



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**  
**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ**

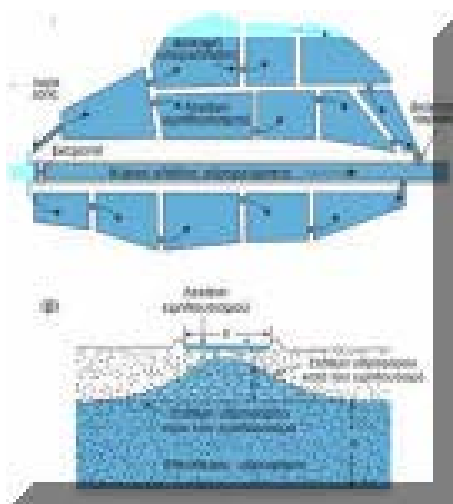
**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΔΙΠΛΩΜΑ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ**  
**ΕΛΕΓΧΟΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ**

**Διατμηματικό Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών: Έλεγχος Ποιότητας  
και Διαχείριση Περιβάλλοντος**

**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΤΕΧΝΗΤΟΣ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΣ ΣΤΟΝ ΔΙΕΘΝΗ  
ΚΑΙ ΕΛΛΑΔΙΚΟ ΧΩΡΟ.  
ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΣΤΗΝ ΚΡΗΤΗ**

**Δρ. Μπουλουκάκης Ηρακλής**



**Επιβλέπων Καθηγητής : ΓΕΩΡΓΙΟΣ Π. ΚΑΡΑΤΖΑΣ**

**Χανιά, Οκτώβριος 2007**

**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΤΕΧΝΗΤΟΣ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΣ ΣΤΟΝ ΔΙΕΘΝΗ  
ΚΑΙ ΕΛΛΑΔΙΚΟ ΧΩΡΟ.  
ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΣΤΗΝ ΚΡΗΤΗ**

**Δρ. Ηρακλής Μπουλουκάκης**

**Επιβλέπων Καθηγητής: ΓΕΩΡΓΙΟΣ Π. ΚΑΡΑΤΖΑΣ**

**Χανιά Οκτώβριος 2007**

---

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

---

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ
2. ΣΚΟΠΟΣ
3. ΠΡΟΫΠΟΘΕΣΕΙΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΟΥ ΤΕΧΝΗΤΟΥ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΥ
4. ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ
  - 4.1. ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ
  - 4.2. ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ
- 5.1. ΜΕΘΟΔΟΙ ΤΕΧΝΗΤΟΥ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΥ
  - 5.1.α ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΥ ΑΠΕΥΘΕΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ
  - 5.1.β. ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΥ ΑΠΕΥΘΕΙΑΣ ΣΤΟ ΥΠΕΔΑΦΟΣ
  - 5.1.γ. ΜΕΘΟΔΟΣ ΣΥΝΔΥΑΣΜΟΥ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΟΥ ΚΑΙ ΥΠΕΔΑ - ΦΙΚΟΥ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΥ
  - 5.1δ. ΜΕΘΟΔΟΣ ΕΜΕΣΟΥ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΥ
- 5.2. ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΣ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΝΕΡΩΝ ΜΕ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΜΕΝΑ ΑΣΤΙΚΑ ΥΓΡΑ ΑΠΟΒΛΗΤΑ
  - 5.2.α ΕΙΣΑΓΩΓΗ
  - 5.2.β ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ SAT ( Soil- Aquifer Treatment Systems)
  - 5.2.γ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ ΠΡΟ ΤΗΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΓΙΑ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟ
  - 5.2.δ ΣΗΜΑΝΤΙΚΑ ΣΧΕΤΙΚΑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ
- 5.3. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΕΡΓΩΝ ΤΕΧΝΗΤΟΥ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΥ –
- 5.4. ΥΔΡΑΥΛΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΑΙ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΤΕΧΝΗΤΟΥ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΥ
6. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΕΧΝΗΤΟΥ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΥ ΣΤΟΝ ΔΙΕΘΝΗ ΧΩΡΟ
7. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΕΧΝΗΤΟΥ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΥ ΣΤΗΝ ΚΥΠΡΟ
8. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΕΧΝΗΤΟΥ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΥ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ
  - 8.1. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΕΧΝΗΤΟΥ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΥ ΣΤΟ ΑΡΓΟΛΙΚΟ ΠΕΔΙΟ.
  - 8.2. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΕΧΝΗΤΟΥ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΣ ΣΕ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΠΕΔΙΝΩΝ ΤΜΗΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΑΝΑΤΟΛΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΘΡΑΚΗΣ
9. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΕΧΝΗΤΟΥ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΥ ΣΤΗΝ ΚΡΗΤΗ
  - 9.1 . ΔΗΜΟΣ ΜΑΛΙΩΝ Δ.Δ ΜΟΧΟΥ ΝΟΜΟΥ ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ
  - 9.2. ΛΕΚΑΝΗ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΕΣΑΡΑΣ –ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΣ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΤΕΤΑΡΤΟΓΕΝΩΝ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ ΑΠΟ ΧΕΙΜΑΡΙΚΕΣ ΑΠΟΡΡΟΕΣ ΤΟΥ ΓΕΡΟΠΟΤΑΜΟΥ
  - 9.3. ΔΗΜΟΣ ΒΙΑΝΝΟΥ
    - Δ.Δ. ΕΜΠΑΡΟΥ
    - Δ.Δ. ΚΕΦΑΛΟΦΡΥΣΙΟΥ , ΣΥΜΗΣ ,ΟΙΚΙΣΜ. ΑΡΒΗΣ ΔΗΜΟΥ ΒΙΑΝΝΟΥ.
  - 9.4. ΔΗΜΟΣ ΚΑΣΤΕΛΛΙΟΥ ΠΕΔΙΑΔΑΣ Δ.Δ ΓΕΡΑΚΙΟΥ
  - 9.5. ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ (ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΣ ΥΔΡΟΦΟΡΟΥ ΟΡΙΖΟΝΤΑ ΜΕ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΜΕΝΑ ΛΥΜΑΤΑ ΜΕΤΑ ΑΠΟ ΗΛΕΚΤΡΟΧΗΜΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟ)
  - 9.6.ΔΗΜΟΣ ΜΑΚΡΥ ΓΙΑΛΟΥ Δ.Δ. ΑΓΙΟΥ ΣΤΕΦΑΝΟΥ
10. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο τεχνητός εμπλουτισμός των υδροφόρων στοχεύει, κυρίως στην αποθήκευση πλεονασμάτων επιφανειακών νερών ή στην ενίσχυση των αποθεμάτων νερού του υδροφορέα και προστασία τους από την υπεράντληση ή ρύπανση, που πολλές φορές οφείλεται στη διείσδυση θαλάσσιου νερού σε παράκτιους υδροφορείς. Αναλυτικότερα, ο εμπλουτισμός των υπόγειων υδροφόρων εφαρμόζεται για:

α) την ελάττωση της πτώσης του υδροφόρου ορίζοντα  
β) την προστασία του υπόγειου νερού σε παράκτιους υδροφορείς από τη διείσδυση και την ανάμειξή του με θαλάσσιο νερό και  
γ) στην αποθήκευση νερού που ανακτάται κατά την επεξεργασία των υγρών αποβλήτων (τριτοβάθμια επεξεργασία) ή άλλων επιφανειακών νερών

Ως εκ τούτου, η συνεχώς 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 μερικώς 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. 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 (Boywer, 1995a)

## 2. ΣΚΟΠΟΣ

Εκτός από τη φυσική τροφοδοσία των υδροφόρων η οποία γίνεται από τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα ένα μέρος των οποίων κατεισδύει στο υπέδαφος και εμπλουτίζει τα υδροφόρα αλλά και από τα επιφανειακά νερά των χειμάρρων, ρευμάτων, ποταμών και λιμνών τα οποία διηθούνε φθάνουν στην στάθμη των υπογείων νερών και τα εμπλουτίζουν. Στις περιπτώσεις όμως υπερεκμετάλλευσης των υδροφορέων ο φυσικός εμπλουτισμός μπορεί να χρειασθεί δεκαετίες για την φυσική τους επαναπλήρωση ( Καλλέργης 1986 ), τότε για την ενίσχυση του υδατικού ισοζυγίου των υπόγειων νερών εφαρμόζεται ο τεχνητός εμπλουτισμός (groundwater recharge).



#### Φωτογραφία 1

Φυσικός εμπλουτισμός καρστικού υδροφορέα ασβεστολίθων (Ομαλός Βιάννου)

Ο τεχνητός εμπλουτισμός συνίσταται στην αύξηση του ρυθμού ανανέωσης του υπόγειου νερού των υδροφόρων στρωμάτων με χρησιμοποίηση περίσσεια φυσικού ή επεξεργασμένου νερού.

Σκοπός του τεχνικού εμπλουτισμού είναι ένας από τους ποιο κάτω ή συνδυασμός περισσότερων του ενός από αυτούς .

1<sup>ο</sup> Η επαναπλήρωση εξαντλημένων υπόγειων υδροφορέων από την εντατική εκμετάλλευσή τους.

2<sup>ο</sup> Η αποθήκευση ποσοτήτων νερού για μελλοντική χρήση.

3<sup>ο</sup> Η ποιοτική αναβάθμιση υπογείων νερών.

4<sup>ο</sup> Η αποκατάσταση της υδρολογικής ισορροπίας υδροφόρων στρωμάτων που διαταράχθηκε λόγω υπερεκμετάλλευσης ή λόγω έμμεσης επιζήμιας ανθρώπινης παρέμβασης ( κατασκευή δρόμων, διευθέτησης χειμάρων, καταστροφές δασών κλπ).

5<sup>ο</sup> Η πρόκληση ανόδου της στάθμης σε παράκτια υδροφόρα στρώματα για την αποφυγή ή την αναχαίτιση διείσδυσης της θάλασσας και υφαλμύρισης των υδροφορέων π.χ βόρεια παράλια Κρήτης.

6<sup>ο</sup> Η άνοδος ή έστω η διατήρηση της στάθμης υδροφόρων στρωμάτων για την αποφυγή συνίζησης και υποχώρησης της επιφανείας του εδάφους ( καθίζηση ) π.χ Καλοχώρι Θεσσαλονίκης, Αρχάνες Ηρακλείου Κρήτης κλπ.

7<sup>ο</sup> Η συνδυασμένη διαχείριση υπόγειων και επιφανειακών νερών,

8<sup>ο</sup> Η αντιμετώπιση προβλημάτων που έχουν σχέση με την ποσότητα και την ποιότητα του υπόγειου νερού και τη διείσδυση της θάλασσας,

9<sup>ov</sup> Η επεξεργασία και αποθήκευση χρησιμοποιούμενων νερών προκειμένου να ξαναχρησιμοποιηθούν.

10<sup>ov</sup> Η εξοικονόμηση ή παραγωγή ενέργειας με τη μορφή ζεστού ή κρύου νερού σε περιοχές γεωθερμικών πεδίων.

11<sup>ov</sup> Ο έλεγχος των πλημμυρών.

12<sup>ov</sup> Η άντληση πετρελαίου με μικρότερο κόστος.

13<sup>ov</sup> Δημιουργία προσωρινής υπόγειας αποθήκευσης νερού για εκμετάλλευση ως οικονομικός πόρος.

### **3. ΠΡΟΫΠΟΘΕΣΕΙΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΟΥ ΤΕΧΝΗΤΟΥ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΥ**

1ον Να υπάρχει σε επαρκή ποσότητα το νερό και να είναι διαθέσιμο . Το νερό αυτό μπορεί να προέρχεται από ποταμοχειμάρρους, από πηγές ή τέλος από επεξεργασμένες εκροές βιολογικών καθαρισμών.

2ον Η ποσότητα του νερού εμπλουτισμού να είναι κατάλληλη και χημικά συμβατή με αυτή του υπογείου.

3ον Να υπάρχουν κατάλληλες γεωλογικές συνθήκες ( επιφάνειες και υπέδαφος με μεγάλη περατότητα) .

4ον Να υπάρχουν περιοχές κατάλληλες γεωμορφολογικά και να είναι διαθέσιμες.

5ον Το κατασκευαστικό και λειτουργικό κόστος των έργων υποδομής καθώς και το κόστος συντήρησής τους να μην είναι οικονομικά ασύμφορο.

### **4. ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ**

#### **4.1 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ**

Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις από τα συνοδά έργα τεχνικού εμπλουτισμού αναφέρονται σε επιπτώσεις αυτού καθ' αυτού των έργων στο περιβάλλον (εκσκαφές, διάθεση υλικών εκσκαφής), σε επιπτώσεις στο φυσικό και δομημένο περιβάλλον ( αλλαγές χρήσεων γης, επηρεασμός οικοσυστημάτων επιπτώσεις στην πυκνότητα πληθυσμού της περιοχής, αλλαγές στο είδος καλλιέργειας κ. ά)

Ο τεχνικός εμπλουτισμός περιβαλλοντικά έχει και θετικές επιπτώσεις

1<sup>ov</sup> Βελτίωση της ποιότητας του υπογείου νερού

2<sup>ov</sup> Προστασία της ύπαρξης και της λειτουργίας πηγών.

3<sup>ov</sup> Αποφυγή συνίζησης και υποβάθμισης του υδροφορέων.

4<sup>ov</sup> Αναχαίτιση διείσδυσης θαλασσινού νερού στα παράκτια υδροφόρα στρώματα.

5<sup>ov</sup> Οι υπόγειοι ταμιευτήρες δεν διατρέχουν τους κινδύνους φυσικών καταστροφών των επιφανειακών ταμιευτήρων ( κατολισθήσεις, πλημμύρες, άμεσες μολύνσεις)

6<sup>ov</sup> Μειώνονται οι απώλειες νερού από εξατμίσεις καθώς η αποθήκευση του νερού γίνεται υπόγεια.

## 4.2 ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ

1<sup>ov</sup> Απαιτείται συνεχής και επιμελής παρακολούθηση των συστημάτων τεχνικού εμπλουτισμού.

2<sup>ov</sup> Υπάρχει κίνδυνος μόλυνσης –ρύπανσης υπογείου νερού , αν έστω επεισοδικά χρησιμοποιηθεί μολυσμένο- ρυπασμένο νερό.

3<sup>ov</sup> Η μεγάλη επιφάνεια που απαιτείται για την λειτουργία και συντήρηση ενός συστήματος διάθεσης υπογείου νερού.

4<sup>ov</sup> Δεν συναντώνται συχνά στη φύση κατάλληλες συνθήκες υπο οικονομικά συμφέροντες όρους για την εφαρμογή του τεχνικού εμπλουτισμού.

5<sup>ov</sup> Δυσκολία απομάκρυνσης των αλάτων ασβεστίου , μαγνησίου, σιδήρου, μαγγανίου ή άλλων στοιχείων που πιθανόν υπάρχουν στο νερό εμπλουτισμού.

6<sup>ov</sup> Δυσκολία αποτελεσματικής αντιμετώπισης του Φαινομένου clogging ( απόφραξη των πόρων του εδάφους ) το φαινόμενο αυτό παρατηρείται λόγω της καθίζησης διαλυμένων στερεών , της ανάπτυξης φυτικών οργανισμών και βακτηρίων όταν το νερό είναι πλούσιο σε θρεπτικά συστατικά και τέλος της βαθμιαίας ανάπτυξης διαλυμένων ή παρασυρμένων από τη ροή αερίων καθώς το νερό περνάει μέσα από ανοίγματα. Εάν το υλικό της απόφραξης αποτελείται από ιλύ , άργιλο ή άλλες μη οργανικές ύλες τότε θα πρέπει να απομακρύνεται με απόξεση για την βέλτιστη απόδοση της ταχύτητας διήθησης.

## 5. ΜΕΘΟΔΟΙ ΤΕΧΝΗΤΟΥ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΥ

Για την εφαρμογή του εμπλουτισμού των υδροφόρων έχουν αναπτυχθεί πολλές μέθοδοι όπως:

### 5.1α Μέθοδοι εμπλουτισμού απευθείας στην επιφάνεια

- Μέθοδος λεκάνης
- Μέθοδος τάφρων και αυλάκων
- Μέθοδος πλημμύρας
- Μέθοδος διευθέτησης υδρορρεύματος
- Επανενεργοποίηση ή αύξηση της ροής υδρορρεύματος
- Μέθοδος άρδευσης

### 5.1β Μέθοδοι εμπλουτισμού απευθείας στο υπέδαφος

- Μέθοδος με φυσικά ανοίγματα
- Μέθοδος ορυγμάτων
- Μέθοδος αντίστροφης αποστράγγισης
- Μέθοδος με γεωτρήσεις εμπλουτισμού
- Μέθοδος με γεωτρήσεις αποθήκευσης - άντλησης
- Μέθοδος με πηγάδια στην ακόρεστη ζώνη

### **5.1γ Συνδυασμοί επιφανειακού και υπεδαφικού εμπλουτισμού**

- Συνδυασμός λεκάνης εμπλουτισμού και αποστραγγιστικού δικτύου
- Συνδυασμός λεκανών και ορυγμάτων, εκσκαφών ή γεωτρήσεων

### **5.1δ Μέθοδοι έμμεσου εμπλουτισμού**

- Επαγωγικός εμπλουτισμός
- Συμπωματικός εμπλουτισμός
- Διευθέτηση υδροφορέων

Η επιλογή της πιο κατάλληλης μεθόδου είναι συνάρτηση (Καλλέργης, 1986, Pettyjohn, 1981):

- των 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.
- Πρίν την εφαρμογή του Τ.Ε. σε μια περιοχή απαιτείται η εκπόνηση ολοκληρωμένης υδρογεωλογικής έρευνας που περιλαμβάνει:
- Την γεωλογία, στρωματογραφία, τεκτονική
  - Είδος υδροφορέων, γεωμετρία, αδιαπέραστα όρια
  - Πιεζομετρία και διεύθυνση υπόγειας ροής
  - Συνθήκες τροφοδοσίας
  - Υπολογισμός υδραυλικών παραμέτρων από δοκιμαστικές αντλήσεις
  - Καθορισμός ζωνών αυξημένης υδρυλικής αγωγιμότητας
  - Κατάσταση εκμετάλλευσης των υπογείων νερών
  - Νομικά προβλήματα μεταφοράς νερού στην περιοχή για εμπλουτισμό.

**Τα πλεονεκτήματα της εφαρμογής του Τ.Ε. και κυρίως της χρήσης του υπόγειου νερού σε συστήματα δημόσιας διάθεσής του, μπορεί να επισκιασθούν 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 υδροφορείς δεν μπορούν να αποστραγγιστούν τόσο εύκολα όπως οι αντίστοιχοι επιφανειακοί ταμιευτήρες,
- το μεγάλο σχετικά κόστος μιας ενδεχόμενης επέκτασης των συστημάτων διάθεσης υπόγειου νερού.

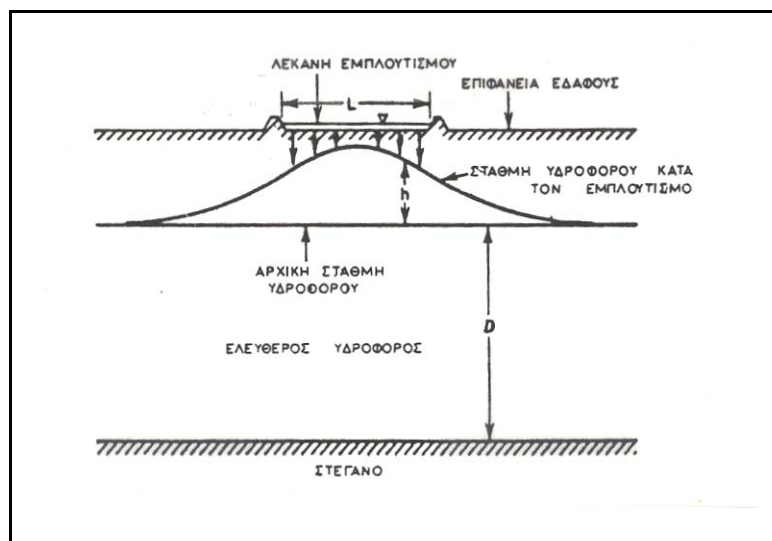


### **5.1α Μέθοδοι εμπλουτισμού απευθείας στην επιφάνεια (direct-surface recharge)**

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 ύψωμα (σχ.1.5.1α). Η γεωμετρία του υψώματος εξαρτάται από εκείνη της λεκάνης, τα χαρακτηριστικά του υδροφόρου ορίζοντα, την παροχή και τη διάρκεια εμπλουτισμού (Bauman, 1965, Bittinger and Tzeleuse, 1965, Hantush, 1967, Haskell and Bianchi, 1965).

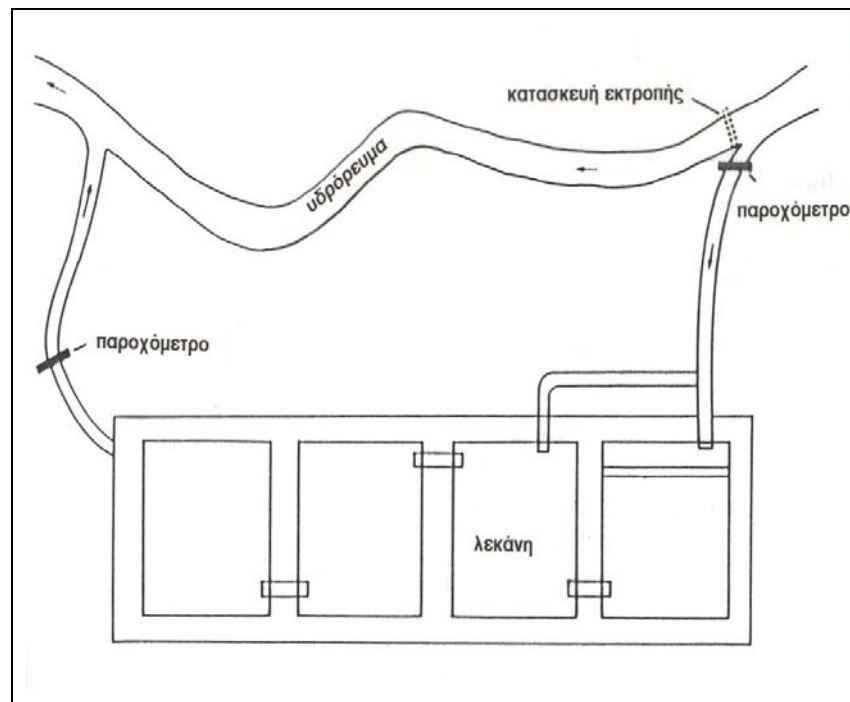


Σχήμα 1.5.1α Διάγραμμα ανύψωσης της υδροστατικής επιφάνειας κάτω από μια τετράγωνη λεκάνη εμπλουτισμού (Todd, 1980, Καλλέργης 1986).

