

ΤΕΧΝΗΤΟΣ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΣ ΥΔΡΟΦΟΡΕΩΝ ΜΕΣΩ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ -ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΣ ΑΠΩΛΕΙΩΝ ΝΕΡΟΥ ΠΡΟΣ ΤΟ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΟ ΔΙΚΤΥΟ ΑΠΟΡΡΟΗΣ

Κ.Λ. Κατσιφάρικης¹ και Ν. Θεοδοσίου²

Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ.

54124 Θεσσαλονίκη

¹klkats@civil.auth.gr, ²niktheod@civil.auth.gr

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι υπόγειοι υδροφόροι αποτελούν φυσικές εποχικές αποθήκες νερού, που μπορούν να καλύψουν τις ανθρώπινες ανάγκες κατά τις ξηρές περιόδους του έτους. Ο τεχνητός εμπλουτισμός τους, δηλαδή η διοχέτευση πλεονάζοντος επιφανειακού νερού σε αυτούς αποτελεί συχνά μια πολύ καλή λύση διαχείρισης των υδατικών πόρων. Επιβάλλεται, ακόμη, η επαναφορά στους υδροφόρους όσων ποσοτήτων νερών αντλούνται, αλλά δεν καταναλώνονται, στο πλαίσιο διάφορων ανθρώπινων δραστηριοτήτων όπως π.χ. κατασκευή τεχνικών έργων και εξόρυξη ορυκτών.

Στην εργασία αυτή μελετάται ο τεχνητός εμπλουτισμός υδροφορέων μέσω γεωτρήσεων, με στόχο τον περιορισμό απωλειών του διοχετευόμενου νερού προς το επιφανειακό δίκτυο απορροής ή απευθείας προς τη θάλασσα. Για την επίτευξη του στόχου αυτού, προτείνονται κάποιοι απλοί κανόνες, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον προκαταρκτικό σχεδιασμό των αντίστοιχων έργων.

ARTIFICIAL AQUIFER RECHARGE BY MEANS OF WELLS- MITIGATION OF WATER LOSSES TOWARDS SURFACE DRAINAGE SYSTEM

K.L. Katsifarakis and N. Theodossiou

Department of Civil Engineering, Aristotle University of Thessaloniki

54124 Thessaloniki, Greece

¹klkats@civil.auth.gr, ²niktheod@civil.auth.gr

ABSTRACT

Aquifers offer natural seasonal water storage, therefore they can cover water demand during low rain periods. Artificial aquifer recharge, namely injection of surface water surplus, may be a very good solution for local water resources management. Moreover, groundwater extracted, but not consumed, in order to facilitate human activities, such as construction of underground works or mining, should be returned to the aquifers.

In this paper, artificial aquifer recharge is studied, by means of wells. The aim is to restrict losses of injected water towards the surface drainage system or directly to the sea. To achieve this goal, some simple rules, which can be used for preliminary planning of the required works are proposed.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Συμβατικοί υδατικοί πόροι μιας περιοχής είναι το σύνολο το γλυκού νερού που υπάρχει και διακινείται στην περιοχή αυτή. Οι υδατικοί πόροι διακρίνονται σε επιφανειακούς και υπόγειους. Οι πρώτοι περιλαμβάνουν τα ποτάμια και τις λίμνες και οι δεύτεροι το νερό που είναι αποθηκευμένο και κινείται στα διάκενα διαφόρων εδαφικών στρωμάτων. Τα επιφανειακά και τα υπόγεια νερά επικοινωνούν με διάφορους τρόπους. Επομένως οι επεμβάσεις στα επιφανειακά νερά επιδρούν έμμεσα και στα υπόγεια (και αντίστροφα). Τα υπόγεια νερά είναι πιο προστατευμένα από τα επιφανειακά. Και αυτά όμως κινδυνεύουν από ρύπανση, που μπορεί να οφείλεται σε φυσικές διεργασίες, σε διάφορες ανθρώπινες δραστηριότητες και σε ατυχήματα.

Οι υπόγειοι υδροφορείς, με εξαίρεση τους καρστικούς και τους έντονα ρηγματωμένους, αποτελούν φυσικές εποχικές αποθήκες νερού, που μπορούν να καλύψουν τις ανθρώπινες ανάγκες κατά τις ξηρές περιόδους του έτους, ενώ η εποχική αποθήκευση επιφανειακών υδατικών πόρων συχνά προϋποθέτει κατασκευή φραγμάτων. Μια εναλλακτική λύση είναι ο τεχνητός εμπλουτισμός υπόγειων υδροφορέων (π.χ. [1], [2]), δηλαδή η διοχέτευση ποσοτήτων επιφανειακών νερών σε αυτούς.

