

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΥΦΑΛΜΥΡΗΣ ΚΑΡΣΤΙΚΗΣ ΠΗΓΗΣ ΚΑΡΑΒΟΜΥΛΟΣ ΤΗΣ ΣΑΜΗΣ ΚΕΦΑΛΛΗΝΙΑΣ

Γιαλαμάς Ι.¹, Μαραμαθάς Α.², Αμπελιώτης Κ.³, Καπίρης Κ.⁴

¹ *Ινστ. Υδατοκαλλιέργειας, Ελληνικό Κέντρο Θαλάσσιων Ερευνών, jgiala@hcmr.gr*

² *Σχολή Χημικών Μηχανικών Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, thamar@chemeng.ntua.gr*

³ *Τμήμα Οικιακής Οικονομίας και Οικολογίας, Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο Αθηνών, kabeli@hua.gr*

⁴ *Ινστ. Θαλάσσιων Βιολογικών Πόρων, Ελληνικό Κέντρο Θαλάσσιων Ερευνών, kkapir@hcmr.gr*

Το αντικείμενο αυτής της εργασίας είναι η προσομοίωση της λειτουργίας της υφάλμυρης καρστικής πηγής της Σάμης στην Κεφαλλονιά, όπως αυτή περιγράφεται από τις χαρακτηριστικές καμπύλες της, δηλαδή το υδρογράφημα και την καμπύλη χλωριόντων. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε το ντετερμινιστικό μαθηματικό μοντέλο MODKARST. Από την προσομοίωση προέκυψε ότι ο συντελεστής κατείδυσης της λεκάνης τροφοδοσίας της πηγής είναι 61%, το εμβαδόν της λεκάνης 22.500.000 m² περίπου, ενώ ο μηχανισμός διείδυσης του θαλασσινού νερού είναι το φαινόμενο Venturi.

Λέξεις κλειδιά: διαχείριση υπόγειου νερού, Καραβόμυλος, Κεφαλλονιά, Modkarst.

SIMULATION OF THE BRACKISH KARST SPRING OF KARAVOMILOS, IN SAMI, KEFALONIA

Gialamas I.¹, Maramathas A.², Ampeliotis K.³, Kapiris K.⁴

¹ *Institute of Aquaculture Hellenic Center of Marine Research, jgiala@hcmr.gr*

² *National Technical University of Athens, School of Chemical Engineering, thamar@chemeng.ntua.gr*

³ *Harokopio University of Athens, Department of Home Economics and Ecology, kabeli@hua.gr*

⁴ *Institute of Marine Biological Resources Center of Marine Research, kkapir@hcmr.gr*

The subject of this work is the simulation of the brackish karst spring of Karavomilos, in Sami, Kefalonia. MODKARST deterministic mathematical model was used in order to simulate the characteristic curves of the spring, that is, the hydrograph, as well as the curve of the chloride concentration of the spring water versus time. Chloride concentration is proportional to seawater intrusion within its basin. From the simulation it has been concluded that for the Karavomilos spring the infiltration coefficient is 61%, the recharge area is about 22.500.000 m², while the sea intrusion mechanism is the venturi effect.

Keywords: Ground-water management, Karavomilos, Kefalonia, Modkarst.

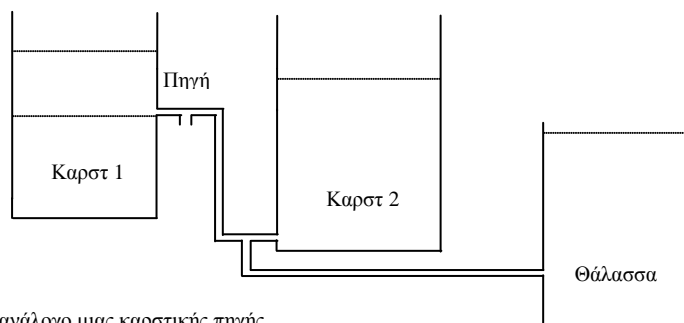
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ MODKARST

Η προσομοίωση έγινε με σκοπό την μελέτη των χαρακτηριστικών του καρστικού υδροφόρου συστήματος που εκφορτίζεται από την πηγή του Καραβόμυλου, τον προσδιορισμό του μηχανισμού υφαλμύρισης, καθώς και τη διερεύνηση της δυνατότητας αξιοποίησής της. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκε το μαθηματικό μοντέλο MODKARST (Maramathas, A., Maroulis, Z., Marinou-Kouris, D. 2003 και Maramathas, A. Boudounis, A.G., 2006). Παρακάτω θα γίνει μια σύντομη παρουσίαση αυτού του μοντέλου.