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. 2.5.1α). 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 τίθενται εκτός λειτουργίας λεκάνες που χρειάζονται συντήρηση (ξύσιμο, σκάψιμο, αναμόχλευση) χωρίς να παρεμποδίζεται η όλη λειτουργία του έργου εμπλουτισμού.



Σχήμα 2.5.1α 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 ιλύ και γενικά από στερεά αιωρούμενα υλικά για να μην γίνει απόφραξη των πόρων της λεκάνης και μείωση της υδροπερατότητας της, επίσης μπορεί να βελτιωθεί με την προσθήκη οργανικών και χημικών ουσιών στο νερό ( χλωρίωση του νερού 2-5mg/l CL είναι απαραίτητη ). Ακόμα, μπορεί να βελτιωθεί και με την καλλιέργεια βλάστησης στην επιφάνεια κατάκλυσης 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,

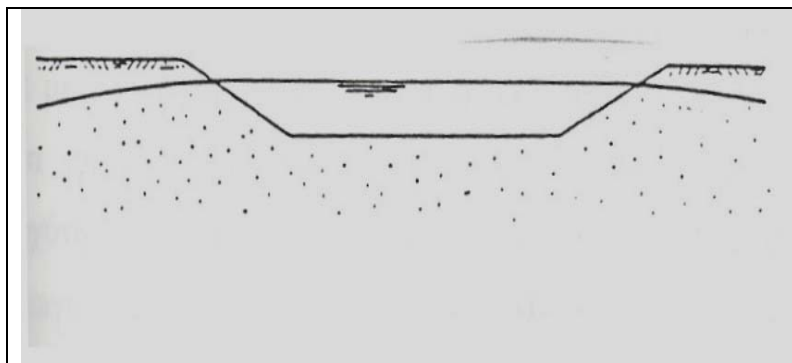
- τη δυνατότητα αποθήκευσης περιοδικών πλημμυρών για μελλοντική χρήση τους με σκοπό τον εμπλουτισμό,
- την αντιμετώπιση του φαινομένου clogging (Oaksford, 1985).

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**

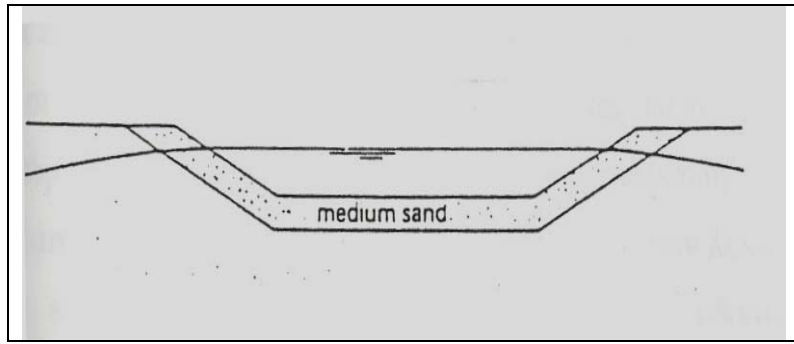
Συνήθως οι θέσεις των λεκανών επιλέγονται κοντά σε υδρορρεύματα και σχηματίζονται δύο οι περισσότερες σε σειρά με εκσκαφές ή και κατασκευή αναχωμάτων. Κατά την κατασκευή των λεκανών το έδαφος σκάβεται τόσο όσο να αφαιρεθεί κάποιου πάχους επιφανειακό εδαφικό στρώμα. Η έκτασή τους κυμαίνεται από λίγες 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. 3.5.1α) (Huisman and Olsthoorn, 1983).



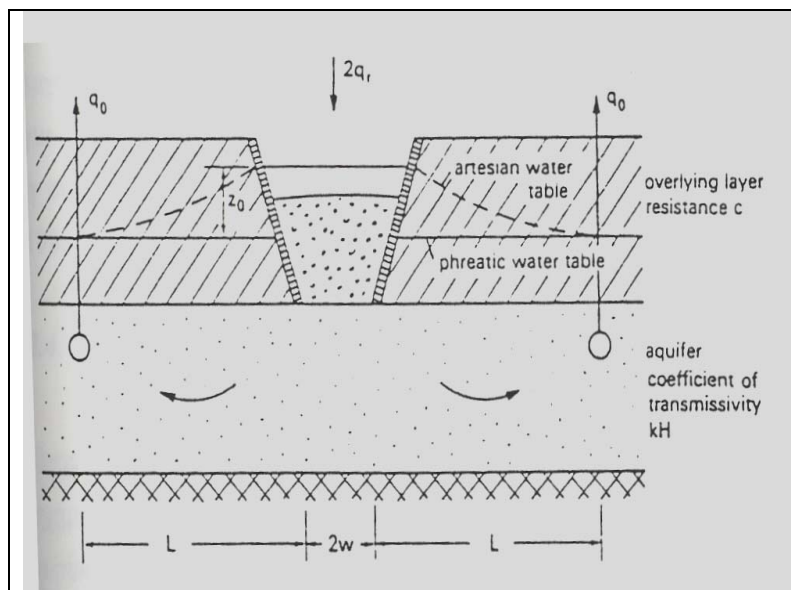
Σχήμα 3.5.1α Απλή λεκάνη κατάκλυσης (Huisman and Olsthoorn, 1983).

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. 4.5.1α).



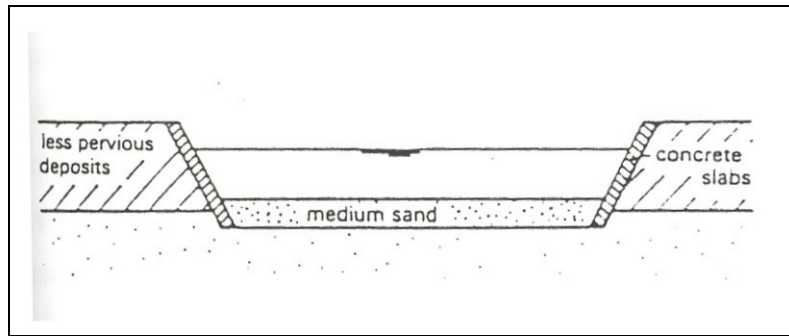
Σχήμα 4.5.1α Λεκάνη κατάκλισης με στρώμα άμμου στο πυθμένα και τα πρανή (Huisman and Olsthoorn, 1983).

Το ίδιο στρώμα μεσόκοκκης άμμου μπορεί να τοποθετηθεί πάνω από ένα υδροφορέα από χονδρόκοκκο υλικό ή ρωγματωμένο 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 (υπο πίεση) (σχ. 5.1α),



Σχήμα 5.5.1α Εμπλουτισμός σε υδροφόρο υπό πίεση με δυνατότητα κίνησης του νερού (Huisman and Olsthoorn, 1983).

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 κυματισμού στις δεξαμενές και να προκαλέσει απόφραξη των πόρων χρησιμοποιούνται συχνά τοίχοι αντιστήριξης (σχ. 6.5.1α).



Σχήμα 6.5.1α Λεκάνη κατάκλυσης με τοίχους αντιστήριξης (Huisman and Olsthoorn, 1983).

Τα περατά εδάφη συνήθως έχουν υδραυλικές αγωγιμότητες που κυμαίνονται από 1 m/ημέρα (λεπτή αργιλώδη 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 υδραυλική αγωγιμότητα των υποκείμενων εδαφικών υλικών. Οι πραγματικές ταχύτητες διήθησης κατά την κατάκλυση ωστόσο γενικώς κυμαίνονται από 0,1 - 3 m/ημέρα. Για αλλουβιακά εδάφη με κλίση 0,1-10% , η ταχύτητα με την οποία διηθείται το νερά ανα ημέρα δίνεται από την σχέση (Todd, 1980 )

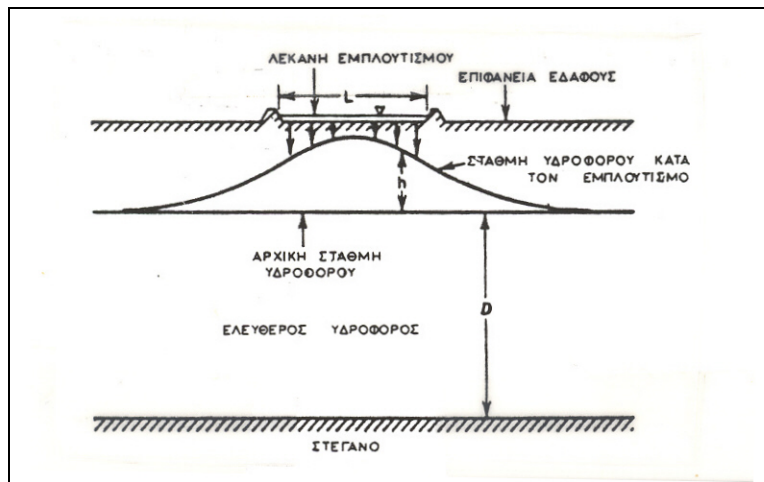
$$W = 0,65 + 0,56j$$

Όπου j η κλίση του εδάφους %

Οι λεκάνες εμπλουτισμού απαιτούν περατά εδάφη, η αναγνώριση περιοχών με τέτοια εδάφη και η επιλογή της τοποθεσίας είναι πολύ σημαντική. Γενικά για την εξέταση της περατότητας χρησιμοποιούνται διαφόρων τύπων περατόμετρα, ή με πιο αξιόπιστες μεθόδους όπως δοκιμές διήθησης με μετρήσεις της υδραυλικής αγωγιμότητας του εδάφους στη ακόρεστη ζώνη. 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. 7.5.1α) (Bouwer, 1989).



Σχήμα 7.5.1α Διάγραμμα ανύψωσης της υδροστατικής επιφάνειας κάτω από μια λεκάνη εμπλουτισμού (Todd, 1980, Καλλέργης, 1986).

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 υδροφορέας θα πρέπει να διαθέτει ικανοποιητική μεταβιβαστικότητα ώστε να κρατηθεί το ύψωμα 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.

### **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 ερευνούνται 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.

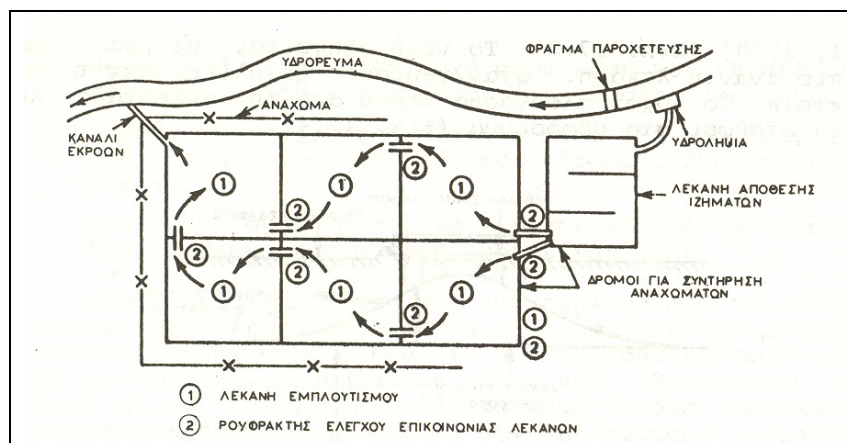
Υπάρχουν επίσης περιβαλλοντολογικοί παράγοντες που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη (έντομα, υδρόβια βλάστηση, δυσάρεστες οσμές).

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. 8.5.1α).



Σχήμα 8.5.1α Τυπικό έργο εμπλουτισμού με πολλαπλές λεκάνες (Καλλέργης, 1986).

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 της διατάξεις κατάκλυσης 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 αποξηραθούν 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.

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 συσσώματά 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 άλγη 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 άλγη λόγω φωτοσύνθεσης απορροφούν  $\text{CO}_2$  από το νερό, με αποτέλεσμα να αυξάνεται το PH του σε τιμές 9-10. Τέτοια νερά όμως αποβάλλουν ως ίζημα  $\text{CaCO}_3$  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 περιφράξη 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**

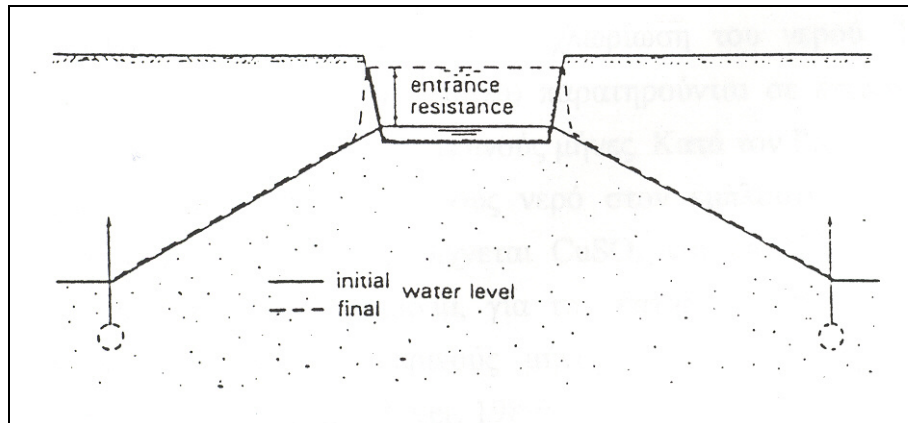
Το μεγαλύτερο πρόβλημα στην εφαρμογή του εμπλουτισμού παραμένει η απόφραξη των πόρων (clogging). Ιδιαίτερα αισθητό είναι το φαινόμενο αυτό στις λεκάνες εμπλουτισμού.

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 , 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. 9.5.1α).



Σχήμα 9.5.1α Επιρροή της απόφραξης (Huisman and Olsthoorn, 1983).

Στην εφαρμογή του εμπλουτισμού για αστική χρήση η απόφραξη των λεκανών κατάκλυσης 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 συσσωμάτων 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 παγιεύσει 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 κατάκλυσης 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 ολόκληρη η οργανική στρώση μέχρι το βάθος του σβάρνισματος 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 καθαρίσμα 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 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 σ' 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/l. 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/l. Χαμηλός δείκτης SAR και υψηλός δείκτης TDS ευνοούν τη συσσωμάτωση (flocculation) της άργιλου 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

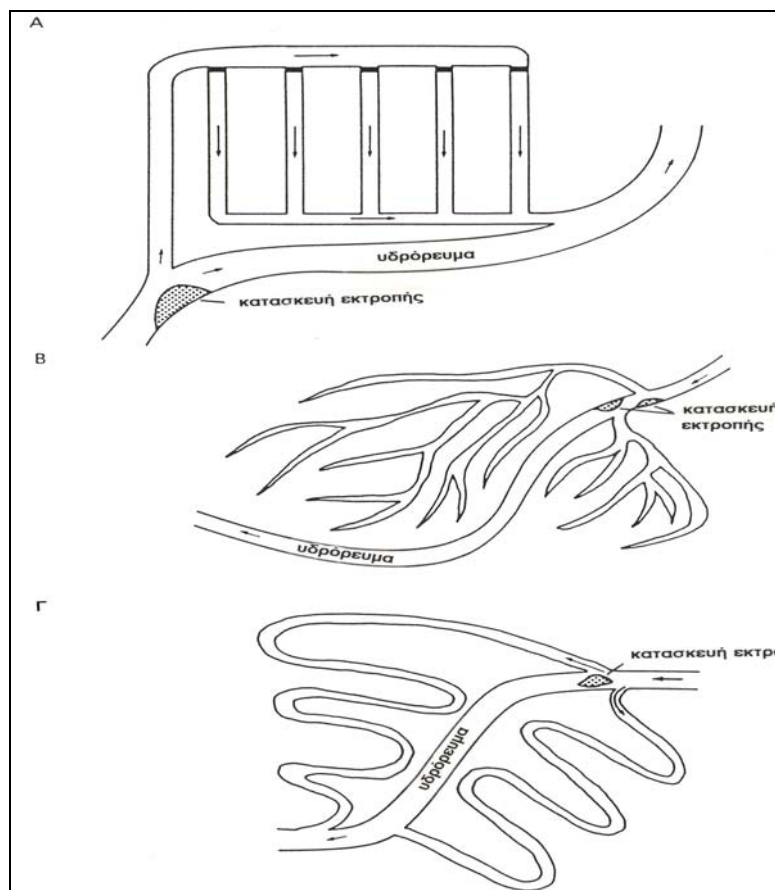
TDS, μπορούν να κινητοποιηθούν σωματίδια αργίλου στο σύστημα του υδροφόρου. Τα σωματίδια αυτά μπορούν να μετακινηθούν μέσω του υδροφόρου προς τα πηγάδια και να αυξήσουν τη θολότητα του αντλούμενου νερού.

### **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. 10.5.1α). Το σύστημα αυτό των τάφρων και αυλάκων μπορεί να έχει (Καλλέργης, 1986, Muckel, 1959):

- μαιανδρική μορφή (ακολουθώντας τις ισοϋψείς),
- 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.



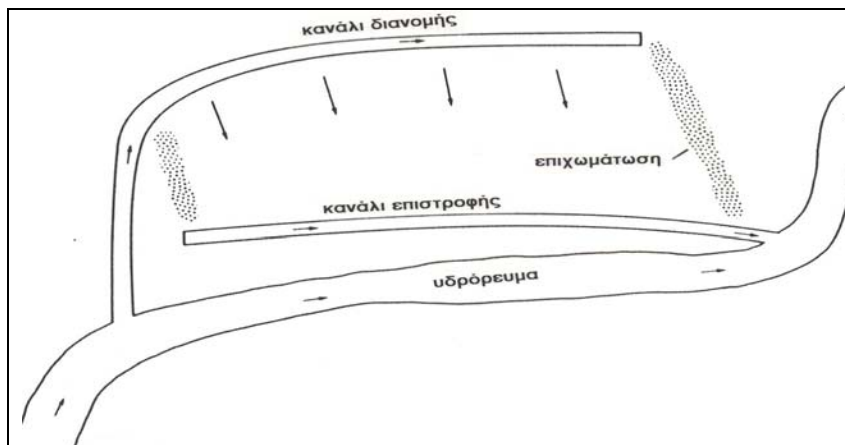
Σχήμα 10.5.1α Τυπικό σύστημα τεχνητού εμπλουτισμού τάφρων και αυλάκων Α.Πλευρική διάταξη Β. Δενδριτική διάταξη Γ. Μαιανδρική διάταξη (Asano, 1985, Καλλέργης 1986).

### **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. 12). 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 11.5.1α Τυπική διάταξη συστήματος εμπλουτισμού με πλημμύρα (Asano, 1985, Καλλέργης, 1986).

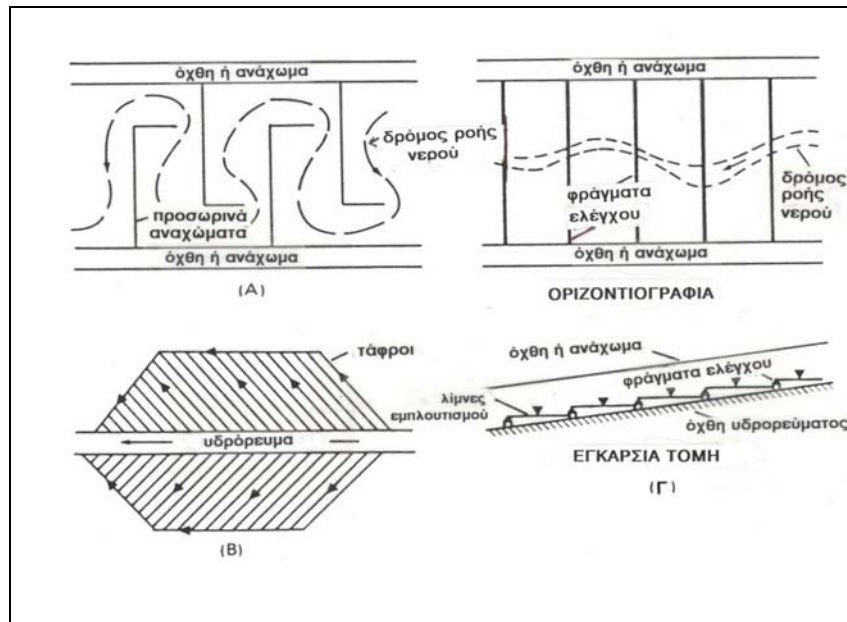
### **Μέθοδος διευθέτησης υδρορρεύματος (*stream - channel modification*)**

Με τη μέθοδο αυτή επιχειρείται η αύξηση της ικανότητας διήθησης με την κατάλληλη διευθέτηση της κοίτης υδρορρεύματος 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 υδρορρεύματος (σχ. 12.5.1α). 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 υδρορρεύματος 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 υδρορρεύματος (stream flow reactivation or augmentation)**

Η μέθοδος αυτή επιχειρεί την εφαρμογή του εμπλουτισμού στην αρχή της πηγής τροφοδοσίας υδρορρεύματος 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 12.5.1α Τεχνητός εμπλουτισμός με διευθέτηση υδρορεύματος 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. 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).

