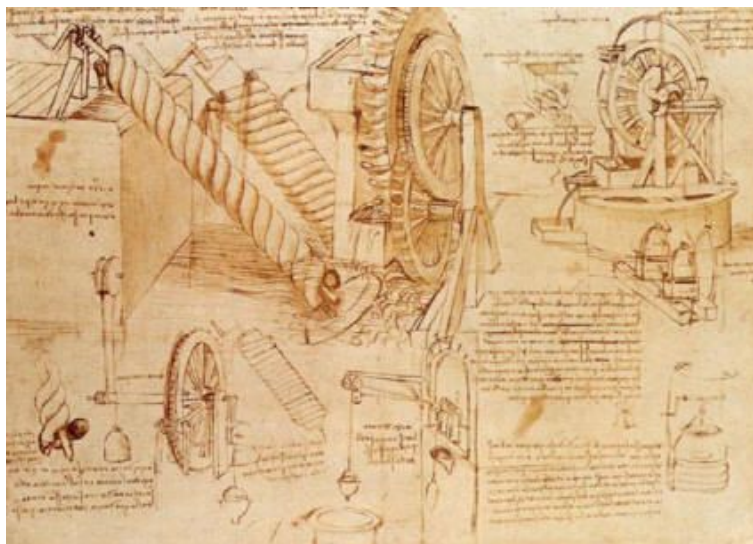




ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΕΛΕΓΧΟΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ & ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**"Μοντελοποίηση της Υπόγειας Ροής
της Λεκάνης Απορροής του Ποταμού Ευρώτα"**



ΜΑΡΙΑ ΠΟΛΥΧΡΟΝΑΚΗ
ΠΟΛΙΤΙΚΟΣ ΜΗΧΑΝΙΚΟΣ

Εξεταστική επιτροπή:

ΚΑΡΑΤΖΑΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ (Επιβλέπων)

ΝΙΚΟΛΑΪΔΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

ΠΑΛΑΙΟΛΟΓΟΣ ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ

Χανιά, 2011

Το νερό είναι αρχή
και καταγωγή
όλων των πραγμάτων

Θαλής ο Μιλήσιος
(630/635 π.Χ. - 543 π.Χ.)

Ευχαριστίες

Με το πέρας της παρούσας μεταπτυχιακής διατριβής, νιώθω το χρέος να ευχαριστήσω τον κ. Γεώργιο Καρατζά, καθηγητή του Τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος, τόσο για την πολύτιμη βοήθεια και κατανόηση που μου προσέφερε, όσο και για το θέμα που μου ανέθεσε. Επίσης, ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στην Dr. Ζωή Δόκου, μεταδιδακτορική ερευνήτρια του Τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος, για την συνεργασία, την υπομονή και την καθοδήγησή της σε όλο το διάστημα που χρειάστηκε. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής, τους κ. Νικόλαο Νικολαΐδη και κ. Ευάγγελο Παλαιολόγο, καθηγητές του Τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	1
-----------------------	---

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ	3
1.1 Υδρολογία	3
1.1.1 Εισαγωγή	3
1.1.2 Ιστορική εξέλιξη	4
1.1.3 Ο υδρολογικός κύκλος	5
1.1.4 Το υδατικό ισοζύγιο	6
1.1.5 Υδρολογική λεκάνη.....	12
1.2 Υδρογεωλογία	15
1.2.1 Εισαγωγή	15
1.2.2 Δομή φυσικού εδάφους	16
1.2.3 Πορώδες.....	17
1.2.4 Ενεργό πορώδες	18
1.2.5 Είδη γεωλογικών σχηματισμών	19
1.3 Υπόγειο νερό	20
1.3.1 Εισαγωγή	20
1.3.2 Κατακόρυφη κατανομή υπογείου νερού	22
1.3.3 Είδη υπογείου νερού.....	25
1.4 Υπόγειοι υδροφορείς	27
1.4.1 Εδαφικές στρώσεις.....	27
1.4.2 Είδη υπόγειων υδροφορέων.....	28
1.4.3 Ομοιογένεια και Ισοτροπία υδροφορέων	32
1.4.4 Εμπλουτισμός υπογείων υδροφόρων οριζόντων	32
1.4.5 Πηγές	33
1.5 Υδραυλικά χαρακτηριστικά υδροφορέων	36
1.5.1 Υδραυλική αγωγιμότητα	36
1.5.2 Μεταβιβασιμότητα	38
1.5.3 Αποθηκευτικότητα	38
1.6 Ροή υπογείων υδάτων	39
1.6.1 Εισαγωγή	39
1.6.2 Υδραυλικό φορτίο	40
1.6.3 Υδραυλικό δυναμικό	43
1.6.4 Ο νόμος του Darcy	44
1.6.5 Εξισώσεις υπόγειας ροής.....	47

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΟΧΗΣ	48
2.1 Η λεκάνη του ποταμού Ευρώτα	48
2.1.1 Εισαγωγή	48

2.1.2	Ιστορικές πληροφορίες	48
2.1.3	Ο ποταμός Ευρώτας	50
2.1.4	Το Δέλτα του Ευρώτα	52
2.1.5	Η λεκάνη απορροής του Ευρώτα	53
2.1.6	Χλωρίδα και πανίδα	55
2.1.7	Προβλήματα της λεκάνης απορροής του Ευρώτα	60
2.2	Γεωλογία της περιοχής	62
2.2.1	Γεωμορφολογία	62
2.2.2	Λιθολογία	64
2.2.3	Γεωτεκτονικά στοιχεία	65
2.2.4	Σεισμικότητα	69
2.2.5	Υδρογεωλογία	72
2.3	Μετεωρολογία και υδρολογία	73
2.3.1	Κλιματολογικά στοιχεία	73
2.3.2	Βιοκλίμα	75
3.3.3	Βροχοπτώσεις	76
3.3.4	Υδρογραφικό δίκτυο	78

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΡΟΗΣ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ		81
3.1	Μοντέλα προσομοίωσης	81
3.1.1	Μοντέλα	81
3.1.2	Προσομοίωση	82
3.1.3	Μοντέλα ροής υπογείων υδάτων	84
3.1.4	Τρόποι επίλυσης μοντέλων	85
3.1.5	Εφαρμογές	85
3.1.6	Το πρωτόκολλο της μοντελοποίησης	86
3.1.7	Το εννοιολογικό μοντέλο	89
3.1.8	Η κατασκευή του εννοιολογικού μοντέλου	90
3.2	Τύποι μοντέλων	91
3.2.1	Γενικά	91
3.2.2	Δισδιάστατα επιφανειακά μοντέλα	92
3.2.3	Ήμι-τρισδιάστατα μοντέλα	93
3.2.4	Δισδιάστατα profile και τρισδιάστατα μοντέλα	94
3.3	Θεμελιώδεις εξισώσεις ροής	94
3.4	Προσέγγιση των συστημάτων υπόγειας ροής	98
3.4.1	Προσέγγιση ως υδροφορέας	99
3.4.2	Προσέγγιση ως σύστημα συνεχούς ροής	101
3.5	Αριθμητικές μέθοδοι επίλυσης	101
3.5.1	Γενικά	101
3.5.2	Σύγκριση μεθόδων πεπερασμένων διαφορών και πεπερασμένων στοιχείων	102
3.5.3	Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών	104
3.5.4	Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων	105
3.6	Σχεδιασμός πλέγματος	107
3.6.1	Γενικά	107
3.6.2	Τύποι πλέγματος πεπερασμένων διαφορών και πεπερασμένων στοιχείων	108
3.7	Οριακές συνθήκες	110
3.7.1	Χειρισμός οριακών συνθηκών	110

3.7.2	Είδη οριακών συνθηκών.....	110
3.7.3	Προσδιορισμός ορίων.....	112
3.7.4	Προσομοίωση ορίων	113

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΚΩΔΙΚΑ PTC.....	116
4.1 Περιγραφή του λογισμικού Argus One και του κώδικα PTC	116
4.1.1 Το λογισμικό Argus One	116
4.1.2 Ο κώδικας PTC	117
4.1.3 Οριακές συνθήκες σταθερού υδραυλικού ύψους.....	118
4.1.4 Οριακές συνθήκες σταθερής ροής	119
4.1.5 Συνθήκες για τον υδροφόρο ορίζοντα.....	119
4.2 Εισαγωγή δεδομένων στο PTC	121
4.2.1 Αρχικά δεδομένα.....	121
4.2.2 Περίγραμμα περιοχής.....	125
4.2.3 Κατασκευή πλέγματος.....	126
4.2.4 Υψόμετρα	127
4.2.5 Υδραυλική αγωγιμότητα	129
4.2.6 Οριακές συνθήκες	129
4.2.7 Βροχή.....	133
4.2.8 Βαθμονόμηση.....	135
4.2.9 Εκτέλεση του μοντέλου.....	136
4.3 Αποτελέσματα.....	137
4.3.1 Υδραυλικά ύψη	137
4.3.2 Ταχύτητες ροής.....	143
4.3.3 Σενάρια συνθηκών άντλησης.....	143
 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	 152
 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	 154

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή εκπονείται με στόχο να προσομοιώσει την υπόγεια ροή στη λεκάνη απορροής του ποταμού Ευρώτα, με τη χρήση του μοντέλου PTC (Princeton Transport Code). Γνωρίζοντας ότι οι διαθέσιμοι υδατικοί πόροι αποτελούν κρίσιμο παράγοντα για την οικονομία και πηγή ζωής σε ένα υγροτοπικό σύμπλεγμα που τείνει να υποβαθμίζεται, η εξέταση του συνόλου της υδρολογικής λεκάνης έχει σκοπό να βοηθήσει στη γνώση των δεδομένων του συστήματος των υπογείων υδάτων της και να οδηγήσει στην ορθολογική διαχείρισή της.

Η περιοχή μελέτης βρίσκεται στο νοτιοανατολικό τμήμα της Πελοποννήσου, περιλαμβάνει όλο το νομό Λακωνίας και εκτείνεται βόρεια και βορειοανατολικά έως το νομό Αρκαδίας. Η περιοχή οριοθετείται, κυρίως, από τους δύο μεγάλους ορεινούς όγκους του Πάρωνα και του Ταΰγετου και καταλαμβάνει έκταση περίπου 2.420 km². Η περιοχή χαρακτηρίζεται από μεγάλο ενδημισμό τόσο χλωρίδας, όσο και πανίδας, και προστατεύεται από το ευρωπαϊκό δίκτυο NATURA.

Το γεωλογικό υπόβαθρο της περιοχής μελέτης χαρακτηρίζεται, γενικά, από γεωλογικούς σχηματισμούς που ανήκουν στην Παλαιοζωική Εποχή. Το γεωλογικό υπόβαθρο της περιοχής του Δέλτα του Ευρώτα, χαρακτηρίζεται από γεωλογικούς σχηματισμούς που ανήκουν στην Τεταρτογενή και στην Τριτογενή Περίοδο. Το υπόβαθρο των Τριτογενών σχηματισμών το αποτελούν, κυρίως, στρώματα δολομιτωμένων ασβεστόλιθων του κατώτερου Κρητιδικού. Οι κυριότεροι Τεταρτογενείς σχηματισμοί της περιοχής, είναι οι Ολοκαινικές προσχωσιγενείς αποθέσεις, οι οποίες αποτελούνται από αλλούβια φερτά υλικά ποταμοχειμάρριας δράσης, ψιλή άμμο και μικρό ποσοστό αργίλων.

Η περιοχή μελέτης χαρακτηρίζεται από τυπικό μεσογειακό κλίμα, με θερμό καλοκαίρι και ψυχρό χειμώνα, με μέση ετήσια θερμοκρασία που φθάνει τους 16 °C. Η μέση μηνιαία βροχόπτωση είναι της τάξης των 78 mm και η μέση ετήσια βροχόπτωση της τάξης των 932 mm με τάση αύξησης από τα νότια στα βόρεια και από τα ανατολικά στα δυτικά τμήματα.

Το βασικό υδρογραφικό δίκτυο της περιοχής μελέτης επηρεάζεται από την τοπική μορφολογία η οποία συμβάλει στην ταχεία συγκέντρωση των νερών στην κοίτη του Ευρώτα και έχει μήκος, περίπου, 1.500 Km.

Για την προσομοίωση της υπόγεια ροής έγινε χρήση του κώδικα PTC και εφαρμόστηκαν δύο σενάρια μηδενικής άντλησης. Το σύστημα των υπογείων υδάτων της περιοχής

μελετήθηκε για πέντε χρόνια, από το 2004 έως το 2009, θεωρώντας δύο διαφορετικές περιόδους φόρτισης για το κάθε έτος.

SYNOPSIS

The objective of this thesis is the simulation of the groundwater flow in the river basin of Eurotas, using the model PTC (Princeton Transport Code). Knowing that the available water resources are crucial to the economy and source of life in a hydrotopic system which tends to deteriorate, the simulation of the entire basin is performed to help in the understanding of the groundwater system data and to serve as a guide for rational water resources management of the area.

The study area is located in the southeastern part of the Peloponnese, contains the entire prefecture of Laconia and extends north and northeast the prefecture of Arcadia. The area is bounded mainly by two major mountain ranges Parnon and Taygetos and occupies an area of approximately 2.420 km². The area is characterized by high endemic flora and fauna and is protected by the European network NATURA.

The geological setting of the study area is generally characterized by geological formations belonging to the Paleozoic Era. The geological setting of Evrotas Delta is characterized by geological formations belonging to the Quaternary and Tertiary Period. The setting of the Tertiary formations, is mainly consisting of layers of dolomitic limestone of lower Cretaceous age. The main Quaternary formations of the region are Holocene alluvial deposits consist of alluvial debris of river and torrent action, fine sand and small quantity of clay. The study area is characterized by a typical mediterranean climate with hot summers and cold winters, with annual average temperature reaching 16 °C. The average monthly rainfall is about 78 mm and the average annual rainfall is about 932 mm with an increasing trend from south to north and from east to west areas. The main hydrographic network of the study region is influenced by local topography and contributes to the rapid concentration of water in the bed of the river Eurotas, which has a length of 1.500 Km.

The simulation of groundwater flow is performed using the finite element groundwater flow simulation model PTC. Two scenarios of decreasing pumping activity were implemented. The system of groundwater in the area was studied for five years, from 2004 to 2009, considering two different stress periods for each year.

ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΥΔΑΤΩΝ

1.1 Υδρολογία

1.1.1 Εισαγωγή

Η Υδρολογία είναι η επιστήμη που ασχολείται με τα ύδατα της γης, την παρουσία, την κυκλοφορία και κατανομή τους, τις φυσικές και χημικές ιδότητές τους καθώς και με τις αλληλεπιδράσεις τους με το περιβάλλον. Ο ορισμός αυτός προτάθηκε από μία αμερικανική επιτροπή, με αρκετές διαφοροποιήσεις, σε παλαιότερους ορισμούς των Horton (1931) και Meinzer (1942) και έγινε δεκτός κατά τη Διεθνή Υδρολογική δεκαετία (1965-1974) που οργανώθηκε από τον Οργανισμό Ηνωμένων Εθνών (Κουτσογιάννης & Ξανθόπουλος, 1999).

Η βασική διάκριση των κλάδων της υδρολογίας βασίζεται στον τρόπο και στον στόχο της προσέγγισης του αντικειμένου. Ο κλάδος της υδρολογίας που έχει κύριο στόχο την κατανόηση των υδρολογικών διεργασιών, των νόμων που τις διέπουν καθώς και των μηχανισμών που τις κατευθύνουν, είναι συχνά γνωστός με το γενικό όρο Υδρολογική Επιστήμη (Hydrologic Science). Συνώνυμοι όροι είναι η Περιβαλλοντική Υδρολογία (Environmental Hydrology) και η Φυσική Υδρολογία (Physical Hydrology). Ο κλάδος της υδρολογίας που έχει στόχο την ποσοτική εκτίμηση και πρόγνωση των υδρολογικών μεγεθών είναι γνωστός ως Τεχνική Υδρολογία (Engineering Hydrology) ενώ πρακτικά συνώνυμος είναι και ο όρος Εφαρμοσμένη Υδρολογία (Applied Hydrology). Η ανάπτυξη της τεχνικής υδρολογίας, ιστορικά υπαγορεύτηκε από τις ανάγκες σχεδιασμού των έργων ελέγχου της φυσικής υδρολογικής δίκτυας και είναι αυτή που καθιέρωσε στον αιώνα μας την υδρολογία ως σύγχρονη επιστήμη. Σήμερα, η τεχνική υδρολογία υποστηρίζει την ευρύτερη επιστημονική και τεχνολογική περιοχή της τεχνολογίας και διαχείρισης των υδροσυστημάτων (hydrosystems engineering and management), η οποία πρόκειται για συστήματα που αποτελούνται από το συνδυασμό φυσικών υδατικών σωμάτων (ποταμών, λιμνών, υπόγειων υδροφορέων) και των υδραυλικών έργων, συνήθως μεγάλης κλίμακας, που αποσκοπούν τόσο στην αξιοποίηση του νερού ως φυσικού πόρου, όσο και στην προστασία από την καταστροφική του δράση (πλημμύρες κτλ.) ως φυσικού κινδύνου. Στην πρώτη κατηγορία υδραυλικών έργων, ανάπτυξης και αξιοποίησης των υδατικών πόρων, περιλαμβάνονται έργα για ύδρευση, άρδευση και παραγωγή ενέργειας, ενώ στη δεύτερη κατηγορία, ελέγχου των

υδρολογικών κινδύνων, περιλαμβάνονται έργα προστασίας από τις πλημμύρες και τη διάβρωση. Στην περιοχή της τεχνολογίας και διαχείρισης των υδροσυστημάτων συμπεριλαμβάνονται τόσο ο σχεδιασμός και η κατασκευή των υδραυλικών έργων, όσο και η λειτουργία και διαχείριση των έργων αυτών. Ειδικότερα, η διαχείριση υδατικών πόρων, που σήμερα έχει αποκτήσει ιδιαίτερη σπουδαιότητα διεθνώς, αποσκοπεί στο σχεδιασμό και υλοποίηση πολιτικών κατανομής των χρήσεων του νερού μέσω τεχνικών, νομικών, οικονομικών και πολιτικών μηχανισμών (Κουτσογιάννης & Ξανθόπουλος, 1999).

Ένας δεύτερος τρόπος διάκρισης κλάδων ή ενοτήτων της υδρολογίας στηρίζεται στην εξειδίκευση του χώρου στον οποίο συμβαίνουν τα υδρολογικά φαινόμενα. Έτσι, διακρίνουμε δύο βασικές ενότητες της υδρολογίας:

- ⇒ την **Επιφανειακή Υδρολογία** (Surface Hydrology), που ασχολείται με τα επιφανειακά νερά και
- ⇒ την **Υπόγεια Υδρολογία** (Subsurface Hydrology), που ασχολείται με τα υπόγεια νερά.

Η σκοπιμότητα αυτού του διαχωρισμού βρίσκεται στις διαφορές της κινητικής και δυναμικής συμπεριφοράς των επιφανειακών και των υπόγειων νερών (Κουτσογιάννης & Ξανθόπουλος, 1999).

1.1.2 Ιστορική εξέλιξη

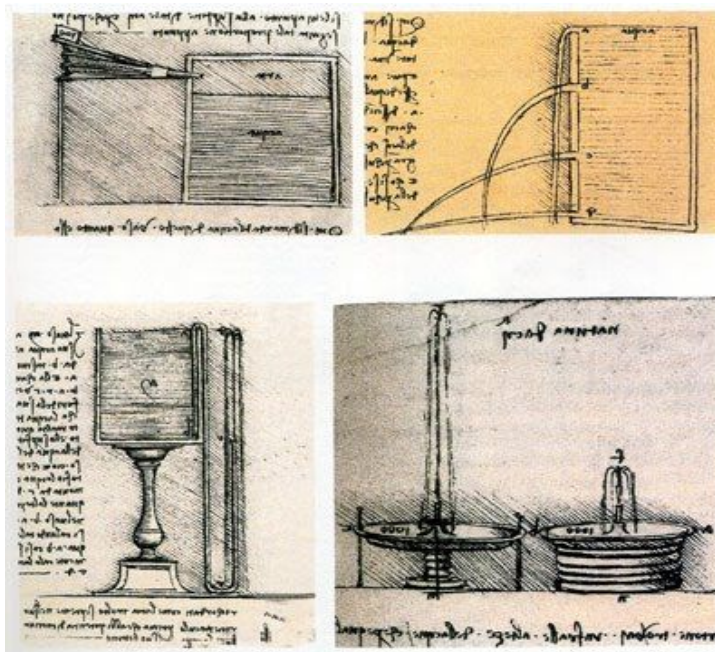
Τα υδραυλικά έργα είναι αρχαία όσο και οι πρώτοι οργανωμένοι ανθρώπινοι πολιτισμοί. Έως το 15^ο αιώνα μ.Χ. (προορθολογική περίοδος), υπήρχε απόλυτος εμπειρισμός σχετικά με τις επιστήμες που αφορούν στο νερό. Μέχρι την εποχή αυτή, είχαν κατασκευαστεί σημαντικά υδραυλικά έργα από άγνωστους μελετητές στην Ιταλία, στην Κρήτη, στην Κύπρο, στους ποταμούς Τίγρη και Ευφράτη, στο Νείλο, στην Κίνα και στη Συρία (Μαριολάκος, 2010).

Πολλά υδρολογικά φαινόμενα προσεγγίστηκαν από το Θαλή, τον Αναξιμένη, τον Ίππων, τον Αναξαγόρα, τον Εμπεδοκλή, τον Αριστοτέλη, τον Αρχιμήδη και τον Ήρων. Αργότερα, οι ιδέες των Ελλήνων φιλοσόφων μεταλαμπαδεύτηκαν στους ρωμαίους: Λουκρήτιο, Βιτρούβιο, Σενέκα και Πλίνιο. Σ' αυτή την περίοδο (6^{ος} αι. π. Χ.) ανήκουν και οι πρώτοι νόμοι για το νερό, οι οποίοι θεσμοθετήθηκαν από το Σόλωνα και αφορούν στη σωστή διαχείριση των υδάτων και στην πρόληψη για την ποιότητά του (Κουτσογιάννης & Ξανθόπουλος, 1999, Μαριολάκος, 2010).

Το διάστημα μεταξύ 15^{ου} και 19^{ου} αιώνα, αποτέλεσε περίοδο μετρήσεων και πειραματισμών. Κατά την περίοδο αυτή, υπήρξαν χαρακτηριστικοί ερευνητές όπως ο Leonardo Da Vinci (Εικ. 1.1), ο Perrault, ο Mariotte, ο Halley, ο Bernoulli, ο Pitot, ο Borda

και ο Chezy.

Η περίοδος μεταξύ 15^{ου} και Β΄ παγκοσμίου πολέμου, χαρακτηρίζεται ως περίοδος εμπειρισμού. Κατά το διάστημα αυτό, συντέθηκαν και εφαρμόστηκαν οι εμπειρικοί νόμοι κυρίως των: Poiseuille, Darcy, Kutter και Manning. Επίσης, εμφανίσθηκαν και ημιεμπειρικοί νόμοι όπως οι νόμοι των: Nicuradse 1932, Moody 1939, Shields 1936, Mayer-Peter 1934, Einstein 1942, Horton 1933, Theis 1935 και Gumbel 1941.



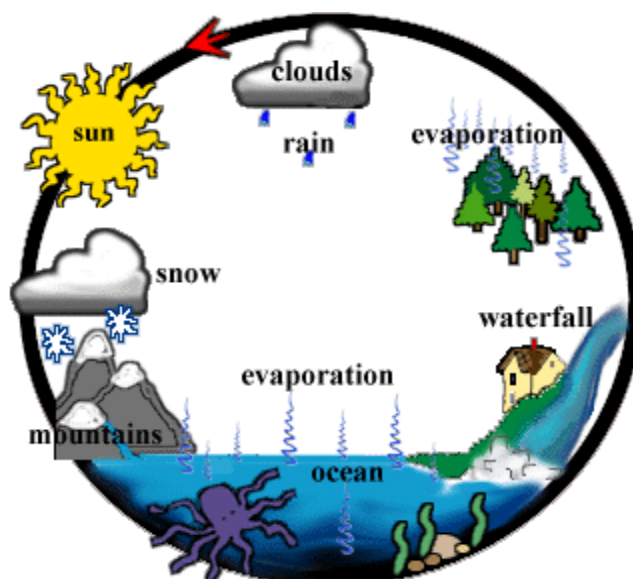
Εικόνα 1.1: Συγγράμματα του Leonardo Da Vinci (*Codex Madrid I*, «Η φύση του ύδατος»).

Τέλος, από το Β΄ παγκόσμιο πόλεμο έως σήμερα, με την ανάπτυξη των ηλεκτρονικών υπολογιστών και την διεπιστημονική υδρολογία, πραγματοποιείται και βελτιώνεται συνεχώς η επίλυση μαθηματικών ομοιωμάτων, ο τεχνοοικονομικός σχεδιασμός των υδραυλικών έργων, η αυτόματη καταγραφή, η μετάδοση και η αποθήκευση των υδρολογικών δεδομένων (Κουτσογιάννης & Ξανθόπουλος, 1999).

1.1.3 Ο υδρολογικός κύκλος

Ο υδρολογικός κύκλος (hydrologic cycle) ή κύκλος του νερού (water cycle), είναι το σύνολο των φαινομένων που διατηρούν σταθερά τα υδατικά αποθέματα που υπάρχουν στον πλανήτη (Σχ. 1.1). Στον κύκλο περιλαμβάνονται μια σειρά διαδικασιών με τις οποίες το νερό κυκλοφορεί μεταξύ υδρόσφαιρας, ατμόσφαιρας, ξηράς και θάλασσας. Σε αυτή την αλυσίδα το νερό εμφανίζεται με όλες τις μορφές του: υγρό, αέριο (υδρατμοί), στερεό (χιόνι, χαλάζι).

Το σύνολο της ενέργειας που κατευθύνει τον κύκλο του νερού, μέσα στην υδρόσφαιρα και στην ατμόσφαιρα, επιτυγχάνεται εξαιτίας της ηλιακής ακτινοβολίας (Perlman et al., 2005).



Σχήμα 1.1: Ο κύκλος του νερού (www.radford.edu).

1.1.4 Το υδατικό ισοζύγιο

Το υδατικό ισοζύγιο θεμελιώνεται με την αρχή διατήρηση της μάζας και αποτελεί τον απολογισμό του νερού που εισέρχεται, εξέρχεται και αποθηκεύεται σε ένα συγκεκριμένο υδρολογικό σύστημα (Σχ. 1.2). Για δεδομένη λεκάνη απορροής η εξίσωση της διαφοράς μεταξύ των εκροών και των εισροών με το ρυθμό αλλαγής της αποθήκευσης του νερού στη λεκάνη, σε καθορισμένο χρόνο, εκφράζει το υδατικό ισοζύγιο της λεκάνης:

$$\text{Εισροές} - \text{Εκροές} = \text{Μεταβολή της αποθήκευσης}$$

Ειδικότερα, η παραπάνω σχέση εκφράζεται:

$$P - R - E - T - I = \Delta s$$

Όπου:

P, ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα,

R, επιφανειακή απορροή,

E, εξάτμιση,

T, διαπνοή,

I, κατείσδυση,

Δs , μεταβολή υδατικού αποθέματος.