Κατά την εκφόρτιση ενός καρστικού συστήματος διακρίνονται (τουλάχιστον κατά την αρχική φάση) δύο ταχύτητες. Μία μεγάλη που αντιστοιχεί σε τμήμα του καρστ που εκφορτίζεται πολύ γρήγορα (λίγοι αγωγοί μεγάλης διαμέτρου) και μία μικρότερη που αντιστοιχεί σε τμήμα του καρστ που εκφορτίζεται με πολύ αργότερο ρυθμό (πολλοί αγωγοί μικρής διαμέτρου). Θα μπορούσε επομένως να γίνει αποδεκτό, ότι μια καρστική πηγή τροφοδοτείται από δύο διαφορετικά ως προς την υδρογεωλογική συμπεριφορά τους καρστικά υποσυστήματα. Αν τώρα είναι και υφάλμυρη θα τροφοδοτείται και από τη θάλασσα. Με βάση τα παραπάνω ένα φυσικό μοντέλο προσομοίωσης μιας καρστικής πηγής πρέπει να αποτελείται από τρεις δεξαμενές, μία για κάθε καρστικό υποσύστημα και μία για τη θάλασσα (σχ.1).

Το μαθηματικό μοντέλο προκύπτει από την εφαρμογή των ισοζυγίων μάζας και μηχανικής ενέργειας στις παραπάνω δεξαμενές. Για τον προσδιορισμό των ισοζυγίων χρησιμοποιήθηκαν οι μακροσκοπικές εξισώσεις διατήρησης της μάζας και της μηχανικής ενέργειας σε όγκο ελέγχου και την αντίστοιχη επιφάνεια ελέγχου (Maramathas et al 2003).



Σχ. 1 Το υδροδυναμικό ανάλογο μιας καρστικής πηγής

Είσοδο του μοντέλου αποτελούν οι βροχοπτώσεις στη λεκάνη τροφοδοσίας της πηγής ενώ στην έξοδο παίρνουμε το υδρόγραμμα της πηγής (η παροχή της συναρτήσει του χρόνου) και την περιεκτικότητα σε χλωριόντα του νερού της συναρτήσει του χρόνου (σχ. 2). Η περιεκτικότητα σε χλωριόντα του νερού μιας υφάλμυρης πηγής αποτελεί δείκτη υφαλμύρινσής της.



Σχ. 2 Διαγραμματική παρουσίαση του μοντέλου MODKARST

2. Η ΠΗΓΗ ΤΟΥ ΚΑΡΑΒΟΜΥΛΟΥ ΣΑΜΗΣ ΚΕΦΑΛΛΗΝΙΑΣ

Κατά το Ι.Γ.Μ.Ε (Σμυρνιώτης Χ. και άλλοι 2010) οι πηγές της Σάμης αποτελούν την συνολική εκφόρτιση του νότιου καρστικού συστήματος του Αίνου και έχουν παροχή 0.25 m³/sec. Η λεκάνη τροφοδοσίας των καρστικών πηγών με βάση τις μετρημένες παροχές προσδιορίστηκε στα 40 km² αλλά είναι σίγουρο ότι με βάση το συνολικό αριθμό των αναβλύσεων η έκταση της λεκάνης τροφοδοσίας υπερβαίνει τα 80 km². Από την διακύμανση των παροχών σε σχέση με τις βροχές της περιόδου 2005-2008 προκύπτει άμεση συσχέτιση με μια διαφορά χρόνου μεταξύ της βροχής και της απορροής της τάξης των 3 μηνών. Η γενικότερη τάση της παροχής της περιόδου ήταν πτωτική και οφείλεται στις βροχές. Οι φυσικοχημικές παράμετροι (ιόντα χλωρίου και θερμοκρασία) φαίνεται ότι ακολουθούν αντίστροφα την διακύμανση των υδραυλικών φορτίων. Αναφορικά με τη διαφοροποίηση των ιόντων χλωρίου στις διάφορες αναβλύσεις, η συγκέντρωσή τους μεταβάλλεται ανάλογα με το υψόμετρο της ανάβλυσης. Σημειώνεται ότι με μια υψομετρική αύξηση στο σημείο ανάβλυσης της τάξης των 0.8 m έως 1 m η συγκέντρωση των ιόντων χλωρίου υποδιπλασιάζεται.