### **5.1β Μέθοδοι εμπλουτισμού απευθείας στο υπέδαφος (Direct - subsurface recharge)**

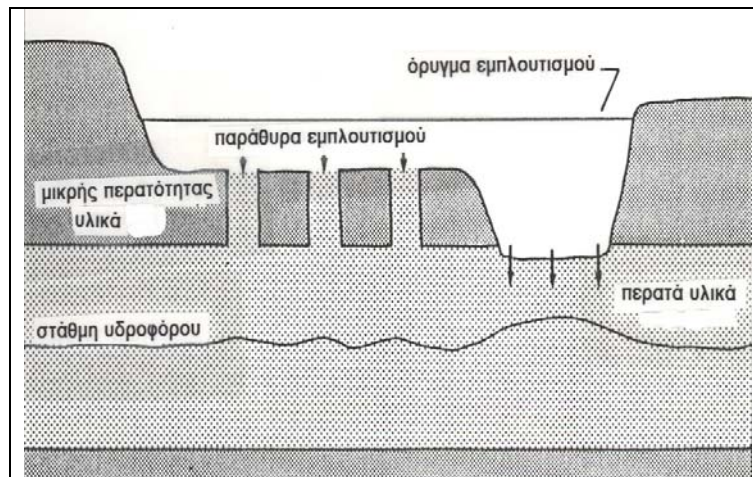
Οι μέθοδοι αυτές αποσκοπούν στην επίτευξη απευθείας τροφοδοσίας των υδροφόρων. Συνήθως χρησιμοποιούνται όταν ένα ημιπερατό υπό πίεση υδροφόρο στρώμα διαχωρίζει την πηγή τροφοδοσίας του νερού εμπλουτισμού από τον υδροφόρο που πρόκειται να εμπλουτισθεί. Σε όλες αυτές τις μεθόδους δίνεται μεγάλη σημασία 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. 13.51β) (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 χαλκώδη ορύγματα.



Σχήμα 13.5.1β 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).

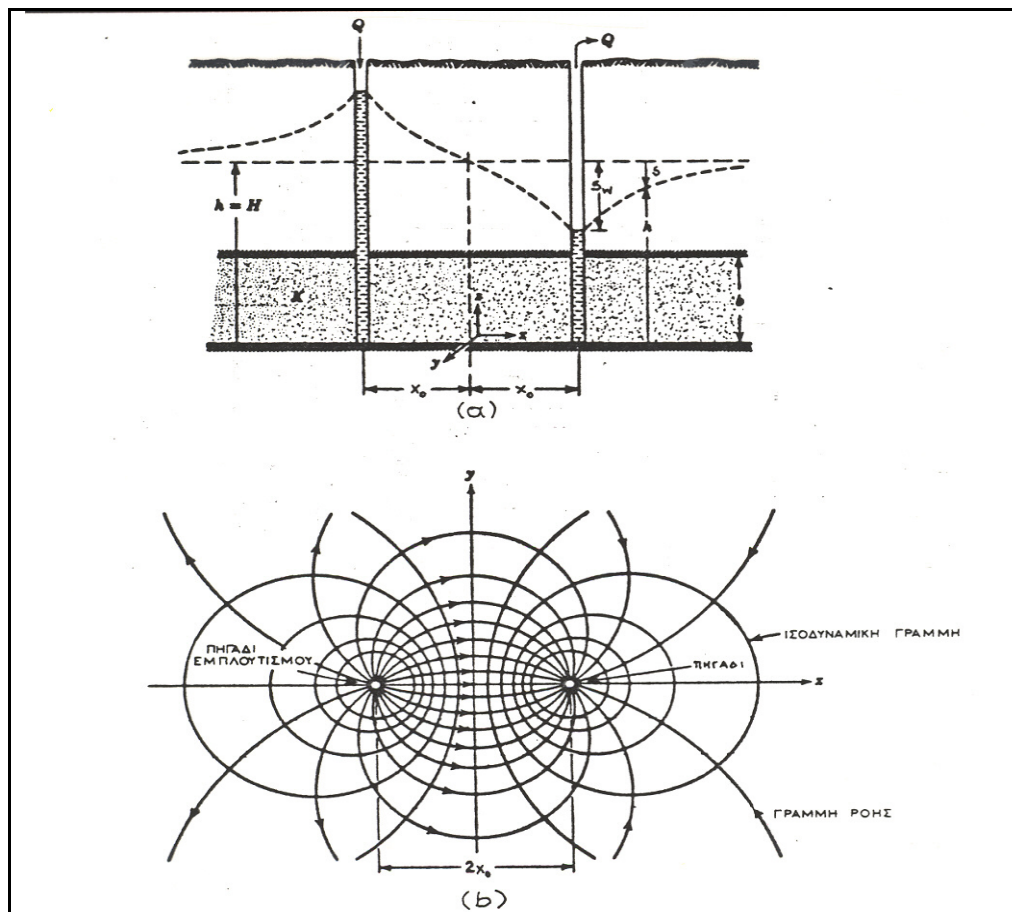
### ***Μέθοδος με γεωτρήσεις εμπλουτισμού (recharge well method)***

Σαν 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. 14.5.1β). 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.

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 καρστικά 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).



Σχήμα 14.5.1β (α) Πηγάδι άντλησης και εμπλουτισμού σε αρτεσιανό υδροφόρο και (β) δίκτυο ροής του συστήματος των δύο πηγαδιών (Καλλέργης, 1986).

Σε επίπεδες παράκτιες περιοχές, όπου δεν προσφέρεται η κατασκευή ταμειυτήρων 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 Τ.Ε. 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)***

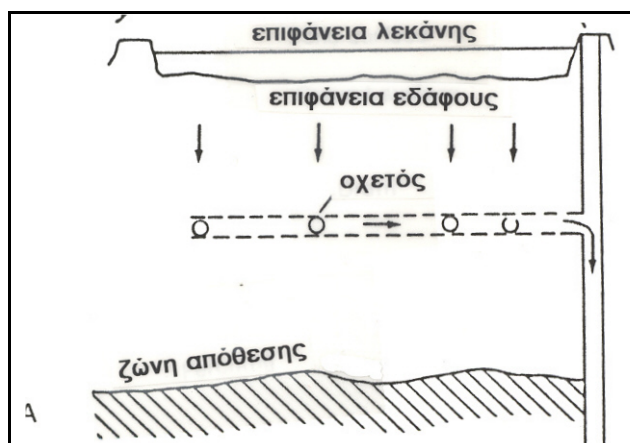
Τα πηγάδια στην ακόρεστη ζώνη είναι πηγάδια που διατρέχουν την ακόρεστη ζώνη φτάνοντας σε βάθος 10-50 m και έχουν διάμετρο 1-2 m. Χρησιμοποιούνται για την απόθεση και διήθηση των απορροών των καταιγίδων σε περιοχές με σχετικά χαμηλές βροχοπτώσεις και χωρίς εγκαταστάσεις αποχέτευσης όμβριων νερών. Τα 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).

### **5.1γ 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. 15.5.1γ) (Bianchi et al., 1978).



Σχήμα 15.5.1γ Υπεδαφικό σύστημα συγκέντρωσης και αποστράγγισης του νερού, συνδεδεμένο με ένα πηγάδι εμπλουτισμού (Bianchi et al., 1978, Καλλέργης 1986).

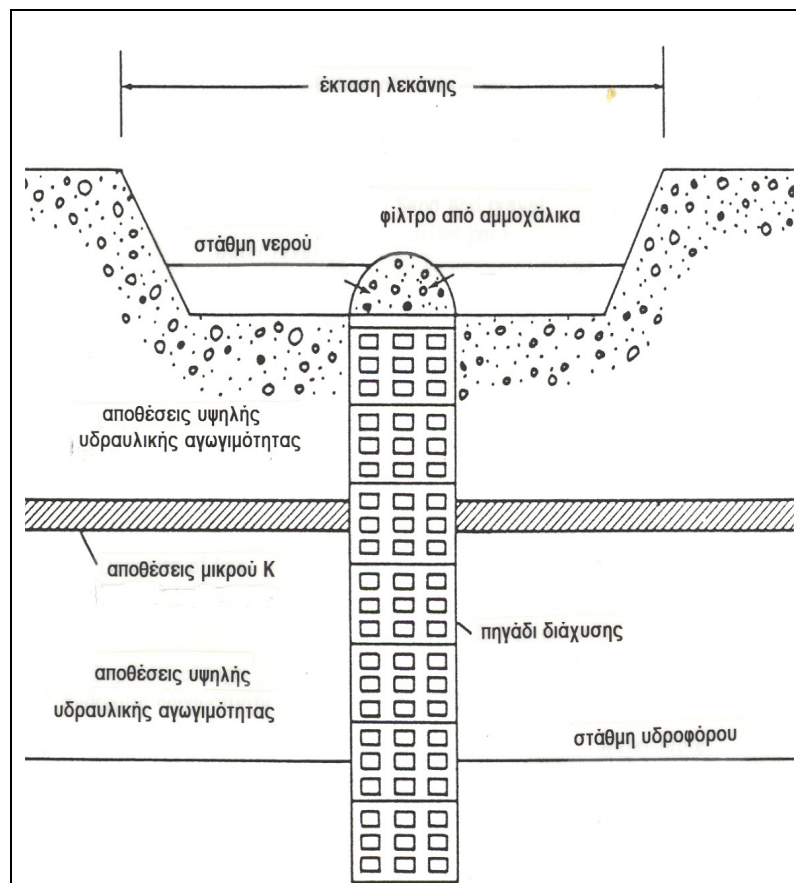
#### **Συνδυασμός λεκανών και ορυγμάτων, εκσκαφών ή γεωτρήσεων (basins with pits, shafts, or wells)**

Ο συνδυασμός αυτός επιτρέπει στις λεκάνες να αποθηκεύσουν νερό και στη συνέχεια στα ορύγματα, τις εκσκαφές ή τις γεωτρήσεις (σχ. 16.5.1γ) να διανείμουν το νερό γρήγορα σε περισσότερες περατές ζώνες που υπόκεινται των περιοχών εμπλουτισμού (Aronson et al., 1974, Pettyjohn, 1968).



### **5.1δ 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.

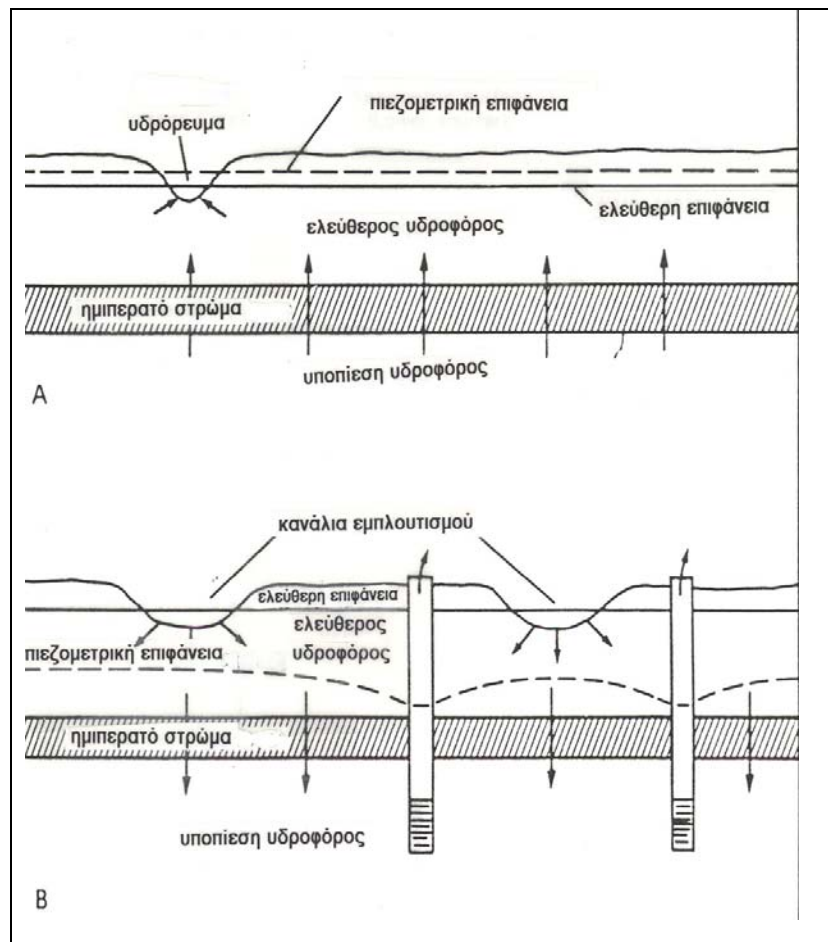


Σχήμα 16.5.1γ Συνδυασμός λεκάνης και γεώτρησης εμπλουτισμού (Asano, 1985, Καλλέργης, 1986).

### ***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. 17.5.1δ). 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 μεταβιβαστικότητα 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 υδρορρέυμα 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 17.5.1δ 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 διαρροή τους, (Keller, 1933, Ratnopakhi, 1978, Pettyjohn, 1981), ή με τεχνικές που δημιουργούν επιπρόσθετη αποθηκευτική ικανότητα όπως με τη δημιουργία τεχνητών υδροφόρων μικρής κλίμακας. Στην τελευταία περίπτωση, οι σημαντικοί παράγοντες που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη είναι:

- (α) η επιλογή καταλλήλων διαστάσεων λεκάνης αποστράγγισης,
- (β) η μέριμνα για τη διατήρηση της ικανότητας αποθήκευσης στα επιθυμητά όρια, και
- (γ) η πρόληψη φαινομένων clogging (Helweg et al., 1978).

## **5.2 ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΣ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΝΕΡΩΝ ΜΕ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΜΕΝΑ ΑΣΤΙΚΑ ΥΓΡΑ ΑΠΟΒΛΗΤΑ**

### **5.2.α 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 απόληψη 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).

## **5.2.β Συστήματα SAT (Soil-Aquifer Treatment Systems)**

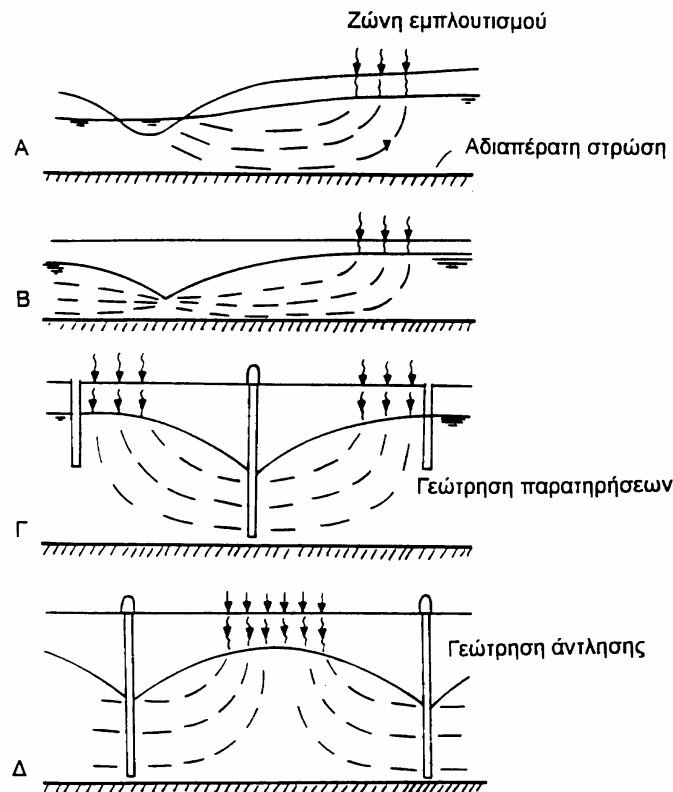
Οι υπόγειοι υδροφορείς έχουν φυσικούς μηχανισμούς για επεξεργασία, αποθήκευση και διακίνηση των επεξεργασμένων αποβλήτων. Όταν η εφαρμογή του αποβλήτου γίνεται με το σύστημα SAT η βελτίωση της ποιότητας του νερού επιτυγχάνεται καθώς το νερό κινείται αρχικά προς τα κάτω δια μέσου της ακόρεστης ζώνης (vadose) 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 18.5.2).

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.



Σχήμα 18.5.2β Σχηματική παράσταση συστήματος SAT με φυσική ανάκτηση του νερού σε χείμαρρο 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).

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.

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 φίλτρωση. Τιμές διηθητικότητας από 25 mm/h ή υψηλότερες είναι αναγκαίες για ταχεία διήθηση. Γι' αυτό επιφανειακά εδάφη από αμμόδη 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 διεύθυνση 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).

### **5.2.γ 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 1 απεικονίζεται η ποιότητα του αποβλήτου πριν και μετά τον εμπλουτισμό με το σύστημα SAT.

Πίνακας 1. Χαρακτηριστικά ποιότητας αποβλήτου που ελήφθη από σύστημα SAT στο Salt River Floodplain West of Phoenix, Arizona, ΗΠΑ (Bouwer, 1993).

Παράμετρος	Αποβλήτα 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 ( $\text{NH}_4^+$ -H)	16	0,1
Νιτρικό άζωτο ( $\text{NO}_3^-$ -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 (Cd)	0,008	0,007
Μόλυβδος (Pb)	0,082	0,066
Κοπρώδη κολοβακτηρίδια / 100 ml	3500	0,3
Ιοί, PFU/100 l	2118	0

### **5.2.δ 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 Τέξας 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.

**-Long Island, στη Νέα Υόρκη 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 Φλόριντα 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 εφαρμόζομενου 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  $0,1 \text{ Mm}^3/\text{ημέρα}$ , δηλ. περίπου  $35 \text{ Mm}^3/\text{έτος}$  δευτεροβάθμιας επεξεργασίας.

**-Dan Region, στο Τελ-Αβίβ του 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.

Στη συνέχεια δίνονται αναλυτικά ορισμένα στοιχεία από το έργο του Τελ-Αβίβ.

Ένα σημαντικό μέρος των ποσοτήτων των υγρών αποβλήτων του Τελ-Αβίβ 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 αποικοδόμηση, 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  $103 \times 10^6 \text{ m}^3$  επεξεργασμένα απόβλητα, από το 1977 όπου λειτουργεί το έργο, έχουν διοχετευτεί στον υπόγειο υδροφόρο  $851 \times 10^6 \text{ m}^3$  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 2.



Πίνακας 2. Χαρακτηριστικά ποιότητας αποβλήτου που ελήφθη από σύστημα SAT στο Dan Region, του Τελ-Αβίβ.

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

### 5.3. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΕΡΓΩΝ ΤΕΧΝΗΤΟΥ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΥ

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 αναπτυγμένες.

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:

$$A = \frac{Q}{I}$$

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) [ $LT^{-1}$ ].

Από έρευνες εφαρμογής Τ.Ε. στην Καλιφόρνια, ΗΠΑ, βρέθηκε ότι η φυσική κλίση του εδάφους μπορεί να αποβεί σημαντικός οδηγός στην εκτίμηση της I (Richter et al., 1959). Ενδεικτικές τιμές της τελευταίας έχουμε, για κλίσεις του εδάφους 0,1-0,3% να κυμαίνονται στο επίπεδο των 150 mm/ ημέρα (από την έρευνα 100 εφαρμογών Τ.Ε. σε αλλουβιακούς σχηματισμούς στην Καλιφόρνια, ΗΠΑ) ή για κλίσεις του εδάφους από 0,1- 10% να δίνονται από τη σχέση:

$$I = 2,14 + 1,85 \log S, \text{ (Richter et al 1959),}$$

όπου S: η κλίση σε (%). Για παράδειγμα, για κλίση 10%,  $I=1,2m/ημέρα$ .

Οι περιβάλλουσες καμπύλες ενός ευρύτερου φάσματος τιμών έχουν σαν ανώτερο όριο και κατώτερο όριο τις αντίστοιχες σχέσεις:

$$I_{\max} = 4,29 + 3,26 \log S \text{ και } I_{\min} = 0,67 + 0,78 \log S$$

Γενικά το I αυξάνεται με την αύξηση της κλίσης του εδάφους μέχρι μια τιμή πάνω από την οποία στη συνέχεια μειώνεται, ενώ συνεχίζει να αυξάνει η κλίση του εδάφους. Η διακύμανση του I εξαρτάται άμεσα από τις τοπικές κατά περίπτωση ιδιαιτερότητες της σύστασης του εδαφικού υλικού.

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 ταχύτητας 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 υδροφόρου (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 ισοπιεζομετρικών καμπυλών,
    - 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.

#### **5.4 ΥΔΡΑΥΛΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΤΕΧΝΗΤΟΥ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΥ**

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 σχηματοποιείται 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 τον συντελεστή εναποθήκευσης  $S$ , τη μεταβιβαστικότητα  $T$ , την ποσότητα επαναπλήρωσης και τις οριακές συνθήκες του υδροφόρου (Roscoe Moss Comp., 1990).

##### **Εμπλουτισμός με κατακλύσεις**

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

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

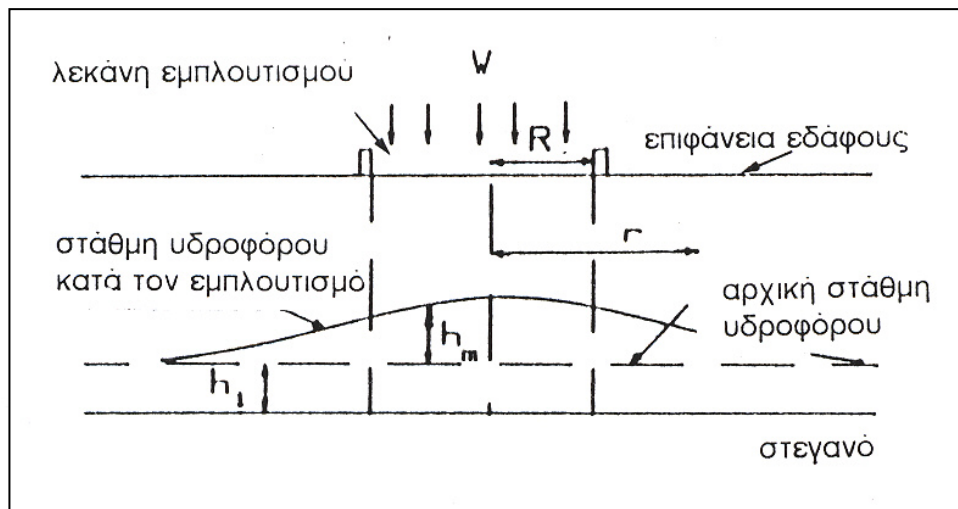
$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (\text{για υπό πίεση ομοιογενή και ισότροπο υδροφόρο})$$

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

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = \frac{S_y}{Kb} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (\text{για ομοιογενή και ισότροπο ελεύθερο υδροφόρο})$$

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 κατάκλυσης,
- το ύψος του υβώματος είναι μικρό σε σχέση με το αρχικό κορεσμένο πάχος.



