

Ο Τεχνητός Εμπλουτισμός των Υπόγειων Νερών και Εφαρμογές του στην Ελλάδα και το Διεθνή Χώρο

Φ. ΠΛΙΑΚΑΣ

Επιστημονικός Συνεργάτης Δ.Π.Θ.

Ι. ΔΙΑΜΑΝΤΗΣ

Αναπληρωτής Καθηγητής Δ.Π.Θ.

Περίληψη

Ο τεχνητός εμπλουτισμός έχει χρησιμοποιηθεί στο διεθνή χώρο εδώ και δύο περίπου αιώνες, με ελάχιστες εφαρμογές στην Ελλάδα, σε ένα ευρύ φάσμα περιπτώσεων και σε μια μεγάλη ποικιλία μεθόδων και τεχνικών. Η μεγαλύτερη χρήση του τεχνητού εμπλουτισμού, σήμερα, αποσκοπεί στην επαναπλήρωση των μειωμένων διαθέσιμων ποσοτήτων υπόγειων νερών για την κάλυψη αστικών, βιομηχανικών και αρδευτικών αναγκών ή στη βελτίωση της ποιότητάς τους. Στην Ελλάδα, κατά τις τελευταίες δεκαετίες, έχουμε μια σειρά από προσπάθειες εφαρμογής τεχνητού εμπλουτισμού, με κύριες και μεγαλύτερες εκείνες στο Αργολικό Πεδίο και στη Θράκη, όπου στην τελευταία, η ενεργοποίηση παλιών αδρανοποιημένων κοιτών αποτελεί μια ελπιδοφόρα, σχετικού μικρού κόστους και αρκετά αποτελεσματική μέθοδο εμπλουτισμού.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ραγδαία αύξηση των απαιτήσεων σε νερό, κατά τις τελευταίες δεκαετίες, έχει αναγκάσει τη σύγχρονη κοινωνία να αντιμετωπίζει το νερό ως ένα απόθεμα σε πρώτη ζήτηση και όχι ως ένα οικοσύστημα που συντηρεί το φυσικό περιβάλλον από το οποίο εξαρτώμαστε. Η προσπάθεια επέκτασης των αρδευόμενων εκτάσεων, η αλλαγή των καλλιεργειών σε περισσότερο υδροβόρες, όπως και οι μεγαλύτερες καταναλώσεις για οικιακή χρήση έχουν προκαλέσει υπέρμετρη ζήτηση νερού. Η ικανοποίηση αυτής της ζήτησης γίνεται με την αλόγιστη υπερεκμετάλλευση των υπόγειων νερών, αφού αυτά αποτελούν τις σημαντικότερες πηγές διάθεσης νερού, κυρίως στα πεδινά τμήματα, με αποτέλεσμα την εμφάνιση, όλο και πιο έντονα, του φαινομένου της λειψυδρίας. Το φαινόμενο αυτό εκδηλώνεται είτε μέσα από τη δραματική πτώση της στάθμης των υπερβολικά πολλών κατά περίπτωση γεωτρήσεων και κατά συνέπεια του περιορισμού της εκμεταλλεύσιμης παροχής, είτε μέσα από την επιβάρυνση της ποιότητας του νερού. Επίσης, σημαντικό ρόλο έχουν παίξει τα διάφορα εγγειοβελτιωτικά έργα που κατασκευάστηκαν στο τέλος της δεκαετίας του '50, σε πεδινές περιοχές, και περιλάμβαναν εκτροπές και διευθετήσεις ποταμών και χει-

μάρρων, συμμάζεμα και εγκιβωτισμό διάσπαρτων κοιτών, καθώς και διάφορα μεγάλα αποστραγγιστικά έργα. Οι επεμβάσεις αυτές έγιναν χωρίς ιδιαίτερη πρόβλεψη για τις συνέπειές τους στην εξέλιξη του υπόγειου υδατικού δυναμικού κατά τα επόμενα χρόνια. Έτσι, σήμερα, έχει διαμορφωθεί ένα διαφορετικό καθεστώς τροφοδοσίας των υπόγειων νερών, με κύριο χαρακτηριστικό το δραματικό περιορισμό των επιφανειών διήθησης του επιφανειακού νερού προς τους υπόγειους υδροφόρους.

Το ερώτημα που τίθεται σήμερα είναι κάτω από ποιες προϋποθέσεις μπορεί το σημερινό καθεστώς των υπόγειων νερών να επανέλθει ή να προσεγγίσει ικανοποιητικά την κατάσταση προηγούμενων ετών, τότε που σοβαρά προβλήματα, σαν αυτά που αναφέρθηκαν πιο πάνω, δεν είχαν εμφανιστεί. Η άμεση προώθηση εφαρμογής έργων τεχνητού εμπλουτισμού αποτελεί μια ρεαλιστική και ελπιδοφόρα απάντηση που σήμερα μπορεί να κατατεθεί.

ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ

T	συντελεστής μεταβιβαστικότητας [m ² /sec]
S	συντελεστής εναποθήκευσης
r	ρυθμός ανόδου της στάθμης των γεωτρήσεων της περιοχής έρευνας πριν από την εφαρμογή του τεχνητού εμπλουτισμού (Τ.Ε.) [cm/ημέρα]
R	ρυθμός ανόδου της στάθμης των γεωτρήσεων της περιοχής έρευνας κατά τη διάρκεια της εφαρμογής του Τ.Ε. [cm/ημέρα]
R/r	βαθμός επηρεασμού από την εφαρμογή του Τ.Ε.

