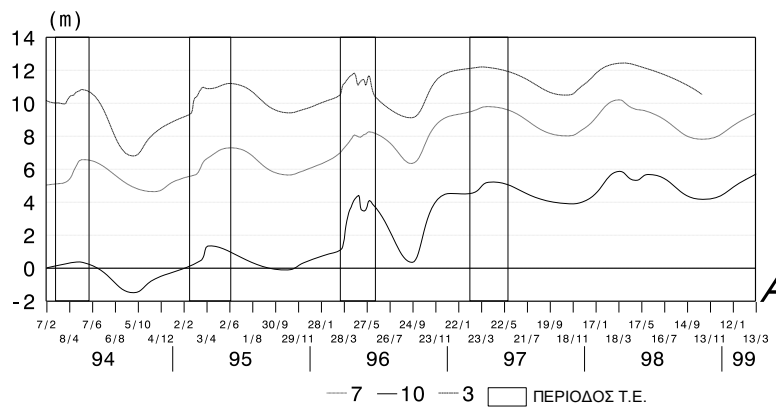
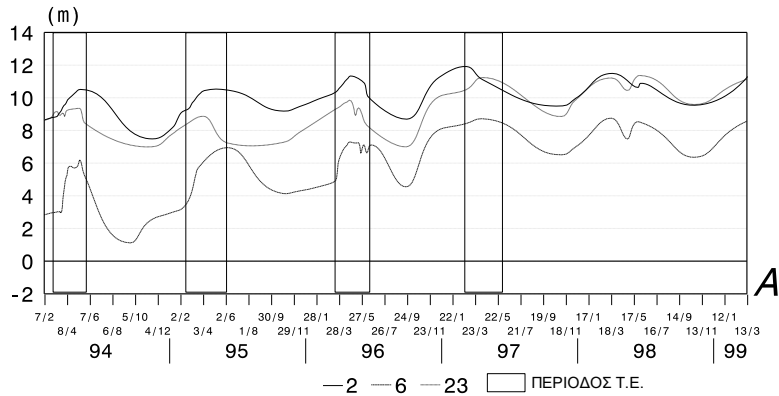


Σχήμα 11.15. Χάρτης με την κοίτη εμπλουτισμού στην περιοχή Πολυσίτου του νομού Ξάνθης, τα όρια της περιοχής έρευνας και τις γεωτρήσεις παρακολούθησης της μεταβολής της στάθμης (Πλιάκας, 1998).

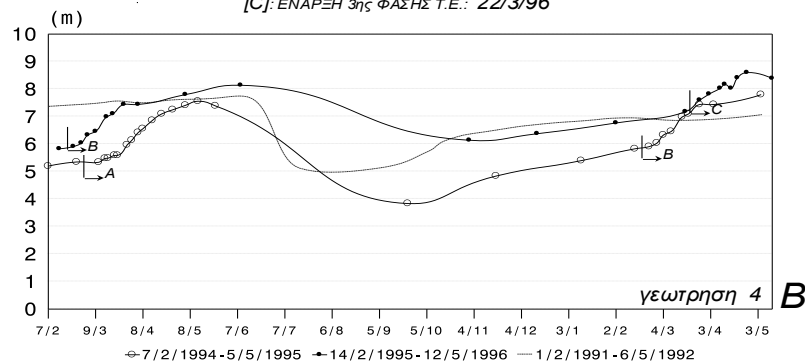
Πραγματοποιήθηκαν συστηματικές μετρήσεις της μεταβολής της στάθμης σε ένα δίκτυο 32 γεωτρήσεων στην περιοχή γύρω και κυρίως νότια της κοίτης. Οι μετρήσεις αυτές ξεκίνησαν στις 6/2/1994, λίγο πριν από την έναρξη της διαδικασίας του εμπλουτισμού, και συνεχίζονται μέχρι σήμερα σε μηνιαία βάση, με εξαίρεση τις περιόδους εμπλουτισμού όπου η συχνότητα μετρήσεων κυμάνθηκε σε 1-2 μετρήσεις την εβδομάδα. Για τον προσδιορισμό του βαθμού της αποτελεσματικότητας της εφαρμογής του τεχνητού εμπλουτισμού στην περιοχή, πραγματοποιήθηκε μια λεπτομερής έρευνα για τις χρονικές περιόδους πριν και κατά τη διάρκεια της εφαρμογής του εμπλουτισμού και για τις 4 φάσεις των ετών 1994, 1995, 1996 και 1997, που περιέλαβε (Πλιάκας, 1998):

- σύνταξη και ανάλυση 33 ισοπιεζομετρικών χαρτών της περιοχής έρευνας και για τις 4 φάσεις εφαρμογής του εμπλουτισμού, στους οποίους διακρίνεται σημαντική μετακίνηση υπόγειων υδάτινων μαζών κατά μήκος τριών συγκεκριμένων διαδρομών, με κατεύθυνση κύρια προς το νοτιοανατολικό τμήμα της περιοχής έρευνας και με σταδιακή αύξηση του όγκου τους, όσο προχωράμε διαδοχικά από τις τρεις φάσεις εμπλουτισμού,
- συστηματική επεξεργασία της μεταβολής της στάθμης των γεωτρήσεων της περιοχής έρευνας και για τις 4 φάσεις εφαρμογής του εμπλουτισμού (σχ. 11.16), όπου από τις σχετικές μετρήσεις των τριών πρώτων φάσεων υπολογίστηκαν οι μέσοι ρυθμοί ανόδου της στάθμης πριν ( $r$ ) και κατά τη διάρκεια εφαρμογής του εμπλουτισμού ( $R$ ) και τελικά προέκυψαν οι τιμές του βαθμού επηρεασμού από την εφαρμογή του Τ.Ε. για κάθε γεώτρηση και για κάθε φάση αντίστοιχα, ως ο λόγος  $R/r$ . Με βάση τις τιμές αυτές ( $R/r$ ) και σε σύγκριση τόσο με την πορεία της στάθμης των γεωτρήσεων της περιοχής έρευνας κατά τη διάρκεια των ετών που προηγήθηκαν των εφαρμογών του εμπλουτισμού, όσο και με τις υδραυλικές συνθήκες και την αντίστοιχη πορεία της στάθμης γεωτρήσεων της

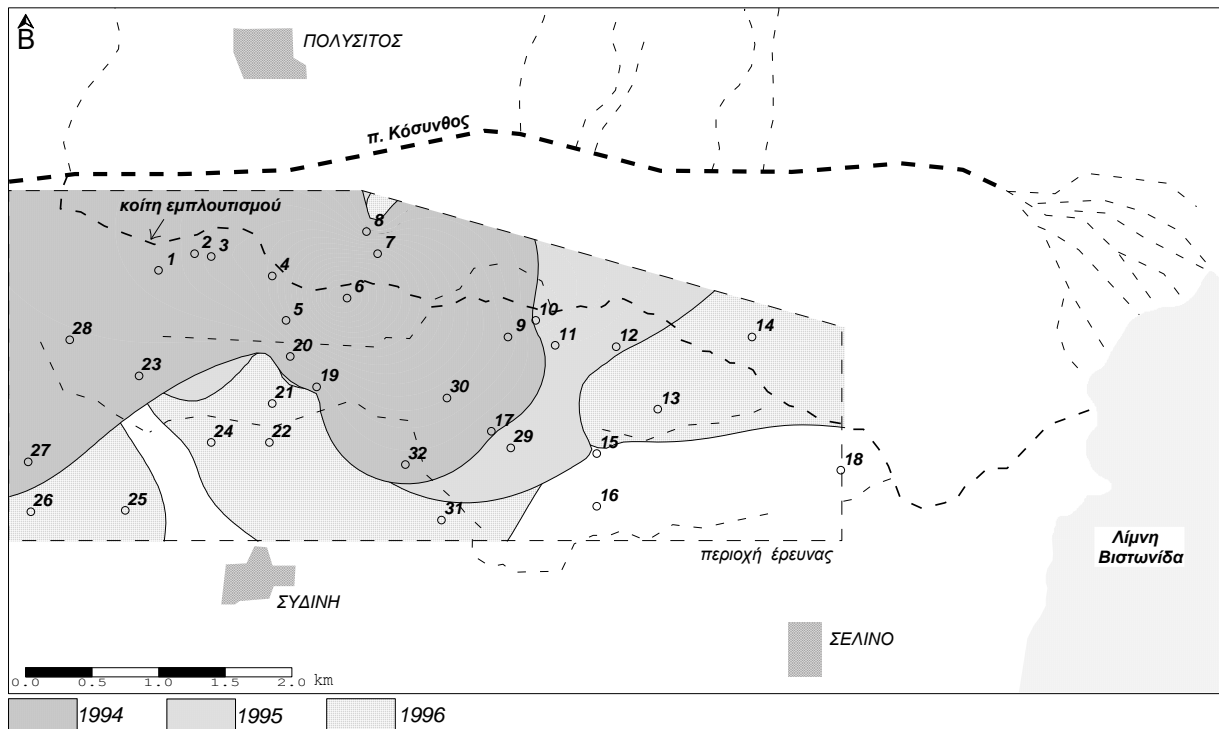
ευρύτερης περιοχής, σχεδιάστηκαν χάρτες με τις περιοχές έντονου ( $R/r \geq 1,5$ ) και μέτριου ( $1,5 > R/r > 1$ ) επηρεασμού και για τις τρεις φάσεις εφαρμογής του Τ.Ε.. Τα μέτωπα επηρεασμού από την εφαρμογή του Τ.Ε. είναι τέσσερα και κινούνται με κατεύθυνση κυρίως νοτιοανατολική (σχ. 11.17). Έτσι διακρίνονται περιοχές όπου τα υδροφόρα στρώματα έχουν επηρεασθεί σημαντικά και περιοχές όπου αυτά έχουν επηρεασθεί λιγότερο ή καθόλου, ομαδοποιώντας έτσι τις γεωτρήσεις σε ομάδες γεωτρήσεων με έντονο επηρεασμό (π.χ. άνοδος στάθμης μέχρι και 2,70 m σε διάστημα ενός μήνα) και ομάδες γεωτρήσεων απλά επηρεασμένων και ανεπηρέαστων τελείως.



[A]: ΕΝΑΡΞΗ 1ης ΦΑΣΗΣ Τ.Ε.: 2/3/94 [B]: ΕΝΑΡΞΗ 2ης ΦΑΣΗΣ Τ.Ε.: 20/2/95  
[C]: ΕΝΑΡΞΗ 3ης ΦΑΣΗΣ Τ.Ε.: 22/3/96



Σχήμα 11.16. (A): Διαγράμματα μεταβολής της στάθμης των γεωτρήσεων που αναγράφονται για την περίοδο: 7/2/1994-13/3/1999, (B): Διάγραμμα μεταβολής της στάθμης της γεώτρησης 4 στην περιοχή έρευνας.



Σχήμα 11.17. Χάρτης με τις περιοχές επηρεασμού από τον Τ.Ε. για τις τρεις φάσεις εφαρμογής των ετών 1994, 1995, 1996 αντίστοιχα (Πλιάκας κ.α., 1998).

Η συνολική ποσότητα νερού, που διοχετεύθηκε με τη διαδικασία του Τ.Ε. κατά την τριετία 7/2/1994-6/2/1997, ανέρχεται σε  $450 \times 10^3 \text{ m}^3$ , ενώ το ισοζύγιο των υπόγειων νερών της περιοχής έρευνας (διαφορά του εισερχόμενου νερού στο υπό μελέτη υπόγειο υδραυλικό σύστημα από φυσικό εμπλουτισμό, Τ.Ε., επιστροφές από άρδευση, πλευρικές υπόγειες εισροές και του εξερχόμενου από το σύστημα νερού από αντλήσεις και πλευρικές υπόγειες εκροές) παρουσίασε, για πρώτη φορά, θετικές τιμές φθάνοντας στο ύψος των  $+195 \times 10^3 \text{ m}^3$ , αντίστοιχα για την ίδια τριετία, σε αντίθεση με όλα τα προηγούμενα χρόνια που παρουσίαζε αρνητικές τιμές (Πλιάκας, 1998).

Για τον προσδιορισμό των υδροχημικών χαρακτήρων του υπόγειου νερού της περιοχής έρευνας, πραγματοποιήθηκαν χημικές αναλύσεις σε επιλεγμένες γεωτρήσεις κατά τις χρονικές στιγμές 20/2/1996 και 14/5/1996, δηλαδή 32 ημέρες πριν και 54 ημέρες μετά την έναρξη της 3ης φάσης (1996) εφαρμογής Τ.Ε. στην περιοχή αντίστοιχα, με τις μετρημένες τιμές να κυμαίνονται μέσα στα επιτρεπόμενα όρια (Πλιάκας, 1998).

Ο τεχνητός εμπλουτισμός με την επανενεργοποίηση παλιών αδρανοποιημένων κοιτών αποτελεί μια ελπιδοφόρα λύση για την αποτροπή της περαιτέρω επιβάρυνσης, τόσο της ποσοτικής όσο και της ποιοτικής, του υπόγειου υδατικού δυναμικού σε περιοχές, όπως αυτές της Θράκης.

Η περίπτωση Πολυσιτού Ξάνθης απέδειξε ότι η πιο πάνω μέθοδος αποτελεί μια διαδικασία με μικρό σχετικά κόστος αλλά αρκετά αποτελεσματική. Η τεχνική αυτή μπορεί να εφαρμόζεται ως εναλλακτική μέθοδος Τ.Ε. σε περιοχές, όπου έχουμε κοίτες εγκαταλελειμμένες ή σε κοίτες που έχει μειωθεί η έκτασή τους εξαιτίας της μεγάλης πτώσης του υποκείμενου υδροφόρου ορίζοντα, αφού προηγηθούν όλες εκείνες οι απαραίτητες ερευνητικές εργασίες για τον προσδιορισμό της καταλληλότητας της περιοχής να δεχθεί τον εμπλουτισμό και κυρίως να εξασφαλισθεί η σχετικά εύκολη και μικρού κόστους πρόσβαση σε διαθέσιμο νερό για εμπλουτισμό (όπως για παράδειγμα το νερό ενός παρακείμενου χειμάρρου ή ενός ποταμού). Τέλος, εκτός από το πρακτικό μέρος της ευεργετικής από υδρογεωλογικής άποψης

εφαρμογής του Τ.Ε., η μέθοδος αποκτά και άλλες διαστάσεις, αφού με την εκ νέου ροή νερού στην κοίτη, το ευρύτερο περιβάλλον αρχίζει να επανακτά τη διαταραγμένη φυσική του λειτουργία.

☑ Ενδεικτική πρόταση εφαρμογής πιλοτικού συστήματος SAT εμπλουτισμού υπόγειου υδροφόρου συστήματος στη Ν. Πέραμο του Ν. Καβάλας

Το Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Δ.Π.Θ. έχει διερευνήσει, από το 2009, τη δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης της εκροής από την Εγκατάσταση Επεξεργασίας Λυμάτων (ΕΕΛ) της Δημοτικής Ενότητας (ΔΕ) Ελευθερών του Δήμου Παγγαίου του Ν. Καβάλας (σχ. 11.18).



Σχήμα 11.18. Περιοχή έρευνας Ν. Περάμου της ΔΕ Ελευθερών.

Η επαναχρησιμοποίηση προτείνεται να επιτευχθεί με τη διάθεση της εκροής για γεωργική χρήση με διαδικασίες άρδευσης κατά τη θερινή περίοδο και για τον τεχνητό εμπλουτισμό του παράκτιου υπόγειου υδροφόρου συστήματος της εν λόγω ΔΕ κατά τη χειμερινή περίοδο για την αντιμετώπιση της υφαλμύρισης εξαιτίας της θαλάσσιας διείσδυσης που παρατηρείται στη δυτική παράκτια ζώνη του Ν. Καβάλας. Ο εμπλουτισμός μπορεί να επιτευχθεί κυρίως με τα συστήματα SAT (Soil Aquifer Treatment systems), όπου η εκροή από την ΕΕΛ διοχετεύεται σε σύστημα λεκανών κατάκλισης – εμπλουτισμού, ενώ το εδαφικά υλικά στην ακόρεστη ζώνη επενεργούν ως φυσικά φίλτρα που μπορούν να "καθαρίσουν" ή να επεξεργαστούν τα λύματα έτσι ώστε μετά την απόληψή του από το υπόγειο υδροφόρο σύστημα το "ανανεωμένο" πλέον νερό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να ικανοποιήσει σχεδόν όλες τις ανάγκες χρήσης μη

πόσιμου νερού με πλήρη ανάκτηση του νερού μέσα από κατάλληλα τοποθετημένες γεωτρήσεις ή αγωγούς αποστράγγισης. Επίσης, όπου δεν διατίθενται σχετικά αβαθείς ελεύθεροι υδροφόροι ή παρεμβάλλονται περιοριστικοί σχηματισμοί πολύ μικρής υδραυλικής αγωγιμότητας ή ανακύπτουν προβλήματα διάθεσης της απαιτούμενης έκτασης γης για επιφανειακή κατάκλυση, εκεί μπορεί να χρησιμοποιηθούν και γεωτρήσεις εμπλουτισμού μετά όμως αυστηρή σχετική υδρογεωλογική έρευνα.

Οι προτάσεις βασίζονται στις προδιαγραφές και τις οδηγίες της αριθμ. οικ.145116 απόφασης με τίτλο: Καθορισμός μέτρων, όρων και διαδικασιών για την επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων και άλλες διατάξεις (ΦΕΚ 354/Β/8-3-2011), όπως επίσης και λαμβάνουν σοβαρά υπόψη τις σχετικές συστάσεις, προτάσεις, οδηγίες και προδιαγραφές επιστημονικών οργανώσεων, επιτροπών και υπηρεσιών στο διεθνή χώρο (Aharoni et al., 2011, ASCE, 1987, 2001, U.S. EPA, 1992, U.S. National Research Council, 1994, κ.ά.).

Στην περιοχή μελέτης 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 Δ.Π.Θ. (Pliakas et al. 2007, Pliakas et al., 2011) Τα αποτελέσματα των σχετικών αυτών υδρογεωλογικών και υδροχημικών ερευνών συνηγορούν στη διαπίστωση ότι στα 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 (σχ. 11.19).

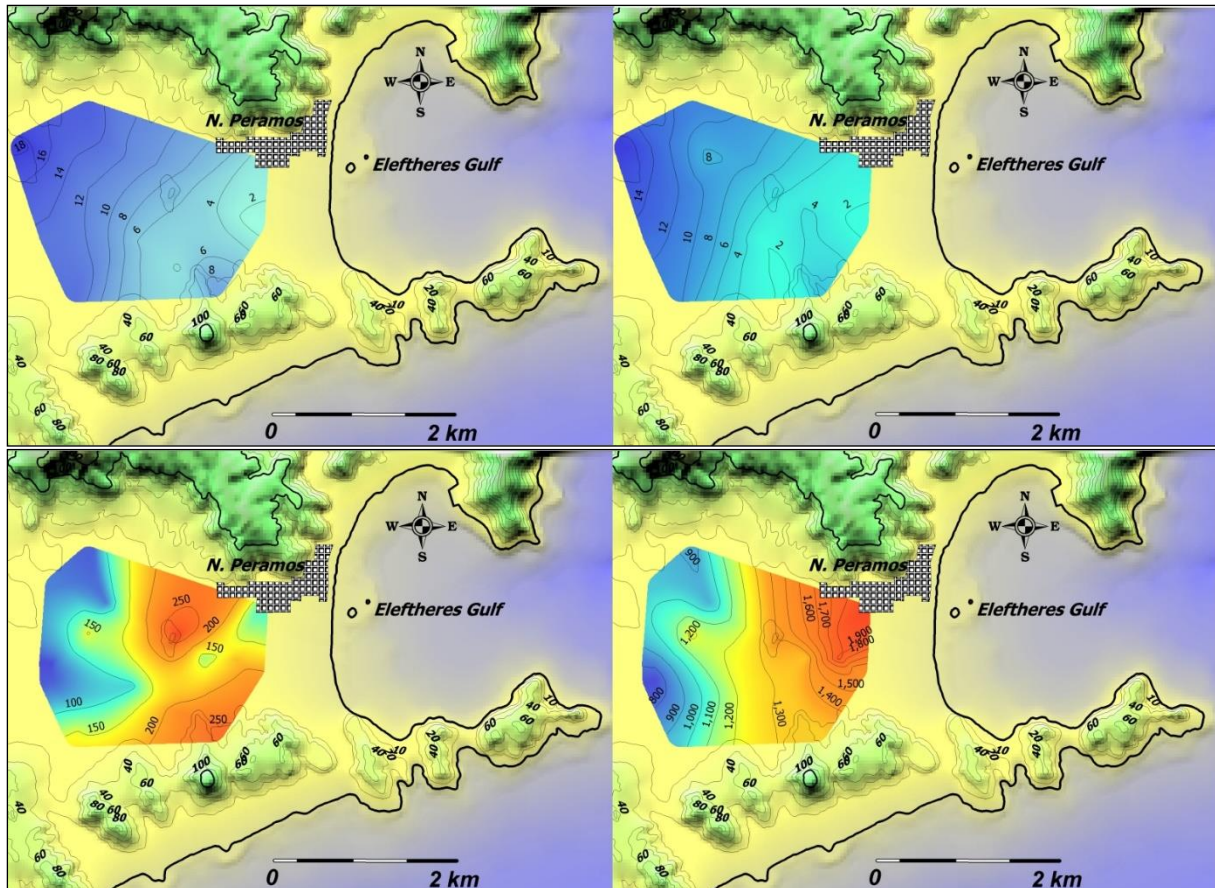
### Γενικά

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. 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 κλίμα της περιοχής είναι μεσογειακού τύπου με ξηρά και θερμά καλοκαίρια.

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., 2007):

- 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.



Σχήμα 11.19. Επάνω: Πιεζομετρικοί χάρτες (αριστερά: Μάιος 2006, δεξιά: Οκτώβριος 2006). Κάτω αριστερά: χάρτης κατανομής τιμών συγκέντρωσης ιόντων χλωρίου (mg/L) (15/07/2006), κάτω δεξιά: χάρτης κατανομής τιμών ηλεκτρικής αγωγιμότητας (μS/cm) (15/07/2006) (Pliakas et al., 2007, Pliakas et al., 2011).

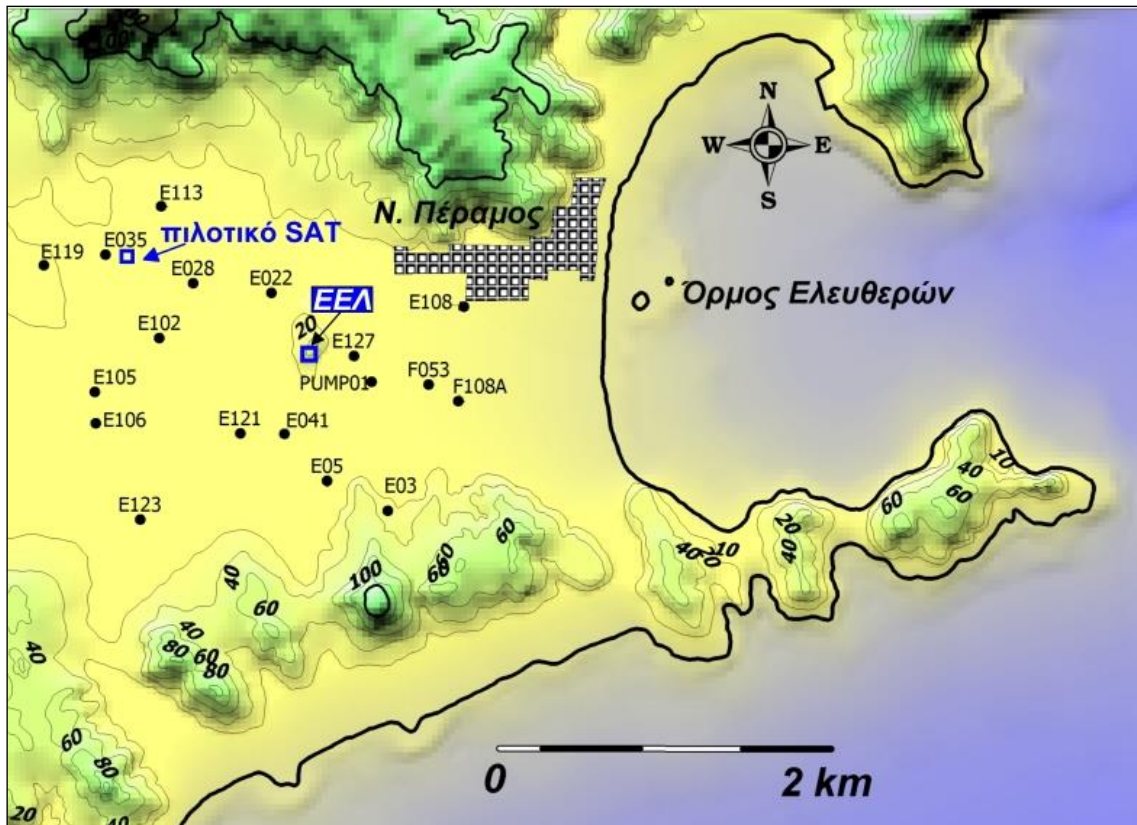
Ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά των ερευνών που έχουν κατά καιρούς διεξαχθεί κυρίως από το Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Δ.Π.Θ., είναι τα θετικά υψόμετρα της στάθμης του υπόγειου νερού στον ελεύθερο υδροφόρο που μελετάται. Αυτό το φαινόμενο ενεργεί ως ένα μέτρο αντιμετώπισης 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.

#### Γενικά στοιχεία σχεδιασμού της Εγκατάστασης Επεξεργασίας Λυμάτων (ΕΕΛ) της ΔΕ Ελευθερών

Η Εγκατάσταση Επεξεργασίας Λυμάτων (ΕΕΛ) της ΔΕ Ελευθερών κατασκευάστηκε σε επιλεγείσα θέση που βρίσκεται σε τοπικό ύψωμα με υψόμετρο μεταξύ 10 - 20 m και απέχει περί τα 2.000 m από την παραλία της Ν. Περάμου και περί τα 400 m ανάντη του δυτικού ορίου της Ν. Περάμου (σχ. 11.20).

Οι οικισμοί της ΔΕ Ελευθερών που εξυπηρετούνται από το έργο συγκεντρώνουν σήμερα περί τους 6.300 μόνιμους κατοίκους, ενώ κατά τη θερινή περίοδο παρατηρείται έντονη εποχιακή αύξηση του πληθυσμού λόγω παραθεριστών και ο συνολικός πληθυσμός κατά τη θερινή αιχμή ανέρχεται σε 24.700 κατοίκους περίπου. Η δυναμικότητα της μονάδας, για την επόμενη 20ετία θα είναι 30.000 ΙΑ (ισοδ. ατόμων) (Μαρκαντωνάκος και Παπαβασιλόπουλος

a, b, 2003). Προβλέπεται μέρος της εκροής να διατίθεται για άρδευση μη άμεσα βρώσιμων καλλιεργειών (τηρώντας τις απαραίτητες προδιαγραφές σχετικής καταλληλότητας), ενώ το υπόλοιπο της εκροής θα διοχετεύεται στον χείμαρρο Ελευθερών, αφού βελτιωθεί η ποιότητά της με κατάλληλες διατάξεις φίλτρων. Ο σχεδιασμός της μονάδας εξασφαλίζει υψηλό βαθμό αφαίρεσης οργανικών, αμμωνίας, νιτρικών και του φωσφόρου, έτσι ώστε να μην δημιουργούνται τυχόν προβλήματα ρύπανσης. Επί πλέον, η τελική διύλιση και απολύμανση με UV των καθαρών σε συνδυασμό διασφαλίζει την αποτελεσματική καταστροφή του μικροβιακού φορτίου και των παθογόνων, έτσι ώστε να μην προκαλείται μικροβιακή επιβάρυνση των νερών. Η εγκατάσταση έχει σχεδιασθεί ώστε να μην δημιουργεί δυσμενείς περιβαλλοντικές επιπτώσεις στην περιοχή.



Σχήμα 11.20. Η θέση της Εγκατάστασης Επεξεργασίας Λυμάτων (ΕΕΛ) της ΔΕ Ελευθερών. Ενδεικτική θέση των λεκανών εμπλουτισμού στο πλαίσιο εφαρμογής πιλοτικού συστήματος SAT στην περιοχή έρευνας (Pliakas et al., 2011, Στεργίου, 2009).

### Πρόταση σχεδιασμού ενδεικτικού πιλοτικού έργου SAT

Η πρώτη ενέργεια στο πλαίσιο της πρότασης αρχικού σχεδιασμού ενός ενδεικτικού πιλοτικού έργου SAT στη Ν. Πέραμο είναι η επιλογή κατάλληλου χώρου εγκατάστασης του προτεινόμενου έργου. Η επιλογή αυτή θα πρέπει να γίνει με κριτήρια εδαφοτεχνικά και υδρογεωλογικά, αλλά και διάθεσης κατάλληλων αγροτικών εκτάσεων, δημοσίων ή ιδιωτικών. Στην τελευταία περίπτωση θα πρέπει να συνυπολογιστεί και ο παράγοντας του απαιτούμενου κόστους πιθανής απαλλοτρίωσης που πολλές φορές αποβαίνει καθοριστικός και ίσως σε κάποιες περιπτώσεις απαγορευτικές για την τελική επιλογή. Με βάση το κύριο κριτήριο συνεχούς ύπαρξης ακόρεστης ζώνης κάτω από τις λεκάνες εμπλουτισμού ικανού πάχους έτσι

ώστε να μπορούν να ικανοποιηθούν οι κατάλληλες και απαραίτητες αερόβιες διεργασίες και η αναμενόμενη απομάκρυνση των ανεπιθύμητων μικροβίων, οι σχετικοί κανονισμοί της California (USA) προτείνουν ελάχιστο βάθος της στάθμης της ελεύθερης υδροστατικής επιφάνειας του υπόγειου νερού κάτω από την επιφάνεια του εδαφικού πυθμένα των λεκανών εμπλουτισμού να είναι περί τα 3 m. Βέβαια σε άλλες περιπτώσεις, όπως στην Ολλανδία, σε εφαρμογές εμπλουτισμού με bank infiltration systems, οι ανάλογες διεργασίες συντελούνται ελεγχόμενα κάτω από τη στάθμη του υπόγειου νερού.

Από τις σχετικές μετρήσεις σε διάφορα χρονικά διαστήματα του βάθους της στάθμης του υπόγειου νερού του ελεύθερου υδροφόρου σε επιλεγμένες γεωτρήσεις παρακολούθησης της στάθμης διακύμανσης του υπόγειου νερού στην περιοχή μελέτης, διαπιστώνεται ότι η στάθμη του υπόγειου νερού σε κάποιες γεωτρήσεις, κυρίως ΒΔ της Εγκατάστασης Επεξεργασίας Λυμάτων (Ε.Ε.Λ.), ικανοποιεί το κριτήριο ελάχιστου βάθους που αναφέρθηκε πιο πάνω (Pliakas et al., 2011, Στεργίου, 2009).

Από τη σχετική γεωλογική και υδρογεωλογική διερεύνηση στην περιοχή μελέτης που έχει προηγηθεί και στο πλαίσιο μιας πρώτης και αρκετά γενικής προσέγγισης του ζητήματος, διαπιστώθηκε ότι το υλικό των αλλουβιακών και τεταρτογενών αποθέσεων στην ευρύτερη περιοχή ΒΔ της Ε.Ε.Λ., ικανοποιεί τις απαιτήσεις ύπαρξης ικανής ακόρεστης ζώνης από άποψη διαθέσιμου κατάλληλου εδαφικού – γεωλογικού υλικού για τη διήθηση της εκροής προς τον υποκείμενο ελεύθερο υδροφόρο (Pliakas et al., 2011, Στεργίου, 2009).