Τα παραπάνω μεγέθη μπορούν να εκφραστούν σε ύψος νερού (mm) ή σε όγκο νερού (m^3) ή σε ποσοστό επί τοις εκατό (%).

Οι εισροές μπορεί να είναι:

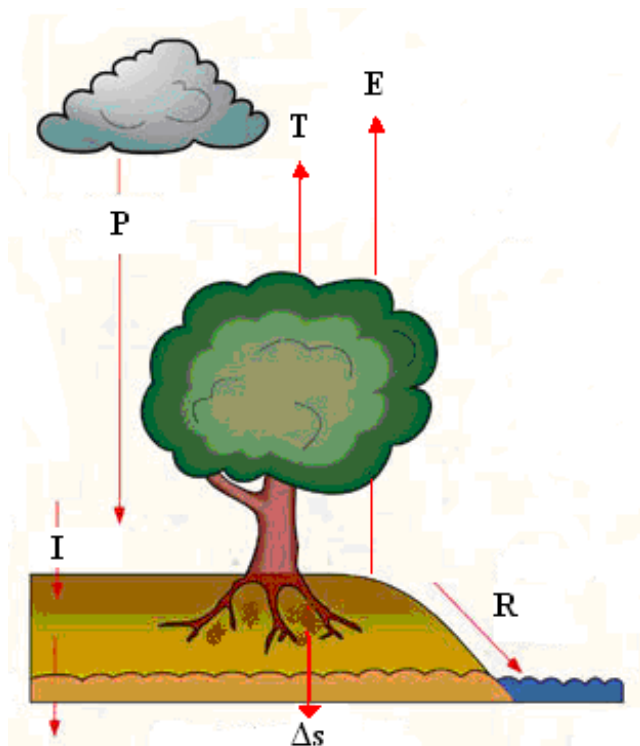
- ⇒ κατακρημνίσεις (βροχόπτωση, χιονόπτωση, χαλάζι) ή
- ⇒ εκροή ανάντη της λεκάνης.

Οι εκροές μπορεί να είναι:

- ⇒ απορροή (επιφανειακή, ενδιάμεση, υπόγεια),
- ⇒ εξάτμιση,
- ⇒ διαπνοή,
- ⇒ διήθηση,
- ⇒ απολήψεις.

Η αποθήκευση μπορεί να είναι:

- ⇒ επιφανειακή (πάνω στο έδαφος, σε υδατορεύματα και ταμιευτήρες),
- ⇒ υπεδάφια (στη ριζική ζώνη),
- ⇒ υπόγεια (υδροφορείς),
- ⇒ παρεμπόδιση ή
- ⇒ κατακράτηση (από βλάστηση ή κτίρια).



Σχήμα 1.2: Απεικόνιση υδατικού ισοζυγίου (www.infovisual.info).

Σημαντικό ρόλο στο υδατικό ισοζύγιο παίζουν επίσης, η σύσταση των πετρωμάτων, η

τεκτονική της περιοχής, η μορφολογία του εδάφους και οι κλιματολογικές συνθήκες (υδρογεωλογία της λεκάνης).

Η εξίσωση του υδατικού ισοζυγίου είναι εξαιρετικά σημαντική στην Υδρολογία και ιδιαίτερα στον υπολογισμό της εξατμισοδιαπνοής όταν είναι δυνατός ο προσδιορισμός των υπολοίπων παραγόντων (Μηλιαρέσης, 2004, Fratino, 2001).

Ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα

Τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα (Precipitation), είναι η πτώση του νερού από τα σύννεφα, με τη μορφή βροχής, χιονόνερου, χιονιού ή χαλαζιού. Αποτελεί τον κύριο τρόπο με τον οποίο το νερό της ατμόσφαιρας επιστρέφει στην επιφάνεια της γης. Η συχνότερη μορφή κατακρημνισμάτων είναι η βροχή. Τα σύννεφα περιέχουν υδρατμούς και σταγονίδια τα οποία είναι πολύ μικρά για να πέσουν ως κατακρημνίσματα, αλλά ταυτόχρονα είναι αρκετά μεγάλα ώστε να σχηματίζουν ορατά σύννεφα. Το νερό συνεχώς εξατμίζεται και συμπυκνώνεται στον αέρα. Το περισσότερο νερό που συμπυκνώνεται στα σύννεφα δεν πέφτει διότι υποστηρίζεται από ανοδικά ρεύματα αέρα (Perlman et al., 2005).

Επιφανειακή απορροή

Με τον όρο επιφανειακή απορροή (Surface runoff), εννοούμε τη ροή του νερού, υπό την επίδραση της βαρύτητας, κατά μήκος των φυσικών υδατορευμάτων (streams), (Ward and Robinson, 1989). Δηλαδή, είναι η απορροή των κατακρημνισμάτων πάνω από το εδαφικό ανάγλυφο. Μέρος των κατακρημνισμάτων που πέφτουν πάνω στο έδαφος, κυλούν επιφανειακά προς τα ποτάμια σχηματίζοντας την επιφανειακή απορροή. Στην πραγματικότητα τα πράγματα είναι πιο περίπλοκα, καθώς τα ποτάμια κερδίζουν και χάνουν νερό μέσω του εδάφους. Συνήθως, τμήμα της βροχής που πέφτει, ποτίζει το έδαφος, αλλά όταν το έδαφος είναι κορεσμένο ή αδιαπέρατο, το νερό αρχίζει να ρέει προς τα χαμηλά με τη μορφή απορροής (Perlman et al., 2005).

Η επιφανειακή απορροή ξεκινά όταν το επιφανειακό στρώμα κορεσθεί. Παράλληλα με την απορροή συνεχίζεται η κατακόρυφη κίνηση του νερού, από την επιφάνεια έως τον υδροφόρο ορίζοντα, μέχρι αυτό να φθάσει στον υδροφόρο ορίζοντα. Η μέγιστη δυνατή ταχύτητα κίνησης του νερού ονομάζεται **διείσδυση**. Η διείσδυση λαμβάνει χώρα αφού το επιφανειακό στρώμα κορεσθεί (Μηλιαρέσης, 2004).

Οι κυριότεροι παράγοντες που επηρεάζουν την επιφανειακή απορροή είναι το κλίμα (ένταση βροχοπτώσεων, υγρασία αέρα, άνεμοι, εξάτμιση), η γεωμορφολογία (κλίση λεκάνης απορροής, υδρογραφική πυκνότητα), η λιθολογία (είδος πετρωμάτων, περατότητα), καθώς

και το είδος της φυτοκάλυψης. Μόνο το ένα τρίτο περίπου του όγκου των κατακρημνισμάτων που πέφτει πάνω στο έδαφος, απορρέει σε υδατορεύματα και γυρίζει στη θάλασσα. Τα υπόλοιπα δύο τρίτα, εξατμίζονται, ή διηθούνται προς τα υπόγεια νερά. Τμήμα της επιφανειακής απορροής χρησιμοποιείται επίσης από τον άνθρωπο για δικές του χρήσεις (Perlman et al., 2005).

Η επιφανειακή απορροή ποσοτικά εκφράζεται με εναλλακτικούς τρόπους και συγκεκριμένα σε όρους παροχής, όγκου ή ισοδύναμο ύψους. Η ποσοτική απεικόνιση της μεταβολής με το χρόνο της απορροής σε μια δεδομένη διατομή A ενός υδατορεύματος ονομάζεται **υδρογράφημα** (Κουτσογιάννης & Ξανθόπουλος, 1999).

Εξάτμιση

Η εξάτμιση (Evaporation), είναι μία φυσική διεργασία μέσω του οποίας το νερό γίνεται από υγρό αέριο, ή αλλιώς υδρατμός και αποτελεί το βασικό τρόπο με τον οποίο το νερό από υγρό ξαναμπαίνει στην ατμόσφαιρα και στον υδρολογικό κύκλο. Οι ωκεανοί, οι θάλασσες, οι λίμνες και τα ποτάμια παρέχουν περίπου το 90% της υγρασίας της ατμόσφαιρας, ενώ τα φυτά, μέσω της διαπνοής παρέχουν το υπόλοιπο 10% (Perlman et al., 2005).

Η θερμότητα (ενέργεια), που παρέχει ο ήλιος είναι απαραίτητη για την εξάτμιση. Η ενέργεια χρησιμοποιείται για να σπάσουν οι δεσμοί που κρατούν ενωμένα τα μόρια του νερού και γι' αυτό το νερό εξατμίζεται εύκολα στο σημείο βρασμού του (100°C), και εξατμίζεται πιο δύσκολα κοντά στο σημείο πήξης.

Η εξάτμιση από τη θάλασσα είναι ο κύριος τρόπος με τον οποίο το νερό περνά στην ατμόσφαιρα. Η μεγάλη επιφάνεια των ωκεανών (πάνω από το 70% της επιφάνειας της Γης καλύπτεται από ωκεανούς) επιτρέπει μεγάλης κλίμακας εξάτμιση. Σε παγκόσμιο επίπεδο, η ποσότητα νερού που εξατμίζεται είναι ίση με τη ποσότητα του νερού που επιστρέφει στην επιφάνεια της γης με τη μορφή κατακρημνισμάτων (Perlman et al., 2005).

Η εξάτμιση εξαρτάται από μετεωρολογικούς παράγοντες όπως: θερμοκρασία, σχετική υγρασία, ταχύτητα ανέμου, ατμοσφαιρική πίεση (Μηλιαρέσης, 2004).

Διαπνοή

Η διαπνοή (Transpiration), είναι το αποτέλεσμα βιολογικών διεργασιών μέσω της οποίας η υγρασία μεταφέρεται από τις ρίζες των φυτών μέχρι τους μικρούς πόρους που βρίσκονται στο κάτω μέρος των φύλλων όπου και μετατρέπεται σε υδρατμό και απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα. Η διαπνοή είναι μια αθέατη διαδικασία κατά την οποία γίνεται ουσιαστικά η εξάτμιση του νερού από τα φύλλα των φυτών. Εκτιμάται ότι περίπου 10% της υγρασίας στην

ατμόσφαιρα προέρχεται από τη διαπνοή των φυτών. Κατά τη διάρκεια της εποχής ανάπτυξης του φυτού, ένα φύλλο μπορεί να διακινήσει μέσω διαπνοής νερό πολλαπλάσιο του βάρους του, ενώ μια μεγάλη βελανιδιά μπορεί να διαπνεύσει 150.000 λίτρα νερό το χρόνο (Perlman et al., 2005).

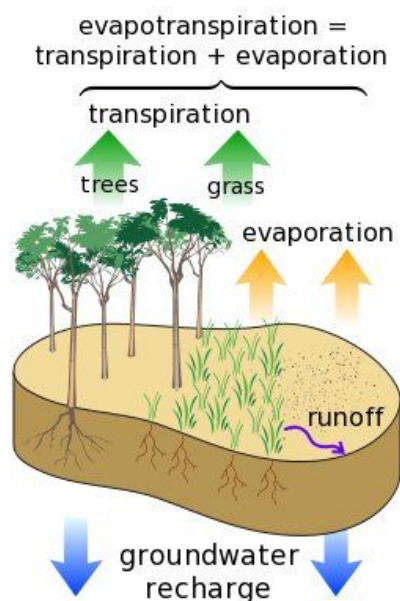
Η ποσότητα νερού που τα φυτά διαπνέουν μεταβάλλεται γεωγραφικά και χρονικά. Οι κυριότεροι παράγοντες που καθορίζουν τους ρυθμούς διαπνοής οι ίδιοι με την εξάτμιση και επιπλέον ο τύπος του φυτού η πυκνότητα και η φυτοκάλυψη. Η ποσότητα του διαθέσιμου προς διαπνοή νερού, καθορίζεται από τη διαφορά της **υδατοϊκανότητας** (ποσότητα υγρασίας που μπορεί να συγκρατήσει το έδαφος με επαρκή αποστράγγιση) μείον το **σημείο μόνιμης μάρανσης** (ποσότητα υγρασίας του εδάφους στην οποία τα φυτά αρχίζουν να μαραίνονται) (Fratino, 2001, Μηλιαρέσης, 2004).

Εξατμισοδιαπνοή

Τα φαινόμενα της εξάτμισης και της διαπνοής είναι δυσδιάκριτα μεταξύ τους γιατί συνυπάρχουν και αλληλοσυμπληρώνονται. Κατά συνέπεια δεν είναι δυνατόν να υπολογιστούν ξεχωριστά και έρευνες οι των τελευταίων ετών οδήγησαν στο διαχωρισμό της εξάτμισης του εδάφους από τη διαπνοή (Ritchie, 1974). Στην πραγματικότητα ενδιαφερόμαστε να υπολογίσουμε την συνολική ποσότητα ύδατος που χάνεται, κι έτσι δεν έχει ιδιαίτερη σημασία να καθορίσουμε αν αυτή η ποσότητα προέρχεται από εξάτμιση ή διαπνοή. Για το λόγο αυτό συνδυάζουμε (αθροίζοντας) αυτές τις δύο διεργασίες σε μία την οποία την ονομάζουμε εξατμισοδιαπνοή, (Evapotranspiration), (Σχ. 1.3) (Fratino, 2001). Ο όρος εξατμισοδιαπνοή ορίζεται σαν την ποσότητα που καταναλώνεται στη διαπνοή των φυτών και στην εξάτμιση των υγρών μερών του φυτού και του εδάφους κατά τη διάρκεια μιας ορισμένης περιόδου. Η πραγματική διαπνοή συσχετίσθηκε με επιτυχία με παραμέτρους όπως το μέγεθος των φύλλων του φυτού (leaf area index), την εδαφική υγρασία και την δυναμική διαπνοή, Εντούτοις τέτοια διάκριση δεν γίνεται για όλους τους πρακτικούς σκοπούς όπου η εξατμισοδιαπνοή θεωρείται ενιαία μεταβλητή και ίση με την υδατοκατανάλωση. Με τον όρο **υδατοκατανάλωση** (water consumption), των καλλιεργειών εννοούμε την ολική ποσότητα που χρησιμοποιείται για τη διαπνοή των φυτών, την εξάτμιση από τις επιφάνειες φυτών και εδάφους καθώς και την ποσότητα που χρειάζεται για κατασκευή των ιστών και του κορμού. Σε μια κανονική περίοδο αναπτύξεως η ποσότητα που παραμένει στο φυτό για τη δόμηση του είναι λιγότερο από το 1% της συνολικής ποσότητας που καταναλώθηκε στην εξάτμιση και τη διαπνοή (Τσακίρης, 2004).

Η εξατμισοδιαπνοή εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως: θερμοκρασία εδάφους-αέρα, υγρασία εδάφους-αέρα, ταχύτητα ανέμου, βαρομετρική πίεση, ηλιακή ακτινοβολία, είδος χλωρίδας, πορώδες, κ.λπ. (Fratino, 2001).

Η δυναμική εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας αναφοράς (potential evapotranspiration of reference crop, PET) είναι η εξατμισοδιαπνοή από μια επιφάνεια πλήρως καλυμμένη από γρασίδι ομοιόμορφου ύψους 8-15 cm, ελεύθερου από οποιαδήποτε ασθένεια με επαρκές διαθέσιμο εδαφικό νερό για την ανάπτυξη του (Doorenbos & Pruitt 1977, Penman 1948). Δηλαδή, είναι η μέγιστη δυνατή τιμή της εξατμισοδιαπνοής, με την προϋπόθεση ότι η εδαφική υγρασία στο ριζόστρωμα παραμένει στην υδατοϊκανότητα. Προφανώς, λόγω κυρίως των διαφορετικών αεροδυναμικών και ανακλαστικών χαρακτηριστικών των καλλιεργειών, ή δυναμική εξατμισοδιαπνοή κάθε καλλιέργειας δεν είναι ίση με αυτή της καλλιέργειας αναφοράς. Η δυναμική εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας PETc μπορεί να προβλεφθεί αν είναι γνωστή η εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας αναφοράς PET με την εισαγωγή ενός φυτικού συντελεστή που χαρακτηρίζει τη διαφορά των χαρακτηριστικών της καλλιέργειας από την καλλιέργεια αναφοράς (Kc) (Τσακίρης, 2004).



Σχήμα 1.3: Απεικόνιση εξατμισοδιαπνοής (www.treehugger.com).

Η εξατμισοδιαπνοή αποτελεί τη δυναμική τιμή του μεγέθους αυτού και είναι η δυσμενέστερη περίπτωση από πλευράς απωλειών μεταξύ βροχόπτωσης και απορροής μιας υδρολογικής λεκάνης. Η δυναμική εξατμισοδιαπνοή είναι η απώλεια ύδατος η οποία θα συμβεί εάν σε καμία χρονική στιγμή δεν παρατηρείται έλλειμμα ύδατος μέσα στο εδάφους για χρήση από την βλάστηση και δίνεται από τη σχέση (Fratino, 2001):

$$PET_c = K_c \times PET$$

Όπου:

PET, εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας αναφοράς ή πραγματική εξατμισοδιαπνοή [L/T],

PET_c, δυναμική εξατμισοδιαπνοή [L/T],

K_c, φυτικός συντελεστής (οι τιμές του δίνονται από πίνακες).

Κατείσδυση

Η κατείσδυση (Infiltration), αντιπροσωπεύει το μέρος των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων που διαπερνά την επιφάνεια του εδάφους και φθάνει στους υπόγειους υδροφορείς προστιθέμενο στα αποθέματα των υπόγειων νερών και μετέχει στις κινήσεις του υπόγειου νερού. Η κατείσδυση αποτελεί τη σημαντικότερη διεργασία για τον καθορισμό της υδροοικονομίας μιας περιοχής γιατί συμβάλλει στην ανανέωση των αποθεμάτων των υπόγειων υδροφορέων. Η ικανότητα κατείσδυσης (infiltration capacity) εξαρτάται από την υγρασία του εδάφους, τη λιθολογία, την κλίση και τον τύπο του εδάφους, τη βλάστηση, την ένταση, την κατανομή των βροχοπτώσεων κ.λπ. (www.geo.auth.gr).

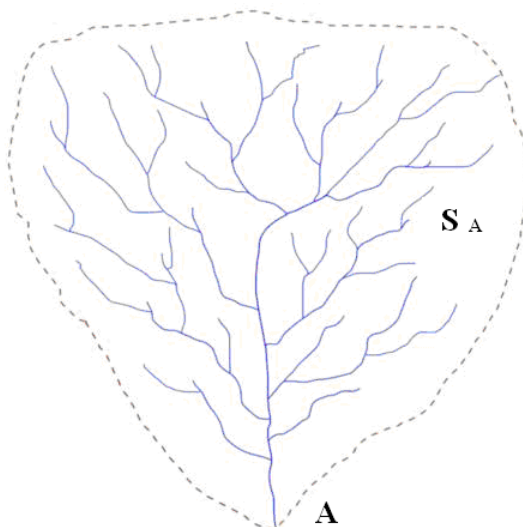
Το μέτρο της κατείσδυσης είναι ο συντελεστής κατείσδυσης, ο οποίος εκφράζει το ποσοστό του νερού που κατεisdύει σε σχέση με την ολική βροχόπτωση. Οι τιμές του συντελεστή κατείσδυσης κυμαίνονται από 3% (φλύσχης, φυλλίτες, σχιστόλιθοι, γνεύσιοι, ηφαιστειακά πετρώματα) έως 60% (ανθρακικά πετρώματα).

1.1.5 Υδρολογική λεκάνη

Για την κατανόηση της λειτουργίας του υδρολογικού κύκλου και του υδατικού ισοζυγίου βασική έννοια είναι η έννοια της υδρολογικής λεκάνης ή λεκάνης απορροής ενός ποταμού. Τα ποτάμια βοηθούν στην τροφοδοσία των υπόγειων υδροφορέων μέσω της διήθησης νερού από την κοίτη τους προς τα κατώτερα υπεδάφια στρώματα και επιστρέφουν στη θάλασσα το μεγαλύτερο τμήμα του νερού που εισέρχεται σε αυτά. Η λεκάνη απορροής είναι η εδαφική έκταση που φιλοξενεί το ποτάμι και όλους τους παραποτάμους του, ακόμη και τα μικρά ρυάκια που καταλήγουν σε αυτό.

Ειδικότερα, με τον όρο **υδρολογική λεκάνη** (watershed - drainage basin - river basin), νοείται η συνολική τοπογραφική επιφάνεια γύρω από ένα υδάτινο οικοσύστημα που οριοθετείται από τις κορυφές των γύρω βουνών ή υψωμάτων και συγκεντρώνει τα νερά των πηγών και κατακρημνισμάτων (βροχή, χιόνι, χαλάζι) στο υδάτινο οικοσύστημα ή πιο

συγκεκριμένα στο υδρογραφικό δίκτυο (Σχ. 1.4). Η υδρολογική λεκάνη ουσιαστικά, ορίζεται ως μία διατομή A ενός υδατορεύματος που αποστραγγίζεται από το υδατορεύμα προς τα ανάντη της εν λόγω διατομής και αποτελεί την γεωγραφική περιοχή S_A της οποίας οι απορροές που δημιουργούνται στο εσωτερικό της, ακολουθούν την πορεία τους προς τα κατάντη και διέρχονται μέσω της διατομής αυτής (Dingman, 1994).



Σχήμα 1.4: Απλουστευμένο σχήμα λεκάνης απορροής (<http://it.wikipedia.org>).

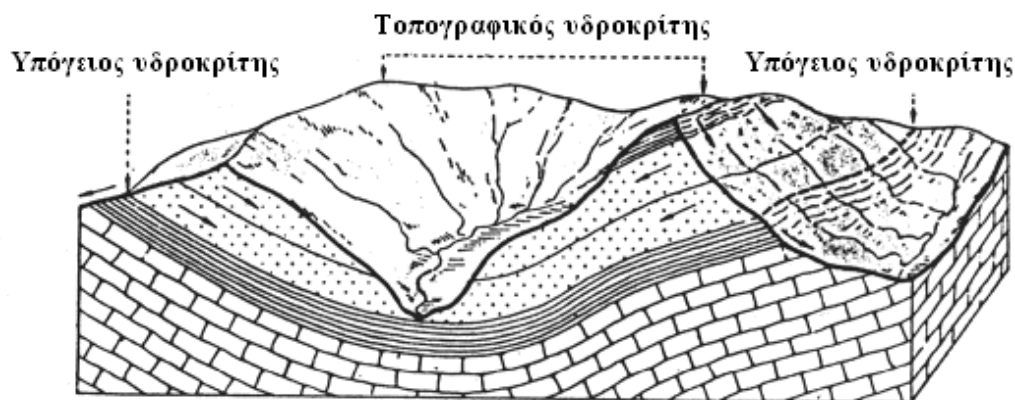
Η υδρολογική λεκάνη λειτουργεί, με όλα τα μορφολογικά, εδαφολογικά και λοιπά χαρακτηριστικά της, σαν ένα σύστημα μετασχηματισμού, ορισμένο στο χώρο S_A της λεκάνης (Κουτσογιάννης & Ξανθόπουλος, 1999).

Μέσα στη λεκάνη απορροής, η γραμμή συνάντησης των κατηφορικών επιφανειών του τοπογραφικού αναγλύφου, στην οποία συγκεντρώνονται τα απορρέοντα νερά, λέγεται **γραμμή συγκέντρωσης των νερών ή μισγάγκεια**. Κατά την αντίθετη διεύθυνση, οι επιφάνειες του τοπογραφικού ανάγλυφου είναι ανηφορικές. Στα όρια δύο γειτονικών λεκανών απορροής η νοητή γραμμή συνάντησης, που συνδέει τα υψηλότερα σημεία της τοπογραφικής επιφάνειας και διαχωρίζει δύο υδρολογικές λεκάνες απορροής, λέγεται **γραμμή διαχωρισμού των νερών ή υδροκρίτης** (Moisello, 1999, Desio, 1973).

Ο υδροκρίτης διέρχεται από τις κορυφές των τοπικών τοπογραφικών εξάρσεων που περικλείουν τον κλάδο ή τους κλάδους του υδρογραφικού δικτύου των οποίων την λεκάνη απορροής οριοθετούμε. Ο υδροκρίτης τέμνει σχεδόν κάθετα τις ισοϋψείς καμπύλες και δεν κινείται ποτέ παράλληλα προς αυτές. Ο υδροκρίτης δεν τέμνει ποτέ τους κλάδους του υδρογραφικού δικτύου. Θα πρέπει να σημειωθεί πως ο υδροκρίτης των επιφανειακών νερών, πολλές φορές δεν συμπίπτει με τον υδροκρίτη των υπόγειων νερών (Σχ. 1.5), ο οποίος καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από τη γεωλογική δομή μιας περιοχής και όχι αποκλειστικά

από τη μορφή του τοπογραφικού ανάγλυφου (Moisello, 1999, Desio, 1973).

Το **υδρογραφικό δίκτυο** είναι το σύνολο των επιφανειακών ρευμάτων νερού (ποταμών, χειμάρρων κλπ), που συνδέονται μεταξύ τους με καθορισμένο τρόπο (Σχ. 1.6) και δημιουργούν συγκεκριμένους τύπους απορροής. Ο τρόπος σύνδεσης των υδάτινων ρευμάτων και ο τύπος απορροής, είναι αποτέλεσμα του συνδυασμού των νόμων της κίνησης των ρευστών και των γεωλογικών χαρακτηριστικών της συγκεκριμένης περιοχής πάνω στην οποία κυλούν. Ένα υδάτινο ρεύμα με μόνιμη ροή λέγεται **ποταμός**, ενώ ένα ρεύμα παροδικής ροής λέγεται **χειμάρρος**. Επειδή οι βροχοπτώσεις αποτελούν έναν από τους κύριους παράγοντες που καθορίζουν την ροή, οι εποχικές τους διακυμάνσεις καθορίζουν το **υδρολογικό καθεστώς** (ή υδρολογική δίαιτα) των ποταμών (Moisello, 1999).