Η θερμοκρασία που έχει μια μέση υπερετήσια τιμή της τάξης των 16.5° C εμφανίζεται υψηλότερη κατά 0.5° C στις υψηλότερες υψομετρικά αναβλύσεις. Στην περίοδο των μετρήσεων παρατηρείται ένα εύρος (ελάχιστο – μέγιστο) της τάξης των 5° C το οποίο δείχνει μια σχετικά γρήγορη εκφόρτιση και μια μικρή εναποθηκευτικότητα τουλάχιστον στο παράκτιο τμήμα εκφόρτισης.

Οι παραπάνω διαπιστώσεις αφορούν στο τμήμα του υδροφόρου συστήματος που βρίσκεται σε μια ζώνη περίπου 2 km από το μέτωπο εκφόρτισης. Για το υπόλοιπο τμήμα του υδροσυστήματος μοναδική πηγή στοιχείων αποτελεί η γεώτρηση Γ130 στην περιοχή του Αγίου Νικολάου. Η Γ130 βρίσκεται σε μια απόσταση 13 km από το μέτωπο εκφόρτισης, το υδραυλικό φορτίο είναι της τάξης των 140 m, και για την περίοδο παρακολούθησης (11/08 έως 04/09) η διακύμανση είναι 2,5 m. (Σμυρνιώτης Χ. και άλλοι 2010).

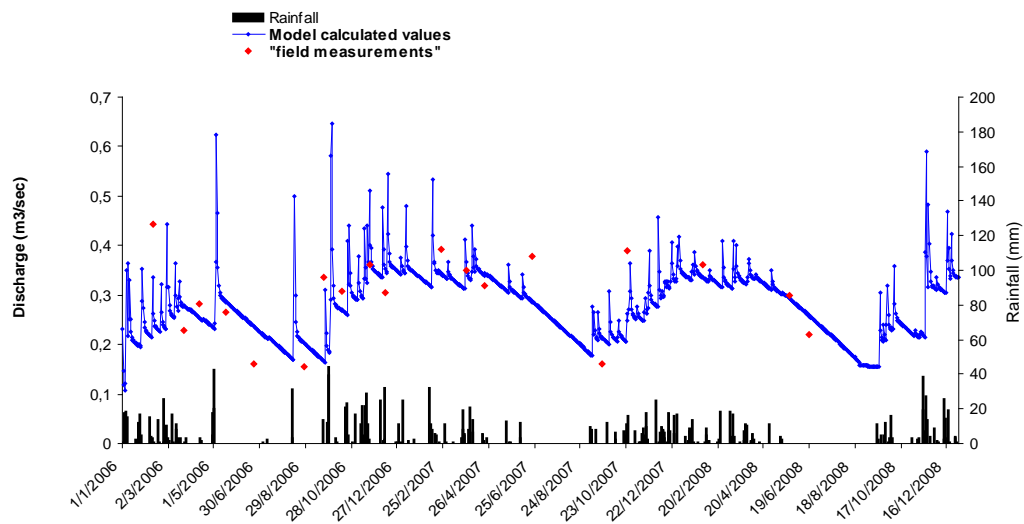
Η πηγή του Καραβόμυλου αποτελεί την εκφόρτιση ενός φυσικού καρστικού έγκοιλου που βρίσκεται σε μια απόσταση 80 m από την ακτή και έχει απομονωθεί με τοίχιο από την θάλασσα δημιουργώντας μία τεχνητή λίμνη με θυρόφραγμα που η στέψη του βρίσκεται σε υψόμετρο +0.64 m το οποίο καθορίζει την υπερχειλίση της. Η μέτρηση της γίνεται σε μικρό κανάλι μπροστά από το θυρόφραγμα που οδηγεί τα νερά στην θάλασσα. Σε όλη την διάρκεια των μετρήσεων το θυρόφραγμα παρέμεινε σε σταθερό ύψος και επόμενα οι μετρήσεις έχουν το ίδιο επίπεδο αναφοράς. Η παροχή κυμάνθηκε κατά την περίοδο μέτρησης από 0.07 m³/sec έως 0.6 m³/sec και αποτελεί το 65% της συνολικής παροχής. Ο χημισμός της είναι τυπικής υφάλμυρης καρστικής πηγής και κατά την περίοδο μέτρησης, τα χλωριόντα κυμαίνονται από 2800 mg/lit έως 6000 mg/lit.

