

ΤΜΗΜΑ ΟΙΚΙΑΚΗΣ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑΣ ΚΑΙ ΟΙΚΟΛΟΓΙΑΣ
ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΓΙΑΛΑΜΑΣ ΙΩΑΝΝΗΣ ΗΛΙΑ

Τίτλος

**«Προσομοίωση της υφάλμυρης καρστικής πηγής Καραβόμυλος της Σάμης
Κεφαλληνίας »**

ΕΠΙΒΛΕΠΟΝΤΕΣ

Δρ. Αμπελιώτης Κωνσταντίνος Επίκουρος Καθηγητής

Δρ. Καπίρης Κωνσταντίνος Ερευνητής Γ΄

Δρ. Μαραμαθός Αθανάσιος Συνεργάτης Ερευνητής

ΕΥΧΑΡΙΣΤΗΡΙΑ

Πολλά ευχαριστώ στον καθηγητή μου κ.Αμπελιώτη για τη συνεργασία μας , όπως και γι' αυτά που διδάχθηκα στη διάρκεια των σπουδών μου απ' αυτόν.

Επιπροσθέτως στον κ. Καπίρη για την βοήθειά του στη διαμόρφωση του τελικού κειμένου.

Τέλος στον κ, Μαραμαθά για την παραχώρηση και χρήση του στοχαστικού του μοντέλου

«Modkarst»και για τις συμβουλές του στην παρούσα εργασία.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αντικείμενο της παρούσας διατριβής είναι η προσομοίωση της υφάλμυρης καρστικής πηγής του Καραβόμυλου, στην περιοχή Σάμη Κεφαλληνίας.

Η πηγή αυτή είναι υφάλμυρη καρστική. Με τον όρο καρστικές πηγές εννοείται το σημείο εξόδου του νερού των καρστικών υδρογεωλογικών λεκανών. Οι καρστικές υδρογεωλογικές λεκάνες είναι συστήματα αποθήκευσης και αγωγής του υπόγειου νερού που αποτελούνται από πλήθος αγωγών ποικίλου σχήματος και μεγέθους. Από μορφολογική άποψη δηλαδή, αυτές οι λεκάνες βρίσκονται στη μέση της απόστασης μεταξύ ενός πορώδους μέσου και μιας κλασσικής δεξαμενής νερού.

Καρστικές λεκάνες δημιουργούνται σε συμπαγή πετρώματα διαλυτά από το νερό όπως είναι οι ασβεστόλιθοι. Οι αγωγοί δημιουργούνται από τη διαλυτική δράση του νερού της βροχής, συνήθως πάνω σε προϋπάρχουσες ασυνέχειες τεκτονικού χαρακτήρα του πετρώματος. Από υδραυλική άποψη τα χαρακτηριστικά αυτών των λεκανών είναι η προνομιακότητα της ροής και σε πολλές περιπτώσεις, ο τυρβώδης χαρακτήρας της. Σε περίπτωση που η καρστική λεκάνη έρχεται σε επαφή με τη θάλασσα η αντίστοιχη καρστική πηγή μπορεί να είναι υφάλμυρη ή περιοδικά υφάλμυρη.

Από μετρήσεις πεδίου εξήχθησαν οι χαρακτηριστικές καμπύλες της πηγής που είναι το υδρόγραμμά της δηλαδή η παροχή της συναρτήσει του χρόνου, καθώς, και η καμπύλη χλωριόντων της δηλαδή η περιεκτικότητα σε χλωριόντα του νερού της συναρτήσει του χρόνου η οποία περιεκτικότητα είναι ανάλογη της διείσδυσης του θαλασσινού νερού στη λεκάνη της.

Η προσπάθεια προσομοίωσης μιας καρστικής πηγής πρέπει να κατατείνει στην πρόβλεψη του υδρογράμματός της, και της καμπύλης χλωριόντων της εφόσον η λεκάνη της υφαλμυρώνεται.

Οι μετρήσεις ελήφθησαν από το Ινστιτούτο Γεωλογικών και μεταλλευτικών Ερευνών και από την Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία.

Αφορούν τα έτη 2006-2008.και είναι ημερήσιες τιμές (γιατί τέτοιες απαιτούνται) βροχοπτώσεων, παροχής της πηγής και μετρήσεις χλωριόντων .

Για την επίλυση του προβλήματος της προσομοίωσης μιας υφάλμυρης καρστικής πηγής χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του Δρ. Αθανάσιου Μαραμαθά που επεξεργάστηκε στο Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο στο τμήμα Χημικών Μηχανικών.

Αναπτύχθηκε ένα μαθηματικό πρότυπο το οποίο τροφοδοτούμενο με τις βροχοπτώσεις της λεκάνης τροφοδοσίας της προβλέπει το υδρόγραμμά της και την καμπύλη χλωριόντων της συναρτήσει του χρόνου.

Από την προσομοίωση συμπεραίνεται ότι για την πηγή του Καραβόμυλου ο συντελεστής κατείδυσης είναι 61%, η λεκάνη τροφοδοσίας είναι 22.500.000 m², ενώ το φαινόμενο venturi αποτελεί τον μηχανισμό θαλάσσιας διείσδυσης .

ABSTRACT

The subject of this project is the simulation of the brackish karst spring of Karavomilos, in Sami, Kefalonia.

A karst spring is the water outflow point of a karst hydrogeological basin. Karst hydrogeological basins are storage and transport systems of ground water that consist of a large number of pipes of various shapes and sizes. From a morphological point of view, these basins are situated in the middle of a distance between a porous medium and a typical water tank. The karst basins are created into solid rocks, which are water dissoluble, such as limestones.

The pipes are created by the solvent action of rainwater, usually over the continuities of the rocks' tectonic structure. From hydraulic point of view, what characterizes the basins is their non-Darcian flow and, in many cases, their turbulent flow. In case the karst basin interacts with the sea, the karst spring could be either brackish or periodically brackish.

From the field measures, the characteristic curves of the spring have been deduced, that is, the hydrograph of the spring, its discharge in relation with time, as well as the curve of the chloride concentration of the spring water versus time. This content is proportional to seawater intrusion within its basin.

The karst spring simulation should attribute to the prediction of its hydrograph as well as its curve of chlorides as long as its basin is getting brackish.

The relevant measurements have been carried out by the Institute of Geological and Mineral Researches and by the National Meteorological Service. All the above data

(years 2006-2008) concern the daily rates of rainfalls of the spring supply and a measurement of chlorides.

To cope with the problem of a brackish karst spring's simulation, a method was developed by Dr Maramathas Athanasios in the National Technological University of Athens, in the Department of Chemical Engineering. This method based on a mathematical model, which uses the rainfalls of the basin, in order to predict its hydrograph and the curve of chlorides versus the time.

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.

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Πίνακας 2.1 Προτεινόμενο μαθηματικό πρότυπο

Παπαιωάννου, Α. 1999. Μηχανική των Ρευστών, Δεύτερη έκδοση. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο Σχολή Χημικών Μηχανικών. Αθήνα, Τόμος Ι σελ. 279-370.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΠΑΡΟΧΕΣ-ΧΛΩΡΙΟΝΤΑ-ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΕΙΣ ΚΑΡΑΒΟΜΥΛΟΥ

Εθνική Μετεωρολογική Υπηρεσία Δεδομένα ετών 2006-2008 (Αθήνα 15-12-2010)

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Σχήμα 1.1 Συνάρτηση μετασχηματισμού

Σχήμα 1.2 Υπόθεση μηχανισμού υπαλμύρωσης γλυκού νερού (Arfib et al 2002.)

Σχήμα 1.3 θεώρηση Ghyben-Herzberg (Arfib et al 2007)

Σχήμα 1.4 Θεώρηση Μαραμαθά για τον τρόπο λειτουργίας του συστήματος του Αλμυρού αποτελούν σημεία τροφοδοσίας ενός καρστικού υδροφόρου ορίζοντα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Σχήμα 2.1 Καρστικά φρέατα (Ψαριανός 1969)

Σχήμα 2.2 Καρστικά Φρέατα (τομή) (Ψαριανός 1969)

Σχήμα 2.3 Δολίνες (Μαραμαθάς 2002)

Σχήμα 2.4 Ουβάλες (Μαραμαθάς 2002)

Σχήμα 2.5 Καταβόθρες (Μαραμαθάς 2002)

Στήμα 2.6 Ηεξέλιξη μιάς ασβεστολιθικής περιοχής, λόγω καρστικής διάβρωσης (Ψαριανός 1969)

Σχήμα 2.7 Η πόλγη Planinsko της Σλοβενίας. Τα φρέατα οι δολίνες οι ουβάλες και οι πόλγες αποτελούν σημεία τροφοδοσίας ενός καρστικού υδροφόρου ορίζοντα

Σχήμα 2.8 Το σπήλαιο των λιμνών στο Χελμό

Σχήμα 2.9 Κλίμακες του προβλήματος για ρηγματωμένους υδροφορείς (Νάνου-Παπαθανασιάδης)

Σχήμα 2.10 Θεωρίες Grund και Katzer (M. Sweeting, 1972) από Γ. Καλλέργη 1980α

Σχήμα 2.11 Ζώνες ενός καρστικού υδροφόρου ορίζοντα (Mijatovic-Bakic 1967) από Γ. (Καλλέργη 1980^α)

Σχήμα 2.12 Ο κύκλος του νερού στη φύση

Σχήμα 2.13 Δεξαμενή υπερπλήρωσης

Σχήμα 2.14 Σίφωνας

Σχήμα 2.15 Υφαλμύρωση καρστικής πηγής (Maramathas et al 2006).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Σχ.. 3.1 Μηχανισμός εισόδου θαλασσινού νερού στηριζόμενος στη διαφορά πυκνότητας μεταξύ θαλασσινού και γλυκού νερού.

Σχ. 3.2. Μηχανισμός υφαλμύρισης στηριζόμενος στο φαινόμενο venturi. Sea intrusion mechanism of the spring based on the venture

Σχήμα 3.3. Το υδροδυναμικό ανάλογο μιας καρστικής πηγής

Σχήμα 5.1 Σχέση απορροής – χρόνου

Σχήμα 5.2 Σχέση χλωριόντων -χρόνου

Σχ.5.3 Γραφική παράσταση γλυκού – αλμυρού νερού

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1·

1.1 Γενικά

1.2 Εισαγωγή – Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

1.1 Γενικά

Το νερό είναι ίσως το πολυτιμότερο αγαθό που μας παρέχει η φύση. Αποτελεί αναμφισβήτητα σημαντικό παράγοντα για την ανάπτυξη, την υγιεινή διαβίωση, την ίδια τη ζωή. Όμως, αυτή η πηγή ζωής αποτελεί πλέον είδος εν ανεπαρκεία. Επιπλέον, οι λιγοστές ποσότητες νερού που απομένουν δε χαρακτηρίζονται πάντα από την καλύτερη ποιότητα.

Η Ελλάδα, όπως εξάλλου και ολόκληρος ο πλανήτης, βρίσκεται τα τελευταία χρόνια αντιμέτωπη με ένα μείζον οικολογικό πρόβλημα, αυτό της απειλούμενης λειψυδρίας. Το πρόβλημα αυτό οφείλεται σε μία σειρά από αίτια όπως η συνεχής αύξηση του πληθυσμού, η αύξηση του τουρισμού και της τουριστικής κατανάλωσης, η έλλειψη σχεδιασμού, η κακή διαχείριση των υδάτινων αποθεμάτων, η καταστροφή των δασών, η περιφρόνηση των φυσικών νόμων που διέπουν τον υδρολογικό κύκλο, η μείωση των βροχοπτώσεων λόγω κλιματικών αλλαγών κ.α.

Το πρόβλημα της έλλειψης ύδατος παρουσιάζεται σε ολόκληρη την ηπειρωτική Ελλάδα και ιδιαίτερα και στα νησιά. Υπάρχει εν μέρει πρόβλημα λειψυδρίας και στην Κεφαλληνία.

Η Κεφαλληνία είναι το μεγαλύτερο νησί της επτανήσου και το 11^ο μεγαλύτερο στη Μεσόγειο με πληθυσμό 36.527 κατοίκους (απογραφή 2001). Βρίσκεται στο νότιο άκρο του Ιονίου πελάγους και καλύπτει μια περιοχή 781km². Το νησί είναι εξαιρετικά ορεινό και καθορίζεται από μια υψηλή σειρά βουνών που το διασχίζει από τη δύση ως την ανατολή. Η Κεφαλληνία ανήκει στη Μεσογειακή κλιματολογική ζώνη που δίνει τον κύριο χαρακτήρα στο κλίμα της, το οποίο χαρακτηρίζεται ως εύκρατο. Η οικονομία της, λόγω του κλίματος και της έκτασης του νησιού, δίνει έμφαση στη γεωργία και την κτηνοτροφία, ενώ πλέον υπάρχει μεγάλη αύξηση στην παροχή υπηρεσιών, κυρίως σχετική με τον τουρισμό.

Το ζήτημα έλλειψης νερού στο νησί έχει απασχολήσει όχι μόνο την τοπική διοίκηση, αλλά προσπάθειες εύρεσης λύσης έχουν πραγματοποιηθεί σε παγκόσμια κλίμακα. Οι διάφορες ανθρωπογενείς παρεμβάσεις έχουν χειροτερέψει την ποιοτική και ποσοτική κατάσταση του νερού στην περιοχή, ενώ συγχρόνως παρατηρείται συνεχής μείωση των διαθέσιμων υδάτινων πόρων και υποβάθμιση της ποιότητάς τους.

Συνολικά, η Κεφαλληνία διαθέτει επαρκείς, αλλά άνισα κατανομημένους χωροχρονικά, επιφανειακούς και υπόγειους υδατικούς πόρους. Υπάρχουν, όμως, διάφοροι λόγοι οι οποίοι μειώνουν σημαντικά την πραγματική διαθέσιμη ποσότητα των υδατικών πόρων και δυσκολεύουν την αξιοποίησή τους.

Σύμφωνα με στοιχεία της Περιφέρειας Δυτικής Ελλάδος, οι κυριότεροι από αυτούς τους λόγους είναι:

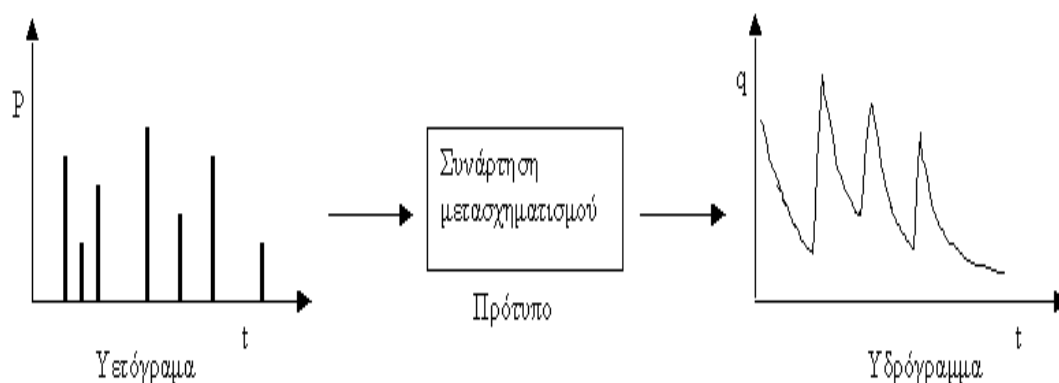
- Η προβληματικότητα των δικτύων ύδρευσης.
- Η ανομοιόμορφη κατανομή των υδατικών πόρων στο χρόνο, καθώς παρατηρείται συγκέντρωση βροχοπτώσεων κατά τη χειμερινή περίοδο.

Με αποτέλεσμα σε μια περιοχή με πολλές βροχοπτώσεις να υπάρχουν πόλεις που υδρεύονται (Φισκάρδο) με αφαλάτωση. Και ετοιμάζεται στην Ασσο νέα μονάδα αφαλάτωσης.

1.2 Εισαγωγή – Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Επισκόπηση προηγούμενων εργασιών

Από παλιά έχουν γίνει προσπάθειες προσομοίωσης του υδρογράμματος των πηγών γενικότερα και ειδικότερα των καρστικών πηγών. Η κεντρική ιδέα πάντα ήταν να βρεθεί μία κατάλληλη ‘συνάρτηση μετασχηματισμού’ ή ένα κατάλληλο πρότυπο που να οδηγεί από το υετόγραμμα στη λεκάνη τροφοδοσίας μιας πηγής, στο υδρόγραμμά της (σχ.1.1).



Σχήμα 1.1 Συνάρτηση μετασχηματισμού

Με την προσομοίωση του υδρογράμματος:

1. Μπορεί να γίνει πρόγνωση της παροχής μιας πηγής και υπολογισμός των αποθεμάτων του συστήματος που την τροφοδοτεί και
2. Να εξαχθούν ενδεχομένως, συμπεράσματα για τη φύση και τα χαρακτηριστικά του καρστικού υδροφόρου ορίζοντα.

Το τμήμα του υδρογράμματος που μπορεί ευκολότερα να προσομοιωθεί, καθώς εξαρτάται μόνον από τα χαρακτηριστικά του υδροφόρου και όχι από το σχέδιο των

βροχοπτώσεων, και παράλληλα έχει και το μεγαλύτερο από πρακτική άποψη ενδιαφέρον είναι η καμπύλη στείρευσης.

Για την προσομοίωση του υδρογράμματος έχουν προταθεί πολλές μαθηματικές σχέσεις (Σούλιος, 1982) από τις οποίες δύο είναι οι σημαντικότερες:

I. Η εκθετική σχέση του Maillet: $Q_t = Q_0 \cdot e^{-at}$, όπου Q_t η παροχή της πηγής στον χρόνο t , Q_0 η αρχική παροχή (παροχή στον χρόνο 0) και a παράμετρος που καλείται συντελεστής στείρευσης. Από φυσική άποψη ο τύπος του Maillet εκφράζει το νόμο εκκένωσης μιας δεξαμενής μέσω ενός πορώδους στομίου.

II. Η υπερβολική σχέση του Tison: $Q_t = \frac{Q_0}{(1+at)^x}$, όπου $0.5 \leq x \leq 3$. Ο τύπος του Tison εκφράζει το νόμο εκκένωσης μιας δεξαμενής μέσω μιας πορώδους πλευράς της σε όλο της το μήκος.

Και οι δύο προαναφερθέντες τύποι προσομοιώνουν την καμπύλη στείρευσης του υδρογράμματος, ενώ αποτυγχάνουν να προσομοιώσουν την καμπύλη πτώσης.

Για την προσομοίωση εκτός από την καμπύλη στείρευσης και της καμπύλης πτώσης του υδρογράμματος, ο D. Drogue (1967) προτείνει (Μπεζές, 1980), το άθροισμα τριών εκθετικών συναρτήσεων τύπου Maillet θεωρώντας ότι στην κορεσμένη ζώνη του κάρστ συνυπάρχουν τρεις ταχύτητες εκφόρτισης αναλόγως του μεγέθους των αγωγών και ότι κατά την περίοδο της πτώσης τη μεγαλύτερη συνεισφορά στην παροχή την έχουν οι μεγαλύτερης διαμέτρου αγωγοί. Υπολογίζει έτσι τρεις συντελεστές a_1, a_2, a_3 ο τελευταίος εκ των οποίων είναι ο συντελεστής στείρευσης κατά Maillet. Η σχέση μεταξύ τους είναι: $a_1 \geq a_2 \geq a_3$.

Πάντως πρώτη καταγραφή αυτής της ιδέας (Σούλιος, 1982), δηλαδή της συνύπαρξης διαφορετικών ταχυτήτων εκφόρτισης στην κορεσμένη ζώνη του υδροφόρου γίνεται από τον Schoeller (1948, 1962, 1967). Στην τελική διαμόρφωση της ιδέας συμμετοχή είχαν και οι Aigrot (1967) και Tripet (1969).

Ο Mangin (1971) για μεν την καμπύλη στείρευσης δέχεται (Σούλιος, 1982) τον τύπο του Maillet ενώ για την καμπύλη πτώσης προσθέτει στην παροχή κατά Maillet

παροχή q η οποία δίνεται από τη σχέση: $q = q_0 \frac{1 - nt}{1 + \varepsilon t}$, όπου $t = \frac{1}{n}$ ο χρόνος πτώσης

και ε συντελεστής που εκφράζει την κυρτότητα της καμπύλης. Αυτή η επιπλέον παροχή q , σύμφωνα με τον Mangin, οφείλεται σε νερό που φθάνει στην έξοδο της πηγής κατ' ευθείαν από τη ζώνη αερισμού μέσω αγωγών μεγάλης διαμέτρου. Θεωρεί ακόμη ο Mangin ότι αυτά τα νερά της ζώνης αερισμού, φθάνουν πρώτα στην έξοδο της πηγής και επομένως έχουν σχέση με την καμπύλη πτώσης του υδρογράμματος. Παρόμοιες σχέσεις με τις παραπάνω (Σούλιος, 1982) έχουν προτείνει και άλλοι ερευνητές όπως οι Shoeller (1967), Castany (1967) και Forkasiewicz-Paloc (1967).

Ο Μπεζές (1976) προκειμένου να προσομοιώσει ολόκληρο το υδρόγραμμα της πηγής, δηλαδή και την καμπύλη συγκέντρωσης, και δεχόμενος την άποψη Drogue σε συνδυασμό με την άποψη του Mangin, δημιούργησε ένα μαθηματικό πρότυπο δουλεύοντας με το φυσικό ανάλογο της σχέσης Maillet που είναι μία γραμμική δεξαμενή στην οποία η παροχή εκροής είναι ανάλογη του φορτίου. Θεώρησε έτσι ένα σύστημα πέντε δεξαμενών σε τρία επίπεδα εκ των οποίων η πρώτη στο πρώτο επίπεδο υπολογίζει την ενεργό κατείσδυση, οι επόμενες τρεις στο δεύτερο επίπεδο, που αντιστοιχούν στις τρεις εκθετικές σχέσεις του Drogue, μετατρέπουν την ενεργό κατείσδυση σε υδρόγραμμα, ενώ η πέμπτη υπολογίζει ορισμένα ειδικά φαινόμενα του κάρστ.

Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι ακόμη και για την καμπύλη στείρευσης, ο τύπος του Maillet στον οποίο σε τελευταία ανάλυση στηρίζονται όλοι οι παραπάνω ερευνητές, ισχύει προσεγγιστικά και μάλιστα για την εφαρμογή του επιλέγεται το τμήμα εκείνο της καμπύλης στείρευσης που προσεγγίζει περισσότερο την ευθεία γραμμή. Πιστεύουμε ότι η απόκλιση του τύπου του Maillet από την πραγματικότητα η οποία απόκλιση μάλιστα γίνεται σημαντική κατά τον χρόνο πτώσης του υδρογράμματος, οφείλεται στο ότι τα καρστικά συστήματα είναι μη γραμμικά και επομένως δεν είναι δυνατόν να προσομοιωθούν ικανοποιητικά από γραμμικές δεξαμενές.

Μετά την ευρεία εξάπλωση των υπολογιστών έχουν χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση του υδρογράμματος των καρστικών πηγών μαθηματικά μοντέλα που επιλύουν τα προβλήματα των υπογείων ροών, όπως π.χ. το MODFLOW (Angelini – Dragoni, 1997). Τα προβλήματα που υπάρχουν με τη χρήση τέτοιων μοντέλων είναι βασικά δύο:

1. Στηρίζονται για την επίλυση των ροών στον νόμο του Darcy, ο οποίος όπως προαναφέρθηκε δεν ισχύει ή στην καλύτερη περίπτωση ισχύει οριακά, όταν έχουμε να κάνουμε με καρστικούς υδροφόρους ορίζοντες, και
2. Απαιτούν την τροφοδότησή τους με πλήθος στοιχείων, γεωγραφικά καταναμημένων στην λεκάνη τροφοδοσίας της πηγής, που στις πλείστες των περιπτώσεων δεν υπάρχουν είτε διότι δεν λαμβάνονται είτε διότι δεν είναι δυνατόν να ληφθούν. Από την άλλη δίνουν μεγάλο όγκο πληροφοριών για το καρστικό υδροφόρο οι οποίες όμως δεν είναι χρήσιμες αν δεν μπορεί να ελεγχθεί η αξιοπιστία τους. Για παράδειγμα πληροφορίες σχετικές με τη στάθμη του νερού σε διάφορα σημεία του καρστικού υδροφόρου είναι εν πολλοίς άχρηστες εφ' όσον δεν υπάρχει η δυνατότητα να ελεγχθούν με την κατασκευή κάποιας γεώτρησης. Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι κατά κανόνα τα καρστικά υδροφόρα αναπτύσσονται στο εσωτερικό ορεινών όγκων όπου λόγω του δύσβατου του εδάφους αλλά και κυρίως λόγω των μεγάλων υψομέτρων δεν είναι δυνατόν να κατασκευαστούν γεωτρήσεις.

Για την προσομοίωση της υφαλμύρωσης των υδροφόρων οριζόντων γενικά ορισμένοι ερευνητές χρησιμοποιούν μοντέλα μεταφοράς όπως τα SUTRA και HST3D . Ειδικότερα όμως όσον αφορά τις υφάλμυρες καρστικές πηγές προσπάθειες προσομοίωσης της καμπύλης χλωριόντων τους δεν έχουν γίνει μέχρι σήμερα. Αυτό οφείλεται αφ' ενός μεν σε μια εδραιωμένη πλην όμως εσφαλμένη αντίληψη, ότι δεν είναι δυνατόν να βελτιωθεί η ποιότητα του νερού μιας υφάλμυρης καρστικής πηγής με έργα παρεμπόδισης της υφαλμύρωσης στο σημείο εξόδου του νερού, οπότε δεν υπάρχει πρακτικό ενδιαφέρον για την προσομοίωση και αυτό σε συνδυασμό και με τη δυσκολία χειρισμού του προβλήματος βάσει των καθιερωμένων περί υφαλμύρωσης αντιλήψεων, και αφ' ετέρου στη μη αναμονή εξαγωγής σημαντικών συμπερασμάτων για τη φύση του καρστικού συστήματος από την προσομοίωση, βάσει και πάλι των καθιερωμένων για την υφαλμύρωση των καρστικών πηγών αντιλήψεων όπως αυτές περιγράφηκαν στις προηγούμενες παραγράφους.

Η παρούσα εργασία στηρίχθηκε κατ'εξοχήν στην διατριβή που βασίζεται σε μία εξ ολοκλήρου πρωτότυπη ιδέα, που είναι η εξομοίωση του καρστικού συστήματος μια υφάλμυρης καρστικής πηγής με ένα σύστημα τριών δεξαμενών κατάλληλα συνδεδεμένων εκ των οποίων οι δύο έχουν πεπερασμένο μέγεθος και αντιστοιχούν

στον καρστικό υδροφορέα ενώ η τρίτη θεωρείται ότι έχει άπειρο μέγεθος και αντιστοιχεί στη θάλασσα.

Το άθροισμα των παροχών εκροής των τριών δεξαμενών δίνει την παροχή της πηγής ενώ από την επίλυση του προβλήματος ανάμιξης του γλυκού νερού των δεξαμενών του καρστικού υδροφορέα με το θαλασσίνο νερό της δεξαμενής της θάλασσας προκύπτει η περιεκτικότητα του νερού της πηγής σε χλωριόντα. Πάνω σ' αυτή την ιδέα στηρίζεται η ανάπτυξη ενός μαθηματικού προτύπου το οποίο υπολογίζει τις παροχές εκροής των δεξαμενών από την εφαρμογή των ισοζυγίων μάζας και ενέργειας στις δεξαμενές του καρστικού υδροφορέα και του ισοζυγίου ενέργειας στη δεξαμενή της θάλασσας. Για τον προσδιορισμό των ισοζυγίων χρησιμοποιήθηκαν οι μακροσκοπικές εξισώσεις συνέχειας και διατήρησης της μηχανικής ενέργειας.

Πέρα από τη βασική ιδέα πρωτότυπα επιστημονικά στοιχεία παρουσιάζονται και κατά το στάδιο ανάπτυξης του μαθηματικού προτύπου όσο και κατά το στάδιο της εφαρμογής του για την προσομοίωση της πηγής του Αλμυρού Ηρακλείου Κρήτης. Αυτά είναι:

- Ένας νέος τρόπος υπολογισμού της ενεργού κατείσδυσης μέσω της προσομοίωσης των διεργασιών που την καθορίζουν από μία δεξαμενή υπερχειλίσσης της οποίας οι διαστάσεις προκύπτουν από την προσαρμογή του προτύπου στα πραγματικά δεδομένα.
- Η αντιμετώπιση του προβλήματος του μαθηματικού χειρισμού των υπό πίεση καρστικών υδροφόρων οριζόντων για τις ανάγκες της προσομοίωσης, μέσω της εξομοίωσής τους με ελεύθερους που έχουν τον ίδιο αποθηκευμένο όγκο νερού. Η εξομοίωση αυτή επιτυγχάνεται με τη χρήση παραμέτρου που προκύπτει από τον συνδυασμό του συντελεστή εναποθήκευσης με το ενεργό πορώδες. Με τη μέθοδο αυτή αποφεύγεται η χρήση της πίεσης στην επιφάνεια του υπό πίεση καρστικού υδροφόρου ορίζοντα και έτσι μειώνεται ο αριθμός των μεταβλητών του προς επίλυση συστήματος εξισώσεων του μαθηματικού προτύπου.
- Η επισήμανση για πρώτη φορά του γεγονότος της απότομης ελάττωσης ή ακόμη και αντιστροφής σε κάποιες περιπτώσεις, της κλίσης της καμπύλης αύξησης της περιεκτικότητας σε χλωριόντα του νερού της πηγής του Αλμυρού κατά την περίοδο στείρευσης, πράγμα εκ πρώτης όψεως μη αναμενόμενο καθώς το καρστικό

σύστημα δεν τροφοδοτείται από βροχοπτώσεις κατά τη περίοδο αυτή. Το φαινόμενο ερμηνεύθηκε θεωρητικά και οι σχετικές διεργασίες προσομοιώθηκαν με τη χρήση δύο νέων παραμέτρων.