Σχήμα 19.5.4 Διάγραμμα ανύψωσης της στάθμης του υδροφόρου κάτω από μία κυκλική επιφάνεια εμπλουτισμού (από Walton, 1991).

Η ανύψωση της στάθμης του υπόγειου νερού που παρατηρείται κάτω από μια κυκλική επιφάνεια κατάκλυσης (σχ. 19.5.4) περιγράφεται από τις εξισώσεις (Hantush, 1967):

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

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

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

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

με

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

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:

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

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):

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

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).

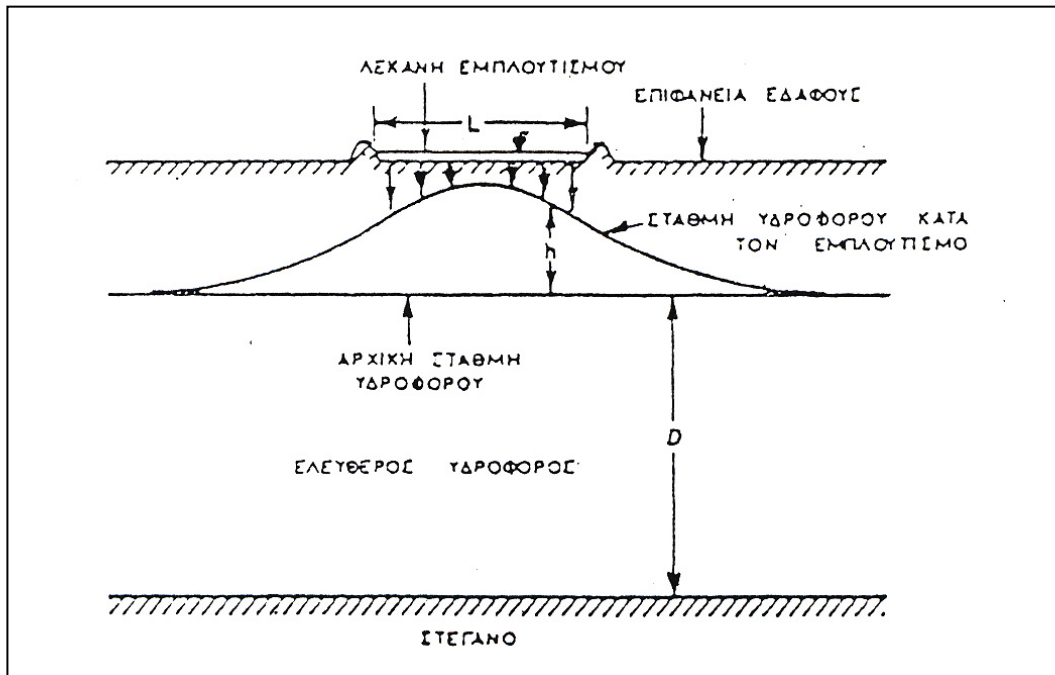
$T$  : η μεταβιβαστικότητα του υδροφόρου,

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

$S$ : ο συντελεστής εναποθήκευσης του υδροφόρου,

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

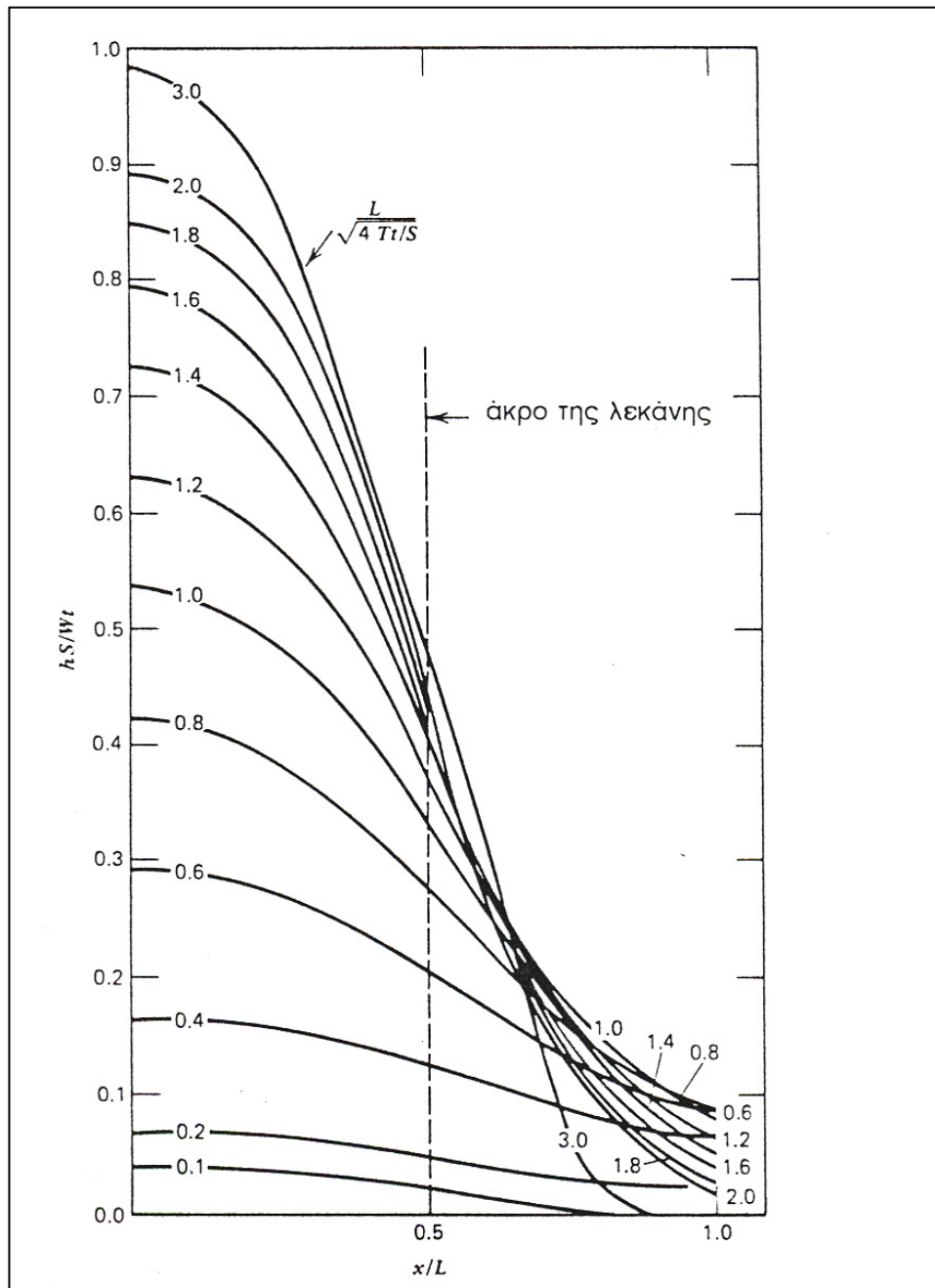
Οι εξισώσεις του Hantush είναι εφαρμόσιμες στην περίπτωση που η ανύψωση της στάθμης του υπόγειου νερού σε σχέση με το αρχικό βάθος κορεσμού δεν υπερβαίνει το 50%. Επίσης δεχόμαστε ότι ο υδροφόρος είναι ομοιογενής και ισότροπος, ομοιόμορφου πάχους και άπειρης έκτασης, όπως και ότι η στάθμη του υπόγειου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



Σχήμα 20.5.4 Διάγραμμα ανύψωσης της υδροστατικής επιφάνειας κάτω από μία τετραγωνική επιφάνεια εμπλουτισμού (από Καλλέργη 2001, Todd 1980).

Η μορφή του υβώματος που σχηματίζεται κάτω από μία τετραγωνική επιφάνεια κατάκλυσης (σχ. 20.5.4) μπορεί να περιγραφεί με τη χρήση των αδιάστατων παραμέτρων  $\frac{x}{L}$  και  $\frac{L}{\sqrt{4Tt/S}}$  και του διαγράμματος του σχ. 22, 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 21.5.4 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. 22.5.4), μπορεί να περιγραφεί από τις εξισώσεις που σύνταξε ο Hantush (Maasland et al., 1963):

και

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



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, [ $L T^{-1}$ ],

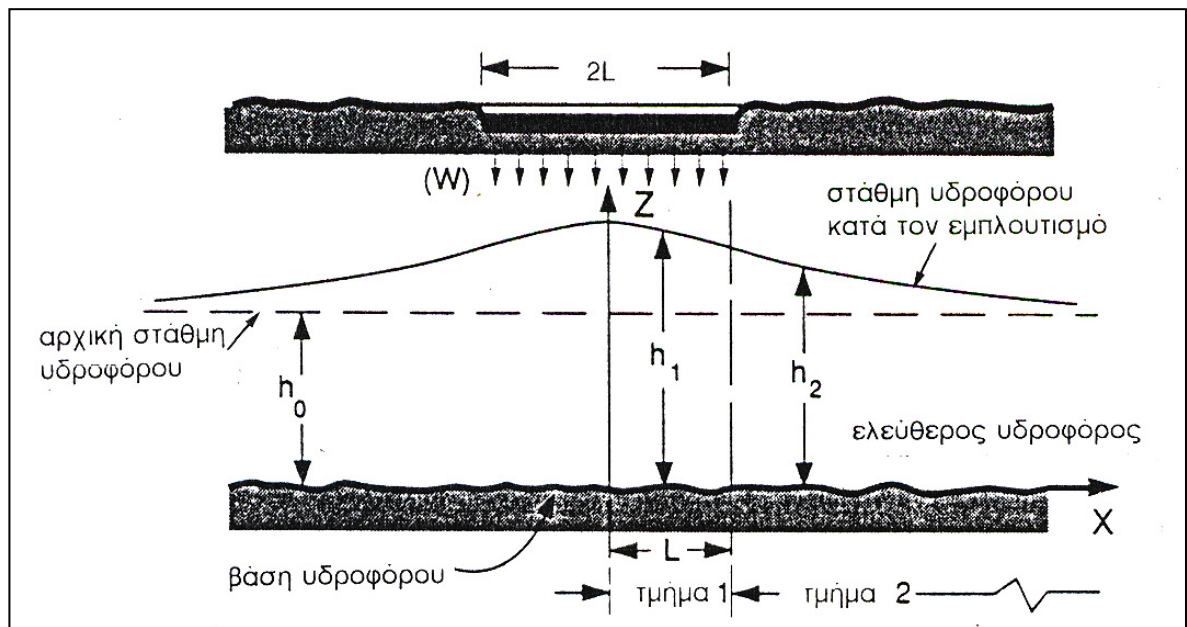
$L$ : η οριζόντια απόσταση του τμήματος 2 από το την αρχή του τμήματος 1, [L],

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

$W$ : η ομοιόμορφη παροχή εμπλουτισμού από τη διήθηση ανά μονάδα επιφάνειας, [ $L T^{-1}$ ],

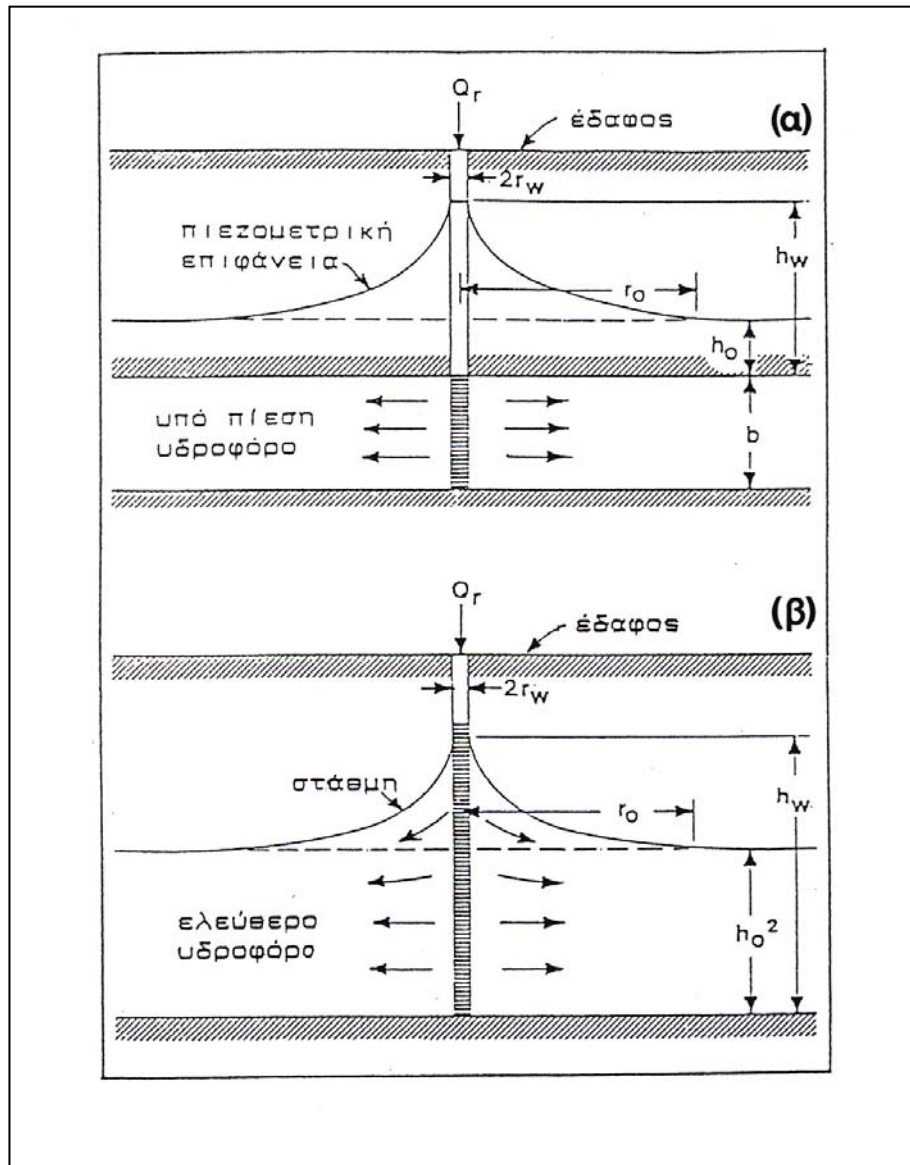
$\kappa = \frac{Kh_0}{\theta}$ : η υδραυλική διάχυση, [ $L^2 T^{-1}$ ], όπου  $\theta$  είναι το ενεργό πορώδες,

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



Σχήμα 22.5.4 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 κατάκλυσης, 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 μία ισορροπία διατηρώντας μία σταθερή ταχύτητα εμπλουτισμού.



Σχήμα 23.5.4 Διάγραμμα ακτινωτής ροής σε γεώτρηση εμπλουτισμού, σε (α) υπό πίεση και σε (β) ελεύθερο υδροφόρο (από Βαφειάδη, 1995, Espina, 1980).

### Γεωτρήσεις εμπλουτισμού και έγχυσης

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. 23.5.4). Σε αρτεσιανούς (σχ. 23.5.4(α)) και ελεύθερους υδροφόρους (σχ. 23.5.4(β)), όταν ο εμπλουτισμός γίνεται με "τέλεια" γεώτρηση, η παροχή εμπλουτισμού δίνεται αντίστοιχα από τις σχέσεις (Καλλέργης, 2001):

$$Q_r = \frac{2\pi k b (h_w - h_0)}{\ln(r_0/r_w)},$$

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

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 εμπλουτισμού (clogging effect) και τη μεταφορά στον υδροφόρο, από το νερό εμπλουτισμού, 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):

$$P = BQ + B'Q + CQ^2$$

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:

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

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].

## 6. ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΕΧΝΗΤΟΥ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΥ ΣΤΟ ΔΙΕΘΝΗ ΧΩΡΟ

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 κατάκλυσης, 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 ημίξηρες 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 διαφόρων 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 κατάκλυσης 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 κατάκλυσης (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 υδροφορέα των Κοκκινοχωρίων (Καλλέργης, 1986).

## ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ

- 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. γίνεται στην Καλιφόρνια, όπου η εφαρμογή τεχνητού εμπλουτισμού στην παραλιακή πεδιάδα Oxnard της Κεντρικής Καλιφόρνιας (Berger and Gientke, 1998) αποτελεί ένα ενθαρρυντικό παράδειγμα αντιμετώπισης της υφαλμύρινης.

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 υφαλμύρινης 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. 24.6). Μέχρι το 1996 αποκαταστάθηκε σε μεγάλη έκταση το καθεστώς της αυτόματης αρτεσιανής ροής.

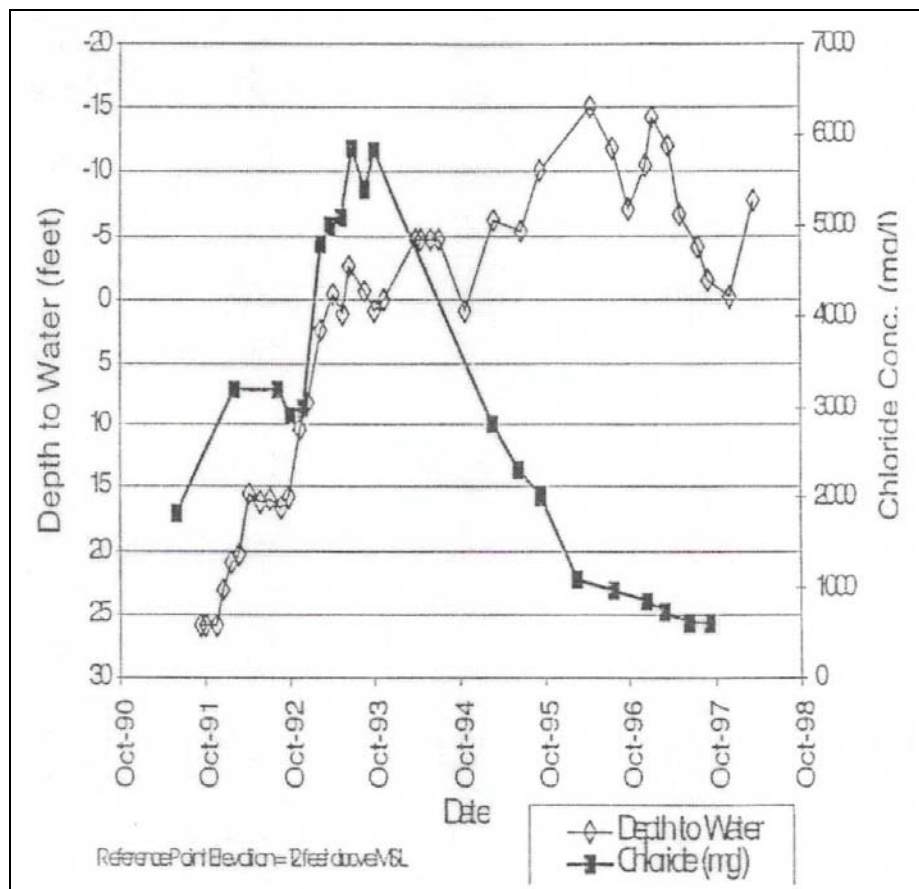
Στην παραλιακή ζώνη ο αρτεσιανισμός είχε αποκατασταθεί από τις αρχές του 1993. Παρά το γεγονός όμως ότι η ανύψωση της στάθμης από το 1991 έως το 1993 ήταν συνεχής και έφθασε περί τα 17μ., η περιεκτικότητα των υπόγειων νερών σε χλωριόντα συνέχισε να αυξάνεται μέχρι το τέλος του 1993, για να ελαττωθεί έκτοτε σημαντικά και από 6.000 mg/l να φθάσει σε 500 mg/l το τέλος του 1997 (σχ. 24.6)

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 υφαλμύρινης μέσω τεχνητού εμπλουτισμού, προέρχεται από το **Ομάν (Al Battashi and Ali, 1998)**. Συγκεκριμένα μετά από το 1992 όπου λειτούργησε το φράγμα εμπλουτισμού Al Fulayī, η στάθμη του παραλιακού υδροφόρου ανυψώθηκε κατά 4-7 m, λόγω μέσης ετήσιας τεχνητής φόρτισής 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  $\mu\text{S/cm}$  μειώθηκε κάτω των 6.000  $\mu\text{S/cm}$ .



Σχήμα 24.6 Διάγραμμα μεταβολής στάθμης υπόγειων νερών και συγκέντρωσης χλωριόντων (10/1990 – 10/1998) στην παράκτια πεδιάδα Oxnard Καλιφόρνιας (Κουμαντάκης, 1999).

- 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.