Τα συστήματα εμπλουτισμού απαιτούν διαπερατά εδάφη με υψηλή διηθητικότητα, ακόρεστη ζώνη χωρίς περιοριστικές στρώσεις ή άλλα προβλήματα, όπως ρυπασμένες ζώνες ή με ανεπιθύμητες χημικές ουσίες που είναι δυνατόν να υποστούν έκπλυση. Μια ιδανική επιφάνεια εδάφους θα πρέπει να είναι ομοιόμορφη, με χονδρόκοκκη δομή ώστε να έχει υψηλή διηθητικότητα αλλά και με λεπτόκοκκα συστατικά για να έχει ικανοποιητική φίλτραση. Τιμές διηθητικότητας από 25 mm/h ή υψηλότερες είναι αναγκαίες για ταχεία διήθηση. Γι' αυτό επιφανειακά εδάφη από αμμώδη πηλό, πηλό ή λεπτόκοκκη άμμο και χαλίκια είναι προτιμότερα για τα συστήματα SAT. Πολύ χονδρόκοκκη άμμος και χαλίκια δεν είναι κατάλληλα, διότι επιτρέπουν τα απόβλητα να διέρχονται πολύ γρήγορα από το επιφανειακό στρώμα του εδάφους, στο οποίο υπάρχει η κύρια βιολογική και χημική δραστηριότητα. Ομοιόμορφα εδάφη με βάθος πάνω από 3 m είναι τα πλέον κατάλληλα.

Αν ληφθεί ως μια μέση τιμή υδραυλικής αγωγιμότητας για πηλούχο άμμο η τιμή των 0,5 m/ημέρα και μέση παροχή  $Q=800 \text{ m}^3/\text{ημέρα}$  (διακύμανση χειμερινής και θερινής παροχής, περίπου: 600 - 1000  $\text{m}^3/\text{ημέρα}$ ), τότε στο πλαίσιο μιας πρώτης γενικής προσέγγισης, η ελάχιστη έκταση των διατάξεων εμπλουτισμού μπορεί να εκτιμηθεί σε  $A=1600 \text{ m}^2$  περίπου. Επίσης επισημαίνεται ότι το ύψωμα εμπλουτισμού θα πρέπει να διατηρείται υψομετρικά συνεχώς κάτω από τον πυθμένα των λεκανών διήθησης να για να αποφευχθούν μειώσεις στο ρυθμό διήθησης. Μια διαμήκης και στενή λεκάνη εμπλουτισμού ή μια σειρά από λεκάνες παράγουν χαμηλότερα υβώματα από ό,τι οι τετράγωνες ή κυκλικές λεκάνες με το ίδιο εμβαδόν και υδραυλικά φορτία. Τέλος προτιμώνται οι ρηχές λεκάνες εμπλουτισμού με βάθος νερού περίπου 0,5 m ή λιγότερο παρά οι πιο βαθιές λεκάνες.

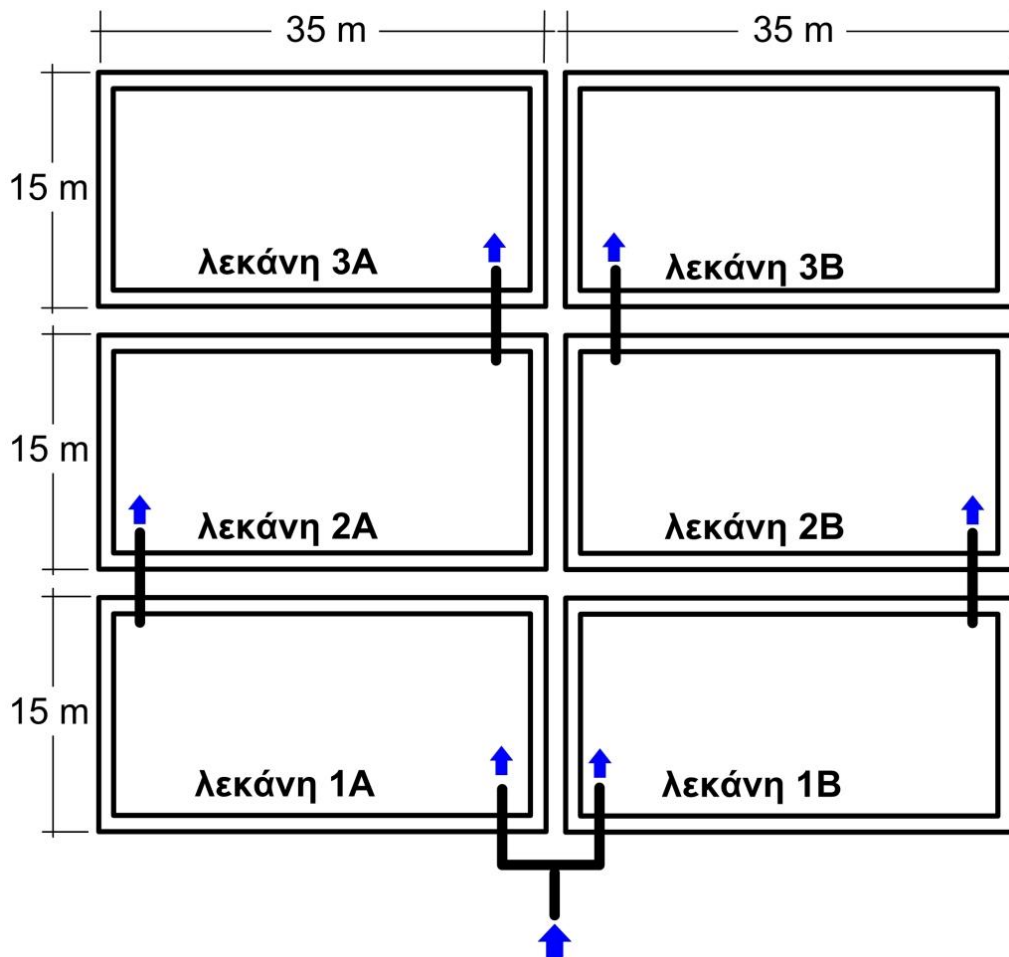
Με βάση τα παραπάνω, προτείνεται ενδεικτικά μια θέση των έργων εμπλουτισμού ΒΔ της Εγκατάστασης Επεξεργασίας Λυμάτων (Ε.Ε.Λ.), και σε απόσταση περίπου 1,5 km (σχ. 11.20). Το συγκεκριμένο πilotικό έργο εμπλουτισμού προτείνεται να περιλαμβάνει (σχ. 11.21, 11.22) (Pliakas et al., 2011, Στεργίου, 2009):

- Τη διαμόρφωση στεγανής δεξαμενής καθαρών που θα υποδέχεται την εκροή από την ΕΕΛ και η οποία με κατάλληλη υδραυλική μελέτη θα πρέπει να διαστασιολογηθεί (διαστάσεις πυθμένα, βάθος και χωρητικότητα).
- Την εκσκαφή για τη διαμόρφωση 2 συστημάτων ρηχών λεκανών κατάκλυσης-εμπλουτισμού (ή διήθησης) Α και Β, με 3 λεκάνες το καθένα και με προτεινόμενες ενδεικτικά διαστάσεις η κάθε μια: επιφάνειας 15 m × 35 m, βάθους 0,80 – 1 m, ώστε να επιτυγχάνεται ελεγχόμενα κατάκλυση νερού με βάθος το πολύ 20-30 cm (για να αποφεύγεται όσο το δυνατόν η γρήγορη εμφάνιση του προβλήματος της απόφραξης των εδαφικών πόρων του πυθμένα των λεκανών - clogging). Κάθε σύστημα λεκανών καλύπτει έκταση περίπου 1600  $\text{m}^2$  και μπορούν να χρησιμοποιούνται εναλλάξ στο πλαίσιο των

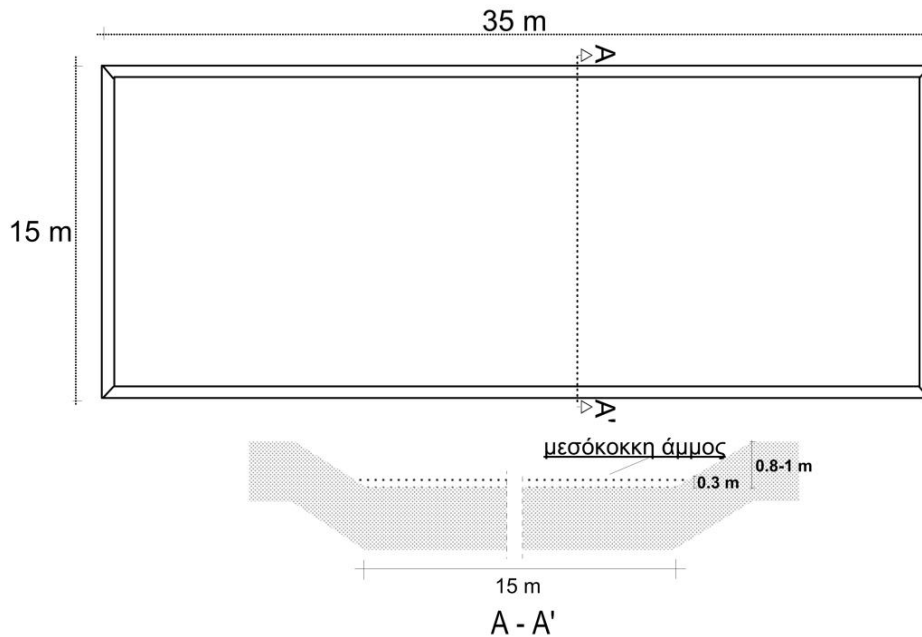


απαιτούμενων εναλλαγών χρήσης αποξηράνσης – διάβρεξης (wetting - drying cycles) σε χρονική βάση κάποιων ημερών για την αντιμετώπιση του προβλήματος της απόφραξης των πόρων του πυθμένα αλλά και των πρηνών των εκσκαφών (clogging). Συνεπώς ο όγκος εκσκαφών μόνο για τα συστήματα αυτά, υπολογίζεται περίπου σε περίπου  $1600 \text{ m}^3 \times 2$  συστήματα =  $3200 \text{ m}^3$ , χωρίς να συμπεριλαμβάνεται η στεγανή λεκάνη δεξαμενής καθαρών. Τέλος εκτιμάται ότι το ελάχιστο μήκος του απαιτούμενου συστήματος σωληνώσεων μεταφοράς της εκροής (νερού εμπλουτισμού) στη θέση των λεκανών είναι της τάξης του 1,5 km περίπου.

- Επίστρωση του πυθμένα των λεκανών με χαλίκι ή μεσόκοκκη άμμο (0,10-0,20 cm)
- Την τοποθέτηση αγωγών για τη διοχέτευση του νερού από τη δεξαμενή στις λεκάνες, όπως και των αγωγών που θα συνδέουν τις λεκάνες ανά τρεις μεταξύ τους.
- Την επιλογή ή/και ανόρυξη γεωτρήσεων ή/και πιεζομέτρων για την παρακολούθηση της αποτελεσματικότητας της διαδικασίας του εμπλουτισμού τόσο ποσοτικά όσο και ποιοτικά.



Σχήμα 11.21. Ενδεικτικό σκαρίφημα διάταξης και διαστάσεων των λεκανών εμπλουτισμού (Pliakas et al., 2011, Στεργίου, 2009).



Σχήμα 11.22. Κάτοψη και τομή προτεινόμενης λεκάνης εμπλουτισμού (Pliakas et al., 2011, Στεργίου, 2009).

Ενδεικτική πρόταση εφαρμογής πιλοτικού συστήματος εμπλουτισμού των υπόγειων νερών SAT στο πεδινό τμήμα του Ν. Ξάνθης

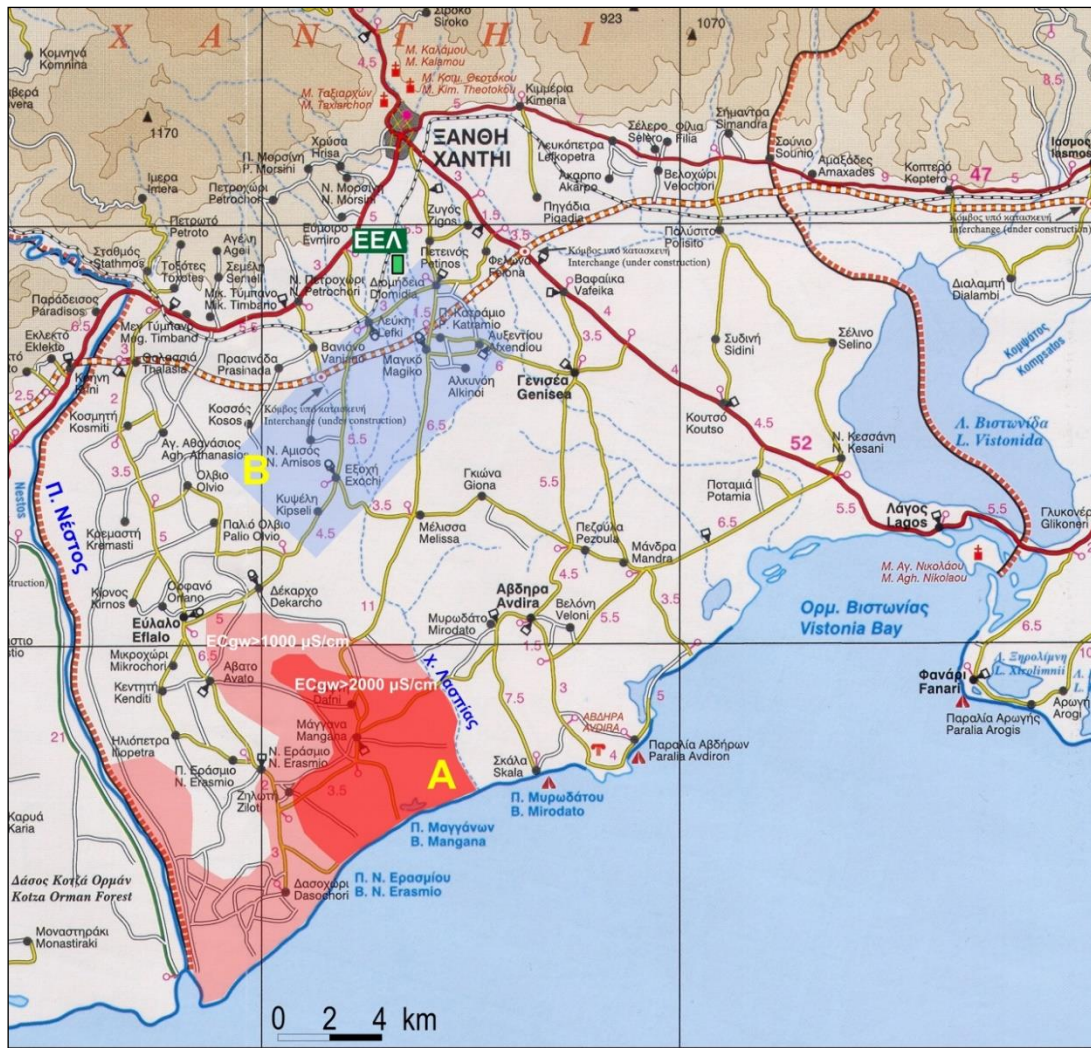
Η ΔΕΥΑ Ξάνθης διαθέτει και λειτουργεί Εγκατάσταση Επεξεργασίας Λυμάτων (ΕΕΛ) στη Διομήδεια Ξάνθης, και έχει δυναμικότητα οργανικού φορτίου σε μονάδες ισοδύναμου πληθυσμού (Μ.Ι.Π.) 90.000 (σχ. 11.23). Η λειτουργία αυτής της ΕΕΛ χαρακτηρίζεται ως επιβεβλημένη και σημαντική διαδικασία στο πλαίσιο της ορθολογικής ανάπτυξης της ευρύτερης παράκτιας περιοχής του δήμου. Τελικός αποδέκτης της κύριας εκροής της ΕΕΛ αποτελεί ο χείμαρρος Λασπίας, που διατρέχει το ανατολικό όριο του ανατολικού Δέλτα του Ποταμού Νέστου (σχ. 11.23).

Οι οικισμοί που εξυπηρετούνται από την ΕΕΛ είναι οι εξής:

- Εύμοιρο με πληθυσμό αιχμής 4776 (ΜΙΠ),
- Κιμμέρια με πληθυσμό αιχμής 4760 (ΜΙΠ),
- Ξάνθη με πληθυσμό αιχμής 50.000 (ΜΙΠ).

Οι παραπάνω οικισμοί εξυπηρετούνται από την εγκατάσταση μέσω δικτύου αποχέτευσης. Το μέγιστο συνολικό εισερχόμενο φορτίο στην Ε.Ε.Λ είναι 3300 Kg BOD5/ day (η τιμή αυτή αναφέρεται στο μέγιστο μέσο εβδομαδιαίο που εισέρχεται στην ΕΕΛ κατά τη διάρκεια ενός έτους εξαιρουμένων των ασυνήθιστων καταστάσεων, όπως οι περιπτώσεις καταρρακτωδών βροχών). Το συνολικό αυτό φορτίο αποτελείται κυρίως από λύματα και σε μικρότερη ποσότητα από βοθρολύματα.

Σχετικά με το βαθμό επεξεργασίας που πραγματοποιείται στην ΕΕΛ, σημειώνεται ότι χρησιμοποιείται πρωτοβάθμια και δευτεροβάθμια επεξεργασία, και απολύμανση με χλωρίωση. Η ποσότητα της παραγόμενης ιλύος είναι 7392000kg DS/έτος, καταλήγει στο σύνολο της σε ΧΥΤΑ.



Σχήμα 11.23. Προτεινόμενες περιοχές έρευνας του Δήμου Ξάνθης για την επαναχρησιμοποίηση της εκροής από την ΕΕΛ: (Α) προτεινόμενη παράκτια περιοχή για εμπλουτισμό του υδροφόρου, με την κατανομή ενδεικτικών τιμών ηλεκτρικής αγωγιμότητας (EC<sub>gw</sub>) του υπόγειου νερού (Ιούλιος 2008), (Β) περιοχή Λεύκης - Διομήδειας - Αμισσού, για άρδευση (Ντελή Ιμπραχίμ, 2012, Pliakas et al., 2013, με τροποποιήσεις).

Η διοχέτευση της εκροής μετά από την απαιτούμενη με βάση τις αντίστοιχες νομικές διατάξεις επεξεργασία της, αφενός για την κάλυψη αρδευτικών αναγκών της κατάντη περιοχής της ΕΕΛ (σήμερα εκβαθύνονται συνεχώς οι υπάρχουσες αρδευτικές γεωτρήσεις για την ικανοποίηση των υδατικών αναγκών των καλλιεργειών) και αφετέρου προς τα υπόγεια υδροφόρα συστήματα της παράκτιας περιοχής του ανατολικού Δέλτα του Ποταμού Νέστου και δυτικά του χειμάρρου Λασπία με διάφορες τεχνικές τεχνητού εμπλουτισμού υπόγειων νερών, προβάλλουν ως ελκυστικές και εφικτές λύσεις, αφού βέβαια τηρηθούν οι ανάλογοι απαιτούμενοι κανόνες, κριτήρια και προδιαγραφές. Ιδιαίτερα το σημαντικό πλεονέκτημα του εμπλουτισμού με τη χρήση επεξεργασμένων αστικών λυμάτων από τη μονάδα της ΕΕΛ είναι και η αναμενόμενη συμβολή του στην αντιμετώπιση της διείσδυσης του θαλασσινού νερού στην παράκτια περιοχή.

Επισημαίνεται ότι οι τιμές εξόδου της εκροής της ΕΕΛ BOD, COD και SS είναι μέσα στα απαιτούμενα όρια για εμπλουτισμό υπόγειου υδροφόρου, που δεν χρησιμοποιείται για πόση και με διήθηση διαμέσου κατάλληλου εδαφικού στρώματος, δηλαδή BOD<25 mg/L, COD<125

mg/L, SS<35 mg/L (ΚΥΑ 145116 - ΦΕΚ 354/Β/8-3-2011, ΚΥΑ 5673/400/1997) (Ντελή Ιμπραχίμ, 2012, Pliakas et al., 2013).

Με τις ενέργειες αυτές θα μειωθούν σημαντικά οι αντλούμενες ποσότητες από το πεδίο νότια της ΕΕΛ και έτσι δεν θα απαιτηθούν νέες γεωτρήσεις ή εκβάθυνση των παλαιότερων. Επίσης με τον τεχνητό εμπλουτισμό στην παράκτια περιοχή θα περιοριστεί αποτελεσματικά η διείσδυση της θάλασσας στους παράκτιους υδροφόρους και θα πραγματοποιηθεί επαναπλήρωση των αβαθών υπόγειων υδροφόρων συστημάτων τα οποία σήμερα εξυπηρετούν τις αρδευτικές ανάγκες της περιοχής του Δέλτα.

Ανακύπτει η ανάγκη διερεύνησης της δυνατότητας επαναχρησιμοποίησης της εκροής από την ΕΕΛ της Δ.Ε.Υ.Α Ξάνθης. Η επαναχρησιμοποίηση της εκροής προτείνεται να επιτευχθεί με τη διάθεση της εκροής για γεωργική χρήση με διαδικασίες άρδευσης και για τον εμπλουτισμό του παράκτιου υδροφόρου για την αντιμετώπιση της υπαλμύρισης εξαιτίας της θαλάσσιας διείσδυσης που παρατηρείται στη δυτική παράκτια ζώνη του Ν. Ξάνθης.

Ο εμπλουτισμός μπορεί να επιτευχθεί κυρίως με τα συστήματα SAT (Soil Aquifer Treatment systems), (Todd and Mays, 2005, National Research Council, 1994), όπου η εκροή από την ΕΕΛ διοχετεύεται σε σύστημα λεκανών κατάκλυσης – εμπλουτισμού, ενώ το εδαφικά υλικά στην ακόρεστη ζώνη επενεργούν ως φυσικά φίλτρα που μπορούν να "καθαρίσουν" ή να επεξεργαστούν τα λύματα έτσι ώστε μετά την απόληψή του από το υπόγειο υδροφόρο σύστημα το "ανανεωμένο" πλέον νερό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να ικανοποιήσει σχεδόν όλες τις ανάγκες χρήσης μη πόσιμου νερού με πλήρη ανάκτηση του νερού μέσα από κατάλληλα τοποθετημένες γεωτρήσεις ή αγωγούς αποστράγγισης. Επίσης, όπου δεν διατίθενται σχετικά αβαθείς ελεύθεροι υδροφόροι ή παρεμβάλλονται περιοριστικοί σχηματισμοί πολύ μικρής υδραυλικής αγωγιμότητας ή ανακύπτουν προβλήματα διάθεσης της απαιτούμενης έκτασης γης για επιφανειακή κατάκλυση, εκεί μπορεί να χρησιμοποιηθούν και γεωτρήσεις εμπλουτισμού μετά όμως αυστηρή σχετική υδρογεωλογική έρευνα.

Οι προτάσεις βασίζονται στις προδιαγραφές και τις οδηγίες της αριθμ. οικ.145116 απόφασης με τίτλο: Καθορισμός μέτρων, όρων και διαδικασιών για την επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων και άλλες διατάξεις (ΦΕΚ 354/Β/8-3-2011) – ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5, όπως επίσης και λαμβάνουν σοβαρά υπόψη τις σχετικές συστάσεις, προτάσεις, οδηγίες και προδιαγραφές επιστημονικών οργανώσεων, επιτροπών και υπηρεσιών στο διεθνή χώρο (ASCE, 1987, 2001, U.S. EPA, 1992, U.S. National Research Council, 1994, κ.ά.).

Τα αποτελέσματα των σχετικών υδρογεωλογικών και υδροχημικών ερευνών του Εργαστηρίου Τεχνικής Γεωλογίας του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Δ.Π.Θ. στην ευρύτερη περιοχή έρευνας συνηγορούν στη διαπίστωση ότι στο παράκτιο τμήμα της περιοχής 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.

Τα γενικά κριτήρια επιλογής κατάλληλων θέσεων πιλοτικών έργων SAT περιλαμβάνουν:

- κατάλληλες υδρογεωλογικές συνθήκες,
- απαιτούμενο βάθος ακόρεστης ζώνης > 3 m,
- κατάλληλο υλικό ακόρεστης ζώνης, που να εξασφαλίζει ρυθμό διήθησης τουλάχιστον περί τα 5 mm/h,
- κλίση εδάφους < 5 %

Η πρώτη ενέργεια στο πλαίσιο της πρότασης αρχικού σχεδιασμού ενός ενδεικτικού πιλοτικού έργου SAT στην περιοχή έρευνας είναι η επιλογή κατάλληλου χώρου εγκατάστασης του προτεινόμενου έργου. Η επιλογή αυτή θα πρέπει να γίνει με κριτήρια εδαφοτεχνικά και υδρογεωλογικά, αλλά και διάθεσης κατάλληλων αγροτικών εκτάσεων, δημοσίων ή ιδιωτικών. Στην τελευταία περίπτωση θα πρέπει να συνυπολογιστεί και ο παράγοντας του απαιτούμενου κόστους πιθανής απαλλοτρίωσης που πολλές φορές αποβαίνει καθοριστικός και ίσως σε κάποιες περιπτώσεις απαγορευτικές για την τελική επιλογή. Με βάση το κύριο κριτήριο συνεχούς ύπαρξης ακόρεστης ζώνης κάτω από τις λεκάνες εμπλουτισμού ικανού πάχους έτσι ώστε να μπορούν να ικανοποιηθούν οι κατάλληλες και απαραίτητες αερόβιες διεργασίες και η αναμενόμενη απομάκρυνση των ανεπιθύμητων μικροβίων, οι σχετικοί κανονισμοί της

California (USA) προτείνουν ελάχιστο βάθος της στάθμης της ελεύθερης υδροστατικής επιφάνειας του υπόγειου νερού κάτω από την επιφάνεια του εδαφικού πυθμένα των λεκανών εμπλουτισμού να είναι περί τα 3 m. Βέβαια σε άλλες περιπτώσεις, όπως στην Ολλανδία, σε εφαρμογές εμπλουτισμού με bank infiltration systems, οι ανάλογες διεργασίες συντελούνται

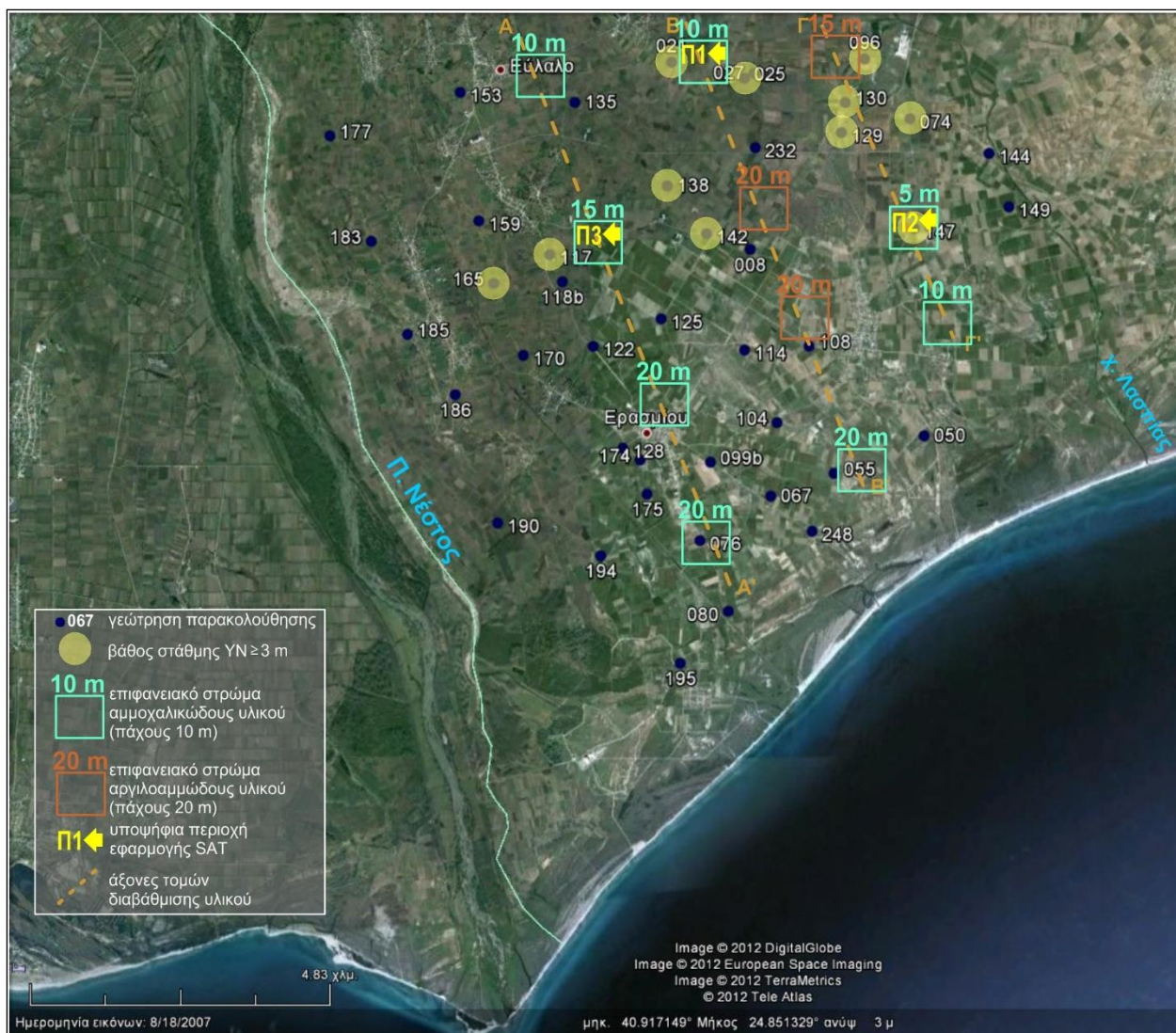
Τα συστήματα εμπλουτισμού απαιτούν διαπερατά εδάφη με υψηλή διηθητικότητα, ακόρεστη ζώνη χωρίς περιοριστικές στρώσεις ή άλλα προβλήματα, όπως ρυπασμένες ζώνες ή με ανεπιθύμητες χημικές ουσίες που είναι δυνατόν να υποστούν έκπλυση. Μια ιδανική επιφάνεια εδάφους θα πρέπει να είναι ομοιόμορφη, με χονδρόκοκκη δομή ώστε να έχει υψηλή διηθητικότητα αλλά και με λεπτόκοκκα συστατικά για να έχει ικανοποιητική φίλτραση. Τιμές διηθητικότητας από 25 mm/h ή υψηλότερες είναι αναγκαίες για ταχεία διήθηση. Γι' αυτό επιφανειακά εδάφη από αμμώδη πηλό, πηλό ή λεπτόκοκκη άμμο και χαλίκια είναι προτιμότερα για τα συστήματα SAT. Πολύ χονδρόκοκκη άμμος και χαλίκια δεν είναι κατάλληλα, διότι επιτρέπουν τα απόβλητα να διέρχονται πολύ γρήγορα από το επιφανειακό στρώμα του εδάφους, στο οποίο υπάρχει η κύρια βιολογική και χημική δραστηριότητα. Ομοιόμορφα εδάφη με βάθος πάνω από 3 m είναι τα πλέον κατάλληλα.