Από την προσομοίωση της πηγής του Αλμυρού με το προτεινόμενο μαθηματικό πρότυπο προέκυψαν νέα δεδομένα για τη λειτουργία της. Αυτά είναι:

- Οι ενεργές τιμές του συντελεστή εναποθήκευσης και του ενεργού πορώδους για τις καρστικές λεκάνες των ασβεστολίθων της Τρίπολης και των πλακωδών ασβεστολίθων.
- Η τιμή του εμβαδού της λεκάνης τροφοδοσίας της πηγής.
- Το ενεργό βάθος κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας από το οποίο ξεκινά η υφαλμύρωση του καρστικού συστήματος.

Πρέπει να τονιστεί ότι η μελέτη των καρστικών υδροφορέων είναι γενικά δυσχερής και συνήθως δεν είναι σαφείς οι περιοχές τροφοδοσίας των καρστικών πηγών. Οι μέθοδοι που ακολουθούνται βασίζονται κυρίως στην στατιστική επεξεργασία των μετρήσεων πεδίου. Η ανάπτυξη μαθηματικών προσομοιώσεων των καρστικών υδροφορέων, σε συνδυασμό με υφαλμύρωση λόγω της γειτνίασης με τη θάλασσα, είναι δυσχερής και με μεγάλο βαθμό αβεβαιότητας λόγω της ιδιαίτερα σύνθετης, συνήθως άγνωστης, γεωλογικής δομής τους και της ετερογένειας που παρουσιάζουν. Στις εργασίες που αναφέρονται στη συνέχεια, γίνεται προσπάθεια συγκριτικής παρουσιάσής τους.

Με βάση τις ομάδες των συγγραφέων και τις μεθόδους που ακολουθούν (στην παρούσα διπλωματική), οι εργασίες μπορούν να καταταγούν σε τέσσερις ομάδες:

- Ομάδα Arfib, de Marsily, Ganoulis κλπ: προσπαθούν να εξηγήσουν την υδροδυναμική συμπεριφορά της πηγής και τον μηχανισμό υφαλμύρωσης με βάση τους νόμους της υδραυλικής. Επεξεργάζονται χρονοσειρές με ημερήσια δεδομένα.
- Ομάδα Bonacci κλπ: εφαρμόζει μεθόδους στατιστικής επεξεργασίας των χρονοσειρών.

- Ομάδα Lambrakis κλπ: εφαρμόζει επίσης μεθόδους στατιστικής επεξεργασίας των χρονοσειρών και φασματικής ανάλυσης. Χρησιμοποιεί μη γραμμικές μεθόδους για την πρόβλεψη των παροχών της πηγής.

- Ομάδα Maramathas κλπ: θεωρεί σύστημα τριών δεξαμενών, εκ των οποίων οι δύο αντιπροσωπεύουν τα δύο καρστικά συστήματα της περιοχής τροφοδοσίας της πηγής και η τρίτη αντιπροσωπεύει τη θάλασσα και εφαρμόζει τις εξισώσεις διατήρησης μάζας και ενέργειας.

Στις ακόλουθες παραγράφους ακολουθεί αναλυτική παρουσίαση των παραπάνω αναφερθέντων μεθόδων.

Οι Arfib et al. (2001) θεώρησαν περιοχή τροφοδοσίας της τάξης των 300 km² από το οροπέδιο της Ίδης και το Κρητικό πέλαγος προς βορά μέχρι την κορυφογραμμή του Ψιλορείτη προς νότο. Διακρίνουν στην περιοχή δύο καρστικές ζώνες εν μέρει επικαλυπτόμενες, τους αυτόχθονες ασβεστολίθους και τους ασβεστολίθους Τριπόλεως. Οι ζώνες αυτές πιθανόν να χωρίζονται μεταξύ τους με αδιαπέρατη στρώση φλύσχη. Οι ερευνητές πραγματοποίησαν τους πρώτους μήνες του 2000 μετρήσεις, ανά 30 λεπτά της ώρας, της παροχής, της ηλεκτρικής αγωγιμότητας και της θερμοκρασίας της πηγής (αυτόματες καταγραφές). Επιπλέον επεξεργάστηκαν δεδομένα από γεωτρήσεις στην περιοχή του Ηρακλείου (θερμοκρασία και αγωγιμότητα του νερού) με συχνότητα μία φορά το μήνα,.

Ο Αλμυρός είναι η μόνη έξοδος μιας αρκετά πολύπλοκης λεκάνης τροφοδοσίας, η οποία αποτελείται από πολλούς επιμέρους υδροφορείς, που είτε βρίσκονται σε διαδοχή ο ένας του άλλου, είτε σε κάποιες περιπτώσεις υπερκαλύπτονται. Η θερμοκρασία του νερού της πηγής είναι περίπου 14-16°C, ενώ το νερό που αντλείται στα φρέατα έχει θερμοκρασία περίπου 20°. Οι ερευνητές παρατηρούν ότι η αξιοποίηση μέσω γεωτρήσεων του καρστικού φρεάτιου υδροφορέα, που ξεκινάει από το σημείο της πηγής, οδηγεί σε αργή και συνεχή αύξηση της διείσδυσης θαλασσινού νερού (saline intrusion), χωρίς όμως να υπάρχει κάποια επιρροή στο νερό της πηγής του Αλμυρού. Η ποσότητα χλωριόντων και η αλατότητα κάθε γεώτρησης διαφοροποιείται ανάλογα με τα ρήγματα και την καρστικοποίηση της περιοχής. Όσον αφορά την πηγή, αυτή τροφοδοτείται με γλυκό νερό από τα βουνά, αρκετά μακριά από την ακτή. Το γλυκό νερό ρέει προς στην πηγή μέσω αγωγών σε μεγάλο βάθος και

σε κάποια περοχή αναμιγνύεται με θαλάσσιο νερό και έτσι καταλήγει πλέον στην πηγή υφάλμυρο.

Κάθε γεγονός βροχόπτωσης στην περιοχή της λεκάνης τροφοδοσίας έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της παροχής της πηγής και την μείωση της αλατότητας του νερού. Οι ερευνητές όμως παρατήρησαν ότι, ενώ η παροχή της πηγής αυξάνει σχεδόν αμέσως μετά την βροχόπτωση, παρατηρείται πτώση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας του νερού της πηγής μετά από παροχέτευση 760,000 έως 790,000 m³ υφάλμυρου νερού, χωρίς στο ενδιάμεσο να έχει παρατηρηθεί μεταβολή της αλατότητας. Το φαινόμενο αυτό φαίνεται ανεξάρτητο από τις αρχικές συνθήκες. Ο όγκος του παροχετευόμενου υφάλμυρου νερού είναι ενδεικτικός της απόστασης μεταξύ της πηγής και της περιοχής διείσδυσης της θάλασσας μέσα στον καρστικό υδροφορέα.

Στο σύστημα του Αλμυρού, μπορεί να θεωρηθεί μία κύρια δεξαμενή γλυκού νερού. Το νερό αυτό κατά τη παροχέτευσή του προς την πηγή αναμιγνύεται με θαλασσινό αλμυρό νερό. Το αποτέλεσμα είναι υφάλμυρο νερό, το οποίο μεταφέρεται μακριά από την περιοχή διείσδυσης θαλασσινού νερού. Η πηγή του Αλμυρού αποτελεί σημείο εξόδου του όλου συστήματος, αλλά δεν αντιπροσωπεύει μόνο την άμεσα περιβάλλουσα περιοχή της, αλλά επηρεάζεται από πολύ μεγαλύτερη έκταση. Η περιοχή τροφοδοσίας της πηγής ότι δεν μπορεί να θεωρηθεί σαν ένα απλό πορώδες μέσο, ούτε σαν ένα σύστημα καρστικών αγωγών, αλλά σαν σύνθετο σύστημα διπλού πορώδους και αυτό πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στα μαθηματικά μοντέλα.

Οι Arfib et al. (2002), σε συνέχεια της προηγούμενης εργασίας του 2001, περιγράφουν τη λειτουργία του καρστικού συστήματος του Αλμυρού και δείχνουν την επιρροή της διττής φύσης της ροής στο καρστ και στην ποιότητα των υδατικών πόρων στην παράκτια περιοχή. Προτείνουν ένα μηχανισμό διείσδυσης του αλμυρού νερού σε αυτό το ετερογενές σύστημα, επιβεβαιώνοντάς το με ένα υδραυλικό μαθηματικό μοντέλο που περιγράφει αρκετά ικανοποιητικά τις παρατηρήσεις. Ο μηχανισμός υφαλμύρωσης του γλυκού νερού της πηγής φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα:

Σύμφωνα με την σχηματική αυτή απεικόνιση, ο κύριος καρστικός αγωγός τροφοδοσίας της πηγής διέρχεται από την περιοχή διείσδυσης της θάλασσας. Το θαλάσσιο νερό εισέρχεται στον αγωγό σύμφωνα με τους συνήθεις νόμους της ροής σε πορώδες μέσο. Όσο αυξάνεται το ενεργειακό φορτίο του γλυκού νερού, τόσο μικρότερη είναι η ποσότητα του θαλάσσιου νερού που εισέρχεται στον αγωγό και συνεπώς η ποσότητα των χλωριόντων.

■ Το μαθηματικό μοντέλο αυτό είναι μονοδιάστατο ρητό σχήμα πεπερασμένων διαφορών και είναι γραμμένο στο Matlab. Ο υδροφορέας θεωρείται ως οριζόντιος αγωγός κυκλικής διατομής, περιβαλλόμενος από πορώδες μέσο, του οποίου η πίεση και η αλατότητα είναι συνδεδεμένη με το θαλάσσιο νερό. Ο αγωγός τροφοδοτείται με γλυκό νερό από το ανάντη άκρο, ενώ σε ένα μήκος L διεισδύει θαλάσσιο νερό σύμφωνα με το νόμο Dupuit-Forchheimer και τη μέθοδο των εικόνων. Το μοντέλο υπολογίζει το πιεζομετρικό φορτίο για τυρβώδη ροή και θεωρώντας την εξίσωση Darcy-Weisbach.

■ Μετά από βαθμονόμηση, μπορούν να εκτιμηθούν τα χλωριόντα της πηγής για δεδομένη υδραυλική αγωγιμότητα, βάθος και διάμετρο του αγωγού, διαφοροποιώντας το μήκος του και τη σχετική του τραχύτητα. Το υπολογίζει τις ταχύτητες ροής της πηγής (αυτές θεωρούνται γνωστές από μετρήσεις), απλώς εκτιμάει τις διακυμάνσεις αλατότητας.

Θεώρηση αγωγού διαμέτρου 15 m, σε βάθος 500 m, με υδραυλική αγωγιμότητα 10^{-4} m/s, δίνει ως αποτέλεσμα μήκος θαλάσσιας διείσδυσης 1320 m, σε απόσταση 4350 m από την πηγή και με συντελεστή τραχύτητας 1.1. Βάθη αγωγού μικρότερα των 400 m δεν φαίνονται ρεαλιστικά.

Οι Arfib et al. (2002) κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι για την επίτευξη βιώσιμης διαχείρισης του νερού στην περιοχή, είναι αναγκαία η αλλαγή του τρόπου άντλησης των γεωτρήσεων, έτσι ώστε να περιοριστεί η μη αναστρέψιμη υφαλμύρωση στους πάνω υδροφορείς (που βρίσκονται σε μικρότερο βάθος κάτω από την επιφάνεια τους εδάφους). Φαίνεται δυνατή η απ'ευθείας εκμετάλλευση της πηγής, αν το υψόμετρο του νερού στο σημείο εξόδου είναι μεγαλύτερο από το υπάρχον. Σύμφωνα με το μοντέλο, αν το υψόμετρο της πηγής ανυψωθεί κατά 15 m, η πηγή θα έχει γλυκό νερό καθ' όλη την διάρκεια του έτους. Για την επιβεβαίωση των παραπάνω, όμως, είναι απαραίτητη η διεξαγωγή μετρήσεων πεδίου με το υπάρχον φράγμα.

Ακολουθεί η ανάλυση της εργασίας των Arfib et al. (2006). Στην εργασία αυτή οι συγγραφείς ερμηνεύουν την υστέρηση μεταξύ παροχής και μεταβολής των χλωριόντων της πηγής θεωρώντας την παραδοχή Ghyben-Herzberg (βλ. σχήμα) και διατυπώνοντας την ακόλουθη σχέση μεταξύ:

- Παροχής και συγκέντρωσης χλωριόντων της πηγής Q_{spring} και C_{spring} αντίστοιχα
- Παροχής θαλάσσιου νερού που τροφοδοτείται στην πηγή Q_{sea} και των αντίστοιχης συγκέντρωσης χλωριόντων C_{sea} και
- Παροχής και συγκέντρωσης χλωριόντων του παροχτευόμενου γλυκού νερού Q_{fresh} και C_{fresh} αντίστοιχα

$$Q_{spring} * C_{spring} = Q_{sea} * C_{sea} + Q_{fresh} * C_{fresh}$$

Στην—εργασία των Arfib et al. (2007) εφαρμόστηκαν μετρήσεις αλατότητας και παροχής στην υφάλμυρη πηγή του Αλμυρού, όχι μόνο για να αποδειχθεί η μεταξύ τους συσχέτιση, αλλά και για να εκτιμηθεί η θέση όπου λαμβάνει χώρα η ανάμειξη του γλυκού νερού με το αλμυρό νερό της θάλασσας μέσα στον καρστικό υδροφορέα. Η συγκεκριμένη μελέτη είναι η πρώτη που προτείνει την ανάλυση της χρονικής καθυστέρησης (Lag) μεταξύ της συγκέντρωσης των χλωριόντων και της παροχής της πηγής, με σκοπό την εκτίμηση της απόστασης από τη ζώνη ανάμειξης του γλυκού νερού με το αλμυρό ως την πηγή.

Τα αποτελέσματα της εργασίας βασίζονται σε χημικές και φυσικές μετρήσεις, λαμβανόμενες κάθε 30 λεπτά στην πηγή του Αλμυρού, κατά την περίοδο του Σεπτεμβρίου 1999 μέχρι το Μάιο 2001. Με βάση την ανάλυση των υδροχημικών, γεωλογικών και μετεωρολογικών δεδομένων στη λεκάνη τροφοδοσίας του Αλμυρού προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα:

- Η διακύμανση της αλατότητας δρα σαν «ανιχνευτής» υποδεικνύοντας κατευθείαν την απόσταση μεταξύ της πηγής του Αλμυρού και της ζώνης όπου το θαλασσίνο νερό διεισδύει μέσα στον αγωγό γλυκού νερού.

- Ο καρστικός αγωγός που έχει υποτεθεί βρίσκεται πάνω στις βασικές ρωγμές από το νότο προς το βορρά και η τομή του αγωγού δεν μπορεί να μετρηθεί κατευθείαν από διάφορους.
- Η χρονική υστέρηση (Lag) μεταξύ της μείωσης της αλατότητας που καταγράφηκε στην πηγή και της αύξησης της παροχής μπορεί εύκολα να μετατραπεί σε όγκο παροχής για αυτή τη χρονική διάρκεια. Ο τελευταίος είναι ο όγκος του, γεμάτου με νερό, αγωγού μεταξύ της πηγής του Αλμυρού και της ζώνης ανάμειξης.
- Ο όγκος του καρστικού αγωγού μεταξύ της ζώνης ανάμειξης και της πηγής του Αλμυρού βρέθηκε ότι είναι σταθερός καθ' όλη τη διάρκεια του έτους και υπολογίζεται περίπου 770000 m³. Αυτό δείχνει ότι το θαλασσινό νερό διεισδύει πάντα στην ίδια ζώνη του αγωγού. Η διείσδυση του νερού ρυθμίζεται μόνο από το ενεργειακό ύψος μέσα στον καρστικό αγωγό, που εξαρτάται από την εποχή και τη βροχόπτωση.
- Η απόσταση μεταξύ της πηγής και της ζώνης ανάμειξης μέσα στον αγωγό εκτιμάται γύρω στα 2500 και 8000 m.
- Η περίοδος παρατήρησης και των διαστημάτων που λαμβάνονται δείγματα νερού είναι μεγάλης σημασίας στη μελέτη καρστικών πηγών. Είναι συχνά απαραίτητη η λήψη δειγμάτων ανά τακτά χρονικά διαστήματα για εκτεταμένες περιόδους.

Οι εργασίες των Bonacci et al. (2006) και οι Panagopoulos et al. (2006) φαίνεται να έχουν τον ίδιο τρόπο αντιμετώπισης της πηγής του Αλμυρού, εφαρμόζοντας και οι δύο τη στατιστική μέθοδο ανάλυσης αυτοσυσχέτισης και ετεροσυσχέτισης σε διάφορες χρονοσειρές στοιχείων.

Στον καθορισμό της περιοχής τροφοδοσίας της πηγής, οι Bonacci & Fistanic (2006) ακολουθούν τη μεθοδολογία των Arfib et al. (2000). Στην τελευταία εργασία, όπως αναφέρεται παραπάνω, χωρίζεται η λεκάνη σε δύο υδροφορείς θεωρώντας ότι ο νοτιότερος και ορεινότερος υδροφορέας της Ίδης είναι αυτός που συνδέεται απ' ευθείας με την πηγή.

Σαν βασικό βήμα επεξεργασίας, εφαρμόζεται ανάλυση Αυτοσυσχέτισης (Auto-correlation) και Ετεροσυσχέτισης (Cross-Correlation). Τα δεδομένα στα οποία εφαρμόζεται η παραπάνω ανάλυση είναι: δεδομένα βροχόπτωσης ανά 30 λεπτά και μέσα ημερήσια δεδομένα βροχόπτωσης (μετρημένης στους σταθμούς των Ανωγείων

και του Μάραθου), παροχής της πηγής και συγκέντρωσης των χλωριόντων της πηγής για την περίοδο 15 Σεπτεμβρίου 1999 με 17 Μαΐου 2001.

Με την εφαρμογή της παραπάνω στατιστικής ανάλυσης οι μελετητές επιβεβαιώνουν τα πολύπλοκα χαρακτηριστικά της επαναφόρτισης/τροφοδοσίας της πηγής.

- Γρήγορη μείωση των συντελεστών αυτοσυσχέτισης της χρονοσειράς της ημερήσιας παροχής στην αρχή του διαγράμματος φανερώνει το γεγονός ότι η πηγή τροφοδοτείται από τις μεγάλους καρστικούς σχηματισμούς του καρστικού υδροφορέα, στον οποίο η ροή είναι γρήγορη και τυρβώδης. Μικρότερη μείωση της συνάρτησης στη συνέχεια δείχνει ότι στη μάζα του καρστικού υδροφορέα υπάρχει και σημαντική ποσότητα μικρότερων κενών μέσα στα οποία φυλάσσεται ο μεγαλύτερος όγκος νερού και η ροή είναι στρωτή.
- Αντίστροφη είναι η σχέση μεταξύ των υδρολογικών δεδομένων και της συγκέντρωσης των χλωριόντων. Η παροχή γλυκού νερού έχει μεγαλύτερη επίπτωση στα χλωρίοντα παρά στην εισροή θαλασσινού νερού, γεγονός που δείχνει ότι σε κάποιες περιόδους τα χλωρίοντα αυξάνονται όχι λόγω μεγαλύτερης εισροής θαλασσινού νερού, αλλά λόγω του ότι μειώνεται ο όγκος γλυκού νερού.

Σαν βασικό βήμα επεξεργασίας, εφαρμόζεται ανάλυση Αυτοσυσχέτισης (Auto-correlation) και Ετεροσυσχέτισης (Cross-Correlation). Τα δεδομένα στα οποία εφαρμόζεται η παραπάνω ανάλυση είναι: δεδομένα βροχόπτωσης ανά 30 λεπτά και μέσα ημερήσια δεδομένα βροχόπτωσης (μετρημένης στους σταθμούς των Ανωγείων και του Μάραθου), παροχής της πηγής και συγκέντρωσης των χλωριόντων της πηγής για την περίοδο 15 Σεπτεμβρίου 1999 με 17 Μαΐου 2001.

Με την εφαρμογή της παραπάνω στατιστικής ανάλυσης οι μελετητές επιβεβαιώνουν τα πολύπλοκα χαρακτηριστικά της επαναφόρτισης/τροφοδοσίας της πηγής.

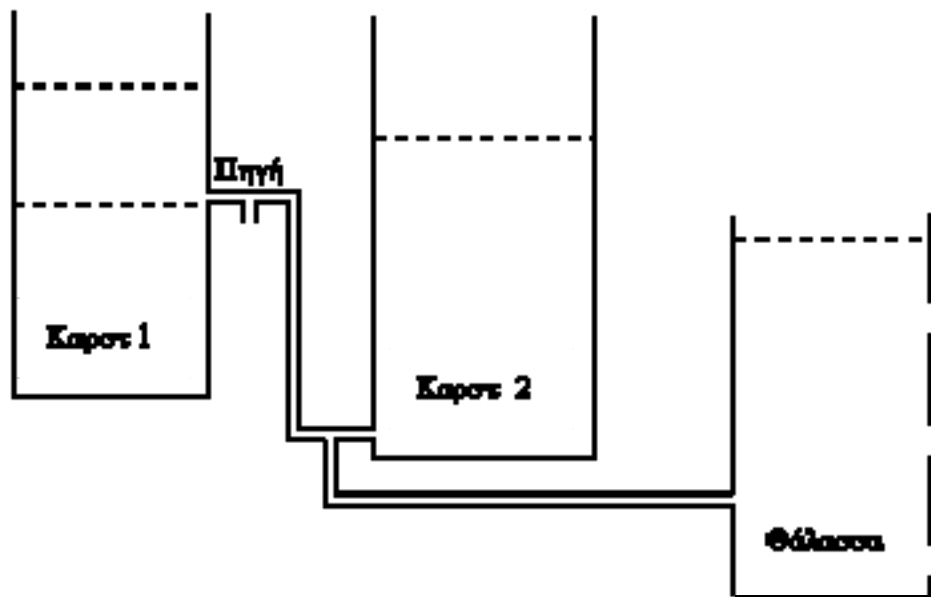
- Γρήγορη μείωση των συντελεστών αυτοσυσχέτισης της χρονοσειράς της ημερήσιας παροχής στην αρχή του διαγράμματος φανερώνει το γεγονός ότι η πηγή τροφοδοτείται από τις μεγάλους καρστικούς σχηματισμούς του καρστικού υδροφορέα, στον οποίο η ροή είναι γρήγορη και τυρβώδης. Μικρότερη μείωση της συνάρτησης στη συνέχεια δείχνει ότι στη μάζα του καρστικού υδροφορέα υπάρχει και

σημαντική ποσότητα μικρότερων κενών μέσα στα οποία φυλάσσεται ο μεγαλύτερος όγκος νερού και η ροή είναι στρωτή.

Η ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα εργασία του Lambrakis (2000) έχει σαν στόχο την μελέτη της ροής της πηγής του Αλμυρού και τη δυνατότητα βραχυπρόθεσμης προβλέψης των παροχών της πηγής. Τα χαρακτηριστικά του συστήματος παρουσιάζουν μη γραμμική χαοτική συμπεριφορά και συνεπώς απαιτήθηκε ενδελεχέστερη μελέτη των δυναμικών χαρακτηριστικών και αναλύθηκε με φασματικές μεθόδους χρονοσειρά ημερήσιων μέσων παροχών. Τέλος, για την πρόβλεψη των παροχών, εφαρμόστηκαν μη γραμμικές μέθοδοι και τεχνητά νευρωνικά δίκτυα.

Οι Panagopoulos et al. (2006) εφάρμοσαν στατιστική μέθοδο επεξεργασίας των χρονοσειρών της βροχόπτωσης, της απορροής της πηγής και των πιεζομετρικών φορτίων για τα δύο αντιπροσωπευτικά καρστικά συστήματα που υπάρχουν στον ελληνικό χώρο, την Τριφυλιά στην Πελοπόννησο και τον Αλμυρό του Ηρακλείου, Κρήτης. Τα αποτελέσματα για τον Αλμυρό, μετά από μεθόδους αυτοσυσχέτισης, ετεροσυσχέτισης, φασματικής πυκνότητας και άλλων, έδειξαν ότι η διαδικασία καρστικοποίησης στο σύστημα είναι πολύ πιο προχωρημένη σε αντίθεση με την Τριφυλιά και το καρστικό δίκτυο είναι πολύ καλύτερα οργανωμένο. Επιπρόσθετο συμπέρασμα που πρέπει να σημειωθεί είναι ότι στο σύστημα του Αλμυρού συνυπάρχουν δύο ροές, η ροή προερχόμενη από άμεση απόκριση από τη βροχόπτωση και η ροή βάσης προερχόμενη από τον υπόγειο υδροφόρα. Το καρστικό σύστημα του Αλμυρού εντάσσεται, τελικώς, σαν ενδιάμεση περίπτωση στις δύο ακραίες μορφές καρστικών συστημάτων που συναντώνται γενικά.

Οι Maramathas et al. (2003) προτείνουν και εφαρμόζουν τη χρήση μαθηματικού μοντέλου προσομοίωσης της περιοδικά υφάλμυρης πηγής του Αλμυρού. Παραδοχές του μοντέλου αποτελούν η ισορροπία μηχανικής ενέργειας και μάζας σε μια υδροδυναμική αναλογία, που ενσωματώνει αποτελεσματικούς αγωγούς και δεξαμενές. Βασική ιδέα του μοντέλου είναι η θεώρηση δύο δεξαμενών, μία για κάθε καρστικό υδροφόρα και μίας τρίτης που αντοπροσωπεύει τη θάλασσα. Ανάλογα με το υψόμετρο του νερού στην πρώτη δεξαμενή, επηρεάζεται η ποσότητα θαλάσσιου νερού που παροχετεύεται από την πηγή.



Σχήμα 1.4 Θεώρηση Μαραμαθά για τον τρόπο λειτουργίας του συστήματος

Δύο ταχύτητες «αδειάσματος» μπορούν να παρατηρηθούν κατά τη διάρκεια της αρχικής φάσης του συστήματος:

- Μεγάλη ταχύτητα, που αντιστοιχεί στο τμήμα του καρστ που αδειάζει γρήγορα και αποτελείται από λίγους αγωγούς μεγάλης διαμέτρου.
- Μικρή ταχύτητα, που αντιστοιχεί στο τμήμα του καρστ που αδειάζει αργά. και αποτελείται από πολλούς αγωγούς μικρότερης διαμέτρου.

Το μοντέλο προσομοιώνει το χρόνο σε σχέση με τα χλωριόντα και τη διαφοροποίηση του υδρογραφήματος της πηγής και μετατρέπει τα δεδομένα βροχόπτωσης της λεκάνης τροφοδοσίας στα υδρογραφήματα της πηγής. Στην εργασία χρησιμοποιούνται ημερήσια δεδομένα των ετών 1995-1997.

Βασικό συμπέρασμα της εργασίας είναι ότι μια αύξηση του υψομέτρου του νερού, στο σημείο εξόδου της πηγής, στα 26 m. θα εμπόδιζε πλήρως την εισροή θαλασσινού νερού. Οι απώλειες γλυκού νερού αποτελούν το 24% ολόκληρης της υδρολογικής περιόδου και 37% της περιόδου αδειάσματος.

Στην εργασία των Maramathas et al. (2006) γίνεται μαθηματική προσομοίωση της πηγής του Αλμυρού με το μοντέλο MODKARST, με αποτέλεσμα την εκτίμηση του μηχανισμού τροφοδοσίας της πηγής ώστε να είναι δυνατές παρεμβάσεις που

κατατείνουν στην δυνατότητα εκμετάλλευσης του υδάτινου δυναμικού της πηγής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΚΑΡΣΤΙΚΟΙ ΥΔΡΟΦΟΡΕΓΣ

2.1 Γενικά

2.2 Μηχανισμός της Καρστικής Διεργασίας

2.2.1. Η υδραυλική συμπεριφορά των καρστικών υδροφόρων οριζόντων

2.2.2. Υφαλμύρωση παράκτιων καρστικών υδροφόρων οριζόντων

2.2.3 Οι καρστικές πηγές και το υδρόγραμμά τους

2.2.4 Η εισαγωγή των δεδομένων στο πρότυπο

2.2.5 Υφάλμυρες Καρστικές Πηγές

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΚΑΡΣΤΙΚΟΙ ΥΔΡΟΦΟΡΕΓΣ

2.1 Γενικά

Χαρακτηριστικά του υδροφόρου ορίζοντα Διαδικασία δημιουργίας ασβεστολιθικών πετρωμάτων

Ο όρος καρστ περιγράφει γενικώς όλες τις γεωλογικές δομές που οφείλονται στο φαινόμενο της χημικής διάλυσης των ανθρακικών πετρωμάτων (ασβεστόλιθοι, δολομίτες) από ασθενές ανθρακικό οξύ, προερχόμενο από το νερό της βροχής και το διαλυμένο σ' αυτό διοξείδιο του άνθρακα, που προσλαμβάνει από το έδαφος και από τον αέρα.