Επιπλέον, απαιτείται η επαναφορά στους υδροφορείς όσων ποσοτήτων νερού αντλούνται αλλά δεν καταναλώνονται, για την κατασκευή ή τη λειτουργία τεχνικών έργων ή στο πλαίσιο μεταλλευτικών δραστηριοτήτων. Ακόμη, η νομοθεσία επιβάλλει την επαναφορά του γεωθερμικού νερού στον αντίστοιχο υδροφορέα μετά τη χρήση του.

Η σχεδιασμένη διοχέτευση επιφανειακού νερού σε υπόγειους υδροφορείς γίνεται με λεκάνες κατάκλυσης, τάφρους ή γεωτρήσεις. Η χρήση γεωτρήσεων επιβάλλεται όταν ο υδροφορέας βρίσκεται σε σχετικά μεγάλο βάθος ή όταν παρεμβάλλονται αδιαπέρατα στρώματα μεταξύ της επιφάνειας του εδάφους και του υδροφορέα.

Στην εργασία αυτή εξετάζεται η επαναφόρτιση υδροφορέων μέσω γεωτρήσεων. Το ζητούμενο είναι να αποθηκευθεί η συνολική ποσότητα νερού που διοχετεύεται στις γεωτρήσεις στον προς εμπλουτισμό υδροφορέα. Αν όμως οι γεωτρήσεις γίνονται σε πλαγιές ή σε μικρή σχετικά απόσταση από αυτές (της τάξης των λίγων χιλιομέτρων) υπάρχουν ρέματα, λίμνες ή θάλασσα, μέρος του διοχετευόμενου νερού μπορεί να καταλήξει στο επιφανειακό δίκτυο απορροής, ακυρώνοντας, μερικώς, τη διαδικασία του εμπλουτισμού. Στόχος της εργασίας είναι η διατύπωση απλών κανόνων, για την αποφυγή τέτοιου τύπου αστοχιών, που οδηγούν σε απώλεια υδατικών πόρων και σπατάλη ενέργειας.

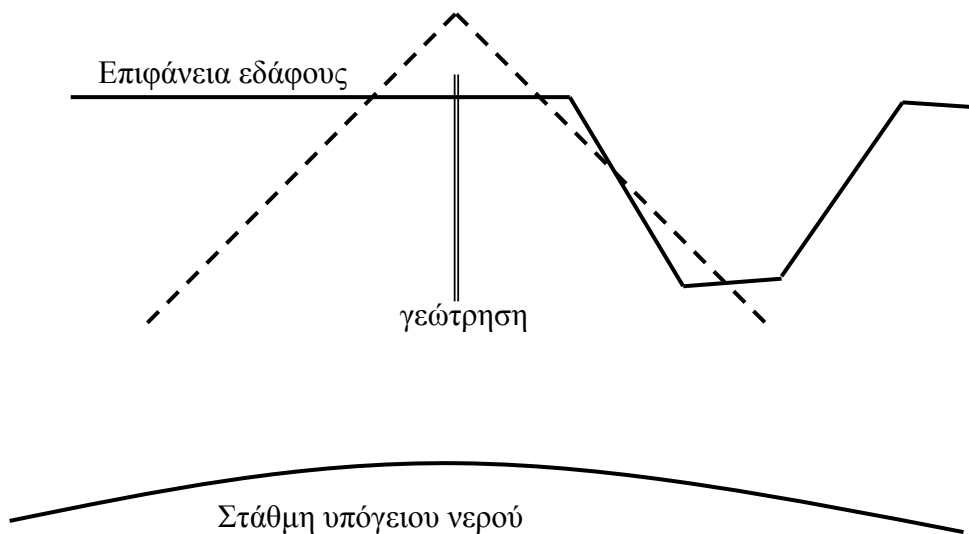
2. ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΕΠΑΝΑΦΟΡΤΙΣΗΣ ΥΔΡΟΦΟΡΕΩΝ

Για την προσομοίωση της λειτουργίας των γεωτρήσεων τεχνητού εμπλουτισμού, μπορούμε να διακρίνουμε δύο περιπτώσεις:

- α) Το διάτρητο τμήμα της γεώτρησης δεν φθάνει μέχρι τη στάθμη του νερού στον υδροφορέα, αλλά διοχετεύει το νερό στην ακόρεστη ζώνη πάνω από αυτόν.
- β) Η γεώτρηση διεισδύει στην κορεσμένη ζώνη του υδροφορέα, την οποία τροφοδοτεί.