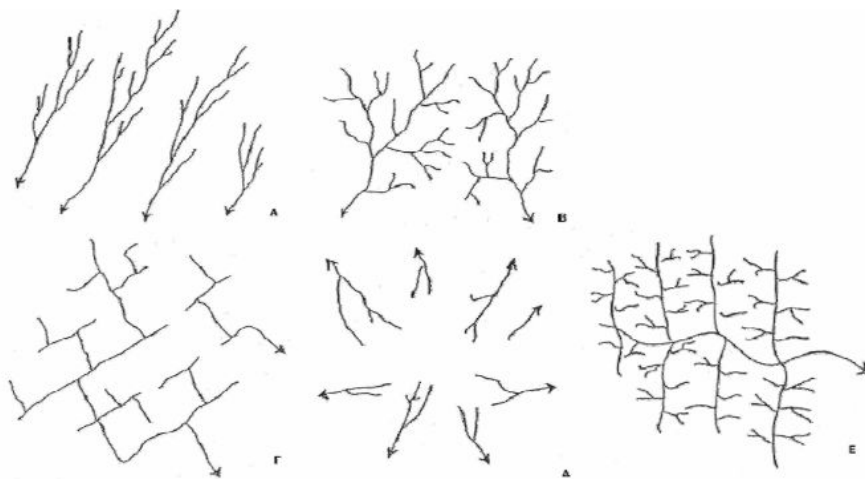


Σχήμα 1.5: Τοπογραφικός υδροκρίτης (ή υδροκρίτης επιφανειακών νερών) και υδροκρίτης υπόγειων νερών (Desio, 1973).

Κάθε μεγάλη λεκάνη απορροής μπορεί να χωριστεί σε μικρότερες επιμέρους υπολεκάνες (π.χ. μια για κάθε παραπόταμο). Οι λεκάνες απορροής είναι πολύ σημαντικές διότι η ποσότητα και η ποιότητα του νερού στα ποτάμια εξαρτώνται από το ό,τι συμβαίνει μέσα σε αυτές. Επίσης, η λεκάνη απορροής αποτελεί τμήμα του εδάφους με αυτόνομη επιφανειακή υδροοικονομία, δηλαδή έχει ανεξάρτητο υδρολογικό ισοζύγιο.

Οι λεκάνες απορροής των επιφανειακών υδάτων συνοδεύονται από ένα δίκτυο υπόγειων νερών, το οποίο, όμως, δεν ακολουθεί πάντα την ίδια πορεία με τα επιφανειακά ύδατα. Τα όρια, δηλαδή, της υδρολογικής λεκάνης δεν ταυτίζονται με τα όρια της υδρογεωλογικής λεκάνης γιατί είναι δυνατή η ύπαρξη υπόγειας πλευρικής τροφοδοσίας ή απώλειας του υδροφόρου ορίζοντα, που αναπτύσσεται σε μια υδρολογική λεκάνη από ή προς μια γειτονική υδρολογική λεκάνη. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τα υπόγεια ύδατα συχνά να υπάγονται σε διαφορετική λεκάνη απορροής από τα επιφανειακά κι έτσι να μην μπορούν να διαχωριστούν

μεταξύ τους. Επιπλέον, αλληλοεπηρεάζονται τόσο από την ποιότητα όσο και από την ποσότητα τους. Οι περιπτώσεις που η επιφανειακή και η υπόγεια λεκάνη δεν συμπίπτουν παρατηρούνται σχεδόν αποκλειστικά στις καρστικές περιοχές ή γενικά σε περιοχές με διαπερατούς σχηματισμούς σε επιφανειακή εμφάνιση και με μεγάλο πάχος. Από τα παραπάνω κατανοούμε το πόσο σημαντικό είναι να διαχωριστούν αυτές οι δύο έννοιες. Η υδρολογική λεκάνη αποτελεί, όπως είδαμε, μια φυσιογραφική ενότητα η οποία τροφοδοτεί με επιφανειακό νερό ένα υδρόρευμα. Η **υδρογεωλογική λεκάνη** αποτελεί, με τη σειρά της, μία υδρογεωλογική ενότητα η οποία περιέχει ένα μεγάλο υδροφορέα, ή περισσότερους αλληλοσυνδεδεμένους υδροφορείς, και αποτελεί μια υπόγεια αποθήκη τροφοδοσίας των υπόγειων υδροφόρων οριζόντων (Desio, 1973).



Σχήμα 1.6: Μορφές υδρογραφικού δικτύου: Α. Παράλληλη μορφή, Β. Δενδριτική μορφή, Γ. Ορθογώνια μορφή, Δ. Ακτινωτή μορφή, Ε. Κλιμακωτή μορφή (Σωτηριάδης & Ψιλοβίκος, 1974).

1.2 Υδρογεωλογία

1.2.1 Εισαγωγή

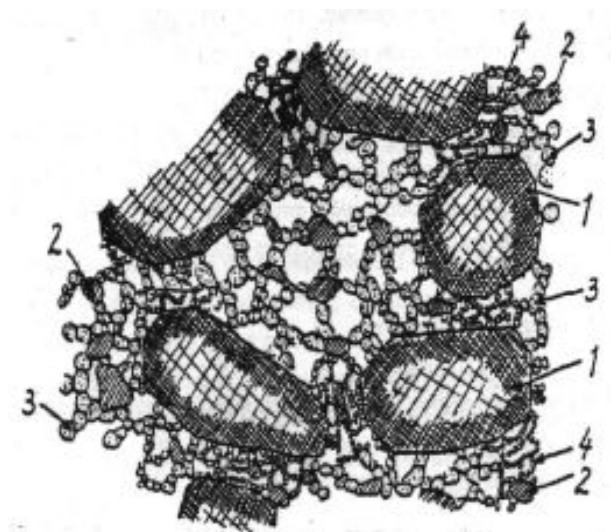
Η επιστήμη της Υδρογεωλογίας μελετά το υπόγειο νερό, δηλαδή το νερό που βρίσκεται στους εδαφικούς πόρους και διακινείται υπογείως. Ειδικότερα, εξετάζει την κίνηση του υπόγειου νερού και του νόμους που την διέπουν, τους τρόπους αποθήκευσης, κατανομής, αναζήτησης και εκμετάλλευσής του, τις μεταβολές των φυσικών και χημικών ιδιοτήτων του και τέλος, την προστασία του. Το υπόβαθρο για όλες τις παραπάνω μελέτες αποτελούν οι ποικίλοι γεωολογικοί σχηματισμοί και οι γεωολογικές δομές της περιοχής που μελετάται. Οι παράγοντες που καθορίζουν την υδρογεωλογία μιας περιοχής είναι:

⇒ η σύσταση των πετρωμάτων που την καλύπτουν,

- ⇒ η στρωματογραφία των πετρωμάτων,
- ⇒ η τεκτονική της ευρύτερης περιοχής,
- ⇒ η μορφολογία και
- ⇒ οι κλιματολογικές συνθήκες (Fidelibus, 2003).

1.2.2 Δομή φυσικού εδάφους

Το εδαφικό σώμα διακρίνεται από τον **εδαφικό σκελετό**, που αποτελείται από στερεά ύλη, και τα **διάκενα** (εδαφικοί πόροι) μέσα από τα οποία πραγματοποιείται η ροή (Σχ. 1.7). Γενικά, οι πόροι του εδάφους μπορούν να περιέχουν, εν μέρει, κάποια υγρή φάση (νερό) και εν μέρει κάποια αέρια φάση (υδρατμοί) (Νάνου, 2007).



Σχήμα 1.7: Δομή φυσικού εδάφους: 1. μεγάλοι κόκκοι άμμου, 2. μικροί κόκκοι άμμου, 3. μη στοιβαγμένα σωματίδια αργίλου μέσα σε μεγάλα διάκενα, 4. μικρά στοιβαγμένα σωματίδια αργίλου σε επαφή μεταξύ τους (Νάνου, 2007).

Τα κυριότερα είδη για το διαχωρισμό εδαφών είναι τα αμμώδη και τα αργιλώδη εδάφη (Πιν. 1.1):

Αμμώδη

Τα αμμώδη εδάφη είναι σύνθεση από μακροσκοπικά στερεά σωματίδια, στρογγυλεμένα ή γωνιώδη. Στραγγίζουν εύκολα, δεν διογκώνονται ή συρρικνώνονται κάτω από την επίδραση υγρασίας και παρουσιάζουν μικρό τριχοειδές δυναμικό. Αυτού του είδους τα εδάφη δεν παρουσιάζουν πλαστικότητα, δηλαδή κάτω από οποιεσδήποτε συνθήκες υγρασίας δεν διογκώνονται και δεν χάνουν τις μηχανικές τους ιδιότητες.

Αργιλώδη

Τα αργιλώδη εδάφη είναι σύνθεση από μικροσκοπικά στερεά σωματίδια με πλακοειδές

σχήμα. Η επιφάνεια των στερεών σωματιδίων είναι σημαντικά μεγαλύτερη από αυτήν των αμμωδών εδαφών, γεγονός που εξηγεί την επίδραση σημαντικών μοριακών δυνάμεων μεταξύ των αργιλικών στερεών και του νερού. Είναι πρακτικώς αδιαπέρατα, διογκώνονται και συρρικνώνονται σημαντικά κάτω από μεταβολές υγρασίας και κατέχουν μεγάλο τριχοειδές δυναμικό.

Οι ιδιότητες στα συνήθη εδάφη είναι ενδιάμεσες αυτών που αναφέρθηκαν παραπάνω. Τα αμμώδη εδάφη πλησιάζουν περισσότερο το ιδεατό πορώδες μέσο, ενώ τα αργιλώδη εδάφη είναι πρακτικά αδιαπέρατα (Νάνου, 2007).

Πίνακας 1.1: Χαρακτηρισμός εδαφών (Bouwer, 1978).

Χαρακτηρισμός εδαφών	Διάμετρος κόκκων
Άργιλος	0 – 2 μm
Ιλύς	2 – 50 μm
Άμμος	
⇒ πολύ λεπτή άμμος	50 – 100 μm
⇒ λεπτή άμμος	0,1 – 0,25 mm
⇒ μεσαία άμμος	0,25 – 0,5 mm
⇒ χονδρή άμμος	0,5 – 1 mm
⇒ πολύ χονδρή άμμος	1 – 2 mm
Χάλικες	> 2 mm
⇒ λεπτοί χάλικες	0,6 – 1,9 mm
⇒ χονδροί χάλικες	1,9 – 7,6 cm
⇒ μικρές κροκάλες	7,6 – 15,2 cm
⇒ μεγάλες κροκάλες	15,2 – 30,5 cm
⇒ κροκάλες	> 30,5 cm

1.2.3 Πορώδες

Το πορώδες (Porosity), (n), ή ολικό πορώδες, είναι ένα μέτρο των διακένων (ή πόρων, ή ρωγμών) (Σχ. 1.8) που υπάρχουν σε ένα πέτρωμα ή έδαφος και εκφράζεται με το λόγο του συνολικού όγκου των διακένων (V_{κ}) προς τον συνολικό όγκο του πετρώματος του εδάφους ($V_{\text{ολ}}$) (Fidelibus, 2003):

$$n = V_{\kappa} / V_{\text{ολ}}$$

Στον Πίνακα 1.2 παρουσιάζονται ενδεικτικές οι τιμές του ολικού πορώδους από 0-60%.

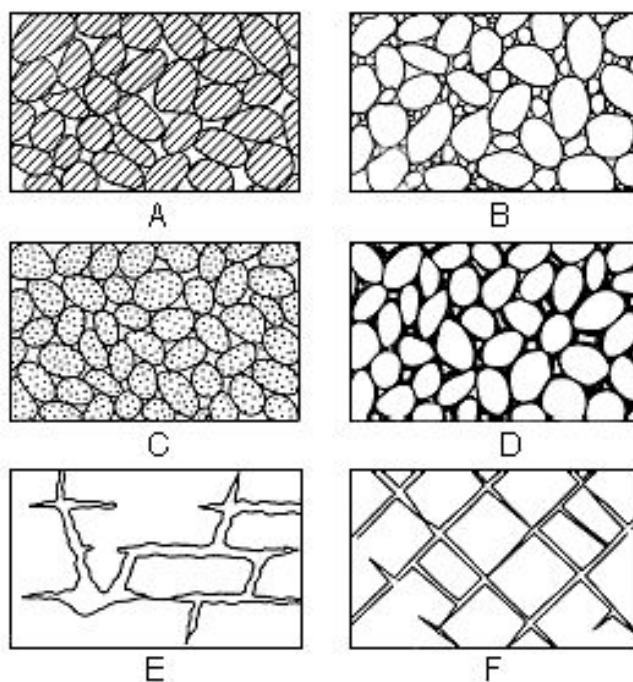
Οι παράγοντες που το επηρεάζουν είναι (Νάνου, 2007):

- ⇒ το σχήμα των κενών,
- ⇒ το μέγεθος και διαβάθμιση των κόκκων του εδάφους,
- ⇒ η διάταξη των κόκκων του εδάφους (Σχ. 1.6),

- ⇒ το υλικό πλήρωσης των κενών (cementation),
- ⇒ η γεωλογική ιστορία του εδάφους.

Πίνακας 1.2: Τιμές ολικού πορώδους (Καλλέργης, 1999).

Προσχώσεις	Πορώδες (%)	Ιζηματογενή πετρώματα	Πορώδες (%)	Κρυσταλλικά πετρώματα	Πορώδες (%)
Μικρά χαλίκια	24-36	Ψαμμίτες	5-30	Ρηγματωμένα	0-10
Μεγάλα χαλίκια	25-38	Ιλύολιθοι	21-41	Μη ρηγματωμένα	0-5
Χονδρόκοκκη άμμος	31-48	Ασβεστόλιθοι	0-40	Βασάλτες	3-35
Λεπτόκοκκη άμμος	26-53	Καρστοποιημένοι ασβεστόλιθοι	0-40	Αποσαθρωμένοι γρανίτες	34-57
Ιλύς	34-61	Σχιστόλιθοι	0-10		
Άργιλος	34-60				



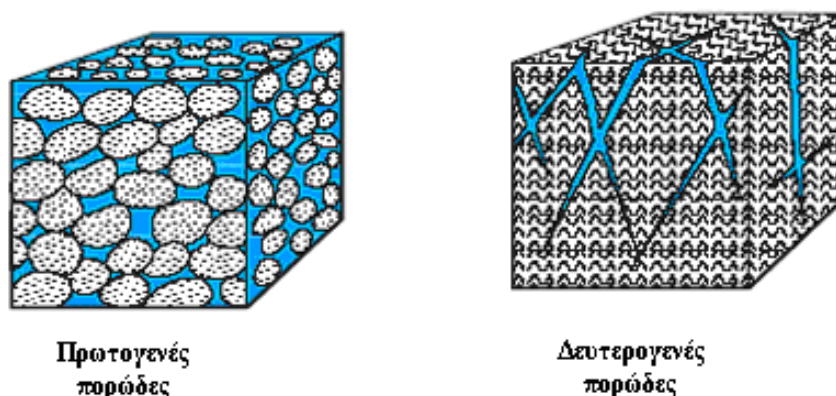
Σχήμα 1.8: Τύποι διάταξης κόκκων: Α) καλή διαβάθμιση υλικού με υψηλό πορώδες, Β) φτωχή διαβάθμιση με μικρό πορώδες, Γ) καλή διαβάθμιση σε πορώδη χαλίκια με υψηλό πορώδες, Δ) καλή διαβάθμιση με παρουσία ορυκτής ύλης και μειωμένο πορώδες, Ε) πορώδες από διάλυση, F) πορώδες από ρηγμάτωση (Meinzer, 1923).

1.2.4 Ενεργό πορώδες

Το ενεργό πορώδες (Effective porosity), αναφέρεται στο ποσό των διακένων που επικοινωνούν μεταξύ τους και επιτρέπουν τη ροή του υπόγειου νερού υπό την επίδραση της βαρύτητας ή της υδροστατικής πίεσης. Τα διάκενα που δεν συνεισφέρουν στη ροή αυτή καταλαμβάνονται από το νερό συγκράτησης. Στους κοκκώδεις σχηματισμούς το ενεργό

πορώδες κυμαίνεται από 0-3% (άργιλος) έως 20% (χαλίκια). Το πορώδες χαρακτηρίζεται ως (Σχ. 1.9):

- ⇒ **πρωτογενές:** το πορώδες που οφείλεται στα διάκενα που δημιουργήθηκαν κατά τη διάρκεια σχηματισμού του πετρώματος και ως
- ⇒ **δευτερογενές:** το πορώδες που οφείλεται στα διάκενα που δημιουργήθηκαν λόγω τεκτονισμού, αποσάθρωσης, διάλυσης, δράσης του έμβιου κόσμου κ.ά. Το πρωτογενές πορώδες εξαρτάται από τη διάταξη, το μέγεθος και τη μορφή των κόκκων (Fidelibus, 2003).



Σχήμα 1.9: Πρωτογενές και δευτερογενές πορώδες (Alessandro, 2010, <http://blogs.isidavinci.it>)

1.2.5 Είδη γεωλογικών σχηματισμών

Οι γεωλογικοί σχηματισμοί ταξινομούνται ανάλογα με τη δυνατότητα που παρέχουν στο νερό να διεισδύσει και να κινηθεί μέσα στη μάζα τους με την επίδραση της βαρύτητας σε τρεις κατηγορίες:

- ⇒ Υδροπερατούς
- ⇒ Ημιπερατούς
- ⇒ Αδιαπέρατους

Ο συντελεστής περατότητας εξαρτάται από το πορώδες, το καρστ ή τις ρωγμές του πετρώματος.

Υδροπερατοί σχηματισμοί

Ονομάζονται οι γεωλογικοί σχηματισμοί που επιτρέπουν τη διείσδυση και κυκλοφορία του νερού διαμέσου της μάζας τους και διακρίνονται σε δύο κατηγορίες:

- ⇒ **Μικροδιαπερατούς**

Πρόκειται για χαλαρά υλικά (άμμοι, χάλικες, κροκάλες) ή συμπαγή πετρώματα που η

υδροπερατότητά τους οφείλεται στο πρωτογενές πορώδες.

⇒ **Μακροδιαπερατούς**

Πρόκειται για πετρώματα που η υδροπερατότητά τους οφείλεται στο δευτερογενές πορώδες. Είναι σύνηθες οι διάφοροι γεωλογικοί σχηματισμοί να είναι μικρο- και μακροδιαπερατοί. Χαρακτηριστικό παράδειγμα υδροπερατών σχηματισμών είναι οι ανθρακικοί σχηματισμοί (Fidelibus, 2003).

Ημιπερατοί σχηματισμοί

Είναι οι γεωλογικοί σχηματισμοί που επιτρέπουν εν μέρει την κίνηση των νερών διαμέσου της μάζας τους, υπό την επίδραση της βαρύτητας ή της υδροστατικής πίεσης. Χαρακτηριστικό παράδειγμα ημιπερατών σχηματισμών αποτελούν οι σχηματισμοί των κροκαλοπαγών, ψαμμιτών και άμμων (Chiesa, 1992).

Αδιαπέρατοι σχηματισμοί

Είναι οι γεωλογικοί σχηματισμοί που δεν επιτρέπουν την κίνηση των νερών διαμέσου της μάζας τους, υπό την επίδραση της βαρύτητας ή της υδροστατικής πίεσης. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αδιαπέρατων σχηματισμών είναι οι μάργες και οι άργιλοι (Fidelibus, 2003).

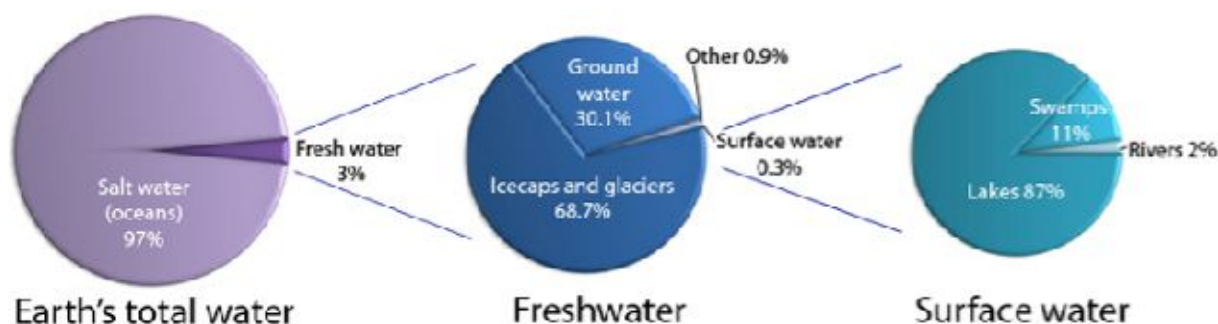
1.3 Υπόγειο νερό

1.3.1 Εισαγωγή

Το υπόγειο νερό είναι η ροή νερού και υδρατμών κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, ανεξαρτήτως κατάστασης, βάθους και προέλευσης. Δεν υπάρχει ακριβής διαχωρισμός μεταξύ επιφανειακών και υπόγειων υδάτων για τον κυριότερο λόγο ότι υπάρχει υδραυλική επικοινωνία μεταξύ τους (με ποταμούς, λίμνες, πηγές κλπ.). Επιπλέον, υπάρχει ποσοτική και ποιοτική αλληλεπίδραση και συνδιαχείριση (Νάνου, 2007). Τα υπόγεια νερά συνήθως καταλαμβάνουν μεγάλες σε έκταση επιφάνειες κάτω από το έδαφος και κινούνται με μικρές ταχύτητες ροής, αποτελούν μέρος του υδρολογικού κύκλου και αντιστοιχούν περίπου στο 30% του συνολικού νερού στον πλανήτη (Σχ. 1.10).

Το υπόγειο νερό κινείται μέσα στα διάκενα των εδαφών και των πετρωμάτων τα οποία χαρακτηρίζονται ως διαπερατά ή υδροπερατά, όπως είδαμε παραπάνω. Οι όγκοι των γεωλογικών σχηματισμών στα οποία μπορεί να κινηθεί το υπόγειο νερό λέγονται υδροφορείς

ή υδροφόρα στρώματα και θα εξετασθούν παρακάτω. Το νερό εισέρχεται στο υπέδαφος από την επιφάνεια του εδάφους, είτε κατευθείαν από τις βροχοπτώσεις, είτε από σώματα επιφανειακού νερού (ποτάμια, λίμνες). Μετά, κινείται αργά σε ποικίλες αποστάσεις μέχρι να επιστρέψει στην επιφάνεια του εδάφους είτε με φυσική εκφόρτιση (πηγές), είτε με ανθρώπινη παρέμβαση (πηγάδια, γεωτρήσεις), είτε τέλος με τη διαπνοή των φυτών. Ο χρόνος παραμονής του υπόγειου νερού στο υπέδαφος αποτελεί την ηλικία του νερού, η οποία μπορεί να προσδιορισθεί με φυσικά ραδιοϊσότοπα, κυρίως το τρίτιο (^3H) και τον άνθρακα - 14 (^{14}C) (Fidelibus, 2003).



Σχήμα 1.10: Κατανομή νερού στον πλανήτη (www.sciencelearn.org.nz, The University of Waikato, 2009).

Προέλευση υπογείων υδάτων

Η κυριότερη προέλευση των υπογείων υδάτων είναι τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα (μετεωρικά νερά), ενώ ένα μικρό ποσοστό των υπόγειων νερών είναι **μαγματικής** ή κοσμικής προέλευσης, που εισέρχεται για πρώτη φορά στον υδρολογικό κύκλο (νεαρό νερό, juvenile). Το **συγγενετικό** (connate) είναι νερό που δεν έχει έλθει σε επαφή με την ατμόσφαιρα για μεγάλο χρονικό διάστημα. Το μαγματικό και το μεταμορφωμένο νερό συνδέονται με την άνοδο του μάγματος και τις διαδικασίες της μεταμόρφωσης των πετρωμάτων, αντίστοιχα (Fidelibus, 2003).

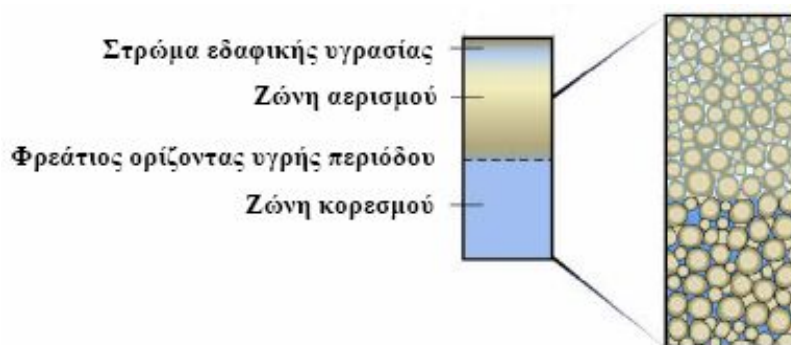
Ποιότητα υπογείων υδάτων

Ως προς την ποιότητά τους, τα υπόγεια νερά ρυπαίνονται δυσκολότερα από τα επιφανειακά, όμως ο καθαρισμός τους είναι δυσκολότερος και αντιοικονομικός ή πρακτικά αδύνατος (π.χ. υφαλμύριση). Το έδαφος αποτελεί φυσικό φίλτρο προστασίας. Η εκμετάλλευση των υπογείων υδάτων είναι ενεργοβόρα και δαπανηρή. Ο σχεδιασμός και η μελέτη για τη χρήση των υπογείων υδάτων αποτελεί διεπιστημονικό θέμα, απαιτεί την ύπαρξη μακροχρόνιων μετρήσεων των δεδομένων. Επίσης, απαιτείται η ύπαρξη κατάλληλου νομικού και θεσμικού πλαισίου ως προς την ποιότητα και την ποσότητα (Νάνου, 2007).

1.3.2 Κατακόρυφη κατανομή υπογείου νερού

Η παρουσία του υπόγειου νερού στο υπέδαφος μπορεί να διακριθεί σε δύο ζώνες (Σχ. 1.11):

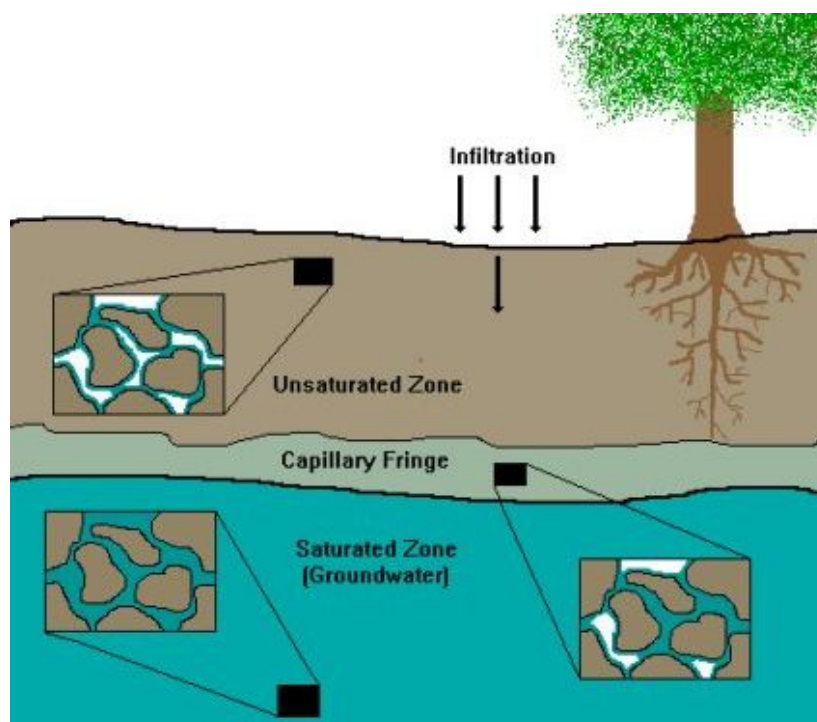
- ⇒ Ζώνη αερισμού ή ακόρεστη ζώνη
- ⇒ Ζώνη κορεσμού



Σχήμα 1.11: Κορεσμένη και ακόρεστη ζώνη (Κουτσογιάννης & Ξανθόπουλος, 1999).