Η όλη διαδικασία ονομάζεται καρστικοποίηση ενώ η λέξη "καρστ" προέρχεται από την περιοχή Kras της πρώην Γιουγκοσλαβίας που πρωτομελετήθηκε. Τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα μιας καρστικής περιοχής είναι: τα λιγοστά επιφανειακά νερά και οι ξηρές κοιλάδες, οι δολίνες, οι ουβάλες, οι καταβόθρες, τα ασβεστολιθικά πλακόστρωτα, οι αμαξοτροχιές, οι γλυφές, (επιφανειακό καρστ) οι μικροί ή μεγάλοι υπόγειοι αγωγοί απορροής υδάτων, τα βάραθρα και τα σπήλαια (υπόγειο καρστ). Πολλές φορές υπάρχει άμεση επικοινωνία του επιφανειακού με το υπόγειο καρστ.

Τα καρστικά πεδία, πέρα από όμορφα και ενδιαφέροντα τοπία, είναι πολύ σημαντικά για την υδροφορία μιας περιοχής. Τα ανθρακικά πετρώματα, εξ αιτίας της κατακερματισμένης μάζας τους είναι από τα πλέον υδατοπερατά. Μόνο ένα μικρό ποσοστό των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων ρέει επιφανειακά σε αυτά. Το νερό "τρυπώνει" στις ρωγμές του βράχου, μεγαλώνοντας τις συνεχώς και κυλάει προς τα κάτω μέχρι να συναντήσει - αν υπάρχει - ένα αδιαπέρατο πέτρωμα. Τότε συγκεντρώνεται και σχηματίζει υπόγειους υδροφόρους ορίζοντες. Οι πηγές δεν είναι παρά φυσικές δίοδοι εκροής των υδάτων αυτών και μπορεί να είναι είτε στην επιφάνεια του εδάφους ή υποθαλάσσιες στον πυθμένα των θαλασσών. Όπως είναι αναμενόμενο τέτοια συστήματα είναι εξαιρετικά ευάλωτα σε χημικούς ρύπους, π.χ. φυτοφάρμακα, που διαλύονται στο νερό και ρυπαίνουν τους υπόγειους υδροφορείς.

Για διάφορους φυσικοχημικούς λόγους η καρστικοποίηση στην επιφάνεια των υδροφόρων οριζόντων είναι πολύ έντονη αλλά κάτω από αυτή σταματάει εντελώς. Στην περίπτωση που δεν υπάρχει αδιαπέρατο υπόβαθρο, το νερό συνεχίζει την προς τα κάτω πορεία του μέχρι την επιφάνεια της θάλασσας. Κατά τη διάρκεια της τελευταίας παγετώδους περιόδου, 20-10 χιλιάδες χρόνια πριν, η στάθμη της θάλασσας στη Μεσόγειο είχε φθάσει ως και 120μ. χαμηλότερα. Έτσι η καρστικοποίηση έχει προχωρήσει αρκετά πιο βαθιά από τη σημερινή στάθμη της θάλασσας με αποτέλεσμα τώρα να διευκολύνεται η υδραυλική επικοινωνία μεταξύ γλυκού και θαλασσινού νερού και να επιταχύνεται η υφαλμύρωση των υδροφορέων.

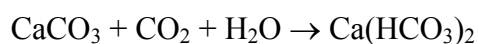
Γενικότερα, οι καρστικές πηγές είναι εκροές νερού μέσα από καρστικούς αγωγούς, που φτάνουν στην επιφάνεια του εδάφους ή του πυθμένα θάλασσας ή λίμνης. Πρόκειται, δηλαδή, για εξωκαρστικές εκδηλώσεις ενδοκαρστικών φαινομένων. Με άλλα λόγια, αποτελούν το σημείο εξόδου ή «σημείο εκφόρτισης» του νερού των υδρογεωλογικών λεκανών που αναπτύσσονται σε καρστικά πετρώματα.

Οι καρστικές λεκάνες σχηματίζονται σε ασβεστολιθικά πετρώματα τα οποία διαλύονται με τη διαδικασία της καρστικής αποσάθρωσης και διάβρωσης. Αυτή έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία αγωγών, συνήθως πάνω σε προϋπάρχουσες ασυνέχειες τεκτονικού χαρακτήρα του πετρώματος.

2.2 Μηχανισμός της Καρστικής Διεργασίας

Καρστική αποσάθρωση και διάβρωση

Πρόκειται για ιδιαίτερο τύπο αποσάθρωσης και διάβρωσης που αφορά τα ανθρακικά πετρώματα (ασβεστόλιθοι) και οφείλεται στη διαλυτική δράση του νερού της βροχής. Το CaCO_3 από το οποίο αποτελούνται κυρίως αυτά τα πετρώματα είναι αδιάλυτο στο καθαρό νερό, διαλύεται όμως σε νερό που περιέχει CO_2 , όπως είναι το νερό της βροχής, μέσω της μετατροπής του προηγούμενως σε ευδιάλυτο όξινο δισανθρακικό ασβέστιο κατά την αντίδραση:



Η διάλυση διευκολύνεται από την παρουσία ρωγμών στο πέτρωμα (ρήγματα, διακλάσεις) συνεχίζεται δε και στο βάθος σε όλη τη μάζα του πετρώματος καθώς με τη διάλυση ανοίγονται δίοδοι που μπορεί να οδηγούν ακόμη και μέχρι το τυχόν υποκείμενο των ασβεστολίθων αδιαπέρατο πέτρωμα ή αν υπάρχει υδροφόρος ορίζοντας μέχρι τον υδροφόρο ορίζοντα. Τα νερά του υδροφόρου ορίζοντα επίσης διαλύουν τον ασβεστόλιθο δημιουργώντας οριζόντιες πλευρικές στοές και σπήλαια.

Οι δημιουργούμενες με την παραπάνω διαδικασία διαβρωσιγενείς δομές ονομάζονται καρστικές δομές και έχουν ιδιαίτερη σημασία για τη διαίτα του νερού του υδροφόρου ορίζοντα που τυχόν αναπτύσσεται σε αυτού του είδους τα πετρώματα. Τις καρστικές δομές τις διακρίνουμε σε επιφανειακές και υπόγειες (Ψαριανός 1969). Οι επιφανειακές είναι: α) δακτυλογλυφές και αμαξοτροχιές: δικτυωτές ραβδώσεις (δακτυλογλυφές) ή βαθιές αύλακες (αμαξοτροχιές) που τις συναντάμε στην επιφάνεια του ασβεστολίθου, β) καρστικά φρέατα (σχ.2.2, 2.3): βάραθρα που ξεκινώντας από την επιφάνεια φθάνουν πολλές φορές σε μεγάλα βάθη μέσα στη μάζα του ασβεστολίθου συναντώντας μερικές φορές και το υπόγειο κάρσι, γ) δολίνες (σχ.2.4): κλειστές κυκλικές ή ελλειπτικές λεκάνες μικρών διαστάσεων, δ) ουβάλες (σχ. 2.5): ένωση πολλών δολινών και στ) πόλγες (σχ.2.6): μεγάλες καρστικές πεδιάδες (π.χ οροπέδιο Λασιθίου). Στις πόλγες αλλά και στις ουβάλες και στις μεγάλες δολίνες υπάρχουν καταβόθρες οι οποίες διοχετεύουν τα νερά των βροχών στον υδροφόρο ορίζοντα.

Οι υπόγειες καρστικές δομές είναι α) καταβόθρες (σχ.2.7): Ανοίγματα σε χαμηλά σημεία επιφανειακών λεκανών που έχουν προκύψει από τη διαλυτική δράση του νερού τα οποία προχωρούν στο εσωτερικό του πετρώματος και σχηματίζουν ένα σύστημα υπόγειων αγωγών λαβυρινθώδους μορφής, στοών και ενδεχομένως σπηλαίων και β) σπήλαια (σχ. 2.8): μεγάλες υπόγειες κοιλότητες οι οποίες στις περισσότερες περιπτώσεις επικοινωνούν με την επιφάνεια μέσω μικρών στομιών. Χαρακτηριστικές δομές των σπηλαίων είναι οι σταλακτίτες και οι σταλαγμίτες που σχηματίζονται από αποθέσεις CaCO_3 οι οποίες λαμβάνουν χώρα στα σπήλαια όταν το νερό που το μεταφέρει εν διαλύσει, εξατμίζεται ή χάνει το CO_2 λόγω της αναταραχής που υφίσταται κατά τη ροή του πάνω στην ανώμαλη επιφάνεια των πετρωμάτων.

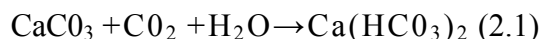
Στο σχήμα 2.9 φαίνονται τα γεωμορφολογικά στάδια από τα οποία περνάει μια περιοχή που δομείται από ασβεστόλιθο λόγω της καρστικής διάβρωσης.

Πρόκειται για έναν ιδιαίτερο τύπο αποσάθρωσης και διάβρωσης που συναντάται συχνά με τον όρο «διάβρωση» (corrosion), ο οποίος θεωρείται πιο επιτυχής και ορθός. Στην παρούσα εργασία μας ενδιαφέρει η διάβρωση ασβεστολιθικών πετρωμάτων, με το μηχανισμό μιας αμφίδρομης χημικής αντίδρασης, που δημιουργεί το ανθρακικό καρστ, σε σχετικά καθαρούς ασβεστόλιθους και δολομίτες.

Η διαδικασία διάβρωσης των ανθρακικών πετρωμάτων είναι μια συνεχής δυναμική διαδικασία, οφειλόμενη στη διαλυτική δράση του νερού της βροχής. Περιλαμβάνει πολυάριθμες φυσικές και χημικές επιμέρους διαδικασίες.

Η χημική σύσταση των ασβεστολίθων και δολομιτών είναι: Ασβεστόλιθος CaCO_3
Δολομίτης $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$

Τα παραπάνω συστατικά δεν είναι διαλυτά σε καθαρό νερό. Το νερό της βροχής, όμως, αναμιγνύεται με το διοξείδιο του άνθρακα CO_2 που βρίσκεται στον αέρα και στο έδαφος και, μέσω μιας σειράς αμφίδρομων αντιδράσεων, καταλήγουμε στη γνωστή εξίσωση αποσάθρωσης των ανθρακικών πετρωμάτων που είναι:



Το φαινόμενο διευκολύνει η παρουσία ρωγμών στο πέτρωμα (ρήγματα, διακλάσεις) και εκτείνεται σε όλη τη μάζα του πετρώματος. Αυτό συμβαίνει επειδή η διάβρωση ανοίγει αγωγούς που μπορεί να καταλήγουν ακόμη και στο τυχόν υποκείμενο αδιαπέρατο πέτρωμα ή, αν υπάρχει υδροφόρος ορίζοντας, στον υδροφόρο ορίζοντα.

Αποτέλεσμα της παραπάνω χημικής διαδικασίας είναι η δημιουργία διαβρωσιγενών δομών που ονομάζονται καρστικές δομές.

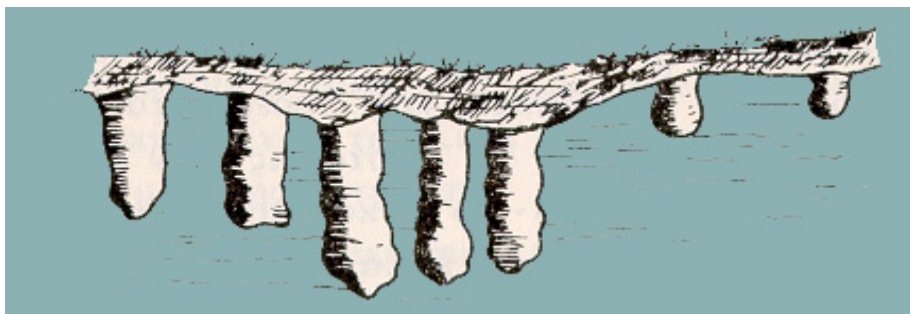
Καρστικοί υδροφόροι ορίζοντες

Είναι υδροφόροι ορίζοντες που αναπτύσσονται σε καρστικοποιημένα ασβεστολιθικά πετρώματα. Υπάρχουν δύο σχολές σκέψης (Καλλέργης, 1980α) όσον αφορά τη μορφή και τα χαρακτηριστικά των καρστικών υδροφόρων οριζόντων, η σχολή Grund και η σχολή Katzer (σχ.2.10). Ο A. Grund (1903) δέχεται το σχηματισμό ενός ενιαίου υπεδαφικού Ο A.Grund διατυπώνει τη θεωρία του για την ύπαρξη ενός ενιαίου, περισσότερο ή λιγότερο, υπεδαφικού υδροφόρου, ο οποίος αναπτύσσεται πάνω από το υποκείμενο του ασβεστολιθικού αδιαπέρατο πέτρωμα ή πάνω από τη στάθμη της θάλασσας, και ανυψώνεται προοδευτικά προς το εσωτερικό.

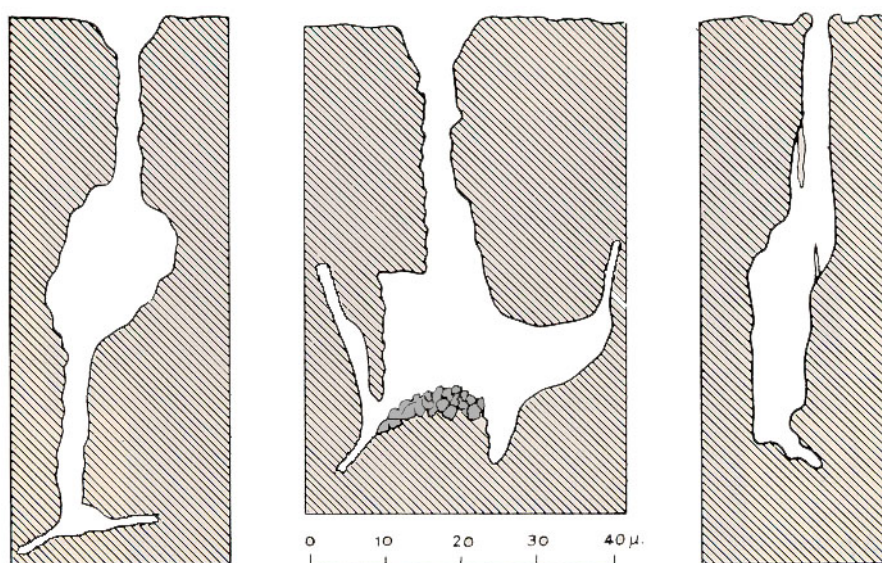
Ο F.Katzer υποστηρίζει την ύπαρξη μεμονωμένων υδάτινων ρευμάτων κατά μήκος αγωγών που συμπίπτουν με τεκτονικές ασυνέχειες του πετρώματος.

Οι αντιτιθέμενες απόψεις των A.Grund και F.Katzer κυριαρχούν μέχρι και το 1930, όταν ο W.Davis αναπτύσσει τη θεωρία του διπλού κύκλου, όπου οι υδροφόροι ορίζοντες κατά Grund και Katzer αποτελούν το αρχικό και τελικό στάδιο αντίστοιχα σε μια διαδικασία καρστογένεσης. Σύμφωνα με αυτήν δημιουργούνται καρστικές κοιλότητες κάτω από τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα με τη διαδικασία της διάλυσης οι οποίες αργότερα βρίσκονται στην ακόρεστη ζώνη, καθώς η στάθμη του υδροφόρου έχει κατέβει λόγω της δημιουργίας τους.

Τα τελευταία χρόνια έχουν πραγματοποιηθεί επιτυχείς προσπάθειες προσομοίωσης της εξέλιξης, στο χρόνο, ενός καρστικού υδροφόρου ορίζοντα, με τη χρήση μαθηματικών προσομοιώσεων. Τα μοντέλα αυτά λαμβάνουν υπόψη τους την κινητική του ανθρακικού ασβεστίου και υπολογίζουν κάθε φορά το ρυθμό διάλυσης του ασβεστολίθου και τη διερεύνηση, σε μήκος και σε διάμετρο, των ασυνεχειών του πετρώματος. Ξεκινώντας, λοιπόν, από μια αρχική κατάσταση όσον αφορά στις πρωτογενείς ασυνέχειες του πετρώματος και για δεδομένες οριακές συνθήκες, δίνουν, στη συνέχεια, τη μεταβολή βασικών υδραυλικών χαρακτηριστικών του καρστικού υδροφόρου ορίζοντα, καθώς και της θέσης και των γεωμετρικών χαρακτηριστικών της στάθμης του συναρτήσει του χρόνου.



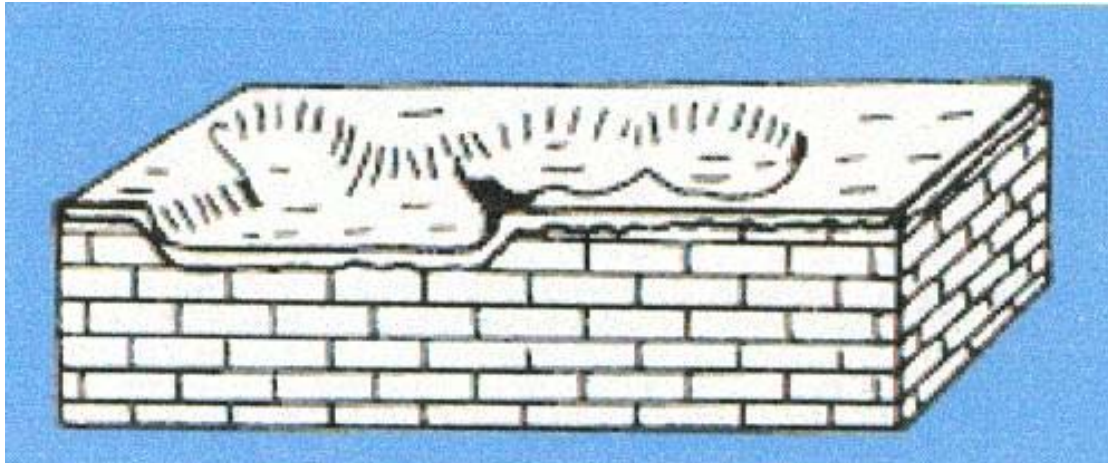
Σχήμα 2.1 Καρστικά φρέατα (Ψαριανός, 1969)



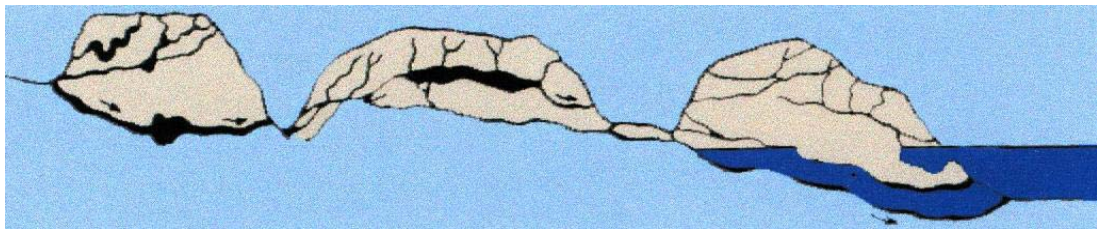
Σχήμα 2.2 Καρστικά Φρέατα (τομή) (Ψαριανός, 1969)



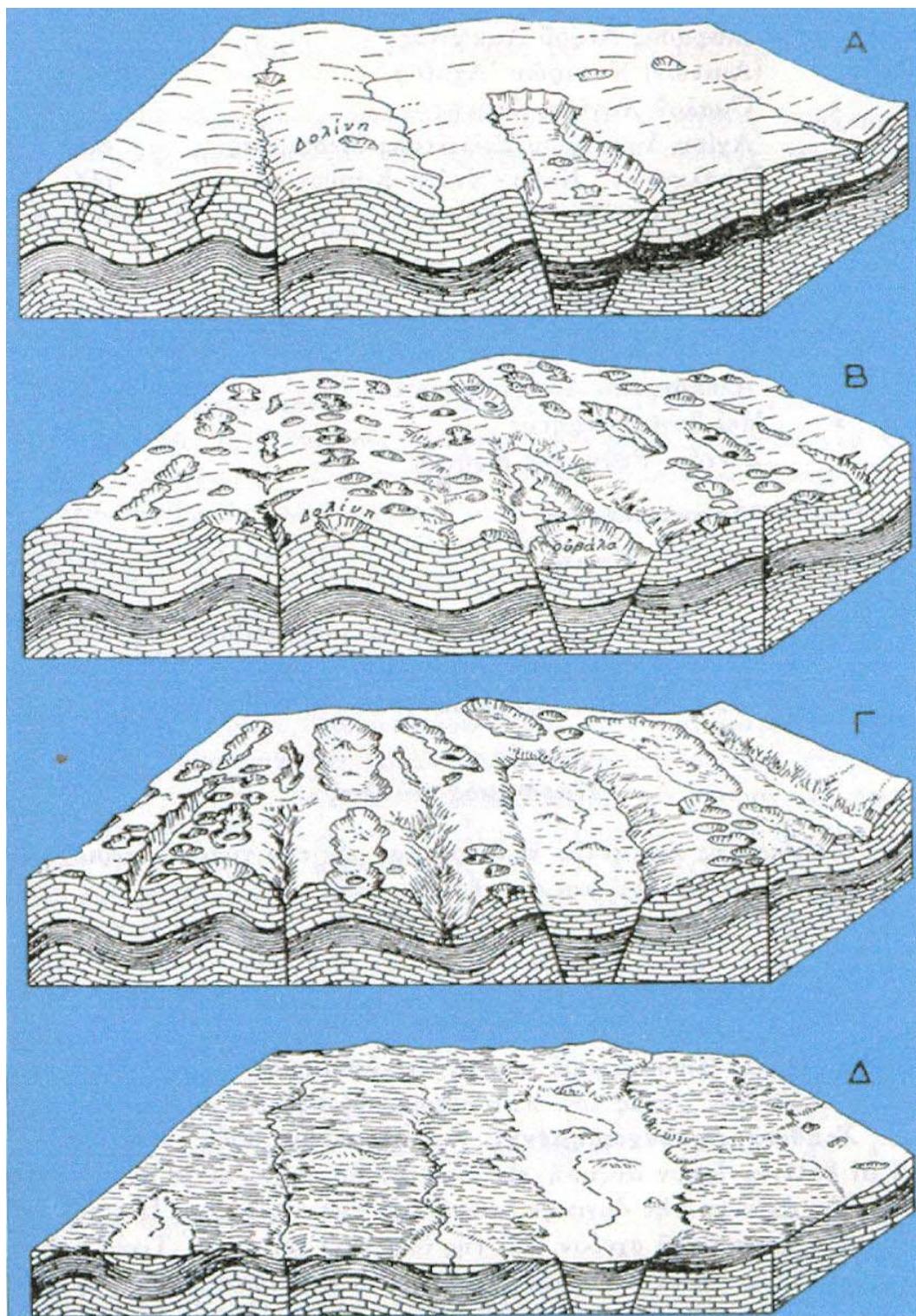
Σχήμα 2.3 Δολίνες (Μαραμαθάς, 2002)



Σχήμα 2.4 Ουβάλες (Μαραμαθάς, 2002)



Σχήμα 2.5 Καταβόθρες (Μαραμαθάς, 2002)



Στήμα 2.6 Ηεξέλιξη μιάς ασβεστολιθικής περιοχής, λόγω καρστικής διάβρωσης (Ψαριανός, 1969)



Σχήμα 2.7 Η πόλγη Planinsko της Σλοβενίας. Τα φρέατα οι δολίνες οι ουβάλες και οι πόλγες αποτελούν σημεία τροφοδοσίας ενός καρστικού υδροφόρου ορίζοντα.



Σχήμα 2.8 Το σπήλαιο των λιμνών στο Χελμό

Η γενική εξέλιξη που προκύπτει από αυτά τα μοντέλα είναι μια αύξηση, με την πάροδο του χρόνου, της υδραυλικής αγωγιμότητας του πετρώματος και της ανομοιομορφίας του, καθώς ξεκινώντας από έναν ομοιόμορφο και με μικρή περατότητα υδροφορέα στα αρχικά στάδια, καταλήγουμε μετά από μερικές χιλιάδες χρόνια σε έναν έντονα ανομοιόμορφο (καρστικοποιημένο) υδροφορέα που αποτελείται από ζώνες μεγάλης υραυλικής αγωγιμότητας μέσα σε ένα συνεχές μικρότερης υδραυλικής στάθμης του συναρτήσει του χρόνου.

Τα δίκτυα σωλήνων είναι πολυδαίδαλα, αναπτύσσονται κατά την ροή του νερού μεγάλες αντιστάσεις, οι ταχύτητες που αναπτύσσονται είναι πολύ μικρές και η ροή, παρά το πολυδαίδαλο των σωληνίσκων είναι κατ' αρχήν στρωτή. Όταν το έδαφος μπορεί να θεωρηθεί σαν πορώδες μέσο, τότε η ροή υπόγειου νερού στο έδαφος αντιμετωπίζεται με τη μεθοδολογία της ροής σε πορώδες μέσο.

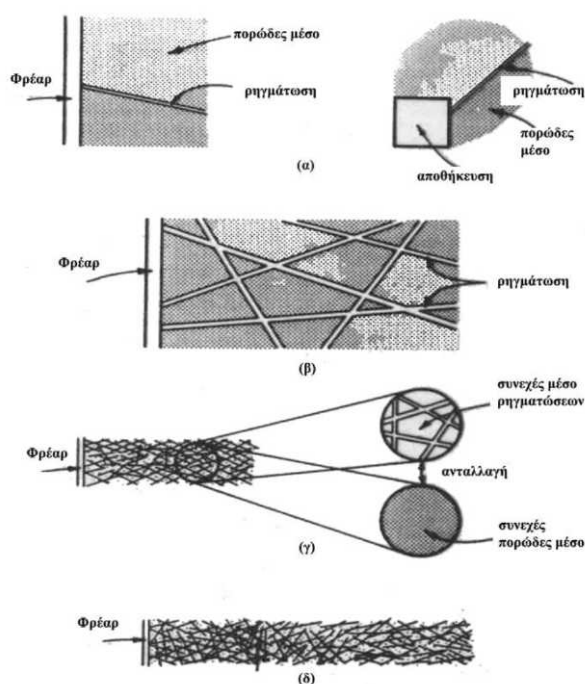
Ο ορισμός του πορώδους μέσου δεν είναι απλός. Σύμφωνα με τους Bear et al. (1968), ως πορώδες μέσο ορίζεται:

- a) Περιοχή του χώρου που καλύπτεται από ετερογενές ή πολυφασικό υλικό (σε στερεά, υγρή, αέρια φάση) στο οποίο μια τουλάχιστον φάση είναι συνεχώς σε πιθανόν παραμορφώσιμη στερεά κατάσταση.
- b) Η στερεά φάση είναι κατανεμημένη σε όλη την περιοχή του πορώδους μέσου. Τα διάκενα είναι στενά και έχουν σημαντική ειδική επιφάνεια.
- c) Σε κάθε θέση του πεδίου μπορεί να επιλεγεί αντιπροσωπευτικός στοιχειώδης όγκος αναφοράς, ο οποίος περιέχει στερεά ύλη (εδαφικό σκελετό) και διάκενα (πόρους). Το μέγεθος του αντιπροσωπευτικού στοιχειώδους όγκου αναφοράς είναι τέτοιο ώστε να έχουν στατιστικά έννοια παράμετροι οι οποίες απεικονίζουν τις κατανομές των πόρων και της στερεάς ύλης.
- d) Τουλάχιστον ορισμένα διάκενα είναι διασυνδεδεμένα μεταξύ τους.

Τα ρηγματωμένα πετρώματα και ασβεστολιθικοί σχηματισμοί μόνο υπό προϋποθέσεις μπορούν να θεωρηθούν πορώδη μέσα, επειδή τα ρήγματα δυνατόν να

έχουν σημαντικό μέγεθος και να απέχουν αρκετά μεταξύ τους. Συνεπώς όλες οι μεθοδολογίες που έχουν αναπτυχθεί για τα πορώδη μέσα δεν ισχύουν πάντοτε.