3. ΣΚΟΠΟΙ - ΜΕΘΟΔΟΙ ΚΑΙ ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΕΠΙΛΟΓΗΣ ΤΟΥΣ

Ο τεχνητός εμπλουτισμός (Τ.Ε.) μπορεί να χαρακτηριστεί ως μια διαδικασία αύξησης της φυσικής ροής του επιφανειακού νερού προς τους υπόγειους υδροφόρους με την

κατασκευή κατάλληλων έργων, την κατάκλυση με νερό ή τη μεταβολή των φυσικών συνθηκών [21]. Αποτελεί μια σημαντική διαδικασία ενίσχυσης του υπόγειου υδατικού δυναμικού από επιφανειακά νερά, συμβάλλοντας έτσι ουσιαστικά στον περιορισμό του φαινομένου της λειψυδρίας, η οποία τα τελευταία χρόνια έχει ενταθεί σε πολλές περιοχές.

Ο Τ.Ε. έχει χρησιμοποιηθεί στο διεθνή κυρίως χώρο εδώ και 200 χρόνια περίπου, με ελάχιστες εφαρμογές στην Ελλάδα κατά τις τελευταίες δεκαετίες, σε ένα ευρύ φάσμα περιπτώσεων, όπως [10, 14, 15, 17, 21]:

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

Πολλές μέθοδοι Τ.Ε. έχουν αναπτυχθεί, όπως [7, 17, 20]: α) μέθοδοι επιφανειακού εμπλουτισμού (μέθοδοι λεκάνης, τάφρων και αυλάκων, πλημμύρας, διευθέτησης υδρορρευματος, επανεργοποίησης ή αύξησης της ροής υδρορρευματος, άρδευσης), β) μέθοδοι υπεδάφικου εμπλουτισμού (με φυσικά ανοίγματα, ορύγματα και εκσκαφές, γεωτρήσεις εμπλουτισμού, με αντίστροφη αποστράγγιση), γ) διάφοροι συνδυασμοί των δύο πιο πάνω μορφών εμπλουτισμού και δ) μέθοδοι έμμεσου εμπλουτισμού (επαγωγικός εμπλουτισμός, συμπωματικός εμπλουτισμός, διευθέτηση υδροφορέων).

Η επιλογή της πιο κατάλληλης μεθόδου είναι συνάρτηση 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 και τέλος, διάφορων οικονομικών και νομικών παραγόντων και κριτηρίων [15, 19].

Τα πλεονεκτήματα της εφαρμογής του Τ.Ε. και κυρίως της χρήσης του υπόγειου νερού σε συστήματα δημόσιας διάθεσης του μπορεί να επισκιασθούν από ορισμένα μειονεκτήματα, όπως είναι: 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 αιφνίδιων απαιτήσεων σε νερό, αφού οι υπόγειοι υδροφορείς δεν μπορούν να αποστραγγισθούν τόσο εύκολα όπως οι αντίστοιχοι επιφανειακοί ταμιευτήρες, το μεγάλο σχετικά κόστος μιας ενδεχόμενης επέκτασης των συστημάτων διάθεσης υπόγειου νερού [17].

4. ΔΙΕΘΝΗΣ ΕΜΠΕΙΡΙΑ

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) [13] και στις Η.Π.Α., την τελευταία δεκαετία του ίδιου αιώνα (στο Denver με λεκάνες κατάκλυσης, στην Καλιφόρνια με άρδευση) [19]. 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 [13].

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, τη Σουηδία, το Ισραήλ, την Αίγυπτο, την Αλγερία, το Ιράν, τη Λιθουανία, το Τουρκμενιστάν, το Ουζμπεκιστάν, την Ουκρανία. Ο Τ.Ε. εφαρμόζεται, επίσης, ευρέως για τον έλεγχο της διεύθυνσης 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, τη Βουλγαρία και τη Γαλλία ο Τ.Ε. συμβάλλει στη συμπλήρωση του νερού άρδευσης που προέρχεται από υπόγειες τροφοδοσίες [19].

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 [19].

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 [19]. Η μέθοδος αυτή διαδόθηκε σε όλη την Ευρώπη και συνεχίστηκε στις αποικίες, όπως τη Ν. Αφρική, την Αυστραλία, το Μεξικό, όπου πολλές από τις μεγάλες φάρμες εφήρμοσαν υπόγεια στραγγιστήρια για να μεταφέρουν το πλεόνασμα του υπόγειου νερού του Τ.Ε. σε γειτονικούς χειμάρρους. Σε ημίξερους περιοχές των Η.Π.Α. (Καλιφόρνια, Αριζόνα, Φλόριδα κ.α.) αλλά και στο Ισραήλ (Τελ-Αβίβ) εφαρμόζεται με επιτυχία επί σειρά ετών εμπλουτισμός με τη μέθοδο της φυσικής επεξεργασίας υγρών αποβλήτων μέσω του εδάφους - υδροφορέα, γνωστή διεθνώς με την ονομασία "Soil Aquifer Treatment" (S.A.T.), και με αποτέλεσμα την ικανοποίηση αναγκών 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 [18].

Στις περισσότερες χώρες - κράτη μέλη της Ε.Ο.Κ., ο Τ.Ε. εφαρμόζεται με μια μεγάλη ποικιλία και εύρος εφαρμογών, ενώ υπάρχουν σχέδια για μελλοντική και συστηματικότερη ανάπτυξή του. Στην Ιρλανδία, την Ιταλία, το Λουξεμβούργο και την 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, τη Δανία, τη Γαλλία, την Ελλάδα, την Αγγλία, την Ισπανία, την 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) [4].

Στην Κύπρο, από το 1982, έχει εφαρμοστεί συστηματικά ο Τ.Ε. με μεθόδους κυρίως κατάκλυσης (λιμνοδεξαμενές σε αλλουβιακές αποθέσεις) σε μεγάλους υδροφορείς του νησιού (Γερμασόγεια, 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 [5]. 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 Κοκκινοχωριών [16].

5. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΤΕΧΝΗΤΟΥ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΥ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

Στο Αργολικό Πεδίο έχουμε μια σειρά από προσπάθειες εφαρμογής Τ.Ε., με πρώτη εκείνη του Υπουργείου Γεωργίας (ΥΕΒ), την περίοδο 1963-1966, με τη μέθοδο των φρεάτων. Χρησιμοποιήθηκαν περί τα 60 φρέατα εμπλουτισμού και αξιοποιήθηκαν τα χειμερινά νερά των πηγών Κεφαλαρίου και Λέρνης. Ο εμπλουτισμός συνεχίστηκε και τις χρονιές 1967, 1968, όταν εγκαταλείφθηκε πλέον η προσπάθεια λόγω έλλειψης συστηματικού δικτύου μεταφοράς του επιφανειακού νερού και ανόρυξης πολλών βαθιών γεωτρήσεων στην περιοχή. Η συνολική ποσότητα νερού, που διοχετεύθηκε στα υδροφόρα στρώματα κατά την τριετία 1965, 1966, 1967, ανέρχεται σε $3.29 \times 10^6 \text{ m}^3$. Η δεύτερη προσπάθεια ξεκίνησε με την πρόταση του Εργαστηρίου Γεωργικής Υδραυλικής του Γεωργικού Πανεπιστημίου Αθηνών μέσω ερευνητικού προγράμματος, που του ανατέθηκε από το Υπουργείο Γεωργίας το 1984, με θέμα την υφαλμύρωση των υδροφορέων του Αργολικού Πεδίου, για εφαρμογή Τ.Ε. με τα νερά των πηγών Κεφαλαρίου και Λέρνης, με στόχο την αναπλήρωση και την

ποιοτική αναβάθμιση των υπόγειων νερών, όπως επίσης και την παρεμπόδιση της θαλάσσιας διείσδυσης. Το έλλειμμα στα υπόγεια νερά εκτιμήθηκε σε $1000 \times 10^6 \text{m}^3$ και η δυνατότητα των πηγών για παροχή νερού εμπλουτισμού υπολογίστηκε στα $50 \times 10^6 \text{m}^3$ περίπου, κάθε χρόνο, κατά τους χειμερινούς μήνες. Το 1986-1987, εφαρμόστηκε Τ.Ε. σε δύο χειμάρρους του πεδίου με την κατασκευή λεκανών διήθησης και 5 γεωτρήσεων εμπλουτισμού για εκμετάλλευση των χειμερινών ροών, χωρίς όμως να υπάρξει σημαντικό αποτέλεσμα λόγω των περιορισμένων έως ασήμαντων ροών των χειμάρρων αυτών. Η τρίτη προσπάθεια έγινε το 1993 με την κατασκευή της προσαγωγού διώρυγας Αναβάλου. Έτσι, το 1994 άρχισε ο Τ.Ε. μέσω πηγαδιών, 80 γεωτρήσεων και 11 γεωτρήσεων εμπλουτισμού, καλύπτοντας μια έκταση 40.000 στρεμμάτων [3, 11, 12].

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 [6].

Στη Βιομηχανική Περιοχή Πατρών (ΒΙΠΕΠ), το 1993, εφαρμόστηκε πειραματικά ο Τ.Ε. μέσω μιας γεώτρησης στα πλειοπλειστοκαινικά ιζήματα της λεκάνης του Πείρου ποταμού [9], 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. Θεσσαλονίκης προτάθηκε το 1995 [18] μια διαδικασία εφαρμογής Τ.Ε. με επεξεργασμένα αστικά λύματα με στόχο την αντιμετώπιση φαινομένων καθίζησης της ευρύτερης περιοχής, την επαναχρησιμοποίηση του νερού για βιομηχανική και γεωργική χρήση και την ανάπλαση του Γαλλικού ποταμού.

Το ΕΘ.Ι.Α.Γ.Ε. (Ινστιτούτο Εγγείων Βελτιώσεων - Ινστιτούτο Υγιεινής Τροφίμων), σε συνεργασία με το Α.Π.Θ. (Τομέας Εγγείων Βελτιώσεων, Εδαφολογίας και Γεωργικής Μηχανικής, Τμήμα Γεωπονίας), εκπονεί ερευνητικό πρόγραμμα Τ.Ε. των υδροφόρων στρωμάτων της περιοχής Ριζού - Πετραίας - Αρσενίου Ν. Πέλλης (νότια της Σκύδρας), για λογαριασμό του Τοπικού Οργανισμού Εγγείων Βελτιώσεων Έδεσσαίου [2].

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. Τον τελευταίο καιρό, το Υπουργείο Γεωργίας έχει αρχίσει να χρηματοδοτεί ερευνητικά προγράμματα Τ.Ε. [1], όπως είναι οι περιπτώσεις του Γεωργικού Πανεπιστημίου Αθηνών, που εκπονεί σχετικό πρόγραμμα για το Αργολικό

Πεδίο, και του Δημοκριτείου Πανεπιστημίου Θράκης που εκπονεί ανάλογο ερευνητικό πρόγραμμα για περιοχές της Θράκης.