Ζώνη αερισμού (Zone of aeration) ή ακόρεστη ζώνη (Vadose or unsaturated zone)

Είναι η ζώνη που καταλαμβάνει το τμήμα μεταξύ της στάθμης του υπόγειου νερού και της επιφάνειας του εδάφους. Η ζώνη αυτή αποτελείται από διάκενα, που κατέχονται μερικώς από νερό και μερικώς από αέρα και η ροή είναι διφασική (αέρας + νερό) με πίεση μικρότερη της ατμοσφαιρικής, (Σχ. 1.12), (Fidelibus, 2003).



Σχήμα 1.12: Είδη υπόγειου νερού (<http://oceanworld.tamu.edu>).

Η ποσότητα του νερού σε ένα μερικώς κορεσμένο μέσο εκφράζεται με την περιεκτικότητα κατ' όγκο σε νερό (θ), που ορίζεται ως:

$$\theta = V_w / V_T$$

Όπου:

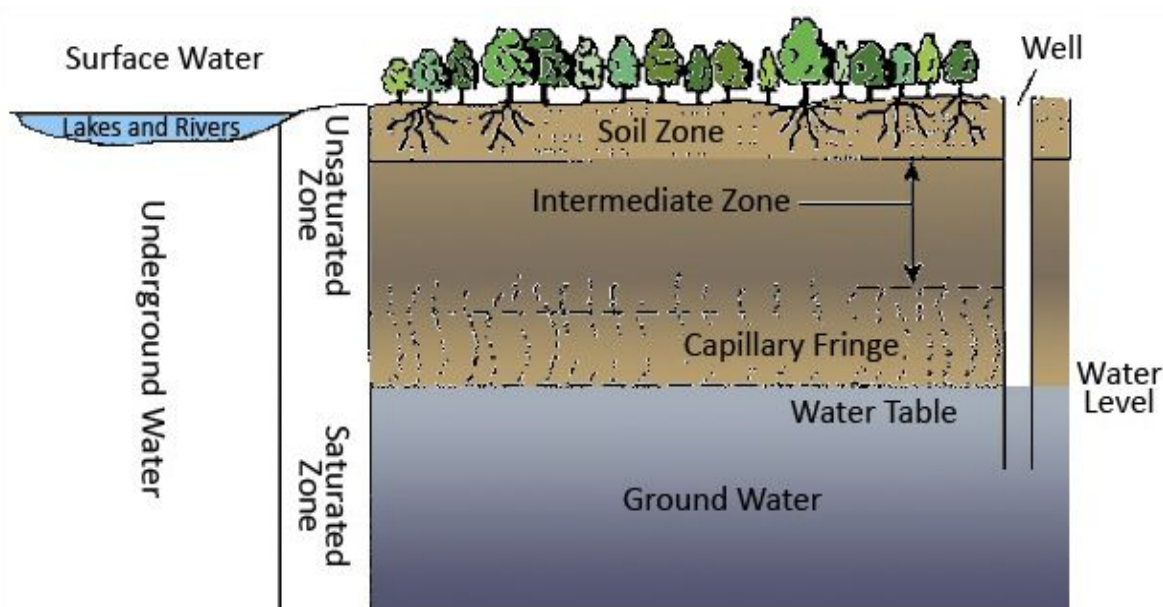
V_w , ο όγκος του νερού και

V_T , ο όγκος του μέσου.

Αν οι πόροι είναι πλήρως κορεσμένοι, ο περιεχόμενος όγκος νερού είναι ίσος με το πορώδες (n). Συνεπώς στην ακόρεστη ζώνη το περιεχόμενο νερό κυμαίνεται μεταξύ $0 \leq \theta \leq n$. Η ακόρεστη ζώνη υποδιαιρείται, (Σχ. 1.13), σε:

- ⇒ **Εδαφική ζώνη νερού** (Soil water zone), μικρού πάχους, ανάλογα με τον τύπο του εδάφους και τη βλάστηση, όπου η υγρασία μεταβάλλεται ανάλογα με τους κλιματικούς παράγοντες.
- ⇒ **Ενδιάμεση ζώνη** (Intermediate zone), όπου το νερό συγκρατείται με υγροσκοπικές και τριχοειδείς δυνάμεις και από την οποία το νερό πρέπει να περάσει κινούμενο προς τη ζώνη κορεσμού.
- ⇒ **Τριχοειδή ζώνη** (Capillary zone), με ύψος που μεταβάλλεται, αντιστρόφως ανάλογα, με το μέγεθος των διακένων (20-πλάσια στη λεπτόκοκκη άμμο από τους χάλικες). Η τριχοειδής ανύψωση (h_c) δίνεται από τη σχέση:

$$h_c = (2\tau / \epsilon R) \cos \phi$$



Σχήμα 1.13: Κατακόρυφη κατανομή υπογείου νερού (<http://whatcom.wsu.edu>).

Όπου:

τ , η επιφανειακή τάση,

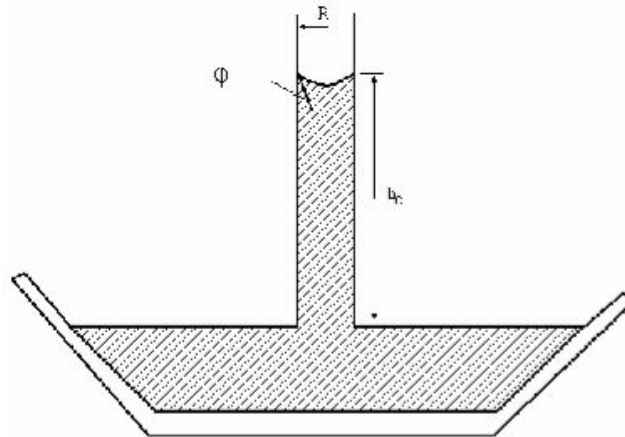
ε , το ειδικό βάρος του νερού,

R , η ακτίνα του τριχοειδούς σωλήνα,

ϕ , η γωνία συνεπαφής ανάμεσα στα τοιχώματα του σωλήνα και το μηνίσκο.

Για καθαρό νερό στους $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, το ύψος της τριχοειδούς ανύψωσης (Σχ. 1.14) είναι $h_c = 0,153/R$. Στα αργιλώδη εδάφη το αναπτυσσόμενο δυναμικό από τριχοειδή φαινόμενα είναι μεγάλο, σε αντίθεση με τα αμμώδη εδάφη στα οποία είναι ασήμαντο.

Η ροή στην ακόρεστη ζώνη έχει ως κύρια συνιστώσα την κατακόρυφη. Η κίνηση μπορεί να είναι ανοδική (εξάτμιση) ή καθοδική (κατείσδυση). Ο ρόλος της ακόρεστης ζώνης στην εξασθένηση της ρύπανσης και στην τρωτότητα των υπόγειων νερών είναι σημαντικός (Fidelibus, 2003).



Σχήμα 1.14: Τριχοειδής ανύψωση (Fetter, 1994).

Ζώνη κορεσμού (Zone of saturation)

Όλα τα διάκενα της ζώνης αυτής είναι γεμάτα με νερό βαρύτητας (Σχ. 1.12), κάτω από υδροστατική πίεση μεγαλύτερη ή ίση της ατμοσφαιρικής, και η ροή είναι μονοφασική. Αντιπροσωπεύει, ουσιαστικά, το υδροφόρο στρώμα και η επάνω επιφάνεια της ζώνης αυτής είναι η ελεύθερη (φρεάτια) επιφάνεια. Η ζώνη αυτή μπορεί να τροφοδοτήσει με νερό και ως εκ τούτου έχει ιδιαίτερη σημασία. Το επιφανειακό νερό με την επίδραση της βαρύτητας, της υδροστατικής πίεσης, των τριχοειδών δυνάμεων κ.λπ., διεισδύει στο έδαφος διαμέσου των διακένων και κινείται προς την κορεσμένη ζώνη, εμπλουτίζοντας τους υπόγειους υδροφόρους ορίζοντες. Από τα παραπάνω κατανοούμε ότι η κατείσδυση αναφέρεται στην κατακόρυφη κίνηση του νερού στη ζώνη αερισμού και η διήθηση στην κίνηση του νερού στην κορεσμένη ζώνη (Fidelibus, 2003).

1.3.3 Είδη υπογείου νερού

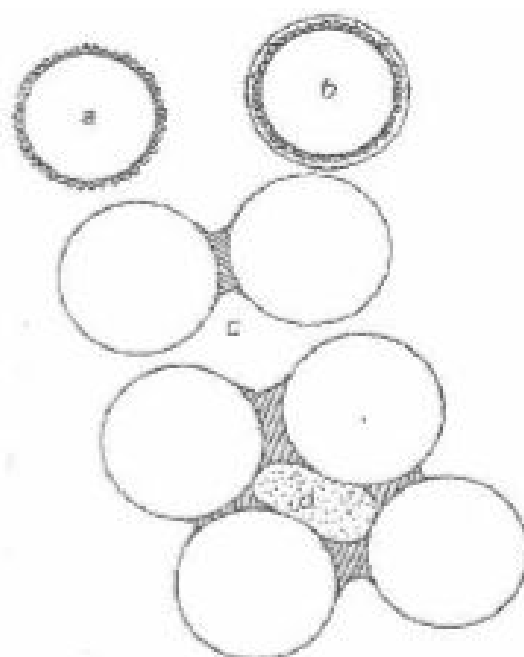
Το υπόγειο νερό ανάλογα με τη θέση που βρίσκεται ανάμεσα στους κόκκους του εδάφους, διαχωρίζεται σε (Σχ. 1.15):

- ⇒ υγροσκοπικό νερό
- ⇒ επιδερμικό νερό
- ⇒ τριχοειδές νερό
- ⇒ βαρυτικό νερό

Το **υγροσκοπικό νερό** ή νερό κατακράτησης, βρίσκεται στους λεπτούς πόρους του εδάφους και περιβάλλει σαν μεμβράνη τα εδαφικά μόρια. Το υγροσκοπικό νερό δεν υπακούει στους νόμους της βαρύτητας και συνεπώς δεν παίρνει μέρος στην υπόγεια κυκλοφορία. Οι δυνάμεις επιφανειακής τάσης είναι πολύ ισχυρές ($>15 \text{ atm}$) και το νερό δεν απομακρύνεται εύκολα από το έδαφος και κατά συνέπεια δεν προσλαμβάνεται από τα φυτά (Fidelibus, 2003).

Το υγροσκοπικό νερό είναι άμεσα συνδεδεμένο με την **ειδική κατακράτηση** S_r (Specific retention). Η ειδική κατακράτηση ενός γεωλογικού σχηματισμού, είναι ο λόγος του νερού κατακράτησης (V_r) προς τον όγκο του σχηματισμού αυτού (V):

$$S_r = V_r / V$$



Σχήμα 1.15: Είδη νερού στο έδαφος: a) υγροσκοπικό νερό, b) επιδερμικό νερό, c) τριχοειδές νερό, d) βαρυτικό νερό (Tulipano & Sappa, 2008).

Το **τριχοειδές νερό** είναι το νερό που συγκρατείται ανάμεσα στους εδαφικούς κόκκους όταν οι δυνάμεις επιφανειακής τάσης εξισορροπούνται με τη δύναμη της βαρύτητας. Το τριχοειδές νερό βρίσκεται σε μορφή μικροσκοπικών απομονωμένων καναλιών γύρω από τους εδαφικούς κόκκους και αποτελεί την κυριότερη πηγή νερού για τα φυτά (Tulipano & Sappa, 2008).

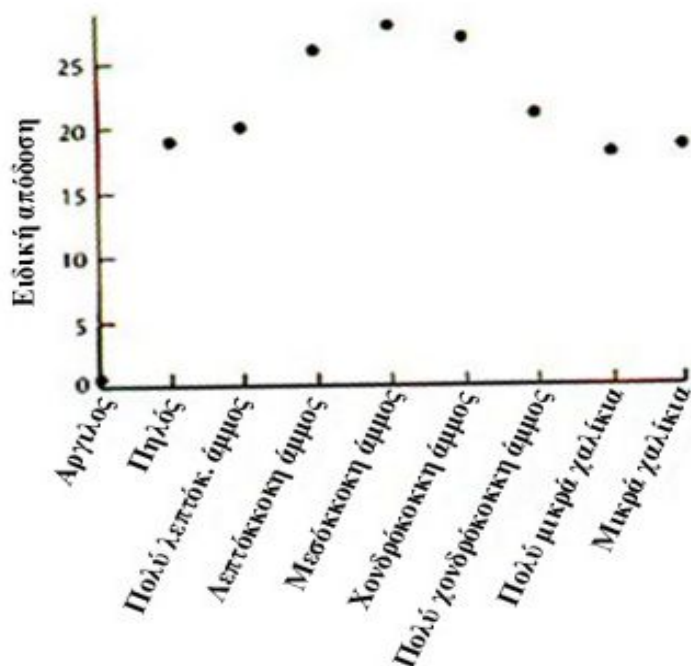
Ένα είδος εδαφικού νερού, για το οποίο δεν γίνεται συχνά αναφορά, είναι το **επιδερμικό νερό**. Πρόκειται για ένα λεπτό στρώμα νερού, απορροφημένο από τους εδαφικούς κόκκους, το οποίο συγκρατείται από αυτούς με ηλεκτροστατικές δυνάμεις (Tulipano & Sappa, 2008).

Το **βαρυτικό νερό** είναι το νερό που υπόκειται στους νόμους της βαρύτητας και παίρνει μέρος στην υπόγεια κυκλοφορία. Το νερό αυτό μπορεί να ληφθεί άμεσα ή έμμεσα (Fidelibus, 2003).

Το βαρυτικό νερό είναι άμεσα συνδεδεμένο με την **ειδική απόδοση** S_y (Specific yield) ενός γεωλογικού σχηματισμού. Η ειδική απόδοση είναι ο λόγος του βαρυτικού νερού (V_w) προς τον όγκο του σχηματισμού αυτού (V):

$$S_y = V_w / V$$

Η ειδική απόδοση ταυτίζεται με το ενεργό πορώδες. Ενδεικτικές τιμές ειδικής απόδοσης για διάφορους τύπους εδαφών εμφανίζονται στο σχήμα 1.16.



Σχήμα 1.16: Ειδική απόδοση και τύποι εδάφους (<http://geo-sector.geology.upatras.gr>).

1.4 Υπόγειοι υδροφορείς

1.4.1 Εδαφικές στρώσεις

Πριν αναφερθούμε στους υπόγειους υδροφορείς θα γίνει μία αναφορά στα είδη των εδαφικών στρώσεων που αφορούν στη ροή των υπογείων υδάτων (Σχ. 1.17). Οι εδαφικές στρώσεις διακρίνονται από τη διαπερατότητά τους στο νερό και είναι:

- ⇒ Αδιαπέρατη στρώση
- ⇒ Αδιαπέρατη στεγανή στρώση
- ⇒ Υδροφορέας ή υδροφόρο στρώμα
- ⇒ Ημιπερατή στρώση

Αδιαπέρατη στρώση (aquiclude)

Με τον όρο αδιαπέρατη στρώση εννοούμε τον γεωλογικό σχηματισμό ο οποίος περιέχει σημαντικές ποσότητες νερού, αλλά υπό συνήθειες όμως συνθήκες πεδίου δεν επιτρέπει την κίνηση του νερού, ή τη διέλευσή του, μέσω αυτού. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα αδιαπέρατης στρώσης αποτελούν τα αργιλικά εδάφη (Chiesa, 1992).

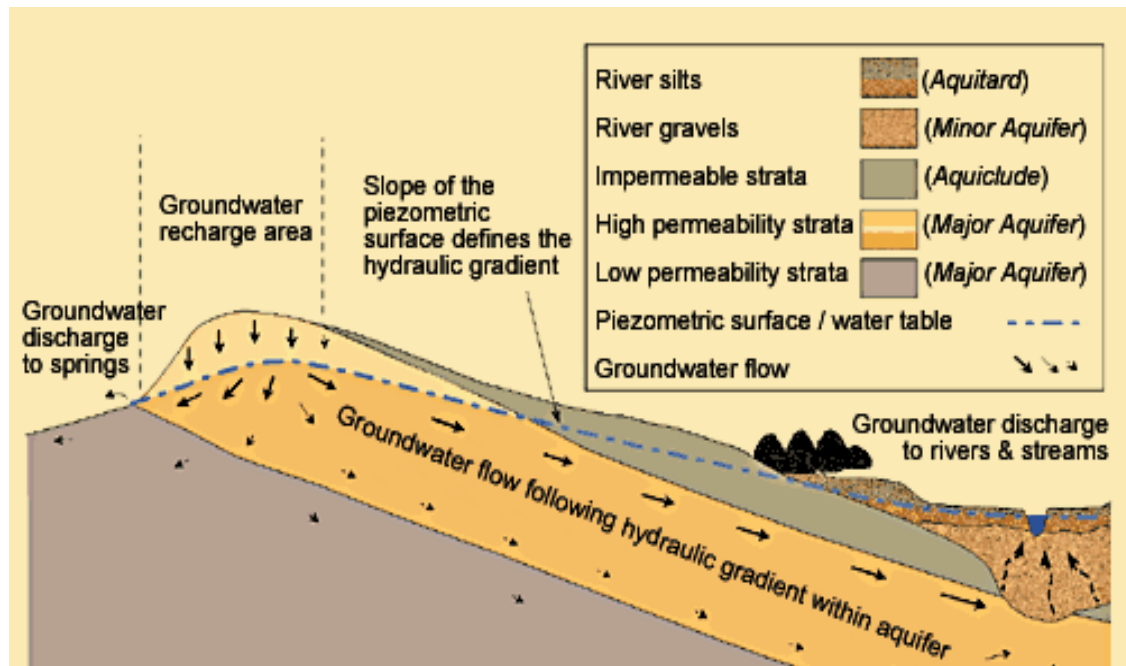
Αδιαπέρατη στεγανή στρώση (aquifuge)

Η αδιαπέρατη στρώση είναι ο γεωλογικός σχηματισμός ο οποίος δεν μπορεί να περιέχει νερό και δεν επιτρέπει ούτε την κίνησή του μέσω αυτού από γειτονικά στρώματα (Chiesa, 1992). Χαρακτηριστικά παραδείγματα αδιαπέρατων στρώσεων αποτελούν οι σχιστόλιθοι και ο πηλός.

Υδροφορέας ή υδροφόρο στρώμα (aquifer or groundwater reservoir) ο οποίος θα εξετασθεί εκτενέστερα παρακάτω.

Ημιπερατή στρώση (aquitard)

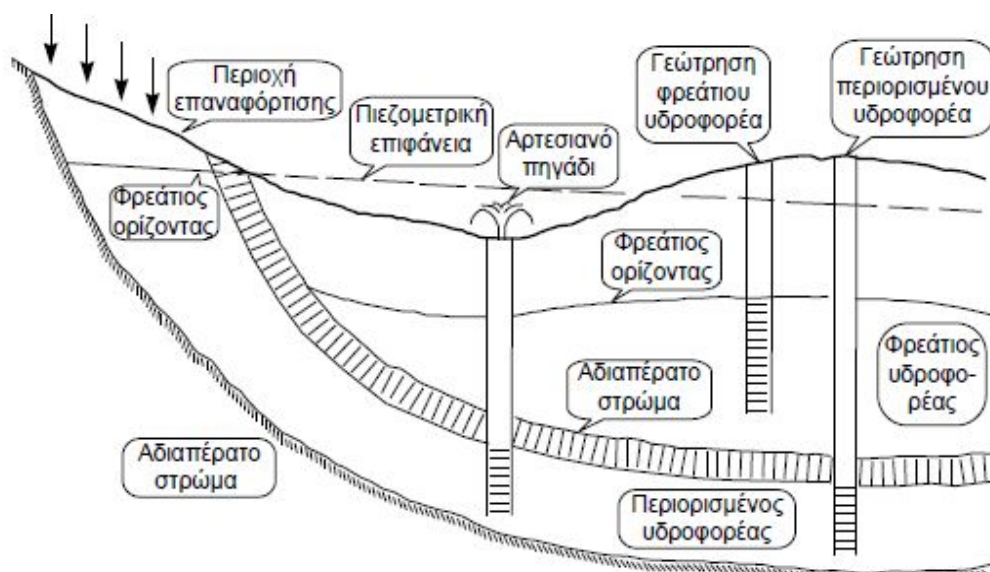
Η ημιπερατή στρώση είναι ο γεωλογικός σχηματισμός ο οποίος επιτρέπει την κίνηση του νερού με πολύ χαμηλούς ρυθμούς σε σύγκριση με τον υδροφορέα. Η ημιπερατή στρώση, είναι συνήθως, μια λεπτή στρώση σε σύγκριση με τον κυρίως υδροφορέα και έχει μικρότερη διαπερατότητα από αυτόν (υποδεκαπλάσια). Η τροφοδότησή της ημιπερατής στρώσης γίνεται από τον υποκείμενο ή από τον υπερκείμενο υδροφορέα ή και από τους δυο. Ο χαρακτηρισμός μιας στρώσης ως ημιπερατής δεν είναι απόλυτα ουσιαστικός αλλά περισσότερο αποτελεί μία σχετική έννοια. (Chiesa, 1992). Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν οι ασβεστόλιθοι οι δολομίτες και τα εκρηξιγενή πετρώματα.



Σχήμα 1.17: Ροή μέσω διάφορων εδαφικών στρώσεων (www.goodquarry.com).

1.4.2 Είδη υπόγειων υδροφορέων

Μία γεωλογική μονάδα η οποία μπορεί να αποθηκεύσει αξιόλογη ποσότητα νερού και να τη μεταφέρει με ρυθμό υδρολογικά σημαντικό ονομάζεται υδροφορέας (aquifer) (Dingman, 1994) (Σχ. 1.18).



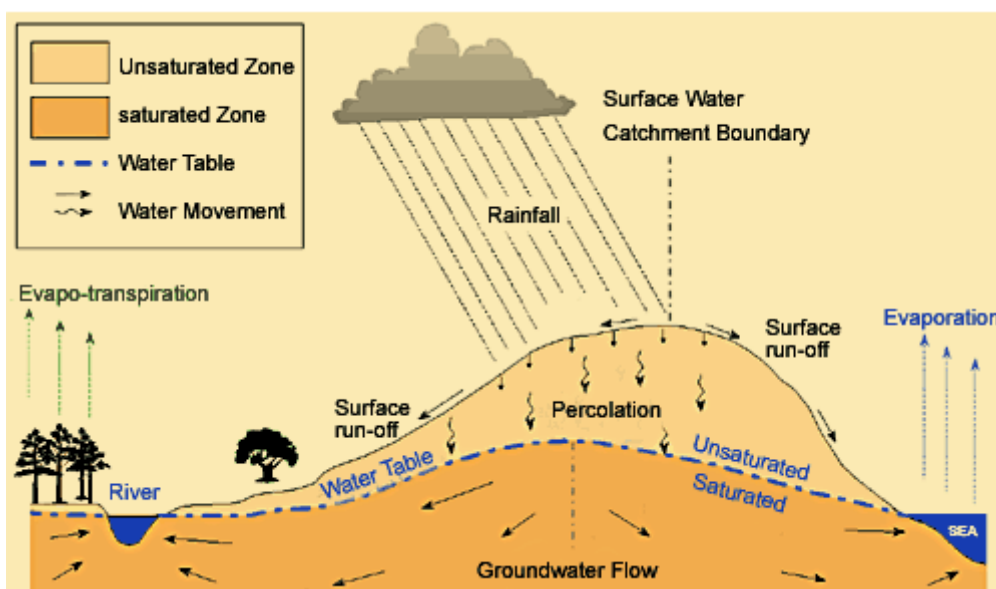
Σχήμα 1.18: Σχηματική παράσταση υδροφορέων (Κουτσογιάννης & Ξανθόπουλος, 1999).

Το υδροφόρο στρώμα αποτελείται από το γεωλογικό σχηματισμό (σκελετό) και το υπεδάφικο νερό, που βρίσκεται σε βαρυτική μορφή και ως νερό συγκράτησης όπως είδαμε παραπάνω. Ως υδροφόρος ορίζοντας θεωρείται η άνω επιφάνεια του υδροφορέα. Οι κυριότεροι τύποι υπόγειων υδροφορέων είναι:

- ⇒ Ελεύθεροι
- ⇒ Περιορισμένοι ή υπό πίεση ή αρτεσιανοί
- ⇒ Ημιαρτεσιανοί

Ελεύθεροι υδροφορείς ή φρεάτιοι (unconfined aquifers).

Είναι οι υδροφόροι που έχουν ως δάπεδο στεγανό στρώμα και στην οροφή τους δεν παρεμβάλλεται αδιαπέρατο γεωλογικό στρώμα. (Σχ. 1.19).



Σχήμα 1.19: Υδρολογικός κύκλος και υπόγεια ροή σε ελεύθερο υδροφορέα (www.goodquarry.com).

Οι ελεύθεροι υδροφορείς παρουσιάζουν ελεύθερη επιφάνεια (υπόγειος ή φρεατίου ορίζοντας), η οποία συμπίπτει με τον υδροφόρο ορίζοντα και κατά συνέπεια η υδροστατική πίεση είναι ίση με την ατμοσφαιρική. Η ροή τους είναι ανάλογη της ροής σε αγωγούς με ελεύθερη επιφάνεια. Οι μεταβολές της στάθμης του νερού αντιστοιχούν σε μεταβολές του όγκου του αποθηκευμένου νερού στον υδροφορέα.

Οι ελεύθεροι υδροφορείς συνήθως βρίσκονται πιο κοντά στην επιφάνεια του εδάφους, εκεί όπου δεν υπάρχει κάποιο στρώμα πετρωμάτων που να περιορίζει την άμεση επαφή του υπόγειου νερού με την επιφάνεια του εδάφους. Η τροφοδότηση αυτών των υδροφορέων

γίνεται κατευθείαν από την επιφάνεια του εδάφους, μέσω του φρεατίου ορίζοντα, είτε μέσω της βροχής είτε μέσω κάποιου ποταμού ή λίμνης (Fidelibus, 2003).