2.1 Διοχέτευση του νερού στην ακόρεστη ζώνη

Στην περίπτωση αυτή, έχουμε εκροή του νερού από τον διάτρητο σωλήνα της γεώτρησης προς την ακόρεστη ζώνη του εδάφους, όπου θεωρούμε ότι η πίεση είναι ίση με την ατμοσφαιρική. Η ροή, σε πρώτη προσέγγιση, μπορεί να θεωρηθεί ανάλογη με την εκροή από τοιχώματα κυλινδρικού δοχείου, που έχουν σειρά οπών μικρών διαστάσεων. Επομένως, η περιβάλλουσα των γραμμών ροής είναι παράπλευρη επιφάνεια κόλουρου κώνου, με κλίση γενέτειρας 45° ως προς την κατακόρυφη. Η μικρή βάση αυτού του κόλουρου κώνου ταυτίζεται με τη γεώτρηση στη στάθμη του επιβαλλόμενου υδραυλικού φορτίου. Αν κάποια πλαγιά βουνοῦ τέμνει την περιβάλλουσα των γραμμών ροής, η οποία απεικονίζεται στο Σχήμα 1 με διακεκομμένη γραμμή, θα έχουμε απώλεια διοχετευόμενου επιφανειακού νερού προς το επιφανειακό δίκτυο απορροής.



Σχήμα 1. Γεώτρηση διοχέτευσης νερού στην ακόρεστη ζώνη.

2.2 Διοχέτευση του νερού στην κορεσμένη ζώνη

Στην περίπτωση αυτή, η λειτουργία των γεωτρήσεων εμπλουτισμού είναι από μαθηματική και φυσική άποψη παρόμοια με αυτή των γεωτρήσεων άντλησης. Μαθηματικώς διαφέρει μόνο ως προς το πρόσημο της παροχής, ενώ ως προς το φυσικό αποτέλεσμα επιφέρει άνοδο της στάθμης του υδραυλικού φορτίου αντί για πτώση. Οι υψηλότερες τιμές παρουσιάζονται προφανώς στις παρειές των γεωτρήσεων.

Σε άπειρο, ομογενή και ισότροπο υδροφορέα και για μόνιμη ροή με ελεύθερη επιφάνεια, η εξίσωση της μεταβολής του υδραυλικού φορτίου δίνεται από τη σχέση (π.χ. [3], [4]):

$$H^2 = h_1^2 - \frac{Q}{\pi K} \ln \frac{r}{R} \quad (1)$$

όπου H είναι η στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας σε απόσταση r από τη γεώτρηση, h_1 η αρχική στάθμη του υπόγειου νερού, Q η διοχετευόμενη παροχή (θεωρείται θετική), K η υδραυλική αγωγιμότητα του υδροφορέα και R η ακτίνα επιρροής της γεώτρησης.

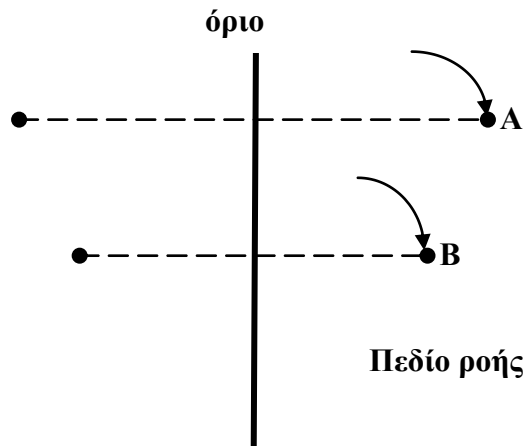
Αν η ροή δεν είναι μόνιμη, ισχύει η σχέση (π.χ. [5]):

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W\left(\frac{Sr^2}{4Tt}\right) \quad (2)$$

όπου s είναι η μεταβολή της στάθμης, Q η διοχετευόμενη παροχή, T η μεταφορικότητα και S η αποθηκευτικότητα του υδροφορέα, $W(u)$ η λεγόμενη συνάρτηση πηγαδιού, τη απόσταση από τη γεώτρηση και t ο χρόνος από την έναρξη της διοχέτευσης του νερού. Η σχέση (2) ισχύει για ροές υπό πίεση. Ισχύει όμως προσεγγιστικά και για ροές με ελεύθερη επιφάνεια, εφόσον μπορεί να ορισθεί μια μέση τιμή για τη μεταφορικότητα.