Με βάση τα δυο κύρια κριτήρια, που αναφέρονται πιο πάνω, δηλαδή το βάθος της στάθμης του υπόγειου νερού (ΥΝ) να είναι τουλάχιστον 3 m και το υλικό του επιφανειακού στρώματος να είναι πρόσφορο για ικανοποιητικούς ρυθμούς κατείσδυσης, έγιναν οι ερευνητικές εργασίες που ακολουθούν:

1. Έγινε επεξεργασία των τιμών στάθμης του ΥΝ στο δίκτυο παρακολούθησης στο ανατολικό δέλτα του Π. Νέστου από στοιχεία που μας διέθεσε ο κ. Ι. Γκιουγκής, υποψήφιος διδάκτορας του Τομέα Γεωτεχνικής Μηχανικής του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Δ.Π.Θ. και επιλέχθηκαν οι γεωτρήσεις του Πίνακα 11.1, όπου εμφανίζονται οι γεωτρήσεις στις οποίες έχουν καταγραφεί τιμές βάθους στάθμης  $\geq 3$  m, στις 27-1-2009 και 28-4-2009, μήνες με τις πιο υψηλές στάθμες ΥΝ.
2. Σχεδιάστηκε ο χάρτης του σχήματος 11.24, όπου διακρίνονται:
  - ✓ όλες οι γεωτρήσεις παρακολούθησης,
  - ✓ οι θέσεις των γεωτρήσεων του Πίνακα 11.2 με βάθος στάθμης  $\geq 3$  m,
  - ✓ άξονες τομών διαβάθμισης υλικού και αντίστοιχα στοιχεία για το εδαφικό υλικό της επιφανειακής διαστρωμάτωσης (κατά τόπους αμμοχαλικώδες με πάχος 10 – 20 m ή αργιλοαμμώδες πάχους 15 – 20 m) ,
  - ✓ και τέλος οι υποψήφιες θέσεις εφαρμογής συστημάτων SAT (Π1, Π2, Π3).

Πίνακας 11.1. Βάθος στάθμης υπόγειου νερού σε γεωτρήσεις με βάθος στάθμης  $\geq 3$  m (2009) (Γκιουγκής, 2013).

γεώτρηση	27/1/2009	28/4/2009
21	5,90	5,98
25	3,35	4,46
74	7,46	7,97
96	23,69	18,32
117	4,18	4,19
129	3,95	3,77
130	5,11	4,98
138	4,33	4,62
142	4,25	4,02
147	3,00	2,86
165	3,07	3,11



Σχήμα 11.24. Χάρτης με τις υποψήφιες θέσεις εφαρμογής SAT (Π1, Π2, Π3), τις γεωτρήσεις παρακολούθησης, τα σημεία με βάθος στάθμης  $\geq 3$  m, τους άξονες τομών διαβάθμισης υλικού και αντίστοιχα στοιχεία για το εδαφικό υλικό της επιφανειακής διαστρωμάτωσης (Ντελή Ιμπραχίμ, 2012, Pliakas et al., 2013, με τροποποιήσεις) (υπόβαθρο: Google Earth 2012).

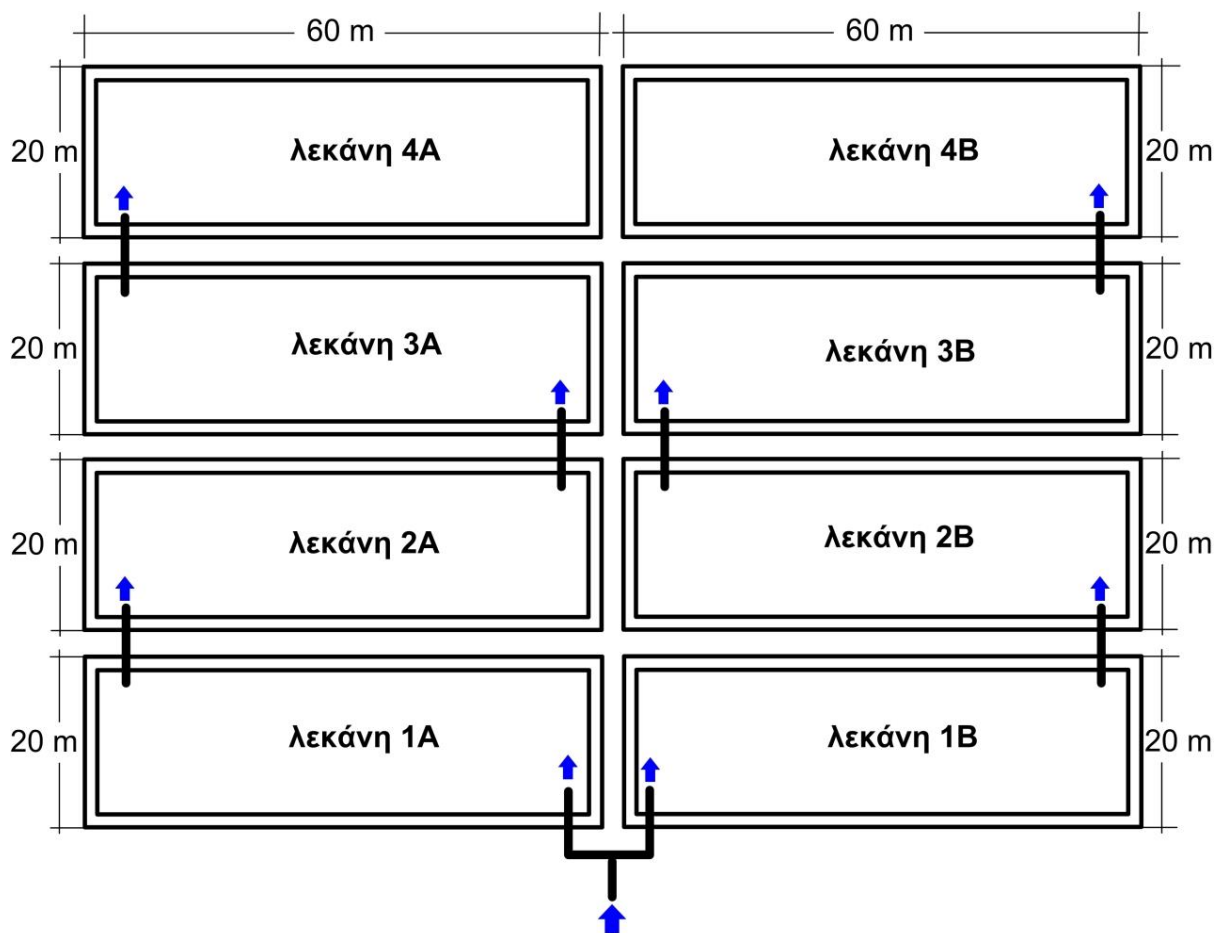
Οι θέσεις Π1, Π2, Π3 επιλέχθηκαν εκεί όπου συνδυάζονται και τα δυο κριτήρια του βάθους της στάθμης ( $\geq 3$  m) και του κατάλληλου εδαφικού υλικού του επιφανειακού στρώματος (εδώ αμμοχαλικώδες με πάχος 10 – 20 m).

Αν λάβουμε ως μια μέση τιμή υδραυλικής αγωγιμότητας για πηλούχο άμμο την τιμή των  $I=0,5$  m/ημέρα και μέση παροχή που διατίθεται από την εκροή της ΕΕΛ  $Q=4800$  m<sup>3</sup>/ημέρα (από τα περίπου 5000 - 6000 m<sup>3</sup>/ημέρα, που εκρέουν), τότε στο πλαίσιο μιας πρώτης γενικής προσέγγισης, η ελάχιστη έκταση των διατάξεων εμπλουτισμού μπορεί να εκτιμηθεί σε  $A=9600$  m<sup>2</sup> περίπου ( $I=Q/A$ , ASCE, 1987). Επίσης επισημαίνεται ότι το ύψωμα εμπλουτισμού θα πρέπει να διατηρείται υψομετρικά συνεχώς κάτω από τον πυθμένα των λεκανών διήθησης να για να αποφευχθούν μειώσεις στο ρυθμό διήθησης. Μια διαμήκης και στενή λεκάνη εμπλουτισμού ή μια σειρά από λεκάνες παράγουν χαμηλότερα υβώματα από ό,τι οι τετράγωνες ή κυκλικές λεκάνες με το ίδιο εμβαδόν και υδραυλικά φορτία. Τέλος προτιμώνται

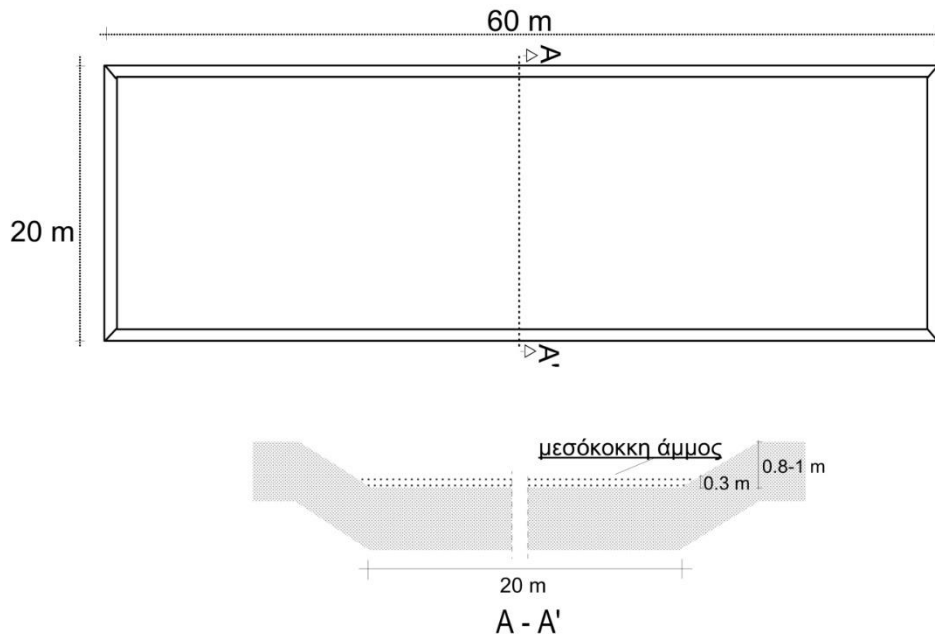
οι ρηχές λεκάνες εμπλουτισμού με βάθος νερού περίπου 0,5 m ή λιγότερο παρά οι πιο βαθιές λεκάνες.

Με βάση τα παραπάνω, προτείνονται ενδεικτικά 2 θέσεις Π1, Π2 και μια εφεδρική/εναλλακτική Π3 (σε περιπτώσεις που ανακύψουν τεχνικά ή διαχειριστικά προβλήματα στις δυο πρώτες είτε κατά τη διάρκεια της μελέτης και κατασκευής τους είτε κατά τη διάρκεια λειτουργίας τους) (σχ. 11.24) των έργων εμπλουτισμού στο πεδινό τμήμα που εκτείνεται μεταξύ των Μαγγάνων και του χειμάρρου Λασπία και σε απόσταση περίπου 15 km από την Εγκατάσταση Επεξεργασίας Λυμάτων (Ε.Ε.Λ.) (σχ. 11.23). Το συγκεκριμένο πιλοτικό έργο εμπλουτισμού προτείνεται να περιλαμβάνει (σχ. 11.25, 11.26):

- Τη διαμόρφωση στεγανής δεξαμενής καθαρών που θα υποδέχεται την εκροή από την ΕΕΛ και η οποία με κατάλληλη υδραυλική μελέτη θα πρέπει να διαστασιολογηθεί (διαστάσεις πυθμένα, βάθος και χωρητικότητα).



Σχήμα 11.25. Ενδεικτικό σκαρίφημα διάταξης και διαστάσεων των λεκανών εμπλουτισμού (Ντελή Ιμπραχίμ, 2012, Ρλιακας et al., 2013, με τροποποιήσεις).



Σχήμα 11.26. Κάτοψη και τομή προτεινόμενης λεκάνης εμπλουτισμού (Ντελή Ιμπραχίμ, 2012, Pliakas et al., 2013, με τροποποιήσεις).

- Την εκσκαφή για τη διαμόρφωση 2 συστημάτων ρηχών λεκανών κατάκλισης-εμπλουτισμού (ή διήθησης) A και B, με 4 λεκάνες το καθένα και με προτεινόμενες ενδεικτικά διαστάσεις η κάθε μια: επιφάνειας 20 m × 60 m, βάθους 0,80 – 1 m, ώστε να επιτυγχάνεται ελεγχόμενα κατάκλιση νερού με βάθος το πολύ 20-30 cm (για να αποφεύγεται όσο το δυνατόν η γρήγορη εμφάνιση του προβλήματος της απόφραξης των εδαφικών πόρων του πυθμένα των λεκανών - clogging). Κάθε σύστημα λεκανών καλύπτει έκταση 4800 m<sup>2</sup> και μπορούν να χρησιμοποιούνται εναλλάξ στο πλαίσιο των απαιτούμενων εναλλαγών χρήσης αποξήρανσης – διάβρεξης (wetting - drying cycles) σε χρονική βάση κάποιων ημερών για την αντιμετώπιση του προβλήματος της απόφραξης των πόρων του πυθμένα αλλά και των πρηνών των εκσκαφών (clogging). Συνεπώς ο όγκος εκσκαφών μόνο για τα συστήματα αυτά, υπολογίζεται περίπου σε περίπου 4800 m<sup>3</sup> × 2 συστήματα = 9600 m<sup>3</sup>, χωρίς να συμπεριλαμβάνεται η στεγανή λεκάνη δεξαμενής καθαρών. Τέλος εκτιμάται ότι το ελάχιστο μήκος του απαιτούμενου συστήματος σωληνώσεων μεταφοράς της εκροής (νερού εμπλουτισμού) στη θέση των λεκανών είναι της τάξης του 15 km περίπου (σχ. 11.23).
- Επίστρωση του πυθμένα των λεκανών με χαλίκι ή μεσόκοκκη άμμο (0,10-0,20 cm)
- Την τοποθέτηση αγωγών για τη διοχέτευση του νερού από τη δεξαμενή στις λεκάνες, όπως και των αγωγών που θα συνδέουν τις λεκάνες ανά τρεις μεταξύ τους.
- Την επιλογή ή/και ανόρυξη γεωτρήσεων ή/και πιεζομέτρων για την παρακολούθηση της αποτελεσματικότητας της διαδικασίας του εμπλουτισμού τόσο ποσοτικά όσο και ποιοτικά.



Σχεδιασμός πιλοτικής εφαρμογής τεχνητού εμπλουτισμού των υπόγειων νερών στο πεδινό τμήμα του Ν. Ξάνθης

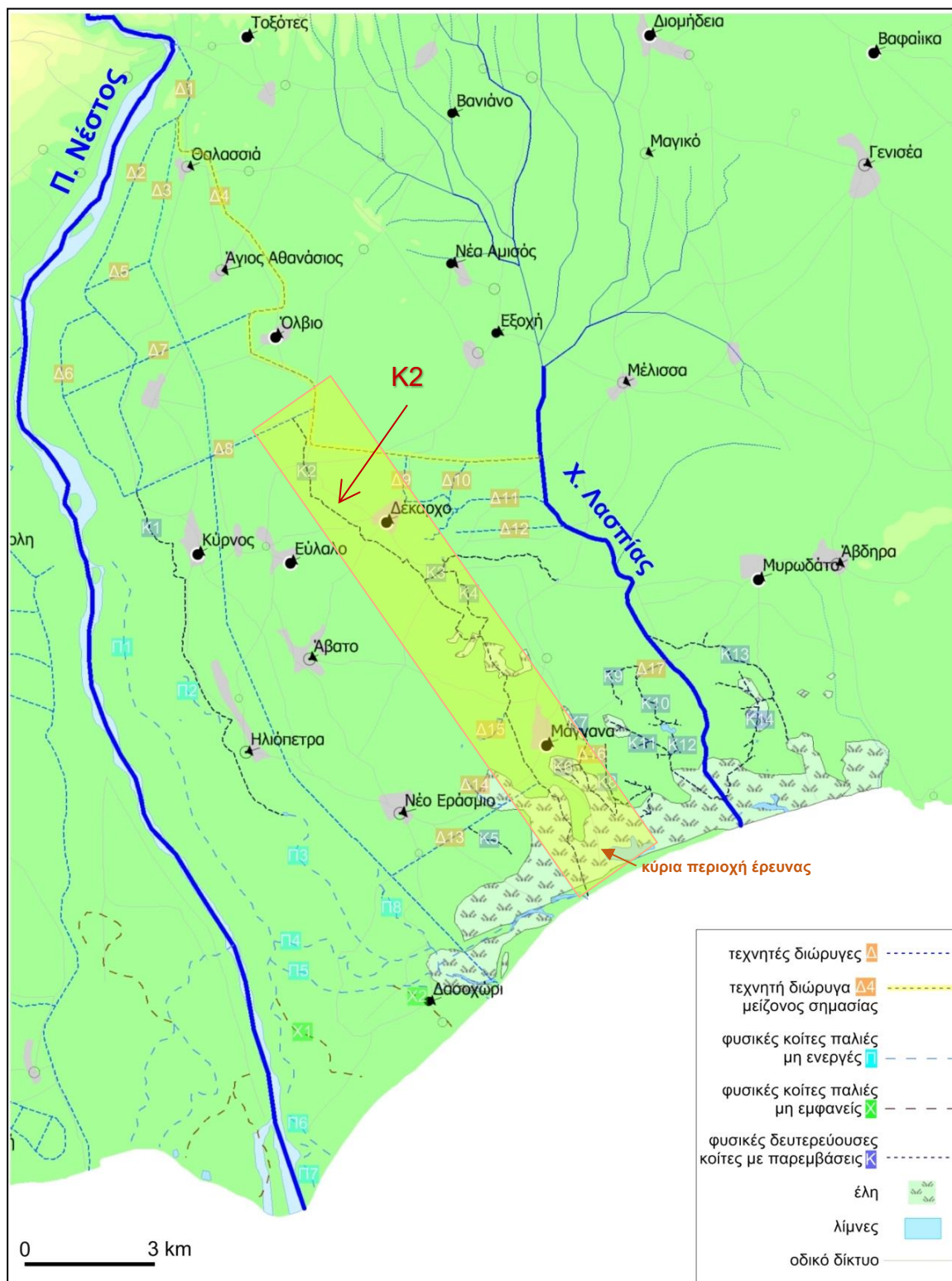
Κατά την περίοδο 2014-2015, το Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας του Τομέα Γεωτεχνικής Μηχανικής του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Δημοκριτείου Πανεπιστημίου Θράκης (Δ.Π.Θ.) εκπόνησε ερευνητικό πρόγραμμα για λογαριασμό της Περιφέρειας Ανατολικής Μακεδονίας-Θράκης, Π.Ε. Ξάνθης, με θέμα: "Μελέτη διευθέτησης αρδευτικού, στραγγιστικού δικτύου άξονα Δεκάρχου, Αβάτου, Μαγγάνων για διευκόλυνση αρδευτικών, στραγγιστικών και αναγκών εμπλουτισμού". Σκοπός της έρευνας ήταν η διερεύνηση της διευθέτησης του στραγγιστικού - αρδευτικού αγωγού Δεκάρχου - Μαγγάνων - παραλίας Ν. Ξάνθης Κ2 (σχ. 11.27) για την αποτελεσματικότερη κάλυψη των αρδευτικών και στραγγιστικών αναγκών της περιοχής Δεκάρχου - Μαγγάνων με στόχο τη βέλτιστη εκμετάλλευση και χρήση διαθέσιμων ποσοτήτων νερού από τον Ποταμό Νέστο (Πλιάκας κ.ά., 2015). Η έρευνα κατέληξε σε τελικές προτάσεις διευθέτησης του προαναφερόμενου κεντρικού αγωγού με όλα τα πιθανά και απαραίτητα έργα, με στόχο τη βέλτιστη λειτουργία του αγωγού, που θα αποσκοπεί στη μεταφορά όσο το δυνατόν μεγαλύτερων ποσοτήτων νερού από τον Ποταμό Νέστο.

Στο πλαίσιο του σχεδιασμού ενδεικτικών έργων τεχνητού εμπλουτισμού στη συγκεκριμένη περιοχή, επιλέχθηκε η θέση ΤΕ, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 11.28. Η θέση βρίσκεται δυτικά του οικισμού Δάφνη, σε απόσταση περίπου 680 m, δίπλα στην κοίτη Κ2. Η επιλογή της βασίστηκε στα εξής κριτήρια:

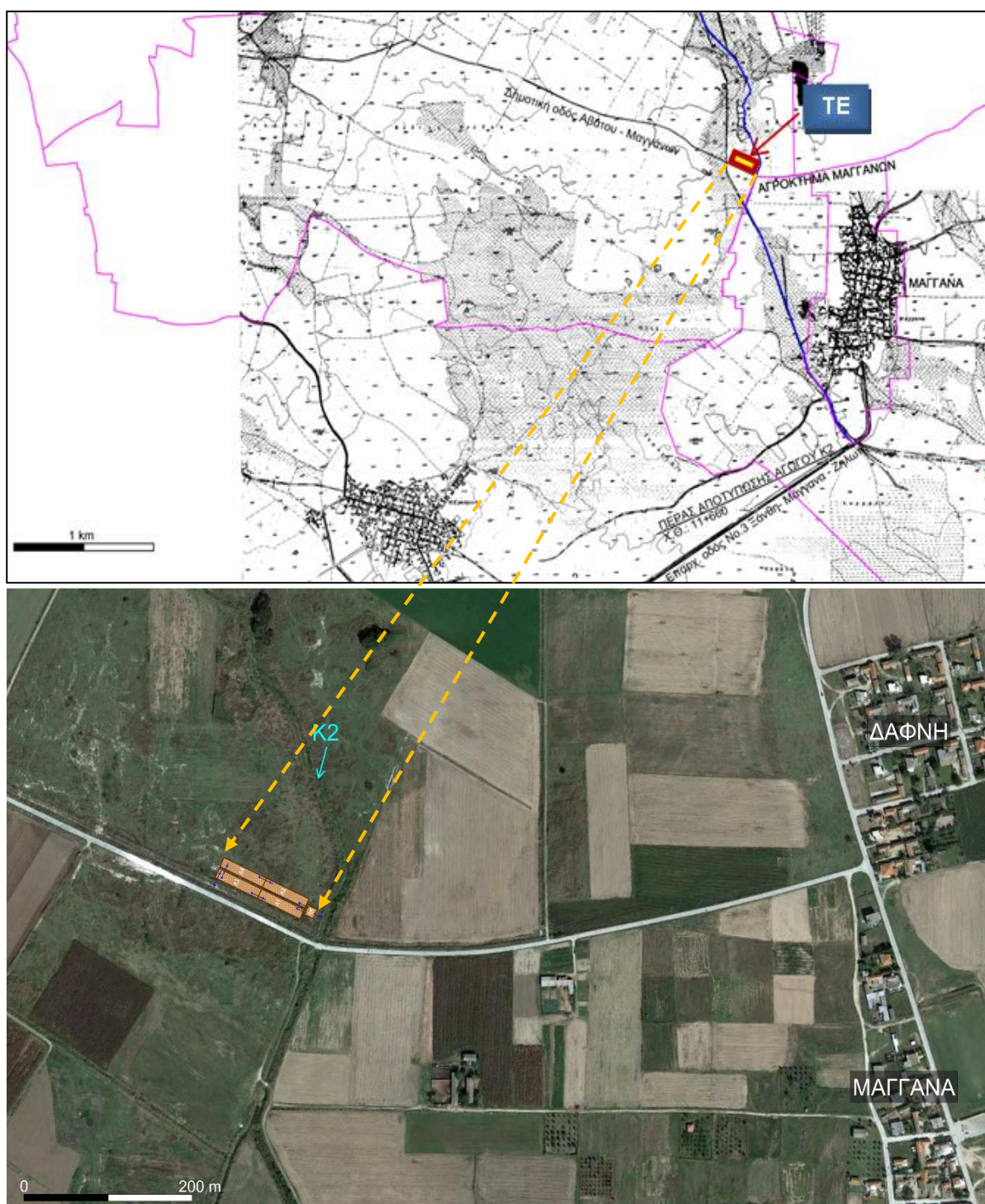
- η τοποθεσία είναι άγονη, οπότε φαίνεται ότι δεν προκύπτουν ζητήματα ιδιοκτησιών και απαλλοτρίωσης,
- κάτω από το έργο, αναπτύσσεται υδροφορέας με διαβάθμιση υλικού κατάλληλου για την εφαρμογή εμπλουτισμού με εναλλαγές χαλικοαμμωδών και αμμωδών στρώσεων με παρεμβαλλόμενες αργιλικές ενστρώσεις (σχ. 11.29),
- η θέση του έργου βρίσκεται επάνω σε έναν άξονα υπόγειας τροφοδοσίας-εμπλουτισμού, όπως διαφαίνεται σε σχετικούς πιεζομετρικούς χάρτες που έχουν σχεδιαστεί στο πλαίσιο υδρογεωλογικής έρευνας στην ευρύτερη περιοχή έρευνας, γεγονός το οποίο συμβάλλει θετικά στην αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης διαδικασίας εμπλουτισμού,
- η θέση του έργου βρίσκεται σε άμεση γεινίαση με την κοίτη Κ2, από την οποία θα διατίθεται το νερό εμπλουτισμού,
- η θέση του έργου βρίσκεται, επίσης, σε άμεση γεινίαση με μια μικρή κοίτη-τάφρο, που εκτείνεται παράλληλα και αμέσως παράπλευρα με τη δημοτική οδό, που συνδέει το Άβατο με τη Δάφνη και τα Μάγγανα, οπότε:
  - η πρόσβαση στο έργο είναι εύκολη
  - η κοίτη-τάφρος προσφέρεται για την τελική διάθεση του νερού εμπλουτισμού, που μπορεί πιθανά να πλεονάζει μετά την όλη διαδικασία κατάκλισης του νερού στο προτεινόμενο σύστημα των λεκανών.

Η διακύμανση των τιμών των υδραυλικών παραμέτρων του υπόγειου υδροφόρου συστήματος της ευρύτερης περιοχής έρευνας, όπως έχουν μετρηθεί, υπολογισθεί και εκτιμηθεί από προηγούμενες σχετικές έρευνες στο ανατολικό Δέλτα του Ποταμού Νέστου (Σακκάς κ.ά., 1998, Ρλιάκας et al., 2001), διακρίνεται ως ακολούθως:

- ο συντελεστής μεταβιβασιμότητας (Τ) παρουσιάζει ένα ευρύ φάσμα τιμών από  $4,0 \times 10^{-4}$  έως  $1,1 \times 10^{-2}$  m<sup>2</sup>/sec,
- 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 ευρύτερης περιοχής) και κατά τόπους ημιελεύθερα υδροφόρα στρώματα,
- το επιφανειακό εδαφικό τμήμα, βάθους μέχρι περίπου τα 85 cm, παρουσιάζει τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας (Κ) της τάξης του  $10^{-5}$  έως  $10^{-7}$  m/sec (μέτρια έως μικρή περατότητα), ενώ στα βαθύτερα στρώματα, μέχρι τα 4,6 m, η υδραυλική αγωγιμότητα (Κ) είναι της τάξης του  $10^{-4}$  m/sec (μέτρια έως μεγάλη περατότητα).



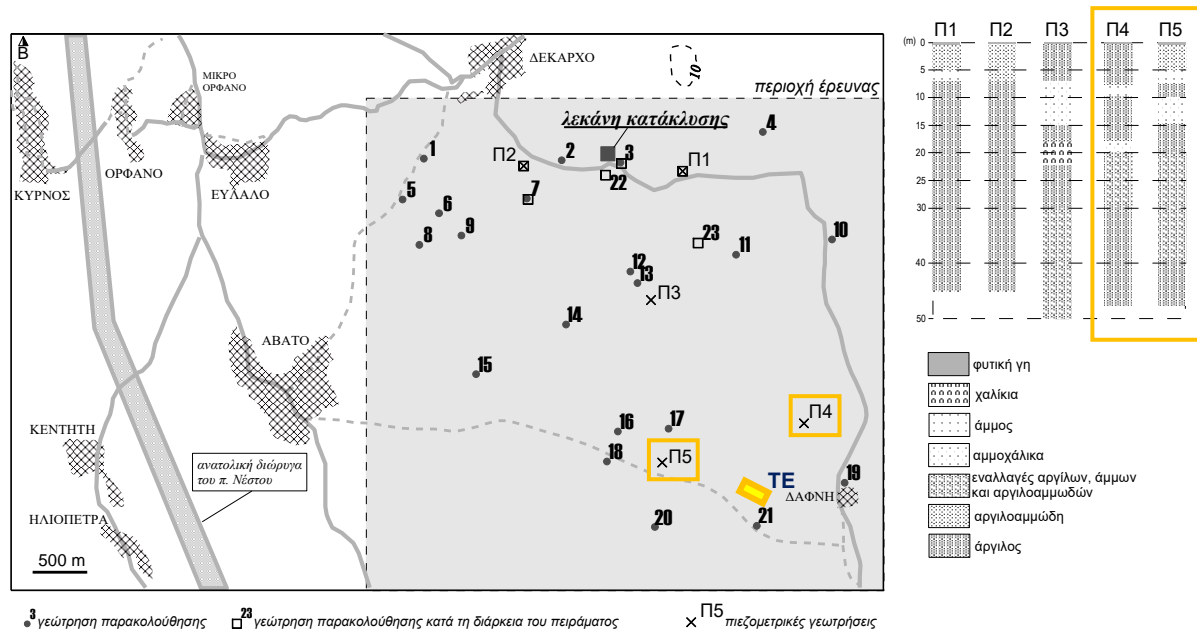
Σχήμα 11.27. Διάκριση κοιτών της ευρύτερης περιοχής έρευνας (Πλιάκας κ. ά., 2014) και κύρια περιοχή έρευνας (Πλιάκας κ.ά., 2015).



Σχήμα 11.28. Θέση της πιλοτικής εφαρμογής τεχνητού εμπλουτισμού (υπόβαθρο: Google Earth 2015) (Πλιάκας κ.ά., 2015).