Περιορισμένοι ή υπό πίεση υδροφορείς ή εγκλωβισμένοι ή αρτεσιανοί. (confined aquifers).

Οι περιορισμένοι υδροφορείς περιέχουν νερό υπό πίεση, μεγαλύτερη της ατμοσφαιρικής, και περιορίζονται στην άνω και κάτω επιφάνεια από αδιαπέρατα στρώματα. Στα υδροφόρα αυτά στρώματα το νερό είναι εγκλωβισμένο ανάμεσα στα αδιαπέρατα στρώματα του δαπέδου και της οροφής. Είναι κορεσμένοι σε όλο το πάχος τους και η πίεση του νερού είναι μεγαλύτερη της ατμοσφαιρικής. Για τον λόγο αυτό η πιεζομετρική επιφάνεια, η οποία είναι μια εικονική επιφάνεια και συμπίπτει με το επίπεδο της υδροστατικής επιφάνειας στον υδροφορέα, βρίσκεται ψηλότερα από τη βάση της αδιαπέρατης οροφής. Όταν η πιεζομετρική επιφάνεια βρίσκεται πάνω από την επιφάνεια του εδάφους, τότε παρατηρείται αυτόματη ροή με τη μορφή πίδακα (αρτεσιανισμός). Οι περιορισμένοι υδροφορείς δεν παρουσιάζουν ελεύθερη επιφάνεια, η ροή τους είναι ανάλογη με κλειστούς αγωγούς υπό πίεση. Η στάθμη του νερού σε ένα φρέαρ παρατήρησης είναι ψηλότερα από το επάνω όριο της στρώσης.

Οι δύο τύποι που αναφέρθηκαν αποτελούν ιδεατές καταστάσεις. Στην πραγματικότητα μπορεί ένας υδροφορέας να εμφανίζει κατά περιοχές χαρακτηριστικά και των δύο κατηγοριών. Επίσης, μιλάμε για **ελεύθερους υδροφορείς με διαρροή** ή **περιορισμένους υδροφορείς με διαρροή**, όταν εμφανίζουν τοπικές διαρροές σε ρήγματα (Κουτσογιάννης & Ξανθόπουλος, 1999).

Ημιαρτεσιανοί ή υπό μερική πίεση υδροφορείς (Semiconfined aquifers).

Πρόκειται για υπόγειους υδροφορείς ανάλογους με τους υπό πίεση με τη διαφορά ότι το υπερκείμενο στρώμα είναι ημιπερατό, παρουσιάζει δηλαδή μικρή υδροπερατότητα. Από πετρογραφικής άποψης διακρίνονται δύο μεγάλες κατηγορίες:

- ⇒ **καρστικοί** (karst aquifers), που αναπτύσσονται στα ανθρακικά πετρώματα και
- ⇒ **πορώδεις** (porous aquifers), που αναπτύσσονται σε κοκκώδεις σχηματισμούς (τεταρτογενείς και αδρομερείς νεογενείς αποθέσεις).

Παραδείγματα υδροφορέων

Χαρακτηριστικά παραδείγματα υδροφορέων αποτελούν οι αλλουβιακές αποθέσεις άμμων και χαλίκων (Εικ. 1.2), τα κροκαλοπαγή πετρώματα, τα αμμώδη (ψαμμίτες), τα ασβεστολιθικά και δολομιτικά (ανθρακικά πετρώματα), τα εκρηξιγενή (γρανίτης, βασάλτης

κλπ.), τα μεταμορφωσιγενή (χαλαζίτης, σχίστης, γνεύσιος κλπ.). Η διαπερατότητα όμως των υδροφορέων μπορεί να οφείλεται και σε ρηγμάτωση των πετρωμάτων (Εικ. 1.3), ή σε καρστικά φαινόμενα (Εικ. 1.4).



Εικόνα 1.2: Υδροφορείς διαπερατοί λόγω πορώδους, (ηφαιστειακά πετρώματα και τόφφοι, άμμοι, χαλίκια κ.λ.π.), (<http://geoingegneria.dits.uniroma1.it>).



Εικόνα 1.3: Υδροφορείς διαπερατοί λόγω ρυγμάτωσης, (δολομίτες, ασβεστόλιθοι, βασάλτοι, γρανίτες), (<http://geoingegneria.dits.uniroma1.it>).



Εικόνα 1.4: Υδροφορείς διαπερατοί λόγω καρστικών φαινομένων, (ασβεστόλιθοι), (<http://geoingegneria.dits.uniroma1.it>).

1.4.3 Ομοιογένεια και Ισοτροπία υδροφορέων

Οι όροι της ομοιογένειας και της ισοτροπίας (Homogeneity and Isotropy), ενός υδροφορέα έχουν να κάνουν με την υδραυλική αγωγιμότητά του. Η υδραυλική αγωγιμότητα μέσα σε ένα υδροφορέα μπορεί να μεταβάλλεται από σημείο σε σημείο ή να μεταβάλλεται ανάλογα με την κατεύθυνση. Στην πρώτη περίπτωση έχουμε την ιδιότητα της ομοιογένειας ή ετερογένειας ενώ στην δεύτερη της ισοτροπίας ή ανισοτροπίας. Έτσι, ένας υδροφορέας μπορεί να χαρακτηριστεί ως:

- ⇒ **Ομοιογενής** (homogeneous), όταν έχει τις ίδιες υδραυλικές ιδιότητες σε κάθε σημείο του ή
- ⇒ **Ετερογενής** (heterogeneous), όταν οι υδραυλικές του ιδιότητες μεταβάλλονται χωρικά.
- ⇒ **Ισότροπος** (isotropic), όταν σε οποιοδήποτε δεδομένο σημείο οι υδραυλικές του ιδιότητες είναι ίδιες προς όλες τις κατευθύνσεις ή
- ⇒ **Ανισότροπος** (anisotropic), όταν σε οποιοδήποτε δεδομένο σημείο οι υδραυλικές του ιδιότητες διαφέρουν ανάλογα με την κατεύθυνση (Fidelibus, 2003).

1.4.4 Εμπλουτισμός υπογείων υδροφόρων οριζόντων

Ο εμπλουτισμός των υπογείων υδροφόρων οριζόντων γίνεται με φυσικό και τεχνητό τρόπο.

Ο φυσικός εμπλουτισμός επιτυγχάνεται:

- ⇒ με απευθείας κατείσδυση των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων,
- ⇒ με διήθηση από τα επιφανειακά νερά,
- ⇒ με υπόγεια τροφοδοσία από γειτονική λεκάνη.

Στους ελεύθερους υδροφορείς ορίζοντες η περιοχή εμπλουτισμού μπορεί να καλύπτει όλη την περιοχή, που εκτείνονται. Στους υπό πίεση οι περιοχές εμπλουτισμού περιορίζονται εκεί όπου ο υδροφορέας εμφανίζεται στην επιφάνεια, εκτός αν έχουν υδραυλική επικοινωνία με άλλους υδροφορείς ή υδρορεύματα. Επίσης η ποσότητα εμπλουτισμού δεν μένει σταθερή με το χρόνο, αλλά μεταβάλλεται από εποχή σε εποχή. Ο συνολικός εμπλουτισμός ενός υδροφορέα ισούται με το ποσοστό του νερού της βροχόπτωσης, το οποίο κατεισδύει και διηθείται στην κορεσμένη ζώνη, επιπλέον τον όγκο νερού της εξωτερικής τροφοδοσίας. Μαθηματικά ο συνολικός εμπλουτισμός (Q_r) μπορεί να εκφραστεί από την σχέση (Birkle et al., 1998):

$$Q_r = P - E - R + Q_{in} - Q_{out} \pm \Delta S$$

Όπου:

P, τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα,

E, η πραγματική εξατμισοδιαπνοή,
 R, η επιφανειακή απορροή,
 Q_{in} , η εξωτερική τροφοδοσία,
 Q_{out} , οι εκροές,
 ΔS , η μεταβολή των αποθεμάτων.

Σε περιπτώσεις αυτοτελών συστημάτων, η εξωτερική τροφοδοσία από γειτονικές λεκάνες θεωρείται μηδενική και οι μεταβολές στα υπόγεια αποθέματα είναι αμελητέες και συνεπώς οι παράγοντες, Q_{in} , Q_{out} , ΔS της ανωτέρω εξίσωσης παραλείπονται. Η ανωτέρω εξίσωση προκύπτει από τη γενική εξίσωση υδρολογικής ισορροπίας:

$$\text{Εισροές} = \text{Εκροές} \pm \text{Μεταβολή αποθεμάτων}$$

Εκτός από τη φυσική τροφοδοσία για την ενίσχυση του υδατικού ισοζυγίου των υπόγειων νερών εφαρμόζεται ο **τεχνητός εμπλουτισμός** (groundwater recharge). Ο τεχνητός εμπλουτισμός συνίσταται στην αύξηση του ρυθμού ανανέωσης του υπόγειου νερού των υδροφόρων οριζόντων με χρησιμοποίηση περίσσειας φυσικού ή επεξεργασμένου νερού με κατασκευή κατάλληλων διατάξεων (π.χ. κατάκλυση κ.λπ.).

Η εφαρμογή τεχνητού εμπλουτισμού μέσω πηγαδιών και γεωτρήσεων έχει εφαρμοσθεί με ικανοποιητικά αποτελέσματα τα τελευταία χρόνια στην Ελλάδα. Η μέθοδος είναι απλή και η τροφοδοσία γίνεται ταχύτερα, αλλά απαιτεί καλής ποιότητας νερό, γιατί διαφορετικά υπάρχουν κίνδυνοι κροκίδωσης του εδάφους αν το νερό εμπλουτισμού περιέχει πολύ νάτριο, λόγω ανταλλαγής με ιόντα ασβεστίου. Επίσης αν το νερό περιέχει βακτήρια μπορεί να δημιουργηθούν εστίες μόλυνσης (Bouwer, 1996, Κουμαντάκης κ.ά, 1999, Βουδούρης κ.ά, 2002, Πουλοβασίλης κ.ά, 2002).

1.4.5 Πηγές

Η εκροή είναι η ανάδυση νερού από το υπέδαφος. Το μεγαλύτερο ποσοστό της φυσικής εκροής γίνεται με τη μορφή εκφόρτισης στη θάλασσα, στις λίμνες ή στα υδρορεύματα. Όταν το υπόγειο νερό εκφορτίζεται στην επιφάνεια του εδάφους με φυσικό τρόπο, τότε εμφανίζονται οι πηγές. Το μέγεθος τους κυμαίνεται από μικρές πηγές που ενεργοποιούνται μόνο μετά από δυνατές βροχές, μέχρι τεράστιες πηγές που λειτουργούν σε μόνιμη βάση και βγάζουν χιλιάδες κυβικά μέτρα νερού ανά ημέρα.

Οι πηγές μπορούν να δημιουργηθούν σε κάθε τύπου πέτρωμα, αλλά είναι συνηθέστερες σε ασβεστόλιθο και δολομίτη οι οποίοι διαλύονται από το νερό, ιδιαίτερα όταν έχουν ρωγμές.

Αυτά τα πετρώματα έχουν μεγάλη διαπερατότητα και απορροφούν μεγάλες ποσότητες κατακρημνισμάτων, οπότε αυξάνεται η πιθανότητα εμφάνισης πηγών, μέσω των οποίων εξέρχεται στην επιφάνεια το νερό που είχε εισχωρήσει στα πετρώματα.

Τεχνητές εκροές υπόγειου νερού θεωρούνται οι απολήψεις από τα υδρομαστευτικά έργα. Τα έργα με τα οποία γίνεται απόληψη υπόγειου νερού από τους υδροφόρους ορίζοντες ή τις πηγές λέγονται **υδρομαστευτικά** και διακρίνονται σε κατακόρυφα (γεωτρήσεις, πηγάδια) και οριζόντια (γαλαρίες ή στοές).

Η ακτίνα επίδρασης R (radius of influence), είναι η απόσταση από την πηγή, πέρα από την οποία δεν είναι αισθητά τα αποτελέσματα της άντλησης (η πτώση στάθμης είναι μηδέν). Η απόσταση αυτή, σύμφωνα με το πρότυπο Jacob, υπολογίζεται από τη σχέση:

$$R=1,5 (a t)^{1/2}$$

Όπου:

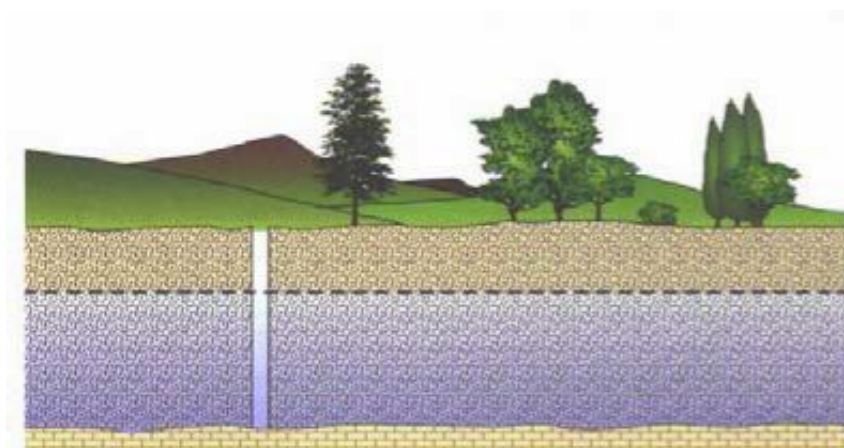
a , διαχυτικότητα ή μεταδοτικότητα (που είναι ίση με το πηλίκο T/S),

T , η μεταβιβαστικότητα,

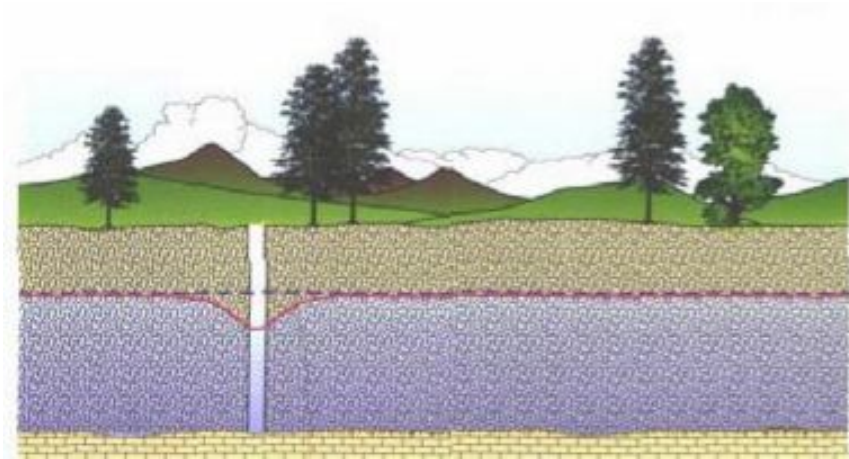
S , η αποθηκευτικότητα του υδροφορέα,

t , χρόνος.

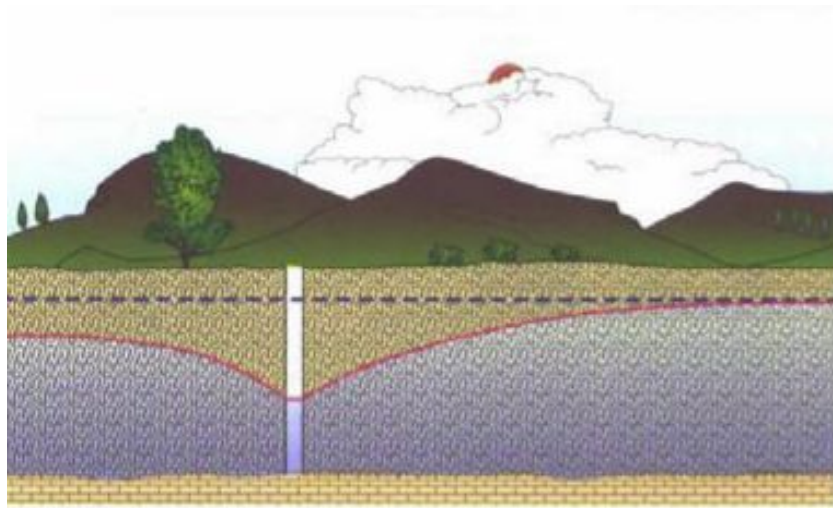
Από την παραπάνω σχέση προκύπτει ότι η ακτίνα επίδρασης της γεώτρησης αυξάνει με την πάροδο του χρόνου και δεν εξαρτάται από την παροχή άντλησης (Σχ. 1.20 έως 1.23). Ο ρυθμός όμως αύξησης (dR/dt) αποδεικνύεται ότι είναι αντιστρόφως ανάλογος της τετραγωνικής ρίζας του χρόνου, που σημαίνει ότι ο ρυθμός αύξησης της ακτίνας επίδρασης μειώνεται συνεχώς με το πέρασμα του χρόνου. Η ακτίνα επίδρασης σχετίζεται με την επέκταση του κώνου κατάπτωσης, τη ζώνη ανάκτησης και τις ζώνες προστασίας των υδροληπτικών έργων (Fidelibus, 2003).



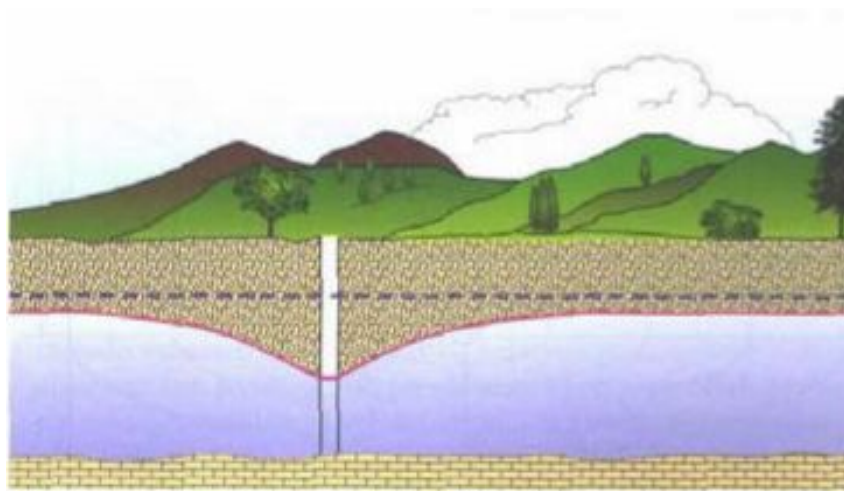
Σχήμα 1.20: Πηγάδι άντλησης σε ηρεμία (Rinaldi, 2010, <http://freedom.dicea.unifi.it>).



Σχήμα 1.21: Σχηματισμός κώνου κατάπτωσης μετά από άντληση (Rinaldi, 2010, <http://freedom.dicea.unifi.it>).



Σχήμα 1.22: Προοδευτική επέκταση του κώνου κατάπτωσης (Rinaldi, 2010, <http://freedom.dicea.unifi.it>).



Σχήμα 1.23: Σταθεροποίηση του κώνου κατάπτωσης μετά από πάροδο χρόνου (Rinaldi, 2010, <http://freedom.dicea.unifi.it>).

1.5 Υδραυλικά χαρακτηριστικά υδροφορέων

Τα σημαντικότερα υδραυλικά χαρακτηριστικά των υπόγειων υδροφορέων είναι: το υδραυλικό φορτίο, η υδραυλική αγωγιμότητα, η μεταβιβασιμότητα και η αποθηκευτικότητα. Για το υδραυλικό φορτίο θα αναφερθούμε στην παράγραφο 5.2.

1.5.1 Υδραυλική αγωγιμότητα

Η υδραυλική αγωγιμότητα (Hydraulic conductivity), ή υδροπερατότητα, εκφράζει συνδυασμένα τις ιδιότητες του πορώδους μέσου και του ρευστού, δηλαδή του εδάφους και του νερού στα προβλήματα της υπόγειας ροής. Συνεπώς, εξαρτάται από τη φύση του πορώδους μέσου (το σχήμα, το μέγεθος, τη διάταξη των κόκκων) και από τις ιδιότητες του ρευστού, με διαστάσεις LT^{-1} .

Η υδραυλική αγωγιμότητα υπολογίζεται από επιτόπου πειραματικές μετρήσεις, από δοκιμαστικές αντλήσεις, από την κοκκομετρία με τη βοήθεια εμπειρικών τύπων, με εργαστηριακές μεθόδους και με ιχνηθετήσεις. Σε μια σειρά πειραμάτων που έγιναν σε ένα ομοιόμορφο, ιδεώδες, πορώδες μέσο το οποίο αποτελείται από γυάλινες σφαίρες διαμέτρου d , ομοιόμορφα κατανεμημένες μελετήθηκε η ροή διάφορων ρευστών πυκνότητας ρ , ιξώδους μ και σταθερής υδραυλικής κλίσης dh/dl . Από τα αποτελέσματα προέκυψε ότι για την υδραυλική αγωγιμότητα ισχύει (Fidelibus, 2003):

$$k = K \rho g / \mu$$

ή

$$k = K \gamma / \mu$$

Όπου:

K , η ειδική διαπερατότητα του πορώδους μέσου $K = Cd_2$,

C , ο συντελεστής που λαμβάνει υπόψη την ταξινόμηση μεγέθους των κόκκων,

ρ , η πυκνότητα του ρευστού (Kg/m^3),

μ , το δυναμικό ιξώδες του ρευστού ($N.s/m^2$ ή poise $P = dyn .s / cm^2$),

γ , το ειδικό βάρος του ρευστού (N/m^3).

Η **διαπερατότητα**, K (permeability) είναι μία σταθερά που εξαρτάται μόνο από τα χαρακτηριστικά του πορώδους μέσου (το σχήμα, το μέγεθος, τη διάταξη των κόκκων) με διαστάσεις L^2 .

Ένα μέσο έχει υδραυλική αγωγιμότητα ίση με τη μονάδα, όταν μεταβιβάζει στη μονάδα του χρόνου κάθετα στη διεύθυνση της υπόγειας ροής, τη μονάδα του όγκου νερού από μοναδιαία διατομή με υδραυλική κλίση ίση με τη μονάδα και την επικράτηση του κινηματικού ιξώδους. Το κινηματικό ιξώδες σχετίζεται με την εσωτερική τριβή, την αντίσταση δηλ. του υγρού στη ροή.

Η υδραυλική αγωγιμότητα των φυσικών εδαφών παρουσιάζει πολύ μεγάλη διακύμανση: 10 έως 12 τάξεις μεγέθους από τα χαλίκια έως την άργιλο. Για συνθήκες φυσικής ροής (π.χ. όχι για συνθήκες άντλησης), οι Mackay et al. (1985) δίνουν ένα αναμενόμενο εύρος ταχυτήτων 1 έως 1000 μέτρα το χρόνο για περατά στρώματα (άμμους και χαλίκια), ενώ εκτιμούν ως πιο συνήθη μια διακύμανση μεταξύ 10 και 100 μέτρων το χρόνο.

Γενικά οι γεωλογικοί σχηματισμοί χαρακτηρίζονται ως (Πίν. 1.3):

- ⇒ Πολύ υδροπερατοί όταν: $k \geq 10^{-1}$ m/s
- ⇒ Υδροπερατοί όταν: $10^{-6} < k < 10^{-1}$ m/s
- ⇒ Λίγο υδροπερατοί όταν: $10^{-9} < k < 10^{-6}$ m/s
- ⇒ Πρακτικά στεγανοί όταν: $k \leq 10^{-9}$ m/s

Η ακόρεστη υδραυλική αγωγιμότητα, ως μέτρο κίνησης του νερού σε ακόρεστο μέσο, είναι μικρότερη από την τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας σε κορεσμένο μέσο. Με βάση την περιεκτικότητα του νερού, η υδραυλική αγωγιμότητα ενός ακόρεστου μέσου (k_{unsat}) σε σχέση με την κορεσμένη τιμή (k) δίνεται από τη σχέση:

$$k_{unsat} = k [(S_s - S_o) / (1 - S_o)]^3$$

Όπου:

S_s , ο βαθμός κορεσμού και

S_o , ο υπολειμματικός κορεσμός που αντιπροσωπεύει το νερό των πόρων που δεν κινείται και δεσμεύεται από τις τριχοειδείς δυνάμεις (Καλλέργης κ.ά, 2004).

Πίνακας 1.3: Τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας (Καλλέργης, 1999).

Υλικό	k (m/s)
Μεγάλα χαλίκια	$1,7 \times 10^{-3}$
Χαλίκια μεσαίου μεγέθους	$3,1 \times 10^{-3}$
Χαλίκια μικρού μεγέθους	$5,2 \times 10^{-3}$
Χονδρόκοκκη άμμος	$5,2 \times 10^{-4}$
Μεσόκοκκη άμμος	$1,4 \times 10^{-4}$
Λεπτόκοκκη άμμος	$2,9 \times 10^{-5}$
Ιλύς	$9,2 \times 10^{-7}$
Άργιλος	$2,3 \times 10^{-9}$

1.5.2 Μεταβιβασιμότητα

Με τον όρο μεταβιβασιμότητα. (Transmissivity), ορίζεται ο ρυθμός με τον οποίο το νερό, δεδομένου κινητικού ιξώδους, μεταβιβάζεται διαμέσου ενός υδροφορέα μοναδιαίου πλάτους με μοναδιαία υδραυλική κλίση. Ο συντελεστής μεταβιβασιμότητας εκφράζει τον όγκο νερού που διαπερνάει από μια μοναδιαία διατομή του υδροφόρου στρώματος με υδραυλική κλίση ίση με τη μονάδα και ισχύει:

$$T = k D$$

Όπου:

T , ο συντελεστής μεταβιβασιμότητας (L^2/T),

k , η υδραυλική αγωγιμότητα (L/T),

D , το κορεσμένο πάχος του υδροφόρου στρώματος (L).

Η μεταβιβασιμότητα των περιορισμένων υδροφορέων είναι σταθερή, εφόσον το πάχος τους είναι αμετάβλητο. Αντίθετα, η μεταβιβασιμότητα των ελεύθερων υδροφορέων μεταβάλλεται χωρικά, καθώς το πάχος του υδροφορέα εξαρτάται σε κάθε θέση από τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα. Στους περιορισμένους υδροφορείς η ικανότητα αποθήκευσης ύδατος οφείλεται στη συμπίεστότητα του ύδατος και του υλικού. Αντίθετα, στους ελεύθερους υδροφορείς η ικανότητα αποθήκευσης ύδατος οφείλεται κυρίως στην πλήρωση ή εκκένωση των πόρων και πολύ λιγότερο στη συμπίεστότητα του ύδατος και του υλικού (Tulipano & Sappa, 2008):

1.5.3 Αποθηκευτικότητα

Ο συντελεστής αποθηκευτικότητας (Storativity), ή υδροχωρητικότητας, (S), είναι ο όγκος του νερού που μπορεί να ληφθεί ή αποθηκευθεί από ένα κατακόρυφο πρίσμα ενός υδροφόρου στρώματος με μοναδιαία επιφάνεια ανά μονάδα μεταβολής του φορτίου. Η αποθηκευτικότητα ορίζεται από τη σχέση:

$$S = \Delta V / (A \Delta h)$$

Όπου:

ΔV , ο όγκος νερού που απελευθερώνεται από τη μονάδα οριζόντιας επιφάνειας A .