Η θερμοκρασία κυμαίνεται από 14 – 19 C. Στην λίμνη ανάντι, τοποθετήθηκε ένα αυτογραφικό για την παρακολούθηση της διακύμανσης της στάθμης στην λίμνη (Σμυρνιώτης Χ. και άλλοι 2010).

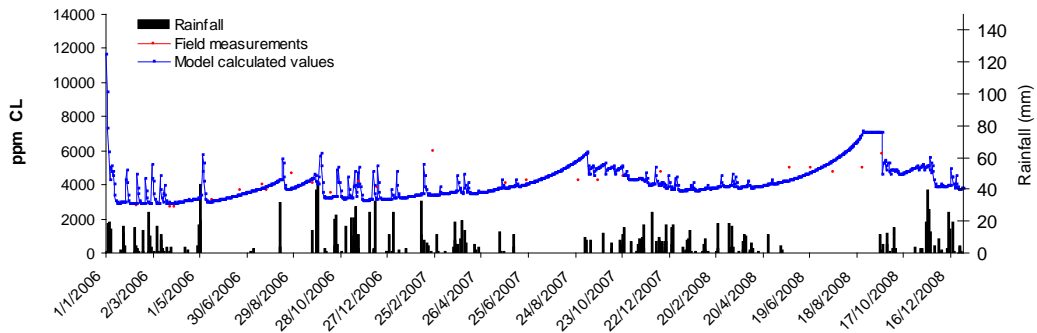
Από την προσομοίωση με το μοντέλο MODKARST ορισμένα από τα στοιχεία που αναφέρονται παραπάνω και πιά συγκεκριμένα, το εμβαδό της λεκάνης τροφοδοσίας και ο χρόνος απόκρισης της πηγής στις βροχοπτώσεις εμφανίζονται διαφοροποιημένα. Συζήτηση για τα θέματα αυτά γίνεται στην παράγραφο 4.

3. Η ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΗΣ ΠΗΓΗΣ ΜΕ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ MODKARST

Η προσομοίωση αφορά τη χρονική περίοδο 2006-2008. Στο σχήμα 3 γίνεται σύγκριση του υδρογραφήματος της πηγής όπως προκύπτει από το μαθηματικό μοντέλο με το πραγματικό, ενώ στο σχήμα 4 φαίνεται η καμπύλη χλωριόντων που προκύπτει από το μοντέλο σε σύγκριση με τις πραγματικές τιμές χλωριόντων.