Συγκεκριμένα στη Θράκη, από το 1993, στο πλαίσιο ερευνητικού προγράμματος που ανατέθηκε από το Υπουργείο Γεωργίας και εκπονείται από τα εργαστήρια Υδραυλικών Έργων και Τεχνικής Γεωλογίας της Πολυτεχνικής Σχολής του Δ.Π.Θ., μελετάται η δυνατότητα εφαρμογής Τ.Ε. σε επιλεγμένες περιοχές των νομών Ξάνθης και Ροδόπης. Οι περιοχές αυτές είναι: μία από τις πολλές 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 κοιτητάφος 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 Κομψάτου Ν. Ροδόπης, κατά την έξοδο 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 ήδη βρίσκεται σε προχωρημένο στάδιο και περιλαμβάνει 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 (σχ. 1), 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 [7, 8, 20]. Για την περιοχή αυτή, μετά από προκαταρκτική έρευνα και λαμβάνοντας υπόψη και οικονομοτεχνικά κριτήρια, προέκυψε ότι η αποτελεσματικότερη μέθοδος εφαρμογής τεχνητού εμπλουτισμού είναι εκείνη της ενεργοποίησης παλιών αδρανοποιημένων κοιτών. Έτσι επιλέχθηκε μια παλιά κοίτη της περιοχής, όπου έγιναν οι απαραίτητες έρευνες (κοκκομετρικές αναλύσεις, δοκιμαστικές αντλήσεις, γεωηλεκτρικές διασκοπήσεις, σύνταξη πιεζομετρικών χαρτών) για να φανεί αρχικά η καταλληλότητά της κατά την ενεργοποίησή της, και προσδιορίστηκαν οι απαραίτητες εργασίες που απαιτούνται για την προετοιμασία της. Από τη σχετική έρευνα προέκυψαν: (1) τρεις κύριοι γεωλογικοί σχηματισμοί: (α) ο ανώτερος σχηματισμός, πάχους 8-80m, που καλύπτει επιφανειακά το μεγαλύτερο τμήμα της περιοχής έρευνας, με αργιλοαμμώδη υλικά με εναλλαγές κατά θέσεις μικρού πάχους χαλικοαμμωδών, στο σύνολό τους μικρής περατότητας, (β) ο ενδιάμεσος σχηματισμός, πάχους 10-70m,

υδροφόρος σχηματισμός με χαλικοαμμώδη υλικά μεγάλης περατότητας και (γ) ο τρίτος σχηματισμός, που αποτελεί το αδιαπέρατο αργιλοϊλλώδες υπόβαθρο, τη βάση του υπερκείμενου υδροφόρου, σε βάθος 30-90m, (2) τιμές της μεταβιβαστικότητας T που κυμαίνονται από $1.05 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{sec}$ έως $1.6 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{sec}$ και τιμές του συντελεστή εναποθήκευσης S που κυμαίνονται από 2.4×10^{-4} έως 8.75×10^{-3} , (3) η ύπαρξη προνομιακών αξόνων συγκλίνουσας και αποκλίνουσας ροής με κατεύθυνση Ν.ΝΑ προς τη λίμνη Βιστονίδα, οι οποίοι συχνά διασπώνται ή μεταβάλλονται από άξονες συγκλίνουσών σε άξονες αποκλίνουσών ροών ή αντίστροφα και οι οποίοι σε ένα μεγάλο βαθμό ταυτίζονται με τον άξονα επιφανειακής ροής δημιουργώντας ευνοϊκές προϋποθέσεις για την τροφοδοσία του υπόγειου υδροφόρου, (4) η σύσταση του υλικού της κοίτης εμπλουτισμού, όπου έχουμε εμφάνιση από καθαρούς χάλικες, που καταλαμβάνουν και τη μεγαλύτερη έκταση, μέχρι ιλυώδεις χάλικες και άμμο. Η διαδικασία ενεργοποίησης της κοίτης περιλαμβάνει τρεις χρονικές φάσεις, από τις οποίες οι δύο πρώτες πραγματοποιήθηκαν κατά τις περιόδους αντίστοιχα 2/3/1994 έως 30/5/1994 (περίπου 3 μήνες) και 20/2/1995 έως 7/6/1995 (περίπου 3,5 μήνες), ενώ η τρίτη φάση άρχισε στις 22/3/1996 και τελείωσε στις 20/6/1996 (περίπου 3 μήνες). Κατά τη διάρκεια των δύο πρώτων φάσεων (1994 και 1995) διοχετεύθηκε νερό από τον παρακείμενο ποταμό Κόσυνθο, με άντληση, απευθείας στην υπό ενεργοποίηση κοίτη, χωρίς να έχουν προηγηθεί κάποιες επεμβάσεις σε αυτή. Στην τρίτη 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. 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 τρεις φάσεις των ετών 1994, 1995 και 1996, που περιέλαβε:

- Σύνταξη και ανάλυση 25 ισοπιεζομετρικών χαρτών της περιοχής έρευνας και για τις τρεις φάσεις εφαρμογής του εμπλουτισμού, έξι από τους οποίους φαίνονται στο σχ. 1, όπου 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 τρεις φάσεις εφαρμογής του εμπλουτισμού, όπου 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. 2). 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 (σχ. 3). 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 μελετώμενο 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.

Ο τεχνητός εμπλουτισμός με την ενεργοποίηση 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. 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 ερευνη-

τικές 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.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