Ο ρυθμός ταπείνωσης της στάθμης ($\Delta h / \Delta t$) σε έναν υδροφορέα επιφάνειας A και συντελεστή αποθηκευτικότητας S , για άντληση με παροχή Q , χωρίς να συμβαίνει

εμπλουτισμός, δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta h / \Delta t = Q / (S A)$$

Ο συντελεστής αποθηκευτικότητας είναι ένας καθαρός αριθμός και στους ελεύθερους υδροφορείς παίρνει τιμές που κυμαίνονται από 1%-30%, ενώ στους υπό πίεση από 0,0001%-0,5%. Η διαφορά αυτή οφείλεται στο διαφορετικό μηχανισμό απελευθέρωσης του νερού από τα είδη υδροφορέων. Στους υπό πίεση υδροφορείς η αφαίρεση ή η προσθήκη του νερού οφείλεται σε διόγκωση του νερού και συμπίεση του υδροφορέα. Η αποθηκευτικότητα είναι συνάρτηση της ελαστικότητας του υδροφορέα και της συμπιεστότητας του περιεχομένου σ' αυτόν υπόγειου νερού. Από τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι για να πάρουμε αξιόλογες ποσότητες από τα υπό πίεση υδροφόρα στρώματα απαιτούνται μεγάλες πτώσεις της πιεζομετρικής στάθμης και σε μεγάλη έκταση του υδροφορέα (www.geo.auth.gr). Ο συντελεστής αποθηκευτικότητας S στους ελεύθερους υδροφορείς συμπίπτει με το ενεργό πορώδες ενώ στους υπό πίεση υδροφορείς ισχύει (Desio, 1973):

$$S = \gamma D (\alpha + \beta S_y)$$

Όπου:

γ , το ειδικό βάρος του νερού,

D , το πάχος του υδροφορέα,

S_y , το ενεργό πορώδες,

α , ο συντελεστής συμπιεστότητας του υδροφορέα ,

β , ο συντελεστής συμπιεστότητας του νερού.

1.6 Ροή υπογείων υδάτων

1.6.1 Εισαγωγή

Η ροή των υπογείων υδάτων (groundwater flow), αποτελεί αντικείμενο των ευρύτερων θεματικών ενοτήτων “ρευστομηχανική” (fluid mechanics) και “ροή σε πορώδες μέσο” (flow in porous media), αφού έτσι ονομάζονται όλα τα πετρώματα και τα εδάφη που αποτελούνται από ένα στερεό σκελετό με τη μορφή συνάθροισης στερεών κόκκων που διαχωρίζονται και περιβάλλονται από διάκενα δηλαδή πόρους ή ρωγμές. Το κίνητρο για τη μελέτη των αρχών της υπόγειας ροής το θέτουν μια σειρά από ερωτήματα που αφορούν κυρίως στην κατεύθυνση του υπόγειου νερού, στην ταχύτητα της κίνησής του, στον όγκο του νερού που

μπορούμε να αντλήσουμε κ.α.

Η κίνηση των υπόγειων νερών ακολουθεί τους νόμους των νευτώνειων ρευστών. Το νερό είναι νευτώνειο ρευστό για το οποίο ισχύει η σχέση:

$$\tau = \mu (du/dy)$$

Όπου:

τ , διατμητική τάση (δύναμη ανά μονάδα επιφάνειας),

μ , δυναμικό ιξώδες.

Η παραπάνω σχέση σημαίνει ότι η διατμητική τάση, είναι ανάλογη της βαθμίδας ταχύτητας (du/dy) και του δυναμικού ιξώδους και αποτελεί το νόμο της εσωτερικής τριβής (ιξώδες) του Νεύτωνα. Το ιξώδες είναι η αντίσταση ενός υγρού στη ροή και συσχετίζεται με τους διαμοριακούς δεσμούς. Η εσωτερική τριβή κατά την κίνηση του νερού, παράγει έργο το οποίο μετατρέπεται σε θερμότητα αυξάνοντας τη θερμοκρασία του νερού. Σε προβλήματα ροής, όπου αντεπιδρούν δυνάμεις αδράνειας και δυνάμεις τριβής, εμφανίζεται ο λόγος του δυναμικού ιξώδους (μ) προς την πυκνότητα (ρ). Ο λόγος αυτός ονομάζεται **κινηματικό ιξώδες** (Citrini & Nosedà, 1987):

$$\nu = \mu / \rho$$

Οι συντελεστές μ και ν μειώνονται με την αύξηση της θερμοκρασίας και έχουν διαστάσεις: $\mu = L^{-1} M^1 T^{-1}$ και $\nu = L^{-2} M^0 T^{-1}$. Ένα υγρό λέγεται ιδανικό, όταν $\mu=0$ (δεν εμφανίζει εσωτερική τριβή). Το νερό, και τα υγρά γενικότερα, εμφανίζουν μεγάλη αντίσταση σε κάθε μεταβολή του όγκου τους και γι' αυτό πρακτικά χαρακτηρίζονται σαν **ασυμπίεστα**. Οι δυνάμεις **συνοχής** (δυνάμεις μεταξύ ομοειδών μορίων) δίνουν στο νερό χαρακτηριστική επιφανειακή τάση, σχηματίζοντας σφαιρικές σταγόνες κατά την πτώση του. Οι δυνάμεις **συνάφειας** εμφανίζονται μεταξύ ετεροειδών μορίων, δηλαδή μεταξύ του νερού και των στερεών σωμάτων με τα οποία έρχεται σε επαφή (Fidelibus, 2003).

1.6.2 Υδραυλικό φορτίο

Τα υπόγεια νερά κινούνται με την επίδραση της συνολικής ενέργειας που έχουν και η οποία ανά μονάδα όγκου ισούται με το άθροισμα της κινητικής, της δυναμικής και της υδροστατικής ενέργειας. Για τη ροή των υπογείων υδάτων, το πιο βασικό μέγεθος για την κατανόηση και την επίλυση των προβλημάτων, είναι το υδραυλικό φορτίο. Το υδραυλικό φορτίο (Hydraulic head), είναι το μέτρο της μηχανικής ενέργειας του ρευστού (Σχ. 1.24). Στα προβλήματα υπόγειας ροής υπολογίζουμε δυο συνεισφορές στη συνολική μηχανική ενέργεια

του ρευστού: την **ενέργεια λόγω θέσης** του ρευστού στο βαρυτικό πεδίο και την **ενέργεια λόγω πίεσης**. Αγνοούμε δηλαδή τη συμβολή της κινητικής ενέργειας επειδή οι ταχύτητες είναι μικρές.

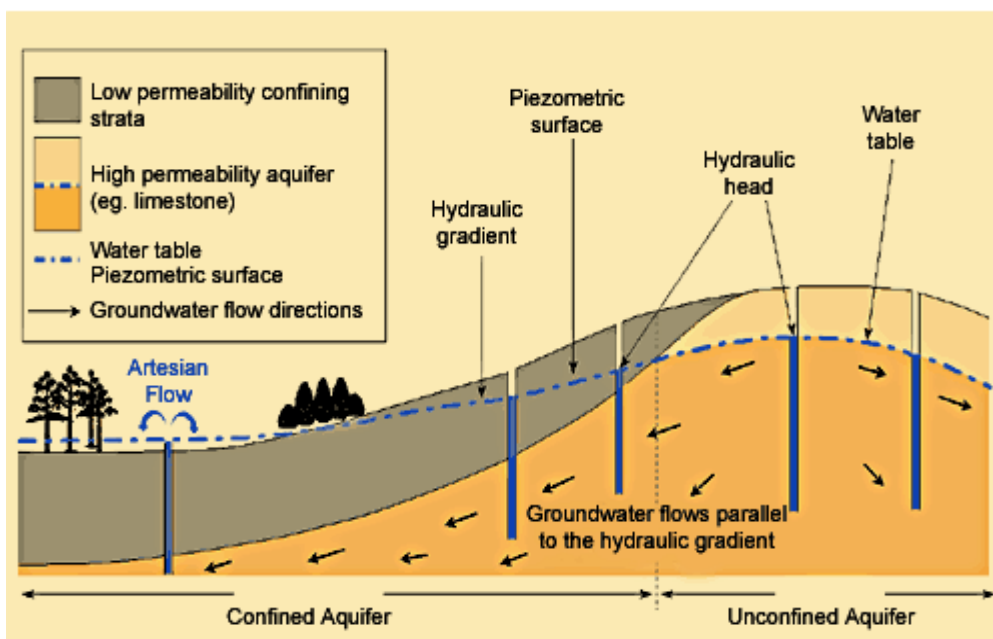
Έτσι, η ενέργεια αυτή ανά μονάδα βάρους ή υδραυλικό φορτίο, h , είναι ίση με το άθροισμα του φορτίου πίεσης P/γ (pressure head) και του φορτίου ύψους (ή υψομετρικό ή θέσης) της απόστασης δηλαδή από το επίπεδο αναφοράς z (elevation head) (Citrini & Nosedà, 1987):

$$h = (P/\gamma) + z \quad [\text{m}]$$

Όπου:

P , η υδροστατική πίεση,

γ , το ειδικό βάρος του νερού ίσο με την πυκνότητά του επί την επιτάχυνση της βαρύτητας.

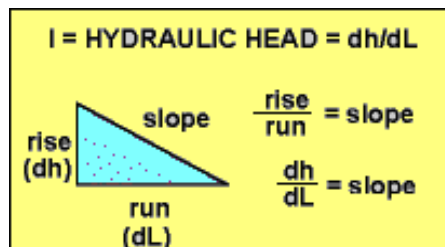


Σχήμα 1.24: Υδραυλικό φορτίο σε ελεύθερο και περιορισμένο υδροφορέα (www.goodquarry.com).

Το υδραυλικό φορτίο αναφέρεται και ως πιεζομετρικό φορτίο ή πιεζομετρικό δυναμικό και ταυτίζεται με το απόλυτο υψόμετρο της στάθμης του υπόγειου νερού σε μια γεώτρηση ανορυγμένη σε ελεύθερο υδροφορέα. Στους υπό πίεση υδροφορείς το φορτίο είναι το απόλυτο υψόμετρο που θα έφτανε το νερό, αν ο σωλήνας της γεώτρησης επεκτεινόταν πάνω από την επιφάνεια του εδάφους. Έτσι, η κίνηση του υπόγειου νερού σε ένα πορώδες μέσο οφείλεται στην υδροστατική πίεση και στη θέση του ως προς το επίπεδο αναφοράς. Οι γραμμές ίσου υδραυλικού φορτίου, που λέγονται **ισοδυναμικές γραμμές**, μπορεί να απεικονισθούν με τη βοήθεια χαρτών. Οι γραμμές ροής είναι κάθετες στις ισοδυναμικές γραμμές.

Η μεταβολή του υδραυλικού φορτίου ανά μονάδα μήκους κατά τη διεύθυνση της υπόγειας ροής ονομάζεται **υδραυλική κλίση** (Σχ. 1.25) και δίνεται από τη σχέση:

$$i = dh/dL$$



Σχήμα 1.25: Υδραυλική κλίση (<http://imnh.isu.edu>).

Η διαφορά του υδραυλικού φορτίου είναι το μέγεθος που μας επιτρέπει να αποφανθούμε αν το νερό κινείται ή όχι. Έτσι, αν εξετάζουμε δύο σημεία A και B, διακρίνουμε μεταξύ δύο περιπτώσεων:

$\Delta h_{AB} = 0$: το νερό δεν κινείται μεταξύ A και B. (Το δεδομένο αυτό όμως δεν παρέχει επαρκή πληροφορία για να συμπεράνουμε ότι επικρατούν υδροστατικές συνθήκες, καθώς το νερό μπορεί να κινείται κάθετα στο διάστημα AB).

$\Delta h_{AB} \neq 0$ (ύπαρξη υδραυλικής κλίσης): το νερό κινείται μεταξύ A και B. Επίσης ξέρουμε και τη φορά της κίνησης, από το σημείο υψηλού δυναμικού στο σημείο χαμηλού δυναμικού, αφού στην κατεύθυνση της κίνησης του νερού χάνεται ενέργεια. (Όμως, δεν έχουμε επαρκή πληροφορία για να συμπεράνουμε ότι η διεύθυνση της κίνησης συμπίπτει με το διάστημα AB, απλά ξέρουμε ότι η ταχύτητα του υπόγειου νερού έχει μια συνιστώσα στη διεύθυνση που ορίζει το διάστημα AB. Για να έχουμε μια συνολική εικόνα για το πεδίο ροής, χρειαζόμαστε χάρτες με ισοδυναμικές καμπύλες) (Πανταζίδου, 2007).

Για κάθε σημείο του πεδίου ροής μπορούμε να υπολογίσουμε το υδραυλικό φορτίο αν γνωρίζουμε την πίεση, p , σε αυτό το σημείο και μετρώντας την απόστασή του, z , από το επίπεδο αναφοράς. Το υδραυλικό φορτίο είναι το μέγεθος που αναζητούσαμε, δηλαδή εκείνο που όταν το γνωρίζουμε σε κάθε σημείο του πεδίου ροής, ξέρουμε πώς κινείται το νερό (Πανταζίδου, 2007).

Πρέπει να τονιστεί ότι τα παραπάνω περιγράφουν τη ροή ως αποτέλεσμα μεταβολών της μηχανικής ενέργειας του ρευστού. Υπάρχουν και άλλου είδους διαφορές ενέργειας (κλίσεις δυναμικού) που προκαλούν ροή των ρευστών, όπως διαφορές θερμοκρασίας, ηλεκτρικού δυναμικού και συγκεντρώσεων χημικών ουσιών. Σε αυτές τις περιπτώσεις έχουμε συζευγμένα φαινόμενα ροής (ωσμωτικά φαινόμενα) (Mitchell & Soga, 2005).

1.6.3 Υδραυλικό δυναμικό

Η ροή των υπογείων υδάτων είναι ένα μηχανικό φαινόμενο. Το νερό στο έδαφος μετέχει σε μια διαρκή κίνηση. Επειδή η ταχύτητά του είναι συνήθως πολύ μικρή, είναι λογικό να υποτεθεί ότι η κινητική του ενέργεια είναι αμελητέα. Επομένως, η κίνηση του νερού στο έδαφος προκαλείται από τις διαφορές της δυναμικής του ενέργειας από το ένα σημείο στο άλλο. Το νερό έχει την τάση να κινείται προς τη διεύθυνση της ελαττούμενης δυναμικής ενέργειας. Έτσι, το μέγεθος το οποίο όταν μεταβληθεί προκαλεί ροή, είναι η συνολική μηχανική ενέργεια ανά μονάδα μάζας του ρευστού (Τσακίρης, 2006). Το υδραυλικό δυναμικό (Hydraulic potential), Φ , για μοναδιαία μάζα και σταθερή πυκνότητα σε ένα σημείο του πεδίου ροής δίνεται ως (Freeze and Cherry, 1979):

$$\Phi = gz + \frac{v^2}{2} + \frac{p - p_0}{\rho}$$

Όπου:

g , είναι η επιτάχυνση της βαρύτητας,

z , είναι η απόσταση από κάποιο οριζόντιο επίπεδο αναφοράς,

v , είναι η ταχύτητα του ρευστού,

p , είναι η πίεση του ρευστού,

p_0 , είναι μια πίεση αναφοράς (συνήθως η ατμοσφαιρική),

ρ , είναι η πυκνότητα του ρευστού.

Λαμβάνοντας μηδενική την ατμοσφαιρική πίεση αναφοράς ($p_0 = 0$) και αμελητέο τον όρο της κινητικής, όπως είδαμε, η έκφραση για το δυναμικό απλοποιείται:

$$\Phi = gz + \frac{pg}{\gamma} = gh$$

Δηλαδή, το υδραυλικό φορτίο h σε ένα σημείο του πορώδους μέσου πολλαπλασιασμένο με την επιτάχυνση της βαρύτητας g , δίνει το δυναμικό ροής Φ στο σημείο αυτό:

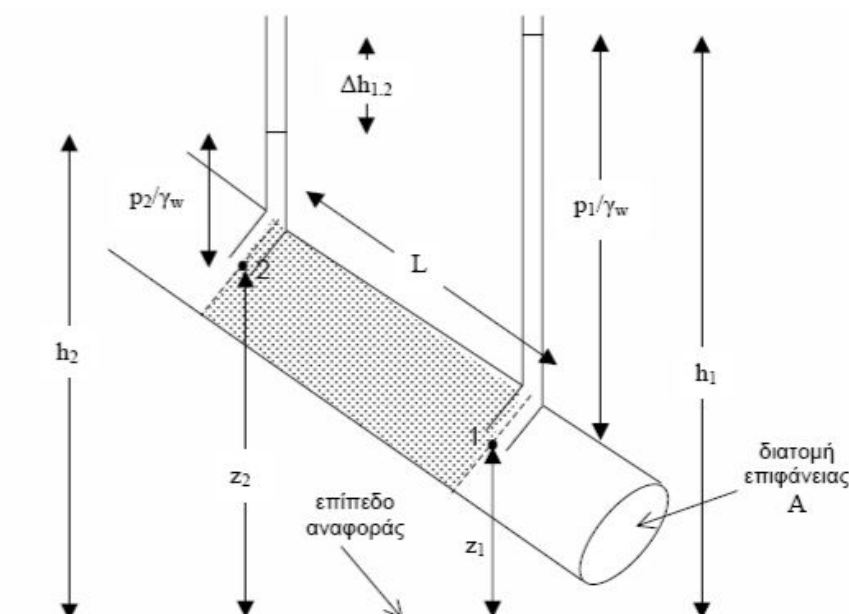
$$\Phi = g h$$

Με άλλα λόγια, το Φ είναι η ενέργεια ανά μονάδα μάζας και το h ενέργεια ανά μονάδα βάρους (Τσακίρης, 2006).

1.6.4 Ο νόμος του Darcy

Το 1854 ο Henry Darcy προσδιόρισε μια εμπειρική σχέση που συνδέει την ταχύτητα του νερού στο έδαφος με τα χαρακτηριστικά της ροής, με τη βοήθεια πειραμάτων ροής σε εδαφικές στήλες (Σχ. 1.26). Τα βασικά μεγέθη που πρέπει να οριστούν είναι:

- ⇒ Η παροχή, Q [m^3/sec], είναι ο όγκος νερού που διέρχεται από μια διατομή στη μονάδα του χρόνου.
- ⇒ Η επιφάνεια της διατομής, A [m^2], (η επιφάνεια A είναι κάθετη στη διεύθυνση ροής).
- ⇒ Η μέση ταχύτητα ροής (ή ειδική παροχή), v [m/sec], είναι ο λόγος της παροχής προς την επιφάνεια της διατομής.



Σχήμα 1.26: Πειραματική διάταξη ροής διαμέσου εδαφικής στήλης (Πανταζίδου, 2007).

Αναφορικά με το σχήμα έχοντας μετρήσει την παροχή, βρίσκουμε τη μέση ταχύτητα ως:

$$v = Q / A$$

Ο Darcy βρήκε πειραματικά ότι η ταχύτητα είναι ανάλογη της υδραυλικής κλίσης, i :

$$i = \frac{\Delta h_{1,2}}{L}$$

(δηλαδή της κλίσης του υδραυλικού φορτίου), η οποία ορίζεται ως η διαφορά υδραυλικού φορτίου μεταξύ δύο σημείων, $\Delta h_{1,2}$ δια το μήκος ροής μεταξύ των δύο αυτών σημείων, L . Στο απλό μονοδιάστατο παράδειγμα του σχήματος το μήκος ροής συμπίπτει με

την απόσταση.

Την αναλογική σχέση που βρήκε ο Darcy μπορούμε να την εκφράσουμε ως ισότητα, εισάγοντας το μέγεθος της υδραυλικής αγωγιμότητας, k , που περιγράφει την ευκολία κίνησης του νερού διαμέσου των εδαφικών πόρων (Πανταζίδου, 2007).

$$v_{1,2} = k \times i_{1,2}$$

Στη γενική περίπτωση όπου δεν γνωρίζουμε την φορά της κίνησης του νερού, η παραπάνω εξίσωση γράφεται με αρνητικό πρόσημο, που δηλώνει ότι η κίνηση του νερού γίνεται στην κατεύθυνση που μειώνεται το υδραυλικό φορτίο δηλαδή η ροή γίνεται από περιοχές υψηλότερου προς περιοχές χαμηλότερου υδραυλικού φορτίου (Citrini & Nosedà, 1987):

$$v_{1 \rightarrow 2} = -k(h_2 - h_1)/L$$

Η εξίσωση του Darcy διανυσματικά γράφεται:

$$\mathbf{v} = -k \text{ grad} h$$

Θα πρέπει να αναφερθεί ότι ο νόμος Darcy δεν είναι φυσικός νόμος, δηλαδή νόμος με γενική εφαρμογή, αλλά μια απλή προσέγγιση της πραγματικής συμπεριφοράς, δηλαδή ένας καταστατικός νόμος. Ειδικότερα, λόγω της γραμμικής του μορφής είναι ο απλούστερος καταστατικός νόμος για τη ροή διαμέσου ενός εδαφικού υλικού (Fidelibus, 2003).

Περιορισμοί

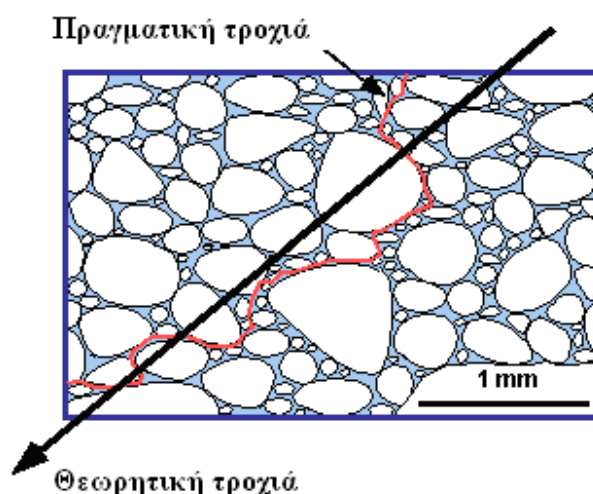
Οι περιορισμοί της ισχύς του νόμου του Darcy έχουν να κάνουν με την **ομοιογένεια** του πορώδους μέσου και τον **αριθμό του Reynolds**. Πιο συγκεκριμένα, ο νόμος του Darcy θεωρεί τη ροή διαμέσου της συνολικής επιφάνειας της διατομής, αγνοεί δηλαδή την ύπαρξη των εδαφικών κόκκων, που καταλαμβάνουν ένα ποσοστό της διατομής το οποίο δεν είναι διαθέσιμο για ροή. Γι' αυτόν το λόγο, όταν αναφερόμαστε στην ταχύτητα που δίνει η εξίσωση του Darcy, την προσδιορίζουμε ως “**ταχύτητα Darcy**” ή “**φαινόμενη ταχύτητα**” (μακροσκοπική ταχύτητα), ενώ η **πραγματική ταχύτητα** (μικροσκοπική ταχύτητα) ισούται με (Datei, 1999, Citrini & Nosedà, 1987):

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}_\phi / S_y$$

Όπου:

S_y , το ενεργό πορώδες.

Ένα μόριο νερού δεν κινείται ευθύγραμμα σε πορώδη μέσα, αλλά ακολουθεί μια σύνθετη τροχιά, λόγω πρόσκρουσης με τους κόκκους του μέσου και τα γειτονικά μόρια του νερού (Σχ. 1.27).



Σχήμα 1.27: Θεωρητική και πραγματική τροχιά μορίων νερού σε πορώδες μέσο (<http://imnh.isu.edu>).

Επίσης, ο νόμος του Darcy ισχύει για στρωτή ροή (laminar flow) και όχι για τυρβώδη (turbulent) (Σχ. 1.28). Στη στρωτή ροή η ταχύτητα είναι ανάλογη με την πρώτη δύναμη της υδραυλικής κλίσης. Δείκτη για το είδος ροής, αποτελεί ο **αριθμός Reynolds (R)**, που ισούται με:

$$R = \rho \cdot v \cdot d_m / \mu$$

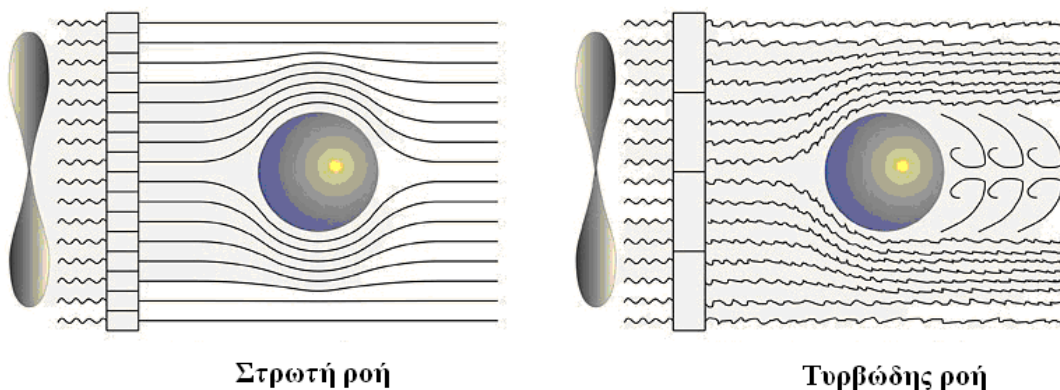
Όπου:

ρ , η πυκνότητα του νερού,

v , η μέση ταχύτητα ροής,

d_m , η μέση διάμετρος κόκκων του πορώδους μέσου,

μ , το δυναμικό ιξώδες.



Σχήμα 1.28: Στρωτή και τυρβώδης ροή (www.tubus-bauer.com).

Η ροή είναι στρωτή αν $R \leq 10$, με εξαίρεση τη ροή στους αργίλους. Σημειώνεται, ότι ο αριθμός Reynolds ορίζεται για σωλήνα διαμέτρου d , περιορισμός που ικανοποιείται στις περισσότερες περιπτώσεις φυσικής ροής σε εδάφη. Έχει βρεθεί πειραματικά ότι ο νόμος του Darcy είναι ασφαλές να χρησιμοποιείται για $R < 1$ (Hillel, 1998).

Ένας άλλος περιορισμός είναι ότι ο νόμος του Darcy δεν ισχύει στην ακόρεστη ζώνη γιατί εκεί η ροή δεν είναι μονοφασική, λόγω της παρουσίας σ' αυτήν αέρα, και κατά κανόνα δεν ισχύει και στα καρστικά υδροφόρα συστήματα λόγω της μεγάλης ταχύτητας ροής, της ανισοτροπίας και της ανομοιογένειας που εμφανίζουν.