Η θεώρηση ενός εδαφικού σχηματισμού σαν πορώδους μέσου είναι θέμα κλίμακας. Όταν τα μεγέθη και οι αποστάσεις των ρηγμάτων είναι συγκρίσιμα με την κλίμακα του προβλήματος δεν μπορεί να εφαρμοστεί η μεθοδολογία του απλού πορώδους μέσου και εφαρμόζονται άλλες μέθοδοι. Οι κλίμακες του προβλήματος για



Σχήμα 2.9 Κλίμακες του προβλήματος για ρηγματωμένους υδροφορείς (Νάνου-Γιάνναρου Παπαθανασιάδης)

ρηγματωμένους υδροφορείς απεικονίζονται στο Σχήμα 2.9 Σε πολύ κοντινά πεδία ροής είναι απαραίτητη η πλήρης γνώση της γεωμετρίας των ρηγμάτων και γίνεται ακριβής επίλυση (π.χ. ύπαρξη συγκεκριμένων ρηγμάτων κοντά σε φρέαρ, περίπτωση α). Σε κοντινά πεδία ροής, στα οποία δεν είναι δυνατή η πλήρης γνώση των ρηγμάτων, εφαρμόζονται στατιστικές μέθοδοι (περίπτωση β). Σε μακρινά πεδία ροής εφαρμόζονται πιο σύνθετες μεθοδολογίες, όπως είναι η μέθοδος του διπλού πορώδους (περίπτωση γ). Μόνο σε πολύ μακρινά πεδία ροής ο υδροφορέας μπορεί να θεωρηθεί πορώδες μέσο (περίπτωση δ). Ευτυχώς η ονομαζόμενη διαχειριστική κλίμακα μπορεί να θεωρηθεί συνήθως σαν περίπτωση δ.

Στα πορώδη μέσα η λεπτομερειακή περιγραφή της ροής - μικροσκοπική θεώρηση - με βάση τις εξισώσεις Navier - Stokes είναι πρακτικά αδύνατη, λόγω της αδυναμίας ακριβούς μαθηματικής περιγραφής της γεωμετρίας της ροής. Έτσι είναι δυνατή μόνο η μακροσκοπική εξέταση του προβλήματος ροής και η χρησιμοποίηση εμπειρικών νόμων, οι οποίοι θεωρούν κάποια υποθετική μέση ροή που πραγματοποιείται σε ένα ιδεατό πορώδες μέσο που υποκαθιστά τον πραγματικό υδροφορέα. Άλλωστε στην πράξη δεν ενδιαφέρει το λεπτομερές πεδίο των πραγματικών ταχυτήτων, αλλά αρκεί η εκτίμηση κάποιας παροχής του νερού, κατάλληλα διατυπωμένης, που περνάει από μια δοσμένη επιφάνεια του πορώδους μέσου.

Στο πορώδες μέσο γίνεται η παραδοχή του συνεχούς μέσου, κλασική προσέγγιση σε πολλούς κλάδους της φυσικής (π.χ. ρευστομηχανική). Συνεπώς χρησιμοποιώντας την ννοια του αντιπροσωπευτικού στοιχειώδους όγκου, το πραγματικό πορώδες μέσο αντικαθίσταται από ένα άλλο ιδεατό συνεχές μέσο στο οποίο μπορούν πλήρως να καθορισθούν τιμές όλων των ιδιοτήτων του σε κάθε μαθηματικό σημείο του πεδίου ροής.

Κατά τα γνωστά από τη Ρευστομηχανική, για την επίλυση κάποιας ροής πρέπει να διατυπωθούν αφενός η αρχή διατήρησης μάζας, με την μορφή της εξίσωσης συνέχειας και αφετέρου ο δεύτερος νόμος του Νεύτωνα, διατυπωμένος με τις εξισώσεις Navier-Stokes. Επειδή η χρήση των εξισώσεων Navier-Stokes δεν είναι δυνατή λόγω του πολύπλοκου της ροής, αντί αυτών, χρησιμοποιείται ο γνωστός εμπειρικός νόμος του Darcy.

Ο νόμος αυτός συσχετίζει κινηματικά μεγέθη, δηλαδή παροχή ή ταχύτητα, με την κλίση της γραμμής ενέργειας. Στις ροές σε πορώδες μέσο, εφ' όσον οι ταχύτητες είναι πολύ μικρές, τα ύψη κινητικής ενέργειας $v^2/2g$ είναι ακόμα μικρότερα και η γραμμή ενέργειας συμπίπτει με την πιεζομετρική γραμμή. Στο νόμο αυτό δεν υπεισέρχονται οι πραγματικές υδροδυναμικές ταχύτητες, αλλά κάποιες μέσες ταχύτητες, που παλαιότερα ονομάζονταν ταχύτητες Darcy και σήμερα ειδικές παροχές (παροχές ανα μονάδα επιφάνειας). Η συνεκτικότητα, σαν μέγεθος εκφρασμένο μέσω του συντελεστή συνεκτικότητας μ , δεν υπεισέρχεται άμεσα στο νόμο. Ο νόμος αυτός διατυπώνει απολύτως ικανοποιητικά το πρόβλημα ροής σε πορώδες μέσο και μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελεί "μακροσκοπικό στατιστικό ισοδύναμο των εξισώσεων Navier - Stokes".

Το 1856 ο Γάλλος μηχανικός Henry Darcy, ασχολούμενος με τις πηγές της πόλης Dijon της Γαλλίας, μελέτησε τη ροή νερού σε κατακόρυφα ομογενή φίλτρα άμμου. Για τα πειράματά του χρησιμοποίησε ένα κατακόρυφο σωλήνα με εμβαδόν διατομής E γεμάτο με άμμο, όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 2.10. Από αυτήν την πειραματική έρευνα συμπεράνε ότι η παροχή της ροής Q είναι:

$$Q = KE(h_1 - h_2)/L$$

Ο συντελεστής αναλογίας K ονομάζεται (σύγχρονη ονομασία) υδραυλική αγωγιμότητα, ή (παλαιότερη ονομασία) συντελεστής διαπερατότητας, έχει διαστάσεις ταχύτητας και εξαρτάται όχι μόνο από τη φύση του πορώδους μέσου αλλά και από τις ιδιότητες του ρευστού.

Τα ύψη h_1 και h_2 είναι τα πιεζομετρικά ύψη που εκφράζουν τα αθροίσματα $h_{pzfi} = p/\gamma$ ανά μονάδα βάρους ρέοντος ρευστού, όπου p η πίεση και γ το ειδικό βάρος του νερού. Ο λόγος $(h_1 - h_2)/L$ είναι η λεγόμενη υδραυλική κλίση και συμβολίζεται με J , άρα:

$$J = h_1 - h_2/L \quad (2.3)$$

Ο νόμος του Darcy εκφράζει την απώλεια ενέργειας του νερού λόγω τριβών κατά την κίνηση του σε ένα πορώδες μέσο, σαν συνάρτηση της πρώτης δύναμης της ταχύτητας.

Είναι δηλαδή ένας γραμμικός νόμος. Για την περίπτωση μονοδιάστατης ροής σε ένα ομογενές και ισότροπο πορώδες μέσο ο νόμος του Darcy δίνεται από τη σχέση: $V = KJ = K(\Phi_1 - \Phi_2)/L$, όπου $V = q/E$: η ταχύτητα διήθησης του νερού, K : η περατότητα του μέσου και $J = (\Phi_1 - \Phi_2)/L$: η υδραυλική κλίση (απώλεια φορτίου ανά μονάδα μήκους) με $\Phi = z + p/\gamma$, όπου z : το υψόμετρο, p : η πίεση και γ : το ειδικό βάρος του νερού (Bear 1979). Η ταχύτητα διήθησης (ταχύτητα κατά Darcy) είναι πολύ μικρότερη από την πραγματική ταχύτητα των σωματιδίων του νερού καθώς αφ' ενός μεν θεωρείται ενεργή όλη η επιφάνεια E ενώ μεγάλο μέρος της καταλαμβάνεται από τη στερεά φάση, αφ' ετέρου δε δεν λαμβάνεται υπ' όψιν η πραγματική τεθλασμένη τροχιά των σωματιδίων του νερού ανάμεσα στους κόκκους της στερεάς φάσης.

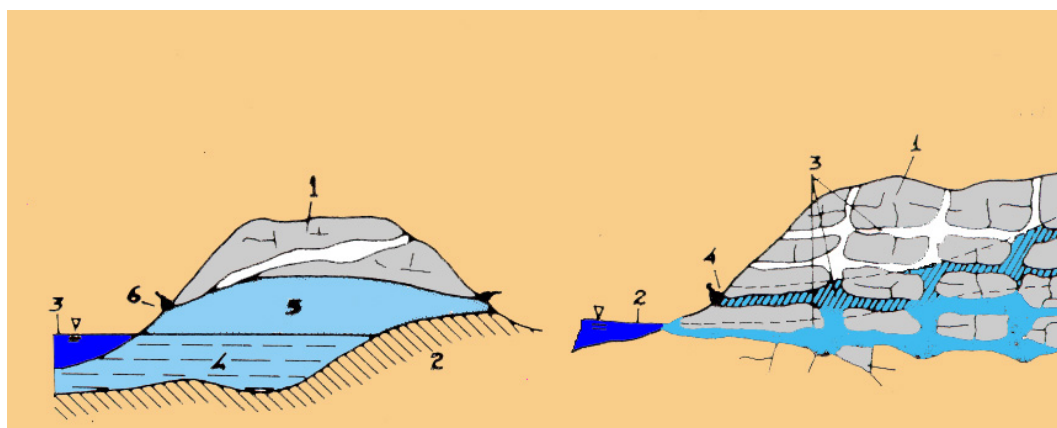
Έχει αποδειχθεί ότι ο νόμος του Darcy ισχύει σε μια στενή περιοχή στρωτής ροής που προσδιορίζεται από αριθμούς Reynolds μεταξύ 1 και 10. Αυτό σημαίνει ότι οι απώλειες ενέργειας του νερού παύουν να είναι συνάρτηση της πρώτης δύναμης της ταχύτητας για ροές διήθησης με αριθμούς Reynolds μεγαλύτερους του 10. Παύει δηλαδή από ενεργειακή άποψη μία ροή διήθησης με αριθμό Reynolds μεγαλύτερο του 10 να συμπεριφέρεται σαν στρωτή ροή και αρχίζει να προσεγγίζει την τυρβώδη. Όταν ο αριθμός Reynolds γίνει μεγαλύτερος από 100 τότε οι απώλειες ενέργειας γίνονται ανάλογες του τετραγώνου της ταχύτητας και η ροή χαρακτηρίζεται πλέον ως τυρβώδης.

Συμπερασματικά, η ροή σε ένα καρστικό υδροφόρο θα πρέπει να θεωρείται τυρβώδης και βέβαια μη μόνιμη καθώς παρατηρούνται μεγάλες αυξομειώσεις στη στάθμη του ανάλογα με την τροφοδοσία του από το νερό της βροχής.

Καρστικοί υδροφόροι ορίζοντες

Είναι υδροφόροι ορίζοντες που αναπτύσσονται σε καρστικοποιημένα ασβεστολιθικά πετρώματα. Υπάρχουν δύο σχολές σκέψης (Καλλέργης 1980α) όσον αφορά τη μορφή και τα χαρακτηριστικά των καρστικών υδροφόρων οριζόντων, η σχολή Grund και η σχολή Katzer

Ο Grund (1903) δέχεται το σχηματισμό ενός ενιαίου υπεδάφικου



Σχήμα 2.10 Θεωρίες Grund και Katzer (M. Sweeting, 1972) από Γ. Καλλέργη 1980α

Θεωρία Grund

1. Ασβεστόλιθος

Θεωρία Katzer

1. Ασβεστόλιθος

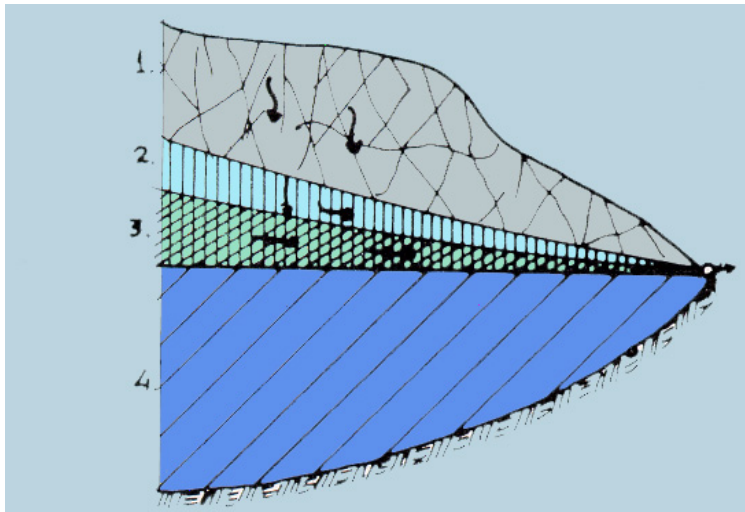
- | | |
|--------------------------|---------------------|
| 2. Υποκείμενο αδιαπέρατο | 2. Θάλασσα |
| 3. Θάλασσα | 3. Καρστικοί αγωγοί |
| 4. Υπόγειο νερό | 4. Καρστική πηγή |
| 5. Καρστικό νερό | |
| 6. Καρστική πηγή | |

Μία άλλη έννοια γύρω από την οποία έχουν διατυπωθεί πολλές διαφορετικές απόψεις είναι η έννοια του επιπέδου βάσεως.

Γίνεται δεκτός τουλάχιστον από τους ερευνητές που ασχολούνται με την εφαρμοσμένη έρευνα, ορισμός που αναφέρει σαν επίπεδο βάσεως την ‘επιφάνεια’ εκείνη η οποία αποτελεί το κατώτερο όριο ενός καρστικού υδροφόρου συστήματος που προσεγγίζει το μοντέλο του Grund.

Σε κάθε καρστικό υδροφόρο ορίζοντα διακρίνονται, κατά την κατακόρυφη έννοια, τέσσερις ζώνες (Mijatovic-Bakic, 1967) (σχ.1.11):

- Η ζώνη αερισμού ή ακόρεστη ζώνη, όπου επικρατεί η κατακόρυφη κίνηση του νερού (κατείσδυση).
- 2.Η ζώνη εποχικής διακύμανσης, μεταβατική ζώνη που ανάλογα με την εποχή του χρόνου μεταπίπτει είτε στην ζώνη κορεσμού είτε στην προηγούμενη ζώνη αερισμού.
- 3.Η ζώνη ολοκληρωτικού κορεσμού, ζώνη στην οποία υπάρχει νερό όλον τον χρόνο και επικρατεί η οριζόντια κίνηση του νερού και,
- 4,Η ζώνη βαθιάς κυκλοφορίας, ζώνη στην οποία το νερό δεν επηρεάζεται από κανένα δίκτυο αποστράγγισης. Το νερό εδώ χαρακτηρίζεται από αργούς ρυθμούς ανανέωσης



Σχήμα 2.11 Ζώνες ενός καρστικού υδροφόρου ορίζοντα (Mijatovic-Bakic, 1967) από Γ. (Καλλέργη, 1980^α)

2.2.1. Η υδραυλική συμπεριφορά των καρστικών υδροφόρων οριζόντων

Από υδραυλική άποψη τα καρστικά μέσα χαρακτηρίζονται από έντονη ασυνέχεια, ετερογένεια και ανισοτροπία στην κλίμακα του δείγματος. Στην κλίμακα του συστήματος σε ορισμένες περιπτώσεις αυτή η ανισοτροπία σε κάποιο βαθμό εξαλείφεται αν το πέτρωμα χαρακτηρίζεται μόνο από μικροασυνέχειες ενώ σε άλλες διατηρείται αν εκτός από μικροασυνέχειες στο πέτρωμα υπάρχουν και μακροασυνέχειες. Ο βαθμός ανισοτροπίας στην κλίμακα του συστήματος αποτελεί κριτήριο, για τους περισσότερους ερευνητές, ισχύος ή όχι του νόμου του Darcy με δεδομένη τη δυσκολία υπολογισμού του αριθμού Reynolds.

Καρστικοί Υδροφορείς

Καρστικός υδροφορέας ονομάζεται ένας όγκος διαλυτού πετρώματος στον οποίο η ροή γίνεται κυρίως μέσα στα κανάλια διάλυσης, των οποίων το μέγεθος και η κατεύθυνση είναι ακανόνιστη. Η ροή μπορεί να είναι γραμμική, τυρβώδης ή/και να έχει τα χαρακτηριστικά ροής σε ανοιχτό αγωγό. Η κίνηση του υπόγειου νερού μπορεί να προκαλέσει διάλυση του ασβεστόλιθου γύρω από τα υπάρχοντα κενά, με αποτέλεσμα την αύξηση του ανοίγματος τους και της υδραυλικής αγωγιμότητας του υδροφορέα. Όσον αφορά τα ρήγματα, λόγω της καρστικοποίησης αρκετά από αυτά

μεγεθύνονται και μετατρέπονται σε κανάλια. Μέσο της διαδικασίας της διάλυσης, η δομή του καρστικοποιημένου υδροφορέα και τα υδραυλικά χαρακτηριστικά του μεταβάλλονται τόσο χωρικά όσο και χρονικά, με συνέπεια οι υδροφορείς αυτοί να χαρακτηρίζονται από μεγάλη ετερογένεια και ανισοτροπία (Καλλέργης 2001 και Ζαχαριάδη- Παπαδοπούλου- Καρατζάς «Μελέτη του φαινομένου της Υφαλμύρινης σε καρστικοποιημένες παράκτιες περιοχές»)

Παράκτιοι Καρστικοί Υδροφορείς

2.2.2. Υφαλμύρωση παράκτιων καρστικών υδροφόρων οριζόντων

Αν ο ασβεστόλιθος-υδροφορέας ενός καρστικού υδροφόρου ορίζοντα έρχεται σε επαφή με τη θάλασσα τότε ο καρστικός υδροφόρος ορίζοντας υφαλμυρώνεται. Γενικά, στην περίπτωση που ο υδροφορέας ενός οποιουδήποτε υδροφόρου ορίζοντα εφάπτεται με την θάλασσα το γλυκό νερό επιπλέει πάνω στο θαλασσινό λόγω διαφοράς πυκνότητας. Κατά την ισορροπία, η θέση της διεπιφάνειας γλυκού-αλμυρού νερού σε ένα παράκτιο υδροφόρο ορίζοντα τύπου Darcy καθορίζεται από το νόμο Ghyben-Herzberg (1889-1901) ο οποίος για τον υπολογισμό αυτόν λαμβάνει υπ' όψιν του τη σχέση πυκνοτήτων γλυκού-θαλασσινού νερού. Πιο συγκεκριμένα η θέση της διεπιφάνειας δίνεται από τη σχέση: $H_s = \frac{\gamma}{\gamma_s - \gamma} H$, όπου H_s : το βάθος της

διεπιφάνειας κάτω από τη στάθμη της θάλασσας, H : το ύψος της στάθμης του γλυκού νερού πάνω από την επιφάνεια της θάλασσας, γ_s : το ειδικό βάρος του θαλασσινού νερού, και γ : το ειδικό βάρος του γλυκού νερού. Στους υδροφόρους ορίζοντες που αναπτύσσονται σε μικροπερατά (πορώδη) πετρώματα στην πραγματικότητα λόγω της δράσης της διασποράς - διάχυσης η επαφή γλυκού-αλμυρού νερού δεν είναι διακριτή διεπιφάνεια αλλά ζώνη με υφάλμυρο νερό το πάχος της οποίας εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του υδροφόρου ορίζοντα και τη γεωλογία της περιοχής.

Στους καρστικούς υδροφόρους ορίζοντες συναντάται επίσης μεταβατική ζώνη υφάλμυρου νερού (σχ7) η οποία όμως έχει πολύ μεγαλύτερο πάχος ενώ κοντά στην ακτογραμμή είναι δυνατόν να βρίσκεται και σε θετικά υψόμετρα. Εξαιτίας αυτού του γεγονότος πολλές από τις παράκτιες πηγές που βρίσκονται σε μικρό υψόμετρο δίνουν

υφάλμυρο νερό. Ο μηχανισμός δημιουργίας της μεταβατικής ζώνης στα καρστικά υδροφόρα είναι διαφορετικός από τον αντίστοιχο στα πορώδη υδροφόρα που περιγράφηκε προηγουμένως. Οι λόγοι σχηματισμού της στα υδροφόρα αυτά έχουν σχέση περισσότερο με την υδροδυναμική του συστήματος και λιγότερο με φαινόμενα διασποράς-διάχυσης.

Αυτό οφείλεται στη φύση των καρστικών υδροφορέων που είναι ένα άθροισμα από μικρο και μάκρο-αγωγούς ποικίλου σχήματος και μεγέθους που σχηματίζουν σχετικά ανεξάρτητα ή και πλήρως ανεξάρτητα υδραυλικά σύνολα τα οποία στην περίπτωση ύπαρξης πηγής εκφορτίζονται στον κεντρικό αγωγό εξόδου που οδηγεί το νερό στο στόμιο της πηγής. (Groves, C.G., Howard, A.D., 1994a).

2.2.3 Οι καρστικές πηγές και το υδρόγραμμά τους

Οι καρστικές πηγές αποτελούν, όπως έχει ήδη αναφερθεί, το σημείο εκφόρτισης των καρστικών υδροφόρων οριζόντων. Τα χαρακτηριστικά μιας καρστικής πηγής αλλά κυρίως του καρστικού υδροφόρου ορίζονται που την τροφοδοτεί αποτυπώνονται στο υδρόγραμμά της. Το υδρόγραμμα μιας πηγής είναι η γραφική παράσταση της συνάρτησης $Q=F(t)$, δηλαδή της παροχής της σε σχέση με το χρόνο.

Η παρούσα εργασία βασίστηκε στην διατριβή του Δρ. Μαραμαθά Α. που είχε μία εξ ολοκλήρου πρωτότυπη ιδέα, που είναι η εξομοίωση του καρστικού συστήματος μια υφάλμυρης καρστικής πηγής με ένα σύστημα τριών δεξαμενών κατάλληλα συνδεδεμένων εκ των οποίων οι δύο έχουν πεπερασμένο μέγεθος και αντιστοιχούν στον καρστικό υδροφορέα ενώ η τρίτη θεωρείται ότι έχει άπειρο μέγεθος και αντιστοιχεί στη θάλασσα. Το άθροισμα των παροχών εκροής των τριών δεξαμενών δίνει την παροχή της πηγής ενώ από την επίλυση του προβλήματος ανάμιξης του γλυκού νερού των δεξαμενών του καρστικού υδροφορέα με το θαλασσινό νερό της δεξαμενής της θάλασσας προκύπτει η περιεκτικότητα του νερού της πηγής σε χλωριόντα. Πάνω σ' αυτή την ιδέα στηρίζεται η ανάπτυξη ενός μαθηματικού προτύπου το οποίο υπολογίζει τις παροχές εκροής των δεξαμενών από την εφαρμογή των ισοζυγίων μάζας και ενέργειας στις δεξαμενές του καρστικού υδροφορέα και του ισοζυγίου ενέργειας στη δεξαμενή της θάλασσας. Για τον προσδιορισμό των ισοζυγίων χρησιμοποιήθηκαν οι μακροσκοπικές εξισώσεις συνέχειας και διατήρησης της μηχανικής ενέργειας.

2.2.4 Η εισαγωγή των δεδομένων στο πρότυπο

Τα δεδομένα που εισάγονται στο πρότυπο είναι οι βροχοπτώσεις στην λεκάνη τροφοδοσίας της πηγής όπως αυτές καταγράφονται από τα υπάρχοντα βροχόμετρα στην περιοχή. Στους υπολογισμούς όμως για την προσομοίωση του υδρογράμματος και της καμπύλης χλωριόντων της πηγής δεν υπεισέρχονται οι βροχοπτώσεις αλλά η ενεργός κατείσδυση, το τμήμα δηλαδή εκείνο των βροχοπτώσεων, που διαπερνώντας τα στρώματα του υπεδάφους φτάνει μέχρι τον καρστικό υδροφόρο ορίζοντα και τον τροφοδοτεί. Στις επόμενες παραγράφους αναλύεται η μέθοδος που ακολουθείται από το πρότυπο για τον υπολογισμό της ενεργού κατείσδυσης από τις βροχοπτώσεις.

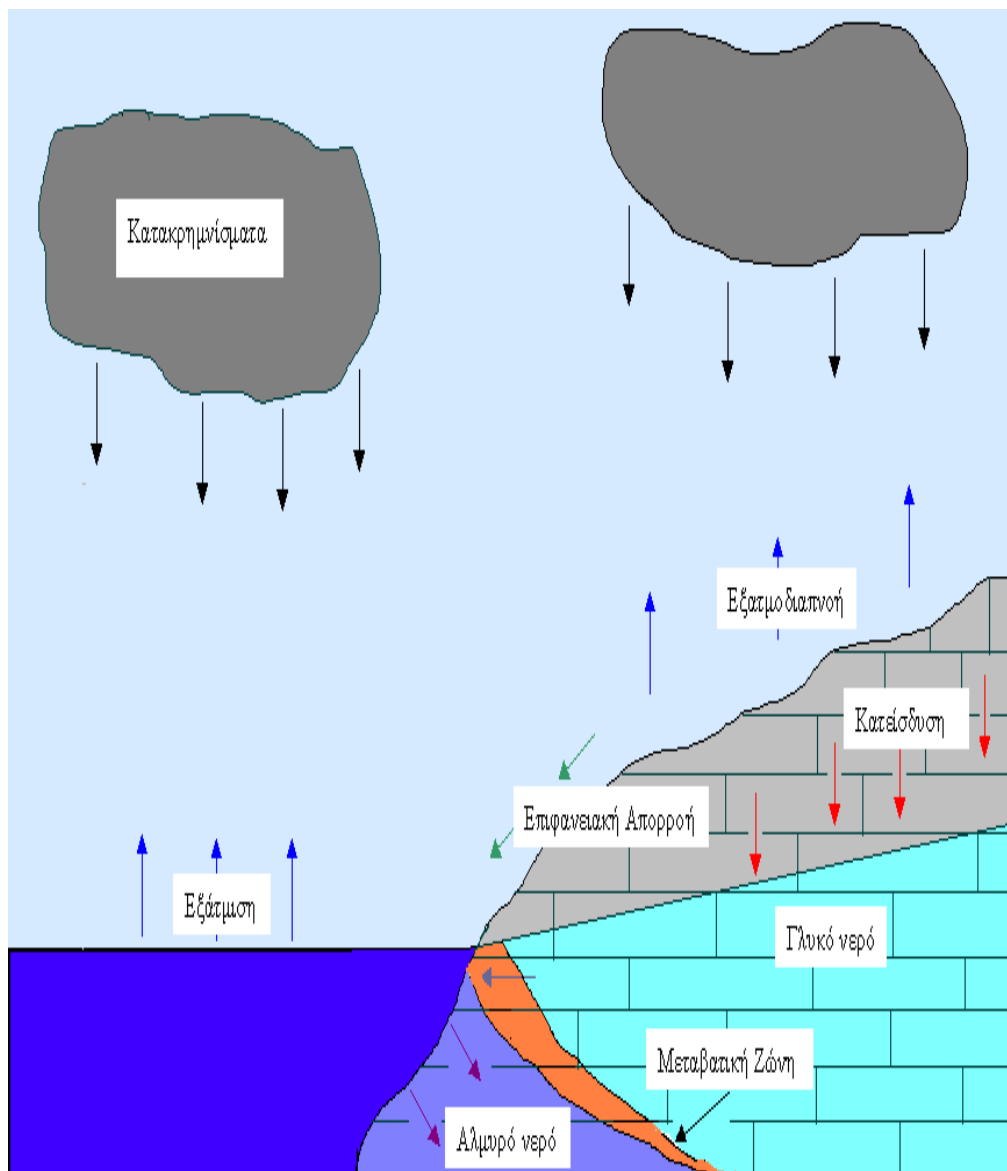
Ο κύκλος του νερού στη φύση (υδρολογικός κύκλος)

Το νερό δεν παραμένει στάσιμο στα διάφορα περιβάλλοντα (θάλασσες, λίμνες, ποτάμια, ατμόσφαιρα, εδάφη, υπέδαφος) αλλά κινείται συνεχώς και αιωνίως από περιβάλλον σε περιβάλλον διαγράφοντας τον λεγόμενο κύκλο του νερού στη φύση (σχ. 2.4). Έτσι νερό από την ατμόσφαιρα που έχει προέλθει από την εξάτμιση κυρίως των θαλασσών αλλά των εσωτερικών νερών καθώς και από τη διαπνοή των φυτών, μέσω των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων (βροχή, χιόνι, χαλάζι) φθάνει στην επιφάνεια της γης. Το νερό αυτό φθάνοντας στην επιφάνεια της γης έχει τη δυνατότητα να ακολουθήσει τρεις δρόμους.