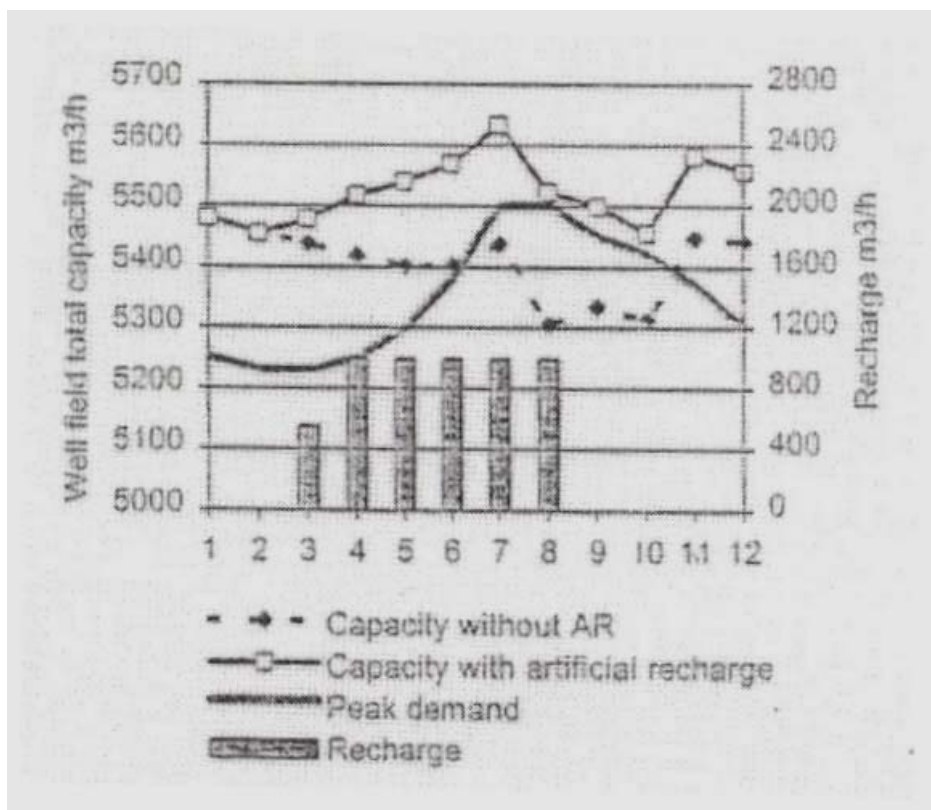
Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η εφαρμογή τεχνητού εμπλουτισμού στην **περιοχή Παρισίων** με νερά του Σηκουάνα (Haefner et al., 1998). Περισσότερο από 35 χρόνια η "Lyonnaise des Eaux" έχει εφαρμόσει τεχνικές τεχνητού εμπλουτισμού στα δύο μεγαλύτερα πεδία που προμηθεύουν το Δυτικό Παρίσι με υπόγεια νερά του αλλουβιακού



υδροφόρου. Πρόκειται για τις περιοχές Croissy-sur-Seine (300.000 m<sup>3</sup> ημερησίως) και Flins-Aubergenville (σχ. 25.6) (150.000 m<sup>3</sup> ημερησίως).

Κάθε χρόνο 54 εκατομμύρια m<sup>3</sup> 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.



Σχήμα 25.6 Παράδειγμα εφαρμογής Τ.Ε. υδροφόρου πεδίου (Flins – Aubergenville Παρίσι) ως μεθόδου βέλτιστης διαχείρισης για αντιμετώπιση της αιχμής της ζήτησης νερού (Κουμαντάκης, 1999).

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 m<sup>2</sup> 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.

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 Καΐρου, προερχόμενο από τον Νείλο (Attia et al., 1998). Τρία πειράματα που έγιναν το 1996 σε μια λεκάνη διήθησης 135 X 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  $240 \times 10^6 \text{ m}^3$ . 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. Ετσι 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 ημιορεινικών 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 επανατροφοδосίας των υδροφόρων οριζόντων η οποία καλύπτει μόνο το 70% της ζήτησης.

Η υπεράντληση των περισσότερων 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.

## **7. Εφαρμογές τεχνητού εμπλουτισμού στην Κύπρο**

Η Κύπρος με ανομοιογενή κατανομή των βροχοπτώσεων και με σύνθετες το φαινόμενο ύπαρξης συνεχόμενων άνομβρων χρόνων ( λόγω των επικρατουσών ξηρών έως ημίξηρων κλιματικών συνθηκών ) 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 στερήσε 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 αρνητικό υδατικό ισοζύγιο σε αρκετούς υδροφορείς, ενώ στους παράκτιους υδροφορείς παρατηρήθηκαν φαινόμενα υφαλμύρισης. Γρήγορα διαφάνηκε η ανάγκη για ενίσχυση των υδροφορέων με τεχνικές μεθόδους. Οι πρώτες προσπάθειες τεχνητού εμπλουτισμού ξεκίνησαν από τους ιδίους 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.

**Διάφοροι μέθοδοι τεχνητού εμπλουτισμού που έχουν εφαρμοστεί:**

#### **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 αλλουβιακών 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 χειμάρρων.**

Σε αρκετούς χείμαρρους 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 χείμαρροι διασχίζουν πεδινούς, αλλουβιακούς 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 υπερχειλίση 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 ταμιευτήρες**

##### **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 δύομισι 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 στην βελτίωση της ποιότητας του υπόγειου νερού, αφού μετά την εφαρμογή του υποχώρησε η ζώνη υφαλμύρισης 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 ταμιευτήρα 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 ολιγομβρίας 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 Ασπρόκρεμμου, 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 ταμιευτήρων 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 εγκλωβισμένο 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 φουσαλίδες 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 υπόγειας χρήσης του για σκοπούς τεχνητού εμπλουτισμού του υδροφορέα Ακρωτηρίου. Με τον τεχνητό εμπλουτισμό θα μειωνόταν το έλλειμμα του

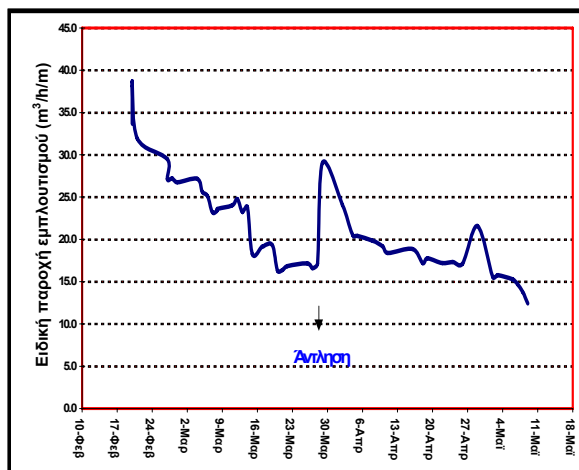


υδροφορέα και θα περιοριζόταν η διαδικασία της θαλάσσιας διείσδυσης. Η μεταφορά του νερού στην περιοχή του υδροφορέα γίνεται με αγωγό μήκους 10 περίπου km.

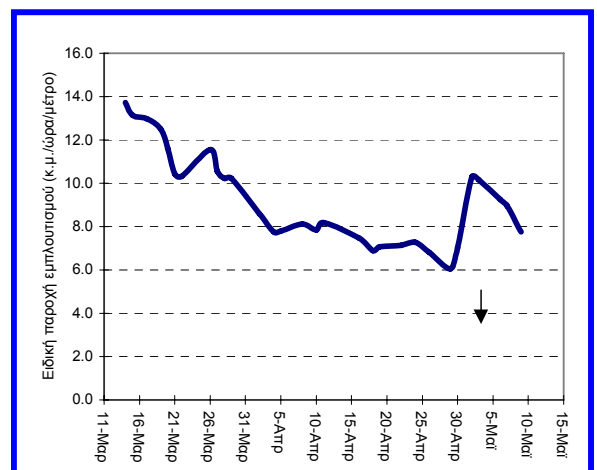
Η πιο πάνω διάθεση κρίθηκε εφικτή λόγω της λιθολογίας και του βάθους της στάθμης του υδροφορέα, ενώ παρουσίαζε επίσης το πλεονέκτημα της καλύτερης διαχείρισης του εμπλουτισμού. Το μειονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι ότι δεν θα γίνεται χρήση της ακόρεστης ζώνης του υδροφορέα, για περαιτέρω επεξεργασία 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 26.7 και 27.7. Όπως φαίνεται στα πιο πάνω διαγράμματα, πάρα 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 26.7 Τεχνητός Εμπλουτισμός μέσω γεωτρήσεων - Αρ. Γεώτρ. 1236 Ακρωτήρι Περίοδος 19/2 - 10/5/96 - Παροχή εμπλουτισμού 70 κ.μ./ώρα



Σχ. 27.7 Τεχνητός Εμπλουτισμός γεώτρηση 1235, Ακρωτήρι Παροχή εμπλουτ. 83 κ.μ./ώρα - Περίοδος 14/3 - 10/5/96

#### **Αποστράγγιση όμβριων υδάτων από καλλιέργειες με ταυτόχρονο τεχνητό εμπλουτισμό του υδροφορέα.**

Στη 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 υπερυψωμένου οδικού δικτύου (σχ. 28.7). Το υπερυψωμένο αυτό οδικό δίκτυο λειτούργησε σαν φυσικό ανάχωμα, προκαλώντας προβλήματα στη φυσική αποστράγγιση της περιοχής, κυρίως μετά από έντονες

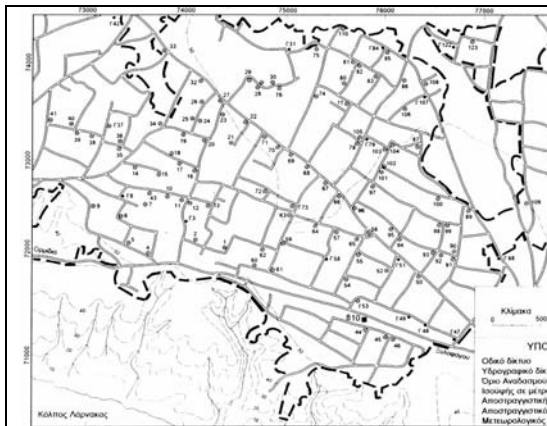
βροχοπτώσεις. Στη ίδια περιοχή αναπτύσσεται μέρος του υδροφορέα της Νοτιο-Ανατολικής Μεσαορίας, ο οποίος όπως έχει προαναφερθεί υπεραντλείται και έχει υφαλμυρίσει.

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 χαλκόφιλτρο για έλεγχο της ροής του νερού προς τα πηγάδια και συγκράτηση των αιωρούμενων στερεών σωματιδίων (σχ. 29). 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.

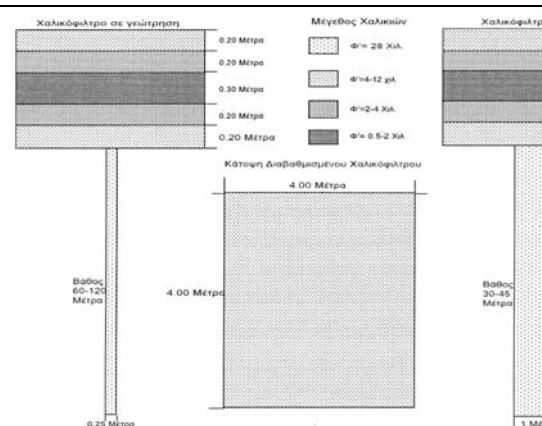
Με βάση την ανάλυση των βροχομετρικών, υδρολογικών και μετεωρολογικών δεδομένων προέκυψε ότι η μέγιστη αναμενόμενη ημερήσια βροχόπτωση ήταν 50 χιλ. και οι παραγόμενες ποσότητες νερού 500 κυβικά μέτρα ανά εκτάριο (καθορίστηκε συντελεστής ασφάλειας 80%). Η πυκνότητα των γεωτρήσεων και των πηγαδιών καθορίστηκε 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.

**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.



Σχήμα 28.7 Τοποθέτηση στραγγιστηριών πηγαδιών και γεωτρήσεων στην περιοχή Ξυλοφάγου Ορμίδειας (Κωνσταντίνου Κ. 1995).



Σχήμα 29.7 Σχεδιασμός απορροφητικών φίλτρων στην περιοχή Ξυλοφάγου Ορμίδειας (Κωνσταντίνου Κ. 1995).

3. Το χαλικόφιλτρο θα πρέπει να είναι διαβαθμισμένο και συμμετρικό (σχ. 29.7). 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 εκατοστά 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 επιλέχθηκε 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 ( $u=2 \times 10^{-3}$  m/sec) και την παροχή αποστράγγισης ( $125 \text{ m}^3/\text{h}$ ), υπολογίστηκε η ανάλογη υδραυλική κλίση ( $i=3$ ), το εμβαδόν του φίλτρου ( $16 \text{ m}^2$ ) 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. 6). 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 τοιχώματα 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  $m^3/h$ . 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 υδροφορέας 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 ρύπανσης 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.

## **8. Εφαρμογές τεχνητού εμπλουτισμού στην Ελλάδα**

**Στο Αργολικό Πεδίο** έγιναν προσπάθειες εφαρμογής Τ.Ε., από το Υπουργείο 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 μετά από πρόταση 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).

**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 ανάπτυξη του Γαλλικού ποταμού.

**Περιοχή Ριζού - Πετραίας - Αρσενίου Ν. Πέλλης (νότια της Σκύδρας)**, 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 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 Αργολικό Πεδίο και οι περιοχές της Θράκης. 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 παλιές διάσπαρτες κοίτες του Νέστου στο ανατολικό τμήμα του Δέλτα του (όπου έχουμε κυρίως φαινόμενα υφαλμύρωσης του υπόγειου νερού), η περιοχή της παλιάς κοίτης του χειμάρρου Κόσυνθου που διερχόταν ΝΑ του χωριού Βαφέικα Ξάνθης, η κοίτη- τάφος 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. 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. 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 et al., 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 αδραντοποιημένων κοιτών.

## **8.1 Εφαρμογή τεχνητού εμπλουτισμού στο Αργολικό πεδίο**

### **Ιστορικά – Υδρογεωλογικά στοιχεία**

Από υδρογεωλογικής πλευράς 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:

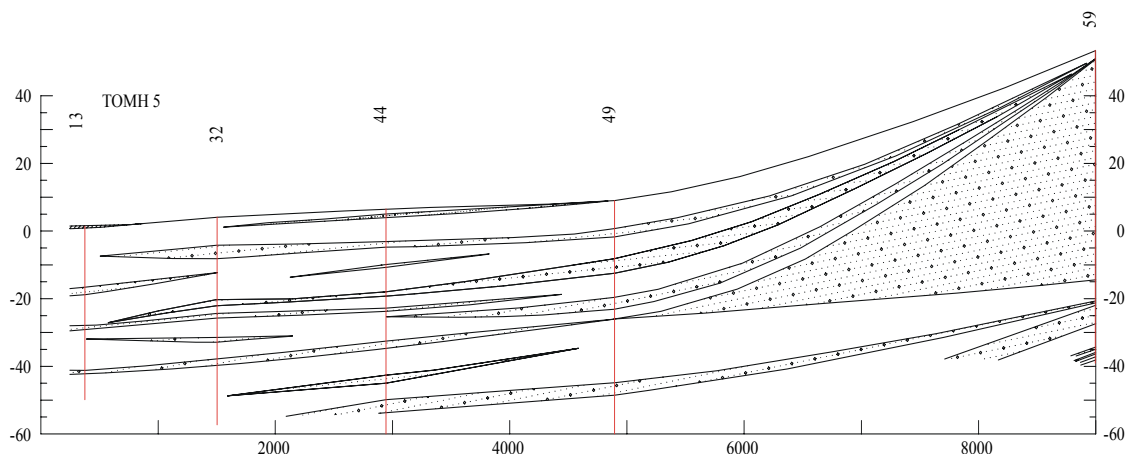
**Φρεάτιος υδροφόρος:** αναπτύσσεται σε μια στενή λωρίδα κατά μήκος της παραλιακής ζώνης από την ακτή μέχρι και 200-300 m προς την πεδιάδα και εκτείνεται από το Ναύπλιο μέχρι το μέσο περίπου των ακτών του Αργολικού κόλπου. Συνίσταται κυρίως από λεπτόκοκκες άμμους με ποικίλη συμμετοχή αργιλικών υλικών. 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 μαργαϊκής 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. 30.8).

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 30.8 Απλοποιημένη υδροστρωματογραφική τομή του Αργολικού πεδίου διεύθυνσης B-N

## Ο εμπλουτισμός του Αργολικού πεδίου έγινε σε δύο φάσεις

### 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 κατανεμημένα 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.

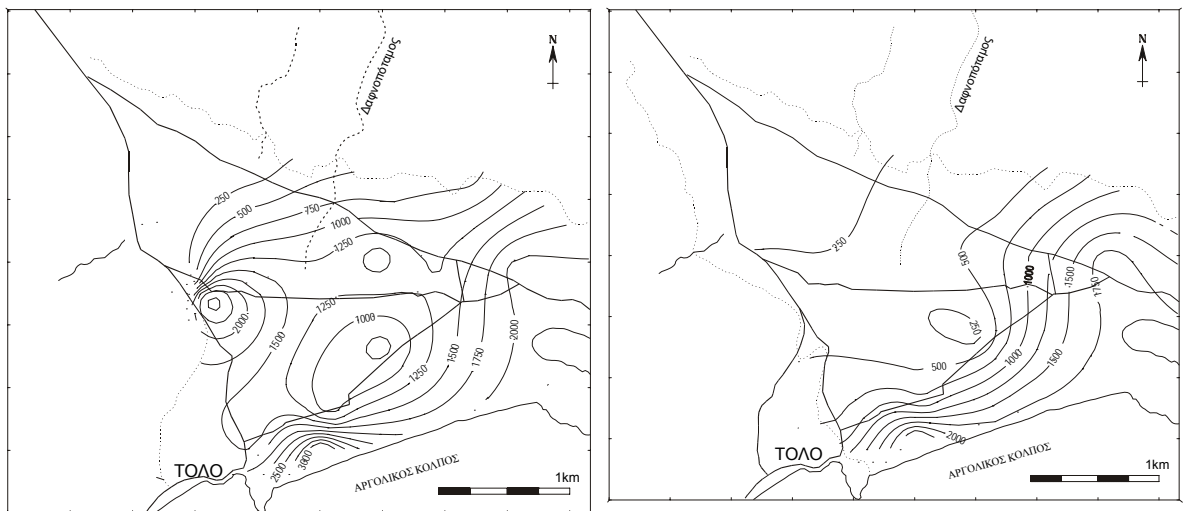
Τέλος την Άνοιξη του 1968 ο ΤΟΕΒ επαναλαμβάνει τον Τ.Ε. σε επίπεδο πρακτικής εφαρμογής με οδηγίες της ΥΕΒ του ΥΠΓΕ.

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 31.8) 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.



α) Φθινόπωρο 1963

β) Φθινόπωρο 1965

Σχήμα 31.8. Ισοχλώριες καμπύλες (mg/l) της περιοχής Ασίνης - Δρέπανου - Τολού πριν και μετά από τα πειράματα εμπλουτισμού της περιόδου 1965

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 φρέατος 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 κατάπτωση των τοιχωμάτων του πηγαδιού.

## 2<sup>η</sup> Φάση εμπλουτισμού

Λόγω της υπεράντλησης που εφαρμόστηκε, από το 1960 και μετέπειτα, το μέτωπο της υφαλμύρωσης, κατά τα τελευταία έτη της δεκαετίας του 1980,

προωθήθηκε μέχρι των περιοχών Κουρτακίου, Πυργέλας, Ηραίου και Αγίας Τριάδας ενώ μέτωπα υφαλμύρωσης 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. 32.8).

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.



◆ Γεώτρηση εμπλουτισμού περιόδου 1990-94

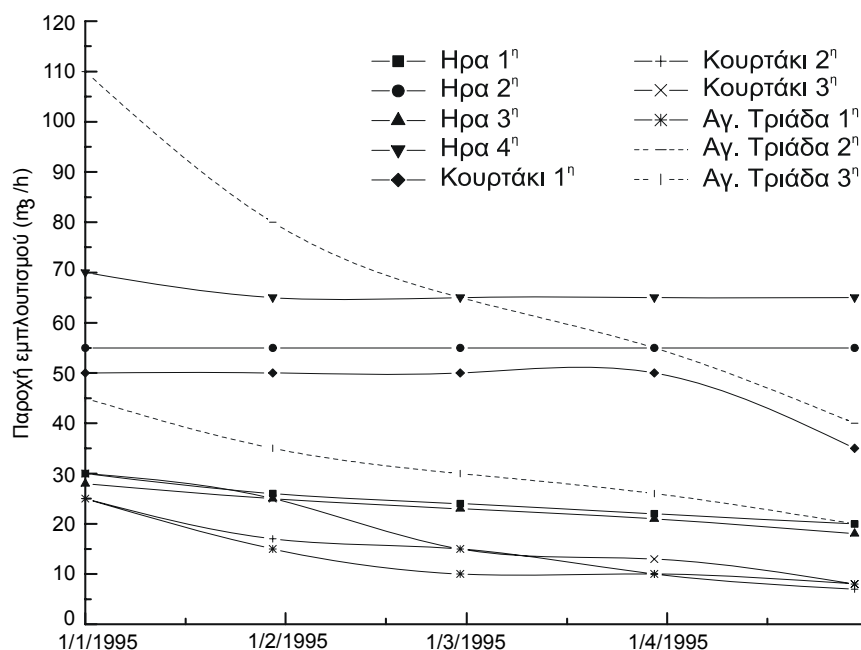
◆ Γεώτρηση εμπλουτισμού περιόδου 1990-94

📍 Πηγή

**Σχήμα 32.8. Θέσεις γεωτρήσεων εμπλουτισμού περιόδου 1990-98**

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 κινείται 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.



Σχήμα 33.8. Παροχές γεωτρήσεων εμπλουτισμού

Παραδείγματα μετρήσεων παροχών στις παραπάνω γεωτρήσεις καθώς και η μεταβολή τους με το χρόνο παρουσιάζονται γραφικά στο (σχήμα 33.8) (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).

## **8.2. Εφαρμογή τεχνητού εμπλουτισμού σε υδροφόρους πεδινών τμημάτων της ανατολικής Μακεδονίας και της Θράκης**

Η απρογραμματίστη 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.

### **Παράκτια περιοχή Δήμου Ορφανού του Νομού Καβάλας**

Για την αντιμετώπιση του φαινομένου της υφαλμύρινσης της περιοχής, αλλά και της ικανοποίησης μεγαλύτερων αρδευτικών αναγκών, διερευνήθηκε η εφαρμογή Τ.Ε. των υδροφόρων 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. 36). 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).

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 ορίζοντα 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 Ν 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 ορίζοντα 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. 34.8).