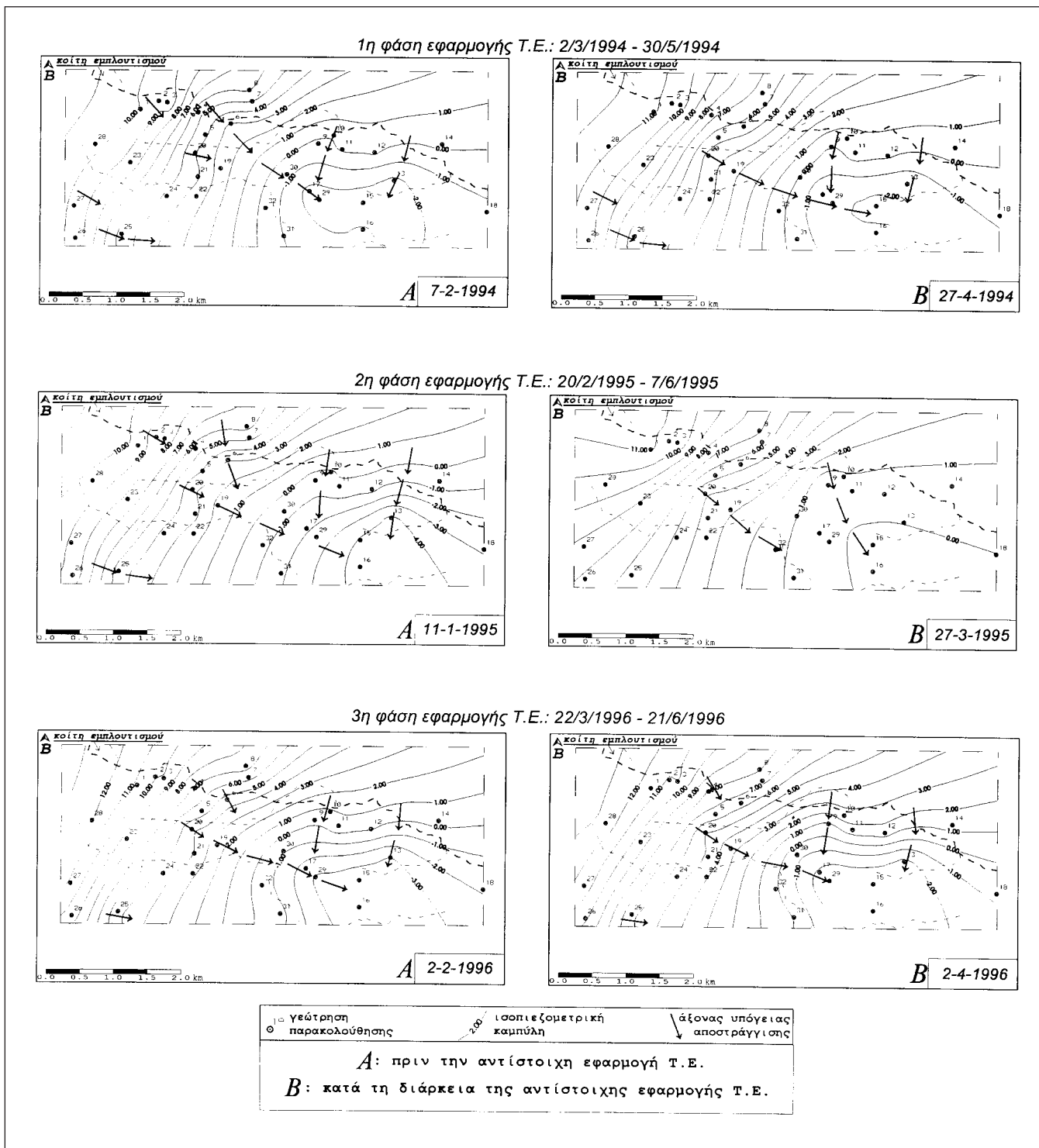
1. Βαφειάδης, Π. και Πανώρας, Α., 1994. "Είναι καιρός ο τεχνητός εμπλουτισμός των υδροφόρων στρωμάτων να αρχίσει να εφαρμόζεται και στη χώρα μας". Περιοδικό "Γεωτεχνική Ενημέρωση", Τεύχος 59, Απρίλιος 1994, σελ. 44-45.
2. Βαφειάδης, Π., Πανώρας, Α. και Αναγνωστόπουλος, Κ., 1995. "Πείραμα τεχνητού εμπλουτισμού των υδροφόρων στρωμάτων της περιοχής Πετραίας Ν. Πέλλης με τη χρήση αρδευτικής γεώτρησης". **Πρακτικά 7ου Συνεδρίου της Ελληνικής Γεωλογικής Εταιρείας** (υπό έκδοση).
3. Βαφειάδης, Π., 1995. "**Τεχνητός Εμπλουτισμός των Υδροφόρων Στρωμάτων**". Εκδ. Γιαχούδη-Γιαπούλη Ο.Ε., Θεσσαλονίκη.
4. Connorton, B.J. and McIntosh, P., 1995. "EUREAU survey on artificial recharge". **Proceedings of the 2nd International Symposium on Artificial Recharge of Ground Water, 1994**, Florida, USA, pp. 11-19.
5. Γεωργίου, Α., 1991. "Εμπλουτισμός από υδατοφράκτη και εντατική εκμετάλλευση του υδροφορέα Γερμασόγειας". **1ο Πανελλήνιο Συνέδριο Υδρογεωλογίας, 14-17/10/1991**, Λευκωσία, Κύπρος, Πρακτικά Bulletin 6, σελ.149-173.
6. 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.
7. Διαμαντής, Ι., Πλιάκας, Φ., Τζεβελέκης, Θ., 1994. "Τεχνητός εμπλουτισμός με επαναδραστηριοποίηση αδραντοποιημένων κοιτών: μία πρώτη προσέγγιση". **Πρακτικά 2ου Υδρογεωλογικού Συνεδρίου, 24-28/11/1993**, Πάτρα, σελ. 107-118.
8. Εργαστήριο Τεχνικής Γεωλογίας, Δ.Π.Θ., 1992. "**Διερεύνηση των δυνατοτήτων για συνδυασμένη διαχείριση υπογείων και επιφανειακών νερών στο νομό Ξάνθης**". Ερευνητικό πρόγραμμα για τη Νομαρχία Ξάνθης.
9. Fleet, M. και Βουδούρης, Κ., 1995. "Πείραμα τεχνητού εμπλουτισμού μέσω γεώτρησης στα πλειοπληστοκαινικά ιζήματα της βιομηχανικής περιοχής Πατρών". **Πρακτικά 6ου Πανελληνίου Συνεδρίου Ελληνικής Υδροτεχνικής Ένωσης, 22-26/5/1995**, Θεσσαλονίκη, σελ. 74-83.
10. Franson, J.W., 1989. "Evaluating potential artificial recharge projects". **Proceedings of the International Symposium on Artificial Recharge of Ground Water, 23-27/8/1988**, California, USA, pp. 256-264.
11. Ζυμής, Α., 1994. "Τα υπόγεια νερά της Αργολίδας και ο τεχνητός εμπλουτισμός τους". **Γεωτεχνική Ενημέρωση No 64**, σελ. 70-71, (Σεπτ. 1994).
12. 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.
13. Huisman, L. and Olsthoorn, T.N., 1983. "**Artificial Groundwater Recharge**". Delft University of Technology, Pitman Publ., 320pp., Boston.
14. Iihola, H., 1989. "Artificial recharge in Finland". **Proceedings of the International Symposium on Artificial Recharge of Ground Water, 23-27/8/1988**, California, USA, pp. 538-545.
15. Καλλέργης, Γ., 1986. "**Εφαρμοσμένη Υδρογεωλογία**". Τόμος Β, Έκδοση ΤΕΕ, Αθήνα.
16. Κωνσταντίνου, Κ., 1995. "Αποστράγγιση ομβρίων υδάτων και τεχνητός εμπλουτισμός μέσω πηγαδιών. Παράδειγμα από την περιοχή Κοκκινόχωριων- Κύπρος". **3ο Υδρογεωλογικό Συνέδριο, 3-5/11/1995**, Ηράκλειο, Κρήτη.
17. Oaksford, E.T., 1985. "Artificial recharge: methods, hydraulics and monitoring". **Artificial Recharge of Groundwater**, Edited by Asano T., Butterworth Publishers, Chapter 4, pp. 69-127.
18. 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.
19. Pettyjohn, W.A., 1981. "**Introduction to artificial groundwater recharge**". NWWA/EPA-600/2-81-236, Robert S.Kerr Environmental Research Laboratory, US Environ. Protection Agency, Ada, Oklahoma.
20. 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.
21. Todd, D.K., 1980. "**Ground Water Hydrology**". John Willey & Sons, New York.