- a. Να ρεύσει επιφανειακά και μέσω των ποταμοχειμάρων συστημάτων να καταλήξει στις θάλασσες. Το μέρος αυτό του νερού ονομάζεται επιφανειακή απορροή.
- b. Να επιστρέψει ξανά στην ατμόσφαιρα μέσω της εξάτμισης από την επιφάνεια του εδάφους, ή μέσω της διαπνοής των φυτών. Αυτή η ποσότητα που επιστρέφει ονομάζεται πραγματική εξατμισοδιαπνοή σε αντίθεση με την δυνητική εξατμισοδιαπνοή που είναι το μέγιστο της εξατμισοδιαπνοής για δεδομένες καιρικές συνθήκες. Η πραγματική εξατμισοδιαπνοή συμπίπτει με την δυνητική σε συνθήκες πλήρους κορεσμού του υπεδάφους και της επιφάνειας του εδάφους.
- c. Να διαπεράσει την επιφάνεια του εδάφους και αφού συμπληρώσει το έλλειμμα υγρασίας των στρωμάτων του υπεδάφους να εμπλουτίσει τους υδροφόρους ορίζοντες το νερό των οποίων καταλήγει επίσης στις θάλασσες. Η συνολική ποσότητα του νερού που διηθείται από την επιφάνεια του εδάφους ονομάζεται ολική

κατείσδυση ενώ το τμήμα της ολικής κατείσδυσης που προστίθεται στο υπόγειο νερό ονομάζεται ενεργός κατείσδυση.

Τα πιο πάνω συνοψίζονται στην εξίσωση: $P = A + ET + I$ όπου το P αντιπροσωπεύει τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα, το I την ολική κατείσδυση, το ET την πραγματική εξατμισοδιαπνοή, και το A την επιφανειακή απορροή. Οι παράμετροι αυτές ονομάζονται και φάσεις του υδρολογικού ισοζυγίου και μπορούν να εκφραστούν είτε σε ύψος βροχής (mm), είτε σαν συντελεστής επί τοις εκατό με βάση τα κατακρημνίσματα, είτε και σε όγκο νερού (m^3) αν αναφερόμαστε σε συγκεκριμένη περιοχή ορισμένου εμβαδού.



Σχήμα 2.12Ο κύκλος του νερού στη φύση

Ο υπολογισμός του υδρολογικού ισοζυγίου μιας περιοχής αποτελεί τη βάση πάνω στην οποία στηρίζονται οι υδρολογικές και υδρογεωλογικές μελέτες αυτής της περιοχής. Οι διάφορες φάσεις του υδρολογικού ισοζυγίου υπολογίζονται είτε άμεσα (με μετρήσεις από κατάλληλα όργανα), είτε έμμεσα με τη χρήση διαφόρων εμπειρικών συνήθως τύπων ή και υπολογιστικών μεθόδων ή ακόμα και της ίδιας της εξίσωσης του υδρολογικού ισοζυγίου. Το P υπολογίζεται άμεσα με τη χρήση βροχόμετρων. Το A υπολογίζεται είτε άμεσα, με τη μέτρηση με ειδικά όργανα (μυλίσκοι) της παροχής των ποτάμιων συστημάτων της περιοχής και ανάλυση των υδρογραμμάτων που προκύπτουν, προκειμένου να γίνει κατανομή της επιφανειακής απορροής ανά βροχόπτωση, είτε έμμεσα από εμπειρικούς τύπους. Το ET υπολογίζεται συνήθως έμμεσα με τη χρήση είτε εμπειρικών, είτε ντετερμινιστικών μαθηματικών τύπων και μοντέλων. Το I κάτω από ορισμένες προϋποθέσεις είναι δυνατόν να μετρηθεί άμεσα, τις περισσότερες φορές όμως προκύπτει από την επίλυση της εξίσωσης του υδρολογικού ισοζυγίου μετά τον υπολογισμό των υπολοίπων τριών φάσεων.

Το υδρολογικό ισοζύγιο μιας περιοχής εξαρτάται από:

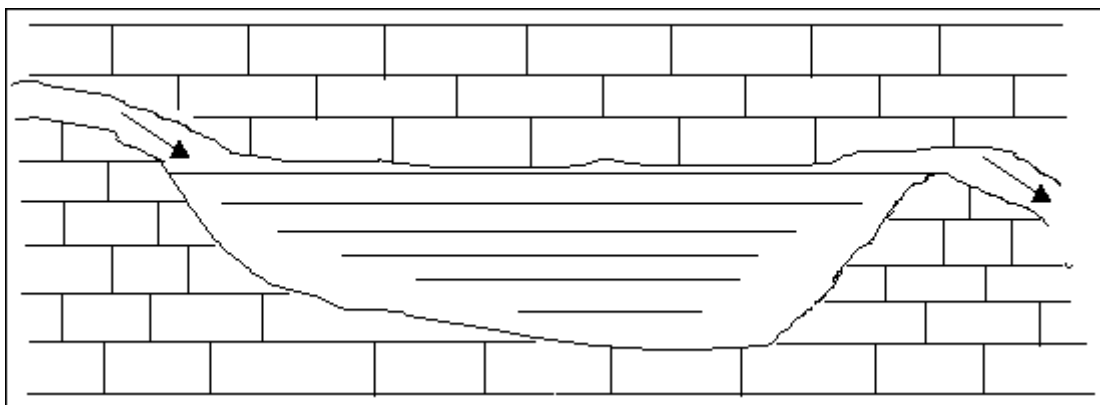
- a) Τις κλιματικές συνθήκες (βροχοπτώσεις, θερμοκρασία, άνεμοι).
- b) Τη φύση των πετρωμάτων που δομούν την περιοχή (διαπερατά, αδιαπέρατα).
- c) Τις μορφολογικές κλίσεις, και
- d) Τη βλάστηση.

Η τροφοδοσία των υπόγειων νερών (ενεργός κατείσδυση)

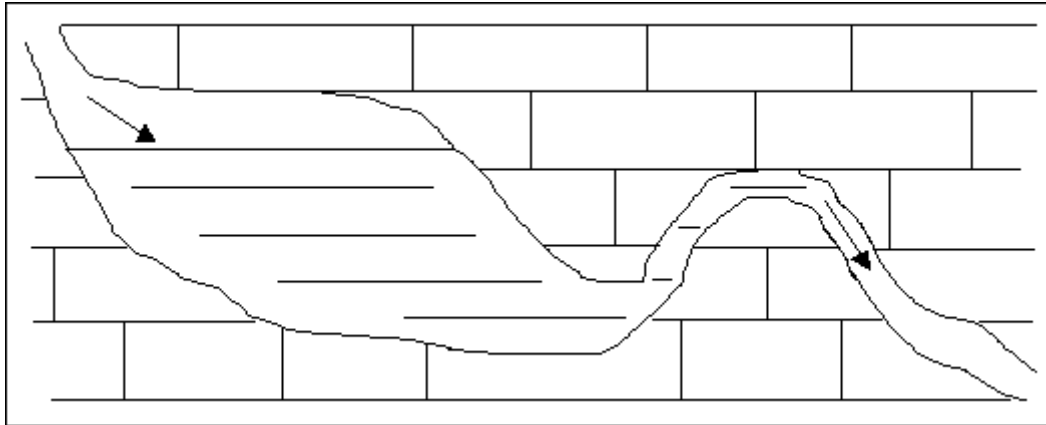
Η τροφοδοσία των υπόγειων νερών γίνεται, όπως αναφέραμε στην προηγούμενη παράγραφο, από την ενεργό κατείσδυση από το τμήμα δηλαδή του νερού της βροχής ή του τηκόμενου χιονοκαλύμματος, που διαπερνώντας την επιφάνεια του εδάφους κατεισδύει, και οδηγούμενο από τη βαρύτητα φτάνει μέχρι τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα.

Η ενεργός κατεΐσδυση σε πολλές περιπτώσεις είναι τμήμα μόνο της ολικής κατεΐσδυσης, καθώς όπως προαναφέραμε ένα μέρος του νερού που διηθείται από την επιφάνεια του εδάφους καταναλώνεται για την κάλυψη του ελλείμματος υγρασίας των υπεδάφικων στρωμάτων της μη κορεσμένης ζώνης του πετρώματος. Αυτό συμβαίνει κυρίως σε περιοχές, όπως η νότια Ελλάδα, όπου οι βροχοπτώσεις είναι αραιές με μεγάλα ξηρά μεσοδιαστήματα κατά τα οποία τα στρώματα του υπεδάφους χάνουν την υγρασία τους λόγω της εξάτμισης και της διαπνοής των φυτών.

Στις καρστικές περιοχές, η διαφορά μεταξύ της ολικής και της ενεργού κατεΐσδυσης μπορεί να οφείλεται εκτός από το έλλειμμα υγρασίας και στην ύπαρξη ειδικών φαινομένων που συμβαίνουν στην αεριζόμενη ζώνη του κάρστ όπως είναι η εκκένωση δεξαμενών υπερχείλισης (σχ. 2.13) ή εκκένωση δεξαμενών από σίφωνες (σχ. 2.14). Οι δεξαμενές υπερχείλισης είναι κοιλότητες, που έχουν δημιουργηθεί από την καρστική διάβρωση και βρίσκονται πάνω από τη στάθμη του καρστικού υδροφόρου ορίζοντα. Η εκκένωση των δεξαμενών αυτών προς τον υδροφόρο ορίζοντα γίνεται αφού η στάθμη τους ξεπεράσει ένα ορισμένο επίπεδο (σχ. 2.13). Οι δεξαμενές που εκκενώνονται από σίφωνες είναι επίσης κοιλότητες της μη κορεσμένης ζώνης του καρστικού πετρώματος που αδειάζουν το νερό τους στον υποκείμενο υδροφόρο ορίζοντα αφού πρώτα η στάθμη τους ξεπεράσει το υψηλότερο σημείο του σίφωνα που τις εκφορτίζει (σχ. 2.14). Και τα δύο προαναφερθέντα είδη δεξαμενών της μη κορεσμένης ζώνης χάνουν νερό λόγω εξάτμισης στα ξηρά μεσοδιαστήματα των βροχοπτώσεων αλλά κυρίως κατά την ξηρά θερινή περίοδο.



Σχήμα 2.13 Δεξαμενή υπερπλήρωσης



Σχήμα 2.14 Σίφωνας

Ο υπολογισμός της ενεργού κατείσδυσης είναι όπως γίνεται φανερό, θεμελιώδους σημασίας για τη σωστή προσομοίωση της διάταξης των υπόγειων νερών από κάποιο μοντέλο. Στο προτεινόμενο πρότυπο υπάρχει η δυνατότητα υπολογισμού της ενεργού κατείσδυσης με δύο τρόπους. Με τον πρώτο υπολογίζεται σταθερός για όλο το υδρολογικό έτος, συντελεστής ενεργού κατείσδυσης σαν ποσοστό του νερού της βροχής και η τιμή του προκύπτει από την προσαρμογή του προτύπου. Με τον δεύτερο γίνεται υπολογισμός της ενεργού κατείσδυσης, σε mm νερού, αφού πρώτα προσδιοριστούν οι υπόλοιποι παράγοντες του υδρολογικού ισοζυγίου και ληφθεί υπ' όψιν αφ' ενός η κάλυψη του ελλείμματος υγρασίας των στρωμάτων του υπεδάφους και αφ' ετέρου τα ειδικά φαινόμενα του κάρστ στην ακόρεστη ζώνη. Τόσο ο προσδιορισμός των παραγόντων του υδρολογικού ισοζυγίου όσο και η εκτίμηση του ελλείμματος υγρασίας του υπεδάφους αλλά και η επίδραση στην ενεργό κατείσδυση των διεργασιών της ακόρεστης ζώνης του κάρστ που αναφέραμε προηγουμένως, γίνονται μέσω προσομοίωσης των σχετικών φαινομένων.

Στις επόμενες παραγράφους θα αναλυθεί ο δεύτερος τρόπος υπολογισμού της ενεργού κατείσδυσης, ενώ στο επόμενο κεφάλαιο θα γίνει σύγκριση των δύο μεθόδων. Όσα θα αναφερθούν παρακάτω αφορούν τον υπολογισμό της ενεργού κατείσδυσης από βροχοπτώσεις και όχι από το τηκόμενο χιονοκάλυμμα.

Υπολογισμός της ενεργού κατείδυσης από το προτεινόμενο πρότυπο

Για δεδομένο χρονικό διάστημα Δt η ενεργός κατείδυση δίνεται από τη σχέση:

$$K=P-A-E-L \quad (1)$$

όπου K: είναι η ενεργός κατείδυση, P: η βροχόπτωση, A: η επιφανειακή απορροή, E: η πραγματική εξατμισοδιαπνοή και L: παράγοντας που αντιπροσωπεύει τον κορεσμό σε υγρασία των υπεδαφικών στρωμάτων και τα ειδικά φαινόμενα της αεριζόμενης ζώνης του καρστικού υδροφόρου που περιγράψαμε στην προηγούμενη παράγραφο, δηλαδή την εκκένωση δεξαμενών υπερχειλίσης και την εκκένωση δεξαμενών από σίφωνες. Το P είναι οι μετρήσεις του ύψους βροχόπτωσης (mm) που λαμβάνονται από τα βροχόμετρα, ενώ όλοι οι άλλοι παράγοντες της εξίσωσης (1) υπολογίζονται από το πρότυπο σαν ισοδύναμο ύψος βροχόπτωσης (mm). Θα εξετάσουμε χωριστά κάθε ένα από αυτούς τους παράγοντες.

Βροχοπτώσεις

Η μέτρηση της βροχόπτωσης που παίρνουμε από ένα βροχόμετρο είναι σημειακή. Αναφέρεται δηλαδή στο σημείο που βρίσκεται το βροχόμετρο. Προκειμένου επομένως να προσδιορίσουμε τη βροχόπτωση που δέχεται μια περιοχή, θα πρέπει να εκτιμήσουμε τι ποσοστό της συνολικής περιοχής μπορεί να αντιπροσωπευθεί από τις μετρήσεις κάθε βροχόμετρου.

Στο προτεινόμενο πρότυπο οι μετρήσεις κάθε βροχομέτρου της περιοχής τροφοδοσίας της καρστικής πηγής πολλαπλασιάζονται με ένα συντελεστή βάρους ο οποίος εξάγεται από την προσαρμογή του προτύπου. Έτσι αν υπάρχουν k βροχόμετρα στην περιοχή η ολική βροχόπτωση θα δίνεται από τη σχέση:

$$P = \sum_{i=1}^k w_i P_i, \text{ με } 0 < w_i < 1 \text{ και } w_1 + w_2 + \dots + w_k = 1 \quad (2)$$

όπου P: είναι η βροχόπτωση για όλη την περιοχή, P_i : η μέτρηση της βροχόπτωσης από το i βροχόμετρο, και w_i : ο αντίστοιχος συντελεστής βάρους. Στην πραγματικότητα με αυτόν τον τρόπο η περιοχή τροφοδοσίας της πηγής διαιρείται σε υποπεριοχές ανάλογα με την επιρροή του κάθε βροχομέτρου. Η μέθοδος αυτή είναι

παρόμοια με την κλασσική μέθοδο επιφανειακής ολοκλήρωσης σημειακών βροχοπτώσεων του Thiessen (1911). Η διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι εδώ οι συντελεστές βάρους προκύπτουν από προσαρμογή ενώ στη μέθοδο Thiessen λαμβάνονται ανάλογοι των εμβαδών των ζωνών επιρροής του κάθε βροχομετρικού σταθμού οι οποίες ζώνες επιρροής καθορίζονται επί χάρτου με κριτήριο την αρχή της μικρότερης απόστασης.

Ένας άλλος παράγοντας ο οποίος επηρεάζει σημαντικά τις βροχοπτώσεις μιας περιοχής είναι το υψόμετρό της. Έτσι αν το μέσο υψόμετρο των βροχομέτρων μιας περιοχής είναι διαφορετικό από το μέσο υψόμετρο της περιοχής, οι μετρήσεις χρειάζονται διόρθωση. Στο προτεινόμενο πρότυπο οι μετρήσεις των βροχοπτώσεων πολλαπλασιάζονται με ένα συντελεστή που εξαρτάται από τη διαφορά του μέσου υψομέτρου των βροχομέτρων από το μέσο υψόμετρο της λεκάνης τροφοδοσίας της πηγής σύμφωνα με τη σχέση:

$$P_c = \kappa \cdot P \quad (3)$$

όπου P_c : είναι η διορθωμένη τιμή της βροχόπτωσης, P : η βροχόπτωση από τη σχέση (2), και κ : ο συντελεστής διόρθωσης. Η τιμή του συντελεστή κ εξάγεται από την προσαρμογή του προτύπου.

Επιφανειακή απορροή

Στις καρστικές περιοχές ο πιο σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει την επιφανειακή απορροή, εκτός από την τοπογραφία και την γεωλογία της περιοχής, είναι η ένταση των βροχοπτώσεων. Στο προτεινόμενο πρότυπο η επιφανειακή απορροή δίνεται ως συνάρτηση της βροχόπτωσης από τη σχέση:

$$R = \lambda \cdot P_c, \quad (0 \leq \lambda \leq 1) \quad (4)$$

όπου R : είναι η επιφανειακή απορροή, και λ : παράγοντας που εξαρτάται από την ένταση της βροχόπτωσης και τα τοπογραφικά και γεωλογικά χαρακτηριστικά της περιοχής. Στο πρότυπο χρησιμοποιούνται περισσότεροι από ένας συντελεστές λ ανάλογα με την ένταση της βροχόπτωσης ($\frac{P_c}{\Delta t}$). Χωρίζονται δηλαδή οι εντάσεις των βροχοπτώσεων σε κλάσεις ενώ κάθε κλάση έχει τον δικό της συντελεστή λ . Τόσο οι

κλάσεις όσο και οι αντίστοιχοι συντελεστές εξάγονται από την προσαρμογή του προτύπου.

Εξατμισοδιαπνοή, κορεσμός υπεδαφικών στρωμάτων – ειδικά φαινόμενα κάρστ

Η πραγματική εξατμισοδιαπνοή, η συμπλήρωση του ελλείμματος υγρασίας των στρωμάτων της ακόρεστης ζώνης του καρστικού πετρώματος, και τα ειδικά φαινόμενα του καρστ, προσομοιώνονται από μία δεξαμενή υπερχειλίσσης ύψους Z η οποία γεμίζει με νερό ποσότητας $P_c - R$, ενώ ταυτόχρονα αδειάζει με ρυθμό που ταυτίζεται με την πραγματική εξατμισοδιαπνοή E η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$E = \mu \cdot H, \quad (0 \leq \mu \leq 1) \quad (5),$$

όπου H είναι το ύψος του νερού στη δεξαμενή και μ συντελεστής ο οποίος εξαρτάται από τις καιρικές συνθήκες. Όταν $H = Z$ η πραγματική εξατμισοδιαπνοή λαμβάνει τη μέγιστη τιμή της, προσεγγίζει δηλαδή τη δυνητική εξατμισοδιαπνοή ή και ταυτίζεται με αυτήν.

Ο παράγοντας L της σχέσης 1 δίνεται από τη σχέση:

$$L = Z - H \quad (6)$$

Η τιμή του L κυμαίνεται από την τιμή 0 όταν $H = Z$, οπότε τα στρώματα του υπεδάφους είναι κορεσμένα σε υγρασία και οι δεξαμενές υπερπλήρωσης και σιφωνισμού της ακόρεστης ζώνης είναι πλήρεις, έως την τιμή Z όταν $H = 0$, οπότε τα υπεδαφικά στρώματα είναι πλήρως ακόρεστα και οι δεξαμενές άδειες.

Το ύψος Z της δεξαμενής προσομοίωσης και ο συντελεστής μ υπολογίζονται από την προσαρμογή του προτύπου. Το πρότυπο χρησιμοποιεί περισσότερους από έναν συντελεστές μ καθώς το έτος διαιρείται σε εποχές με παρόμοιες καιρικές συνθήκες, με κάθε εποχή να έχει τον δικό της συντελεστή μ . Ο διαχωρισμός αυτός γίνεται από τον χρήστη του προτύπου.

Από τις εξισώσεις (1), (2), (4), (5) και (6) για δεδομένο Δt έχουμε:

$$K = \kappa P - \lambda P_c + (1 - \mu)H - Z, \quad (K \geq 0) \quad (7)$$

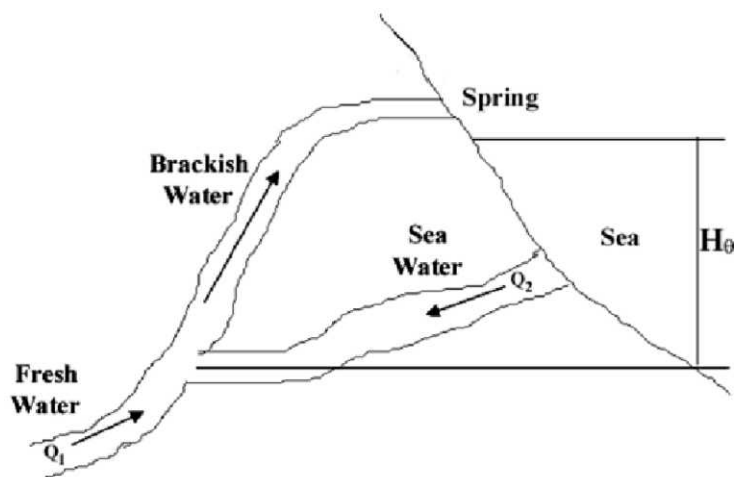
και γενικά:

$$\int K(t)dt = \kappa \dot{P}dt - \lambda \kappa \dot{P}dt + (1 - \mu)H(t) - Z, \quad (K(t) \geq 0) \quad (8) \quad \text{όπου } \dot{P}: \text{ είναι ο}$$

ρυθμός των βροχοπτώσεων στην λεκάνη τροφοδοσίας της πηγής.

2.2.5 Υφάλμυρες Καρστικές Πηγές

Αν μία καρστική πηγή είναι παράκτια, οπότε κατά πάσα πιθανότητα και ο καρστικός υδροφόρος που την τροφοδοτεί θα έρχεται σε επαφή με τη θάλασσα, μπορεί να είναι υφάλμυρη ή περιοδικά υφάλμυρη. Εξήγηση στο φαινόμενο της υφαλμύρωσης έχουν δώσει από παλιά ερευνητές (Καλλέργης, 2001), αναφερόμενοι είτε στη διαφορά πυκνότητας ανάμεσα στο γλυκό και στο αλμυρό νερό, είτε στην ύπαρξη στένωσης στη συμβολή των δύο αγωγών που φέρνουν γλυκό νερό από τη λεκάνη της πηγής και αλμυρό νερό από τη θάλασσα, οπότε σύμφωνα με την εξίσωση Bernoulli γίνεται αναρρόφηση του θαλασσινού νερού λόγω της δημιουργίας υποπίεσης (Μαραμαθάς, 2006).



Σχήμα 2.15 Υφαλμύρωση καρστικής πηγής

(Maramathas et al. 2006).

Τις δύο παραπάνω απόψεις συνδυάζει ο Kuscser (1950), του οποίου η θεωρία για τις υφάλμυρες παράκτιες καρστικές πηγές παρατίθεται περιληπτικά παρακάτω (Καλλέργης, 2001):

Ο Kuscser δέχτηκε την ύπαρξη ενός αγωγού που φέρνει γλυκό νερό στο στόμιο εξόδου της πηγής και ενός αγωγού ο οποίος τον συνδέει με τη θάλασσα (σχήμα 2.12). Το θαλασσινό νερό μπορεί να μπει στον αγωγό του γλυκού νερού είτε λόγω διαφοράς πυκνότητας εφόσον η συμβολή βρίσκεται σε μεγάλο βάθος, είτε λόγω αναρρόφησης θαλασσινού νερού εφόσον η διατομή της συμβολής είναι στενή. Με απλό τρόπο υπολόγισε τη διαφορά υδροστατικής πίεσης P μεταξύ του αγωγού του γλυκού νερού. Αν μία καρστική πηγή είναι παράκτια, τότε κατά πάσα πιθανότητα και ο καρστικός υδροφόρος που την τροφοδοτεί θα έρχεται σε επαφή με τη θάλασσα, μπορεί να είναι υφάλμυρη ή περιοδικά υφάλμυρη. Εξήγηση στο φαινόμενο της υφαλμύρωσης έχουν δώσει από παλιά ερευνητές (Καλλέργης, 2001), αναφερόμενοι είτε στη διαφορά πυκνότητας ανάμεσα στο γλυκό και στο αλμυρό νερό, είτε στην ύπαρξη στένωσης στη συμβολή των δύο αγωγών που φέρνουν γλυκό νερό από τη λεκάνη της πηγής και αλμυρό νερό από τη θάλασσα, οπότε σύμφωνα με την εξίσωση Bernoulli γίνεται αναρρόφηση του θαλασσινού νερού λόγω της δημιουργίας υποπίεσης.

Τις δύο παραπάνω απόψεις συνδυάζει ο Kuscser (1950), του οποίου η θεωρία για τις υφάλμυρες παράκτιες καρστικές πηγές παρατίθεται περιληπτικά παρακάτω (Καλλέργης, 2001):

Ο Kuscser δέχτηκε την ύπαρξη ενός αγωγού που φέρνει γλυκό νερό στο στόμιο εξόδου της πηγής και ενός αγωγού ο οποίος τον συνδέει με τη θάλασσα (σχήμα 2.12). Το θαλασσινό νερό μπορεί να μπει στον αγωγό του γλυκού νερού είτε λόγω διαφοράς πυκνότητας εφόσον η συμβολή βρίσκεται σε μεγάλο βάθος, είτε λόγω αναρρόφησης θαλασσινού νερού εφόσον η διατομή της συμβολής είναι στενή. Με απλό τρόπο υπολόγισε τη διαφορά υδροστατικής πίεσης P μεταξύ του αγωγού του γλυκού νερού

Δύο είναι οι τρόποι αντιμετώπισης προβλημάτων υφαλμύρωσης παράκτιων υδροφορέων (Νάνου-Γιάνναρου και Παπαθανασιάδης, 2008):

- a) θεώρηση διεπιφάνειας πεπερασμένου πάχους, λόγω υδροδυναμικής διασποράς. Η διείσδυση θαλάσσιου νερού σε υπόγειους υδροφορείς αντιμετωπίζεται σαν ένα είδος ρύπανσης περιβαλλοντικής προέλευσης. Θεωρείται ότι υπάρχει μία φάση, η υδάτινη, και δύο συνιστώσες, το γλυκό και το θαλάσσιο νερό. Το πρόβλημα αντιμετωπίζεται σαν πρόβλημα υδροδυναμικής διασποράς με συγκέντρωση εξαρτώμενη από την πυκνότητα (για κορεσμένη ροή).
- b) θεώρηση απότομης διεπιφάνειας (ακίνητης ή κινούμενης), εάν το πάχος της διεπιφάνειας είναι μικρό σε σχέση με το πάχος του υδροφορέα. Γίνεται η παραδοχή ότι υπάρχουν δύο μη αναμίξιμα υγρά, το γλυκό και το θαλάσσιο νερό, δηλαδή δύο διαφορετικές φάσεις. Για αδιατάρακτες συνθήκες ροής θεωρείται κατάσταση ισορροπίας, δηλαδή μόνιμη ροή και ακίνητη διεπιφάνεια, με ταυτόχρονη εκροή γλυκού νερού προς τη θάλασσα πάνω από αυτήν. Λόγω άντλησης παρατηρείται κινούμενη διεπιφάνεια, επομένως μη μόνιμη ροή. Υπό προϋποθέσεις μπορεί να γίνει η παραδοχή της οριζόντιας ροής. Οι εξισώσεις γράφονται για κάθε μία φάση χωριστά:

Οι κύριοι μηχανισμοί που επηρεάζουν την μεταφορά ρύπων στα υπόγεια νερά είναι:

- **Μετάθεση.** Η διαλυμένη ουσία ή ο ρύπος κινούνται λόγω της υπόγειας ροής και μαζί με αυτήν, σύμφωνα με την μεθοδολογία που έχουμε εισάγει με τον νόμο του Darcy για την μέση ροή.
- **Μηχανική διασπορά (ή μεταθετική διάχυση).** Σε κάθε πόρο του εδάφους οι πραγματικές υδροδυναμικές ταχύτητες είναι διαφορετικές από αυτές της μέσης ροής που θεωρεί ο νόμος του Darcy και μεταβάλλονται κατά μέγεθος και διεύθυνση, από την τιμή μηδέν στα όρια των πόρων, μέχρι κάποια μέγιστη τιμή στο εσωτερικό τους. Συνεπώς, η ανομοιογένεια που υπάρχει σε μικροσκοπική κλίμακα έχει σαν

αποτέλεσμα, εκτός από την μετάθεση, την εξάπλωση της διαλυμένης ουσίας, με διαφορετικό ρυθμό, τόσο κατά την διεύθυνση της ροής, όσο και εγκάρσια σε αυτήν.

- Μοριακή διάχυση. Σε μικροσκοπική κλίμακα, η ύπαρξη διαφορών στις τιμές των συγκεντρώσεων της διαλυμένης ουσίας ή του ρύπου έχει σαν αποτέλεσμα ροή από την μεγαλύτερη προς την μικρότερη συγκέντρωση.
- Αλληλεπιδράσεις μεταξύ στερεάς και υγρής φάσης (προσρόφηση) και χημικές αντιδράσεις.
- Φαινόμενα αποσύνθεσης του ρύπου.

Με τον όρο «υδροδυναμική διασπορά» εννοούμε την κίνηση και εξάπλωση, σε μακροσκοπική κλίμακα, της διαλυμένης ουσίας ή του ρύπου λόγω μηχανικής διασποράς και μοριακής διάχυσης.