Η διαδικασία εφαρμογής Τ.Ε. περιλαμβάνει την κατασκευή είτε λεκανών κατάκλυσης 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. 35)

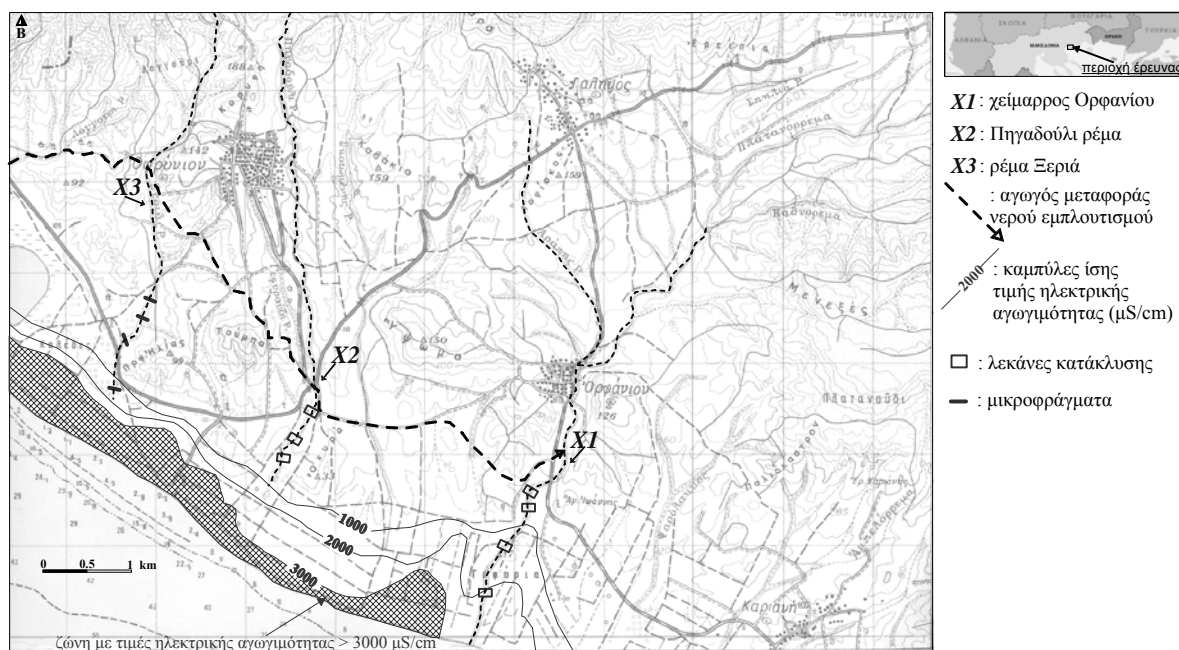
**1. Χείμαρρος Ορφανίου.** Πρόκειται για το χείμαρρο με την ευνοϊκότερη δομή (μεγάλου πάχους αδρόκοκκα υλικά) και ο οποίος τροφοδοτεί τη μεγαλύτερη υδρογεωλογική λεκάνη, που σήμερα αντλείται από ένα αρκετά μεγάλο αριθμό υδρογεωτρήσεων. Στο χείμαρρο αυτό προτείνεται η κατασκευή 4 λεκανών κατάκλυσης, με 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 υφαλμύρινσης. Τα έργα που προτείνονται εδώ είναι η κατασκευή 3 λεκανών κατάκλυσης 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 λεπτόκοκα υλικά).

Σε περιοχές όπου δεν υπάρχει προηγούμενη εμπειρία εφαρμογής Τ.Ε. 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). 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 χείμαρρου Ορφανίου. Έτσι στο χείμαρρο αυτό εφαρμόστηκε ένα μικρού χρονικού διαστήματος (20 ημέρες) πειραματικό στάδιο εμπλουτισμού. Σε όλη τη διάρκεια του πειραματικού σταδίου και για 10 ημέρες επιπλέον, παρακολούθηθηκε 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 υφαλμυρισμένων 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).



Σχήμα 34.8 Χάρτης με την περιοχή έρευνας στο Ορφανό Καβάλας, τα προτεινόμενα έργα τεχνητού εμπλουτισμού και τις καμπύλες ίσης τιμής ηλεκτραγωγιμότητας (μS/cm).

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 χάραξή του, την επιλογή της διαμέτρου, του είδους και της αντοχής του υλικού των σωλήνων, αντιπληγματικό έλεγχο του καταθλιπτικού αγωγού, υπολογισμό των στοιχείων του αντλιοστασίου, υπολογισμό του κόστους του αντλούμενου νερού, υπολογισμό της ρυθμιστικής δεξαμενής, μελέτη της αντιδιαβρωτικής προστασίας των χαλυβδосωλήνων και διαστασιολόγηση των απαιτούμενων εκσκαφών (Πλιάκας et al., 1997).

### **Ανατολικό τμήμα του Δέλτα του ποταμού Νέστου**

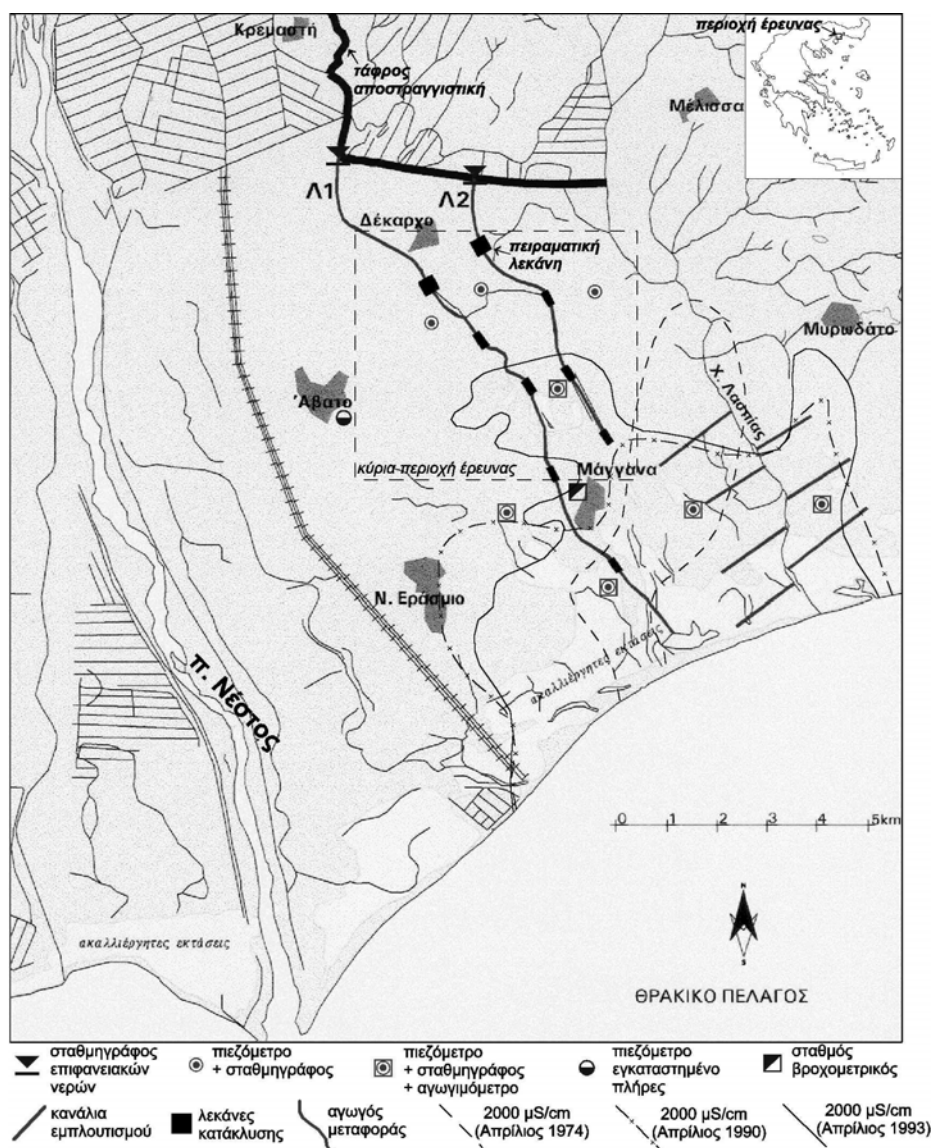
Στην περιοχή του Ανατολικού τμήματος του Δέλτα προτάθηκε (Σακκάς et al., 1998), ως λύση αντιμετώπισης του φαινομένου της υφαλμύρισης του ανατολικού πεδινού τμήματος του Δέλτα του ποταμού Νέστου, αλλά και της ικανοποίησης μεγαλύτερων αρδευτικών αναγκών, η εφαρμογή Τ.Ε. των υδροφόρων της περιοχής.



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 επιβαρυνμένων (υφάλμυρων) περιοχών του ανατολικού Δέλτα εντοπίζεται στην ευρύτερη περιοχή Δεκάρχου – Μαγγάνων (σχ. 35.8). 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. 36). 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).

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 ανάπτυγμά 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.



Σχήμα 35.8 Χάρτης με την περιοχή έρευνας στο ανατολικό δέλτα του ποταμού Νέστου, τις προτεινόμενες εγκαταστάσεις τεχνητού εμπλουτισμού και τις καμπύλες ίσης τιμής ηλεκτραγωγιμότητας ( $2000 \mu\text{S}/\text{cm}$ ).

Παρακολουθήθηκε η διακύμανση των τιμών ηλεκτραγωγιμότητας των υπόγειων νερών της περιοχής για μια σειρά ετών. Στο σχήμα 2 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 Ν-Β, ενώ είναι σαφής η σημαντική εξάπλωση των επιβαρυνμένων περιοχών κατά τα έτη 1990 και 1993, αλλά και η μικρή διαφοροποίηση μεταξύ των δύο τελευταίων που οφείλεται στην αδρανοποίηση των περισσότερων 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 υφαλμύρισης 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 μεταβιβαστικότητας (T) καταλαμβάνει ένα ευρύ φάσμα τιμών από  $4,0 \times 10^{-4}$  έως  $1,1 \times 10^{-2}$  m<sup>2</sup>/sec, ενώ οι τιμές του συντελεστή 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  $10^{-7}$  m/sec (μέτρια έως μικρή περατότητα), ενώ στα βαθύτερα στρώματα, μέχρι τα 4,6 m, η υδραυλική αγωγιμότητα είναι της τάξης του  $10^{-4}$  m/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 εκτελέστηκαν 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 βάθος > 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  $90 \text{ m}^3/\text{h}$  σε λεκάνη κατάκλυσης διαστάσεων  $50 \text{ m} \times 50 \text{ m} \times 2 \text{ m}$  (σχ. 33). 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  $10.000 \text{ m}^3$  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. 35.8 Λ1 και Λ2) και ανατολικότερα ενός συστήματος καναλιών εμπλουτισμού (σχ. 35.8):

- 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  $2 \times 1 \text{ m}$  ο οποίος θα ακολουθεί μια ΝΑ κατεύθυνση, θα συναντάει την παλιά κοίτη, ενώ νότια του Δεκάρχου θα κατασκευαστεί η *πρώτη κύρια λεκάνη* διαστάσεων  $50 \text{ m} \times 50 \text{ m}$  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  $10 \times 50 \times 1 \text{ m}$ .
- 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*  $50 \text{ m} \times 50 \text{ m} \times 2 \text{ m}$  (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  $10 \text{ m} \times 50 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ .
- Σύστημα καναλιών εμπλουτισμού, εκατέρωθεν του χειμάρρου Λασπία. Τα κανάλια υπολογίζονται καταρχήν σε 7, διαστάσεων  $2 \text{ m} \times 1 \text{ m}$  και μήκους 1–2 km το καθένα, ενώ στο χείμαρρο 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 αντισυμβαλλόμενο. 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 κατανεμημένων 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. 35.8).

### **Περιοχή Βαφείκων του Νομού Ξάνθης**

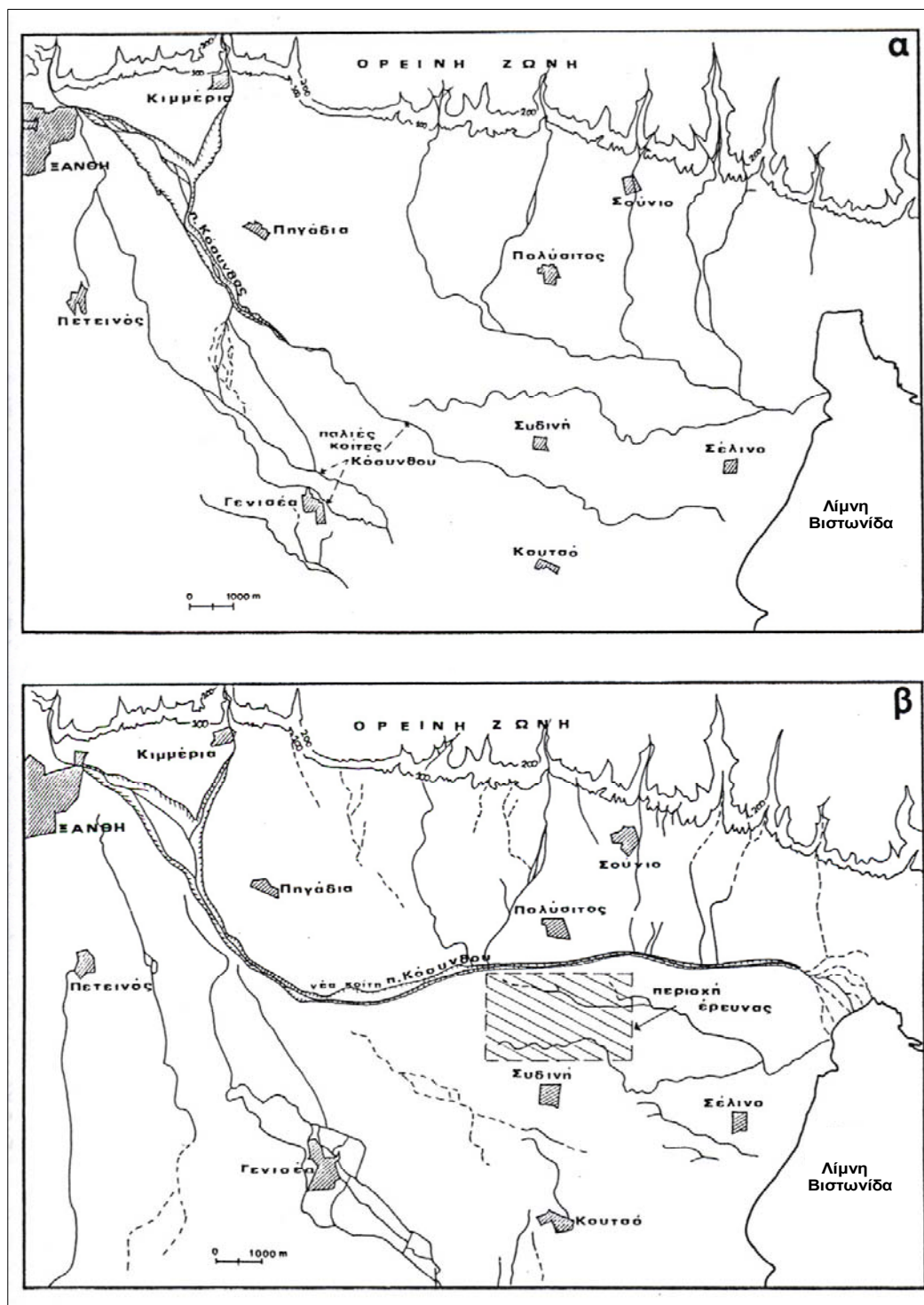
Κατά το τέλος της δεκαετίας του '50 έγιναν ορισμένες επεμβάσεις στο υδρογραφικό δίκτυο του πεδινού τμήματος της λεκάνης Βιστωνίδας. Οι επεμβάσεις αυτές αφορούσαν στην εκτροπή του ποταμού Κόσυνθου, ο οποίος πριν την επέμβαση διέσχισε τον κάμπο της Ξάνθης και μετά την επέμβαση διέρχεται περιφερειακά του κάμπου καταλήγοντας στον βόρειο μυχό της Λίμνης Βιστωνίδας (σχ. 36.8). Επίσης εγκιβωτίστηκαν οι χειμάρροι 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 στέρηση αυτών των νερών έχει εξαναγκάσει τους κατοίκους σε απεγνωσμένες και δαπανηρές προσπάθειες κάλυψης των αναγκών τους με την ανόρυξη ενός υπερβολικά μεγάλου αριθμού υδρογεωτρήσεων.

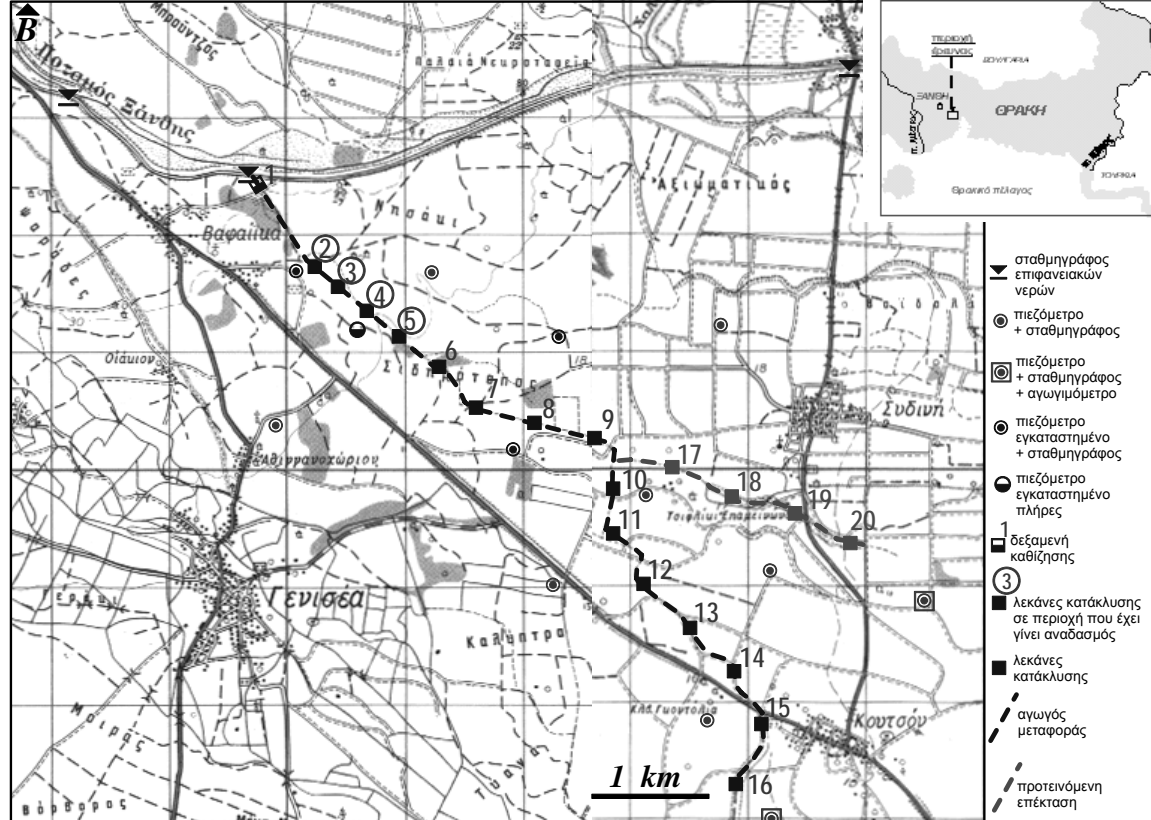
Σήμερα οι ζώνες απόθεσης χονδρόκοκκων υλικών που παρατηρούνται στις περιοχές των εξόδων των χειμάρρων από την ορεινή ζώνη προς τον κάμπο σε συνδυασμό με τη συνεχή ροή για αρκετούς μήνες στους διάφορους κλάδους του υδρογραφικού δικτύου με επικεφαλής τον Κόσυνθο, προσφέρονται για την εφαρμογή ορισμένων 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 Βαφείκων του νομού Ξάνθης, προτάθηκε 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. 37.8).

Η περιοχή των Βαφείκων 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.



Σχήμα 36.8 Υδρογραφικό δίκτυο πεδινού τμήματος Ξάνθης πριν (α) και μετά (β) την εκτροπή του ποταμού Κόσυνθου, (α): από χαρτογράφηση 1948, (β): από χαρτογράφηση 1970.



Σχήμα 37.8 Η περιοχή έρευνας στα Βαφέικα Ξάνθης και οι προτεινόμενες εγκαταστάσεις τεχνητού εμπλουτισμού.

Γεωλογικά η περιοχή εντοπίζεται στις πρόσφατες αλλουβιακές αποθέσεις του πεδινού τμήματος της λεκάνης Βιστωνίδας. Στην περιοχή αυτή φιλοξενούνται εναλλαγές στρωμάτων χαλίκων, 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 Βαφέικα, 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):

- *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 μεταβιβασιμότητας (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 Τ.Ε. 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. 35, 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. 39). 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 αντισυμβαλλόμενο.

Στην εδώ περίπτωση πιστεύουμε ότι το σημαντικότερο πρόβλημα που προέκυψε ήταν ή 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.