Τέλος, να σημειωθεί ότι ο νόμος του Darcy περιγράφει πλήρως τη ροή όταν δεν υπάρχει θερμική, χημική ή ηλεκτρική κλίση δυναμικού (Datei, 1999, Citrini & Noseda, 1987).

1.6.5 Εξισώσεις υπόγειας ροής

Ο νόμος του Darcy έχει θεμελιωθεί πάνω σε πειράματα υπό καθεστώς ισορροπίας (μόνιμη ροή), αλλά δεχόμαστε ότι ισχύει στιγμιαία και για τις μη μόνιμες ροές. Οι φυσικές υπόγειες ροές είναι κατά κανόνα “ανεπαίσθητα” μη μόνιμες και υπακούουν στον νόμο του Darcy. Συνεπώς, ο νόμος του Darcy μπορεί να βοηθήσει στην επίλυση απλών μονοδιάστατων προβλημάτων ροής σε κορεσμένο έδαφος, για συνθήκες μόνιμης ροής, όταν δηλαδή δεν υπάρχουν μεταβολές στο χρόνο (η ταχύτητα σε κάθε σημείο παραμένει σταθερή). Για πιο πολύπλοκα προβλήματα, χρειάζεται να επιλυθούν διαφορικές εξισώσεις ροής οι οποίες προκύπτουν με βάση την αρχή διατήρησης της μάζας του νερού (εξισώσεις συνέχειας) και οι οποίες διαφοροποιούνται για ροή σε κορεσμένο ή ακόρεστο έδαφος. Επίσης, σε περιπτώσεις ταυτόχρονης ροής ρευστών, η αρχή της διατήρησης της μάζας εφαρμόζεται για κάθε ρευστό ξεχωριστά και με αυτόν τον τρόπο προκύπτουν οι συζευγμένες διαφορικές εξισώσεις πολυφασικής ροής. Στις θεμελιώδεις εξισώσεις ροής θα αναφερθούμε στο 3^ο κεφάλαιο στην παράγραφο 3.3.

Για να ζυγίζει το βάρος των ανέμων
και να σταθμίζει τα ύδατα με μέτρο.
(Ιώβ 28,25)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΗΣ ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΟΧΗΣ

2.1 Η λεκάνη του ποταμού Ευρώτα

2.1.1 Εισαγωγή

Η λεκάνη απορροής του ποταμού Ευρώτα βρίσκεται στο νοτιοανατολικό τμήμα της Πελοποννήσου (Εικ. 2.1). Η μεγαλύτερη έκταση της υπό μελέτη περιοχής, βρίσκεται στα όρια του νομού Λακωνίας (δυτικά), ενώ ένα τμήμα προς βορά ανήκει στο νομό Αρκαδίας (βόρεια και βορειοανατολικά), καθώς τα υδρογεωλογικά σύνορα δε ταυτίζονται με τα διοικητικά. Η λεκάνη απορροής συνορεύει βόρεια και βορειοανατολικά με το νομό Αρκαδίας, δυτικά με το νομό Μεσσηνίας ενώ νότια βρίσκεται ο Λακωνικός κόλπος.



Εικόνα 2.1: Χάρτης ευρύτερης περιοχής (<http://users.otenet.gr>).

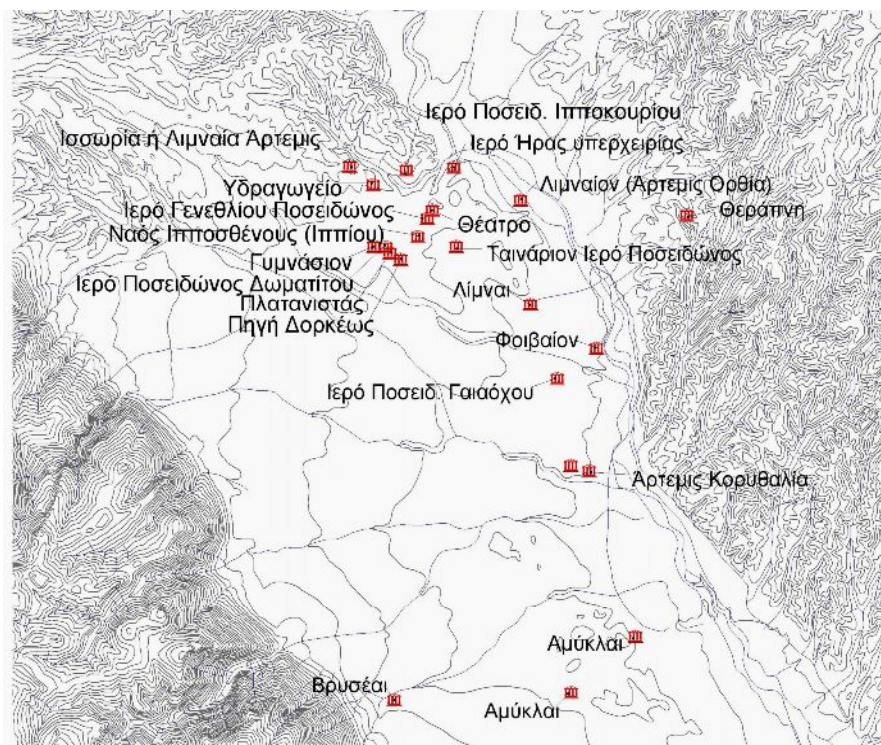
2.1.2 Ιστορικές πληροφορίες

Η περιοχή μελέτης πρωτοκατοικήθηκε τη Νεολιθική Εποχή και έχει μακραίωνη ιστορία τόσο στην αρχαιότητα, όσο και στο μεσαίωνα και τη νεότερη εποχή. Το όνομα Λακωνία

οφείλεται στην γεωφυσική μορφή της περιοχής. Το αρχαϊκό θέμα «λακ» σημαίνει κοίλωμα, δηλαδή κοιλάδα. Στους ομηρικούς χρόνους η περιοχή ονομαζόταν «κοίλη Λακεδαίμονα». Η Σπάρτη και η Λακωνία αναφέρονται στην ελληνική μυθολογία και στον Όμηρο.

Από τα σπουδαιότερα γεγονότα της ιστορίας της είναι η ίδρυση της Σπάρτης τον 11^ο αι. π. Χ. από Δωριείς (Εικ. 2.2). Έκτοτε, η ιστορία της ευρύτερης περιοχής συνδέεται με την ιστορία της Σπάρτης, η οποία αναδείχθηκε σε ηγέτιδα πόλη της Ελλάδας μετά τη νίκη της στον Πελοποννησιακό Πόλεμο (431-404 π.Χ.).

- Στους Ρωμαϊκούς Χρόνους έπεσε σε παρακμή.
- Στους Βυζαντινούς Χρόνους ήταν επαρχία του Θέματος της Πελοποννήσου και ονομαζόταν Λακεδαιμονία.
- Αργότερα, με την υποταγή τους στους Φράγκους γνώρισε μεγάλη ακμή, ιδιαίτερα με την ίδρυση του Δεσποτάτου του Μοριά, που είχε έδρα το Μυστρά.
- Τον 17^ο αι. καταλήφθηκε από τους Τούρκους, από τους οποίους απελευθερώθηκε το 1827.



Εικόνα 2.2: Τοπογραφία της Αρχαίας Σπάρτης (Μαριολάκος, 2006).

Ο ποταμός Ευρώτας είναι διάσημος από το γεγονός ότι ήταν ο ποταμός της αρχαίας Σπάρτης, όπου κοντά στη δεξιά όχθη του σε ύψωμα είχε δημιουργηθεί η αρχαία ατείχιστη και άπαρτη πρωτεύουσα των Δωριέων, η αρχαία Σπάρτη. Στις όχθες του Ευρώτα διαπλάσσονταν

οι αρχαίοι κάτοικοι της πλέον στρατοκρατικής και μαχητικής πολιτείας στη παγκόσμια Ιστορία (Μαριολάκος, 2006).

Σύμφωνα με την μυθολογία, ο Ευρώτας ήταν ο τρίτος μυθικός βασιλιάς της Λακωνίας και διαδέχτηκε τον πατέρα του, Μύλη. Ο Ευρώτας, είχε μια κόρη, την Σπάρτη, η οποία παντρεύτηκε τον Λακεδαίμονα, γιο του Δία και της Ταυγέτης. Ο Ευρώτας θέλησε να δώσει διέξοδο στα λιμνάζοντα νερά γύρω από τη Σπάρτη, γι' αυτό άνοιξε διώρυγα και διοχέτευσε τα νερά προς τη θάλασσα. Έτσι δημιουργήθηκε το ποτάμι, που πήρε το όνομα του, Ευρώτας. Άλλη παράδοση αναφέρει ότι ο Ευρώτας μετά από μια ατιμωτική ήττα από τους Αθηναίους, έπεσε στο ποτάμι και πνίγηκε και έτσι πήρε το όνομά του (www.messinia-guide.gr, www.ellinikoarxeio.com).

2.1.3 Ο ποταμός Ευρώτας

Ο ποταμός Ευρώτας (Εικ. 2.3) βρίσκεται στο νοτιοανατολικό τμήμα της Πελοποννήσου και διέρχεται μεταξύ των οροσειρών του Ταυγέτου και του Πάρωνα σχηματίζοντας μια εύφορη κοιλάδα. Περνά δίπλα από τη Σπάρτη και διασχίζει το νομό Λακωνίας, από βορρά προς νότο, χωρίζοντάς τον στα δύο. Ο ποταμός πηγάζει από τη νότιο-ανατολική περιοχή του οροπεδίου της Μεγαλόπολης του νομού Αρκαδίας. Έχει μήκος περίπου 85 χιλιόμετρα και στο πέραςμά του τροφοδοτείται από πλήθος μικρούς παραποτάμους, χείμαρρους και πολυάριθμες πηγές πριν εκβάλει στο Λακωνικό κόλπο. Οι εκβολές του επεκτείνονται συνέχεια προς τη θάλασσα με συνέπεια να διαφοροποιείται κάθε χρόνο η γραμμή του αιγιαλού και το πλάτος της παραλίας στο μυχό του Λακωνικού Κόλπου.



Εικόνα 2.3: Γενική άποψη του ποταμού Ευρώτα (Νικολαΐδης κ.ά., 2009).

Οι σημαντικότεροι παραπόταμοι του ποταμού Ευρώτα είναι ο Γερακάρης και το Αρδελολάγκαδο (από τον Ταϋγετο) και ο Οινούς ή Κελεφίνα, το Μεγάλο Ρέμα και το Μαριόρεμα (από τον Πάρνωνα). Οι παραπόταμοί του (Εικ. 2.4), μεταφέρουν μεγάλες ποσότητες χωμάτινης ύλης και πέτρες, γι' αυτό ο Ευρώτας χαρακτηρίζεται ιδιαίτερα προσχωματικός (Νικολαΐδης κ.ά., 2009).

Παρά το γεγονός ότι είναι ο δέκατος σε μήκος ποταμός της Ελλάδας, δεν υπάρχουν κατά μήκος της κοίτης του σημαντικά έργα διευθέτησης που να διασπούν τη συνέχεια του ποτάμιου συστήματος. Στη λειτουργία αυτή το Δέλτα του Ευρώτα αποτελεί τερματικό σημείο το οποίο δέχεται μεγάλο μέρος της πληροφορίας και της ύλης που κινείται και μεταφέρεται στον Ευρώτα.



Σχήμα 2.1: Ο ποταμός Ευρώτας, κυρίως ρέμα και παραπόταμοι (Νικολαΐδης κ.ά., 2009).

Ο ποταμός Ευρώτας με το υδρογραφικό δίκτυο που τον τροφοδοτεί αποτελεί τον συνδετικό ιστό, που όχι μόνο μεταφέρει προς τη θάλασσα νερό και φερτά υλικά, αλλά ταυτόχρονα συνδέει απομακρυσμένες περιοχές με μεγάλη αξία για τη φύση, όπως το Δέλτα του Ευρώτα. Από τα νερά του Ευρώτα υδρεύονται οικισμοί, αρδεύεται ένα μεγάλο μέρος της καλλιεργήσιμης έκτασης του νομού Λακωνίας και συντηρούνται αρκετές οικογένειες ψαράδων της περιοχής (www.evrotas.gr, www.minenv.gr, www.medsos.gr).

2.1.4 Το Δέλτα του Ευρώτα

Στις εκβολές του Ευρώτα υπάρχει εκτεταμένο Δέλτα έκτασης 1.800 στρεμμάτων, το οποίο σχηματίστηκε από τη μετακίνηση, στο πρόσφατο και απώτερο παρελθόν, φερτών υλών από τον ποταμό (Εικ. 2.4). Το Δέλτα του Ευρώτα έχει σχήμα με σχετικά σταθερό μήκος 15 Km και πλάτος κυμαινόμενο από 1 – 6 Km. Το χαρακτηριστικό σχήμα εξάπλωσης είναι ένα τραπέζιο με τη μεγαλύτερη πλευρά του να διαβρέχεται από τη θάλασσα και να αποτελεί την ακτογραμμή. Η συνολική έκταση των δελταϊκών αποθέσεων καταλαμβάνει 75 Km² και χαρακτηρίζεται από πολύ μικρές κλίσεις. Η σύνδεση των δελταϊκών αποθέσεων με τη θάλασσα γίνεται μέσω μια στενής λωρίδας 0.3 – 0.7 Km και μήκους 11 Km που αποτελείται από χαρακτηριστικές αμμώδεις αποθέσεις με αμμοθίνες κατά θέσεις που αποτελούν σημαντικό βιότοπο, αλλά και μορφολογικά δημιουργούν ένα φυσικό φράγμα (Barrier) όπως συνηθίζεται να αποκαλείται στη διεθνή βιβλιογραφία (Κακούρος κ. ά., 2009).



Εικόνα 2.4: Το Δέλτα του ποταμού Ευρώτα στην περιοχή της Σκάλας (www.trekearth.com).

Το Δέλτα αρχίζει να διακρίνεται στην περιοχή της Βλαχοκερασιάς του νομού Αρκαδίας. Στη διαδικασία αυτή σημαντικό ρόλο έπαιξαν και παίζουν μικρότεροι ποταμοί, όπως οι Βελονάς, Κοτιτσάνης, Κελεφίνα, Βρυσιώτικο, Ρασίνα και Λεβετσωβίτικος, αλλά και εκατοντάδες χείμαρροι που αναπτύσσονται στους ορεινούς όγκους του Πάρνωνα και του Ταΰγετου. Στο Δέλτα υπάρχουν οι επιμέρους υγρότοποι του έλους Αστερίου και της λιμνοθάλασσας Βιβάρι. Εκτεταμένες είναι και οι θίνες των ακτών του που αποτελούν σημαντική περιοχή για τα πουλιά της Ελλάδας (Κακούρος κ. ά., 2009).

2.1.5 Η λεκάνη απορροής του Ευρώτα

Η επιφάνεια της λεκάνης απορροής του Ευρώτα καλύπτει έκταση 2.420 km^2 και έχει πληθυσμό περίπου 63.000 και με πυκνότητα 26 ατ/Km^2 , θεωρείται αραιοκατοικημένη. Το 68% του πληθυσμού είναι αγροτικός και το 32% αστικός. Η έκταση της καλλιεργήσιμης γης αποτελεί το 37,85 της συνολικής έκτασης της λεκάνης, με επιφάνεια 912 km^2 . Το μεγαλύτερο τμήμα της λεκάνης είναι ορεινό και ημιορεινό. Αναλυτικότερα, η μορφολογία της έχει ως εξής (Νικολαΐδης κ.ά., 2008):

- ⇒ 25,6% πεδινό
- ⇒ 37,8% ημιορεινό
- ⇒ 36,6% ορεινό

Όσον αφορά στη χρήση της γης τα ποσοστά είναι:

- ⇒ 61,25% μη καλλιεργήσιμη γη
- ⇒ 37,85% καλλιεργήσιμη γη (περίπου 912 Km^2)
- ⇒ 0,7 αστική περιοχή

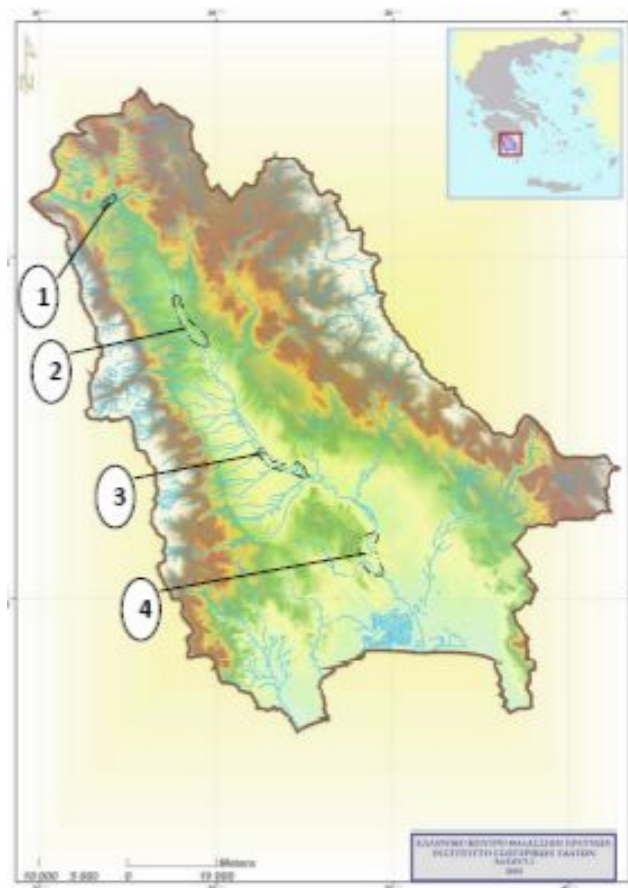
Τόσο η διάταξη της λεκάνης απορροής, η οποία είναι γραμμική, όσο και η γενικά γραμμική ανάπτυξη του ίδιου ποταμού οδηγούν στο χαρακτηρισμό του Ευρώτα ως ποταμού σε νεαρή φάση, που χαρακτηρίζεται από μικρούς χρόνους απόκρισης του σε σχέση με αλλαγές στην υδρολογική συμπεριφορά της λεκάνης απορροής (Νικολαΐδης κ.ά., 2009). Με τον όρο **γραμμική λεκάνη απορροής** εννοούμε μία λεκάνη απορροής για την οποία ισχύει γραμμική σχέση μεταξύ βροχής και απορροής, δηλαδή σε κάθε χρονική στιγμή η παροχή είναι ανάλογη του όγκου του νερού που αποθηκεύεται στη λεκάνη. Σε αυτή την περίπτωση όταν διπλασιάζεται η βροχή, διπλασιάζεται και το υδρογράφημα, ενώ αν υποδιπλασιαστεί η βροχή, υποδιπλασιάζεται και το υδρογράφημα. Μία τέτοιου είδους λεκάνη μπορεί να

θεωρηθεί γραμμικό σύστημα ως προς το μετασχηματισμό της καθαρής βροχής σε απορροή (Becciu, 2006).

Ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής του Ευρώτα

Ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της λεκάνης απορροής του ποταμού Ευρώτα αποτελούν:

- ⇒ Η **μεγάλη οικοποικιλότητα και βιοποικιλότητα** οι οποίες οφείλονται στο μεγάλο εύρος των κλιματικών τύπων, στην τοπογραφία, στη γεωλογία, στη γεωλογική ιστορία, αλλά και στη μακράιωνη παρουσία του ανθρώπου. Οι βασικοί πυρήνες της βιοποικιλότητας της περιοχής μελέτης εικονίζονται στο σχήμα. 2.2.
- ⇒ Η **καλή λειτουργία του υδρογραφικού δικτύου** της ως συστήματος διαδρόμων για τα άγρια είδη της χλωρίδας και της πανίδας (Κακούρος κ. ά., 2009).



Σχήμα 2.2: Περιοχές πυρήνων βιοποικιλότητας (Νικολαΐδης κ.ά., 2009).

Πηγές της λεκάνης

Οι κυριότερες πηγές που βρίσκονται στη λεκάνης απορροής του ποταμού Ευρώτα δίνονται στον πίνακα 2.1.

Πίνακας 2.1: Κύριες πηγές στην λεκάνη απορροής του Ευρώτα (Νικολαΐδης κ.ά., 2009).

Πηγή	Τοποθεσία	Εκτίμηση παροχής [m ³ /h]	Χρήση
Πενταύλοι	Ξηροκάμπιο	96	Υδρευση-Άδρευση
Σκάλας	Σκάλα	7393	Υδρευση-Άδρευση
Αγ. Μαρίνα	Άρνα	475	Υδρευση-Άδρευση
Αγ. Μάμα	Καστόριο	133	Υδρευση-Άδρευση
Πελλάνα	Πελλάνα	-	Υδρευση-Άδρευση
Ζορός	Κονιδίτσα	-	Υδρευση-Άδρευση
Στερνάκλες	Γύθειο	146	Ανεκμετάλλευτη
Βιβαρίου	Σελλασία	3899	Υδρευση-Άδρευση
Δημαρά	Βρέσθена	126	Υδρευση-Άδρευση
Τρύπης	Τρύπη	150	Υδρευση-Άδρευση
Σωτήρος	Ανώγεια	707	Υδρευση-Άδρευση

2.1.6 Χλωρίδα και πανίδα

Η περιοχή της λεκάνης απορροής του Ευρώτα έχει χαρακτηριστεί ως Σημαντική Περιοχή για τα Πουλιά (ΣΠΠ) και το Δέλτα του ποταμού αποτελεί έναν από τους τελευταίους σημαντικούς υγροβιότοπους στη νότια Ελλάδα, ο οποίος περιλαμβάνεται στο ευρωπαϊκό δίκτυο NATURA. Είναι το σημαντικότερο μέρος ξεκούρασης και διατροφής για έναν τεράστιο αριθμό μεταναστευτικών πτηνών στη νότια Ελλάδα, αποτελεί τόπο ωοτοκίας για σημαντικό αριθμό πτηνών και ψαριών και τόπο διαβίωσης ενδημικών οργανισμών και απειλούμενων ειδών πανίδας όπως θα δούμε παρακάτω (Κακούρος κ. ά., 2009).

Στις εκβολές του Ευρώτα εμφανίζονται οι εξής τύποι οικοτόπων:

- ⇒ εκβολές ποταμών,
- ⇒ μεσογειακά αλίπεδα (*Juncetalia maritimi*),
- ⇒ υποτυπώδεις κινούμενες θίνες,
- ⇒ φρύγανα (*Sarcopoterium spinosum*),
- ⇒ παρόχθια δάση-στοές της θερμής Μεσογείου (*Nerio-Tamaricetea*).

Ο μεγάλος ενδημισμός ο οποίος παρουσιάζεται στην ευρύτερη περιοχή του ποταμού Ευρώτα, οφείλεται τόσο στη γεωλογική και κλιματική ιστορία, όσο και στην γεωγραφική απομόνωση και ποικιλομορφία του περιβάλλοντος, η οποία παρατηρείται στην περιοχή. Στη λεκάνη απορροής του Ευρώτα εμφανίζεται πλήθος διαφορετικών και σπάνιων υδατικών και παρόχθιων περιβαλλόντων όπως είναι τα παρόχθια δάση και έλη, τα δυσπρόσιτα φαράγγια και οι χαράδρες, τα δελταϊκά έλη και οι γλυκόβαλτοι. Εμφανίζει, επίσης, πλούσια υδατική χλωρίδα, λόγω της ομαλής κλίσης του ποταμού (Νικολαΐδης κ.ά., 2009).

Χλωρίδα

Οι οροσειρές της Πελοποννήσου αποτελούν σημαντικά κέντρα βιοποικιλότητας, ιδιαίτερα χλωριδικής ποικιλότητας. Η πλούσια χλωρίδα της οροσειράς του Ταϋγέτου αποδεικνύει τη μοναδικότητά του, φιλοξενώντας 32 ενδημικά φυτά. Τα σπανιότερα ενδημικά φυτά του Ταϋγέτου είναι: *Astragalus taygeteus*, *Athamanta arachnoidea*, *Crepis crocifolia*, *Crocus sieberi* – subsp. *Nivalis* (Εικ. 2.5), *Hypericum taygeteum* (Εικ. 2.6), *Lithodora zahnii*, *Nepeta camphorata*, *Onosma leptanthum*, *Silene echinosperma*, *Silene goulimy* και το *Trifolium filicaule* (Σφήκας, 1997).



Εικόνα 2.5: Κρόκος, ενδημικό του Ταϋγέτου (*Crocus sieberi* – subsp. *Nivalis*), (<http://www.mani.org.gr>).



Εικόνα 2.6: Είδος υπερικού (*Hypericum*), (<http://stipsi-electra.blogspot.com>).

Στην περιοχή του Πάρωνα υπάρχουν 108 ενδημικά φυτά, από τα οποία 4 είναι τοπικά ενδημικά, άλλα 34 αναπτύσσονται μόνο στην Πελοπόννησο, ενώ τα υπόλοιπα 69 έχουν ευρύτερη εξάπλωση στον ελληνικό χώρο.

Στα θαλάσσια οικοσυστήματα του Λακωνικού εντοπίζονται εκτεταμένα λιβάδια Ποσειδωνίας, τα οποία αποτελούν τόπους αναπαραγωγής και διατροφής για ένα πλήθος οργανισμών, καθώς και για ψάρια με μεγάλη εμπορική σημασία. Επιπλέον τα λιβάδια Ποσειδωνίας της περιοχής έχουν ταυτοποιηθεί ως αναπτυξιακό πεδίο για ανήλικα άτομα της Πράσινης Χελώνας (*Chelonia mydas*).

Η ζώνη των αμμόλοφων στην παραλία του Ευρώτα είναι η μεγαλύτερη στη νότια Πελοπόννησο και αποτελείται από θίνες μήκους 15 χιλιομέτρων και πλάτους 100 ως 300 μέτρων με αλοφυτική βλάστηση και συστάδες από αλμυρίκια. Η ζώνη φιλοξενεί σπάνια και προστατευόμενα είδη φυτών όπως ο Κρίνος της Θάλασσας (*Pancratium maritimum*) (Εικ. 2.7) και το Λινάρι του Φοίτου (*Linum phitosianum*) (Εικ. 2.8), είδος μοναδικό στον κόσμο, (λεπτό ημιθαμνώδες φυτό με φύλλα γλαυκοπράσινα και πολυάριθμους όρθιους βλαστούς που φτάνουν τα 28 εκ.) (Γεωργίου & Δεληπέτρου, 2000).