Από τους μηχανισμούς αυτούς στα προβλήματα υφαλμύρωσης πρακτικά υπεσέρχονται οι πρώτοι τρεις. Θεωρούμε ότι μεταξύ θάλασσας και υπόγειων υδροφορέων δεν υπάρχουν χημικές αντιδράσεις και το αλάτι, σαν διαλυμένη ουσία, δεν παρουσιάζει φαινόμενα αποσύνθεσης. Πολλές φορές αμελείται και η μοριακή διάχυση, εκτός από περιοχές με ιδιαίτερα μικρές ταχύτητες.

Με βάση τα παραπάνω, η θεώρηση επιφάνειας πεπερασμένου πάχους ή απότομης διεπιφάνειας μεταξύ γλυκού και θαλάσσιου νερού δεν είναι απλή και εξαρτάται από το υπό εξέταση πρόβλημα. Στα συνήθη πορώδη μέσα, όταν δεν υπάρχει ανισοτροπία ή ετερογένειες, πολλές φορές μπορεί να θεωρηθεί απότομη διεπιφάνεια.

Στους καρστικούς υδροφόρους ορίζοντες συνήθως συναντάται μεταβατική ζώνη αλμυρού νερού, η οποία όμως έχει πολύ μεγαλύτερο πάχος, ενώ κοντά στην ακτογραμμή είναι δυνατόν να βρίσκεται και σε θετικά υψόμετρα. Εξαιτίας αυτού του γεγονότος, πολλές από τις παράκτιες πηγές που βρίσκονται σε μικρό υψόμετρο δίνουν

υφάλμυρο νερό. Ο μηχανισμός δημιουργίας της μεταβατικής ζώνης στους καρστικούς υδροφορείς είναι διαφορετικός από τον αντίστοιχο στα συνήθη πορώδη μέσα που περιγράφηκε παραπάνω και έχει σχέση περισσότερο με την υδροδυναμική του συστήματος και λιγότερο με φαινόμενα διασποράς - διάχυσης. Παράδειγμα, μπορεί να εμφανιστεί γλυκό νερό κοντά στη θάλασσα ή και στον πυθμένα αυτής λόγω της ισχύος νόμων ροής αντίστοιχων με αυτούς σε κλειστούς αγωγούς υπό πίεση (π.χ. μεγάλο ενεργειακό φορτίο και σημαντικές ταχύτητες ροής).

Δύο είναι οι τρόποι αντιμετώπισης προβλημάτων υφαλμύρωσης παράκτιων υδροφορέων (Νάνου-Γιάνναρου και Παπαθανασιάδης, 2008):

c) θεώρηση διεπιφάνειας πεπερασμένου πάχους, λόγω υδροδυναμικής διασποράς. Η διείσδυση θαλάσσιου νερού σε υπόγειους υδροφορείς αντιμετωπίζεται σαν ένα είδος ρύπανσης περιβαλλοντικής προέλευσης. Θεωρείται ότι υπάρχει μία φάση, η υδάτινη, και δύο συνιστώσες, το γλυκό και το θαλάσσιο νερό. Το πρόβλημα αντιμετωπίζεται σαν πρόβλημα υδροδυναμικής διασποράς με συγκέντρωση εξαρτώμενη από την πυκνότητα (για κορεσμένη ροή).

d) θεώρηση απότομης διεπιφάνειας (ακίνητης ή κινούμενης), εάν το πάχος της διεπιφάνειας είναι μικρό σε σχέση με το πάχος του υδροφορέα. Γίνεται η παραδοχή ότι υπάρχουν δύο μη αναμίξιμα υγρά, το γλυκό και το θαλάσσιο νερό, δηλαδή δύο διαφορετικές φάσεις. Για αδιατάρακτες συνθήκες ροής θεωρείται κατάσταση ισορροπίας, δηλαδή μόνιμη ροή και ακίνητη διεπιφάνεια, με ταυτόχρονη εκροή γλυκού νερού προς τη θάλασσα πάνω από αυτήν. Λόγω άντλησης παρατηρείται κινούμενη διεπιφάνεια, επομένως μη μόνιμη ροή. Υπό προϋποθέσεις μπορεί να γίνει η παραδοχή της οριζόντιας ροής. Οι εξισώσεις γράφονται για κάθε μία φάση χωριστά:

Οι κύριοι μηχανισμοί που επηρεάζουν την μεταφορά ρύπων στα υπόγεια νερά είναι:

- **Μετάθεση.** Η διαλυμένη ουσία ή ο ρύπος κινούνται λόγω της υπόγειας ροής και μαζί με αυτήν, σύμφωνα με την μεθοδολογία που έχουμε εισάγει με τον νόμο του Darcy για την μέση ροή.

- **Μηχανική διασπορά (ή μεταθετική διάχυση).** Σε κάθε πόρο του εδάφους οι πραγματικές υδροδυναμικές ταχύτητες είναι διαφορετικές από αυτές της μέσης ροής που θεωρεί ο νόμος του Darcy και μεταβάλλονται κατά μέγεθος και διεύθυνση, από την τιμή μηδέν στα όρια των πόρων, μέχρι κάποια μέγιστη τιμή στο εσωτερικό τους.

Συνεπώς, η ανομοιογένεια που υπάρχει σε μικροσκοπική κλίμακα έχει σαν αποτέλεσμα, εκτός από την μετάθεση, την εξάπλωση της διαλυμένης ουσίας, με διαφορετικό ρυθμό, τόσο κατά την διεύθυνση της ροής, όσο και εγκάρσια σε αυτήν.

- Μοριακή διάχυση. Σε μικροσκοπική κλίμακα, η ύπαρξη διαφορών στις τιμές των συγκεντρώσεων της διαλυμένης ουσίας ή του ρύπου έχει σαν αποτέλεσμα ροή από την μεγαλύτερη προς την μικρότερη συγκέντρωση.
- Αλληλεπιδράσεις μεταξύ στερεάς και υγρής φάσης (προσρόφηση) και χημικές αντιδράσεις.
- Φαινόμενα αποσύνθεσης του ρύπου.

Με τον όρο «υδροδυναμική διασπορά» εννοούμε την κίνηση και εξάπλωση, σε μακροσκοπική κλίμακα, της διαλυμένης ουσίας ή του ρύπου λόγω μηχανικής διασποράς και μοριακής διάχυσης.

Από τους μηχανισμούς αυτούς στα προβλήματα υφαλμύρωσης πρακτικά υπεσέρχονται οι πρώτοι τρεις. Θεωρούμε ότι μεταξύ θάλασσας και υπόγειων υδροφορέων δεν υπάρχουν χημικές αντιδράσεις και το αλάτι, σαν διαλυμένη ουσία, δεν παρουσιάζει φαινόμενα αποσύνθεσης. Πολλές φορές αμελείται και η μοριακή διάχυση, εκτός από περιοχές με ιδιαίτερα μικρές ταχύτητες.

Με βάση τα παραπάνω, η θεώρηση επιφάνειας πεπερασμένου πάχους ή απότομης διεπιφάνειας μεταξύ γλυκού και θαλάσσιου νερού δεν είναι απλή και εξαρτάται από το υπό εξέταση πρόβλημα. Στα συνήθη πορώδη μέσα, όταν δεν υπάρχει ανισοτροπία ή ετερογένειες, πολλές φορές μπορεί να θεωρηθεί απότομη διεπιφάνεια.

Στους καρστικούς υδροφόρους ορίζοντες συνήθως συναντάται μεταβατική ζώνη αλμυρού νερού, η οποία όμως έχει πολύ μεγαλύτερο πάχος, ενώ κοντά στην ακτογραμμή είναι δυνατόν να βρίσκεται και σε θετικά υψόμετρα. Εξαιτίας αυτού του γεγονότος, πολλές από τις παράκτιες πηγές που βρίσκονται σε μικρό υψόμετρο δίνουν υφάλμυρο νερό. Ο μηχανισμός δημιουργίας της μεταβατικής ζώνης στους καρστικούς υδροφορείς είναι διαφορετικός από τον αντίστοιχο στα συνήθη πορώδη μέσα που περιγράφηκε παραπάνω και έχει σχέση περισσότερο με την υδροδυναμική του συστήματος και λιγότερο με φαινόμενα διασποράς - διάχυσης. Παράδειγμα, μπορεί

να εμφανιστεί γλυκό νερό κοντά στη θάλασσα ή και στον πυθμένα αυτής λόγω της ισχύος νόμων ροής αντίστοιχων με αυτούς σε κλειστούς αγωγούς υπό πίεση (π.χ. μεγάλο ενεργειακό φορτίο και σημαντικές ταχύτητες ροής).

Υδροδυναμική των Καρστικών Συστημάτων

Οι καρστικοί υδροφόροι αποτελούνται από πολλούς μικρο και μακρο - αγωγούς ποικίλου σχήματος και μεγέθους που σχηματίζουν σχετικά ή πλήρως ανεξάρτητα υδραυλικά σύνολα, τα οποία στην περίπτωση ύπαρξης πηγής εκφορτίζονται στον κεντρικό αγωγό εξόδου που οδηγεί το νερό στο στόμιο της πηγής. Αν δεν υπάρχει πηγή σε θετικό υψόμετρο, το νερό τους οδηγείται τελικά στη θάλασσα, είτε μέσω κεντρικού αγωγού (δημιουργία υποθαλάσσιας πηγής), είτε μέσω μικρότερων αγωγών (δημιουργία μετώπου εκφόρτισης).

Πολλά από τα σύνολα αυτά έρχονται σε επαφή με τη θάλασσα, οπότε κλάδοι των αγωγών τους ή διοχετεύουν γλυκό νερό στη θάλασσα (αν οι πιέσεις του γλυκού νερού είναι μεγάλες σε σχέση με το βάθος κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας των σημείων συμβολής αυτών των κλάδων με τους αγωγούς που διαρρέονται από γλυκό νερό) ή φέρνουν θαλασσινό νερό αν οι πιέσεις του γλυκού νερού είναι μικρές. Ανάλογα, δηλαδή, με την τροφοδοσία του υδροφόρου από τις βροχοπτώσεις, υπάρχουν αγωγοί μέσα στο πέτρωμα στους οποίους κυκλοφορεί μόνο γλυκό νερό, μόνο θαλασσινό νερό ή υφάλμυρο νερό.

Με αποδοχή του παραπάνω μοντέλου, η μεταβατική ζώνη τοποθετείται εκεί όπου συναντώνται αγωγοί που διαρρέονται από υφάλμυρο νερό. Τέτοιοι αγωγοί βρίσκονται ενδιάμεσα σε αγωγούς γλυκού νερού (μικρά βάθη) και αγωγούς αλμυρού νερού (μεγάλα βάθη).

Τα φαινόμενα διασποράς διάχυσης παίζουν δευτερεύοντα ρόλο σε ένα τέτοιο σύστημα, τόσο λόγω της δομής του, όσο και λόγω των σχετικά μεγάλων ταχυτήτων

κίνησης του νερού στους αγωγούς, που δε δίνουν την ευκαιρία σε φαινόμενα που αναπτύσσονται αργά, όπως τα φαινόμενα διασποράς - διάχυσης να δώσουν σημαντικά αποτελέσματα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

- 3.1. Θεωρητική βάση του προτεινόμενου προτύπου
- 3.2. Το υδροδυναμικό ανάλογο
 - 3.2.1. Γεωμορφολογικά γνωρίσματα της περιοχής μελέτης
- 3.3. Το μαθηματικό πρότυπο
 - 3.3.1. Εξισώσεις καρστικού συστήματος
 - 3.3.2. Εξίσωση υπολογισμού χλωριόντων
- 3.3. Η εισαγωγή των δεδομένων στο πρότυπο

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

3.1 Θεωρητική βάση του προτεινόμενου προτύπου

Η εργασία στηρίζεται σε μια μέθοδο που δίνει την υδροδυναμική υφαλμύριση μιας καρστικής πηγής

Το γλυκό νερό συναντά το θαλασσινό. Εάν η πίεση του θαλασσινού είναι μεγαλύτερη τότε εισχωρεί θαλασσινό και πλέον ο σωλήνας παροχέτευσης έχει πλέον υφάλμυρο νερό. Αυτό εκχέεται και στην έξοδο της πηγής.

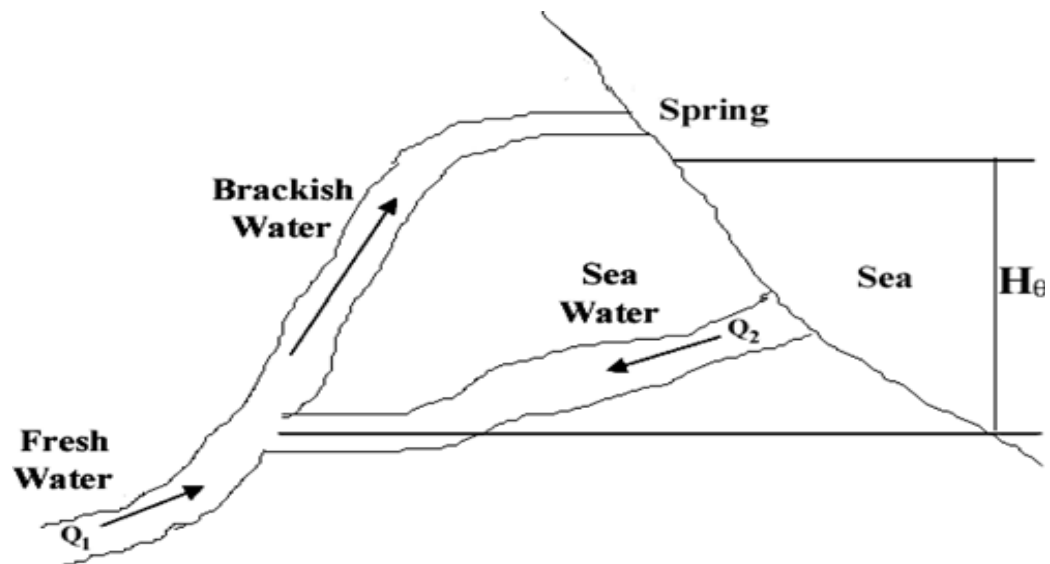
Συνήθως αυτό συμβαίνει επειδή το βάθος της ένωσης θαλασσινού και γλυκού νερού είναι αρκετά μεγάλο ούτως ώστε και η πίεση να είναι αρκετά μεγάλη και οπωσδήποτε μεγαλύτερη του γλυκού νερού.

Ένας άλλος λόγος είναι ότι ο σωλήνας του γλυκού νερού είναι συνήθως αρκετά στενός σε σχέση με του θαλάσσιου και λόγω του φαινομένου Venturi έχουμε μείωση της πίεσης του γλυκού νερού. Σε κάθε περίπτωση πρέπει να δούμε ποιος μηχανισμός υπερισχύει.

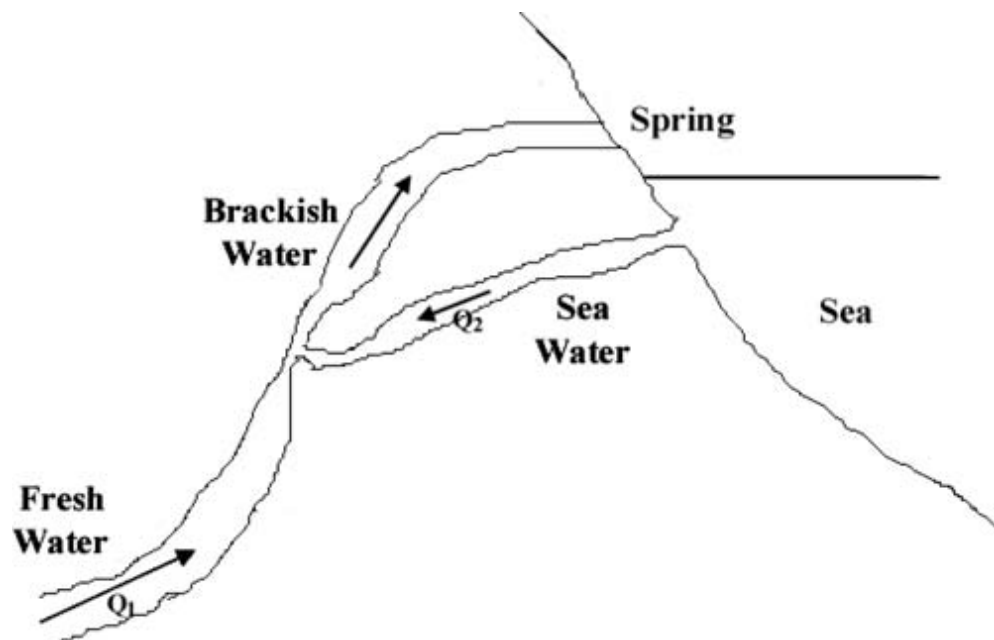
Εάν λοιπόν με κάποιο τρόπο καταστεί δυνατό να αυξηθεί η πίεση του γλυκού νερού θα υπάρχει μείωση της εισροής θαλάσσιου με αποτέλεσμα την μείωση ή έως και εξαφάνιση των χρωριόντων που είναι και το ζητούμενο. Υπό προϋποθέσεις (γεωμορφολογικές), μπορεί να γίνει με αύξηση του ύψους της εξόδου του νερού με κατασκευή ενός φράγματος.

Η δημιουργία του μοντέλου «Modkarst» στηρίχθηκε σε αυτή την ανάλυση.

Δηλαδή της εκτίμησης του μηχανισμού υφαλμύρισης μίας καρστικής πηγής μέσω προσομείωσης με το «Modkarst» το οποίο λαμβάνει υπ' όψιν τις βροχοπτώσεις, την περιεκτικότητα σε ιόντα Cl της πηγής ως και την παροχή αυτής.



Σχ. 3.1 Μηχανισμός εισόδου θαλασσινού νερού στηριζόμενος στη διαφορά πυκνότητας μεταξύ θαλασσινού και γλυκού νερού.



Σχ. 3.2 Μηχανισμός υφαλμύρινσης στηριζόμενος στο φαινόμενο venturi. Sea intrusion mechanism of the spring based on the venturi

Στην παράγραφο αυτή θα γίνει περιγραφή της αντίληψης πάνω στην οποία βασίζεται το προτεινόμενο πρότυπο. Ένας καρστικός υδροφορέας θεωρείται ότι αποτελείται από πλήθος αγωγών ποικίλου σχήματος και μεγέθους οι οποίοι σχηματίζουν υδραυλικά σύνολα σχετικά ή και πλήρως ανεξάρτητα μεταξύ τους. Με τον όρο υδραυλικά σύνολα εννοούμε αγωγούς οι οποίοι επικοινωνούν μεταξύ τους, τροφοδοτούνται από τη λεκάνη τροφοδοσίας της πηγής και εκβάλλουν το νερό τους στον κεντρικό αγωγό που οδηγεί στο στόμιο της πηγής. Δευτερεύουσα επικοινωνία πέραν του κεντρικού αγωγού ανάμεσα στα υδραυλικά σύνολα δεν θα πρέπει να αποκλείεται.

Κλάδοι των διαφόρων αγωγών του υδροφορέα είναι δυνατόν να φθάνουν μέχρι τη θάλασσα σε διάφορα βάθη, οπότε ανάλογα με τις πιέσεις του γλυκού νερού οι αγωγοί αυτοί θα διαρρέονται είτε από γλυκό νερό αν οι πιέσεις είναι μεγάλες είτε από θαλασσινό νερό αν οι πιέσεις είναι μικρές. Στην πρώτη περίπτωση τα στόμια προς την θάλασσα των αγωγών αυτών θα αποτελούν δευτερεύοντα σημεία εκφόρτισης του καρστικού υδροφόρου ορίζοντα πέραν της εκφόρτισης που γίνεται από την καρστική πηγή. Στην δεύτερη περίπτωση θα οδηγούν θαλασσινό νερό στον υδροφόρο ορίζοντα και θα τον υφαλμυρώνουν. Πιο συγκεκριμένα, αυτό που έχει σημασία είναι η πίεση του γλυκού νερού στα σημεία συμβολής των αγωγών γλυκού νερού με τους αγωγούς της θάλασσας σε σχέση με το βάθος αυτών των σημείων κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας.

Η τελική περιεκτικότητα σε χλωριόντα, δηλαδή σε θαλασσινό νερό, του νερού της πηγής προκύπτει από την ανάμιξη του γλυκού με το αλμυρό νερό στα σημεία συμβολής που αποτελούν και τα σημεία υφαλμύρωσης του καρστικού υδροφόρου. Όπως γίνεται φανερό ο βασικός παράγοντας του φαινομένου της υφαλμύρωσης είναι η γεωμετρία του κάρστ (βάθος σημείων συμβολής) σε συνάρτηση με τις πιέσεις του γλυκού νερού, που έχουν σχέση με την στάθμη του υδροφόρου και τις απώλειες ενέργειας λόγω τριβών. Τα φαινόμενα διασποράς – διάχυσης παίζουν δευτερεύοντα ρόλο και η επίδρασή τους στο τελικό αποτέλεσμα είναι αμελητέα.

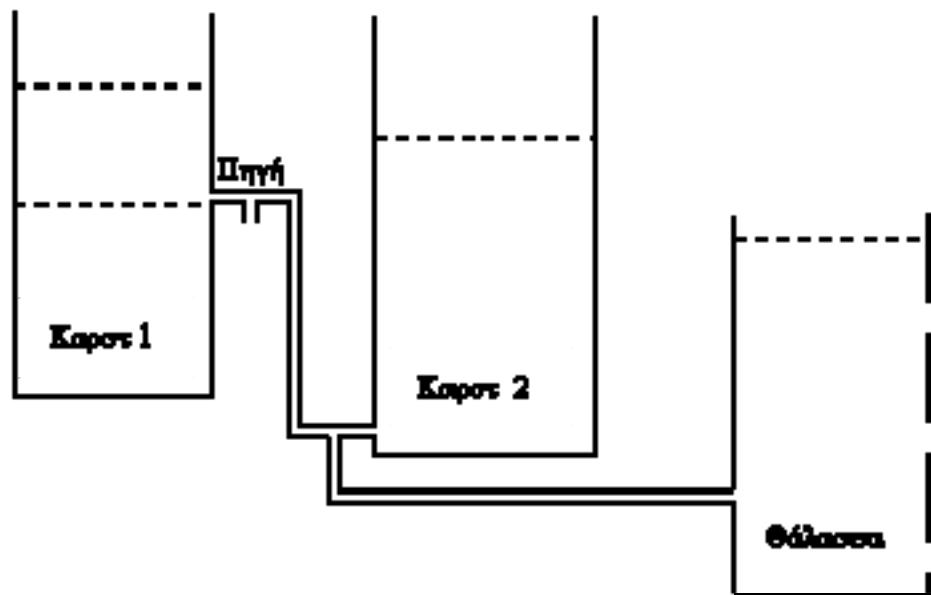
Τους αγωγούς του καρστικού υδροφορέα τους διαχωρίζουμε με βάση τη διάμετρο και το μήκος τους σε μακροαγωγούς με μεγάλη διάμετρο και μεγάλο μήκος και μικροαγωγούς με μικρή διάμετρο και μήκος, που είναι δυνατόν να φθάνουν μέχρι και το τριχοειδές μέγεθος. Περιοχές του υδροφόρου που κυριαρχούνται από

μακροαγωγούς χαρακτηρίζονται από μεγάλες ταχύτητες εκφόρτισης ενώ περιοχές με μικροαγωγούς από μικρότερες. Γίνεται δεκτή δηλαδή η ύπαρξη δύο ταχυτήτων εκφόρτισης στη ζώνη κορεσμού μιας μεγάλης, που έχει σχέση με τους μακροαγωγούς και μιας μικρότερης, που έχει σχέση με τους μικροαγωγούς και με διαφορετικά υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά.

Η ροή στους καρστικούς υδροφόρους ορίζοντες είναι μη μόνιμη ενώ βρίσκεται και εκτός των ορίων ισχύος του νόμου του Darcy, προσεγγίζοντας την τυρβώδη ή και γενόμενη τυρβώδης σε κάποιες περιοχές του υδροφόρου. Αυτό σημαίνει ότι οι απώλειες ενέργειας λόγω τριβών δεν είναι ανάλογες της πρώτης δύναμης της ταχύτητας διήθησης αλλά της V^h όπου V : η ταχύτητα διήθησης και $1 < h \leq 2$ (Maramathas, A., 2006).

3.2 Το υδροδυναμικό ανάλογο

Με βάση τα παραπάνω, αναπτύχθηκε ένα φυσικό πρότυπο προσομοίωσης των καρστικών πηγών που αποτελείται από τρεις ανοιχτές δεξαμενές συνδεδεμένες κατάλληλα με σωλήνες οι οποίοι καταλήγουν στο στόμιο της πηγής (σχ.3.3. Οι δύο από τις τρεις δεξαμενές δηλαδή η κάρστ1 και η κάρστ2 αναφέρονται στο καρστικό σύστημα και η τρίτη στη θάλασσα. Οι δεξαμενές του καρστικού συστήματος δεν είναι κενές αλλά αποτελούνται από υλικό συγκεκριμένου πορώδους. Οι πόροι αυτού του υλικού μπορεί να περιέχουν ή όχι νερό ανάλογα με την τροφοδοσία των δεξαμενών από τις βροχοπτώσεις και τη θέση τους μέσα στις δεξαμενές. Σε κάθε δεξαμενή του καρστικού συστήματος επομένως συναντάται, όπως και στην πραγματικότητα, μία ζώνη αερισμού όπου οι πόροι περιέχουν αέρα και μία ζώνη κορεσμού όπου οι πόροι περιέχουν νερό. Η τροφοδοσία των δεξαμενών γίνεται μέσω των βροχοπτώσεων από το πάνω τμήμα τους που είναι ανοιχτό.



Σχήμα 3.3. Το υδροδυναμικό ανάλογο μιας καρστικής πηγής

Η δεξαμενή κάρστ1 αντιστοιχεί στο τμήμα του κάρστ που εκφορτίζεται γρήγορα προσομοιώνει δηλαδή τη λειτουργία των μακροαγωγών του συστήματος. Εκβάλλει κατ' ευθείαν στο στόμιο της πηγής. Μετά την τροφοδοσία της από κάποια βροχόπτωση η στάθμη της ανεβαίνει γρήγορα φθάνοντας σε ένα μέγιστο, που εξαρτάται από το ύψος της βροχόπτωσης, και σχετικά γρήγορα πέφτει καθώς η δεξαμενή εκκενώνεται. Η δεξαμενή παύει να λειτουργεί όταν η στάθμη της έρθει στο ίδιο επίπεδο με το σημείο εξόδου του νερού της πηγής. Η ροή θεωρείται μη μόνιμη και τυρβώδης. Η δεξαμενή αυτή συμβάλλει κυρίως στην προσομοίωση των κορυφών (Peaks) του υδρογράμματος της καρστικής πηγής. Προσομοιώνει δηλαδή κυρίως το πάνω τμήμα της καμπύλης συγκέντρωσης και το μεγαλύτερο τμήμα της καμπύλης πτώσης του υδρογράμματος.

Η δεξαμενή κάρστ2 αντιστοιχεί στο τμήμα του κάρστ που εκφορτίζεται με βραδύ ρυθμό. Προσομοιώνει δηλαδή τους μικροαγωγούς του καρστικού συστήματος. Εκβάλλει στο στόμιο της πηγής μέσω αγωγού που κατά τη διαδρομή του συναντά άλλο αγωγό που καταλήγει στη θάλασσα. Η υφαλμύρωση του συστήματος γίνεται στο σημείο συμβολής, ανάλογα με την πίεση του γλυκού νερού στο σημείο εκείνο σε σχέση με το βάθος αυτού του σημείου κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας. Η ροή στη δεξαμενή θεωρείται μη μόνιμη και αν όχι τυρβώδης οπωσδήποτε εκτός ορίων

ισχύος του νόμου του Darcy για τις ροές διήθησης. Η δεξαμενή αυτή συμβάλλει κυρίως στην προσομοίωση της καμπύλης στείρευσης του υδρογράμματος αλλά και της καμπύλης χλωριόντων της πηγής καθώς η πίεση του γλυκού νερού στο σημείο συμβολής των δύο αγωγών, που είναι ο ρυθμιστικός παράγοντας για την υφαλμύρωση, έχει άμεση σχέση τόσο με τη στάθμη του νερού όσο και με τις απώλειες ενέργειας λόγω τριβών σ' αυτή τη δεξαμενή.

Η τρίτη δεξαμενή αντιστοιχεί στη θάλασσα. Οι διαστάσεις της είναι άπειρες και εξ' αυτού του γεγονότος η στάθμη της θεωρείται σταθερή. Η ροή στη δεξαμενή αυτή θεωρείται μόνιμη πράγμα που δικαιολογείται από το άπειρο των διαστάσεών της και τη μονιμότητα της στάθμης της. Μέσω αγωγού (αγωγός θάλασσας) συνδέεται με την έξοδο της δεξαμενής 'κάρστ2'. Ανάλογα με το αν πληρούται ή όχι η συνθήκη υφαλμύρωσης, ο αγωγός αυτός είτε οδηγεί θαλασσινό νερό στον καρστικό υδροφόρο ορίζοντα υφαλμυρώνοντας τον, είτε φέρνει γλυκό νερό από το καρστικό υδροφόρο στη θάλασσα, λειτουργώντας σαν δεύτερο σημείο εκφόρτισης πέραν της πηγής. Είναι καθοριστική η συμβολή της στην προσομοίωση της καμπύλης χλωριόντων της καρστικής πηγής.