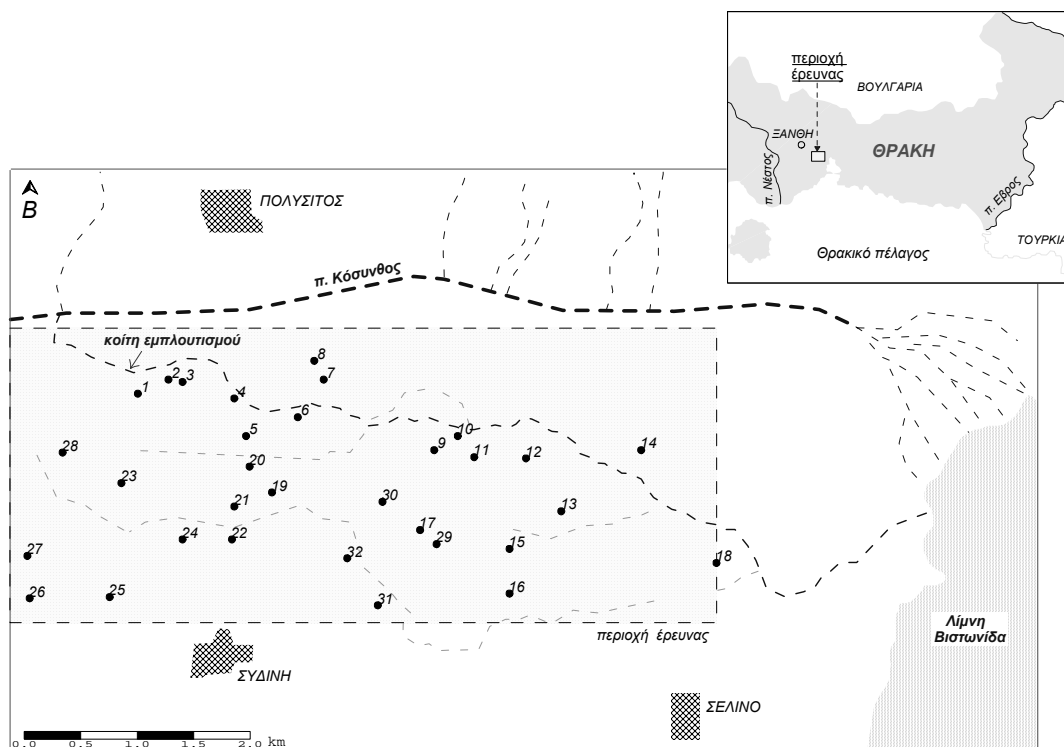
Η ομαλή κλίση του πυθμένα της λεκάνης δημιούργησε ευνοϊκές προϋποθέσεις έτσι ώστε, στην αρχή, οι μεγαλύτερες ποσότητες του νερού εμπλουτισμού να διηθούνται από τον πυθμένα (κεντρική περιοχή) και όχι από τις πλευρές της λεκάνης. Αυτό είχε σαν συνέπεια την εμφάνιση γρήγορα του φαινομένου της απόφραξης 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. 38.8), 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. 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.



Σχήμα 38.8 Χάρτης με την κοίτη εμπλουτισμού στην περιοχή Πολυσιτίου του νομού Ξάνθης, τα όρια της περιοχής έρευνας και τις γεωτρήσεις παρακολούθησης της μεταβολής της στάθμης (Πλιάκας, 1998).

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 (Ε) 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  $150 \text{ m}^3/\text{h}$ . 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

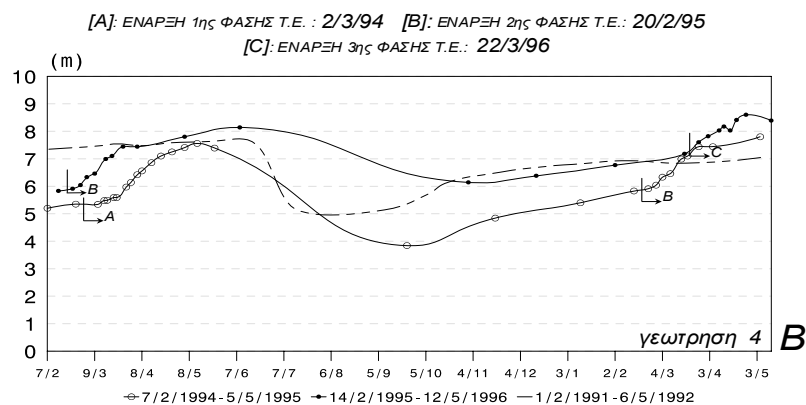
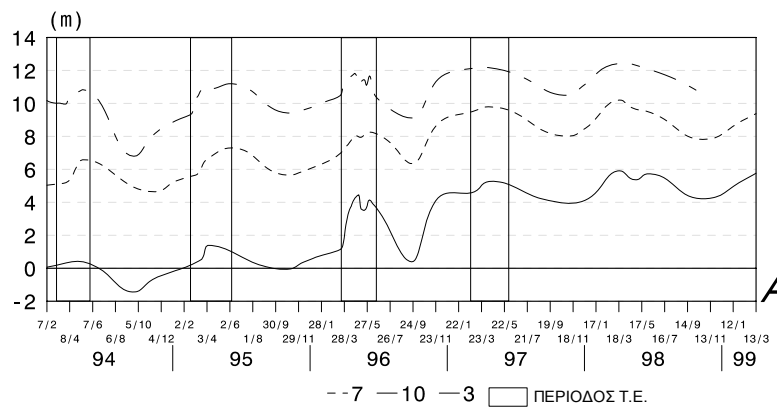
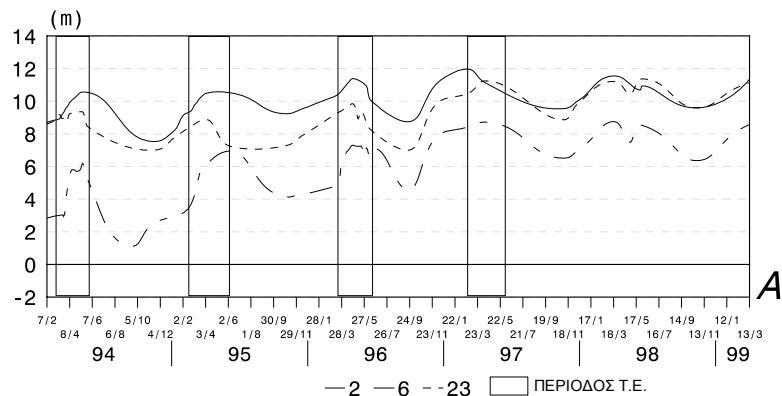
έναρξη της διαδικασίας του εμπλουτισμού, και συνεχίζονται μέχρι σήμερα σε μηνιαία βάση, με εξαίρεση τις περιόδους εμπλουτισμού όπου η συχνότητα μετρήσεων κυμάνθηκε σε 1-2 μετρήσεις την εβδομάδα. Για τον προσδιορισμό του βαθμού της αποτελεσματικότητας της εφαρμογής του τεχνητού εμπλουτισμού στην περιοχή, 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. 39.8), 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. 40). 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.

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).

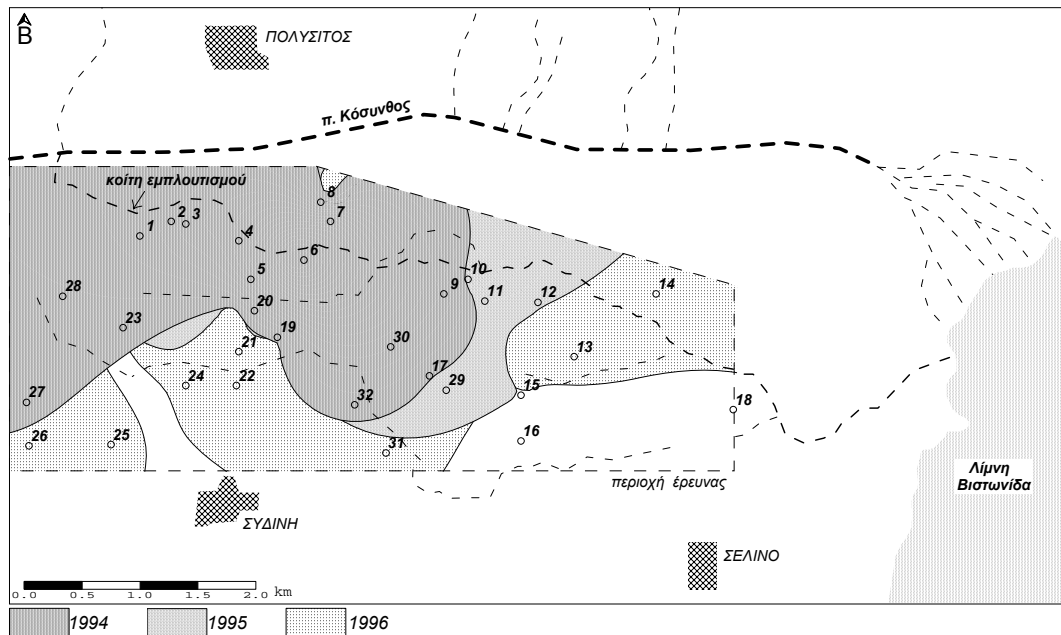
Για τον προσδιορισμό των υδροχημικών χαρακτήρων του υπόγειου νερού της περιοχής έρευνας, πραγματοποιήθηκαν χημικές αναλύσεις σε επιλεγμένες γεωτρήσεις κατά τις χρονικές στιγμές 20/2/1996 και 14/5/1996, δηλαδή 32 ημέρες πριν και 54 ημέρες μετά την έναρξη της 3ης φάσης (1996)

εφαρμογής Τ.Ε. στην περιοχή αντίστοιχα, με τις μετρημένες τιμές να κυμαίνονται μέσα στα επιτρεπόμενα όρια (Πλιάκας, 1998).



Σχήμα 39.8 (Α): Διαγράμματα μεταβολής της στάθμης των γεωτρήσεων που αναγράφονται για την περίοδο: 7/2/1994-13/3/1999, (Β): Διάγραμμα μεταβολής της στάθμης της γεώτρησης 4 στην περιοχή έρευνας.

Ο τεχνητός εμπλουτισμός με την επανενεργοποίηση παλιών αδραντοποιημένων 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.



Σχήμα 40.8 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 περίπτωση Πολυσίτου 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.

## 9 .ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΕΧΝΗΤΟΥ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΥ ΣΤΗΝ ΚΡΗΤΗ

### 9.1 ΔΗΜΟΣ ΜΑΛΛΙΩΝ -ΔΗΜΟΤΙΚΟ- ΔΙΑΜΕΡΙΣΜΑ ΜΟΧΟΥ ΝΟΜΟΥ ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ

Το Δημοτικό Διαμέρισμα Μοχού του Δήμου Μαλίων υδρευόταν παλαιότερα από τις πηγές του οικισμού Κεράς που μεταφερόταν το νερό με αγωγό Φ 63 μήκους περίπου 5974μ από τον οικισμό Κεράς στη δεξαμενή του Τοπικού Διαμερίσματος Μοχού με σημαντικές παροχές κατά τη χειμερινή περίοδο και από μία γεώτρηση που υπήρχε εντός του φυλλιτικού συστήματος με μικρή παροχή της τάξεως περίπου των 10 κ.μ. ανά ώρα η

οποία συνεχώς μειωνόταν και ιδιαίτερα τους καλοκαιρινούς μήνες .με αποτέλεσμα να υπάρχει πρόβλημα υδροδότησης του Τοπικού Διαμερίσματος Μοχού Στην περιοχή όπου υπήρχε γεώτρηση ανήχθησαν επιπλέον δύο γεωτρήσεις απο τον Δήμο σε συνεργασία με την Τ.Υ.Δ.Κ Περιφέρειας Κρήτης και στη συνέχεια μετά από δοκιμαστικές αντλήσεις που έγιναν προσδιορίστηκαν τα υδραυλικά στοιχεία αυτών . Στην συνέχεια έγινε αντιστροφή του καταθλιπτικού αγωγού από τη δεξαμενή προς τις γεωτρήσεις μήκους περίπου 1190μ όπου κατά την χειμερινή περίοδο με το επιπλέον νερό που ερχόταν από τις πηγές του οικισμού Κεράς εμπλουτίζονταν ο υδροφόρος ορίζοντας των τριών γεωτρήσεων με αποτέλεσμα ενώ το Τοπικό Διαμέρισμα Μοχού που είχε πρόβλημα κατά τη θερινή περίοδο, σήμερα να μην υπάρχει ανάλογο πρόβλημα. Το δίκτυο Φ63 που συνέδεε την πηγή με την δεξαμενή σήμερα αντεκατεστάθει με αγωγό τρίτης γενιάς διαμέτρου Φ 90

## **9.2 ΛΕΚΑΝΗ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΕΣΑΡΑΣ**

### **ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΣ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΤΕΤΑΡΤΟΓΕΝΩΝ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΩΝ ΑΠΟ ΧΕΙΜΑΡΙΚΕΣ ΑΠΟΡΡΟΕΣ ΤΟΥ ΓΕΡΟΠΟΤΑΜΟΥ**

Η πεδιάδα της Δυτικής Μεσσαράς (υδρολογική λεκάνη Γεροπόταμου), η οποία εκτείνεται από το Ασήμι μέχρι τη Φαιστό, αποτελεί τη σημαντικότερη αγροτική περιοχή της Κρήτης. Όλη η αγροτική οικονομία σήμερα της περιοχής στηρίζεται στα υπόγεια νερά της. Ο αλουβιακός – πλειστοκαινικός υδροφορέας καταλαμβάνει το κεντρικό τμήμα της λεκάνης, έχει έκταση περίπου 100 Km<sup>2</sup> και δέχεται μέσο ύψος βροχής 650 mm. Ο υπόγειος υδροφορέας άρχισε να εκμεταλλεύεται από το 1970 με την ανόρυξη των πρώτων γεωτρήσεων στα πλαίσια του προγράμματος FAO. Η εκμετάλλευσή του άρχισε βαθμιαία να αυξάνει και μετά το 1981 άρχισε η υπερεκμετάλλευση του και η πτώση του υδροφόρου ορίζοντα, η συνεχής πτώσης στάθμης φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 43 των υδρολογικών ετών 1981-1998. Ο υδροφορέας αυτός διακρίνεται σε μικρότερες λεκάνες, οι οποίες όμως επικοινωνούν υδραυλικά μεταξύ τους. Λόγω της σπουδαιότητας του υδροφορέα έχουν εγκατασταθεί τέσσερις σταθμοί στις θέσεις Ασήμι, Λούκια (Βαγιωνιά), Μοίρες και Πόμπια. Από τα διαγράμματα που ακολουθούν φαίνεται ότι επήλθε μια σημαντική πτώση της στάθμης των υδροφορέων, αποτέλεσμα της μειωμένης αναπλήρωσης , αλλά και των αυξημένων αντλήσεων.





**Σχήμα 41.8 Διακύμανση της στάθμης στην υδρογεωλογική Λεκάνη Μοιρών 1981-1998**

Από το παρακάτω διάγραμμα διακύμανσης της στάθμης στη λεκάνη Μοιρών παρατηρείται πτώση της στάθμης κατά την καλοκαιρινή περίοδο των υδρολογικών ετών 20065-2006 κατά 17 μέτρα σε σχέση με το προηγούμενο.



**Διάγραμμα διακύμανσης στάθμης κατά τα υδρολογικά έτη 2005-2006**

Για την αντιμετώπιση του παραπάνω φαινομένου της πτώσεως της στάθμης του υδροφορέα, το έτος 1995 κατασκευάσθηκε από υπουργείο Γεωργίας μικρό φράγμα εκτροπής ύψους περίπου 2,5μ μέσα στην κοίτη του ποταμού στο Γεροπόταμο στην περιοχή λύσματα κατάντι του οικισμού Πέρι του Δήμου Μοιρών με σκοπό τον εμπλουτισμό του υδροφορέα της Γ΄ ζώνης Μεσαράς από όπου με πλευρικό κανάλι διοχέτευαν το νερό σε παλιά υφιστάμενα κανάλια αποστράγγισης μήκους περίπου 2-3 χλμ (παλαιές κοίτες ποταμού) Φωτογραφίες 2,3,4



Φωτογραφία 2



Φωτογραφία 3

Φράγμα εκτροπής στον ποταμό Γεροπόταμο όπου φαίνεται ο τρόπος μεταφοράς του νερού από τον ποταμό στο πλευρικό κανάλι εμπλουτισμού





Φωτογραφία 4

Εξωποτάμιο κανάλι μεταφοράς νερού εμπλουτισμού από το φράγμα της κοίτης του ποταμού Γεροπόταμου.

### 9.3. ΔΗΜΟΥ ΒΙΑΝΝΟΥ

#### -Δ.Δ. ΕΜΠΑΡΟΥ

Η απρογραμματίστη υπερεκμετάλλευση των υπογείων νερών των πεδινών τμημάτων στην ευρύτερη περιοχή του Δ.Δ. Εμπάρου είχε προκαλέσει μείωση του υπόγειου υδατικού δυναμικού στους υπόγειους αλλουβιακούς και νεογενείς υδροφόρους με κύρια χαρακτηριστικά την συνεχή πτώση στάθμης, την μεγάλη μείωση της παροχής και την υποβάθμιση της ποιότητας των νερών

Στην συνέχεια λόγω των παραπάνω προβλημάτων στην λεκάνη του Δ.Δ. Εμπάρου έγινε έρευνα τεχνητού εμπλουτισμού των υδροφόρων στρωμάτων σε συνεργασία της Τ.Υ.Δ.Κ με το τμήμα Γεωλογίας-Εργαστήριο Υδρογεωλογίας του Πανεπιστημίου Πατρών με επιστημονικά υπεύθυνο τον καθηγητή Ν. Λαμπράκη το έτος 1995 , όπου στην ευρύτερη περιοχή πραγματοποιήθηκε υδρογεωλογική έρευνα με σκοπό τη διερεύνηση των υδροφόρων οριζόντων της περιοχής και των δυνατοτήτων τεχνητού εμπλουτισμού τους. Από την έρευνα διαπιστώθηκε η ύπαρξη δύο υδροφόρων οριζόντων στα κροκαλοπαγή εκ των οποίων ο ένας αναπτύσσεται στα ΝΑ του ΔΔ. Έχει μικρή έκταση και εκτονώνεται από την πηγή Δράου από την οποία υδρεύεται ο συνοικισμός του Θωμαδιανού. Ο δεύτερος που αναπτύσσεται στα ΒΑ έχει επίσης, μικρή επιφανειακή εξάπλωση η οποία εκτιμήθηκε ότι είναι της τάξεως των 1,5 τ.χλμ, έχει όμως

κατά ζώνες μεγάλο πάχος που μπορεί να φτάσει τα 140 μ. Είναι ο πλέον σημαντικός εκ των δύο και η έρευνα εντοπίστηκε κυρίως σε αυτόν. Από την επεξεργασία των υδρολογικών δεδομένων και το υδρολογικό ισοζύγιο προέκυψε ότι οι ποσότητες νερού που αποθηκεύονται στον υδροφόρο και μπορούν να αποδοθούν κατά τη ξηρά περίοδο του έτους ανέρχονται κατά μέσο όρο σε 900.000 κ.μ. νερού ενώ το έλλειμμα τροφοδοσίας των υδροφόρων ανέρχεται σε 500.000 κ.μ. ανά έτος.

Η τροφοδοσία των υδροφόρων στρωμάτων επιτελείται ,μέσω της απευθείας κατείσδυσης αλλά και μέσω παρακείμενων γεωλογικών σχηματισμών. Στην υπολεκάνη Εμπάρου που φιλοξενεί τον υδροφόρο και περιβάλλεται από υδροπερατά πετρώματα, η επιφανειακή απορροή είναι αμελητέα. Αντίθετα, στη λεκάνη Εμπάρου που αναπτύσσεται ανάντη της γέφυρας Εμπάρου, η επιφανειακή απορροή μπορεί να φτάσει το 40% επί των βροχοπτώσεων. Η ποσότητα αυτή είναι αρκετή για να τροφοδοτήσει έργο τεχνητού εμπλουτισμού καθώς και τις δύο λιμνοδεξαμενές που έχουν κατασκευαστεί στις περιοχές Καραβάδω και Σχινιά. Στη συνέχεια υπολογίστηκαν οι υδραυλικές παράμετροι του υδροφορέα και έγινε πιλοτικός τεχνικός εμπλουτισμός. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η υδραυλική κλίση του υδροφορέα κυμένεται μεταξύ 0,7-0,3% , η υδραυλική αγωγιμότητα μεταξύ 0,2- 2m<sup>2</sup>/min, ενώ ο συντελεστής υδροχωρητικότητας ευρέθει ίσος με 30%. Από το πιλοτικό αυτό πρόγραμμα Τεχνικού Εμπλουτισμού προέκυψε ότι η αναπλήρωση του ελλείμματος νερού μπορεί να πραγματοποιηθεί με την κατασκευή τεσσάρων γεωτρήσεων βάθους περίπου 70μ και θα απέχουν μεταξύ των τουλάχιστον 200μ



Φωτογραφία 5

Όπου φαίνεται το Δ.Δ Εμπάρου και λεκάνη της Εμπάρου

#### **-Δ.Δ. ΚΕΦΑΛΟΒΡΥΣΙΟΥ, ΣΥΜΗΣ, ΟΙΚΙΣΜ. ΑΡΒΗΣ ΔΗΜΟΥ ΒΙΑΝΝΟΥ**

Τεχνικός εμπλουτισμός υπογείων Υδροφόρων σχηματισμών

Η μελέτη αυτή η οποία έγινε από τον Μελετητή Δρ Υδρογεωλόγο Παναγιώτη Γιαννουλόπουλο σε συνεργασία με την Τ.Υ.Δ.Κ Περιφέρειας Κρήτης αφορά την αξιοποίηση των υδατικών πλεονασμάτων των πηγών Σύμης που αναβλύζει σε υψόμετρο 795μ και Κεφαλοβρυσίου που αναβλύζει σε υψόμετρο 865μ περίπου ιδιαίτερα για τους χειμερινούς και εαρινούς μήνες για τον Τεχνικό Εμπλουτισμό του καρστικού ασβεστολιθικού συστήματος της Αρβης. Το πλεόνασμα του νερού από την υδρομάστευση της πηγής Κεφαλοβρυσίου που αναβλύζει σε υψόμετρο 865μ περίπου πρόκειται να καταλήξει σε κεντρική αρδευτική δεξαμενή που βρίσκεται σε υψόμετρο 460μ και στη συνέχεια με ελεύθερη ροή σε υφιστάμενες γεωτρήσεις εμπλουτισμού/άρδευσης που βρίσκονται κατόπιν η σε νέες γεωτρήσεις εμπλουτισμού που θα ανορυχθούν ειδικά για τον σκοπό αυτό Ο υδροφόρος σχηματισμός που πρόκειται να εμπλουτισθεί στην άμεση περιοχή είναι το καρστικό υδροφόρο σύστημα της Αρβης..