Στα σχήματα 11.30 και 11.31, παρουσιάζονται τα στοιχεία σχεδιασμού της προτεινόμενης πιλοτικής εφαρμογής τεχνητού, όπου προτείνεται ένα έργο που θα περιλαμβάνει ένα σύστημα λεκανών κατάκλισης με νερό προερχόμενο από την παρακείμενη κοίτη Κ2 μετά από μικρή επέμβαση κατασκευής μικρού τεχνικού έργου μερικής εκτροπής στην κοίτη. Επισημαίνεται ότι το ύψωμα εμπλουτισμού θα πρέπει να διατηρείται υψομετρικά συνεχώς κάτω από τον

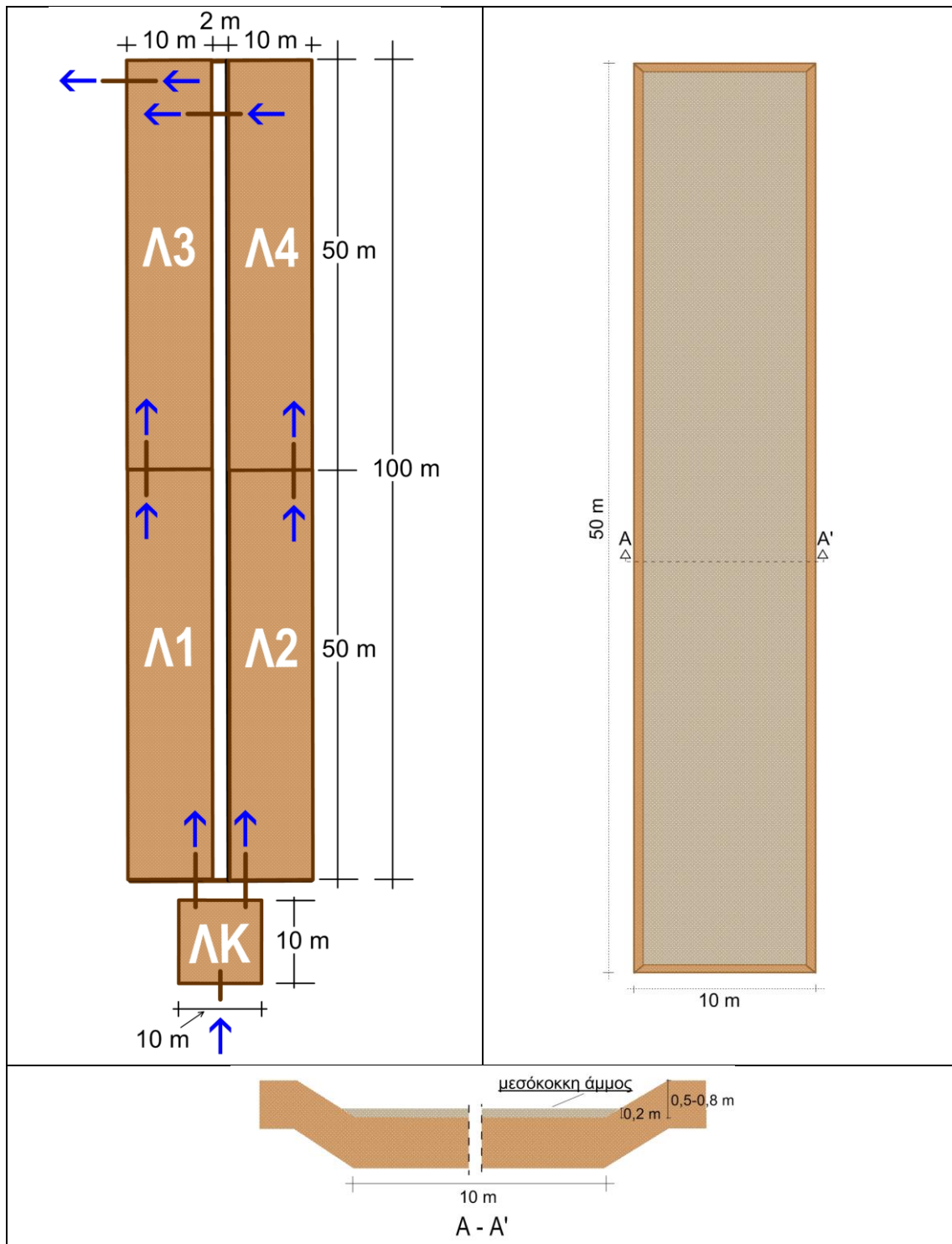
πυθμένα των λεκανών διήθησης για να αποφευχθούν μειώσεις στο ρυθμό διήθησης (11.31). Μια διαμήκης και στενή λεκάνη εμπλουτισμού ή μια σειρά από λεκάνες παράγουν χαμηλότερα υβώματα από ό,τι οι τετράγωνες ή κυκλικές λεκάνες με το ίδιο εμβαδόν και υδραυλικά φορτία. Τέλος, προτιμώνται οι ρηχές λεκάνες εμπλουτισμού με βάθος νερού περίπου 0,5 m ή λιγότερο παρά οι πιο βαθιές λεκάνες.



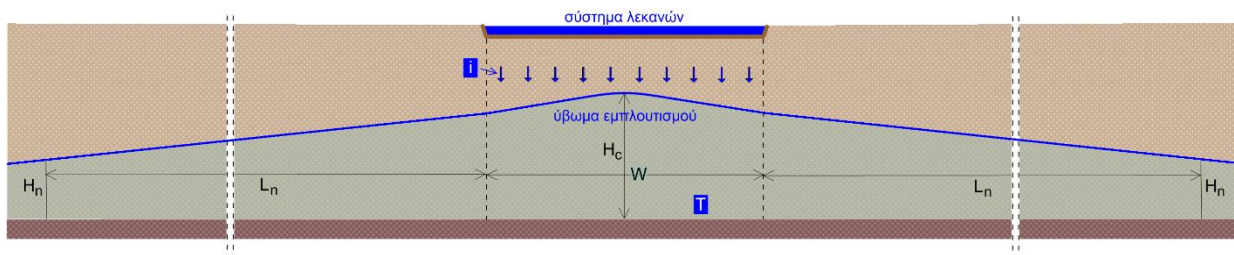
Σχήμα 11.29. Θέσεις πιεζομετρικών-ερευνητικών γεωτρήσεων, που έγιναν στο πλαίσιο προηγούμενης σχετικής μελέτης στο ανατολικό Δέλτα του Ποταμού Νέστου (Σακκάς κ.ά., 1998). Σημειώνονται οι πιεζομετρικές γεωτρήσεις Π4 και Π5, που ενδιαφέρουν την παρούσα έρευνα (ΤΕ: η θέση του προτεινόμενου πιλοτικού έργου εμπλουτισμού) (Πλιάκας κ.ά., 2015).

Με βάση τα προηγούμενα, παρατίθενται οι ακόλουθες εκτιμήσεις των σχετικών παραμέτρων:

- Συντελεστής μεταβιβαστικότητα:  $T = Kb = 4 \times 10^{-4} \div 1,1 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{sec} = 35,46 \div 950 \text{ m}^2/\text{d} \rightarrow T_{\text{mean}} = 500 \text{ m}^2/\text{d}$
- Πάχος υπόγειου υδροφόρου συστήματος:  $b \sim 40 \text{ m}$
- Συντελεστής Υδραυλικής Αγωγιμότητας:  $K = T/b = 12,5 \text{ m}/\text{d} = 1,45 \times 10^{-4} \text{ m}/\text{sec}$  (η μέση περατότητα (K) του υδροφορέα χαρακτηρίζεται μέτρια προς μικρή)
- Παροχή εμπλουτισμού  $Q = 5 \text{ L}/\text{sec} = 18 \text{ m}^3/\text{h} = 432 \text{ m}^3/\text{d}$  (από επί τόπου εκτίμηση, η ροή νερού στην K2 στη θέση του προτεινόμενου έργου στις αρχές Νοεμβρίου 2015, εκτιμήθηκε σε περίπου 5 L/sec)



Σχήμα 11.30. Επάνω αριστερά: ενδεικτικό σκαρίφημα διάταξης και διαστάσεων των λεκανών εμπλουτισμού (Λ) και της λεκάνης καθίζησης (ΛΚ). Επάνω δεξιά και κάτω: κάτοψη και τομή Α - Α' προτεινόμενης λεκάνης εμπλουτισμού (Γλιάκας κ.ά., 2015).



Σχήμα 11.31. Τομή με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και τους σχετικούς συμβολισμούς του υβώματος του υπόγειου νερού κάτω από το προτεινόμενο σύστημα λεκανών εμπλουτισμού πλάτους  $W$ .  $H_n$ : αρχικό υδραυλικό φορτίο,  $H_c$ : υδραυλικό φορτίο υβώματος,  $H_c - H_n$ : ανύψωση του υβώματος εμπλουτισμού,  $i$ : ρυθμός διήθησης,  $T$ : συντελεστής μεταβιβασιμότητας,  $L_n$ : έκταση υβώματος εμπλουτισμού (απόσταση επιρροής από τον εμπλουτισμό) (Πλιάκας κ.ά., 2015).

Το συγκεκριμένο πιλοτικό έργο εμπλουτισμού προτείνεται να περιλαμβάνει (σχ. 11.28, 11.30):

- Τη διαμόρφωση στεγανής δεξαμενής καθαρών (καθίζησης), που θα δέχεται τη ροή από την κοίτη και η οποία με κατάλληλη υδραυλική μελέτη θα πρέπει να διαστασιοποιηθεί (διαστάσεις πυθμένα, βάθος και χωρητικότητα).
- Την εκσκαφή για τη διαμόρφωση 2 συστημάτων ρηχών λεκανών κατάκλισης-εμπλουτισμού (ή διήθησης), με 2 λεκάνες το καθένα και με προτεινόμενες ενδεικτικά διαστάσεις η κάθε μια: επιφάνειας  $10 \text{ m} \times 50 \text{ m}$ , βάθους  $0,80 \text{ m} - 1 \text{ m}$ , ώστε να επιτυγχάνεται ελεγχόμενα κατάκλιση νερού με βάθος το πολύ  $20 \text{ cm} - 30 \text{ cm}$  (για να αποφεύγεται όσο το δυνατόν η γρήγορη εμφάνιση του προβλήματος της απόφραξης των εδαφικών πόρων του πυθμένα των λεκανών - clogging). Κάθε σύστημα λεκανών καλύπτει έκταση  $1000 \text{ m}^2$  και μπορούν να χρησιμοποιούνται εναλλάξ στο πλαίσιο των απαιτούμενων εναλλαγών χρήσης αποξήρανσης – διάβρεξης (wetting - drying cycles) σε χρονική βάση κάποιων ημερών για την αντιμετώπιση του προβλήματος της απόφραξης των πόρων του πυθμένα, αλλά και των πρηνών των εκσκαφών (clogging). Συνεπώς, ο όγκος εκσκαφών μόνο για τα συστήματα αυτά, υπολογίζεται περίπου σε περίπου  $1000 \text{ m}^3 \times 2$  συστήματα =  $2000 \text{ m}^3$ , χωρίς να συμπεριλαμβάνεται η στεγανή λεκάνη δεξαμενής καθαρών.
- Επίστρωση του πυθμένα των λεκανών με χαλίκι ή μεσόκοκκη άμμο ( $0,10 \text{ cm} - 0,20 \text{ cm}$ ).
- Την τοποθέτηση αγωγών για τη διοχέτευση του νερού από τη δεξαμενή στις λεκάνες, όπως και των αγωγών που θα συνδέουν τις λεκάνες μεταξύ τους και της τελικής διάθεσης του πιθανού πλεονάζοντος νερού εμπλουτισμού στην παρακείμενη μικρή κοίτη-τάφρο μετά την όλη διαδικασία κατάκλισης του νερού στο προτεινόμενο σύστημα των λεκανών.
- Την παρακολούθηση της αποτελεσματικότητας της διαδικασίας του εμπλουτισμού, με τη μέτρηση και τη σχετική ανάλυση της στάθμης σε γεωτρήσεις παρακολούθησης, που βρίσκονται κατόπιν του έργου και προς τη διεύθυνση ροής του υπόγειου νερού, όπως διαφαίνεται σε σχετικούς πιεζομετρικούς χάρτες που έχουν σχεδιαστεί στο πλαίσιο υδρογεωλογικής έρευνας στην ευρύτερη περιοχή έρευνας.

Με βάση τον λόγο  $L/W = 5$  (μήκος συστήματος προς εύρος συστήματος, δηλαδή  $100 \text{ m} / 20 \text{ m} = 5$ ), για να υπολογισθεί η έκταση του υβώματος εμπλουτισμού κατά τη διεύθυνση του εύρους  $W$ , όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 11.31, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η εξίσωση (8.22) (§8.4, σελ. 99). Ακολουθούν τα σχετικά στοιχεία, που υπεισέρχονται στη διαδικασία εφαρμογής της εξίσωσης (σχ. 11.31):

- Τελική ανύψωση του υβώματος του υπόγειου νερού κάτω από το κέντρο του συστήματος εμπλουτισμού:  $H_c - H_n = 2 \text{ m}$  (τιμή που εκτιμήθηκε με βάση τις σχετικές μετρήσεις στάθμης του υπόγειου νερού σε γειτονικές γεωτρήσεις παρακολούθησης)

- Μέσος ρυθμός διήθησης:  $i = \frac{432(\text{ m}^3 / \text{d})}{20 \times 100(\text{ m}^2)} = 0,216 \text{ m/d}$
- Εξίσωση (8.22):  $H_c - H_n = \frac{iW}{2T} \left( \frac{W}{4} + L_n \right) \rightarrow L_n = \frac{2T(H_c - H_n)}{iW} - \frac{W}{4}$  (11.1)
- $W = 20 \text{ m}$
- Εξ (11.1)  $\rightarrow L_n = 457,96 \sim 460 \text{ m}$  (έκταση - πλάτος του υβώματος εμπλουτισμού ή αλλιώς απόσταση επιρροής από την εφαρμογή του εμπλουτισμού από την περίμετρο του συστήματος των λεκανών).

Στο πλαίσιο της συμβολής στη σύνταξη ενός φακέλου Μελέτης Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων (ΜΠΕ) αναφορικά με τη διαχείριση του εμπλουτισμού υδροφορέων της περιοχής έρευνας, παρατίθενται οι ακόλουθες επισημάνσεις και προτεινόμενες ενέργειες:

1. Προκαταρκτική υπόδειξη από τις αρμόδιες υπηρεσίες, της κατηγορίας στην οποία κατατάσσονται οι προτεινόμενες επεμβάσεις βάσει της κατάταξης έργων και δραστηριοτήτων, σύμφωνα με την Υ.Α. 1958/12, (ΦΕΚ 21/Β/13-1-12) "Κατάταξη δημοσίων και ιδιωτικών έργων και δραστηριοτήτων σε κατηγορίες και υποκατηγορίες σύμφωνα με το άρθρο 1 παράγραφος 4 του Ν. 4014/21-09-11 (ΦΕΚ 209/Α/2011)". Συγκεκριμένα, οι προτεινόμενες επεμβάσεις τεχνητού εμπλουτισμού (ΤΕ) υπάγονται στην Ομάδα 2η: Υδραυλικά Έργα, και μπορούν να υπαχθούν στις κατηγορίες:
  - Παράρτημα ΙΙ, α/α: 1 (φράγματα και αναβαθμοί εντός κοίτης υδατορεμάτων κάθε είδους και χρήσης – εδώ: εκτροπή - Κατηγορία: Α2 ή Β) και
  - Παράρτημα ΙΙ, α/α: 12 (έργα τεχνητού εμπλουτισμού των υπόγειων νερών - Κατηγορία: Α2 ή Β).
2. Προσδιορισμός των περιβαλλοντικών επιπτώσεων σύμφωνα με τη Στρατηγική Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων (ΣΜΠΕ) του πρώην Υπουργείου Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής – ΥΠΕΚΑ, στο πλαίσιο της κατάρτισης σχεδίων διαχείρισης των Υδατικών Διαμερισμάτων (ΥΔ) Ανατολικής Μακεδονίας και Θράκης (ΥΠΕΚΑ, 2013). Συγκεκριμένα, οι προτεινόμενες επεμβάσεις υπάγονται στις παραγράφους:
  - "7.3.6. Μέτρα για τον έλεγχο τεχνητού εμπλουτισμού των υπόγειων υδροφορέων, συμπεριλαμβανομένης και της σχετικής αδειοδότησης: (i) Διερεύνηση των συνθηκών εφαρμογής τεχνητού εμπλουτισμού υπόγειων υδροφόρων συστημάτων ως μέσο ποσοτικής ενίσχυσης και ποιοτικής προστασίας των ΥΥΣ, (ii) Κατάρτιση εγχειριδίου τεχνικών προδιαγραφών εφαρμογής μεθόδων επαναχρησιμοποίησης".
  - "7.3.18. Τεχνητός εμπλουτισμός υδροφορέων: Εφαρμογή Τεχνητού Εμπλουτισμού ΥΥΣ Δέλτα Νέστου – GR1200060".
3. Εξετάζοντας την προτεινόμενη περιοχή τεχνητού εμπλουτισμού κάτω από το πρίσμα όλων των ενδεχόμενων επιπτώσεων στο περιβάλλον από την κατασκευή και τη λειτουργία των έργων εμπλουτισμού και με βάση την τεχνογνωσία και την εμπειρία του Εργαστηρίου Τεχνικής Γεωλογίας του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών Δ.Π.Θ. σε ανάλογες έρευνες στην Αν. Μακεδονία και Θράκη (Πλιάκας κ.ά., 1999, Pliakas et al., 2003), μπορούν να διατυπωθούν οι ακόλουθες επισημάνσεις:
  - Οι επιπτώσεις στο περιβάλλον από την κατασκευή αυτών των έργων μπορούν να διακριθούν σε επιπτώσεις: i) από τις εκσκαφές (τραυματισμός) του εδάφους για την κατασκευή των λεκανών που θα δέχονται το νερό εμπλουτισμού, ii) από τη διάθεση των υλικών εκσκαφής και iii) από τους προκαλούμενους θορύβους κατά την κατασκευή. Οι εκσκαφές θα πραγματοποιηθούν σε άγονες εκτάσεις χωρίς να επεκταθούν σε περιοχές πέραν των λεκανών. Το σύνολο των εκσκαφών δεν αναμένεται να δημιουργήσει οποιοδήποτε πρόβλημα αισθητικό ή ασφάλειας των κατοίκων με την προϋπόθεση να τηρηθούν οι προδιαγραφές που προβλέπονται για

ανάλογες εγκαταστάσεις εμπλουτισμού (ASCE, 1987) (μέτρα για την αποφυγή ατυχημάτων, όπως περίφραξη των λεκανών, πρόβλεψη για την αντιμετώπιση προβλημάτων που θα δημιουργήσει η ενδεχόμενη ανάπτυξη διαφόρων οργανισμών όπως κουνούπια, ποντίκια κ.α., καθώς επίσης και μυρωδιών από τα άλγη που μπορεί να αναπτυχθούν στις λεκάνες). Οι εκσκαφές θα γίνουν σε χαλαρά υλικά χωρίς ιδιαίτερη δυσκολία. Θα χρησιμοποιηθούν ένας εκσκαφέας και ένας φορτωτής. Οι εκσκαφές είναι πολύ μικρής κλίμακας. Επίσης, η πιθανή ρύπανση από τα χρησιμοποιούμενα μηχανήματα είναι η συνηθισμένη ρύπανση από ανάλογα μικρά σκαπτικά μηχανήματα και μπετονιέρες.

- Με την κατασκευή και λειτουργία των έργων δεν συντελείται καμιά αλλαγή στις χρήσεις γης μέσα στην περίμετρο της κάθε κοινοτικής έκτασης.
- Τόσο η κατασκευή του όλου έργου, όσο και η λειτουργία του δεν δημιουργεί καμιά δυσμενή επίδραση στο οικοσύστημα των περιοχών των έργων, όσο και των ευρύτερων περιοχών. Μέσα στην περίμετρο των λεκανών δεν υπάρχουν βιότοποι, υγρότοποι και δασικές εκτάσεις.
- Μετά την ολοκλήρωση του έργου, δεν προβλέπεται μείωση των εκτάσεων καλλιέργειας, ούτε αλλαγή στην ποικιλία των αρδευόμενων καλλιεργειών. Απλά θα παρέχεται η δυνατότητα διάθεσης αρκετής ποσότητας και καλής ποιότητας νερού, αλλά και η εξασφάλιση της δυνατότητας αναδιάρθρωσης των καλλιεργειών στο πλαίσιο άλλων μελλοντικών σχεδίων.
- Μετά την κατασκευή του έργου, οι ποσότητες των λιπαντικών μονάδων και των φυτοφαρμάκων, που θα χρησιμοποιηθούν, θα παραμείνουν στα σχετικά ίδια σημερινά μη επιβαρυντικά για το περιβάλλον επίπεδα, αφού δεν πρόκειται να αλλάξουν οι καλλιέργειες.
- Τα προτεινόμενα έργα δεν προβλέπεται να προκαλέσουν σημαντική επίδραση στα υπάρχοντα συστήματα συγκοινωνίας ή μεταβολές στους σημερινούς τρόπους κυκλοφορίας ή κίνησης ανθρώπων και αγαθών.
- Τα έργα εκτιμάται ότι δεν μπορούν να συντελέσουν στην ανάγκη για σημαντικές αλλαγές σε τομείς κοινής ωφέλειας (ηλεκτρισμός, συστήματα επικοινωνιών, ύδρευση, βόθροι, στερεά απόβλητα και διάθεσή τους των κοινοτήτων της περιοχής).
- Τα έργα εμπλουτισμού δεν θα έχουν επίπτωση στην περιοχή έρευνας σε σχέση με την παρουσία τοπίων εξαιρετικής αισθητικής, περιοχών φυσικού κάλλους, αρχαιολογικών χώρων, παραδοσιακών οικισμών ή εγκαταστάσεων αναψυχής, αφού η περιοχή των έργων δεν φιλοξενεί κάποια από τα προηγούμενα.
- Εκτός από το πρακτικό μέρος της ευεργετικής από υδρογεωλογική άποψη εφαρμογής του εμπλουτισμού στην περιοχή, η λειτουργία των έργων εμπλουτισμού αποκτά και άλλες διαστάσεις, αφού οι λεκάνες μπορούν μελλοντικά και με κατάλληλη διαμόρφωση να χρησιμοποιούνται και ως χώροι αναψυχής.

#### Κλιματική αλλαγή και υπόγειοι υδατικοί πόροι στο πεδινό τμήμα του Ν. Ξάνθης

Το 2011 διεξήχθη έρευνα από το Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Δ.Π.Θ., που αφορά στη μελέτη μιας πρώτης προσέγγισης στο ζήτημα της συσχέτισης των τιμών βροχόπτωσης και των τιμών στάθμης του υπόγειου νερού (ΥΝ) των υπόγειων υδροφόρων συστημάτων τριών περιοχών έρευνας του πεδινού τμήματος του Ν. Ξάνθης. Οι περιοχές αυτές διακρίνονται στις ακόλουθες (σχ. 11.32):

- Περιοχή 1: Δυτικό τμήμα - Περιοχή μεταξύ Π. Νέστου και Χ. Λασπία - Ανατολικό τμήμα του Δέλτα του ποταμού Νέστου.



- Περιοχή 2: Ανατολικό τμήμα - Περιοχή μεταξύ Χ. Λασπία και Λ. Βιστωνίδας - Περιοχή Βαφέικων του Νομού Ξάνθης.
- Περιοχή 3: Ανατολικό τμήμα - Περιοχή Πολυσίτου του Νομού Ξάνθης.



Σχήμα 11.32. Ο Νομός Ξάνθης, οι περιοχές έρευνας: 1. περιοχή έρευνας στο ανατολικό τμήμα του Δέλτα του ποταμού Νέστου, 2. περιοχή έρευνας στα Βαφέικα, 3. περιοχή έρευνας στον Πολύσιτο, και οι θέσεις των σταθμηγράφων: ΣΤ1: σταθμηγράφος Αβάτου, ΣΤ2: σταθμηγράφος Βαφέικων, ΣΤ3: σταθμηγράφος Νέας Κεσσάνης (Δαμιανίδης κ.ά., 2012).

Με βάση τα υδρολογικά και υδρογεωλογικά δεδομένα των προηγούμενων κεφαλαίων σχεδιάστηκαν ενιαία διαγράμματα μεταβολής μηνιαίων τιμών βροχοπτώσης (από το βροχομετρικό σταθμό Γενισιάς)-κυλιόμενου μέσου όρου και τιμών του υψομέτρου στάθμης του υπόγειου νερού, όπως κατεγράφη σε κάθε σταθμηγράφο από τους τρεις που χρησιμοποιήθηκαν στην έρευνα, αντίστοιχα, για διάφορες χρονικές περιόδους (σχ. 11.33-11.37). Οι σταθμηγράφοι αυτοί είναι οι ακόλουθοι (σχ. 11.32):

- ΣΤ1: σταθμηγράφος Αβάτου,
- ΣΤ2: σταθμηγράφος Βαφέικων,
- ΣΤ3: σταθμηγράφος Νέας Κεσσάνης

Εξετάζεται καταρχάς η πορεία μεταβολής των τιμών της στάθμης του υπόγειου νερού, όπως παρουσιάζεται στα διαγράμματα σε τιμές υψομέτρου κατά την περίοδο 1989-2010 (22 ετών). Επιλέχθηκαν ως μήνες μελέτης κυρίως οι μήνες Φεβρουάριος, Μάρτιος και Απρίλιος, περίοδος λίγο πριν την έναρξη της αρδευτικής περιόδου, όπου κύριος και καθοριστικός παράγοντας του υπόγειου υδατικού ισοζυγίου αποτελεί ο φυσικός εμπλουτισμός, που συντελείται με τη διαδικασία της κατείσδυσης μέσω των βροχοπτώσεων.

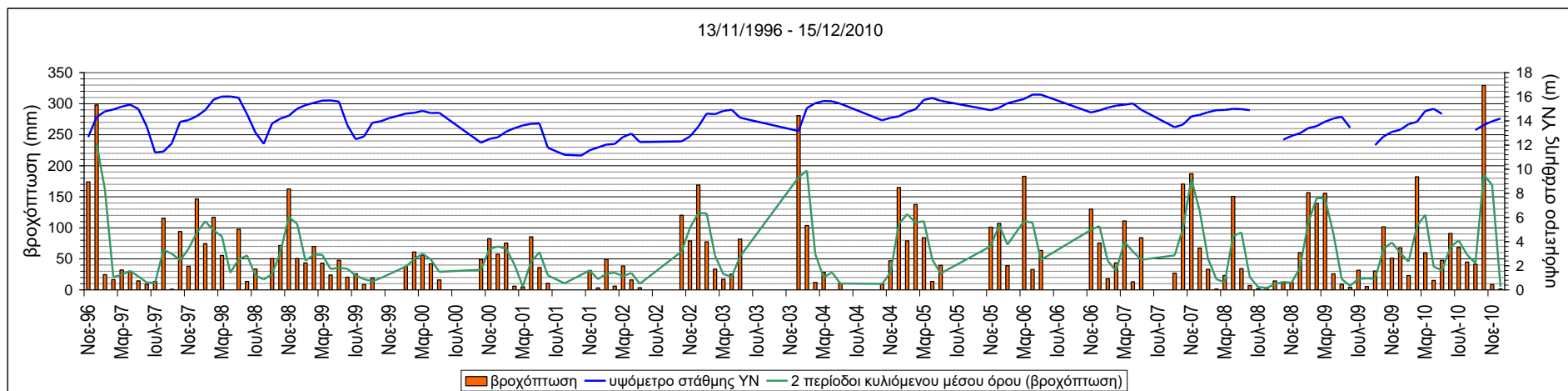
Επικεντρώνοντας στην ανάλυση των διαγραμμάτων που έχουν σχεδιαστεί με βάση τα δεδομένα του σταθμηγράφου της Ν. Κεσσάνης, με τη μεγαλύτερη χρονική βάση, 1989-2010, διακρίνονται 3 χρονικές περιόδους Π1, Π2, Π3 σχετικά αυξημένων τιμών διακύμανσης του υψομέτρου της στάθμης του υπόγειου νερού (Δαμιανίδης, κ.ά., 2012):

- Π1 περίοδος, κατά τα έτη 2005-2010, με τιμές μεγαλύτερες των 9,0 m περίπου
- Π2 περίοδος, κατά τα έτη 1998-2000, με τιμές μεγαλύτερες των 7,0 m περίπου και με μια διαφορά περίπου 2 m από την 1<sup>η</sup> περίοδο
- Π3 περίοδος, κατά τα έτη 1991-1992, με τιμές μεγαλύτερες των 6-6,5 m περίπου και με μια διαφορά περίπου 0,5-1 m από την 1<sup>η</sup> περίοδο

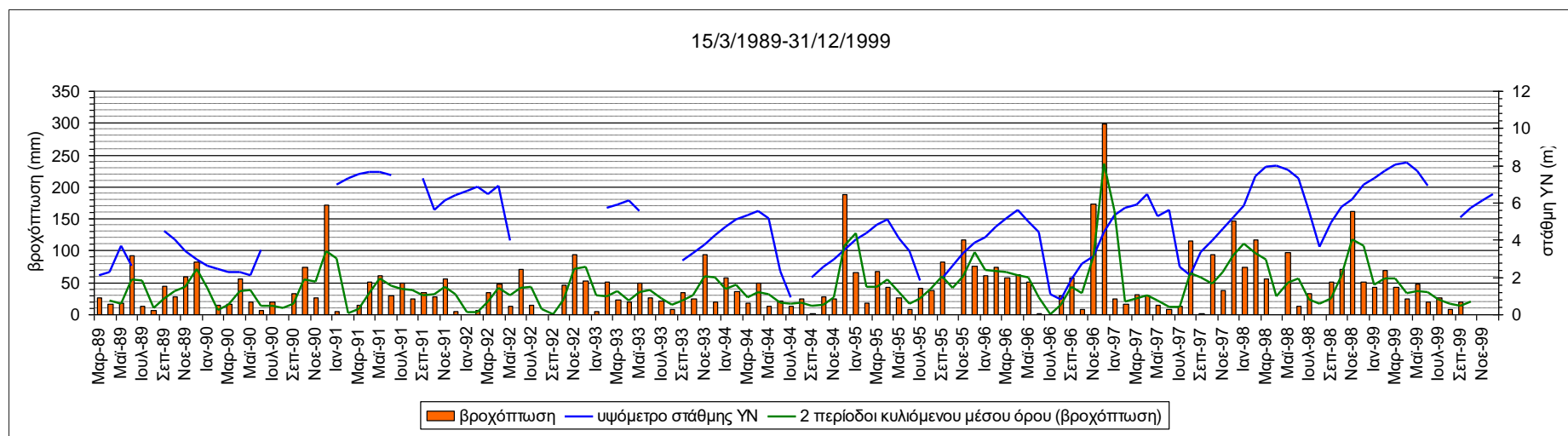
Στη συνέχεια παρουσιάζεται μια σχετική προσέγγιση στην ανάλυση βροχομετρικών δεδομένων των προηγούμενων διαγραμμάτων κατά την περίοδο 1989-2010 (22 ετών), με μέση μηνιαία τιμή βροχόπτωσης 50,5 mm και μέση ετήσια τιμή βροχόπτωσης 628,7 mm, όπου διακρίνονται 6 χρονικές περιόδους Α, Β, Γ, Δ, Ε, Ζ με βάση τις τιμές του κυλιόμενου μέσου όρου (ΚΜ).