Φ. Πλιάκας,

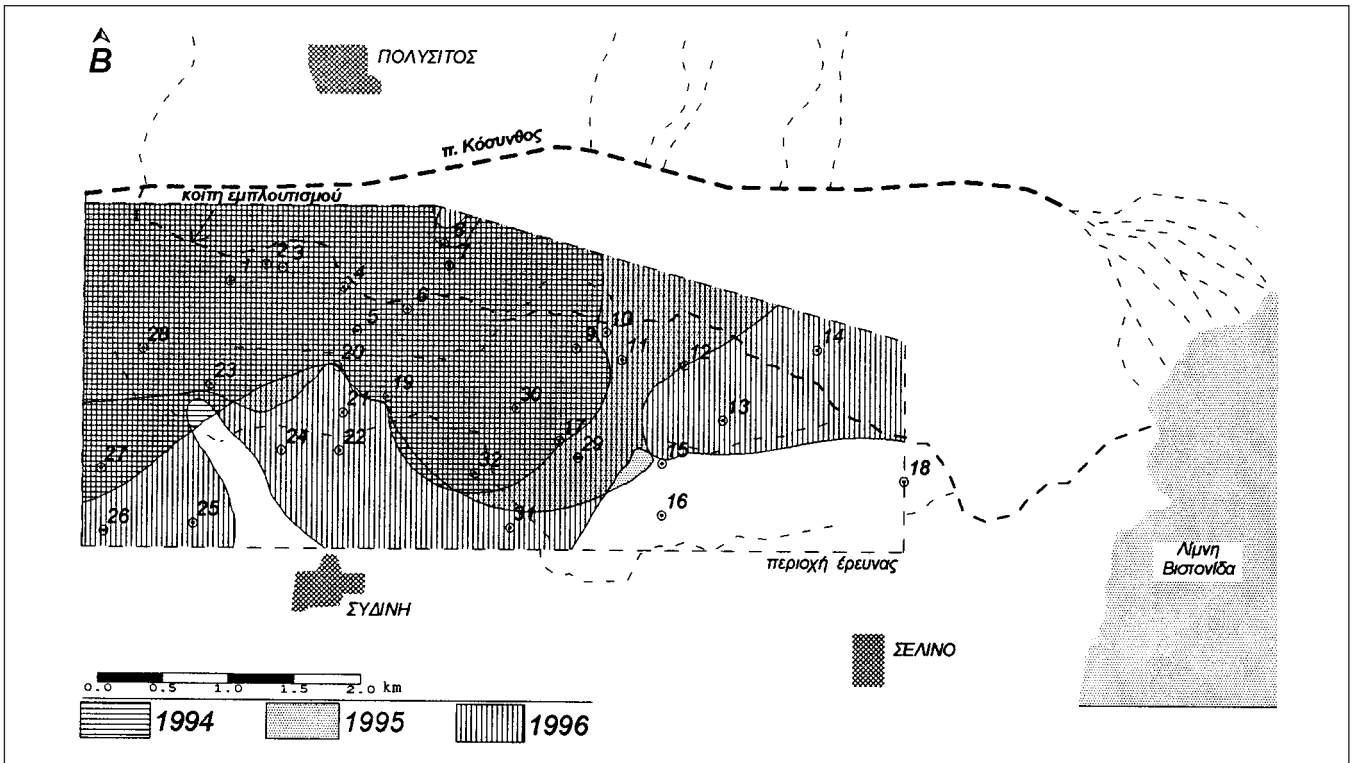
Επιστημονικός συνεργάτης Δ.Π.Θ., Τομέας Γεωτεχνικής Μηχανικής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, Δ.Π.Θ., 671 00 Ξάνθη.