Και στις δύο περιπτώσεις (μόνιμης και μη μόνιμης ροής), αν κάποια πλαγιά τέμνει τον κώνο ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας, θα έχουμε απώλεια διοχετευόμενου νερού προς το επιφανειακό δίκτυο απορροής.

Όπως αναφέρθηκε, οι σχέσεις (1) και (2) εφαρμόζονται σε «άπειρα» πεδία ροής. Σε ημιάπειρα πεδία, που περιορίζονται από ευθύγραμμο όριο, αναλυτικές λύσεις μπορεί να προσφέρει η μέθοδος των εικόνων (π.χ. [3], [4], [5]). Με τη μέθοδο αυτή μπορούμε να αναχθούμε σε ένα ισοδύναμο άπειρο πεδίο ροής και να χρησιμοποιήσουμε τις γνωστές αναλυτικές σχέσεις υπολογισμού του υδραυλικού φορτίου και των ταχυτήτων, που ισχύουν σε αυτό [6]. Το τίμημα που πληρώνουμε για να απαλλαγούμε από τα όρια είναι ότι στο ισοδύναμο άπειρο πεδίο υπάρχουν πολλαπλάσια πηγάδια από τα πραγματικά. Έτσι, αν στο πραγματικό πεδίο υπάρχει ένα ευθύγραμμο όριο και n πηγάδια, στο ισοδύναμο θα υπάρχουν συνολικά $2n$ πηγάδια. Τα πρόσθετα φανταστικά πηγάδια είναι συμμετρικά των πραγματικών ως προς το όριο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2. Σε αυτό το γεγονός οφείλει η μέθοδος το όνομά της, αφού τα φανταστικά πηγάδια είναι «εικόνες» των πραγματικών ως προς το όριο [6].



Σχήμα 2. Γεωτρήσεις εμπλουτισμού A και B και οι εικόνες τους ως προς το όριο

Αν χρησιμοποιούμε τη μέθοδο των εικόνων για να απαλλαγούμε από ένα ευθύγραμμο όριο δεξιαμενής τότε τα φανταστικά πηγάδια έχουν παροχές αντιθέτου προσήμου από αυτές των πραγματικών, δηλαδή οι εικόνες των πηγαδιών φόρτισης είναι πηγάδια άντλησης (και αντιστρόφως). Αν, αντίθετα, στο πεδίο υπάρχει αδιαπέρατο όριο, τότε οι εικόνες έχουν παροχές ίδιου προσήμου με τα αντίστοιχα πραγματικά πηγάδια.

Οι μαθηματικοί τύποι υπολογισμού της στάθμης έχουν απλούστερη μορφή, αν θεωρήσουμε ότι ο άξονας των y ταυτίζεται με το ευθύγραμμο όριο. Για μόνιμη ροή με ελεύθερη επιφάνεια

σε ομογενή και ισότροπο υδροφορέα, στον οποίο υπάρχουν ηγεωτρήσεις κοντά σε όριο δεξαμενής, η στάθμη H της ελεύθερης επιφάνειας σε οποιοδήποτε σημείο x , γ του πραγματικού πεδίου ροής δίνεται από τη σχέση:

$$H^2 = h_1^2 - \frac{1}{\pi K} \sum_{i=1}^n Q_i \cdot \ln \frac{\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2}}{\sqrt{(x + x_i)^2 + (y - y_i)^2}} \quad (3)$$

όπου Q_i είναι η παροχή που διοχετεύεται στο πηγάδι i και x_i, y_i οι συντεταγμένες του κέντρου του. Αντιστοίχως, κοντά σε αδιαπέρατο όριο η σχέση υπολογισμού της H παίρνει την ακόλουθη μορφή:

$$H^2 = h_1^2 - \frac{1}{\pi K} \sum_{i=1}^n Q_i \cdot \ln \frac{\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} \cdot \sqrt{(x + x_i)^2 + (y - y_i)^2}}{R^2} \quad (4)$$

Στις σχέσεις (3) και (4) κάθε όρος του αθροίσματος παριστάνει την επίδραση ενός πραγματικού πηγαδιού και της εικόνας του.