Συνδυάζοντας τα στοιχεία προκύπτει μια πρώτη εκτίμηση για την πιθανή επιρροή των βροχοπτώσεων στη διακύμανση της στάθμης του υπόγειου νερού στις περιοχές έρευνας, αφού και οι τρεις περιοχές παρουσιάζουν σχετικά ίδια γεωμορφολογικά, γεωλογικά και υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά, όπως έχει αναπτυχθεί στα προηγούμενα κεφάλαια. Γενικά παρατηρείται ότι σημαντικό τμήμα της διακύμανσης στάθμης φαίνεται να οφείλεται στις μεταβολές του φυσικού εμπλουτισμού των υπόγειων νερών της περιοχής εξαιτίας των αυξημένων τιμών βροχόπτωσης των αντίστοιχων χρονικών περιόδων. Ειδικότερα διαφαίνεται ότι (Δαμιανίδης, κ.ά., 2012):

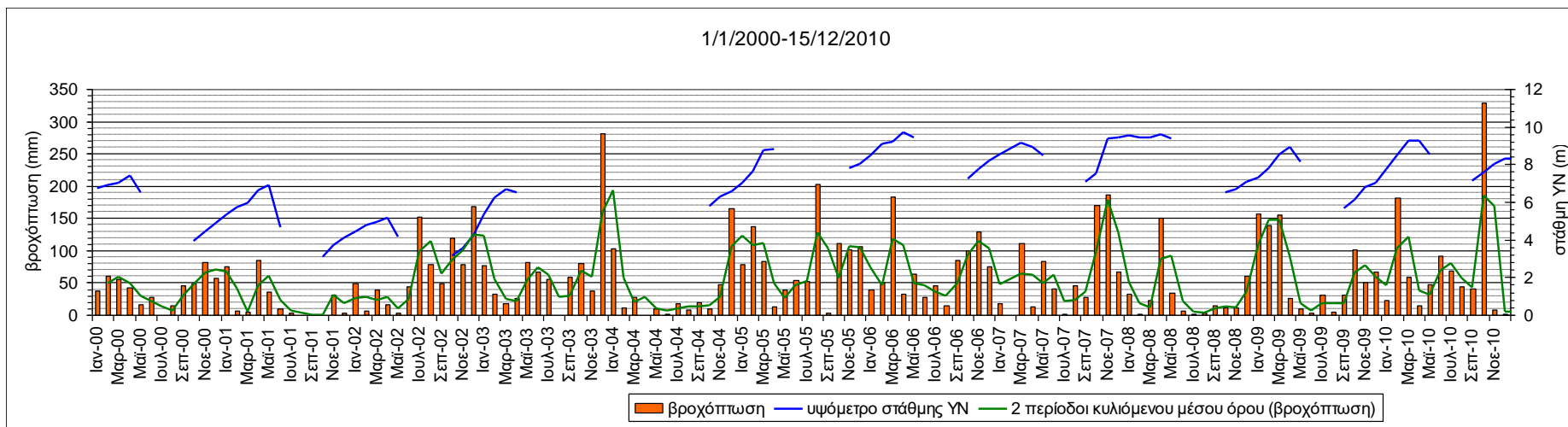
- ✓ η Π1 περίοδος υψηλών τιμών διακύμανσης στάθμης του ΥΝ να εμφανίζεται κατά τη διάρκεια της περιόδου Α, από το 2005 και μετά, καταδεικνύοντας ήδη μια αυξητική πορεία από την έναρξη της περιόδου Α,
- ✓ η Π2 περίοδος υψηλών τιμών διακύμανσης στάθμης του ΥΝ να εμφανίζεται κατά τη διάρκεια της περιόδου Γ, από το 2008 και μετά,
- ✓ η Π3 περίοδος υψηλών τιμών διακύμανσης στάθμης του ΥΝ να εμφανίζεται κατά τη διάρκεια της περιόδου Ε, από το 2001 και μετά.



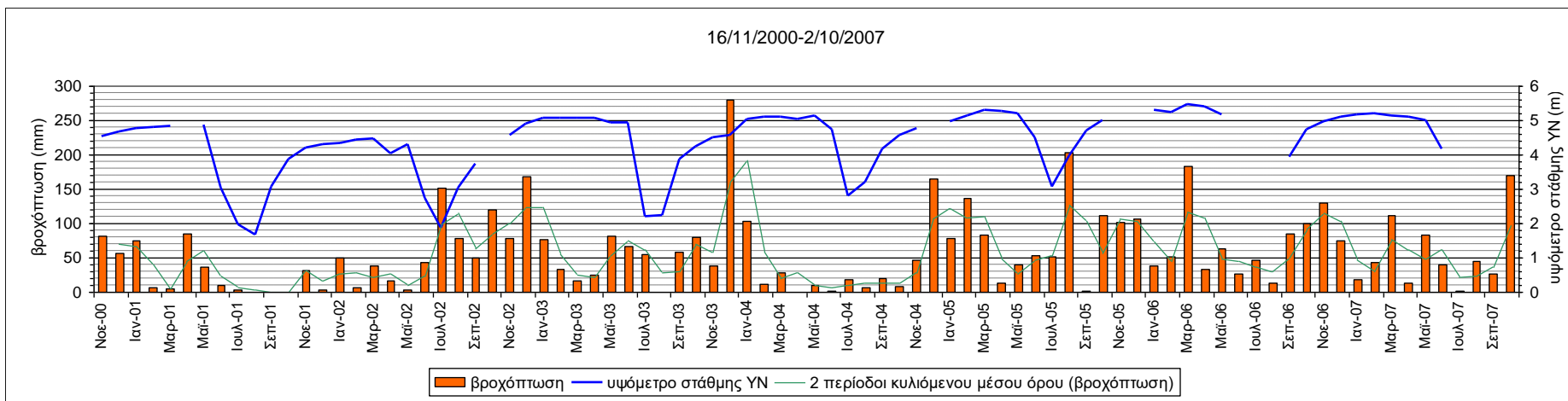
Σχήμα 11.33. Ενιαίο διάγραμμα μεταβολής μηνιαίων τιμών βροχόπτωσης (από βροχομετρικό σταθμό Γενισιάς)-κυλιόμενου μέσου όρου και τιμών του υψομέτρου στάθμης του υπόγειου νερού (από σταθμηγράφο Βαφέικων), περίοδος: 13/11/1996–15/12/2010 (υψόμετρο θέσης: 19,5 m) (Δαμιανίδης, κ.ά., 2012).



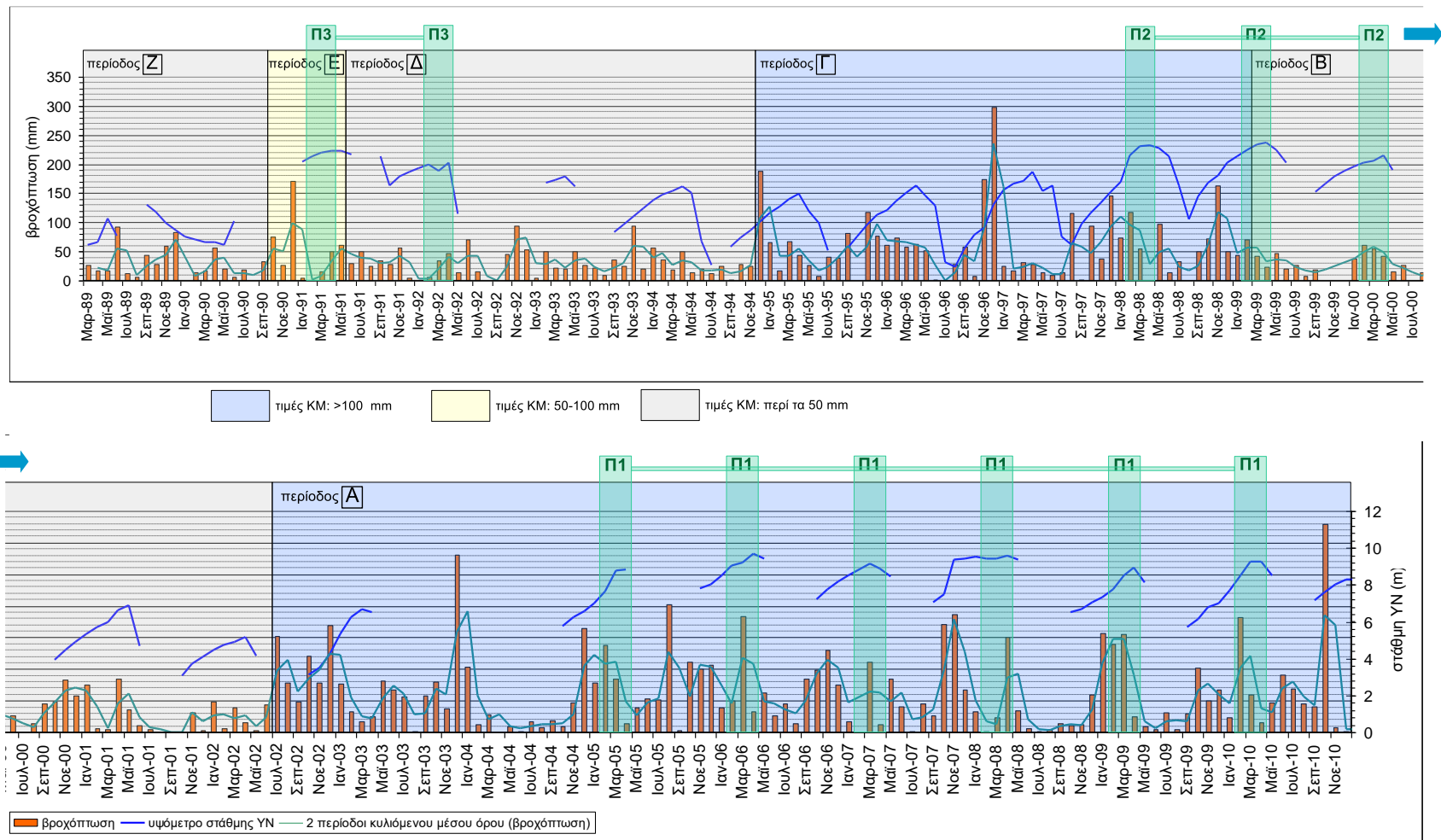
Σχήμα 11.34. Ενιαίο διάγραμμα μεταβολής μηνιαίων τιμών βροχόπτωσης (από βροχομετρικό σταθμό Γενισιάς)-κυλιόμενου μέσου όρου και τιμών του υψομέτρου στάθμης του υπόγειου νερού (από σταθμηγράφο Ν. Κεσσάνης), περίοδος: 15/3/1989–31/12/1999 (υψόμετρο θέσης: 10,0 m) (Δαμιανίδης, κ.ά., 2012).



Σχήμα 11.35. Ενιαίο διάγραμμα μεταβολής μηνιαίων τιμών βροχόπτωσης (από βροχομετρικό σταθμό Γενισέας)-κυλιόμενου μέσου όρου και τιμών του υψομέτρου στάθμης του υπόγειου νερού (από σταθμηγράφο Ν. Κεσσάνης), περίοδος: 1/1/2000–15/12/2010 (υψόμετρο θέσης: 10,0 m) (Δαμιανίδης, κ.ά., 2012).



Σχήμα 11.36. Ενιαίο διάγραμμα μεταβολής μηνιαίων τιμών βροχόπτωσης (από βροχομετρικό σταθμό Γενισέας)-κυλιόμενου μέσου όρου και τιμών του υψομέτρου στάθμης του υπόγειου νερού (από σταθμηγράφο Αβάτου), περίοδος: 16/11/2000–2/10/2007 (υψόμετρο θέσης: 8,6 m) (Δαμιανίδης, κ.ά., 2012).



Σχήμα 11.37. Ενιαίο διάγραμμα μεταβολής μηνιαίων τιμών βροχόπτωσης (από βροχομετρικό σταθμό Γενισιάς)-κυλιόμενου μέσου όρου και τιμών του υψόμετρου στάθμης του υπόγειου νερού (καταγραφή από σταθμηγράφο Ν. Κεσσάνης) για την περίοδο 15/3/1989–15/12/2010 (υψόμετρο θέσης: 10,0 m). Διάκριση χρονικών περιόδων Α, Β, Γ, Δ, Ε, Ζ, Π1, Π2, Π3 και χρωματική διαβάθμιση με βάση τις τιμές του κυλιόμενου μέσου όρου (ΚΜ) (Δαμιανίδης, κ.ά., 2012).

### **11.3. Σύνοψη ερευνητικών εργασιών στο πλαίσιο προγραμματισμού, σχεδιασμού ή/και λειτουργίας έργων τεχνητού εμπλουτισμού**

Με βάση την ανάλογη εμπειρία του Εργαστηρίου Τεχνικής Γεωλογίας του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Δ.Π.Θ., τόσο σε επιστημονική κατάρτιση και ενημέρωση σε θέματα διαχείρισης εμπλουτισμού υδροφόρων (management of aquifer recharge, MAR), όσο και τη σχετική εμπειρία από ανάλογες έρευνες σχεδιασμού και εφαρμογής τεχνητού εμπλουτισμού υπόγειων νερών σε περιοχές της Αν. Μακεδονίας και Θράκης, αλλά και λαμβάνοντας σοβαρά υπόψη τις σχετικές συστάσεις, προτάσεις, οδηγίες και προδιαγραφές επιστημονικών οργανώσεων, επιτροπών και υπηρεσιών στο διεθνή χώρο (ASCE, 1987, 2001, U.S. EPA, 1992, U.S. National Research Council, 1994) παρατίθενται κάποιες απαραίτητες ερευνητικές εργασίες στο πλαίσιο του προγραμματισμού, σχεδιασμού και ενδεχόμενης λειτουργίας (σε πειραματικό στάδιο ή σε μόνιμη βάση) των προτεινόμενων κατά περίπτωση έργων τεχνητού εμπλουτισμού (Τ.Ε.) σε ανάλογες έρευνες:

1. Επιστημονική τεκμηρίωση με αναφορές από τη σχετική διεθνή βιβλιογραφία, τη διεθνή εμπειρία σε συναφή θέματα, όπως και τις προδιαγραφές για ανάλογες εφαρμογές σε άλλες χώρες.

2. Υδρογεωλογική έρευνα κάθε επιμέρους περιοχής.

Αρχικές έρευνες:

- Συλλογή προηγούμενων ερευνητικών εκθέσεων
- Συλλογή σχετικών χαρτών (τοπογραφικοί, γεωλογικοί, υδρολιθολογικοί)
- Συλλογή δημογραφικών στοιχείων, χρήσεων γης
- Συλλογή στοιχείων επιφανειακής υδρολογίας και κλιματολογικών στοιχείων
- Καταγραφή συνολικού δικτύου γεωτρήσεων με GPS και καθορισμός της χρήσης (ύδρευση και άρδευση) και κατάστασής τους (παραγωγικές ή εγκαταλειμμένες)
- Συλλογή γεωλογικών και υδρογεωλογικών στοιχείων της ευρύτερης περιοχής έρευνας (εντοπισμός οριακών συνθηκών και τροφοδοσίας)
- Ανάπτυξη Γεωγραφικού Συστήματος Πληροφοριών (GIS) και σύνδεσή του με σχετική βάση δεδομένων
- Συλλογή διαφόρων πληροφοριών από ιδιοκτήτες γεωτρήσεων
- Συλλογή στοιχείων γεωτρήσεων κάθε χρήσης (γεωλογικές τομές, παροχές, περίοδος άντλησης)
- Μεταβολές ρυθμού άντλησης των υδρευτικών γεωτρήσεων που βρίσκονται εντός των ορίων της περιοχής έρευνας κατά την καλοκαιρινή περίοδο

Κύριες ερευνητικές εργασίες υπαίθρου:

- Καθορισμός δικτύου γεωτρήσεων παρακολούθησης και μέτρησης στάθμης του υπόγειου νερού
- Καθορισμός δικτύου γεωτρήσεων παρακολούθησης και δειγματοληψίας υπόγειων νερών κατά την έναρξη και το πέρας της αρδευτικής περιόδου. Χημικές αναλύσεις βασικών φυσικοχημικών παραμέτρων, βασικών ιόντων, ιχνοστοιχείων και ισοτόπων (ισότοπα υδρογόνου, οξυγόνου και βορίου) για τη διάκριση της αλμύρισης.
- Καθορισμός σημείων για τον προσδιορισμό των υδραυλικών παραμέτρων του υδροφόρου και εκτέλεση δοκιμαστικών αντλήσεων
- Καθορισμός σημείων και εκτέλεση γεωφυσικών διασκοπήσεων
- Εγκατάσταση σταθμηγράφων σε κρίσιμα σημεία (π.χ. πλησίον της ακτογραμμής, στα βορειότερα όρια της περιοχής έρευνας προς την ενδοχώρα) σε επιλεγμένα επί μέρους τμήματα των περιοχών έρευνας, για τη συνεχή καταγραφή της στάθμης των υπόγειων νερών του υδροφόρου

- Μετρήσεις παροχής επιφανειακών νερών (χειμάρροι, ρέματα) και πηγών που τροφοδοτούν την περιοχή
- Ανάλυση και επεξεργασία στοιχείων υπαίθρου:
- Επεξεργασία βροχομετρικών και κλιματολογικών στοιχείων και σύνταξη σχετικής μελέτης (υδρολογική μελέτη)
- Σχεδιασμός και ερμηνεία πιεζομετρικών χαρτών για κάθε μέτρηση στάθμης
- Σχεδιασμός και ερμηνεία χαρτών κατανομής διαφόρων ρυπαντών (κυρίως των ιόντων χλωρίου) για τον εντοπισμό της θαλάσσιας σφήνας
- Σχεδιασμός και ερμηνεία χαρτών κατανομής της υδραυλικής αγωγιμότητας βάσει των αποτελεσμάτων των δοκιμαστικών αντλήσεων
- Επεξεργασία, ανάλυση και απεικόνιση των αποτελεσμάτων των γεωφυσικών διασκοπήσεων
- Δημιουργία ολοκληρωμένης βάσης δεδομένων με την εισαγωγή του συνόλου των πρωτογενών στοιχείων υπαίθρου που συλλέχθηκαν κατά τη διάρκεια της έρευνας
- Ανάπτυξη μαθηματικού ομοιώματος ροής βάσει των υδραυλικών στοιχείων της περιοχής, μοντέλου μεταφοράς ρυπαντών (υδροχημικό μοντέλο) βάσει των υδραυλικών και των ποιοτικών στοιχείων των νερών της περιοχής έρευνας και διαχειριστικού μοντέλου για την επιστημονική τεκμηρίωση των προτάσεων σχετικά με τη διαχείριση των υδατικών πόρων των περιοχών έρευνας.

**3.** Διερεύνηση επιλογής κατάλληλων μεθόδων Τ.Ε. κατά περίπτωση στις περιοχές έρευνας.

**4.** Σε περίπτωση προτεινόμενου Τ.Ε. με την εκροή από εγκαταστάσεις βιολογικού καθαρισμού στην περιοχή, καθορισμός απαιτούμενων ποιοτικών χαρακτηριστικών εκροής ανάλογα με τη μέθοδο Τ.Ε. πριν την εφαρμογή εμπλουτισμού με βάση ανάλογη βιβλιογραφική τεκμηρίωση από τη διεθνή εμπειρία σε ανάλογες έρευνες και εφαρμογές (SS, TDS, SAR, TOC, BOD, παθογενείς μικροοργανισμοί, οργανικές ενώσεις, DBPs, βαρέα μέταλλα, θρεπτικές ουσίες, αζωτούχες ενώσεις, φωσφόρος).

**5.** Σε περίπτωση προτεινόμενου Τ.Ε. με την εκροή από εγκαταστάσεις βιολογικού καθαρισμού στην περιοχή, έλεγχος των ποιοτικών χαρακτηριστικών και του βαθμού επεξεργασίας (πρωτογενής και δευτερογενής επεξεργασία - primary and secondary treatment) της διατιθέμενης εκροής από τις συγκεκριμένες εγκαταστάσεις βιολογικού καθαρισμού των δημοτικών διαμερισμάτων και καθορισμός ενεργειών για την πιθανή περαιτέρω επεξεργασία της εκροής με σκοπό τη βελτίωσή της για να φτάσει στα επίπεδα των απαιτήσεων του σταδίου 4 (τριτογενής επεξεργασία – tertiary treatment, απολύμανση, προχωρημένη επεξεργασία – advanced treatment, με μείωση συγκεντρώσεων βαρέων μετάλλων, αζωτούχων ενώσεων, φωσφόρου, TOC, TDS).

**6.** Επιλογή κατάλληλων θέσεων για εμπλουτισμό σε πειραματικό στάδιο (πιλοτικά-πειραματικά έργα Τ.Ε.) λαμβάνοντας υπόψη καταρχήν τα απαραίτητα στοιχεία από την υδρογεωλογική μελέτη και με πρώτη επιλογή αυτήν των λεκανών κατάκλυσης (συστήματα SAT) σε πεδινές περιοχές (off-channel systems) ή/και σε κοίτες χειμάρρων (in-channel systems). Εκεί όπου δεν είναι εφικτή η κατασκευή λεκανών (αδιαπέρατο επιφανειακό εδαφικό υλικό, αδυναμία διάθεσης κατάλληλων εκτάσεων, παρουσία στρώσεων στην ακόρεστη ζώνη πολύ μικρής υδραυλικής αγωγιμότητας, Κ περιοριστικών για τη ροή διήθησης του υπόγειου νερού, πιθανή απόπλυση στην ακόρεστη ζώνη ανεπιθύμητων φυσικών ή συνθετικών χημικών ουσιών, παρουσία σε μικρό βάθος υπό πίεση υποκείμενων υδροφόρων) θα επιλεγεί η λύση των γεωτρήσεων εμπλουτισμού είτε με την ανόρυξη νέων γεωτρήσεων με βάση τις προδιαγραφές της ανόρυξης γεωτρήσεων εμπλουτισμού (injection wells) ή με τη διευθέτηση γεωτρήσεων άντλησης που ήδη υπάρχουν.

**7.** Ερευνητικές εργασίες στις επιλεγείσες θέσεις των πιλοτικών έργων εμπλουτισμού που πρέπει να καλύπτουν διεθνώς αποδεκτές προδιαγραφές και κριτήρια σχεδιασμού και λειτουργίας ανάλογων έργων:

- ☑ στις γεωτρήσεις εμπλουτισμού:
  - σωστή διασωλήνωση και τοποθέτηση φίλτρων στα κατάλληλα βάθη,
  - προχωρημένη επεξεργασία νερού εμπλουτισμού - AWT (advanced wastewater treatment),
  - έλεγχος παροχής νερού,
  - περιοδικές αντλήσεις,
  - μελέτη των δεικτών φίλτρου μεμβράνης MFI, αφομοιώσιμου οργανικού άνθρακα AOC και παράλληλου φίλτρου PFI,
  - πιθανή ανάγκη ανάμιξης με νερό υψηλότερου TDS πριν τον εμπλουτισμό,
  - εντοπισμός παραγόντων που μπορούν να συντελέσουν στη δημιουργία απόφραξης των εδαφικών πόρων (clogging) (αιωρούμενα στερεά, TOC, θρεπτικές ουσίες, άλγη, κλπ),
  - έλεγχος θερμοκρασίας νερού εμπλουτισμού,
  - μελέτη των υδραυλικών χαρακτηριστικών του υδροφόρου όπως προέκυψαν από την υδρογεωλογική έρευνα,
  - εγκατάσταση πιεζομέτρων κοντά στη λεκάνη και παρακολούθηση της πορείας διακύμανσης της στάθμης του υπόγειου νερού κατά τη διάρκεια του πειράματος εφαρμογής T.E.
- ☑ στις λεκάνες κατάκλισης:
  - καθορισμός κατάλληλου βάθους νερού στη λεκάνη και διερεύνηση των εδαφικών χαρακτηριστικών των υλικών πυθμένα και τοιχωμάτων της λεκάνης,
  - εκτίμηση του βάθους της στάθμης του υβώματος εμπλουτισμού κάτω από τη λεκάνη,
  - διερεύνηση της μορφολογίας της εδαφικής επιφάνειας (θα πρέπει η κλίση < 5 %),
  - διερεύνηση καταλληλότητας εδαφικού υλικού υποκείμενης ακόρεστης ζώνης (φυσικές, χημικές και βιολογικές ιδιότητες του εδαφικού υλικού, κοκκομετρική σύσταση, περατότητα, παρουσία αργίλου, σιδήρου ή αδιαπέρατης στρώσης από οξείδια σιδήρου ή ανθρακικού ασβεστίου (hardpan), βάθος ακόρεστης ζώνης, σύσταση πιθανού οργανικού υλικού και χαρακτηριστικά συμπύκνωσης),
  - μελέτη της υποκείμενης διαστρωμάτωσης στην ακόρεστη ζώνη με έμφαση στον εντοπισμό πιθανών περιοριστικών στρώσεων (πολύ μικρής υδραυλικής αγωγιμότητας K) για την κατακόρυφη ροή του διηθούμενου νερού,
  - εντοπισμός πιθανού κρεμάμενου υπόγειου νερού (perched groundwater) εξαιτίας παρεμβαλλόμενων περιοριστικών στρώσεων πολύ μικρής K,
  - εντοπισμός παραγόντων που μπορούν να συντελέσουν στη δημιουργία απόφραξης των εδαφικών πόρων (clogging) (αιωρούμενα στερεά, TOC, θρεπτικές ουσίες, άλγη, κλπ),
  - μέριμνα για την αποφυγή ζωνών ρυπασμένων ή παρουσίας χημικών ουσιών που μπορούν να υποστούν έκπλυση,
  - μελέτη των υδραυλικών χαρακτηριστικών του υδροφόρου όπως προέκυψαν από την υδρογεωλογική έρευνα,
  - υπολογισμός in situ της υδραυλικής αγωγιμότητας K στην ακόρεστη ζώνη,
  - εγκατάσταση πιεζομέτρων κοντά στη λεκάνη και παρακολούθηση της πορείας διακύμανσης της στάθμης του υπόγειου νερού κατά τη διάρκεια του πειράματος εφαρμογής T.E.,
  - υπολογισμός των υδραυλικών στοιχείων του υβώματος εμπλουτισμού κάτω και γύρω από τη λεκάνη με αναλυτικές σχέσεις,
  - υπολογισμός ικανότητας κατείδυσης της διηθούμενης εκροής (infiltration capacity) και του ρυθμού κατείδυσης (infiltration rate).

**8.** Καθορισμός ενεργειών για την αντιμετώπιση ενδεχόμενης απόφραξης των εδαφικών πόρων (clogging), που μπορεί να προκληθεί από φυσικές, χημικές, βιολογικές ή τεχνικές διεργασίες, κυρίως στον πυθμένα της λεκάνης ή στα τοιχώματά της και στα τοιχώματα της γεώτρησης εμπλουτισμού, όπως στις λεκάνες εμπλουτισμού με:



- λεκάνες καθίζησης πριν τον εμπλουτισμό με τη βοήθεια πηκτικών οργανικών πολυμερών,
- φράγματα ελέγχου της ροής σε χειμάρρους,
- περιοδική ξήρανση και απομάκρυνση των υλικών απόφραξης, στο τέλος μιας ξηρής περιόδου, μηχανικά με εκσκαφείς, αποξέστες ή χειρονακτικά,
- απομάκρυνση του αζώτου, του φωσφόρου και του οργανικού άνθρακα από το νερό εμπλουτισμού,
- απολύμανση με χλώριο ή άλλα απολυμαντικά,

και στις γεωτρήσεις, με:

- με φίλτρα άμμου ή μεμβράνης,
- με συχνή άντληση και περιοδική ανάπτυξη εκ νέου,
- με απομάκρυνση του αζώτου, του φωσφόρου και του οργανικού άνθρακα από το νερό εμπλουτισμού (σε εμπλουτισμό με επεξεργασμένα υγρά απόβλητα),
- με απολύμανση με χλώριο ή άλλα απολυμαντικά.

**9.** Κατασκευή των πιλοτικών έργων εμπλουτισμού και διεξαγωγή του πειράματος εμπλουτισμού για χρονικό διάστημα που θα καθοριστεί κατά περίπτωση και ανάλογα με την εξέλιξη του πειράματος και των διαφόρων προβλημάτων που μπορεί να προκύψουν. Εκτίμηση της αποτελεσματικότητας (effectiveness of groundwater artificial recharge) του πιλοτικού σχεδίου και με ενδεχόμενη διερεύνηση της διαδρομής της εμπλουτιζόμενης ροής με τη χρήση κατάλληλων ιχνηθετών (π.χ. ισοτόπων),

**10.** Σε περίπτωση προτεινόμενου Τ.Ε. με την εκροή από εγκαταστάσεις βιολογικού καθαρισμού στην περιοχή, καθορισμός δικτύου γεωτρήσεων παρακολούθησης (monitoring wells) (από το ήδη υπάρχον δίκτυο γεωτρήσεων παρακολούθησης της πορείας της υφαλμύρισης στην περιοχή) της ποιότητας του ανακτημένου αντλούμενου νερού (με κατάλληλες χημικές και μικροβιολογικές αναλύσεις) και εκτίμηση της αποτελεσματικότητας του εμπλουτισμού με σύγκριση των χαρακτηριστικών ποιότητας της εκροής, του ανακτημένου νερού, του αντλούμενου νερού πριν την εφαρμογή Τ.Ε. (από στοιχεία της προηγούμενης υδρογεωλογικής έρευνας) και της διεθνούς εμπειρίας σε ανάλογες περιπτώσεις (σύνταξη ανάλογων πινάκων και σχεδιασμός χαρτών εξέλιξης διαφόρων κρίσιμων χημικών στοιχείων και παραμέτρων για την πορεία της υφαλμύρισης, κυρίως Cl<sup>-</sup>, Na<sup>+</sup>, EC).

**11.** Σε περίπτωση προτεινόμενου Τ.Ε. με την εκροή από εγκαταστάσεις βιολογικού καθαρισμού στην περιοχή, διερεύνηση της αναγκαιότητας και της δυνατότητας (μετά από σχετική ποιοτική διερεύνηση) ανάμιξης καθαρού επιφανειακού ή και υπόγειου νερού με την εκροή που εμπλουτίζεται .

**12.** Σε περίπτωση προτεινόμενου Τ.Ε. με την εκροή από εγκαταστάσεις βιολογικού καθαρισμού στην περιοχή, καθορισμός επιπρόσθετων χρήσεων του ανακτημένου νερού (αγροτική άρδευση, αστικές ανάγκες – δημόσιες τουαλέτες, πυροπροστασία, χώροι ανάπλασης και αναψυχής, μη πόσιμες ανάγκες ή και για πόση) και διερεύνηση της δυνατότητας χρήσης του κατά περίπτωση με βάση σχετικές οδηγίες και κριτήρια που ισχύουν σε ανάλογες περιπτώσεις στο διεθνή χώρο.

**13.** Διερεύνηση διατύπωσης πρότασης επέκτασης των πιλοτικών έργων εμπλουτισμού και με βάση τα αποτελέσματα της διερεύνησης της παραγράφου 3 (σύστημα πολλαπλών λεκανών κατάκλυσης, συνδυασμός διαφόρων μεθόδων εμπλουτισμού in-channel και off-channel, συστοιχία γεωτρήσεων εμπλουτισμού ή/και γεωτρήσεων άντλησης κατάντη, κλπ) και πρόταση σχεδιασμού μόνιμων εγκαταστάσεων εμπλουτισμού.

**14.** Μελέτη εκτίμησης του κόστους κατασκευής προτεινόμενων εγκαταστάσεων εμπλουτισμού.

**15.** Διερεύνηση πιθανών περιβαλλοντικών επιπτώσεων στην ευρύτερη περιοχή (οικοσυστήματα κατάντη των έργων Τ.Ε., απώλειες λόγω εξατμισοδιαπνοής, κατάργηση καλλιεργειών, ενίσχυση της βασικής ροής μέσω πηγών, αποφυγή ή μείωση πιθανών καθιζήσεων, ενεργειακά οφέλη από τις αντλήσεις, τρωτότητα υπόγειων τεχνικών έργων, συμπτωματικός εμπλουτισμός με απόπλυση ανθρωπογενών ρυπαντών μέσω της ακόρεστης ζώνης, πιθανές επιπτώσεις σε γειτονικά επιφανειακά υδάτινα σώματα, κλπ).