Η παροχή της πηγής προκύπτει από το αλγεβρικό άθροισμα των παροχών των τριών δεξαμενών. Η παροχή της δεξαμενής της θάλασσας έχει θετικό ή αρνητικό πρόσημο ανάλογα με το αν η φορά της ροής στον αγωγό της θάλασσας είναι προς το υδροφόρο ή τη θάλασσα αντιστοίχως. Η περιεκτικότητα σε χλωριόντα του νερού της πηγής προκύπτει από την ανάμιξη του γλυκού με το θαλασσινό νερό (Maramathas A. 2003).

3.2.1. Γεωμορφολογικά γνωρίσματα της περιοχής μελέτης

Γενικά το γεωμορφολογικό ανάγλυφο της περιοχής χαρακτηρίζεται ορεινό από τα 500 ως τα 1800 m, ημιορεινό από τα 100 m ως τα 500 m και πεδινό από τα 0 m ως τα 100 m. Η περιοχή μελέτης αποτελείται από ποικιλία γεωλογικών σχηματισμών και εμφανίζει νεοτεκτονική δράση με αποτέλεσμα να διαμορφώνεται ένα έντονο ανάγλυφο. Η γεωμορφολογία των Ιόνιων Νησιών εμφανίζει γενικά ένα έντονο

οριζόντιο διαμελισμό κυρίως στην βόρεια και δυτική πλευρά τους ενώ εμφανίζεται ασθενέστερος στην ανατολική και νότια πλευρά τους. Στην περιοχή μελέτης κατ'εξοχή ορεινή είναι η βόρεια Κέρκυρα, η κεντρική και δυτική Λευκάδα, όλη σχεδόν η Κεφαλονιά και η δυτική Ζάκυνθος. Εκτεταμένες πεδινές περιοχές συναντώνται στην κεντρική και νότια Κέρκυρα και στην ανατολική και νότια Ζάκυνθο. Οι πυκνές βροχοπτώσεις κατά την διάρκεια του χειμώνα δημιουργούν ένα πυκνό δίκτυο από ρυάκια και χείμαρρους κυρίως στις πεδινές περιοχές της Κέρκυρας και της Ζακύνθου. Την προηγούμενη δεκαετία κατασκευάστηκε μια λιμνοδεξαμενή στην Κεφαλλονιά στην περιοχή βορείως της Αγίας Ειρήνης.

Ειδικότερα τα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά των μεγαλύτερων νησιών περιγράφονται παρακάτω:

- Η Κέρκυρα μαζί με τους Παξούς, τους Οθωνούς και την Ερεϊκούσα έχουν έκταση 808 km^2 και δεν είναι ιδιαίτερα ορεινά νησιά. Το κέντρο και το νότιο τμήμα του νησιού στις περιοχές Μεσογγή και Λευκίμμη εμφανίζουν λοφώδη και πεδινή μορφολογία όπου λόγω της γεωλογικής δομής και της υψηλής βροχόπτωσης εμφανίζει αξιόλογη επιφανειακή απορροή. Στο βόρειο τμήμα του νησιού λόγω της γεωλογικής δομής και της υψηλής βροχόπτωσης σχεδόν το σύνολο της ωφέλιμης βροχόπτωσης κατεισδύει στο αναπτυγμένο και περίπλοκα δομημένο καρστικό σύστημα του νησιού.
- Η Λευκάδα μαζί με το Μεγανήσι έχουν έκταση 356 km^2 και η Λευκάδα είναι ιδιαίτερα ορεινή. Μικρές σχετικά πεδινές εκτάσεις διαμορφώνονται στην περιοχή της Λευκάδας στον όρμο Νυδριού και του κόλπου της Βασιλικής όπου καταλήγουν διάφοροι μικροί χείμαρροι. Λόγω της γεωλογικής δομής δεν εμφανίζει αξιόλογη επιφανειακή απορροή, αφού το σύνολο σχεδόν της ωφέλιμης βροχόπτωσης κατεισδύει στο αναπτυγμένο καρστ.
- Η Κεφαλλονιά μαζί με την Ιθάκη έχει έκταση 904 km^2 και παρουσιάζουν ορεινό ανάγλυφο. Μικρή πεδινή έκταση διαμορφώνεται στον όρμο Σάμης-Αγίας Ευφημίας, και στο νότιο τμήμα του νησιού στην περιοχή Αγ. Ειρήνης - Κατελειού όπου καταλήγουν διάφοροι μικροί χείμαρροι. Λόγω της γεωλογικής δομής δεν εμφανίζει αξιόλογη επιφανειακή απορροή, αφού το σύνολο σχεδόν της ωφέλιμης βροχόπτωσης κατεισδύει στο αναπτυγμένο και περίπλοκα δομημένο καρστικό σύστημα του νησιού.

- Η Ζάκυνθος έχει έκταση 405 km² και είναι ιδιαίτερα ορεινή στη δυτική πλευρά της που αναπτύσσεται το όρος Βραχίονας ενώ εκτεταμένη λοφώδης και πεδινή έκταση διαμορφώνεται στην ανατολική πλευρά της όπου καταλήγουν διάφοροι μικροί και μεγάλοι χείμαρροι.

Υδρογραφικό δίκτυο

Λόγω του νησιωτικού χαρακτήρα της περιοχής μελέτης δεν αναπτύσσονται μεγάλες λεκάνες απορροής ποταμών. Γι' αυτό το λόγο, στην οριοθέτηση των υδροφόρων συστημάτων δεν γίνεται αναφορά σε επίπεδο λεκάνης απορροής ποταμού.

Κεφαλλονιά - GEVLOGIA

Το νησί της Κεφαλλονιάς ανήκει κυρίως στην ζώνη των Παξών εκτός από το ανατολικότερο άκρο της που η εξωτερική Ιόνιος ζώνη επωθείται στην ζώνη των Παξών.

Ιόνια ζώνη

Η δομή της στρωματογραφίας της Ιονίου ζώνης είναι παρόμοια με αυτή της Κέρκυρας .Τριαδικό. Τα Τριαδικά λατυποπαγή εμφανίζονται κυρίως στα A-NA του νησιού μεταξύ των περιοχών Αγίου Νικολάου και Πάστρας. Η εμφάνισή τους δεν αποτυπώνεται στον υπάρχοντα γεωλογικό χάρτη του ΙΓΜΕ, αλλά αναφέρεται από την BP (1971), τον Νικολάου (1986) και τον Κουμαντάκη (1990). Κατά την διάρκεια των γεωλογικών χαρτογραφήσεων στο νησί οι εμφανίσεις αυτές αποτυπώθηκαν στα πλαίσια του έργου.

Ο Κουμαντάκης (1990) αναφέρει ότι η αρχική εμφάνιση των γύψων ήταν σε μεγαλύτερη έκταση από ότι σήμερα, αλλά απομακρύνθηκαν λόγω της διάλυσής τους προκαλώντας την δημιουργία χοανωδών εγκοίλων τα οποία κατέπεσαν στην συνέχεια αποτέλεσμα των οποίων ήταν μεταξύ άλλων η δημιουργία των μικροπηγών Μικρής και Μεγάλης Αβύθου.

Ιουρασικό. Η ανθρακική σειρά εμφανίζεται εφιππευμένη στην κλαστική σειρά του Τριαδικού. Στα κατώτερα της ανθρακικής σειράς εμφανίζονται δολομίτες άστρωτοι γκρίζου χρώματος. Οι ασβεστόλιθοι του Παντοκράτορα εμφανίζονται πάνω στους δολομίτες. Ακολουθεί ένα σύστημα μικρούς πάχους (Κουμαντάκης, 1990) από εναλλασσόμενα στρώματα πλακωδών, ασβεστολίθων με κόκκινους κερατόλιθους που περιέχουν αμμωνίτες (Φάση ammonitico rosso). Εμφανίζονται σε μια στενή σειρά διακοπτόμενη από ρήγματα στην ΝΑ Κεφαλλονιά. Το Μέσο Ιουρασικό (Δογγέριο) εμφανίζεται με την σειρά μαργαϊκών σχιστολίθων και σχιστολίθων που περιέχουν Posidonia. Οι απόψεις των ερευνητών για την εμφάνιση και παρουσία του ανώτερου Ιουρασικού δίστανται όπως αναφέρει ο Κουμαντάκης (1990). Κάποιοι αναφέρουν (γεωλογικός χάρτης ΙΓΜΕ) την εμφάνιση μιας στενής ζώνης ασβεστολίθων και κατά άλλους (BP, 1971) το Α. Ιουρασικό απουσιάζει.

Κρητιδικό Το Κρητιδικό στην Κεφαλονιά εμφανίζεται με ασβεστόλιθους πελαγικής φάσης (αντίστοιχη με την σειρά της Βίγλας στην Κέρκυρα) με μικρές ενστρώσεις κερατολίθων και στα ανώτερα με ενδιαστρώσεις αργίλων και μαργών. Η σειρά του Άνω Κρητιδικού εμφανίζεται στα νοτιοανατολικά παράλια στην περιοχή του ακρωτηρίου Μακρυνά Πέτρα.

Αναλυτικές αναφορές με τις διαφορετικές απόψεις και θεωρήσεις των ερευνητών για τους σχηματισμούς Παλαιοκαίνου – Ολιγόκαινου παρουσιάζει ο Κουμαντάκης (1990).

Ζώνη Παξών

Η ζώνη Παξών έχει την μεγαλύτερη γεωγραφική εξάπλωση στην Κεφαλλονιά.

Κρητιδικό Το Κατώτερο Κρητιδικό εμφανίζεται με την μορφή ασβεστολίθων και δολομιτών, στο ΒΔ τμήμα του Καλού Όρους και στα χαμηλότερα τμήματα των ΝΔ κλιτύων του Αίνου. Πρόκειται για τους παλαιότερους επιφανειακούς σχηματισμούς της ζώνης Παξών στην Κεφαλλονιά. Η BP(1971) παραθέτει την στρωματογραφική σειρά του Καλού Όρους, ενώ ο Κουμαντάκης (1990) παραθέτει λιθολογικά στοιχεία από γεωτρήσεις που ανορύχθηκαν σε κατω κρητιδικούς σχηματισμούς στα πλαίσια της έρευνάς του στην περιοχή της Άσσου και του Αίνου. Νηρητικοί ασβεστόλιθοι μεγίστου πάχους 1000 m αποτελούν τον κύριο σχηματισμό του Άνω Κρητιδικού.

Πρόκειται για τον σχηματισμό με την μεγαλύτερη επιφανειακή εμφάνιση, από το Καλόν Ορος στα βόρεια, την περιοχή του όρους Αγία Δυνατή και την δομή του ορεινού όγκου του Αίνου στην κεντρική Κεφαλλονιά.

Παλαιόκαινο Σύμφωνα με τον Κουμαντάκη (1990) παλαιοκαινικά στρώματα απαντώνται στην περιοχή της Πυλάρου, και στις ανατολικές παρυφές του Αίνου (περιοχές Σάμης – Πουλάτων).

Ηώκαινο Το Ηώκαινο εμφανίζεται με την μορφή ασβεστολίθων που είναι άστρωτοι ή παχυστρωματώδεις και περιέχουν απολιθώματα μεγάλων τρηματοφόρων όπως Νουμουλίτες και Αλβεολίνες. Στον κόλπο του Μύρτου πελαγικοί καλοστρωμένοι ασβεστόλιθοι συνιστούν το Ηώκαινο. Οι ηώκαινοί ασβεστόλιθοι παρουσιάζουν μεγάλη εξάπλωση στην περιοχή της Παλικής. Εμφανίζονται σε επιμήκεις ζώνες παράλληλες με τους παλαιοκαινικούς ασβεστόλιθους στις περιοχές της Πυλάρου, στις ανατολικές παρυφές του Αίνου και την Θηνιά.

Μειόκαινο Μεγάλη ανάλυση και εκτενής βιβλιογραφική επισκόπηση για το Μειόκαινο στην Κεφαλλονιά γίνεται από τον Κουμαντάκη (1990). Το Μειόκαινο εμφανίζεται με την μορφή κροκαλοπαγών, μαργών και μαργαϊκών ασβεστόλιθων. Εμφανίζεται στην Δυτική Παλική, στην περιοχή της Πυλάρου, σε επιμήμη ζώνη νοτίως της Σάμης και στην ΝΑ Κεφαλλονιά.

Πλειόκαινο. Πλειοκαινικοί σχηματισμοί απαντώνται στην περιοχή του Ληξουρίου (ΝΑ Παλική) και στην ΝΔ παράκτια ζώνη της Κεφαλλονιάς (Αεροδρόμιο, Πεσάδα, Κλείσματα, Κατελειός, Σκάλα)

3.3 Το μαθηματικό πρότυπο

Για τη δημιουργία ενός μαθηματικού προτύπου βασισμένου στο υδροδυναμικό ανάλογο της παραγράφου 2.2 (Πίν. 2.1), υπολογίστηκε όπως προαναφέρθηκε το ισοζύγιο μάζας και ενέργειας των δεξαμενών που προσομοιώνουν το καρστικό σύστημα και το ισοζύγιο ενέργειας της δεξαμενής που προσομοιώνει τη θάλασσα. Για τον υπολογισμό των παραπάνω ισοζυγίων χρησιμοποιήθηκαν οι μακροσκοπικές

εξισώσεις συνέχειας και διατήρησης της μηχανικής ενέργειας σε έναν όγκο ελέγχου και την αντίστοιχη επιφάνεια ελέγχου (Παπαιωάννου, 1999).

Η ροή θεωρήθηκε μη μόνιμη στις δεξαμενές του καρστικού συστήματος και μόνιμη στη δεξαμενή της θάλασσας. Αιτιολόγηση αυτής της παραδοχής έγινε στην παράγραφο 2.2. Όπως αναφέρθηκε και στην παράγραφο 2.2.1, οι δύο δεξαμενές που προσομοιώνουν το καρστικό σύστημα θα έχουν όμοιες εξισώσεις. Η μόνη διαφορά τους θα είναι στην τιμή των χρησιμοποιούμενων παραμέτρων.

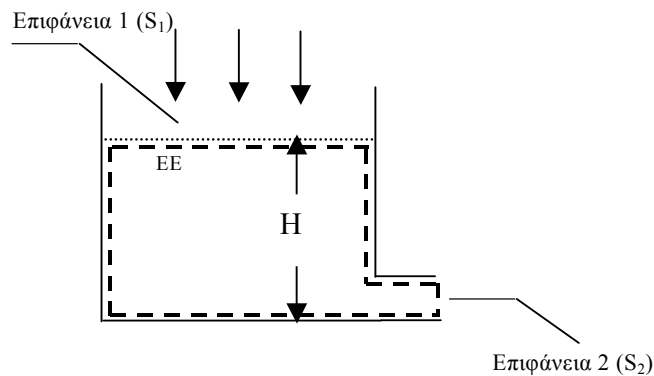
Από τη μαθηματική ανάλυση που ακολουθεί προκύπτει προς λύση ένα σύστημα μη γραμμικών διαφορικών και αλγεβρικών εξισώσεων.

Πίνακας 2.1 Προτεινόμενο μαθηματικό πρότυπο (Παπαιωάννου, 1999).

<u>Εξισώσεις</u>	<u>Μεταβλητές</u>
<u>Καρστικά υποσυστήματα*</u>	Q_2 Παροχή δεξαμενής καρστικού συστήματος (L^3/T)
$sS_1 \frac{dH}{dt} + Q_2 - \gamma \dot{P}S_1 = 0$	Q_3 Παροχή δεξαμενής θάλασσας (L^3/T)
$sS_1 H \frac{dH}{dt} + \frac{Q_2^2}{2gS_2^2} - H\gamma \dot{P}S_1 + L \left[\frac{Q_2}{sS_1} \right]^2 Q_2 = 0$	H Στάθμη νερού πάνω από το σημείο εκφόρτισης (L)
<u>Θάλασσα</u>	P_3 Πίεση στην έξοδο του αγωγού της θάλασσας (M/LT^2)
$\frac{Q_3^2}{2gS_3^2} - \left \frac{P_3}{\rho g} - H_0 \right = 0$	<u>Παράμετροι</u>
$p_3 = \rho_w g (H_0 + h + \frac{s}{\pi} H) - L_a Q_2^2$	$\dot{P}$ Ρυθμός βροχοπτώσεων (L/T)
*Στην πραγματικότητα οι εξισώσεις είναι 4 δύο για κάθε καρστικό υποσύστημα.	s Συντελεστής εναποθήκευσης
<u>Αποτελέσματα μοντέλου</u>	S_1 Λεκάνη τροφοδοσίας (L^2)
Η παροχή της πηγής προκύπτει από το άθροισμα των παροχών των δύο καρστικών υποσυστημάτων και της παροχής της θάλασσας, ενώ η συγκέντρωση των χλωριόντων του νερού προκύπτει από την επίλυση του προβλήματος ανάμιξης του γλυκού με το θαλασσινό νερό.	γ Συντελεστής κατείσδυσης
	g Επιτάχυνση βαρύτητας (L/T^2)
	S_2 Διατομή αγωγού καρστικού συστήματος (L^2)
	L Συντελεστής απωλειών ενέργειας ($L^{-1}T^{-2}$)
	S_3 Διατομή αγωγού θάλασσας (L^2)
	H_0 Βάθος σημείου εξόδου αγωγού θάλασσας (L)
	ρ_0 Πυκνότητα θαλασσινού νερού (M/L^3)
	ρ_w Πυκνότητα γλυκού νερού (M/L^3)
	ρ ρ_0 ή ρ_w αν η θάλασσα στέλνει ή δέχεται νερό από το καρστικό σύστημα αντίστοιχα
	h Υψόμετρο πηγής (L)
	π Ενεργό πορώδες
	L_a Συντελεστής απωλειών πίεσης στην έξοδο του αγωγού της θάλασσας (ML^{-7})

3.3.1 Εξισώσεις καρστικού συστήματος

Στο σχήμα 2.2 παρουσιάζεται η δεξαμενή που προσομοιώνει το καρστικό σύστημα. Η δεξαμενή τροφοδοτείται από τις βροχοπτώσεις μέσω της επιφάνειας S_1 ενώ εκφορτίζεται μέσω της επιφάνειας S_2 . Με διακεκομμένη γραμμή σημειώνεται η επιφάνεια ελέγχου ενώ ο περικλειόμενος από αυτήν όγκος είναι ο όγκος ελέγχου. Με H σημειώνεται το ύψος νερού στη δεξαμενή.



Σχήμα 3.4 Δεξαμενή καρστικού υποσυστήματος

Εξίσωση συνέχειας

Η γενική μορφή της μακροσκοπικής εξίσωσης συνέχειας που εφαρμόζεται στην παραπάνω δεξαμενή είναι:

$$\frac{d}{dt} \iiint_{OE} \rho dV + \iint_{EE} \rho(\mathbf{u} \cdot \mathbf{n}) dS = 0 \quad (1)$$

όπου ρ είναι η πυκνότητα του υγρού, V : ο όγκος του υγρού στη δεξαμενή, $\mathbf{u}$: το διάνυσμα της ταχύτητας στην επιφάνεια εισόδου ή εξόδου της δεξαμενής, $\mathbf{n}$: το μοναδιαίο διάνυσμα κάθετα στις επιφάνειες εισόδου ή εξόδου, και S : το εμβαδόν των επιφανειών εισόδου ή εξόδου της δεξαμενής. Με OE σημειώνουμε τον όγκο ελέγχου ενώ με EE την επιφάνεια ελέγχου.

Ο πρώτος όρος εκφράζει τον ρυθμό αλλαγής της μάζας στον όγκο ελέγχου ενώ ο δεύτερος την καθαρή εκροή μάζας από τον όγκο ελέγχου μέσω της επιφάνειας ελέγχου εξ' αιτίας της ροής. Στην περίπτωση των ελεύθερων υδροφόρων οριζόντων δύο ρευστά (νερό και αέρα) περικλείονται στον όγκο ελέγχου αλλά στους υπολογισμούς λαμβάνεται υπ' όψιν μόνο το νερό καθώς η μάζα του αέρα θεωρείται αμελητέα.

Εξίσωση μηχανικής ενεργειας

Η γενική μορφή της μακροσκοπικής εξίσωσης διατήρησης της μηχανικής ενέργειας είναι:

$$\frac{d}{dt} \iiint_{OE} \left(\frac{u^2}{2} + gz \right) \rho dV + \iint_{EE} \left(\frac{u^2}{2} + gz + \frac{p}{\rho} \right) \rho (\mathbf{u} \cdot \mathbf{n}) dS + \dot{w}_L + \dot{w}_S = 0$$

(2)

όπου g : είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας, z : η απόσταση από το επίπεδο αναφοράς, και p : η πίεση στις επιφάνειες εισόδου ή εξόδου του νερού. Ο πρώτος όρος εκφράζει τον ρυθμό αλλαγής της μηχανικής ενέργειας εντός του όγκου ελέγχου, ο δεύτερος αντιπροσωπεύει την καθαρή εκροή μηχανικής ενέργειας και έργου πίεσης δια μέσου της επιφάνειας ελέγχου, ο τρίτος τον ρυθμό απωλειών μηχανικής ενέργειας λόγω τριβών στο εσωτερικό του όγκου ελέγχου, και ο τέταρτος το ρυθμό προσφοράς αξονικού έργου στο περιβάλλον του όγκου ελέγχου.

Γίνεται δεκτό ότι:

Η κινητική ενέργεια και το έργο πίεσης του νερού των βροχοπτώσεων είναι αμελητέα σε σχέση με την αντίστοιχη δυναμική ενέργεια. Αυτό δικαιολογείται, όσον αφορά την κινητική ενέργεια, από την μικρή ταχύτητα με την οποία φθάνει το νερό της βροχής στο υδροφόρο, ενώ όσον αφορά το έργο πίεσης, από την μικρή πίεση (ατμοσφαιρική) που επικρατεί στην επιφάνεια του υδροφόρου, μέσω της οποίας τροφοδοτείται (επιφάνεια 1 της δεξαμενής).

1. $z_2=0$, δηλαδή σαν επίπεδο αναφοράς λαμβάνεται το δάπεδο της δεξαμενής

2. Το έργο πίεσης του νερού της δεξαμενής είναι αμελητέο, καθώς η πίεση στην επιφάνεια μέσω της οποίας εκφορτίζεται το υδροφόρο (επιφάνεια 2 της δεξαμενής) είναι μικρή (ίση με την ατμοσφαιρική).

4 Θεωρούμε ομοιόμορφα τα χαρακτηριστικά ροής στις επιφάνειες τροφοδοσίας και εκφόρτισης της δεξαμενής

5 Θεωρούμε τη ροή τυρβώδη, λαμβάνουμε τις απώλειες ενέργειας εξ' αιτίας της τριβής ανάλογες του τετραγώνου της ταχύτητας του νερού στη δεξαμενή (Maramathas, 2002).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ - ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΠΗΓΗΣ ΚΑΙ ΠΡΩΤΟΓΕΝΗΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ

Πηγές Σάμης

Στο βορειο-ανατολικό τμήμα του καρστικού συστήματος του Αίνου εκδηλώνονται δύο μέτωπα παράκτιων και υποθαλασσίων αναβλύσεων κατά μήκος ενός μεγάλου ρήγματος ΒΒΔ – ΝΝΑ διεύθυνσης που αποτελεί την φυσική προέκταση της ζώνης επώθησης της Ιονίου ζώνης στην ζώνη των Παξών. Στο νότιο άκρο του ρήγματος στον κόλπο της Σάμης εκδηλώνεται ένα μεγάλος αριθμός παράκτιων και υποθαλάσσιων αναβλύσεων με γνωστότερη αυτή του Καραβόμυλου και στο βόρειο άκρο στον κόλπο της Αγ. Ευφημίας εκδηλώνεται ένα μέτωπο 1500 m παράκτιων καρστικών αναβλύσεων που συγκροτούν την ομώνυμη καρστική πηγή. Δεδομένου ότι η μέτρηση παροχής είναι σχεδόν αδύνατη αφού οι πηγές εμφανίζονται πάνω στην ακτογραμμή περιορίσαμε το ενδιαφέρον μας στις πηγές της Σάμης.

Οι αναβλύσεις των πηγών είναι τέσσερις:

1. Η πρώτη τοποθετείται στον βάλτο που δημιουργείται στο βόρειο άκρο της πόλης της Σάμης στην επαφή των κρητιδικών ασβεστολίθων με τις σύγχρονες προσχώσεις και λειτουργεί σαν υπερχείλιση του συστήματος αφού είναι διαλείπουσα.
2. Η επόμενη αποτελεί ένα μέτωπο αναβλύσεων πάλι στην επαφή των ασβεστολίθων και των προσχώσεων σε μια απόσταση 150 μ από την ακτή σε απόλυτο υψόμετρο +1.05 m και +1.63 m αντίστοιχα και οδηγούνται στην θάλασσα όπως και η προηγούμενη με τεχνικά κανάλια στα οποία γίνονται οι μετρήσεις των παροχών τους (Π1Α, Π1Β). Οι παροχές τους αντιπροσωπεύουν το 10% της συνολικής εκφόρτισης του συστήματος. Ο χημισμός τους είναι παραπλήσιος και η διακύμανση των χλωρίων κυμαίνεται από 1800 mg/lt έως 4000 mg/lt για την Π1Α και έως 3000 mg/lt για την Π1Β, ενώ η θερμοκρασία του νερού από 14 C έως 18.7 C.
3. Η τρίτη είναι αυτή του Καραβόμυλου (Π1) και αποτελεί την εκφόρτιση ενός φυσικού καρστικού έγκοιλου που βρίσκεται σε μια απόσταση 80 m από την ακτή και έχει απομονωθεί με τοιχείο 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..

4. Η τέταρτη πηγή εκδηλώνεται σε ένα μικρό κόλπο 350 m βορειότερα του Καραβόμυλου σε μια απόσταση 4-5 m από την ακτογραμμή σε υψόμετρο +0.10 m και η μέτρηση της παροχής της προβληματική αφού εξαρτάται από τον κυματισμό της θάλασσας. Αποτελεί όμως μια ενδεικτική μέτρηση αφού ως ποσοστό συμβάλλει καθοριστικά στην δίαιτα του μετώπου. Από τις ενδεικτικές τιμές της μετρηθείσας παροχής προκύπτει ότι αυτή κυμαίνεται μεταξύ 25% και 50% της συνολικής παροχής.

Η σημαντικότερη όμως δυσκολία στον υπολογισμό του ισοζυγίου είναι η εκτίμηση της παροχής των υποθαλάσσιων εκφορτίσεων. Στον κόλπο έχουν επισημανθεί 12 υποθαλάσσιες εκφορτίσεις των οποίων η διάμετρος και το βάθος ποικίλει από θέση σε θέση. Η διάμετρος τους μεταβάλλεται στην διάρκεια του υδρολογικού κύκλου ανάλογα με την παροχή τους. Σύμφωνα με πληροφορίες δυτών υπάρχει διαλείπουσα υποθαλάσσια ανάβλυση που λειτουργεί ως υπεχειλιστής του συστήματος και βρίσκεται στο μεγαλύτερο βάθος από όλες τις υποθαλάσσιες αναβλύσεις και σε απόσταση 300 m από την ακτή που στην υγρή περίοδο και μετά από μεγάλες βροχοπτώσεις δημιουργεί διαμέτρους μέχρι και 500 m.

Η ίδια διαπίστωση σχετικά με την επίδραση της παλίρροιας που είχε γίνει από τους ντόπιους και αναφέρεται στον επηρεασμό της δίαιτας της πηγής κατά την διάρκεια της παλίρροιας επιβεβαιώθηκε και στον κόλπο της Σάμης. Η προσπάθεια που έγινε για την συσχέτιση της στάθμης της θάλασσας με την παροχή και την ποιότητα του νερού των πηγών δεν έδωσε αξιόπιστα αποτελέσματα εξαιτίας της ποιότητας των μετρήσεων της στάθμης της θάλασσας.

Για την εκτίμηση του ισοζυγίου εκτός των παροχών του ΙΓΜΕ χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα του μετεωρολογικού σταθμού του Αεροδρομίου του Αργοστολίου.