Σχ. 3 Υδρογράμμα Πηγής. Σύγκριση αποτελεσμάτων μαθηματικού μοντέλου (μπλέ καμπύλη) με τις μετρήσεις πεδίου (κόκκινα σημεία)



Σχ. 4 Καμπύλη Χλωριόντων. Σύγκριση αποτελεσμάτων μαθηματικού μοντέλου (μπλέ καμπύλη) με τις μετρήσεις πεδίου (κόκκινα σημεία)

Όπως παρατηρούμε από τα παραπάνω σχήματα, υπάρχει καλή σύμπτωση μεταξύ των καμπυλών που μας δίνει το μοντέλο και των αντίστοιχων πραγματικών που έχουν προκύψει από μετρήσεις. Ο συντελεστής συσχέτισης μεταξύ των μετρήσεων πεδίου και των αντίστοιχων προβλέψεων του μοντέλου είναι για τις περιόδους στείρευσης της πηγής 0.9468 για το υδρόγραμμα και 0.99 για την καμπύλη χλωριόντων. Το συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι το μαθηματικό πρότυπο (μοντέλο) προσομοιώνει ικανοποιητικά τη λειτουργία της πηγής του Καραβόμυλου και επομένως μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη της συμπεριφοράς της πηγής κάτω από διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας της (π.χ. διαφορετικά ύψόμετρα σημείου εκροής) έτσι ώστε να προκύψει η καλύτερη μέθοδος για την εκμετάλλευσή της.

4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ - ΕΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗ ΤΗΣ ΠΗΓΗΣ

Το χρονικό διάστημα προσομοίωσης ήταν από 2/1/2006 έως 31/12/2008. Ελήφθησαν υπ' όψιν μόνον οι μετρήσεις του βροχομέτρου στον Καραβόμυλο καθώς δεν υπήρχε άλλο βροχόμετρο στην περιοχή. Πρ' όλο που το βροχόμετρο αυτό δεν αντιπροσωπεύει ικανοποιητικά το σύνολο της περιοχής τροφοδοσίας της πηγής καθώς βρίσκεται σε χαμηλό υψόμετρο, η προσομοίωση πρέπει να θεωρείται επιτυχής σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο. Όλες οι τιμές των παραμέτρων που παρουσιάζονται παρακάτω προέκυψαν από την προσαρμογή του κώδικα του μοντέλου στα δεδομένα της πηγής, δηλαδή στην πραγματικότητα, στην προσαρμογή των παραμέτρων των εξισώσεων των οποίων η λύση συνιστά το μοντέλο MODKARST, στα γεωμετρικά και φυσικά χαρακτηριστικά του υδροφόρου ορίζοντα που εκφορτίζεται από την πηγή. Για την προσαρμογή μοντέλου χρησιμοποιήθηκε κατάλληλο πρόγραμμα αριστοποίησης από το οποίο ζητήθηκε να προσαρμόσει τις παραμέτρους του μοντέλου έτσι ώστε οι διαφορές των τιμών της παροχής της πηγής και της περιεκτικότητας σε χλωριόντα του νερού της που προκύπτουν από το μοντέλο, με τις πραγματικές μετρήσεις στο πεδίο, να είναι οι ελάχιστες δυνατές (μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων).

Η προσομοίωση έγινε με ενιαίο συντελεστή κατείδυσης, ο οποίος υπολογίστηκε στο 61% περίπου. Η περιοχή τροφοδοσίας υπολογίστηκε από το μοντέλο στα 22.500.000 m² περίπου. Τα παραπάνω σημαίνουν ότι ο υδροφόρος ορίζοντας που δίνει την πηγή τροφοδοτείται από το νερό της βροχής που κατείδυει (61%) σε μία περιοχή έκτασης 22.500.000 m². Αυτή η πληροφορία

είναι χρήσιμη σε κάθε φορέα που θα αναλάβει να διαχειριστεί τη λεκάνη προκειμένου να προβεί σε κάποιο σχέδιο δράσης. Για παράδειγμα, σ' αυτή την έκταση θα πρέπει να λάβει μέτρα προστασίας ο φορέας διαχείρισης, προκειμένου να προστατεύσει το νερό της πηγής από ενδεχόμενη ρύπανση.