**16.** Καθορισμός μέτρων προστασίας των έργων πειραματικού εμπλουτισμού και προτεινόμενων εγκαταστάσεων Τ.Ε. (προβλήματα ανεξέλεγκτης ροής και πιθανών διαφυγών νερού, δυσοσμίας, ζιζανίων, τρωκτικών και εντόμων, ανεξέλεγκτη είσοδος και αποφυγή ατυχημάτων, απροσδόκητη ρύπανση του νερού εμπλουτισμού, κλπ).

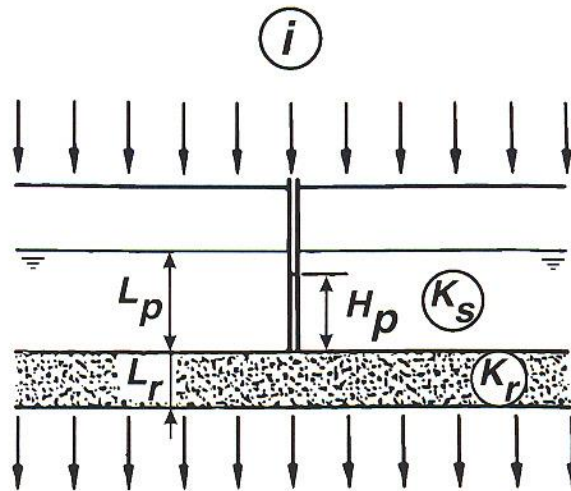
**17.** Διερεύνηση πιθανών προβλημάτων αποδοχής από το κοινό των διαφόρων προτεινόμενων μεθόδων Τ.Ε., χρήσεων του ανανεωμένου νερού (σε περίπτωση προτεινόμενου Τ.Ε. με την εκροή από εγκαταστάσεις βιολογικού καθαρισμού στην περιοχή) και προσπάθεια ανάληψης πρωτοβουλιών για σχετικές διαβουλεύσεις.

## 12. ΑΣΚΗΣΕΙΣ

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

### Άσκηση 1

Ο μέσος ετήσιος ρυθμός εμπλουτισμού σε μια περιοχή όπου εφαρμόζεται επιφανειακός τεχνητός εμπλουτισμός, έκτασης  $25 \text{ km}^2$ , είναι  $10 \text{ m/έτος}$ . Μετά από σχετική υδρογεωλογική έρευνα εντοπίστηκε σε βάθος μια παρεμβαλλόμενη στρώση πάχους  $3 \text{ m}$ , με υδραυλική αγωγιμότητα  $K=7,9 \times 10^{-3} \text{ m/ημέρα}$ . Εάν η υδραυλική αγωγιμότητα της εδαφικής στρώσης που υπέρκειται της παρεμβαλλόμενης στρώσης, είναι  $1,7 \text{ m/ημέρα}$ , να υπολογίσετε το ύψος (πάχος) του κρεμάμενου υβώματος του υπόγειου νερού από τον εμπλουτισμό, που έχει δημιουργηθεί πάνω από την παρεμβαλλόμενη στρώση.



Γεωμετρικά χαρακτηριστικά και σχετικοί συμβολισμοί σε σύστημα διήθησης με κρεμάμενο υπόγειο νερό (perched groundwater) πάνω από παρεμβαλλόμενη στρώση με υδραυλική αγωγιμότητα  $K$ .

$$V_i = 10 \text{ m/έτος} = 2,74 \times 10^{-2} \text{ m/ημέρα}$$

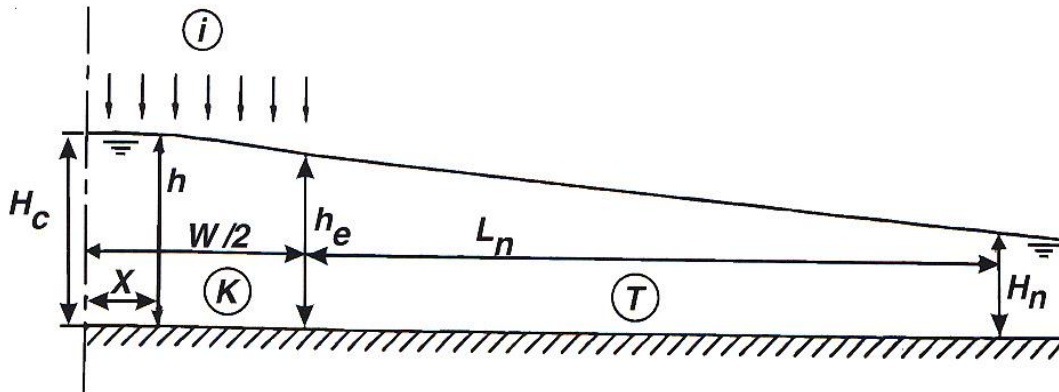
$$K_s = 1,7 \text{ m/ημέρα}, K_r = 7,9 \times 10^{-3} \text{ m/ημέρα}, L_r = 3,0 \text{ m}$$

$$\text{εξ. (8.19)} \Rightarrow L_p = L_r \frac{\frac{V_i}{K_r} - 1}{1 - \frac{V_i}{K_s}} = 3,0 \times \frac{\frac{2,74 \times 10^{-2}}{7,9 \times 10^{-3}} - 1}{1 - \frac{2,74 \times 10^{-2}}{1,7}} = 3,0 \times \frac{2,47}{0,98} = 7,56 \text{ m}$$

Θα πρέπει  $V_i > K_r$ , αλλιώς  $L_p$ : αρνητικό (-)  $\Rightarrow$  πρακτικά μηδέν!

## Άσκηση 2

Στο πλαίσιο της διερεύνησης εφαρμογής τεχνητού εμπλουτισμού σε μια περιοχή, προτείνεται η κατασκευή λεκάνης εμπλουτισμού (κατάκλυσης) διαστάσεων  $300 \text{ m} \times 2500 \text{ m}$ . Ο μέσος ετήσιος ρυθμός εμπλουτισμού εκτιμάται σε  $63 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{έτος}$ . Μετά από σχετικές υδρογεωλογικές έρευνες που αφορούσαν τον ελεύθερο υδροφόρο της περιοχής, προέκυψε ότι το βάθος του υδροφόρου είναι  $46 \text{ m}$ , το πάχος του  $20 \text{ m}$ , ενώ η μεταβιβαστικότητα  $T$  είναι  $2200 \text{ m}^2/\text{ημέρα}$ . Εάν η μέγιστη επιτρεπόμενη ανύψωση του υβώματος του υπόγειου νερού από τον εμπλουτισμό, που θα σχηματισθεί κατά την εφαρμογή του τεχνητού εμπλουτισμού, είναι  $38 \text{ m}$ , να εκτιμήσετε την απόσταση επιρροής από την εφαρμογή του εμπλουτισμού από το κέντρο της λεκάνης ή αλλιώς το πλάτος του υβώματος.



Τομή με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και τους σχετικούς συμβολισμούς υβώματος του υπόγειου νερού κάτω από επιμήκη περιοχή εμπλουτισμού πλάτους  $W$ .

Αφού  $L/W > 5$ , δηλαδή  $2500/300=8,3>5$ , τότε, μπορεί να εφαρμοστεί η εξ. (8.22)\*

$$H_c=20+38=58 \text{ m}, H_n=20 \text{ m}, i = \frac{63 \times 10^6 \text{ m}^3 / \text{έτος}}{300 \times 2500} = 84 \text{ m} / \text{έτος} = 0,23 \text{ m} / \text{ημέρα}$$

!! μέσος ρυθμός διήθησης (διά την έκταση!)

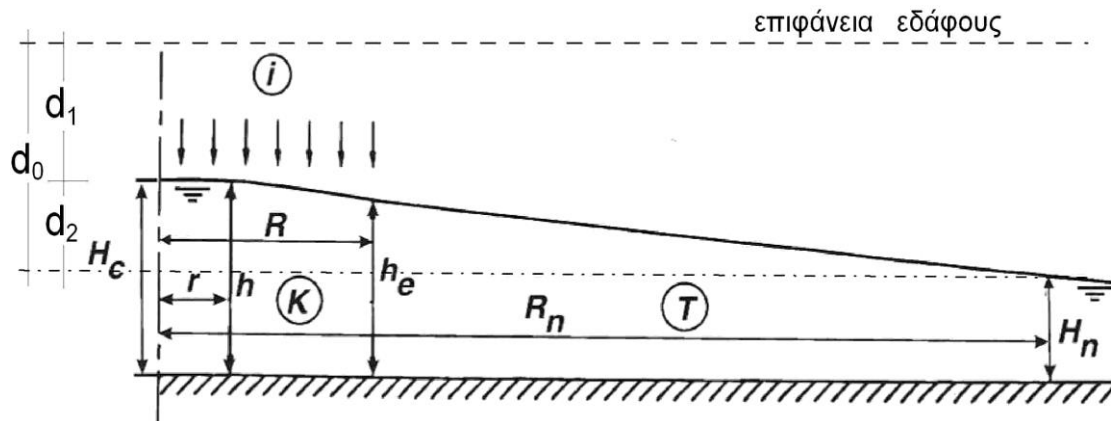
$$* H_c - H_n = \frac{iW}{2T} \left( \frac{W}{4} + L_n \right) \Rightarrow L_n + \frac{W}{4} = \frac{2T(H_c - H_n)}{iW} \Rightarrow L_n = \frac{2T(H_c - H_n)}{iW} - \frac{W}{4} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow L_n = \frac{2 \times 2200 \times (58 - 20)}{0,23 \times 300} - \frac{300}{4} = 2423,19 - 75 = 2348,19 \text{ m}$$

πλάτος υβώματος:  $W+2L_n=300+(2 \times 2348,19)=4996,38 \text{ m} \approx 5,0 \text{ km}$

### Άσκηση 3

Στο πλαίσιο εφαρμογής τεχνητού εμπλουτισμού σε μια περιοχή, μια κατάλληλα διαμορφωμένη κυκλική επιφάνεια ακτίνας 500 m, πρόκειται να κατακλυσθεί με νερό εμπλουτισμού. Το βάθος του υποκείμενου ελεύθερου υδροφόρου είναι 73 m. Εάν ο ρυθμός εμπλουτισμού εκτιμάται ότι θα κυμαίνεται στο επίπεδο των 0,14 m/ημέρα και το ύψωμα εμπλουτισμού πρέπει να διατηρείται τουλάχιστον 10 m κάτω από τον πυθμένα της λεκάνης κατάκλυσης που θα σχηματισθεί, να υπολογίσετε μέχρι ποια απόσταση από το κέντρο της λεκάνης θα εκτείνεται το ύψωμα εμπλουτισμού. Η μεταβιβασιμότητα του υδροφόρου, μετά από σχετική υδρογεωλογική μελέτη, έχει εκτιμηθεί σε 440 m<sup>2</sup>/ημέρα.



Τομή με τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και τους σχετικούς συμβολισμούς υψώματος του υπόγειου νερού κάτω από επιμήκη περιοχή εμπλουτισμού πλάτους W.

$$\begin{array}{l} d_0=73 \text{ m} \\ d_1 \text{ max}=10 \text{ m} \end{array} \quad \Leftrightarrow \quad d_2=d_0-d_1=63 \text{ m} = H_{c \text{ max}}-H_n$$

Επίσης  $i=0,14 \text{ m/ημέρα}$ ,  $R=500 \text{ m}$ ,  $T=440 \text{ m}^2/\text{ημέρα}$

(ρυθμός εμπλουτισμού)

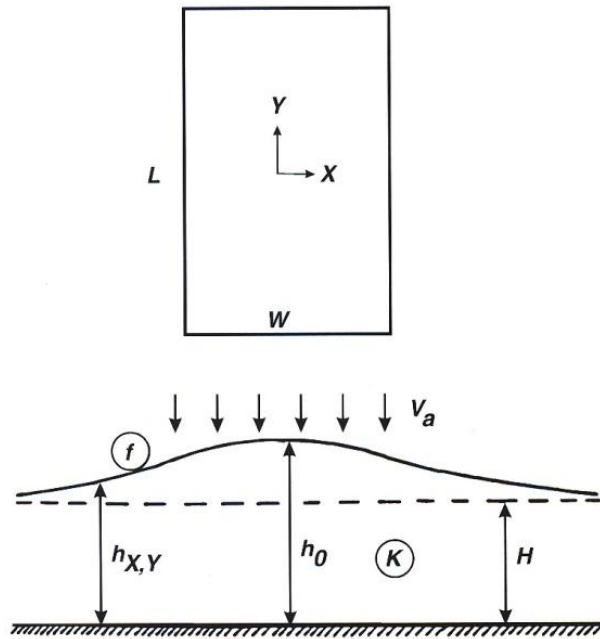
$$\text{Εξ. (8.23)} \Rightarrow H_c - H_n = \frac{iR^2}{4T} \left[ 1 + 2 \ln \frac{R_n}{R} \right] \Rightarrow \frac{R_n}{R} = \exp \left[ \frac{4T(H_c - H_n)}{iR^2} - 1 \right] \Rightarrow$$

$$\Rightarrow R_n = \exp \left[ \frac{2T(H_c - H_n)}{iR^2} - \frac{1}{2} \right] R \Rightarrow R_n = \exp \left[ \frac{880 \times 63}{0,14 \times 500^2} - 0,5 \right] \times 500 \Rightarrow R_n = 1478,24 \text{ m}$$

#### Άσκηση 4

Μια τετράγωνη λεκάνη κατάκλισης διαστάσεων 800 m × 800 m σχηματίσθηκε σε περιοχή, όπου μετά από σχετική υδρογεωλογική έρευνα για τον υποκείμενο ελεύθερο υδροφόρο, υπολογίστηκαν το πάχος του, 50 m και η μεταβιβαστικότητα 1140 m<sup>2</sup>/ημέρα, ενώ το πορώδες-fillable porosity της ακόρεστης ζώνης εκτιμήθηκε σε 0,25. Εάν ο μέσος ετήσιος ρυθμός εμπλουτισμού είναι 25×10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/έτος και η μέγιστη επιτρεπόμενη ανύψωση του υβώματος εμπλουτισμού είναι 25 m πάνω από την αρχική στάθμη του υπόγειου νερού, να υπολογίσετε:

- σε πόσο χρονικό διάστημα το ύβωμα θα φθάσει σε αυτήν τη μέγιστη στάθμη,
- τον όγκο νερού που μπορεί να αποθηκευτεί υπόγεια κατά την ίδια περίοδο,
- μέχρι ποια απόσταση από το κέντρο της λεκάνης θα εκτείνεται το ύβωμα εμπλουτισμού.



Κάτοψη (πάνω) και τομή (κάτω) ενός συστήματος διήθησης – εμπλουτισμού, όπου φαίνονται τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και οι σχετικοί συμβολισμοί για την εξίσωση Hantush.

$W=800$  m,  $L=800$  m,  $[x=0$  m,  $y=0$  m],  $f=0,25$ ,  $H=50$  m,  $T=1140$  m<sup>2</sup>/ημέρα,  $h_{0,0,t}=50+25=75$  m

$$v_a = \frac{25 \times 10^6 \text{ m}^3 / \text{έτος}}{800 \times 800 \text{ m}^2} = 39,0625 \text{ m} / \text{έτος} = 0,107 \text{ m} / \text{ημέρα}$$

$$n = \left[ \frac{4tT}{f} \right]^{-1/2} = \left[ \frac{4 \times (t) \times 1140 \text{ m}^2 / \text{ημ}}{0,25} \right]^{-1/2} = 0,0074(t)^{-1/2}$$

$t^*$                        $n$                        $\alpha=\beta^{**}$                        $\downarrow$  ημέρες!!                       $F(\alpha,\beta)^{***}$                        $h_{0,0,t}^{****}$

έτη (ημέρες)	( $\times 10^{-4}$ )			(m)	
[1]	[2]	[3]		[4]	[5]
0,50 (182,5)	5,481	0,22	$\Rightarrow$ χρήση Πίνακα (8.1)	0,1984	65,50
0,74 (270,1)	4,505	0,18		0,1490	67,22
1,23 (448,95)	3,495	0,14		0,1025	69,70
2,40 (876,0)	2,502	0,10		0,0608	72,80
3,75 (1368,75)	2,001	0,08		0,0425	74,90
6,7 (2445,5)	1,497	0,06		0,0266	77,84
15,00 (5475,0)	1,001	0,04		0,0135	81,63

(\*) : επιλέχθηκαν  $t$  (χρόνος από την έναρξη του εμπλουτισμού) από τον Πίνακα (8.1) έτσι ώστε να μην χρειάζεται παρεμβολή

ΠΡΟΣΟΧΗ: μετατροπή  $t \Leftrightarrow$  ημέρες !!

$$(**): \alpha = \left(\frac{W}{2} + x\right)n \quad \text{ή} \quad \left(\frac{W}{2} - x\right)n$$

$$\beta = \left(\frac{L}{2} + y\right)n \quad \text{ή} \quad \left(\frac{L}{2} - y\right)n$$

$$(x \rightarrow 0, y \rightarrow 0)$$

$$(***) : F(\alpha, \beta) = \int_0^1 \operatorname{erf}(\alpha\tau^{-1/2}) \cdot \operatorname{erf}(\beta\tau^{-1/2}) d\tau$$

(\*\*\*\*):  $h_{0,0,t}$  από εξ. Hantush ( $x \rightarrow 0, y \rightarrow 0$ ):

$$h_{0,0,t} - H = \frac{v_a t}{4f} \left\{ \begin{aligned} &F\left[\left(\frac{W}{2} + x\right)n, \left(\frac{L}{2} + y\right)n\right] + F\left[\left(\frac{W}{2} + x\right)n, \left(\frac{L}{2} - y\right)n\right] + \\ &+ F\left[\left(\frac{W}{2} - x\right)n, \left(\frac{L}{2} + y\right)n\right] + F\left[\left(\frac{W}{2} - x\right)n, \left(\frac{L}{2} - y\right)n\right] \end{aligned} \right\} \Rightarrow$$

$$h_{0,0,t} - 50 = \frac{0,107(t)}{4 \times 0,25} [4F(400n, 400n)] \Rightarrow h_{0,0,t} = 0,107(t) \times 4 \times F(400n, 400n) + 50 \Rightarrow$$

$\nearrow$  ημέρες!!       $\nearrow$  [4]

$$\Rightarrow h_{0,0,t} \Rightarrow [5]$$

1. Σε χρονικό διάστημα ~ 3,75 έτη (~ 1369 ημέρες) θα φθάσει τη μέγιστη επιτρεπόμενη ανύψωση των 75 m πάνω από το αδιαπέρατο υπόβαθρο (ή 25 m πάνω από την αρχική στάθμη του Υ.Ν.)
2. Ο όγκος νερού που μπορεί να αποθηκευθεί υπόγεια στα 3,75 έτη είναι:

$$V = 25 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{έτος} \times 3,75 \text{ έτη} = 93,75 \times 10^6 \text{ m}^3$$

### **Άσκηση 5**

Σε μια περιοχή όπου εφαρμόζεται επιφανειακός τεχνητός εμπλουτισμός με λεκάνη κατάκλισης, μετά από σχετική υδρογεωλογική έρευνα, εντοπίσθηκε στην ακόρεστη ζώνη, μια παρεμβαλλόμενη στρώση πάχους 3 m, σε βάθος 8,6 m κάτω από τον πυθμένα της λεκάνης κατάκλισης, με υδραυλική αγωγιμότητα  $K=2,2 \times 10^{-2}$  m/ημέρα. Εάν η υδραυλική αγωγιμότητα της εδαφικής στρώσης που υπέρκειται της παρεμβαλλόμενης στρώσης, είναι 7,8 m/ημέρα, να υπολογίσετε το μέγιστο ρυθμό εμπλουτισμού που πρέπει να εφαρμοσθεί για να παραμένει η στάθμη του υπόγειου νερού τουλάχιστον 1 m κάτω από τον πυθμένα της λεκάνης κατάκλισης και χωρίς να παρακωλύεται η διαδικασία κατεΐσδυσης του νερού.

### **Άσκηση 6**

Μια τεχνητή λίμνη διαστάσεων 305 m × 3218 m (πλάτος × μήκος) κατασκευάσθηκε σε περιοχή όπου μετά από σχετική υδρογεωλογική έρευνα για τον υποκείμενο ελεύθερο υδροφόρο, υπολογίστηκαν το πάχος του, 30,5 m και η μεταβιβαστικότητα 930 m<sup>2</sup>/ημέρα, ενώ το στεγανό υπόβαθρο του υδροφόρου εντοπίσθηκε σε βάθος 46 m. Εάν ο ρυθμός διήθησης του νερού από τη λίμνη προς τον υδροφόρο είναι 0,46 m/ημέρα και η μέγιστη επιτρεπόμενη ανύψωση του υβώματος του εμπλουτιζόμενου υπόγειου νερού είναι 43 m πάνω από το στεγανό υπόβαθρο, να εκτιμήσετε το πλάτος του σχηματιζόμενου υβώματος (υποθέστε συνθήκες σταθερής ροής και μηδενική υδραυλική κλίση του φυσικού υπόγειου νερού).

### **Άσκηση 7**

Σε περιοχή όπου μελετάται η δυνατότητα εφαρμογής τεχνητού εμπλουτισμού, προτείνεται η κατασκευή τετράγωνης λεκάνης κατάκλισης διαστάσεων 1600 m × 1600 m. Το πάχος του υποκείμενου ελεύθερου υδροφόρου είναι 46 m, ενώ η μεταβιβαστικότητα του υδροφόρου, μετά από σχετική υδρογεωλογική μελέτη, έχει εκτιμηθεί σε 790 m<sup>2</sup>/ημέρα. Να σχεδιάσετε σε διάγραμμα τη σχέση του μέγιστου επιτρεπόμενου ρυθμού εμπλουτισμού, έτσι ώστε η μέγιστη επιτρεπόμενη ανύψωση του υβώματος εμπλουτισμού να είναι 22 m πάνω από την αρχική στάθμη του υπόγειου νερού, και της απόστασης από το κέντρο της λεκάνης που θα εκτείνεται το ύψωμα εμπλουτισμού (υποθέστε ότι στην περίμετρο της όλης επιφάνειας επιρροής του εμπλουτισμού, το υπόγειο νερό θα παραμένει στην αρχική του στάθμη).

### **Άσκηση 8**

Η ανύψωση του υβώματος εμπλουτισμού κάτω από λεκάνη κατάκλισης διαστάσεων 500 m × 1500 m είναι 41 m σε διάστημα εφαρμογής τεχνητού εμπλουτισμού τριών ετών. Εάν ο μέσος ετήσιος ρυθμός εμπλουτισμού είναι  $37 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/έτος και το πορώδες της ακόρεστης ζώνης είναι 0,22, να υπολογίσετε τη μεταβιβαστικότητα του εμπλουτιζόμενου υδροφόρου στην περιοχή κάτω από τη λεκάνη εμπλουτισμού.

### **Άσκηση 9**



Μια λεκάνη κατάκλυσης διαστάσεων 482,7 m × 2574,4 m σχηματίσθηκε σε περιοχή, όπου μετά από σχετική υδρογεωλογική έρευνα για τον υποκείμενο ελεύθερο υδροφόρο, υπολογίστηκε η μεταβιβαστικότητα, 1348,86 m<sup>2</sup>/ημέρα, ενώ το πορώδες της ακόρεστης ζώνης εκτιμήθηκε σε 0,25. Η αρχική στάθμη του υδροφόρου είναι 29,60 m πάνω από το στεγανό υπόβαθρο, ενώ το βάθος της είναι 67,10 m. Εάν ο μέσος ετήσιος ρυθμός εμπλουτισμού είναι 6,38×10<sup>7</sup> m<sup>3</sup>/έτος και η μέγιστη επιτρεπόμενη ανύψωση του υβώματος εμπλουτισμού είναι 88,45 m πάνω από το στεγανό υπόβαθρο, να υπολογίσετε:

- σε πόσο χρονικό διάστημα το ύβωμα θα φθάσει σε αυτήν τη μέγιστη στάθμη,
- τον όγκο νερού που μπορεί να αποθηκευτεί υπόγεια κατά την ίδια περίοδο,
- μέχρι ποια απόσταση από το κέντρο της λεκάνης θα εκτείνεται το ύβωμα εμπλουτισμού.

### 13. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Abu-Zreig, M., Attom, M., Hamasha, N., (2000). Rainfall harvesting using sand ditches in Jordan. *Agric Water Manage* 46(2): 183- 192.
- Aharoni A., J. Guttman, H. Cikurel, S. Sharma, (2011). Guidelines for design, operation and maintenance of SAT (and hybrid SAT) systems. EU SWITCH Project within the Sixth Framework Program (2002-2006), Sustainable Water Management in the City of the Future, Mekorot and UNESCO – IHE, 70p.
- Al Battashi, N., M., and Ali., S. R., (1998). Artificial recharge schemes in water resources development in Oman. *Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Symposium on Artificial Recharge of Ground Water*, 21-25/9/1998, Amsterdam, Peters et al. (eds), Balkema, Rotterdam, pp.231-236.
- Allen, D. M., Mackie, D. C. and Wei, M., (2003). Groundwater and climate change: a sensitivity analysis for the Grand Forks aquifer, southern British Columbia, Canada. *Hydrogeol. J.* 12, 270–290.
- Al-Sefry, S. A., Şen, Z. Z., Al-Ghamdi, S. A., Al-Ashi, W. A. & Al-Bardi, W. A., (2004). Strategic ground water storage of Wadi Fatimah, Makkah region. Tech. Report SGS-TR-2003-2, Saudi Geological Survey, Jeddah, Saudi Arabia.
- Aronovici, V.S., Schneider, A.D. and Jones, O.R., (1972). Basin recharge of the Ogallala aquifer. *Proceedings Irrigation and Drainage Division Journal*, V. 98(IR1), pp.65-76.
- Aronson, D.A. and Seaburn, G.E., (1974). Appraisal and operating efficiency of recharge basins on Long Island, New York, in 1969. U.S. Geological Survey, Water-Supply Paper No.2001-D, Washington.
- Asano, T. (ed), (1985). Artificial recharge of groundwater, section III, Groundwater recharge operations. Butterworth, London, pp. 357-576.
- Asano, T., Levine, A.D., (1998). Wastewater reclamation, recycling, and reuse: an introduction. In: Asano, T. (ed.) *Wastewater reclamation and reuse*. Technomic, Lancaster, Pennsylvania, p. 1-56.
- Asano, T. (ed.), (1985). *Artificial Recharge of Ground Water*. Butterworth Publ., Boston, MA, 767 p.
- Asano. T. and Levine, A.D. (1996). *Wastewater Reclamation, Recycling and Reuse: Past, Present and Future*. *Water Science & Technology*, Volume 33, Number 10-11, Oxford, UK.
- ASCE, (1987). *Ground Water Management*. Third Edition, ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No 40, New York.
- ASCE, (2001). *Standard Guidelines for Artificial Recharge of Ground Water*. Environmental and Water Resources Institute, EWRI/ASCE 34-01, Virginia, USA.
- Attia, F., Moustafa, M., Olsthoorn, T, and Smidt, E., (1998). The role of artificial recharge in intergrated water management in Egypt. *Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Symposium on Artificial Recharge of Ground Water*, 21-25/9/1998, Amsterdam, Peters et al. (eds), Balkema, Rotterdam, pp.47-54.
- Aureli, A. and Grifeo, A.A., (1986). Salt water intrusion in a coastal aquifer subject to over exploitation and to artificial recharge. *Proceedings of the 9<sup>th</sup> salt water intrusion meeting*, Delft, 12-16 May 1986, pp.101-119.
- Baier, D.C. and Wesner, G.W., (1971). Reclaimed waste for ground water recharge. *Water Resources Bulletin*, V.7(5), pp.991-1001.
- Batchelor, C H, Rama, M R, and James, A J., (2000). *Karnataka Watershed Development Project: Water Resources Audit*. KWAD KWADReport.17.
- Baumann, P., (1965). Technical development in ground water recharge. *Advances in Hydroscience*, V.T. Chow ed., V.2, pp.209-279, Academic Press, New York.
- Baveye, P., Vandevivere, P., Hoyle, B.L., DeLeo, P.C., Sanchez de Lozada, D., (1998). Environmental impact and mechanisms of the biological clogging of saturated soils and aquifer materials. *Crit Rev Environ Sci Technol*, CRC Press 28(2): 123-191.
- Bear, J., (1979). "Hydraulics of Groundwater". McGraw-Hill, New York, N.Y., 569p.

- Berger, S.G. and F.J. Gientke (1998). Seawater intrusion reversed through artificial recharge beneath the Oxnard Plain, California. Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Symposium on Artificial Recharge of Ground Water, 21-25/9/1998, Amsterdam, Peters et al. (eds), Balkema, Rotterdam, pp.3-8.
- Bianchi, W.C., (1978). Artificial ground water recharge. In: Irrigation Drainage and Flood Control State-of-the Art. No 1. International Commission on Irrigation and Drainage. pp.331-335.
- Bianchi, W.C. and Muckel, D.C., (1970). Ground-water recharge hydrology. U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service Pub. No. 41-161, 62p.
- Bianchi, W.C., Nightingale, H.I. and McCormick, R.L., (1978). Fresno, California, subsurface drain collector-Deep well recharge system. American Water Works Association Journal, V.70(8), pp.427-435.
- Bittinger, M.W. and Trelease, F.J., (1965). The development and dissipation of a ground-water mound. Trans. Amer. Soc. Agric. Engrs., V.8, pp.103-106.
- Bouwer, E.J., McCarty, P.L., Bouwer, H., Rice, R.C., (1984). Organic contaminant behavior during rapid infiltration of secondary wastewater at the Phoenix 23rd Avenue Project. Water Res 18:463-472.
- Bouwer, H. and Rice, R.C., (1968). Salt penetration technique for seepage measurement. J. Irrig. Drain. Div. ASCE 94, v 01. IR4. 481-492.
- Bouwer, H. (1991). Role of Groundwater Recharge in Treatment and Storage of Wastewater for Reuse. Water Science & Technology, Volume 24, Number 9, Oxford, UK. ]
- Bouwer, H. (1996). Issues of artificial recharge. Water Sci. and Technology, 33 (10-11): 381-390.
- Bouwer, H. (2002). Artificial recharge of groundwater: hydrogeology and engineering. Hydrogeology Journal, V. 10, No 1, pp. 121-142.
- Bouwer, H., (1993). "From sewage farm to zero discharge". European Water Poll. Contr. 3(1), pp.9-16.
- Bouwer, H., (1995a). Artificial recharge. Issues and future. Proceedings of the 2nd International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater. Publ. by ASCE, New York, USA, pp.2-10.
- Bouwer, H., (1995b). Issues in artificial recharge". 2nd International Symposium on wastewater reclamation and reuse. International Association on Water Quality, Iraklio, Crete, Greece, 17-20/10/1995, pp.871-880.
- Bouwer, H. (1990). Effect of water depth and groundwater table on infiltration for recharge basins. In: Harris SC (ed) Proc 1990 Nat Conf Irrig Drain Div, Am Soc Civ Eng, Durango, Colorado, 11-13 July 1990, pp. 337-384.
- Bouwer, H., (1962). Analyzing groundwater mounds by resistance network, Journal Irrigation and Drainage Division, Am Soc Civil Eng 88 (IR 3):15-36.
- Bouwer, H., (1969). Theory of seepage from open channels. In: Chow VT (ed). Advances in hydroscience. Academic Press, New York, pp 121-170.
- Bouwer, H., (1975). Predicting reduction in water losses from open channels by phreatophyte control. Water Resour Res II: 96-101.
- Bouwer, H., (1982). Design considerations for earth linings for seepage control. Ground Water 20(5):531-537.
- Bouwer, H., (1986). Intake rate: cylinder infiltrometer, In: Klute A. (ed.) Methods of soil analyses, Part I. Physical and mineralogical methods. Agronomy Monograph, 2nd edn, pp. 825-844.
- Bouwer, H., (1989). Estimating and enhancing groundwater recharge. In: Shanna ML (ed) Groundwater recharge. Balkema, Rotterdam, pp. 1-10.
- Bouwer, H., (1996). Discussion of Bouwer and Rice slug test review articles. Ground Water 34: 171.
- Bouwer, H., (1999). Artificial recharge of groundwater: systems, design, and management. In: Mays LW (ed) Hydraulic design handbook. McGraw-Hill, New York, pp. 24.1-24.44.
- Bouwer, H., (2000a). Integrated water management, J Agric Water Manage 45:217-228.