Το πλεόνασμα του νερού από την υδρομάστευση της πηγής Σύμης που αναβλύζει σε υψόμετρο 795μ περίπου πρόκειται να καταλήξει σε κεντρική αρδευτική δεξαμενή που βρίσκεται σε υψόμετρο 450μ και στη συνέχεια με ελεύθερη ροή σε υφιστάμενες γεωτρήσεις εμπλουτισμού/άρδευσης που βρίσκονται κατόπιν η σε νέες γεωτρήσεις εμπλουτισμού που θα ανορυχθούν ειδικά για τον σκοπό αυτό Ο υδροφόρος σχηματισμός που πρόκειται να εμπλουτισθεί στην άμεση περιοχή είναι το καρστικό υδροφόρο σύστημα της Αρβης.

Ο τεχνικός εμπλουτισμός του παραπάνω συστήματος αναμένεται επίσης να έχει θετικές επιπτώσεις στην ποιότητα του νερού του καρστικού συστήματος Αρβης Τα πηγαία νερά είναι οξυανθρακικά νερά απηλλαγμένα από θειικά ιόντα ενώ τα υπόγεια του καρστικού συστήματος της Αρβης έχει παρατηρηθεί αυξημένη συγκέντρωση θειικών νερών λόγω της παρουσίας των στρωμάτων γύψου στην ευρύτερη περιοχή. Ο τεχνικός εμπλουτισμός και η σχετική μίξη των δύο νερών θα είχε ως αποτέλεσμα και την βελτίωση της ποιότητας των υπογείων νερών του καρστικού συστήματος Αρβης. Ας σημειωθεί επίσης ότι η αποκατάσταση της στάθμης του υπόγειου νερού στον καρστικό υδροφόρο έχει ως θετικό αποτέλεσμα την επαναλειτουργία της πηγής Αρβης ( πηγή υπερχείλισης). που ανάβλυζε κοντά στην έξοδο του φαράγγιού. Η πηγή αυτή κατά τα τελευταία έτη έχει σταματήσει να λειτουργεί λόγω της σταδιακής πτώσης της στάθμης του υπόγειου νερού στον καρστικό σύστημα της Αρβης.





**Φωτογραφία 6**  
**Καρστικό σύστημα ασβεστολίθων Αρβης**

#### **9.4. ΔΗΜΟΣ ΚΑΣΤΕΛΛΙΟΥ ΠΕΔΙΑΔΟΣ**

##### **Δ.Δ. ΓΕΡΑΚΙΟΥ**

Κατά τη χειμερινή περίοδο στην περιοχή του εν λόγω Δ.Δ. και σε υψόμετρο περίπου 1000 μ. αναβλύζει σημαντική πηγή επαφής η οποία εκφορτίζει τους ασβεστόλιθους της Ζώνης Τρίπολης με σημαντικές παροχές κατά τη χειμερινή περίοδο. Κατά τους καλοκαιρινούς μήνες η πηγή παρουσίαζε σημαντική μείωση της παροχής της. Από τη πηγή αυτή υδρευόταν παλαιότερα το Δ.Δ. Γερακίου. Κατά τους χειμερινούς μήνες λόγω των μεγάλων παροχών της πηγής έγιναν προσπάθειες Τεχνικού εμπλουτισμός της γεώτρησης η οποία βρίσκεται στη θέση Ξερόκαμπος με θετικά αποτελέσματα. Σημειωτέον ότι η ποιότητα του νερού της πηγής ήταν άριστη ενώ η ποιότητα του νερού της γεωτρήσεως ήταν μέτρια με αποτέλεσμα ο τεχνητός εμπλουτισμός να συμβάλλει στη βελτίωση της ποιότητας του νερού της γεώτρησης.

#### **9.5. ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ (ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΣ ΥΦΑΛΜΥΡΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΟΥ ΟΡΙΖΟΝΤΑ ΜΕ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΜΕΝΑ ΛΥΜΑΤΑ ΜΕΤΑ ΑΠΟ ΗΛΕΚΤΡΟΧΗΜΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟ)**

Γεωλογικώς η περιοχή δομείται από νεογενείς αποθέσεις (μαργαίκοι ασβεστόλιθοι, μάργες) που βρίσκονται σε επαφή με τους ασβεστόλιθους

της Ζώνης Τρίπολης. Ο υδροφορέας που αναπτύσσεται είναι ανοικτός προς τη θάλασσα με αποτέλεσμα η υδροστατική στάθμη της περιοχής να είναι το επίπεδο θαλάσσης και να παρουσιάζει υφαλμύρωση. Οι γεωτρήσεις που ανορύχθηκαν στην περιοχή για τις διάφορες ανάγκες των βιομηχανιών ήταν υφάλμυρες. Στην παραπάνω περιοχή γίνεται σήμερα ένα πιλοτικό πρόγραμμα από όπου τα επεξεργασμένα λύματα του βιολογικού καθαρισμού (δευτεροβάθμια επεξεργασία) της βιομηχανικής περιοχής, μετά από περαιτέρω επεξεργασία με ηλεκτροχημική μέθοδο, και φίλτρου θα γίνεται τεχνητός εμπλουτισμός του υδροφορέα με την κατασκευή 2 γεωτρήσεων και 2 πιεζομέτρων για την παρακολούθηση της ποιότητας και έλεγχο της στάθμης με σκοπό την δημιουργία τεχνητού φραγμού για τη μείωση της διείσδυσης της θάλασσας στον υδροφορέα. Το όλο έργο σήμερα ευρίσκεται στην ολοκλήρωσή του.



Φωτογραφία 7

Μονάδα ηλεκτροχημικού καθαρισμού για την περαιτέρω επεξεργασία των Λυμάτων του βιολογικού καθαρισμού της Β.Ι.Π.Ε Ηρακλείου για εμπλουτισμό υφάλμυρου υδροφόρου ορίζοντα





Φωτογραφία 8

Δεξαμενές αντλητικών συγροτημάτων



Φωτογραφία 9

Τρίτη δεξαμενή, από όπου, μετά την τελική επεξεργασία των λυμάτων, (ηλεκτροχημική) το επεξεργασμένο νερό θα διοχετεύεται στις γεωτρήσεις.



**ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΤΙΚΟ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ** Νο 2645-2646 Ημερομηνία: 27-09-07

**ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΕΛΑΤΗ**

ΟΝΟΜΑ ΠΕΛΑΤΗ:	ΒΙΟΛΟΓΙΚΟΣ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΣ Ε.Τ.Β.Α – ΤΕΚ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΠΕΛΑΤΗ:	ΒΙ. ΠΕ. ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ
ΤΗΛ:	2810 380988 / 2310 283932

**ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ**

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ:	ΝΕΡΟ ΒΙΟΛΟΓΙΚΟΥ
ΣΥΣΚΕΥΑΣΙΑ:	ΠΛΑΣΤΙΚΑ ΜΠΟΥΚΑΛΙΑ
ΜΕΤΑΦΟΡΑ:	ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ
ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ:	ΚΑΝΟΝΙΚΗ
ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ	ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΗΣ ΔΕΛΙΟΥΣΗΣ
ΗΜ/ΝΙΑ ΠΑΡΑΛΑΒΗΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ:	20-09-07
ΗΜ/ΝΙΑ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ:	20-09-07
ΗΜ/ΝΙΑ ΕΝΑΡΞΗΣ ΕΞΕΤΑΣΕΩΝ:	20-09-07
ΗΜ/ΝΙΑ ΠΕΡΑΤΩΣΗΣ ΕΞΕΤΑΣΕΩΝ:	26-09-07

Η εταιρία μας έχει πιστοποιηθεί σύμφωνα με το πρότυπο του ISO 9001:2000 για το σύνολο των υπηρεσιών της και βρίσκεται σε διαδικασία διαπίστευσης κατά ISO 17025 (Αρ. Πρωτοκόλλου Ε.Σ.Υ.Α. 4039/18-S-07).

Απαγορεύεται η μερική ανατύπωση του πιστοποιητικού χωρίς τη γραπτή άδεια του εργοστασίου. Το πιστοποιητικό επιτρέπεται να αναπαραχθεί μόνο σε πλήρη μορφή.

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	14175 ΕΙΣΟΔΟΣ (Ε1)	14176 ΑΕΡΙΣΜΟΣ (Ε2)	14177 ΕΞΟΔΟΣ ΔΚ1 (Ε3)	14179 ΕΞ. ΗΛΣΗΣ (Ε4)	14180 ΕΞΟΔΟΣ ΔΚ2 (Ε5)	14178 ΕΞΟΔΟΣ ΦΙΑΤΡΟΥ (Ε6)
pH	7,89	-	7,75	8,10	8,13	8,11
ΔΩΓΓΙΜΟΤΗΤΑ	2,470	-	8,410	-	-	-
Χλωρίδوني (mg/L CF)	418	-	2,318	-	-	-
C.O.D. (mg O <sub>2</sub> /L)	756	-	42	27	31	26
B.O.D <sub>5</sub> (mg O <sub>2</sub> /L)	473	-	16,2	10,4	11,2	10
S.S. (mg/L)	653	13,269	18,2	34,4	34,3	24,4
V.S.S. (mg/L)	457	9,288	-	-	-	-
Ελ. Χλώριο (mg/L)	-	-	-	0,00	-	-
ΟΛΙΚΑ ΚΟΛΟΒ/ΑΙΑ	-	-	5X10 <sup>2</sup>	90	-	10
ΚΟΙΤΡΑΝΩΔΗ ΚΟΛΟΒ/ΕΙΔΗ	-	-	1,8X10 <sup>2</sup>	0	-	0

Ο ΤΕΧΝΙΚΟΣ ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ

Ο ΔΙΕΥΘΥΝΩΝ ΣΥΜΒΟΥΛΟΣ

ΧΡΥΣΗ ΑΓΓΕΛΙΔΑΚΗ  
ΒΙΟΛΟΓΟΣ

Π. ΝΙΚΗΦΟΡΑΚΗΣ  
ΚΤΗΝΙΑΤΡΟΣ

Μικ. Ελευθεριάδη 2, Νέα Αλικαρνασός, 71601 Ηράκλειο  
τηλ: 2810 336760, fax: 2810 336761  
e-mail: info@bri.gr

1/1 Σελ

P.2/3

Tel: 2810336761

2810336761

3-SEP-2007 14:33 From: B10EPFVNHITICH

ΠΙΣΤΟΠΟΙΗΤΙΚΟ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ Νο 2670

Ημερομηνία: 04-10-07

**ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΕΛΑΤΗ**

ΟΝΟΜΑ ΠΕΛΑΤΗ:	ΒΙΟΛΟΓΙΚΟΣ ΚΑΘΑΡΙΣΜΟΣ Ε.Τ.Β.Α
ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΠΕΛΑΤΗ:	ΒΙ. ΠΕ. ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ
ΤΗΛ:	2810 380988 / 6972222981 Κος Χουρδάκης

**ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ**

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ:	ΝΕΡΟ ΒΙΟΛΟΓΙΚΟΥ
ΣΥΣΚΕΥΑΣΙΑ:	ΠΛΑΣΤΙΚΑ ΜΠΟΥΚΑΛΙΑ
ΜΕΤΑΦΟΡΑ:	ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ
ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ:	ΚΑΝΟΝΙΚΗ
ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ	ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΗΣ ΛΕΛΙΟΥΣΗΣ
ΗΜ/ΝΙΑ ΠΑΡΑΛΑΒΗΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ:	27-09-07
ΗΜ/ΝΙΑ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑΣ:	27-09-07
ΗΜ/ΝΙΑ ΕΝΑΡΞΗΣ ΕΞΕΤΑΣΕΩΝ:	28-09-07
ΗΜ/ΝΙΑ ΠΕΡΑΤΩΣΗΣ ΕΞΕΤΑΣΕΩΝ:	03-10-07

Η εταιρία μας έχει πιστοποιηθεί σύμφωνα με το πρότυπο του ISO 9001:2000 για το σύνολο των υπηρεσιών της και βρίσκεται σε διαδικασία διπλοποίησης κατά ISO 17025 (Αρ. Πρωτοκόλλου Ε.Σ.Υ.Δ. 4039/18-5-07).

Απαγορεύεται η μερική ανατύπωση του πιστοποιητικού χωρίς τη γραπτή άδεια του εργαστηρίου. Το πιστοποιητικό επιτρέπεται να αναπαραχθεί μόνο ως πλήρη μορφή.

ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΣ	14291 ΕΙΣΟΔΟΣ (E1)	14292 ΑΕΡΙΣΜΟΣ (E2)	14293 ΕΞΟΔΟΣ ΔΚ1 (E3)	14294 ΕΞΟΔΟΣ ΦΙΛΤΡΟΥ (E6)
Γh	6.94	-	7.86	8.10
ΔΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ	17.560	-	5.880	-
Χλωρίδωση (mg/L CF)	5.282	-	806	-
C.O.D. (mg O <sub>2</sub> /L)	1.466	-	55	30
B.O.D <sub>5</sub> (mg O <sub>2</sub> /L)	916	-	21	11
S.S. (mg/L)	597	11.128	59	21
V.S.S. (mg/L)	418	7.790	-	-
ΟΛΙΚΑ ΚΟΛΟΒΑΚΤΗΡΙΑ/100 ml ISO 9308	-	-	6X10 <sup>3</sup>	10
ΚΟΠΡΑΝΩΔΗ ΚΟΛΟΒ/ΕΙΔΗ /100 ml ISO 9308-1	-	-	10 <sup>3</sup>	3

**Ο ΤΕΧΝΙΚΟΣ ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ**

ΒΙΟΕΡΕΥΝΗΤΙΚΑ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑ Α.Ε.  
ΜΙΧ. ΕΛΕΥΘΕΡΙΔΗ 2 - Ν. ΑΛΙΚΑΡΝΑΣΣΟΣ  
ΑΦΜ 999201258 - Β' ΔΟΥ ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ  
ΤΗΛ. 2810 336760 2810 336761

ΧΡΥΣΗ ΑΓΓΕΛΙΔΑΚΗ  
ΒΙΟΛΟΓΟΣ

**Ο ΔΙΕΥΘΥΝΩΝ ΣΥΜΒΟΥΛΟΣ**

ΒΙΟΕΡΕΥΝΗΤΙΚΑ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑ Α.Ε.  
ΜΙΧ. ΕΛΕΥΘΕΡΙΔΗ 2 - Ν. ΑΛΙΚΑΡΝΑΣΣΟΣ  
ΑΦΜ 999201258 - Β' ΔΟΥ ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ  
ΤΗΛ. 2810 336760 - 2810 336761

Π. ΝΙΚΗΦΟΡΑΚΗΣ  
ΚΙΝΗΜΑΤΟΣ

Μιχ. Ελευθεριόδη 2, Νέα Αλικαρνασσός, 71501 Ηράκλειο  
τηλ: 2810 336760, fax: 2810 336761  
e-mail: info@brl.gr

Σελ. 1/1

P. 3/3

T: 2810336761

2810336761

14294-2007 11:55 P: 0000 B: BIOEREVNHTIKA

Η όλη μέθοδος βρίσκεται σε πιλοτική μορφή και γίνονται προσπάθειες ρύθμισης της ηλεκτροχημικής μονάδος, όπου τα επεξεργασμένα λύματα θα είναι κατάλληλα για τον εμπλουτισμό του υδροφορέα, ο οποίος είναι υφάλμυρος, με σκοπό τη δημιουργία υβώματος για την αποτροπή της διείδυσης της θαλάσσης. Μέχρι τώρα, τα επεξεργασμένα λύματα χρησιμοποιούνται για την άρδευση του πρασίνου της βιομηχανικής περιοχής Ηρακλείου. Μετά τις απαραίτητες ρυθμίσεις της ηλεκτροχημικής μονάδος και όταν τα επεξεργασμένα λύματα είναι εντός των προδιαγραφών, θα διοχετεύονται για τον τεχνητό εμπλουτισμό με τη μέθοδο των γεωτρήσεων.



## 9.6. ΔΗΜΟΣ ΜΑΚΡΥ ΓΙΑΛΟΥ

### Δ.Δ ΑΓΙΟΥ ΣΤΕΦΑΝΟΥ

Στην τοποθεσία Αγγέλου Λάκκος του Δ.Δ. Αγίου Στεφάνου του Δήμου Μακρύ Γιαλού . έχουν γίνει 3 γεωτρήσεις εκ των οποίων οι 2 χρησιμοποιούνται για εμπλουτισμό και η άλλη για άντληση, με στόχο την αναπλήρωση και ποιοτική αναβάθμιση των υπογείων νερών, τον χειμώνα γίνεται εμπλουτισμός της περιοχής με μεταφορά νερού από τις πηγές Αρχών του Δ.Δ. Σταυροχωρίου στην περιοχή όπου υπάρχουν οι παραπάνω γεωτρήσεις με αποτέλεσμα να έχουμε καλύτερη ποιότητα νερού και αναπλήρωση του υδροφορέα.



Φωτογραφία 11

Περιοχή Αγγέλου Λάκκος όπου φαίνονται τα έργα Τ.Ε στις γεωτρήσεις

### ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι το μέλλον του Τεχνικού Εμπλουτισμού διαφαίνεται αρκετά ευόιωνο αφού η δυνατότητα υπόγειας αποθήκευσης του νερού εξελίσσεται σε ισχυρή εναλλακτική προοπτική στην επίλυση του προβλήματος της αντιμετώπισης βραχυπρόθεσμων εποχιακών η και μακροπρόθεσμων διαφορών μεταξύ προσφοράς και ζήτησης νερού.

## 8. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Αγγελάκης Α., Χαρτζουλάκης, 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.
- Αγγελάκης Α. και Τσομπάνολγου Γ. (1996). Υγρά απόβλητα. Πανεπ. Εκδόσεις Κρήτης, Ηράκλειο Κρήτης.
- 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., Πανώρας, Α. και Αναγνωστόπουλος, Κ., (1995). "Πείραμα τεχνητού εμπλουτισμού των υδροφόρων στρωμάτων της περιοχής Πετραίας Ν.Πέλλης με τη χρήση αρδευτικής γεώτρησης". Πρακτικά 7ου Συνεδρίου της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας (υπό έκδοση).
- Βαφειάδης, Π., (1995). "Τεχνητός Εμπλουτισμός των Υδροφόρων Στρωμάτων". Θεσσαλονίκη.
- Διαμαντής, Ι., Πλιάκας, Φ. και Τζεβελέκης, Θ., (1994). "Τεχνητός εμπλουτισμός με επαναδραστηριοποίηση αδρανοποιημένων κοιτών: μία πρώτη προσέγγιση". Πρακτικά 2ου Υδρογεωλογικού Συνεδρίου, 24-28/11/1993, Πάτρα, σελ. 107-118.
- 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.
- Διαμαντής, Ι. Τεχνητός Εμπλουτισμός Ξάνθη 2006
- 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> Πανελλήνιου Υδρογεωλογικού Συνεδρίου, 1991.
- 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.
- 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.
- 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.

- Κωνσταντίνου Κ. Α., (1994). Υδρογεωλογική και υδροχημική συμπεριφορά του ψευτο-καρστικού υδροφορέα των γύψων της περιοχής Μαρώων (Κύπρος), Δελτίο Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας Τόμος XXX, Τεύχος 4, σελ. 191-200 (7ον Συνέδριο Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρίας).
- 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 Ελληνικής Υδροτεχνικής 22-26/5/1995, Θεσσαλονίκη, σελ. 57-64.
- 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. και Διαμαντής, Ι., (1995). "Διερεύνηση εφαρμογής τεχνητού εμπλουτισμού σε υδροφορείς πεδινού τμήματος της Λεκάνης Βιστονίδας (Ξάνθης)". 3ο Υδρογεωλογικό Συνέδριο, 3-5/11/1995, Ηράκλειο, 1995.
- 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. και Ι. Διαμαντής (1998). Ο τεχνητός εμπλουτισμός των υπόγειων νερών και εφαρμογές του στην Ελλάδα και το διεθνές χώρο. Τεχνικά Χρονικά, Επιστημονική Έκδοση του Τ.Ε.Ε. σειρά 1, τόμος 18, τεύχος 1, 1998, σελ. 65-74.
- 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., 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 αδραντοποιημένων 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., (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.
- 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.



- Πουλοβασίλης Α, Μιμίδης Θ, Γιαννουλόπουλος Π., Γερούλης Λ., Ψυχογιού Μ., Αλεξανδρή Σ., Χατζηθωμάς Κ., Κάργας Γ. και Γ. Κωτσαντής (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.
- Σακκάς, Ι., Ι., Διαμαντής, Φ. Πλιάκας, et al., (1998). "Μελέτη τεχνητού εμπλουτισμού υδροφορέων Ξάνθης - Ροδόπης". Ερευνητικό πρόγραμμα για λογαριασμό του Υπουργείου Γεωργίας, Τομείς Υδραυλικών Έργων και Γεωτεχνικής Μηχανικής, Δ.Π.Θ., τεύχη 5, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Δ.Π.Θ., Ξάνθη.
- Στασινόπουλος Κ και Πουλοβασίλης Α. (1965), Κατατοπιστικό σημείωμα επί του Υδατικού προβλήματος του Αργολικού Πεδίου. ΥΠ.ΓΕ., Υπηρεσία Εγγείων Βελτιώσεων, Δ/νσις Ι, Τμήμα Ε, 14σελ.
- Τερζίδης, Γ.Α. και Καραμούζης, Δ.Ν., (2001). "Υδραυλική υπόγειων νερών". Έκδοση ΖΗΤΗ, Θεσσαλονίκη.
- 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., (1980). "Ground Water Hydrology". John Willey & Sons, New York.
- 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.
- 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.
- ΥΠ.ΓΕ, (1963-75), Καταστάσεις Μετρήσεως Στάθμης και Αναλύσεως Ύδατος Ερευνητικών Γεωτρήσεων και Φρεάτων. Υπουργείου Γεωργίας, Υπηρεσία Εγγείων Βελτιώσεων, Γ' Περιφ. Δνσις Εγγείων Βελτιώσεων, Τομέας Αργολίδος.