Συμπερασματικά θα μπορούσαμε να συνοψίσουμε τα παρακάτω:

Οι πηγές της Σάμης αποτελούν την συνολική εκφόρτιση του νότιου καρστικού συστήματος του Αίνου και έχουν παροχή $0.25 \text{ m}^3/\text{sec}$. Η λεκάνη τροφοδοσίας των καρστικών πηγών με βάση τις μετρημένες παροχές προσδιορίστηκε στα 40 km^2 αλλά είναι σίγουρο ότι με βάση το συνολικό αριθμό των αναβλύσεων η έκταση της λεκάνης τροφοδοσίας υπερβαίνει τα 80 km^2 . 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 $2,5 \text{ m}$. 47.
(Σμυρνιώτης, 2010)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

5.1 ΜΟΝΤΕΛΟ –ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΗΓΗΣ

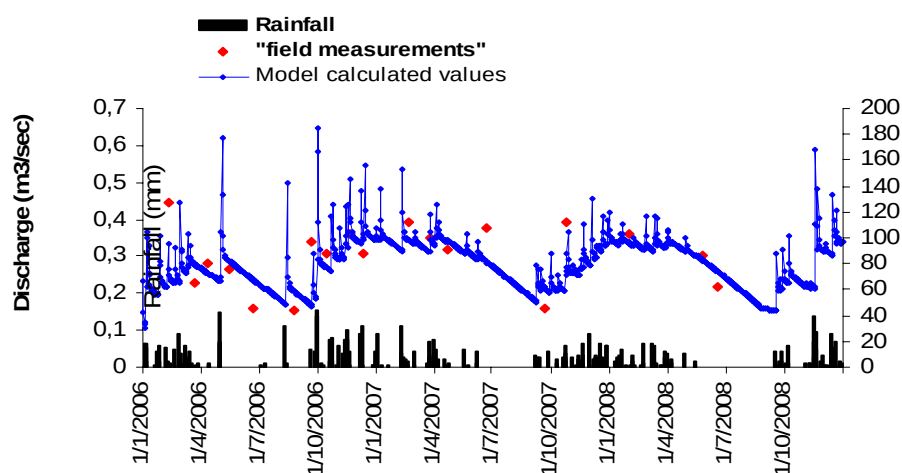
5.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

5.1 ΜΟΝΤΕΛΟ –ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΗΓΗΣ

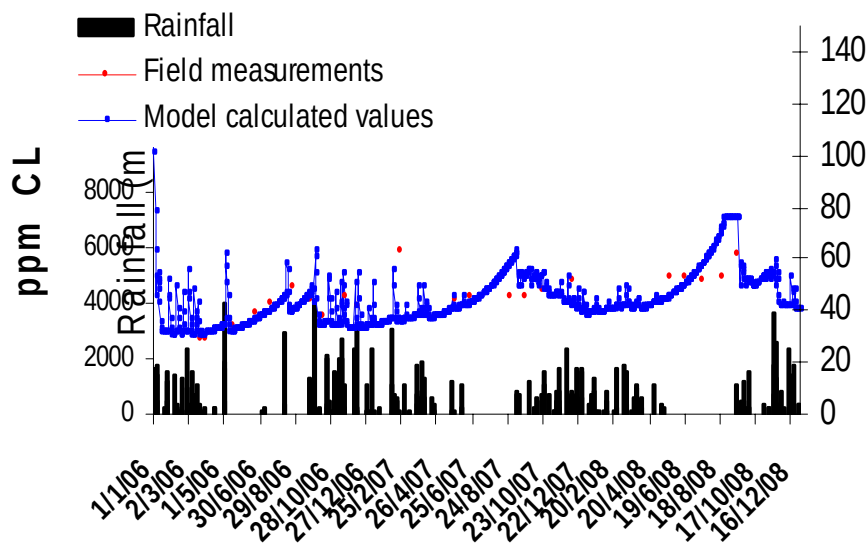
Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση της πηγής του Καραβόμυλου είναι το μοντέλο Modekarst που δημιουργήθηκε στο Ε.Μ.Π. στα πλαίσια της Διδακτορικής Διατριβής του Αθανάσιου Μαραμαθά.

Μετά από επεξεργασία των δεδομένων από το μοντέλο έγινε επιτυχώς η προσομοίωση της πηγής.

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΗΓΗΣ



Σχήμα 5.1 Σχέση απορροής -χρόνου



Σχήμα 5.2 Σχέση χλωριόντων -χρόνου

5.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Η προσομοίωση αφορά το χρονικό διάστημα από 2/1/2006 έως 31/12/2008 και θεωρείται επιτυχής παρ' όλο που ελήφθησαν υπ' όψιν μόνο οι μετρήσεις του βροχομέτρου στον Καραβόμυλο καθώς δεν υπήρχε άλλο βροχόμετρο στην περιοχή. Το ότι είναι επιτυχής αποδεικνύεται από την καλή σύμπτωση τόσο του υπολογισμένου από το μοντέλο υδρογραφήματος όσο και της υπολογισμένης καμπύλης χλωριόντων με τα αντίστοιχα πραγματικά, που έχουν προκύψει από μετρήσεις στο πεδίο. Το βροχόμετρο του Καραβόμυλου δεν αντιπροσωπεύει καλά την περιοχή τροφοδοσίας της πηγής, κυρίως όσον αφορά το ύψος των βροχοπτώσεων και όχι τόσο την κατανομή τους στον χρόνο, διότι βρίσκεται σε χαμηλό υψόμετρο (22m) ενώ η περιοχή τροφοδοσίας (βουνό Αίνος υψ. 1600m) βρίσκεται σε σαφώς υψηλότερο μέσο υψόμετρο. Ως γνωστόν δέ οι βροχοπτώσεις μιάς περιοχής εξαρτώνται άμεσα από το υψόμετρο.

Η προσομοίωση έγινε με ενιαίο συντελεστή κατεΐσδυσης, ο οποίος υπολογίστηκε στο 61% περίπου. Συντελεστής κατεΐσδυσης είναι η ποσότητα του νερού που εισρέει στον

υδροφόρο ορίζοντα σε σχέση με την ποσότητα του νερού που προέρχεται από τις βροχοπτώσεις. Δηλαδή με άλλα λόγια συντελεστής 61% σημαίνει ότι το 61% του νερού των βροχοπτώσεων κατεισδύει και τροφοδοτεί τον υδροφόρο ορίζοντα που δίνει την πηγή, ενώ το υπόλοιπο 39% είτε ρέει επιφανειακά, είτε κυρίως επιστρέφει στην ατμόσφαιρα λόγω εξάτμισης και διαπνοής από τα φυτά.

Η περιοχή τροφοδοσίας υπολογίστηκε από το μοντέλο στα 22.500.000 m² περίπου. Αυτό σημαίνει ότι ο υδροφόρος ορίζοντας που δίνει την πηγή τροφοδοτείται από το νερό της βροχής που κατεισδύει (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.

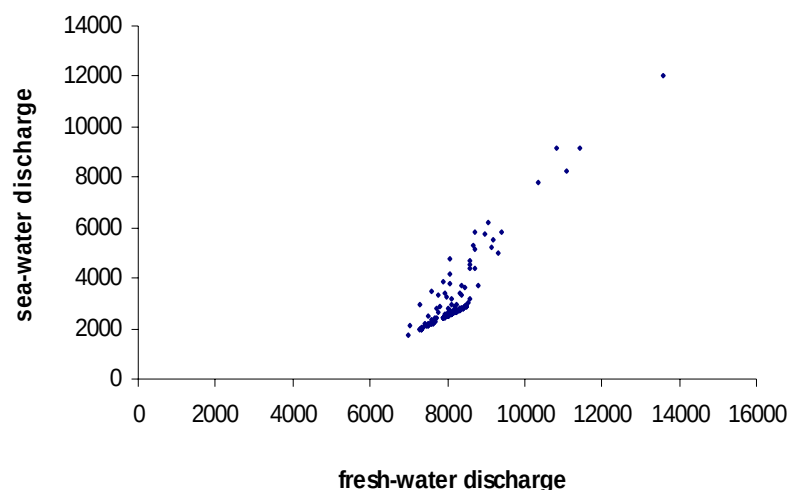
Ο καρστικός υδροφορέας παρουσιάζει διπλό πορώδες (dual porosity), αφ ενός μικρορωγμές και αφ' ετέρου μεγαλύτερες ρωγμές και ίσως και κάποιους αγωγούς (conduits). Κατά συνέπεια υπολογίστηκαν από το μοντέλο δύο συντελεστές εναποθήκευσης: Ένας για τις μικρορωγμές με τιμή: 9,9697E-07 και ένας για τις μεγαλύτερες 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 (CaCO₃) από το νερό της βροχής του οποίου το pH είναι μικρότερο του 7.

Το χρονικό διάστημα που απαιτείται για την ανταπόκριση της πηγής μετά από κάποια βροχόπτωση υπολογίζεται περίπου στις 4 ημέρες. Δηλαδή 4 ημέρες είναι ο χρόνος από την στιγμή που βρέχει έως την στιγμή που φτάνει το νερό στην πηγή.

Όλα τα παραπάνω 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 δίνει την πηγή.

Εκτός όμως από τα παραπάνω προσδιορίστηκε από το μοντέλο και ο μηχανισμός υφαλμύρινσης της πηγής, που είναι το φαινόμενο Venturi. Αυτό φαίνεται από τη γραφική παράσταση της παροχής θαλασσινού (αλμυρού) νερού σε σχέση με την παροχή γλυκού νερού (Σχ. 5.3). Φαίνεται από την γραφική αυτή παράσταση ότι η παροχή θαλασσινού νερού αυξάνεται όταν αυξάνεται η παροχή γλυκού νερού. Δηλαδή στα σημεία συνάντησης των αγωγών που φέρνουν το γλυκό νερό στην πηγή 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 πιο μεγάλη είναι η παροχή του γλυκού νερού.

Ο μηχανισμός υφαλμύρινσης είναι απαραίτητος 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.5.3 Γραφική παράσταση γλυκού – αλμυρού νερού

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.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης μπορούν να παρουσιάσουν την κατάσταση του υδροφόρου ορίζοντα. Τέτοιου είδους μελέτες μας δίνουν τη δυνατότητα βιώσιμης χρήσης του υδατικού δυναμικού και αλλαγής των δράσεών μας σε περιφερειακό και εθνικό επίπεδο. Η γνώση του δυναμικού δε και της υδρολογικής συμπεριφοράς μιάς περιοχής μπορεί να βοηθήσει ακόμη και στην πρόβλεψη και αντιμετώπιση πλημμυρικών φαινομένων όπως και στην εκτίμηση της αλλαγής των κλιματικών δεδομένων.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΠΟΣΟΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ - ΠΑΡΟΧΗ ΠΗΓΗΣ

ΕΘΝΙΚΗ ΜΕΤΕΩΡΟΛΟΓΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ

ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΚΛΙΜΑΤΟΛΟΓΙΑΣ

station_	code						
16685							
m30_year	6	18	Total		RAIN	CL	m3/sec
2006	0,7		0,7	1/1/2006	0,7		
2006	13,8	4,3	18,1	2/1/2006	18,1		
2006		0,9	0,9	3/1/2006	0,9		
2006	8,3	10,6	18,9	4/1/2006	18,9		
2006	4,5		4,5	5/1/2006	4,5		
2006	0,4	14,9	15,3	6/1/2006	15,3		
2006	0,2		0,2	7/1/2006	0,2		
2006		2,1	2,1	8/1/2006			
2006		12	12	9/1/2006			
2006	3,3	13,5	16,8	10/1/2006			
2006	4,8		4,8	11/1/2006			
2006	1,3	14,4	15,7	12/1/2006			
2006	1	0	1	13/1/2006			
2006	4,4		4,4	14/1/2006			
2006		3	3	15/1/2006			
2006	0,7		0,7	16/1/2006			
2006		14	14	17/1/2006			
2006	0,7		0,7	18/1/2006	2,1		
2006	0,8	0,2	1	19/1/2006			
2006	16,3	9,2	25,5	20/1/2006			
2006	7,8	2,8	10,6	21/1/2006			

2006	0,7	2,9	3,6	22/1/2006	12		
2006	1,3		1,3	23/1/2006	16,8		
2006	11,2	5,7	16,9	24/1/2006	4,8		
2006	0,2	1	1,2	25/1/2006			
2006	0,1		0,1	26/1/2006			
2006	0,2		0,2	27/1/2006			
2006	8		8	28/1/2006			
2006	10,9	0,6	11,5	29/1/2006			
2006	1,2	1,7	2,9	30/1/2006			
2006	1,2		1,2	31/1/2006			
2006	0,8		0,8	1/2/2006			
2006	3,5		3,5	2/2/2006			
2006		0,3	0,3	3/2/2006			
2006	0,3	0,5	0,8	4/2/2006			
2006	0,4		0,4	5/2/2006			
2006	3,1		3,1	6/2/2006			
2006	3,1		3,1	7/2/2006			
2006		0	0	8/2/2006		2815,21	
2006	2		2	9/2/2006			0,44
2006	3,8	0,9	4,7	10/2/2006			
2006	2,4	15,4	17,8	11/2/2006			
2006		42,8	42,8	12/2/2006			
2006	20,4		20,4	13/2/2006			
2006		0	0	14/2/2006			
2006	0,3		0,3	15/2/2006			
2006		0,4	0,4	16/2/2006			
2006		1	1	17/2/2006			
2006		2,4	2,4	18/2/2006			
2006	0,3		0,3	19/2/2006			
2006		31,3	31,3	20/2/2006			

2006	3,5		3,5	21/2/2006			
2006	14		14	22/2/2006			
2006		0,3	0,3	23/2/2006			
2006		12,3	12,3	24/2/2006			
2006	8,1	31,3	39,4	25/2/2006			
2006	44,3		44,3	26/2/2006			
2006	2,8	0,1	2,9	27/2/2006			
2006	0,4		0,4	28/2/2006			
2006		0,8	0,8	1/3/2006			
2006		21,2	21,2	2/3/2006			
2006		4,2	4,2	3/3/2006			
2006	22,4	0,9	23,3	4/3/2006			
2006	2,8		2,8	5/3/2006			
2006		5	5	6/3/2006			
2006		0	0	7/3/2006			
2006	0,7	0,1	0,8	8/3/2006			
2006	11,6	5	16,6	9/3/2006			
2006	0		0	10/3/2006			
2006	10	0,9	10,9	11/3/2006			
2006	17,5	4,2	21,7	12/3/2006			
2006	3,8		3,8	13/3/2006			
2006	2,7	1,9	4,6	14/3/2006			
2006		3,3	3,3	15/3/2006			
2006	21,1	0,6	21,7	16/3/2006			
2006	9,2	19,5	28,7	17/3/2006			
2006	0,8		0,8	18/3/2006			
2006	2,9	8,5	11,4	19/3/2006			
2006	2,2		2,2	20/3/2006			
2007		0,3	0,3	21/3/2006			
2007	6,8	18,4	25,2	22/3/2006			0,23
2007	0,3		0,3	23/3/2006			

2007	1,8		1,8	24/3/2006		2694,66	
2007		2,2	2,2	25/3/2006			
2007	0,2	32,2	32,4	26/3/2006			
2007	0,6	10,5	11,1	27/3/2006			
2007	1,6		1,6	28/3/2006			
2007	2,9	4,8	7,7	29/3/2006		2694,66	
2007	0,1		0,1	30/3/2006			
2007	6		6	31/3/2006			
2007	4,5	0	4,5	1/4/2006			
2007	0,2		0,2	2/4/2006			
2007	0,9		0,9	3/4/2006			
2007	0,5	0,4	0,9	4/4/2006			
2007	11,5		11,5	5/4/2006			
2007	0,9		0,9	6/4/2006			
2007		0,7	0,7	7/4/2006			
2007	1,8	1,4	3,2	8/4/2006			
2007	5,4	13,6	19	9/4/2006			
2007	7,2	0,9	8,1	10/4/2006			
2007	4	1	5	11/4/2006			0,28
2007	5,7		5,7	12/4/2006			
2007		8,4	8,4	13/4/2006			
2007	20,6		20,6	14/4/2006			
2007		14	14	15/4/2006			
2007	3,9	2,3	6,2	16/4/2006			
2007		5,7	5,7	17/4/2006			
2007	1,5		1,5	18/4/2006			
2007	3,5		3,5	19/4/2006			
2007	0	0,1	0,1	20/4/2006			
2007	7	6,2	13,2	21/4/2006			
2007		0,7	0,7	22/4/2006			
2007		0,8	0,8	23/4/2006			

2007	0		0	24/4/2006			
2007		0	0	25/4/2006			
2007		0	0	26/4/2006			
2007	6,1	5,7	11,8	27/4/2006			
2007	3,1		3,1	28/4/2006			
2007	0		0	29/4/2006			
2007		9,3	9,3	30/4/2006			
2007	0		0	1/5/2006			
2007	0,2	7,6	7,8	2/5/2006			
2007	7,9		7,9	3/5/2006			
2007	0		0	4/5/2006			
2007	12		12	5/5/2006			
2007		2,7	2,7	6/5/2006			
2007	6,1		6,1	7/5/2006			
2007		0	0	8/5/2006			
2007		7,6	7,6	9/5/2006			
2007		5	5	10/5/2006			
2007	6	1,5	7,5	11/5/2006			
2007	7,3	3,7	11	12/5/2006			
2007	1,7	14,3	16	13/5/2006			
2007	0		0	14/5/2006			
2007		7	7	15/5/2006			
2007		0,3	0,3	16/5/2006		3120,13	0,27
2007		0,8	0,8	17/5/2006			
2007	0,2	0,5	0,7	18/5/2006			
2007	0,5		0,5	19/5/2006			
2007	5,2	0,3	5,5	20/5/2006			
2007	8,6		8,6	21/5/2006			
2007	0,7		0,7	22/5/2006			
2007		5,1	5,1	23/5/2006			
2007	0,6	8,7	9,3	24/5/2006			

2007	11,5	6,3	17,8	25/5/2006			
2007	2,3	0,2	2,5	26/5/2006			
2007	25,3		25,3	27/5/2006			
2007	1		1	28/5/2006			
2007	6,8		6,8	29/5/2006			
2007		9,3	9,3	30/5/2006			
2007		7,8	7,8	31/5/2006			
2007	7,4		7,4	1/6/2006			
2007	0,4	2,7	3,1	2/6/2006			
2007	3,6	3,2	6,8	3/6/2006			
2007		0,7	0,7	4/6/2006			
2007		7,2	7,2	5/6/2006			
2007	15,6	2,2	17,8	6/6/2006			
2007	4,8	2,3	7,1	7/6/2006			
2007		5,7	5,7	8/6/2006			
2007	5,1	11	16,1	9/6/2006			
2007	2,6	14,7	17,3	10/6/2006			
2007	0,4		0,4	11/6/2006			
2007		0,4	0,4	12/6/2006			
2008	3,8		3,8	13/6/2006			
2008	0,9		0,9	14/6/2006			
2008		1,5	1,5	15/6/2006			
2008	3,2	4,4	7,6	16/6/2006			
2008	8,8	0,3	9,1	17/6/2006			
2008		1,2	1,2	18/6/2006			
2008	5,3	8,3	13,6	19/6/2006			
2008	0,8		0,8	20/6/2006			
2008	0,6	0,4	1	21/6/2006			
2008	0,9	0,2	1,1	22/6/2006		3651,97	0,16
2008	2,6	2,3	4,9	23/6/2006			
2008	2,1	6,8	8,9	24/6/2006			

2008	1,7		1,7	25/6/2006			
2008		0	0	26/6/2006			
2008	1,3		1,3	27/6/2006			
2008	0	0,8	0,8	28/6/2006			
2008		2,4	2,4	29/6/2006			
2008	9,9	8,3	18,2	30/6/2006			
2008	9,5	9,1	18,6	1/7/2006			
2008		0,2	0,2	2/7/2006			
2008	2,4	1,5	3,9	3/7/2006			
2008	8,3	8,4	16,7	4/7/2006			
2008	3,6	0,1	3,7	5/7/2006			
2008	0,8		0,8	6/7/2006			
2008		1,5	1,5	7/7/2006			
2008	6,9	0	6,9	8/7/2006			
2008	1,6		1,6	9/7/2006			
2008		11,5	11,5	10/7/2006			
2008	10,2	0,2	10,4	11/7/2006			
2008		1,4	1,4	12/7/2006			
2008	0,1	0,8	0,9	13/7/2006			
2008	5,9		5,9	14/7/2006			
2008	2,3		2,3	15/7/2006			
2008		0,5	0,5	16/7/2006			
2008	0,1		0,1	17/7/2006			
2008	0,2		0,2	18/7/2006			
2008	6	5,2	11,2	19/7/2006		3971,07	
2008	0,4		0,4	20/7/2006			
2008	4,3		4,3	21/7/2006			
2008		2,1	2,1	22/7/2006			
2008		0	0	23/7/2006			
2008	0		0	24/7/2006			
2008	0		0	25/7/2006		3722,88	

2008	0,3		0,3	26/7/2006			
2008	2,2		2,2	27/7/2006			
2008		0	0	28/7/2006			
2008	0	11,5	11,5	29/7/2006			
2008		0,2	0,2	30/7/2006			
2008	2,1		2,1	31/7/2006			
2008	5,1		5,1	1/8/2006			
2008		4,9	4,9	2/8/2006			
2008	12,4		12,4	3/8/2006			
2008	1,2		1,2	4/8/2006			
2008		2,9	2,9	5/8/2006			
2008		16,1	16,1	6/8/2006			
2008	2,9		2,9	7/8/2006			
2008		0	0	8/8/2006			
2008	3,3		3,3	9/8/2006			
2008		2,6	2,6	10/8/2006			
2008	3		3	11/8/2006			
2008		0,3	0,3	12/8/2006			
2008	19,1		19,1	13/8/2006			
2008	33,6	5,5	39,1	14/8/2006			
2008		7	7	15/8/2006			
2008		1	1	16/8/2006			
2008		27,3	27,3	17/8/2006			
2008	13,5		13,5	18/8/2006			
2008	1,4	10,6	12	19/8/2006			
2008	4,4		4,4	20/8/2006			
2008	8,9		8,9	21/8/2006			
2008		0,1	0,1	22/8/2006			
2008	1,9		1,9	23/8/2006			
2008	0,8		0,8	24/8/2006			
2008		2,8	2,8	25/8/2006			

2008	22,7	2,8	25,5	26/8/2006		4644,74	0,15
2008	3		3	27/8/2006			
2008		14,8	14,8	28/8/2006			
2008	0	0,2	0,2	29/8/2006			
2008	19,1		19,1	30/8/2006			
2008	1,2		1,2	31/8/2006			
2008		0	0	1/9/2006			
2008	4,1		4,1	2/9/2006			
2008		3,3	3,3	3/9/2006			
2008		0,5	0,5	4/9/2006			
				5/9/2006			
				6/9/2006			
				7/9/2006			
				8/9/2006			
				9/9/2006			
				10/9/2006			
				11/9/2006			
				12/9/2006			
				13/9/2006			
				14/9/2006			
				15/9/2006			
				16/9/2006			
				17/9/2006			
				18/9/2006			
				19/9/2006			
				20/9/2006			
				21/9/2006			
				22/9/2006		4077,44	0,34
				23/9/2006			
				24/9/2006			
				25/9/2006			

				26/9/2006			
				27/9/2006			
				28/9/2006			
				29/9/2006			
				30/9/2006			
				1/10/2006			
				2/10/2006			
				3/10/2006			
				4/10/2006			
				5/10/2006			
				6/10/2006			
				7/10/2006			
				8/10/2006			
				9/10/2006			
				10/10/2006			
				11/10/2006			
				12/10/2006			
				13/10/2006			
				14/10/2006			
				15/10/2006			
				16/10/2006		3545,60	0,31

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.1 ΠΑΡΟΧΗ-ΧΛΩΡΙΟΝΤΑ-ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΕΙΣ ΚΑΡΑΒΟΜΥΛΟΥ

Εθνική μετεωρολογική Υπηρεσία Δεδομένα ετών 2006-2008 (Αθήνα 15-12-2010)

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Angelini, P., Dragoni, W. (1997) Problem of modeling limestone springs: the case of Bagnara (North Apennines, Italy), Ground Water, Bezes, C. 1976. Contribution a la modelisation des systemes aquiferes karstiques ; etablissement du modele BEMER ; son application a 4 systemes karstiques du Midi de la France. These 3^e cycle. Universite de Montpellier, Memoires du CERGH.
2. Bonacci o. Fistanic I. Contribution to Hydrologiacal analysis of tha coastal karst spring Almyros ACTA CARSOLOGICA 35 / 2, 65-72, Λιουμπλιάνα 2006
3. Γιάνναρου Κ. Χριστιάννα. Υδρολογική διερεύνηση της πηγής Αλμυρού του Ηρακλείου Διπλωματική εργασία, ΕΜΠ 01-/09/2009 .
4. Castany, G. 1967. Traite pratique des eaux souterraines. Dunod, Paris. 121 pp.
5. Dreybrodt, W. 1988. Processes in Karst Systems: Physics, Chemistry, and Geology. Springer- Verlag, Berlin, Germany, p. 288.
- 6 .Dreybrodt, W. 1996. Principles of early development of karst conduits under natural and man made conditions revealed by mathematical analysis of numerical models. Water Resour. Res. 32, 2923-2935.
- 7 .Dreybrodt, W., 1990. The role of dissolution kinetics in the development of karstification in limestone: a model simulation of karst evolution. J. Geol. 98, 639-655.
- 8 .Dreybrodt, W., Siemers, J., 2000. Cave evolution on two-dimensional networks of primary fractures in limestone. In: Klimchouk, A., Ford, D., Palmer, A.N., Dreybrodt, W. (Eds), Speleogenesis: Evolution of karst aquifers. Nat. Speleol. Soc., Huntsville, Alabama, USA.

9 .Drogue, C. 1967. Essai de determination des composantes de l' ecoulement des sources karstiques. Evaluation de la capacite de retemtion par chenaux et fissures. Chronique d' Hdrogeologie, No 10, mars 1967, pp. 59-73.

V. 35, pp. 612-618.

10. Groves, C.G., Howard, A.D., 1994a. Minimum hydrochemical conditions allowing limestone cave development. Water Resour. Res. 30, 607-615.

11. .Howard, A.D., Groves, C.G., 1995. Early development of karst systems 2. Turbulent flow. Water Resour. Res. 31, 19-26.

12. Καλλέργης, G. 1980β. Το παράκτιο Καρστ. Οι παράγοντες διαμόρφωσής του και οι δυνατότητες αξιοποίησής του. Πρακτικά II Πανελληνίου Σεμιναρίου Υδρολογίας (ΥΠΕ.ΧΩ.ΔΕ.) Αθήνα 1980, σελ. 483-508

13. Maille, E. 1905. Essais d'Hydraulique souterraine et fluviale. Hermann, Paris.

14. Maramathas, A., 2006, A new approach for the development and management of brackish karst springs, Hydrogeology Journal Volume 14 Number 7 (2006) pp 1360-1366.

15. Maramathas, A., Pergialiotis, P., Gialamas, G., 2006, Estimation of sea intrusion mechanism of brackish karst springs by their simulation with the "MODKARST" deterministic model, Hydrogeology Journal Volume 14 Number 5 (2006) pp 657-662.

16. Maramathas, A., Maroulis, Z., Marinos-Kouris, D., 2003, A Brackish Karstic Springs Model. Application on Almiros Crete Greece, Ground Water Volume 41 N° 5 pp 608-620.

17. Μπεζές, Κ. 1980. Εφαρμογή ενός μαθηματικού μοντέλου στο καρστικό σύστημα Αλμυρού Αγ. Νικολάου Κρήτης. Πρακτικά II Πανελληνίου Σεμιναρίου Υδρολογίας (ΥΠΕ.ΧΩ.ΔΕ.) Αθήνα 1980, σελ. 509-524.

- 18 .Mijatovic, B., Bakic, M. 1967. Le Karst du Liban. Etude de son evolution d après les recherches hydrogeologiques. Chronique d' Hydrogeolog. ed. BRGM, No 10, pp. 95-107.
19. Palmer, A.N. 2000. Digital modeling of individual solution conduits. In: Klimchouk, A., Ford, D.C., Palmer, A.N., Dreybrodt, W. (Eds.), Speleogenesis: Evolution of karst aquifers. Nat. Speleol. Soc., Huntville, Alabama, USA.
20. Palmer, A.N., 1984. Recent trends in karst geomorphology. J Geol. Educ. 32, 247-253.
21. Palmer, A.N., 1991. The origin and morphology of limestone caves. Geol. Soc. Am. Bull. 103, 1-21.
22. (Παπαιωάννου, Α. 1999. Μηχανική των Ρευστών, Δεύτερη έκδοση. Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο Σχολή Χημικών Μηχανικών. Αθήνα, Τόμος Ι σελ. 279-370.)
23. Siemers, J., Dreybrodt, W., 1998. Early development of karst aquifers on percolation networks of fractures in limestone. Water Resour. Res. 34, 409-419.
24. Schoeller, H. 1967. Hydrodynamique dans le karst (ecoulement et emmagasinement). Chronique d' Hydrogeologie. V. 10, pp.7-21.
25. Σμυρνιώτης Χ., Ζαχαριουδάκης Γ., και Κ. Μανάκος(2010) ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ & ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΤΩΝ ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΩΝ ΤΩΝ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΝΕΡΩΝ & ΚΑΙ ΤΩΝ ΥΔΡΟΦΟΡΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΤΗΣ ΧΩΡΑΣ , ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΝΕΡΩΝ ΙΟΝΙΩΝ ΝΗΣΩΝ -- ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ, ΙΓΜΕ
26. Sweeting, M.M. 1972. Karst Landforms, pp. 208-218 and 235-269
27. Ψαριανός, Π., 1969. Επίτομος Φυσική Γεωγραφία. Γεωλογικό τμήμα Εθνικού Καποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών, σελ. 204-218