- Bouwer, H., (2000b). Groundwater problems caused by irrigation with sewage effluent. *J Environ Health* 63(5):17-20.
- Bouwer, H., (2000c). The recharge of groundwater. Proc Natural Re-charge of Groundwater Symp, Tempe, Arizona, USA, 2 June 2000, Arizona Hydrol Soc, pp. 89-95.
- Bouwer, H., Back, J.T., Oliver, J.M., (1999b). Predicting infiltration and ground water mounding for artificial recharge. *J Hydrol Eng, Am Soc Civil Eng* 4(4):35α-357.
- Bouwer, H., Fox, P., Westerhoff, P., Drewes, J.E., (1999a). Integrating water management and reuse: causes for concern? *Water Qual Int*, January-February, pp. 19-22.
- Bouwer, H., Ludke, J., Rice, R.C., (2001). Sealing pond bottoms with muddy water. *J Ecol Eng* 18(2):233-238.
- Bouwer, H., Maddock, T., (1997). Making sense of the interactions between groundwater and streamflow: lessons for water mas ters and adjudicators. *Rivers* 6(1): 19-31.
- Bouwer, H., Rice, R.C., (1984a). Renovation of wastewater at the 23rd Avenue rapid-infiltration project, Phoenix, Arizona. *J Water Pollut Contr Fed* 56(1):76-83.
- Bouwer, H., Rice, R.C., (1984b) Hydraulic properties of stony vadose zones. *Ground Water* 22(6):696-705.
- Bouwer, H., Rice, R.C., (1989). Effect of water depth in groundwater recharge basins on infiltration rate. *J Irrig Drain Div, Am Soc Civil Eng* 115(4):556-568.
- Bouwer, H., Rice, R.C., (2001). Capturing flood waters for artificial recharge of groundwater. Proc 10th Biennial Symp Artificial Recharge of Groundwater, Tucson, Arizona, Arizona Hydro logical Society, pp. 99-106.
- Bouwer, H., Rice, R.C., Escarcega, E.D., (1974). High-rate land treatment: 1. Infiltration and hydraulic aspects of the Flushing Meadows Project, *J Water Pollut Contr Fed* 46(5):835-843.
- Bouwer,H., (1978). *Groundwater Hydrology*. McGraw-Hill Book Company, New York, N.Y., 479p.
- Bouwer,H., (1985a). Waste water recharge. Seminar on Artificial Recharge of Groundwater, Central Ground Water Board, Ahmedabad, pp.11-1-13-13.
- Bouwer,H., (1985b). Renovation of wastewater with rapid infiltration land treatment systems. *Artificial Recharge of Groundwater*. Edited by Asano T., Butterworth Publ. pp.249-282.
- Bouwer,H., (1989). Systems for artificial recharge of groundwater. Proceedings of the International Symposium on Artificial Recharge of Ground Water, 23-27/8/1988, California, Publ. by ASCE, New York, USA, pp.2-12.
- British Geological Survey, (2002). The Effectiveness of Artificial Recharge of groundwater: a review. Commercial Report CR/02/108N, Keyworth, Nottingham, UK.
- Brown,D.L. and Silvey,W.D., (1977). Artificial recharge to a freshwater-sensitive brackish-water sand aquifer. Norfolk, Virginia, U.S. Geological Survey Prof. Paper 939, 53p.
- Brown,G.,Jr. and Deacon,R., (1972). Economic Optimization of a Single-Cell Aquifer. *Water Resources Research*, V. 8(3), pp.557-564.
- 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.
- Buchan,S., (1958). Replenishment of aquifers by artificial methods. In: Symposium on Ground Water, Calcuta, India, 1955. Pub. 4. Calcutta, India: Central board of Geophysics, pp.327-334.
- Buchan,S., (1964). The problem of ground-water recharge. Artificial recharge as a source of water. *Institute of Water Engineers Journal*, V. 18(3), pp.239-246.
- Burke, J., and Moench M., (2000). *Groundwater and Society: Resources, Tensions. Opportunities*. United Nations.
- Burt,O., (1970). Groundwater storage control under institutional restrictions. *Water Resources Research*, V. 6(6), pp.1540-1548.
- Butler, J.J. Jr, (1997). *The design, performance, and analysis of slug tests*. Lewis Publishers, Boca Raton, Florida.
- California Department of Water Resources, (1970). Oxnad Basin Experimental Extraction Type Barrier, Bulletin 147-6, September.

- California State Department of Health Services, (2000). Water recycling criteria, title 22. Sacramento, California.
- Camey, D., and Farrington, J., (1998). Natural Resource Management and Institutional Change. Routledge Research/ODI Development Policy Studies.
- Carlson, R.D., Lindstedt, K.D., Bennett, E.R., Hartman, R.B. (1982). Rapid infiltration treatment of primary and secondary effluents. *J Water Pollut Contr Fed* 54:270-280.
- Chen, Zhouheng, Grasby, S.E., and Osadetz, K.G., (2004). Relation between climate variability and groundwater levels in the upper carbonate aquifer, southern Manitoba, Canada: *Journal of Hydrology*, v. 290, no. 1–2, p. 43–62.
- Committee on Ground Water, (1961). Recharge and Withdrawal. In: *American Society of Civil Engineers Manual of Engineering Practice*, No. 40, pp.72-92.
- Connorton, B.J. and McIntosh, P., (1995). "EUREAU survey on artificial recharge. Proceedings of the 2nd International Symposium on Artificial Recharge of Ground Water, 17-22/7/1994, Florida, USA, pp. 11-19.
- Crook, J., Hultquist, R., Sakaji, R., (2000). New and improved draft groundwater recharge criteria in California. *Proc Annu Conf Am Water Works Assoc (AWWA)*, Denver, Colorado.
- Crook, J., MacDonald, J.A., Trussell, R.R., (1999). Potable use of reclaimed water. *J Am Water Works Assoc* 91(8):40-49.
- Cummings, R.G., (1970). Some extensions of the economic theory of exhaustible resources. *Western Journal of Economics*, V. 7(3), pp.201-210.
- Cummings, R.G., (1971). Optimum exploitation of groundwater reserves with saltwater intrusion. *Water Resources Research* V. 7(6), pp.1415-1424.
- Cummings, R.G., (1974). "Interbasin water transfers: a case study in Mexico". Baltimore, Johns Hopkins University Press.
- Das Gupta A., Babel, M.S. and Das, R.K., (1999). Assessment of groundwater potential with underground dam in Phuket Island of Thailand. *Water Engineering & Management Program, School of Civil Engineering, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand.* 8 p.
- Daughton, C.G., Jones-Lepp, T. (eds), (2001). *Pharmaceuticals and personal care products in the environment: scientific and regulatory issues.* Symp Ser 791, Am Chem Soc, Washington, DC.
- David, R. and Pyne, G., (1994). Artificial recharge developments in the United States. *Groundwater- Drought, Pollution & Management*, Peene & Watts (eds). Balkema, Rotterdam.
- Devine, R.S., (1995). The trouble with dams. *Atlantic Monthly*, August 1995, pp. 67-73.
- Dhawan, B D., (1995). *Groundwater Depletion. Land Degradation and Irrigated Agriculture in India.* (New Delhi: Commonwealth Publishers.)
- Diamantis, I., Pliakas, F., and Petalas, C., (1997). The contribution of artificial recharge as a remedy procedure regarding the impacts of various interventions on the natural environment of plain regions. The case study in Thrace, Greece. *Proceedings of the International Symposium on Engineering Geology and the Environment*, organized by the Greek National Group of the International Association for Engineering Geology and the Environment (IAEG). 23-27/6/1997, Athens, pp. 2663-2667.
- Diede, C., (1989). Reclamation's recharge projects: California - Nevada. *Proceedings of the International Symposium on Artificial Recharge of Ground Water, 23-27/8/1988, California*, Publ. by ASCE, New York, USA, pp.43-53.
- Dillon, P.J., (eds), (2002). *Management of Aquifer Recharge for Sustainability.* Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater, ISAR -4, Adelaide, South Australia, 22-26 September 2002, published by A.A. Balkema, 567 p.
- Dillon, P.J., Liggett, J.A., (1983). An ephemeral stream-aquifer interaction model. *Water Resources* 19(3):621-626.
- Dillon, P., Pavelic, P., (1996). Guidelines on the quality of stormwater and treated wastewater for injection into aquifers for storage and reuse. *Research Report No 109, Urban Water Research Association of Australia, Water Services Association of Australia, Melbourne.*

- Dillon, P., Pavelic, P., Sibenaler, X., Gerges, N., Clark, R., (1997). Aquifer storage and recovery of stormwater runoff. *Aust Water Wastewater Assoc J Water* 24(4):7-11.
- Döll, P. and Fiedler, K., (2009). Global-scale modeling of groundwater recharge. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 12, 863–885.
- Döll, P. and Flörke, M., (2005). Global-scale estimation of diffuse groundwater recharge. Frankfurt Hydrology Paper 03, Institute of Physical Geography, Frankfurt University, Germany.
- Dvoracek, M.J. and Scott, V.H., (1963). Ground-water flow characteristics influenced by recharge pit geometry. *American Society of Agricultural Engineers Transactions*, V. 6(3), pp.262-265.
- Esmail, O.J. and Kimbler, O.K., (1967). Investigation of the technical feasibility of storing fresh water in saline aquifers. *Water Resources Research*, V. 15(5), pp.683-695.
- Espina, J.M., (1980). The case of artificial recharge. *The Johnson Drillers Journal*, V.52(1), pp.7-11.
- Esrey, S. A., and Habicht, J.P., (1986). Epidemiologic Evidence for Health Benefits from Improved Water and Sanitation in Developing Countries. *Epidemiologic Review*. Vol. 8, 117-128.
- Farrington, J., Turton, C, and James, A.J., (1999). *Participatory Watershed Development: Challenges for the Twenty-First Century*. (New Delhi: OUP.)
- Favor In, N.N., (1967). A change of ground water regime as a method of controlling the incursions of seawater. *Investigation of surface and underground runoff*, V2, No. 14; 31 p. (in Russian).
- Fleet, M. και Βουδούρης,Κ., (1995). "Πείραμα τεχνητού εμπλουτισμού μέσω γεώτρησης στα πλειοπληστοκαινικά ιζήματα της βιομηχανικής περιοχής Πατρών". Πρακτικά 6ου Πανελληνίου Συνεδρίου Ελληνικής Υδροτεχνικής Ενωσης, 22-26/5/1995, Θεσσαλονίκη, σελ.74-83.
- Fox, P., (2007). Management of aquifer recharge for sustainability. *Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Symposium on Managed Artificial Recharge of Groundwater*, ISMAR - 6, Phoenix, Arizona, USA, 28/10 – 2/11 2007, 657 p.
- Foxworthy, B.L., (1970). Hydrologic conditions and artificial recharge through a well in the Salem Heights area of Salem, Oregon. *U.S. Geological Survey Water-Supply Paper* 1594-F, 56 pp.
- Franson, J.W., (1989). Evaluating potential artificial recharge projects. *Proceedings of the International Symposium on Artificial Recharge of Ground Water*, 23-27/8/1988, California, Publ. by ASCE, New York, USA, pp.256-264.
- 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.
- Gleick, P., and Nash, L., (1991). *The Societal and Environmental Costs of the Continuing California Drought*. Pacific Institute for Studies in Development, Environment and Security.
- Glover, R.E., (1964). Ground water movement. *US Bureau of Reclamation, Eng Monogr* 31, 67 pp.
- Green, W.H., Ampt, G.A., (1911). Studies on soil physics, I. The flow of air and water through soils. *J Agric Sci* 4: 1-24.
- Gunston, H., (1998). *Field hydrology in tropical countries. A practical introduction*. (London: Intermediate Technology Publications.) ISBN 1-85339-427-0
- Haeffner, H, Detay, M, and Bersillon, J. L. (1998). Sustainable groundwater management using artificial recharge in the Paris region. *Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Symposium on Artificial Recharge of Ground Water*, 21-25/9/1998, Amsterdam, Peters et al. (eds), Balkema, Rotterdam, pp.9-14.
- Hantke, H., (1983). Der Sickerschlitzen. *Brunnenbau, Bau von Wasserwerken, und Rohrleitungsbau (BBR)* 34(6):207-208.

- Hantush, M.S., (1967). Growth and decay of groundwater-mounds in response to uniform percolation. *Water Resources Research*, V.3(4), pp.227-234.
- Harpaz, Y., (1971). Artificial ground-water recharge by means of wells in Israel. *Proceedings Hydraulics Division Journal*, V.97(HY12), pp.1947-1964.
- Haskell, E.E.Jr. and Bianchi, W.C., (1965). Development and dissipation of ground water mounds beneath square recharge basins. *Jour. Amer. Water Works Assoc.*, V.57, pp.348-353.
- Hauser, V.L. and Lotspeich, F.B., (1967). Artificial Groundwater Recharge through Wells. *Journal of Soil and Water Conservation*, V. 22(1), pp.11-15.
- Helweg, O.J. and Smith, G., (1978). Appropriate technology for artificial aquifers. *Ground Water*, V. 16(3), pp.144-148.
- Herd, R.W. and Wickham, T., (1978). Exploring the gap between potential and actual Rice yields: the Philippine case. *Economic Consequences of the New Rice Technology*. International Rice Research Institute.
- Hernandez-Mora, N., Llamas, R., and Cortina, L.M., (2001). Misconceptions in Aquifer Overexploitation: Implications for Water Policy in Southern Europe. *Workshop SAGA (FAIR-CT97-3673)*. Fondazione Enni Enrico Mattei., Milan 19.
- Hiscock, K., Sparkes, R., Hodgson, A., Martin, J. L. & Taniguchi, M., (2008). Evaluation of future climate change impacts in Europe on potential groundwater recharge. *Geophys. Res. Abstr.* 10, EGU2008-A-10211.
- Huisman, L. and Olsthoorn, T.N., (1983). *Artificial Groundwater Recharge*. Delft University of Technology. Pitman Publ., Boston, 320p.
- Ishaq, A.M., Khan, A.A., (1997). Recharge of aquifers with reclaimed wastewater: a case for Saudi Arabia. *Arabian J Sci Eng* 22(IC):133-141.
- Israelson, O.W., (1950). "Irrigation Principles and Practices". New York, Wiley, Chap.6.
- Johnson, A.I., and Finlayson, D.J., (eds) (1989). *Artificial Recharge of Ground Water*. Proceedings of the 1<sup>st</sup> International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater, published by ASCE, 23-27 August 1988, Anaheim, California, USA, 644 p.
- Johnson, A.I., and Pyne, D., (eds) (1995). *Artificial Recharge of Ground Water, II*. Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater, published by ASCE, 17-22 July 1994, Walt Disney World Swan, Florida, USA, 913 p.
- Kahnert, P., and Levine, G., (1989). Key Findings, Recommendations, and Summary. In: F.K.a.G. Levine (Editor), *Groundwater Irrigation and the Rural Poor: Options for Development in the Gangetic Basin*. 222 in *Groundwater Irrigation and the Rural Poor: Options for Development in the Gangetic Basin*. Levine. K F K a G (editor). (Washington. D.C: The World Bank.)
- Karant, K.R., (1987). *Ground water assessment. Development and management*. Tata McGraw- Hill Publishing Company Limited. New Delhi. *Artificial Recharge*, pp.449-574.
- Kazmann, R.G., (1948). River infiltration as a source of ground-water supply. *Trans. Amer. Soc. Civil Engrs*, V. 113, pp.404-424.
- Keller, G., (1933). Grundwasserperrau [Ground-water barriers]. *Die Bautechnik*, V. 11(2), pp.270-272.
- Kelly, T.E., (1967). Artificial recharge at Valley City. *Ground Water*, V. 5(2), pp.20-25.
- Klaer, F.H.Jr., (1953). Providing large industrial water supplies by induced infiltration. *Min. Engrng.*, V. 5, pp.620-624.
- Knoppers, R., van Hulst, W., (1995). *De Keerzijde van de Dam*. Jan van Arkel. Utrecht, The Netherlands, 142 pp.
- Kraatz, D.B., (1971). Irrigation canal lining. *Food and Agricultural Organization of the United Nations Irrigation and Drainage*. Paper, 2.
- Kuenen, J.G., Jetten, MSM, (2001). Extraordinary anaerobic ammonium-oxidizing bacteria. *Am Soc Microb News* 67(9):456-463.
- Kuhn, W., (1999). Overview of riverbank filtration issues. *Proc Int Riverbank Filtration Conf*, Louisville, Kentucky, USA, sponsored by Nat Water Res Inst, Fountain Valley, California, USA, pp. 1-4.

- Kumar, A. and Kimbler, O.K., (1970). Effect of dispersion, gravitational segregation, and formation stratification on the recovery of fresh water stored in saline aquifers. *Water Resources Research*, V. 6, pp.1689-1700.
- Kundzewicz, Z. W., Mata, L. J., Arnell, N., Döll, P., Jiménez, B., Miller, K., Oki, T., Şen, Z. & Shiklomanov, I. (2008) The implications of projected climate change for freshwater resources and their management. *Hydrol. Sci. J.* 53(1), 3–10. doi:10.1623/hysj.53.1.3.
- Kundzewicz, Z. W., Mata, L. J., Arnell, N., Döll, P., Kabat, P., Jiménez, B., Miller, K., Oki, T., Şen, Z. & Shiklomanov, I. (2007) Freshwater resources and their management. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (ed. by M. L. Parry, O. F. Canziani, J. P. Palutikof, C. E. Hanson & P. J. van der Linden). Cambridge University Press, Cambridge, UK. <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg2/ar4-wg2-chapter3.pdf> (last accessed 11 June 2009).
- Kundzewicz, Z.W., P. Döll, (2009). Will groundwater ease freshwater stress under climate change? *Hydrological Sciences–Journal–des Sciences Hydrologiques*, 54(4) August 2009 Special issue: Groundwater and Climate in Africa, pp. 665-675.
- Lance, J.C., Rice, R.C., Gilbert, R.G., (1980). Renovation of sewage water by soil columns flooded with primary effluent. *J Water Pollut Contr Fed* 52(2):381- 388.
- 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.
- Lemly, A.D., (1993). Subsurface agricultural irrigation drainage: the need for regulation. *Regulatory Toxicol Pharmacol* 7:157-180.
- Lerner, D.N., (2002). Identifying and quantifying urban recharge: a review. *Hydrogeology J* (in press) DOI 10.1007/s10040-001-0177-1.
- Lerner, D.N., Issar, A.S., and Simmers, I., (1990). *Groundwater Recharge. A Guide to understanding and Estimating Natural Recharge. Int. contributions to hydrogeology. Int. Assoc. of Hydrogeologists, Vol. 8.*
- Lihola, H., (1989). Artificial recharge in Finland. *Proceedings of the International Symposium on Artificial Recharge of Ground Water, 23-27/8/1988, California, Publ. by ASCE, New York, USA*, pp.538-545.
- Lim, R., Gayle, S., Doyle, C., Lesjean, B., Gibert, M., (2000). Endocrine disrupting compounds in sewage treatment plant (STP) effluent reused in agriculture is there a concern? In: Dillon P.J. (ed) *Proc First Symp Water Recycling, Australia, Adelaide, CSIRO Land and Water, and Australian Water Association*, pp. 23-28.
- Lipshie, S. R. and Larson, R. A., (1995). The West coast basin, Dominguez gap, and Alamitos seawater-intrusion barrier system, Los Angeles and Orange Counties, California. *AEG NEWS*, 38/4, pp. 25-29.
- Lluria, M.R., (1998). Successful operation of a large aquifer storage facility for a desert community. *Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Symposium on Artificial Recharge of Ground Water, 21-25/9/1998, Amsterdam, Peters et al. (eds), Balkema, Rotterdam*, pp.41-46.
- Maasland, D.E.L. and Bittinger, M.W., (1963). *Proceedings of the Symposium on Transient Ground Water Hydraulics. Colorado State University, Fort Collins, CO.*
- Marino, M.A., (1975a). Artificial ground water recharge, I. circular recharging area. *J Hydro* 125:201-208.
- Marino, M.A., (1975b). Artificial ground water recharge, II. rectangular recharging area, *J Hydrol* 26:29-37.
- McDonald, M.G., Harbaugh, A.W., (1988). A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model. *Techniques Water Res Invest US Geol Survey, Book 6, Chapter A1.*
- McEwen, B., Richardson, T., (1996). Indirect potable reuse: committee report. *Proc 1996 Water Reuse Conf, Am Water Works Assoc and Water Environ Fed, San Diego, California, Feb 1996*, pp. 486-503.



- McWhorter, D.B. and Brookman, J.A., (1972). Pit recharge influenced by subsurface spreading. *Ground Water*, V. 10(5), pp.6-11.
- Meinzen-Dick, R., (1996). *Groundwater Markets in Pakistan: Participation and Productivity*. International Food Policy Research Institute.
- Meinzer, O.E., (1946). General Principles of Artificial Ground-Water Recharge. *Economic Geology* V. 41(3), pp.191-201.
- Moench, M., (2001). *Groundwater and Poverty: Exploring the Links*. Workshop on Intensively Exploited Aquifers. Royal Academy of Sciences.
- Muckel, D.C. and Schiff, L., (1955). Replenishing Ground Water by Spreading. U.S. Department of Agriculture, *Yearbook of Agriculture*, pp. 302-310.
- Muckel, D.C., (1958). Artificial Recharge in Relation to Ground Water Storage. In: *Annual Conference on Water for Texas*. College Station, Texas: Water Research and Information Center, pp. 85-94.
- Muckel, D.C., (1959). Replenishment of Ground Water Supplies by Artificial Means. U.S. Department of Agriculture Technical Bulletin No. 1195.
- National Research Council, (1994). *Ground water recharge using waters of impaired quality*. National Academy Press, Washington, DC, 382 pp.
- Nellor, M.H., Baird, R.B., Smith, J.R., (1984). Summary of health effects study: final report. County Sanitation Districts of Los Angeles County, Whittier, California.
- Nightingale, H.I. and Bianchi, W.C., (1977). Environmental aspects of Water spreading for Ground-Water Recharge. U.S. Department of Agriculture Technical Bulletin No.1568, Agric. Research Service, U.S. Dept. of Agric., 21pp.
- Oaksford, E.T., (1985). Artificial recharge: methods, hydraulics and monitoring. *Artificial Recharge of Groundwater*, Edited by Asano T., Butterworth Publishers, Chapter 4, pp. 69-127.
- ODA, (1995). *A Guide to Social Analysis for Projects in Developing Countries*. Overseas Development Administration. HMSO.
- O'Hare, M.P., Fairchild, D.M, Hajali, P.A. and Canter, L.W., (1986). *Artificial recharge of ground water. Status and potential in the contiguous United States*. Lewis Publishers, Inc.
- Pearce, F., (1992). *The dammed. Rivers, dams, and the coming world water crisis*. The Bodley Head, England, 376 p., U.S. distribution by Trafalgar Square Publishing Company, North Pomfret, Vermont.
- Perry, C.J., and Narayanamurthy, S.G., (1998). *Farmer Response to Rationed and Uncertain Irrigation Supplies*. International Water Management Institute, Colombo.
- Peters, J.H., Castell-Exner, C., (eds), (1993). *Proc Dutch-German Workshop Artificial Recharge of Groundwater*, September, 1993, Castricum, The Netherlands. KIWA, P.O. Box 1072, Nieuwegein 3430 BB, The Netherlands.
- Peters, J.H., et al., (eds), (1998). *Artificial Recharge of Ground Water*. Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Symposium on Artificial Recharge of Groundwater, TISAR 98, Amsterdam, Netherlands, 21-25 September 1998, published by A.A. Balkema, 474 p.
- Pettyjohn, W.A., (1968). Design and construction of a dual recharge system at Minot, North Dakota. *Ground Water*, V. 6(4), pp.4-8.
- Pettyjohn, W.A., (1981). *Introduction to artificial groundwater recharge*. NWWA/EPA-600/2-81-236, Robert S.Kerr Environmental Research Laboratory, US Environmental Protection Agency, Ada, Oklahoma.
- Pfenske, J., leake, S.A., and Prudic, E., (1996). Documentation of a Computer Program (RESI) to Simulate Leakage from Reservoirs Using the Modular Finite-Difference Ground-Water Flow Model (MODFLOW). U.S. Geological Survey Open File Report, 96-364.
- Pliakas F, Kallioras A, Diamantis I, Giougis I., (2007). Seawater intrusion in a coastal phreatic aquifer of Kavala Prefecture, Northern Greece. *Proceedings of the 10th 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., 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.
- Pliakas F., A. Kallioras, K. Mimidis, I. Diamantis, C. Schuth, M. Deli Ibrahim, (2013). Groundwater recharge using a Soil Aquifer Treatment (SAT) system at the Eastern Nestos River Delta, NE Greece. *Proceedings of the 13th International Conference of Environmental Science and Technology*, Athens, Greece, 5-7 September 2013, ISBN: 978-960-7475-51-0, paper 0172.
- Pliakas F., C. Petalas, I. Diamantis, and A. Kallioras, (2004). Modeling of groundwater artificial recharge by reactivating an old stream bed. *Water Resources Management*, international journal published for the European Water Resources Association (EWRA) (accepted for publication, 15-7-2004).
- Pliakas F., Diamantis, I., and Petalas, C., (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., I. Diamantis, A. Kallioras, and C. Petalas, (2003). Environmental effects of a proposed groundwater artificial recharge project in Vafeika plain area of Xanthi region in Thrace, Greece. *Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Conference on Ecological Protection of the Planet Earth. Bio – Environment and Bio – Culture*. Sofia, Bulgaria, 5-8/6/2003, pp. 364-371.
- Postel, S., (1992). *Last oasis: facing water scarcity*. Worldwatch Institute, Washington D.C., 240p.
- Price, D. et al., (1965). *Artificial recharge in Oregon and Washington, 1962*. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 1594-C, 65p.
- Priest, J.E., (1992). International competition for water and motivations for dispute resolution. *J. Agr. Water Management*, V. 21, pp.3-12.
- Prince, K., (1982). *Stream augmentation at Fosters Brook, Long Island, New York. A hydraulic feasibility study*. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper No.2208.
- Public Works Research Institute, (1980). *Principles and effect of underground piping*. Japan.
- Pyne, R.D.G., (1995). *Groundwater recharge and wells: a guide to aquifer storage recovery*. Lewis Publishers, Boca Raton, Florida, 375 pp.
- Quemer, E.P., (2000). The effects of human intervention in the water regime. *Ground Water* 38:167-171.
- Rahmann, M.A. et al., (1969). Effect of sediment concentration on well recharge in a fine sand aquifer. *Water Resources Research*, V.5, pp.641-646.
- Rao, C.H.H., Ray, S.K., and Subbarao, K., (1988). *Unstable Agriculture and Droughts: Implications for Policy*. (New Delhi: Vikas Publishing House.)
- Ratnaparkhi, T.G., (1978). *Underground Bunds for Artificial Recharge*. In: R.N. Athavale (Ed). *Proceedings of Indo-German Workshop*. Padmanagar, Secunderabad, India: National Geophysical Research Institute, pp.351-358.
- Rebhun, M. and Schwarz, J., (1968). Clogging and contamination processes in recharge wells. *Water Resources Research*, V.4, pp.1207-1217.
- Reed, S.C. Crites, R.W., and Middlebrooks, E.J. (1995). *Natural Systems for Waste Management and Treatment*, 2<sup>nd</sup> Ed., McGraw - Hill, Inc., New York.
- Reed, J.E., Deutsch, M. and Wutala, S.W., (1966). *Induced Recharge of an Artesian Glacial-Drift Aquifer at Kalamazoo, Michigan*. U.S. Geological Survey Water- Supply Paper No. 1594-D.
- Rice, R.C., Bouwer, H., (1984). Soil-aquifer treatment using primary effluent. *J Water Pollut Contr Fed* 56(1):848.
- Richter, R.C. and Chun, R.Y.D., (1959). Artificial recharge of ground water reservoirs in California. *Proceedings Irrigation and Drainage Division Journal*, V. 85(IR4), pp.1-27.
- Roscoe Moss Company, (1990). *Handbook of Ground Water Development*. Published by John Wiley & Sons, New York, USA.

- Schicht, R.J., (1971). Feasibility of recharging treated sewage effluent into a deep sandstone aquifer. *Ground Water*, V. 9(6), pp.29-35.
- Schiff, L., (1955). The Status of Water Spreading for Ground-Water Replenishment. *American Geophysical Union Transactions* V. 36(6), pp.1009-1020.
- Schmidt, W. and Meyer, R., (1989). Status and experiences made in the artificial recharge of ground water in the Federal Republic of Germany. *Proceedings of the International Symposium on Artificial Recharge of Ground Water, 23-27/8/1988, California*, Publ. by ASCE, New York, USA, pp.528-537.
- Scott, V.H. and Aron, G., (1967). "Aquifer recharge efficiency of wells and trenches". *Ground Water*, V. 5(3), pp.6-14.
- Seckler, D., and Amarasinghe, U., (1999). Chapter 3, Water Supply and Demand, 1995 to 2025: Water Scarcity and Major Issues, IWMI Web Site, Colombo.
- Shah, T. 1993. *Groundwater Markets and Irrigation Development: Political Economy and Practical Policy*. (Bombay: Oxford University Press.)
- Shaw, E.M. (1996). *Hydrology ITT Practice*. (Chapman and Hall.)
- Sherwood, C. B., and Grantham, R. G., (1966). Water control vs. seawater intrusion, Broward County, Florida, "Leaflet" 5, Florida Board of Conservation, Division of Geology, 1966.
- Sloss, E.M., Geschwind, S.A., McCaffrey, D.F., Ritz, B.R., (1996). Groundwater recharge with reclaimed water: an epidemiologic assessment in Los Angeles County, 1987-1991. RAND, Santa Monica, California, 9407-2138.
- Soil Survey Staff, US Dept Agriculture, (1951). *Soil survey manual*, US Dept Agric Handbook, No 18, 503 pp.
- Stakelbeek, A., (1999). Movement of brackish groundwater near a deep-well infiltration system in the Netherlands. *Seawater Intrusion in Coastal Aquifers. Concepts, Methods and Practices*. J. Bear, A.H.-D. Cheng, S. Sorek, D. Ouazar and I. Herrera (Eds). Kluwer Academic Publishers, The Netherlands, pp. 531-241.
- Sukhija, B.S., Reddy, D.V., Nandakumar, M.V., and Rarnam (1997). A method for evaluation of artificial recharge through percolation tanks using environmental chloride. *Ground Water*, vol. 35, 161-165.
- Sumner, M.E., Stewart, B.A., (eds), (1992). *Soil crusting: chemical and physical processes*, Lewis Publishers, Boca Raton, Florida, 372 pp.
- Tanji, K.K., (ed), (1990). *Agricultural salinity assessment and management*. Am Soc Civ Eng Manuals and Reports on Engineering Practice No 71, ASCE, Reston, Virginia.
- Tatro, S.B., (1999), Dam breaching, the rest of the story. *Civil Engineering*, April, 50-55.
- Tchobanoglous, G and Angelakis, A.N. (1996). Technologies for Wastewater Treatment Appropriate for Reuse: Potential for Applications in Greece. *Water Soil and Techn.* 30 (10-11): 17-26.
- Theis, C.V., (1935). The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using ground-water storage. *Trans. Amer. Geophysical Union*, V.16, pp.519-524.
- Todd, D. K., and Mays L. W. (2005). *Groundwater Hydrology* (3<sup>rd</sup> edition). John Wiley & Sons, Inc., New York, USA.
- Todd, D.K., (1980). *Ground Water Hydrology*. John Willey & Sons, New York.
- Treidel H., Martin-Bordes J.L., Gurdok J.J. (eds), (2012). *Climate change effects on groundwater resources. A global synthesis of findings and recommendations*. IAH, International Contributions to Hydrogeology, no 27, 401p. CRC Press/Balkema, The Netherlands.
- Tsur, Y., (1990). The Stabilization Role of Groundwater When Surface Water Supplies Are Uncertain: The Implications for Groundwater Development. *Water Resources Research*, vol. 26, 811-818.
- Tsur, Y., (1993). *The Economics of Conjunctive Ground and Surface Water Irrigation Systems: Basic Principles and Empirical Evidence from Southern California*. Department of Agricultural and Applied Economics, University of Minnesota, P93-15.