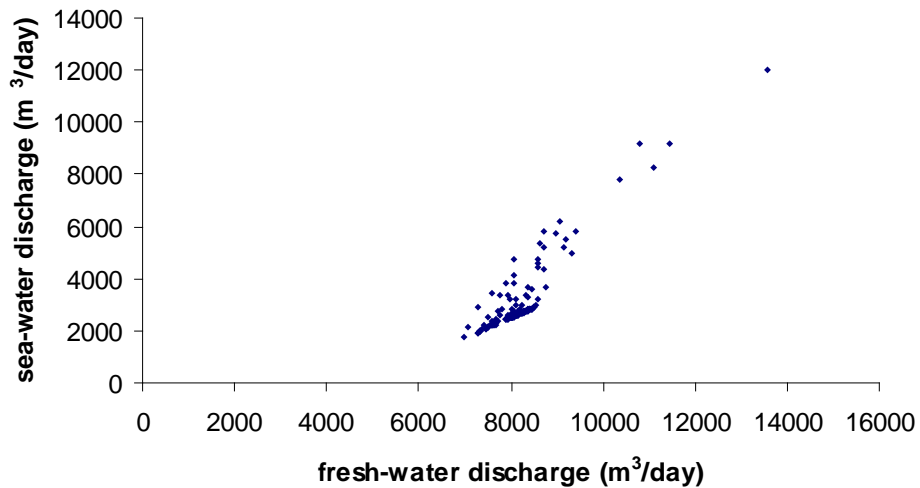
Ο καρστικός υδροφορέας παρουσιάζει διπλό πορώδες (dual porosity), αφ ενός μικρορωγμές και αφ' ετέρου μεγαλύτερες ρωγμές και ίσως και κάποιους αγωγούς (conduits). Κατά συνέπεια υπολογίστηκαν από το μοντέλο δύο συντελεστές εναποθήκευσης: Ένας για τις μικρορωγμές με τιμή: $9,9697E-07$ και ένας για τις μεγαλύτερες ρωγμές και τους αγωγούς με τιμή: $0,000128867$. Η παρουσία διπλού πορώδους είναι συνηθισμένη σε ασβεστολιθικά πετρώματα, όπου τόσο οι μικροαγωγοί όσο και οι μεγαλύτεροι αγωγοί προκύπτουν από τη διάλυση του υλικού του πετρώματος ($CaCO_3$) από το νερό της βροχής του οποίου το pH είναι μικρότερο του 7. Οι τιμές των δύο συντελεστών εναποθήκευσης που προσδιορίστηκαν υποδηλώνουν αγωγούς στους οποίους το νερό βρίσκεται υπό πίεση. Το χρονικό διάστημα που απαιτείται για την απόκριση της πηγής μετά από κάποια βροχόπτωση υπολογίζεται περίπου στις 4 ημέρες.

Οι τιμές κάποιων παραμέτρων που προέκυψαν από την προσομοίωση (έκταση λεκάνης τροφοδοσίας, χρόνος απόκρισης της πηγής στις βροχοπτώσεις) εμφανίζονται διαφορετικές από τις τιμές που αναφέρθηκαν από τη βιβλιογραφία στην παράγραφο 2. Εκτιμάται ότι οι διαφορές αυτές οφείλονται στο ότι η ανάβλυση του Καραβόμυλου αποτελεί μία από τις πολλές εκφορτίσεις του καρστικού συστήματος του Αίνου. Το υδροφόρο που τροφοδοτεί τη συγκεκριμένη πηγή αποτελεί ένα σχετικά αυτόνομο υποσύνολο του συνολικού υδροφόρου που σχηματίζεται στο ορεινό συγκρότημα του Αίνου.