Ι. Διαμαντής,

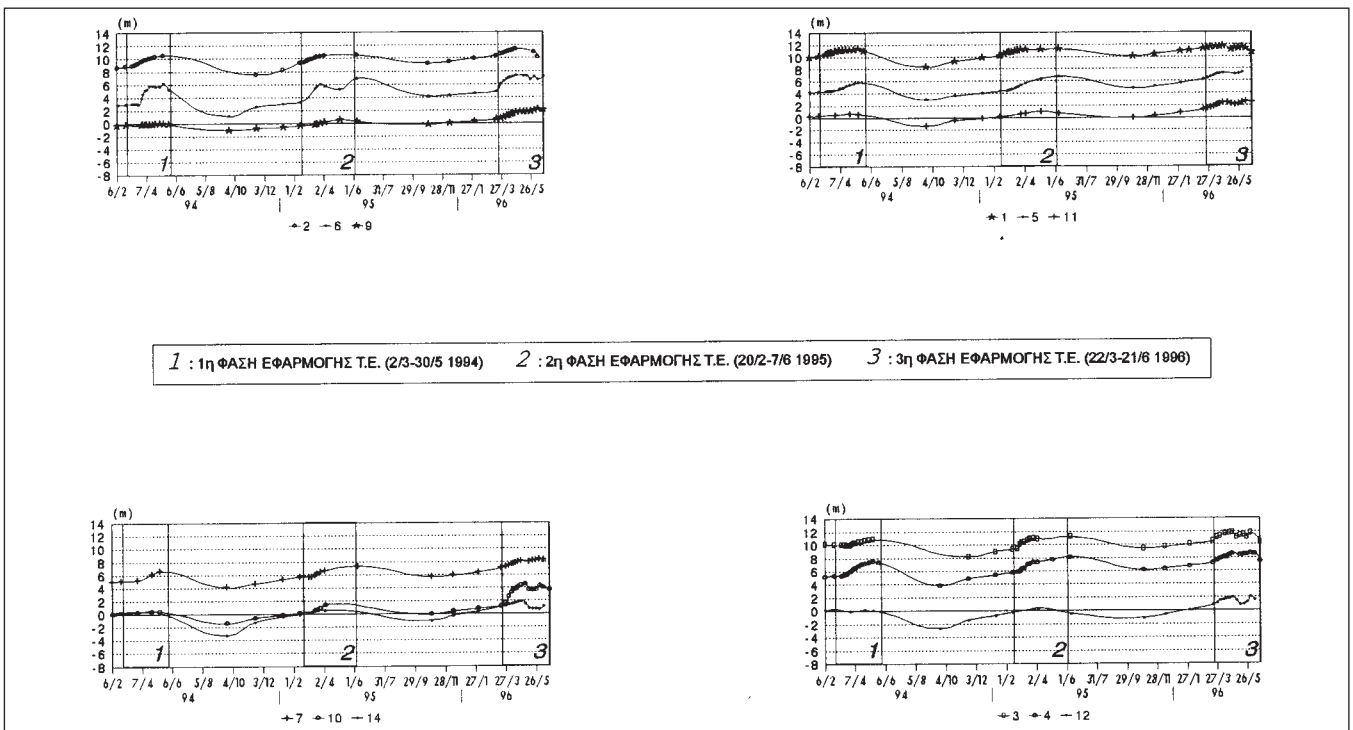
Αναπληρωτής καθηγητής Δ.Π.Θ., Τομέας Γεωτεχνικής Μηχανικής, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Πολυτεχνική Σχολή, Δ.Π.Θ., 671 00 Ξάνθη.



Σχήμα 1: Πιεζομετρικοί χάρτες του αβαθούς υπό πίεση υδροφόρου ορίζοντα της περιοχής έρευνας για την εφαρμογή τεχνητού εμπλουτισμού στην περιοχή Πολυσίτου Ξάνθης, στη Θράκη.
 Figure 1: Piezometric maps of the shallow confined aquifer in the artificial recharge project area at the Polysitos site, in the Xanthi region, Thrace.



Σχήμα 2: Χάρτης με τις γεωτρήσεις παρακολούθησης της στάθμης της περιοχής Πολυσίτου του Ν. Ξάνθης. Περιοχές επηρεασμού από τον Τ.Ε. για τις τρεις φάσεις εφαρμογής των ετών 1994, 1995, 1996 αντίστοιχα.
 Figure 2: Monitoring wells and areas influenced by the artificial recharge project applied at the Polysitos site, in the Xanthi region, Thrace, during 1994, 1995, 1996 recharge phases respectively.



Σχήμα 3: Διαγράμματα μεταβολής της στάθμης γεωτρήσεων της ομάδας με έντονο επηρεασμό. Χρονική περίοδος 6/2/1994 - 21/6/1996.
 Figure 3: Fluctuation levels of wells strongly influenced by the artificial recharge process, within the period 6/2/1994 - 21/6/1996.

Extended summary

Artificial Recharge of Groundwater in Greece and Other Countries

F. PLIAKAS

Scientific Collaborator D.U.Th.

I. DIAMANTIS

Associate Professor D.U.Th.

Abstract

Artificial groundwater recharge techniques have been used throughout the world for more than two centuries for a variety of purposes. The widest use of artificial recharge, nowadays, is to supplement dwindling municipal and industrial groundwater supplies or to improve their quality. In Greece, only a few such projects have been undertaken, during the last decades, including mainly artificial recharge projects in the Argolida plain and in Thrace. The procedure of reactivating old stream beds, experienced in plain regions of Thrace, can be considered as a hopeful, low cost and quite effective artificial recharge method.

1. INTRODUCTION

The increasing water demand during recent years has resulted in an overexploitation of groundwater, observed mainly in plain regions. On the other hand, a variety of flood-controlling engineering works (diversions, adjustments of stream and river beds, drainage systems) have been built since the late 1950s, aiming at self-sufficiency in water resources, in the framework of the then conceived drainage system management. These interventions have caused a significant change of the groundwater recharging regime.

The facts mentioned above have led to the phenomena observed nowadays, such as dramatic groundwater level decline, reduction by half or more of the exploitable yield of water supply wells and downgrading of groundwater quality.

The application of artificial recharge (AR) can positively and substantially contribute to restoring the overall disturbance of the existing groundwater regime, wherever the situation is curable [7, 8, 20].

2. OBJECTIVES - CONSIDERATIONS AND METHODS

Artificial recharge (AR) may be defined as augmenting the natural movement of surface water into underground formations by some method of construction, by spreading of

water, or by artificially changing natural conditions [21].