- Tyler, S.W., Chapman, J.B., Conrad, S.H., Hammermeister, D.P., Blout, D.O., Miller, J.J., Sully, M.J., Ginanni, J.M., (1996). Soil-water flux in the southern Great Basin, United States: temporal and spatial variations over the last 120,000 years. *Water Resour Res* 32(6):1481-1499.
- U.S. Department of Agriculture, (1967). Ground-Water Recharge. Soil Conservation Service Engineering Division Technical Release No.36.
- U.S. Environmental Protection Agency EPA (1992). Guidelines for Water Reuse. Technology Transfer Manual EPA/625/R-92/004. U.S. EPA. Washington, D.C. 247p
- U.S. National Research Council (1994). Ground Water Recharge Using Waters of Impaired Quality. National Academy Press, Washington, D.C., 283p
- UNESCO, (2006). Recharge systems for protecting and enhancing groundwater resources. Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Symposium on Management of Aquifer Recharge, ISMAR-5, Berlin, Germany, 11–16 June 2005, IHP-VI, Series on Groundwater No. 13, 913 p.
- United Nations, (1975). Ground-Water Storage and Artificial Recharge. Department of Economic and Social Affairs. ST/ESA/13, New York.
- United Nations, (1975). Ground-Water Storage and Artificial Recharge. Department of Economic and Social Affairs. ST/ESA/13, New York.
- Valliant, J., (1964). Artificial recharge of surface water to the Ogallala formation in the High Plains of Texas. *Ground Water*, V. 2(2), pp.42-45.
- Van de Graaf, A.A., Mulder, A., de Bnlyn, P., Jetten, M.S.M., Robertson, L.A., Kuenen, J.G. (1995). Anaerobic oxidation of ammonium is a biologically mediated process. *Appl Environ Microbiol* 61(4):1246-1251.
- Vaux, H.J. Jr, (1985). Economic aspects of groundwater recharge. *Artificial Recharge of Groundwater*, Edited by Asano T., Butterworth Publishers, Chapter 5, pp.703-718.
- Walton, W.C., (1970). *Groundwater Resource Evaluation*. McGraw-Hill Book Company, New York, N.Y., 644p.
- Walton, W.C., (1991). *Principles of groundwater engineering*. Lewis Publ. Inc., Chelsea, Michigan, USA, 414p.
- Warner, J.W., Molden, D., Chehata, M, Sunada, D.K., (1989). Mathematical analysis of artificial recharge from basins. *Water Resour Bul* 125:401-411.
- Warner, W.S., (2000). The influence of religion on wastewater treatment. *Water* 21, August 2000: 11-13.
- Whetstone, G.A., (1956). Artificial recharge through tunnels. *American Water Works Association Journal*, V. 48(11), pp.1444.
- Wicks, C.M. and Herman, J.S., (1996). Regional hydrochemistry of a modern coastal mixing zone, *Water Resour. Res.*, Vol. 32, No. 2, pp. 401-407.
- Wilson, L.G., (1985). An overview of artificial recharge methods. Proceedings of 2nd symposium on artificial recharge in Arizona.
- Αγγελάκης Α. και Τσομπάνογλου Γ. (1996). Υγρά απόβλητα. Πανεπ. Εκδόσεις Κρήτης, Ηράκλειο Κρήτης.
- Αγγελάκης Α., Χατζουλάκης, Κ., και Romano, P., (1999). Εμπλουτισμός υπόγειων υδροφορέων με επεξεργασμένα αστικά υγρά απόβλητα. Πρακτικά Ημερίδας που διοργάνωσε η Ελληνική Επιτροπή Υδρογεωλογίας με θέμα “Τεχνητός εμπλουτισμός υπόγειων υδροφορέων” στην Ξάνθη στις 28/5/1999, σελ. 74-82.
- Βαφειάδης, Π. και Πανώρας, Α., (1994). Είναι καιρός ο τεχνητός εμπλουτισμός των υδροφόρων στρωμάτων να αρχίσει να εφαρμόζεται και στη χώρα μας. Περιοδικό "Γεωτεχνική Ενημέρωση", Τεύχος 59, Απρίλιος 1994, σελ. 44-45.
- Βαφειάδης, Π., (1995). Τεχνητός Εμπλουτισμός των Υδροφόρων Στρωμάτων. Θεσσαλονίκη.
- Βαφειάδης, Π., Πανώρας, Α., και Αναγνωστόπουλος, Κ., (1994). Πείραμα τεχνητού εμπλουτισμού των υδροφόρων στρωμάτων της περιοχής Πετραίας του Ν. Πέλλης με τη χρήση αρδευτικής γεώτρησης. Πρακτικά 7<sup>ου</sup> Διεθνούς Συνεδρίου της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας (Ε.Γ.Ε.), Θεσσαλονίκη, 25-27/5/1994, σελ. 231-237.

- Γαλέος Α., (1967). Μελέτη επί των (αλλουβιακών) αποθέσεων του Αργολικού πεδίου δια την εύρεσιν της συμπεριφοράς και της χωρητικότητας των υδροφόρων αυτού. ΥΠΓΕ (ΥΕΒ), 55σελ.
- Γεωργίου, Α., (1992). Εμπλουτισμός από τον Υδατοφράκτη και εντατική εκμετάλλευση του Υδροφορέα Γερμασόγειας. Σύνδεσμος Γεωλόγων και Μεταλλειολόγων Κύπρου, Δελτίον 6, σελ. 149-173), Πρακτικά 1<sup>ου</sup> Πανελληνίου Υδρογεωλογικού Συνεδρίου, 1991.
- Γιαννουλόπουλος, Π., (2002). Μοντέλο προσομοίωσης της ροής των υπόγειων νερών του Αργολικού πεδίου. Πρακτικά 6<sup>ου</sup> Υδρογεωλογικού Συνεδρίου της Ελληνικής Επιτροπής Υδρογεωλογίας και του Συνδέσμου Γεωλόγων και Μεταλλειολόγων Κύπρου, 8-10/11/2002, Ξάνθη, σελ. 223-234.
- Γιαννουλόπουλος, Π., Αλεξανδρής, Σ., Ψυχογιού, Μ., και Πουλοβασίλης, Α., (2002). Υφαλμύρωση και ποιοτικά χαρακτηριστικά των υπόγειων νερών του Αργολικού πεδίου. Πρακτικά 6<sup>ου</sup> Υδρογεωλογικού Συνεδρίου της Ελληνικής Επιτροπής Υδρογεωλογίας και του Συνδέσμου Γεωλόγων και Μεταλλειολόγων Κύπρου, 8-10/11/2002, Ξάνθη, σελ. 1-12.
- Γιαννουλόπουλος, Π., και Πουλοβασίλης, Α., (2002). Υπόγεια υδραυλική και μηχανισμοί λειτουργίας των υδροφόρων σχηματισμών του Αργολικού πεδίου – Εννοιολογικό μοντέλο. Πρακτικά 6<sup>ου</sup> Υδρογεωλογικού Συνεδρίου της Ελληνικής Επιτροπής Υδρογεωλογίας και του Συνδέσμου Γεωλόγων και Μεταλλειολόγων Κύπρου, 8-10/11/2002, Ξάνθη, σελ. 35-46.
- Γκιουγκής, Ι. (2013). Διερεύνηση της θαλάσσιας διείσδυσης σε παράκτιους υδροφόρους σε δελταϊκό περιβάλλον – Η περίπτωση του Δέλτα του ποταμού Νέστου. Διδακτορική Διατριβή. Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Δ.Π.Θ. Ξάνθη (σε εξέλιξη).
- Γλέζος, Μ., Κατριβάνος, Ε., Ιωαννίδης, Ν., Αμανατίδου, Ε., και Αδαμίδου, Κ., (2001). Χαμηλά φράγματα για την ανάσχεση της χειμαρρικής ροής και εμπλουτισμό των υδροφόρων οριζόντων. Proceedings of the 1<sup>st</sup> International Conference on Ecological Protection of the Planet Earth, Xanthi, 5-8/6/2001, pp. 17-24
- Γλέζος, Μ., (1994). Εμπλουτισμός των υδροφόρων από χαμηλά φράγματα ανάσχεσης της χειμαρρικής ροής στα ορεινά- περίπτωση Απεράθου Νάξου. Πρακτικά 2ου Υδρογεωλογικού Συνεδρίου, 24-28/11/1993, Πάτρα, σελ. 99-105.
- Δαμιανίδης Π., Φ. Πλιάκας, Α. Καλλιώρας, (2012). Εκτίμηση της επίδρασης της βροχόπτωσης στη διακύμανση της στάθμης του υπόγειου νερού στο πεδινό τμήμα του Ν. Ξάνθης. Πρακτικά 2ου Κοινού Συνεδρίου, 12ου της Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης (ΕΥΕ) και 8ου της Ελληνικής Επιτροπής Διαχείρισης Υδατικών Πόρων (ΕΕΔΥΠ) με θέμα: Ολοκληρωμένη Διαχείριση Υδατικών Πόρων προς την Αειφόρο Ανάπτυξη. Πάτρα, 11-13/10/2012, σελ. 908-919.
- 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. και Πλιάκας, Φ., (1996). Επιπτώσεις από την υπερεκμετάλλευση των υπόγειων νερών. Αντιμετώπιση - Τεχνητός εμπλουτισμός. Πρακτικά Διεθνούς Συνεδρίου ΤΕΕ με θέμα: «Διαχείριση υδατικών πόρων», 13-16/11/1996, Λάρισα, σελ.198-207.
- Διαμαντής, Ι., Πλιάκας, Φ. και Τζεβελέκης, Θ., (1994). Τεχνητός εμπλουτισμός με επαναδραστηριοποίηση αδραντοποιημένων κοιτών: μία πρώτη προσέγγιση. Πρακτικά 2ου Υδρογεωλογικού Συνεδρίου, 24-28/11/1993, Πάτρα, σελ.107-118.
- Διαμαντής, Ι., Πλιάκας, Φ., και Μπέλλος, Κ., (1993). Διερεύνηση των δυνατοτήτων για συνδυασμένη διαχείριση υπογείων και επιφανειακών νερών στο Νομό Ξάνθης. Ερευνητική Έκθεση προς τη Νομαρχία Ξάνθης, Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Δ.Π.Θ., Ξάνθη, σελ. 113.
- Διαμαντής, Ι., Πλιάκας, Φ., και Πεταλάς, Χ., (1999). Εφαρμογή τεχνητού εμπλουτισμού υπόγειου υδροφορέα της περιοχής Βαφείκων του νομού Ξάνθης. Πρακτικά 5<sup>ου</sup> Υδρογεωλογικού Συνεδρίου της Ελληνικής Επιτροπής Υδρογεωλογίας και του Συνδέσμου Γεωλόγων και Μεταλλειολόγων Κύπρου, 12-14/11/1999, Λευκωσία, Κύπρος, σελ. 81-96.
- Ελληνική Επιτροπή Υδρογεωλογίας, (1999). Τεχνητός Εμπλουτισμός Υπόγειων Υδροφορέων. Πρακτικά Ημερίδας της Ελληνικής Επιτροπής Υδρογεωλογίας της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας (Ε.Γ.Ε.), Ξάνθη, 28/5/1999, σελ. 210.

- Επιτροπή Μελέτης Επιπτώσεων Κλιματικής Αλλαγής (ΕΜΕΚΑ), (2011). Οι περιβαλλοντικές, οικονομικές και κοινωνικές επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στην Ελλάδα., 546 σελ. Ιούνιος 2011, Έκδοση Τράπεζας της Ελλάδος, Αθήνα.
- Ζυμής,Α., (1994). Τα υπόγεια νερά της Αργολίδας και ο τεχνητός εμπλουτισμός τους. Γεωτεχνική Ενημέρωση Νο.64, σελ. 70-71.
- Θάνος,Μ., (1994). Παρατηρήσεις- συμπεράσματα από πείραμα τεχνητού εμπλουτισμού υδροφόρων στο Αργολικό Πεδίο. Πρακτικά 2ου Υδρογεωλογικού Συνεδρίου, 24-28/11/1993, Πάτρα, σελ.119-134.
- Καλλέργης,Γ., (1986). Εφαρμοσμένη Υδρογεωλογία. Τόμοι Α και Β. Έκδοση ΤΕΕ. Αθήνα.
- Καλλέργης,Γ., (2001). "Εφαρμοσμένη – Περιβαλλοντική Υδρογεωλογία". Τόμοι Α, Β, Γ. Έκδοση ΤΕΕ. Αθήνα.
- Καμαριανάκης Α., (2010). Αντιμετώπιση της υφαλμύρισης με μικρά έργα από τους διαθέσιμους υδατικούς πόρους στο Νομό Ξάνθης. 2<sup>ο</sup> Αναπτυξιακό Συνέδριο: Χάρτης πορείας ως το 2020, Νομαρχία Ξάνθης, 15-17/1/2010, Ξάνθη.
- Κουκούλη, Ε-Χ., (2011). Διαχείριση του εμπλουτισμού υπόγειων υδροφόρων συστημάτων του πεδινού τμήματος του Ν. Ξάνθης. Διπλωματική εργασία. Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Δ.Π.Θ., Ξάνθη, 140 σελ.
- Κουμαντάκης, Ι. (1999). Διεθνής εμπειρία σε θέματα τεχνητού εμπλουτισμού υπόγειων νερών με βάση τις εργασίες του πρόσφατου σχετικού συμποσίου του Amsterdam (21-25/9/1998). Πρακτικά Ημερίδας που διοργάνωσε η Ελληνική Επιτροπή Υδρογεωλογίας με θέμα "Τεχνητός εμπλουτισμός υπόγειων υδροφορέων" στην Ξάνθη στις 28/5/1999, σελ. 14-30.
- ΚΥΑ 145116, (2011). Καθορισμός μέτρων, όρων και διαδικασιών για την επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων υγρών αποβλήτων και άλλες διατάξεις (ΦΕΚ 354/Β/8-3-2011).
- Κωνσταντίνου Κ. Α., (1994). Υδρογεωλογική και υδροχημική συμπεριφορά του ψευτοκαρστικού υδροφορέα των γύψων της περιοχής Μαρώνι (Κύπρος), Δελτίο Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας Τόμος ΧΧΧ, Τεύχος 4, σελ. 191-200 (7ον Συνέδριο Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας).
- Κωνσταντίνου, Κ, και Γεωργίου, Α. (1999). Εφαρμογές τεχνητού εμπλουτισμού στην Κύπρο – Προβλήματα. Πρακτικά Ημερίδας που διοργάνωσε η Ελληνική Επιτροπή Υδρογεωλογίας με θέμα "Τεχνητός εμπλουτισμός υπόγειων υδροφορέων" στην Ξάνθη στις 28/5/1999, σελ. 1-13.
- Λαμπράκης, Ν., Σταμάτης, Γ., Γιαννουλόπουλος, Π., και Βοιβόντα, Α., (2001). Ποιότητα των υπόγειων νερών και εκτίμηση του χρόνου απορρύπανσης των υδροφόρων οριζόντων του Αργολικού πεδίου κάτω από συνθήκες τεχνητού εμπλουτισμού. Πρακτικά 9<sup>ου</sup> Διεθνούς Συνεδρίου της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας (Ε.Γ.Ε.), Αθήνα, Σεπτέμβριος 2001, σελ. 1819-1826.
- Μαριολάκος, Η., Λέκκας, Σ., Αλεξόπουλος, Α., Φουντούλης, Ι., Σπυριδώνος, Ε., Μπαντέκας, Ι., Μαριολάκος, Δ., και Ανδρεαδάκης, Ε., (2001). Τεχνητός εμπλουτισμός του υπόγειου καρστικού υδροφορέα του Φυλλήιου όρους στην περιοχή των Φαρσάλων (Θεσσαλία). Πρακτικά 9<sup>ου</sup> Διεθνούς Συνεδρίου της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας (Ε.Γ.Ε.), Αθήνα, Σεπτέμβριος 2001, σελ. 1843-1850.
- Μαρκαντωνάκος Π. και Ε. Παπαβασιλόπουλος, (2003a). Κεντρικός βιολογικός καθαρισμός Δήμου Ελευθερών – Προμελέτη. Περιφέρεια Ανατολικής Μακεδονίας και Θράκης, Νομός Καβάλας, Δήμος Ελευθερών. Αθήνα.
- Μαρκαντωνάκος Π. και Ε. Παπαβασιλόπουλος, (2003b). Αποχέτευση και κεντρικός βιολογικός καθαρισμός Δήμου Ελευθερών – Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων. Περιφέρεια Ανατολικής Μακεδονίας και Θράκης, Νομός Καβάλας, Δήμος Ελευθερών. Αθήνα.
- Ντελή Ιμπραχίμ Μ., (2012). Εμπλουτισμός των υπόγειων νερών με τη χρήση νερών υποβαθμισμένης ποιότητας. Ενδεικτική σχετική πρόταση στο Ν. Ξάνθης. Μεταπτυχιακή Διατριβή. Μ.Π.Σ. Υδραυλική Μηχανική. Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Δ.Π.Θ., Ξάνθη, 101 σελ.
- Παπαδόπουλος, Φ., Παπαδόπουλος, Α. και Βαφειάδης, Π., (1995). Η επαναπλήρωση του υδροφορέα με επεξεργασμένα αστικά λύματα σαν μία προοπτική αντιμετώπισης της

- εδαφικής καθίζησης της περιοχής Καλοχωρίου Ν. Θεσ/κης. Πρακτικά 6ου Πανελληνίου Συνεδρίου της ΕΥΕ (Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης) 22-26/5/1995, Θεσσαλονίκη, σελ.57-64.
- Παπαοικονόμου, Κ. Φ., Καλαϊτζίδου-Παΐκου, Ν., και Καραμούζης, Δ., (2003). Τεχνητός εμπλουτισμός σε ημιελεύθερους υδροφορείς με πηγάδια. Πρακτικά 9<sup>ου</sup> Πανελληνίου Συνεδρίου της ΕΥΕ (Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης), Αθήνα, Απρίλιος 2000, σελ. 401-408.
- Πλιάκας, Φ. και Διαμαντής, Ι., (1995). Διερεύνηση εφαρμογής τεχνητού εμπλουτισμού σε υδροφορείς πεδινού τμήματος της λεκάνης Βιστωνίδας (Ξάνθης). Πρακτικά 3<sup>ου</sup> Υδρογεωλογικού Συνεδρίου της Ελληνικής Επιτροπής Υδρογεωλογίας της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας (Ε.Γ.Ε.) και του Συνδέσμου Γεωλόγων και Μεταλλειολόγων Κύπρου, 3-5/11/1995, Ηράκλειο Κρήτης, σελ. 443-453.
- Πλιάκας, Φ. και Διαμαντής, Ι., (1999). Εφαρμογές τεχνητού εμπλουτισμού σε ετερογενείς υδροφορείς αλλουβιακών πεδίων. Η περίπτωση του πεδινού τμήματος Ξάνθης. Πρακτικά Ημερίδας που διοργάνωσε η Ελληνική Επιτροπή Υδρογεωλογίας με θέμα “Τεχνητός εμπλουτισμός υπόγειων υδροφορέων” στην Ξάνθη στις 28/5/1999, σελ. 31-56.
- Πλιάκας, Φ. και Ι. Διαμαντής (1998). Ο τεχνητός εμπλουτισμός των υπόγειων νερών και εφαρμογές του στην Ελλάδα και το διεθνή χώρο. Τεχνικά Χρονικά, Επιστημονική Έκδοση του Τ.Ε.Ε. σειρά 1, τόμος 18, τεύχος 1, 1998, σελ. 65-74.
- 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., (2008). Ειδικά θέματα της υδραυλικής των υπόγειων νερών. Υδραυλικά στοιχεία των διαφόρων μεθόδων τεχνητού εμπλουτισμού των υπόγειων νερών – Υδραυλικά στοιχεία της δαλάσσιας διεσόδου σε παράκτιους υδροφόρους – Στοιχεία προσομοίωσης των υπόγειων νερών - Σχεδιασμός συστημάτων υποβιβασμού του υπόγειου νερού σε τεχνικά έργα. Συμπληρωματικές σημειώσεις του μαθήματος: Υδραυλική των Υπογείων Υδάτων, του 8<sup>ου</sup> εξαμήνου σπουδών του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών του Δ.Π.Θ., σελ. 121.
- Πλιάκας, Φ., Διαμαντής, Ι., Πεταλάς, Χ., και Πανίλας, Σ., (2001). Διερεύνηση δυνατότητας εφαρμογής τεχνητού εμπλουτισμού των υδροφόρων πεδινών τμημάτων του Ν. Ροδόπης στη Θράκη. Μια πρώτη προσέγγιση. Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Congress of the Geological Society of Greece, Athens, 26-28/9/2001, Vol. 5, pp. 1923-1932.
- Πλιάκας, Φ., Διαμαντής, Ι., και Πεταλάς, Χ., (1997). Ανασκόπηση και οικονομοτεχνικά στοιχεία των μεθόδων εφαρμογής τεχνητού εμπλουτισμού. Πρακτικά 4<sup>ου</sup> Υδρογεωλογικού Συνεδρίου της Ελληνικής Επιτροπής Υδρογεωλογίας της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας (Ε.Γ.Ε.) και του Συνδέσμου Γεωλόγων και Μεταλλειολόγων Κύπρου, 14-16/11/1997, Θεσσαλονίκη, σελ. 466-482.
- Πλιάκας, Φ., Διαμαντής, Ι., και Πεταλάς, Χ., (1999). Αποτέλεσμα από την εφαρμογή τεχνητού εμπλουτισμού υπόγειου υδροφορέα της περιοχής Πολυσίτου του νομού Ξάνθης με τη μέθοδο επανενεργοποίησης παλιών αδρανοποιημένων κοιτών. Πρακτικά 5<sup>ου</sup> Υδρογεωλογικού Συνεδρίου της Ελληνικής Επιτροπής Υδρογεωλογίας και του Συνδέσμου Γεωλόγων και Μεταλλειολόγων Κύπρου, 12-14/11/1999, Λευκωσία, Κύπρος, σελ. 97-113.
- Πλιάκας, Φ., Διαμαντής, Ι., και Πεταλάς, Χ., (1999). Περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την προτεινόμενη εφαρμογή τεχνητού εμπλουτισμού υπόγειων υδροφορέων περιοχής Ορφανού Καβάλας. Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Conference on Environmental Science and Technology, University of the Aegean, Dept. of Environmental Studies, and Global Nest, Πυθαγόρειο Σάμου, 30/8 – 2/9/1999, Τόμος Γ΄, σελ. 381-390.
- Πλιάκας, Φ., Διαμαντής, Ι., και Πεταλάς, Χ., (2001). Έρευνες και προτάσεις εφαρμογής τεχνητού εμπλουτισμού σε υδροφορείς πεδινών τμημάτων της Ανατολικής Μακεδονίας και της Θράκης. Ανακοινώθηκε στην Ημερίδα για τα 50 χρόνια της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας, με έμφαση στη συμβολή των Γεωεπιστημών στην ανάπτυξη της Περιφέρειας Ανατολικής Μακεδονίας και Θράκης, στην Ξάνθη στις 14/11/2001. Πρακτικά υπό έκδοση.

- Πλιάκας, Φ., Ι. Διαμαντής, et al., (1997). Διερεύνηση καταλλήλων έργων τεχνητού εμπλουτισμού υπόγειων υδροφορέων περιοχής Ορφανού από τον ποταμό Στρυμόνα'. Ερευνητικό πρόγραμμα για λογαριασμό του Νομαρχιακού Διαμερίσματος Καβάλας, Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Δ.Π.Θ., Ξάνθη.
- Πλιάκας, Φ., Πεταλάς, Χ., και Διαμαντής, Ι., (1999). Εφαρμογή του προγράμματος MODFLOW για την προσομοίωση τεχνητά εμπλουτιζόμενου υπόγειου υδροφορέα στην περιοχή Πολυσίτου του νομού Ξάνθης. Πρακτικά 5<sup>ου</sup> Υδρογεωλογικού Συνεδρίου της Ελληνικής Επιτροπής Υδρογεωλογίας της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας (Ε.Γ.Ε.) και του Συνδέσμου Γεωλόγων και Μεταλλειολόγων Κύπρου, 12-14/11/1999, Λευκωσία, Κύπρος, σελ. 133-150.
- Πλιάκας Φ., Ι. Διαμαντής, Ι. Γκιουγκής, Κ. Μιμίδης, Θ. Τζεβελέκης, Κ. Μπέλλος, (2014). Διαχείριση επιφανειακών νερών της ευρύτερης περιοχής του Ανατολικού Δέλτα του Ποταμού Νέστου για τη βέλτιστη ικανοποίηση αρδευτικών αναγκών και τη βελτίωση της ποιότητας των υπόγειων νερών. Ερευνητική Έκθεση για λογαριασμό της Περιφέρειας Ανατολικής Μακεδονίας-Θράκης, Περιφερειακή Ενότητα Ξάνθης, 182 σελ.
- Πλιάκας Φ., Ι. Διαμαντής, Ι. Γκιουγκής, Κ. Μιμίδης, Θ. Τζεβελέκης, Κ. Μπέλλος, Λ. Αυγέρης, (2015). Μελέτη διευθέτησης αρδευτικού, στραγγιστικού δικτύου άξονα Δεκάρχου, Αβάτου, Μαγγάνων για διευκόλυνση αρδευτικών, στραγγιστικών και αναγκών εμπλουτισμού. Ερευνητική Έκθεση προς την Περιφέρεια Ανατολικής Μακεδονίας-Θράκης, Περιφερειακή Ενότητα Ξάνθης, 164 σελ.
- Πουλοβασίλης Α, Μιμίδης Θ, Γιαννουλόπουλος Π., Γερούλης Λ., Ψυχογιού Μ., Αλεξανδρής Σ., Χατζηθωμάς Κ., Κάργας Γ. και Γ. Κώτσαντής (1996), Ερευνητικό πρόγραμμα: "Χρησιμοποίηση για άρδευση του φράγματος του νερού Κιβερίου Αργολίδας και παρακολούθηση και αντιμετώπιση της υπαλμύρωσης των υπόγειων νερών του Αργολικού πεδίου", Τελική Έκθεση. 232 σελ. Γεωπονικό πανεπιστήμιο Αθηνών Εργαστήριο Γεωργικής Υδραυλικής.
- Πουλοβασίλης, Α., Γιαννουλόπουλος, Π., και Ζυμής, Α., (2002). Η εφαρμογή του τεχνητού εμπλουτισμού στο Αργολικό Πεδίο. Πρόσφατα αποτελέσματα και προοπτικές. Πρακτικά 6<sup>ου</sup> Υδρογεωλογικού Συνεδρίου της Ελληνικής Επιτροπής Υδρογεωλογίας και του Συνδέσμου Γεωλόγων και Μεταλλειολόγων Κύπρου, 8-10/11/2002, Ξάνθη, σελ. 59-69.
- Σακκάς, Ι., Ι., Διαμαντής, Φ. Πλιάκας, et al., (1998). Μελέτη τεχνητού εμπλουτισμού υδροφορέων Ξάνθης - Ροδόπης. Ερευνητική Έκθεση για λογαριασμό του Υπουργείου Γεωργίας, Τομείς Υδραυλικών Έργων και Γεωτεχνικής Μηχανικής, Δ.Π.Θ., τεύχη 5, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Δ.Π.Θ., Ξάνθη.
- Στασινόπουλος Κ. και Πουλοβασίλης Α. (1965), Κατατοπιστικό σημείωμα επί του Υδατικού προβλήματος του Αργολικού Πεδίου. ΥΠ.Γ.Ε., Υπηρεσία Εγγείων Βελτιώσεων, Δ/νσις Ι, Τμήμα Ε, 14σελ.
- Στεργίου Μ., (2009). Εμπλουτισμός των υπόγειων νερών με τη χρήση νερών υποβαθμισμένης ποιότητας. Ενδεικτική σχετική πρόταση στη Ν. Πέραμο του Ν. Καβάλας. Διπλωματική εργασία. Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Δ.Π.Θ., Ξάνθη, 133 σελ.
- Τερζίδης, Γ.Α. και Καραμούζης, Δ.Ν., (2001). "Υδραυλική υπόγειων νερών". Έκδοση ΖΗΤΗ, Θεσσαλονίκη.
- Τζιμόπουλος, Χ. και Φωτιάδης Χ., (1983). Τεχνητός εμπλουτισμός υδροφόρων στρωμάτων από σύστημα πηγαδιών. Πρακτικά 1<sup>ου</sup> Πανελληνίου Συνεδρίου της Ε.Υ.Ε. (Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης), Θεσσαλονίκη, 30/5/-1/6/1983. σελ. 101-114.
- ΥΠ.Γ.Ε., (1963-75), Καταστάσεις Μετρήσεως Στάθμης και Αναλύσεως Ύδατος Ερευνητικών Γεωτρήσεων και Φρεάτων. Υπουργείον Γεωργίας, Υπηρεσία Εγγείων Βελτιώσεων, Γ' Περιφ. Δ/νσις Εγγείων Βελτιώσεων, Τομείς Αργολίδος.
- ΥΠΕΚΑ (Υπουργείο Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής), (2013). Στρατηγική Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων. Κατάρτιση Σχεδίων Διαχείρισης των Υ.Δ. Ανατολικής Μακεδονίας και Θράκης σύμφωνα με τις προδιαγραφές της Οδηγίας 60/2000/ΕΚ, κατ' εφαρμογή του Ν.3199/2003 και του ΠΔ 51/2007 – Ενδιάμεση Φάση 2 – Υδατικό Διαμέρισμα Θράκης [GR12], Ειδική Γραμματεία Υδάτων, Αθήνα, [https://dl.dropboxusercontent.com/u/54267798/SMPE\\_GR12.pdf](https://dl.dropboxusercontent.com/u/54267798/SMPE_GR12.pdf).