Εκτός όμως από τα παραπάνω προσδιορίστηκε από το μοντέλο και ο μηχανισμός υφαλμύρισης της πηγής, που είναι το φαινόμενο Venturi. Το μοντέλο MODKARST μπορεί να προσδιορίζει τον μηχανισμό υφαλμύρισης μιάς υφάλμυρης καρστικής πηγής, στηριζόμενο στον υπολογισμό της παροχής γλυκού νερού της πηγής σε συνάρτηση με την παροχή αλμυρού νερού από τη θάλασσα η οποία μπαίνει στην λεκάνη της πηγής και την υφαλμυρίζει (Maramathas et al 2006). Στο σχήμα 5 φαίνεται η γραφική παράσταση της παροχής θαλασσινού (αλμυρού) νερού σε σχέση με την παροχή γλυκού νερού για την πηγή του Καραβόμυλου. Φαίνεται από την γραφική αυτή παράσταση ότι η παροχή θαλασσινού νερού αυξάνεται όταν αυξάνεται η παροχή γλυκού νερού. Αυτό συμβαίνει όταν ο επικρατών μηχανισμός θαλάσσιας διείδυσης είναι το φαινόμενο Venturi (Maramathas et al 2006). Για την συγκεκριμένη πηγή, στα σημεία συνάντησης των αγωγών που φέρνουν το γλυκό νερό από τον Αίνο με τους αγωγούς που φέρνουν το νερό της θάλασσας υπάρχουν στενώσεις, οπότε εκεί αυξάνεται η ταχύτητα ροής του γλυκού νερού με αποτέλεσμα λόγω του νόμου του Bernoulli, να δημιουργείται υποπίεση, και κατά συνέπεια συνθήκη εισρόφησης του θαλασσινού νερού. Προφανώς, τα παραπάνω εντείνονται όσο πιά μεγάλη είναι η παροχή του γλυκού νερού.

Η γνώση του μηχανισμού υφαλμύρισης είναι απαραίτητη προκειμένου να επιλεγεί η σωστή μέθοδος αξιοποίησης του νερού της πηγής, δηλαδή της σωστής δράσης προκειμένου να λάβουμε από την πηγή γλυκό νερό κατάλληλο για ύδρευση και άρδευση. Στην περίπτωση που ο μηχανισμός είναι το φαινόμενο Venturi, η σωστότερη μέθοδος αξιοποίησης είναι η κατασκευή

γεωτρήσεων ανάντη της πηγής, προκειμένου να συλληφθεί το γλυκό νερό πριν την συνάντησή του με το θαλασσινό οπότε και υφαλμυρίζεται.



Σχ.5 Γραφική παράσταση γλυκού – αλμυρού νερού όπου μπορεί κανείς να διαπιστώσει ότι αυξανόμενης της παροχής του γλυκού νερού αυξάνεται και η παροχή του αλμυρού

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

1. Ο μηχανισμός υφαλμύρινσης προσδιορίστηκε από το μοντέλο και είναι το φαινόμενο Venturi
2. Η συντελεστής κατείσδυσης της βροχής στην περιοχή τροφοδοσίας του υδροφόρου ορίζοντα που δίνει την πηγή υπολογίστηκε στο 61% περίπου
3. Το χρονικό διάστημα που απαιτείται για την ανταπόκριση της πηγής μετά από κάποια βροχόπτωση υπολογίζεται περίπου στις 4 ημέρες.
4. Η περιοχή τροφοδοσίας υπολογίστηκε από το μοντέλο στα 22.500.000 m² περίπου
5. Η σωστότερη μέθοδος αξιοποίησης της πηγής είναι η κατασκευή γεωτρήσεων ανάντη.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Maramathas, A., Pergialiotis, P., Gialamas, I., 2006, Estimation of sea intrusion mechanism of brackish karst springs by their simulation with the “MODKARST” deterministic model, *Hydrogeology Journal* Hydrogeology Journal Volume 14 Number 5 (2006) pp 657- 662.
2. Maramathas, A. Boudouvis, A.G., 2006, Manifestation and measurement of the fractal characteristics of karst hydrogeological formations *Advances in Water Resources* *Advances in Water Resources*, Volume 29, Issue 1, January 2006, Pages 112-116
3. Maramathas, A., Maroulis, Z., Marinos-Kouris, D., 2003, A Brackish Karstic Springs Model. Application on Almiros Crete Greece, *Ground Water* Volume 41 No 5 pp 608-620.
4. Σμυρνιώτης Χ., Ζαχαριουδάκης Γ., και Κ. Μανάκος(2010) Καταγραφή και αποτίμηση των υδρογεωλογικών χαρακτήρων των υπόγειων νερών και των υδροφόρων σχηματισμών της χώρας, εκτίμηση και αξιοποίηση υπόγειων νερών Ιονίων Νήσων – Υδρογεωλογική μελέτη ΙΓΜΕ.