Κατά μήκος ορίων δεξαμενής ο υδροφορέας επικοινωνεί με επιφανειακά νερά (λίμνη, ποτάμι) και έχει κοινή στάθμη με αυτά. Επομένως, η χρήση γεωτρήσεων εμπλουτισμού κοντά σε τέτοια όρια είναι πιθανή αν διοχετεύεται νερό κατώτερης ποιότητας, π.χ. επεξεργασμένα λύματα, για περαιτέρω φυσικό καθαρισμό (π.χ. [7], [8]). Σε αυτή την περίπτωση, θα πρέπει να αποφεύγεται η άφιξη ρύπων στα επιφανειακά νερά. Εμπλουτισμός υδροφορέων με νερό κατώτερης ποιότητας μπορεί να γίνει και σε παράκτιους υδροφορείς με προβλήματα υφαλμύρισης.

Η ύπαρξη αδιαπέρατων ορίων, δηλαδή εδαφικών σχηματισμών που δεν επιτρέπουν τη διέλευση του νερού, κοντά σε γεωτρήσεις εμπλουτισμού οδηγεί σε ψηλότερη στάθμη της ελεύθερης επιφάνειας γύρω από τις γεωτρήσεις αυτές και πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψιν στους υπολογισμούς.

Η μέθοδος των εικόνων δίνει αναλυτικές λύσεις και σε περιπτώσεις πεδίων ροής που: α) περιορίζονται από 2 ευθύγραμμο όρια, τα οποία τέμνονται υπό ορισμένες γωνίες (π.χ. 90°) και β) έχουν ζώνες διαφορετικής μεταφορικότητας, διαχωριζόμενες από ευθύγραμμο όριο. Ακόμη, μπορεί να χρησιμοποιηθεί προσεγγιστικά και σε πιο σύνθετες περιπτώσεις [9].

3. ΣΥΝΟΨΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Κατά τον τεχνητό εμπλουτισμό υδροφορέων μέσω γεωτρήσεων υπάρχει κίνδυνος απώλειας μέρους του νερού, αν οι γεωτρήσεις κατασκευασθούν σε επικλινές έδαφος ή κοντά σε πλαγιές. Στην εργασία αυτή προτείνονται απλοί κανόνες για τον περιορισμό του κινδύνου αυτού, είτε η διοχέτευση του νερού γίνεται στην ακόρεστη ζώνη του εδάφους είτε στον υδροφορέα. Στην πρώτη περίπτωση ο κανόνας βασίζεται στην περιβάλλουσα των γραμμών ροής, ενώ στη δεύτερη στον υπολογισμό του κώνου ανύψωσης της ελεύθερης επιφάνειας του υδροφορέα, που δεν πρέπει να τέμνονται από την επιφάνεια του εδάφους.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Dillon P. (2005) "Future management of aquifer recharge", *Hydrogeology Journal*, 13:313–316
2. Khan S., S. Mushtaq, M.A. Hanjra and J. Schaeffer (2008) "Estimating potential costs and gains from an aquifer storage and recovery program in Australia", *Agricultural Water Management* 95: 477–488
3. Bear J. (1979) "Hydraulics of Groundwater" McGraw-Hill.
4. Τολίκας Δ. (1997) «Υπόγεια Υδραυλική», Εκδόσεις «Παρατηρητής», Θεσσαλονίκη.
5. Λατινόπουλος Π. (1986) «Υδραυλική των υπόγειων ροών», Θεσσαλονίκη
6. Κατσιφάρακης Κ.Λ. και Κ. Τσελεπίδου (2013) «Η μέθοδος των εικόνων και η προσεγγιστική εφαρμογή της σε προβλήματα υπόγειων ροών», Τιμητικός τόμος για τον ομότιμο καθηγητή Δημήτρη Τολίκα, σελ. 39-46.
7. Spachos T., K. Voudouris and G. Argyropoulos (2012) "Preliminary results of artificial recharge via borehole using treated wastewater in Sindos, Greece" *Proc. of International Conference "Protection and Restoration of the Environment XI"*, Thessaloniki, 2012, pp. 326-335.
8. Asano T. and J.A. Cotruvo (2004) "Groundwater recharge with reclaimed municipal wastewater: health and regulatory considerations", *Water Research* 38: 1941–1951
9. Τσελεπίδου Κ. (2008) «Βελτιστοποίηση διαχείρισης γεωθερμικών και υπόγειων υδατικών πόρων», Διδακτορική Διατριβή, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών Α.Π.Θ.