Artificial groundwater recharge techniques have been used throughout the world for more than 200 years for a variety of purposes [10, 14, 15, 17, 21]. The main ones include groundwater management, reduction of flood flow, renovation of wastewater, combatting adverse conditions (groundwater level decline, saline water intrusion), stream flow augmentation, store of fresh water, land subsidence prevention, crop development, etc. In Greece, there have been only a few applications during the last decades. Many methods of AR have been developed to recharge groundwater and most of them use variations or combinations of direct surface, direct subsurface, or indirect recharge techniques [7, 17, 20]. The type of AR system that can be developed at any specific site is controlled, to a large degree, by cultural, topographic, geologic, hydrologic and soil conditions [15, 19]. However, the advantages of AR may be partly or totally outweighed by certain disadvantages concerning the recoverability of water, the dimensions of the area required for operation, the removal of unwanted elements in recharge water, the remedy of clogging of aquifers, the meeting of sudden water supply demands and the cost of expansion of groundwater public supply [17].

3. ARTIFICIAL RECHARGE PROJECTS THROUGHOUT THE WORLD

AR has been practiced in Europe, since the early 19th century, as an indirect recharge for public water supply (Glasgow-Scotland, 1810, Toulouse-France, 1820) [13] and in the USA, later in the same century (recharge ponds in Denver, irrigation canals in California) [19]. The great upswing in AR had to wait, however, till the 1950s and 1960s, at which time the "second industrial revolution" resulted in the ever increasing pollution of surface water in rivers [13].

The widest use of AR is to supplement dwindling municipal and industrial groundwater supplies or to improve their

quality (Germany, Sweden, Israel, Egypt, Algeria, Iran and Latvian, Lithuanian, Ukrainian Republics). AR is also extensively used to control salt-water intrusion in coastal areas (Australia, The Netherlands, Israel, Morocco, Senegal, Japan, USA), to reduce land subsidence (Japan) and to supplement irrigation water (Romania, Bulgaria, France) [19].

In the USA, the purposes of AR vary widely, ranging from well-field management to waste disposal. Nearly all of the larger projects are designed either to limit salt-water intrusion in coastal areas or to renovate sewage or both [19].

Land application of wastes and wastewaters was practiced in Athens prior to the Christian Era and effluent irrigation was reportedly used in Germany in the 16th century [19]. An AR method known as Soil Aquifer Treatment (SAT) has been carried out for several years with success in semi-arid regions of the USA (California, Arizona, Florida) and in Israel (Tel-Aviv), meeting mainly irrigation needs [18].

In ten of the fourteen member countries within the European Community, AR is important, surveyed either nationally or locally, and its use is increasing. AR schemes are operating successfully and in some cases have been in use for nearly a century (river Ruhr). In addition to increasing water supplies, AR often has environmental and water quality aims and benefits, while financial encouragement to develop AR is limited. In terms of national importance, Sweden, The Netherlands and Germany rely most heavily on AR, which accounts for some 20%, 15% and 10% respectively of total water resources. The most common form of AR (greater than 90%) is basin recharge along the banks of large rivers and, to a lesser extent, canals, ponds and lakes [4].

In Cyprus, basin recharge projects have been developed since 1982, meeting public water supply and irrigation needs and also confronting seawater intrusion [5, 16].

4. ARTIFICIAL RECHARGE IN GREECE

There has never been any systematic effort to apply large artificial recharge projects in Greece, with the exception of the cases mentioned in this paper (AR projects in the Argolida plain and Thrace, [1]) or others applied in smaller Greek regions (small flood controlling dams in Naxos island, recharge well in the Patras Industrial Area, recharge project in Pella, recharge by using secondary treated wastewater in the Kalochori area, Thessaloniki, etc) [2, 6, 9, 18].

The purpose of the artificial recharge project that was carried out in the plain of Argolida was to prevent seawater intrusion. The initial stages included the use of 60 recharge wells exploiting the winter water of the springs of Kephalochoi and Lerni in order to form a recharge mound to prevent the intrusion and increase the available groundwater quantities. The results were not as expected. Two decades later a new project was undertaken, practising basin and recharge well methods, ending in not so important results. Since 1994 a new artificial recharge project has been applied employing existing wells and new recharge wells. It is assumed that the whole effort will lead to positive results [3, 11, 12].

AR has been developed in Thrace during the last three years, resulting in significant and hopeful findings with regard to its effectiveness. After an initial study and considering also some economic criteria, it was concluded that the most efficient method of artificial recharge would be the reactivation of old streams. So it was decided that this particular artificial recharge method had to be carried out in a specific old stream course at the Polysitos site, Xanthi region [7, 8, 20]. After the preliminary works required to determine the aquifers' structure and to evaluate the hydraulic parameters, the stage of implementation of the recharge then came, consisting of three phases. These phases lasted for about three months each and took place during the period from winter to early spring of the years 1994, 1995, 1996, respectively. During the first two phases, water was conveyed into the old stream course by pumping from the adjacent Kosinthos river, without any technical intervention. The third phase took place after a part of the Kosinthos river flow had been diverted. The water flowing through the diversion was then led by controlled flow into the old stream channel which had now been modified along a part of its course. The piezometric level of 32 wells in the region under review was observed and recorded systematically. Consideration of the piezometric maps that were drawn (fig. 1) and examination of the course of the well levels led to the mapping of regions which are strongly influenced by the artificial recharge process (for example, positive fluctuation levels up to 2.70 m within a one month period) and of others which are less or not at all influenced (fig. 2 and 3). AR by reactivating old stream beds can be considered as a positive and hopeful solution, contributing to the prevention of groundwater degradation, both quantitatively and qualitatively, in regions such as Thrace. It was proved that the above method represents not only a relatively low cost procedure but also a quite effective one.

F. Pliakas,

Scientific collaborator D.U.Th., Geotechnical Section, Dept. of Civil Engineering, School of Engineers, Democritus University of Thrace, 671 00 Xanthi, Greece.

I. Diamantis,

Associate professor D.U.Th., Geotechnical Section, Dept. of Civil Engineering, School of Engineers, Democritus University of Thrace, 671 00 Xanthi, Greece.