Εικόνα 2.7: Ο Κρίνος της Θάλασσας (*Pancratium maritimum*), (www.summagallicana.it)

Τα είδη Λινάρι του Φοίτου, Ονοβρυχίς της Πελοποννήσου (*Onobrychis peloponnesiaca*) και Αστράγαλος της Λακωνίας (*Astragalus laconicus*), ανακαλύφθηκαν και περιγράφηκαν πρόσφατα (1994, 1999 και 1999 αντίστοιχα) από το βοτανολόγο Κωνσταντίνο Γουλιμή, από τις πεδινές περιοχές ανάμεσα Βλαχιώτη και Μακρινάρα, στον νομό Λακωνίας (www.kathimerini.gr).

Όσον αφορά στην υδρόβια χλωρίδα ο Ευρώτας έχει μία ιδιαίτερα πλούσια υφυδατική και υδροχαρή βλάστηση, που περιλαμβάνει σημαντικό αριθμό υδροφύτων (*Potamogeton* sp. κ.ά.) και ελοφύτων (*Nasturdium officinale*, *Lycopus europaeus*, *Mentha aquatica*, *Typha domingensis*, *Phragmites australis* κ.ά.) (Κακούρος κ. ά., 2009).



Εικόνα 2.8: Είδος λιναριού (*Linum*), (British Wild Flowers by A. R. Horwood).

Ερπετοπανίδα

Στην περιοχή του Ευρώτα υπάρχουν πολύ μεγάλοι πληθυσμοί από αμφίβια σε πάρα πολλά σημεία του ποταμού. Ένα χαρακτηριστικό είδος είναι ο ελληνικός βάτραχος (*Rana graeca*). Αποτελεί ιδιαίτερα ψυχρόφιλο είδος και βρέθηκε μονό σε σημεία διαρκούς ροής ή πηγαία νερά σε μεγάλα υψόμετρα (π.χ. παραπόταμοι του Ευρώτα στον Πάρνωνα). Άλλα είδη είναι ο Χωματόφρυνος ή Μπράσκα (*Bufo bufo*), ο Πρασινόφρυνος ή Ζάμπα (*Bufo viridis*), ο Δεντροβάτραχος (*Hyla arborea*) και ο Λιμνοβάτραχος ή Βάθρακας (*Rana ridibunda*). Από τα θηλαστικά εμφανίζονται: η βίδρα (*Lutra lutra*), ο σκατζόχοιρος (*Erinaceus concolor*), η νανονυχτερίδα (*Pipistrellus pipistrellus*), η μικρομυωτίδα (*Myotis blythi*) και ο λαγός (*Lepus capensis*), ενώ υπάρχουν κάποιες μαρτυρίες για την παρουσία του ουροδελούς *Triturus vulgaris* (κοινός Τρίτωνας) (Νικολαΐδης κ.ά., 2009).

Στο Δέλτα του ποταμού Ευρώτα και στην ευρύτερη περιοχή υπάρχουν και πολλά είδη χελωνών. Οι στεριανές χελώνες είναι δύο ειδών: η κοινή χελώνα (*Testudo hermanni*) και η κρασπεδοχελώνα (*Testudo marginata*). Από νεροχελώνες βρέθηκαν και τα δύο ελληνικά είδη: η Ποταμοχελώνα (*Mauremys caspica*), (Εικ. 2.9) και η Βαλτοχελώνα (*Emys orbicularis*) σε ίση περίπου πληθυσμιακή αναλογία και έντονη παρουσία.

Τέλος, όπως ήδη αναφέρθηκε, υπάρχει η θαλάσσια χελώνα Καρέττα (*Caretta caretta*). Ο λακωνικός κόλπος φιλοξενεί σε ποσοστό 7.6% του συνόλου των φωλιών στην Ελλάδα και αποτελεί σημαντικό μέρος του μεσογειακού πληθυσμού του είδους, που διαφέρει σημαντικά

από άλλους πληθυσμούς του είδους που ζουν στον Ατλαντικό ωκεανό (Κακούρος κ. ά., 2009).



Εικόνα 2.9: Ποταμοχελώνα (*Mauremys caspica*), (www.aquaworld-crete.com).

Ορνιθοπανίδα

Η μεγάλη ποικιλία ενδιαιτημάτων της περιοχής σε ένα σχετικά μικρό χώρο, δίνει τη δυνατότητα να μπορεί να συγκρατεί πολύ μεγάλους αριθμούς πουλιών κατά τη διάρκεια των δύο μεταναστευτικών περιόδων. Ιδιαίτερα την άνοιξη, που τα πουλιά έχουν φτάσει έως εδώ διανύοντας πολύ μακρινές αποστάσεις ερήμου και θάλασσας, βρίσκουν τόπο για αρκετά μεγάλο διάστημα και τεράστιους χώρους για διατροφή και ξεκούραση. Πολύ χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι τα υγρά λιβάδια που δημιουργούνται από τις ανοιξιάτικες βροχές και που καταλαμβάνουν μέσα στο Δέλτα έναν ενιαίο χώρο, έκτασης 10.000 – 15.000 στρεμμάτων, αναλόγως τη χρονιά, από τους λίγους στον ελλαδικό χώρο, που φιλοξενούν κάθε χρόνο ένα πολύ μεγάλο αριθμό από όλα σχεδόν τα είδη ερωδιών που υπάρχουν στην Ελλάδα, μεγάλους αριθμούς από χαλκόκοτες, πολλά μικρότερα παρυδάτια, ένα πολύ μεγάλο αριθμό σαρσελών, χιλιάδες στρουθιώμορφα και βέβαια όλα αυτά προσελκύουν και ένα πολύ μεγάλο αριθμό αρπακτικών (25 είδη και ένα υποείδος), (βασιλαετοί, χρυσαιτοί, στικταετοί, κίρκοι κ.α.) (Εικ. 2.10). Ειδικότερα, στην περιοχή του Ευρώτα έχουν καταγραφεί 244 είδη πουλιών, από τα οποία τα 67 ανήκουν στο Κόκκινο Βιβλίο των απειλούμενων σπονδυλόζων της Ελλάδας και 166 ανήκουν στο Παράρτημα II της συνθήκης της Βέρνης. Από τα 243 αυτά είδη τα 76 αναπαράγονται στο Δέλτα του Ευρώτα και στα γύρω υψώματα (www.ornithologiki.gr).



Εικόνα 2.10: Καλαμόκιρκος (*Circus aeruginosus*), (<http://greeknaturephotography.blogspot.com>).

Ιχθυοπανίδα

Η ιχθυοπανίδα του ποταμού Ευρώτα είναι αξιοσημείωτη. Υπάρχουν έξι είδη ψαριών του γλυκού νερού: το περιμεσογειακό είδος *Salaria fluviatilis*, (ποταμοσαλιάρα ή σγουδιός), το Βαλκανικό είδος *Pseudophoxinus stymphalicus* (Ντάσκα), το *Tropidophoxinellus spartiaticus* (Μπάφα, ενδημικό είδος της Πελοποννήσου), το *Leuciscus keadicus* (Μενίδα, ενδημικό είδος του Ευρώτα). Αξίζει να αναφερθούν επίσης, δυο ακόμα είδη που ζουν στον Ευρώτα, το κοινό χέλι (*Anguilla anguilla*) και το κουνουνπόψαρο (*Gambusia affinis*). Υπάρχουν, επίσης, ορισμένα ακόμη είδη θαλασσινών ψαριών που εισέρχονται από τη θάλασσα όπως η αθερίνα (*Atherina boyeri*), το μαυράκι (*Liza ramada*) και το λαυράκι (*Dicentrarchus labrax*) (Κακούρος κ. ά., 2009, Νικολαΐδης κ.ά., 2009).

2.1.7 Προβλήματα της λεκάνης απορροής του Ευρώτα

Η λεκάνη απορροής του Ευρώτα είναι μια περιοχή κυρίως αγροτική χωρίς ανεπτυγμένη βιομηχανία και κατά συνέπεια τα κύρια προβλήματά της προέρχονται από την γεωργία: η αλόγιστη χρήση φυτοφαρμάκων, οι ανεξέλεγκτες γεωτρήσεις, τα κανάλια εκτροπής του νερού του ποταμού και τα μικρά χωμάτινα φράγματα τα οποία εξυπηρετούν υδροαρδευτικούς σκοπούς. Επίσης, η διάθεση ανεπεξέργαστων λυμάτων, κυρίως από οικισμούς, κατευθείαν στο ποτάμι ή στον υδροφόρο ορίζοντα και τα απόβλητα των ελαιουργείων και των χυμοποιών επιβαρύνουν περαιτέρω την κατάσταση. Οι έντονες απολήψεις νερού σε

συνδυασμό με τις ξηρές περιόδους αναγκάζουν, κατά καιρούς, τον Ευρώτα να χάνει την επιφανειακή ροή του, με σημαντικές επιπτώσεις στην υδρόβια ζωή αλλά και στην οικονομία της περιοχής (Νικολαΐδης κ.ά., 2009).

Στη δεκαετία του '90 έγιναν έργα διάνοιξης της κοίτης του κοντά στις εκβολές του, και οι όχθες του ενισχύθηκαν και ανυψώθηκαν. Κάποιες φορές, πάντως, έχει υπάρξει κίνδυνος υπερχειλίσης του ποταμού το χειμώνα και το 1999 μεγάλες καλλιεργούμενες εκτάσεις της κοιλάδας του Ευρώτα πλημμύρισαν, όπως και αρκετά χωριά στην ίδια περιοχή (www.medsos.gr).

Το τελευταίο διάστημα υπάρχουν συνεχείς καταγγελίες για τη διαρκώς αυξανόμενη ρύπανση του ποταμού Ευρώτα (Εικ. 2.11). Το ποτάμι έχει πληγεί, όσο ποτέ, από την ρίψη σκουπιδιών και μπαζών στις όχθες του, την υπερβόσκηση, τον υπερτροφισμό από τα υπολείμματα των λιπασμάτων και τέλος, την υπέρμετρη επέκταση καλλιεργούμενων εκτάσεων σε μερικά σημεία κατά μήκος της όχθης του. Οι κάτοικοι της ευρύτερης περιοχής, εκφράζουν την αγανάκτησή τους και ζητούν από τις αρμόδιες υπηρεσίες να δράσουν άμεσα και αφού ελέγξουν και εντοπίσουν τις πηγές της ρύπανσης, να προβούν στις απαραίτητες ενέργειες και κυρώσεις που επιβάλλει ο νόμος (www.notospress.gr).



Εικόνα 2.11: Σημερινή κατάσταση του Ευρώτα στην περιοχή της Σκούρας (www.notospress.gr).

2.2 Γεωλογία της περιοχής

2.2.1 Γεωμορφολογία

Η περιοχή της μελέτης αποτελείται από δύο μεγάλους ορεινούς όγκους, του Πάρνωνα (Εικ. 2.12) και του Ταΰγετου (Εικ. 2.13) και από δύο κύριες πεδιάδες, της Σπάρτης και της Σκάλας. Επίσης, περιλαμβάνει ένα μικρό μέρος της πεδιάδας των Μολαών. Η υψηλότερη κορυφή του Ταΰγετου είναι ο Προφήτης Ηλίας (2.404 m), η οποία βρίσκεται στα όρια της λεκάνης και η υψηλότερη κορυφή του Πάρνωνα είναι η Μεγάλη Τούρλα ή Μαλεβός (1.936 m), βορειότερα της λεκάνης. Μέσα στη λεκάνη απορροής, βρίσκονται και οι δύο επόμενες υψηλότερες κορυφές του Πάρνωνα, η Γαϊτανοράχη (1.891 m) και η Μαδαρή (1.686 m). Η πεδιάδα της Σπάρτης είναι μακρόστενη με ΒΔ και ΝΑ διεύθυνση και διατρέχεται κατά πλάτος από τον ποταμό Ευρώτα. Στο κέντρο της παρατηρούνται λοφώδεις εξάρσεις, οι οποίες κατανέμονται γραμμικά, παράλληλα με τη γενική διεύθυνση της κοιλάδας. Η πεδιάδα της Σκάλας βρίσκεται νότια και ορίζεται από μια λοφώδη περιοχή (βορειοδυτικά) και από μια ορεινή περιοχή (ανατολικά) και καταλήγει στον Λακωνικό κόλπο (Νικολαΐδης κ.ά., 2008).



Εικόνα 2.12: Πάρνωνας (<http://arcadia.ceid.upatras.gr>).

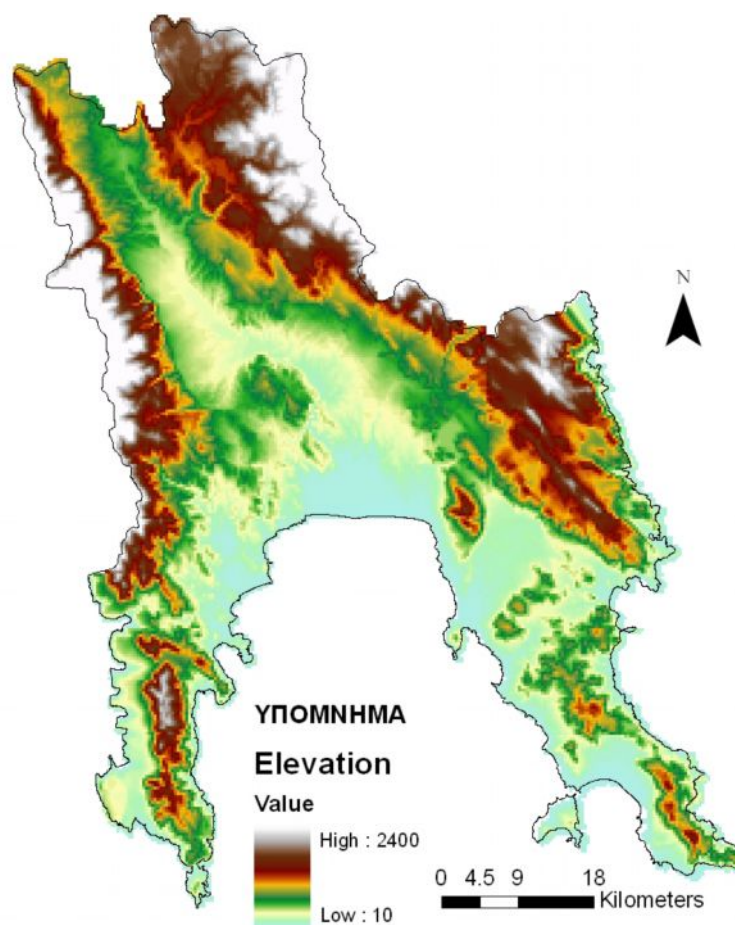
Το μεγαλύτερο τμήμα του εδάφους της λεκάνης είναι ορεινό και ημιορεινό και υπάρχουν πολλά φαράγγια. Το υψομετρικό εύρος της περιοχής είναι ιδιαίτερα μεγάλο και αναπτύσσονται έντονες κλίσεις, ειδικά στον Ταΰγετο. Η μέση κλίση είναι 19% και κυμαίνεται από 15-30%. Το μέσο υψόμετρο είναι 562 m με ποσοστά:

- ⇒ 41,1% της περιοχής έχει υψόμετρο > 600 m
- ⇒ 46,2% της περιοχής έχει υψόμετρο από 150 έως 600 m
- ⇒ 12,7% της περιοχής έχει υψόμετρο από 0 έως 150 m



Εικόνα 2.13: Ταύγετος, τμήμα της εθνικής οδού, (www.diasnews.com).

Η γεωμορφολογία της περιοχής, όπως φαίνεται και στο σχήμα 2.3, συμβάλει στην ταχεία συγκέντρωση των νερών στην κοίτη του Ευρώτα, κάτι που ευνοεί την ανάπτυξη πλημμυρικών φαινομένων και τις μεγάλες διακυμάνσεις της στάθμης του ποταμού (Νικολαΐδης κ.ά., 2009).



Σχήμα 2.3: Ψηφιακό ανάγλυφο της περιοχής μελέτης (Μαριολάκος κ.ά., 2007).

2.2.2 Λιθολογία

Το γεωλογικό υπόβαθρο της περιοχής, σύμφωνα με παλαιότερες μελέτες, αποτελείται, γενικά από σχηματισμούς Παλαιοζωικού τύπου (Στρώματα Τυρού - Παλαιοζωικά πετρώματα) (Νικολαΐδης κ.ά., 2006). Η ευρύτερη περιοχή του Δέλτα του Ευρώτα, για την οποία έχει γίνει πρόσφατα πρωτογενής έρευνα πεδίου, καλύπτεται από σχηματισμούς που ανήκουν στην Τεταρτογενή και στην Τριτογενή Περίοδο (Σχ. 2.4) (Κακούρος κ. ά., 2009). Το υπόβαθρο των Τριτογενών σχηματισμών, το αποτελούν στρώματα δολομιτιωμένων ασβεστόλιθων του κατώτερου Κρητιδικού (Μουντράκης, 1985). Η περιγραφή των λιθολογικών σχηματισμών από τα νεότερα προς τα αρχαιότερα περιγράφεται παρακάτω:

Τεταρτογενή

⇒ **Ολοκαινικές προσχωσιγενείς αποθέσεις** που αποτελούνται από αλλούβια φερτά υλικά ποταμοχειμάρριας δράσης και πλημμυρικών φάσεων, τα οποία αποτελούνται κυρίως από ψιλή άμμο και μικρό ποσοστό αργίλων. Το βάθος τους είναι έως τρία μέτρα και παρατηρούνται σε λωρίδα κατά μήκος της ακτογραμμής (Κακούρος κ. ά., 2009).

<i>Geologic Time Scale</i>					Years Ago	
Eon	Era	Period		Epoch		
Phanerozoic	Cenozoic	Quaternary		Holocene	10 ky	
				Pleistocene	1.81 my	
		Tertiary		Pliocene	5.33 my	
				Miocene	23.0 my	
				Oligocene	33.9 my	
				Eocene	55.8 my	
				Paleocene	65 my	
	Mesozoic	Cretaceous			145 my	
		Jurassic			200 my	
		Triassic			251 my	
	Paleozoic	Permian			299 my	
		Carbon-iferous	Pennsylvanian			318 my
			Mississippian			359 my
			Devonian			416 my
		Silurian			444 my	
		Ordovician			490 my	
		Cambrian			544 my	
Proterozoic		----- Precambrian -----				2.5 by
Archean	4.55 by					

Σχήμα 2.4: Υποδιαίρεση γεωλογικού χρόνου (Gradstein, Ogg & Smith, 2004).

- ⇒ **Αλλουβιακές αποθέσεις** (al) ποταμοχειμάρριας προέλευσης από άμμους, χάλικες, κροκαλολατύπες μικρού πάχους. Εμφανίζονται, κυρίως, στις περιοχές που εκβάλλουν τα ρέματα. Πρόκειται για πλαστικές αργίλους, άμμους, χαλίκια και κροκάλες. Συνήθως επικρατούν τα λεπτόκοκκα υλικά άργιλοι - άμμοι, ενώ η παρουσία χονδρόκοκκων υλικών είναι μεγαλύτερη στην ευρύτερη περιοχή της κοίτης των χειμάρρων. Το πάχος των αλλουβιακών αποθέσεων είναι σχετικά μικρό και κυμαίνεται από 0.5 - 2.0 μέτρα (Κακούρος κ. ά., 2009).

Τριτογενή (Πλειόκαινο)

- ⇒ **Θαλάσσιοι σχηματισμοί** (Pl.mk): αναπτύσσονται κυρίως, στο ΝΔ τμήμα της περιοχής της μελέτης και αποτελούνται από ασβεστοψαμμιτικούς και αμιγείς αργίλους, τεφρές μάργες και αραιές διαστρώσεις οργανογενών ψαμμιτικών ασβεστολίθων με *Ostrea*, *Korallia*, *Γαστερόποδα* κ.α. (Κακούρος κ. ά., 2009).
- ⇒ **Παράκτιοι σχηματισμοί** (Pl.c): βρίσκονται πάνω σε διάφορους παλαιότερους (παλαιοζωϊκούς ή μεσοζωϊκούς) σχηματισμούς. Αναπτύσσονται κυρίως στο ΒΑ τμήμα της περιοχής της μελέτης αλλά και νοτιότερα και αποτελούνται από ασβεστολιθικές και σπάνια χαλαζιακές κροκάλες. Προς ΝΔ μεταπίπτουν οριζόντια σε αργιλοψαμμιτικές αποθέσεις με αραιές κροκάλες μεταμορφωμένου υπόβαθρου. Το συνολικό πάχος είναι 200 μ. περίπου (Καραλέμας, 2006).

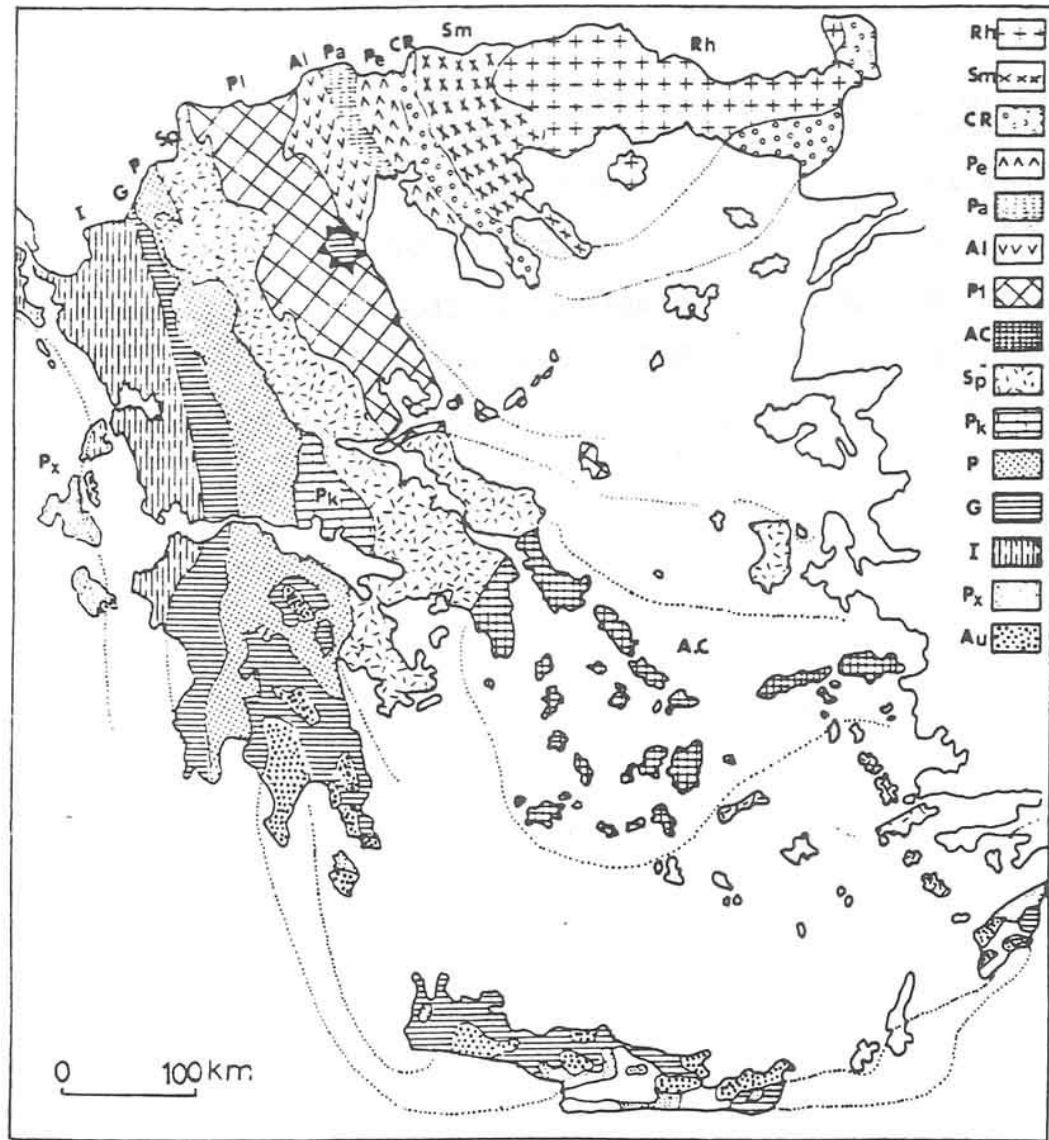
2.2.3 Γεωτεκτονικά στοιχεία

Η περιοχή μελέτης ανήκει στις γεωτεκτονικές ζώνες, της Πίνδου, του Γαβρόβου–Τρίπολης, των Παξών και της Ιονίου ζώνης (Σχ. 2.5, 2.6). Οι ζώνες αυτές είναι οι νεότερες του Ελληνικού χώρου και κάθε μία από αυτές έχει συγκεκριμένη στρωματογραφική διαδοχή ιζημάτων, από τους ιδιαίτερους λιθολογικούς χαρακτήρες της και από την ιδιαίτερη τεκτονική της συμπεριφορά, στοιχεία γενικά που εξαρτώνται από την παλαιογεωγραφική της θέση.

Η ζώνη **Γαβρόβου – Τρίπολης** δομείται στη βάση από δολομιτικούς ασβεστολίθους και δολομίτες μέσω ως άνω Τριαδικού, ασβεστολίθους του Ιουρασικού, βιτουμενιούχους με φλέβες ασβεστίτη, ασβεστολίθους του Κρητιδικού και του Παλαιοκαίνου και τέλος το φλύσχη με την τυπική μορφή του φλύσχη Τριπόλεως και ηλικία Ηωκαίνου-Ολιγοκαίνου (Αντωνάκος, 1997).

Η ζώνη της Τρίπολης έχει αναλυθεί διεξοδικά από μεγάλο πλήθος ερευνητών, καθώς χαρακτηρίζεται από μεγάλη γεωγραφική εξάπλωση, σε όλο το μήκος του ελληνικού τόξου. Ο

λιθολογικός της χαράκτηρας (παχυστρωματώδεις έως άστρωτοι νηρητικοί ασβεστόλιθοι), σε συνδυασμό με το γεγονός ότι δεν βρέθηκε σε συνθήκες μεταμόρφωσης, είχε σαν αποτέλεσμα η παραμόρφωσή της να εκδηλώνεται με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά (Καραλέμας, 2006).



Σχήμα 2.5: Γεωτεκτονικό σχήμα των Ελληνίδων ζωνών. **Rh:** Μάζα της Ροδόπης, **Sm:** Σερβομακεδονική μάζα, **CR:** Περιροδοπική ζώνη, **Pa:** Ζώνη Πάικου, **Al:** Ζώνη Αξιού, **PI:** Πελαγονική ζώνη, **Ac:** Αττικό-Κυκλαδική ζώνη, **Sp:** Υποπελαγονική ζώνη, **Pk:** Ζώνη Παρνασσού - Γκιώνας, **P:** Ζώνη Πίνδου, **G:** Ζώνη Γαβρόβου - Τρίπολης, **I:** Ιόνιος ζώνη, **Px:** Ζώνη Παξών, **Au:** Ενότητα “Ταλέα όρη - πλακώδεις ασβεστόλιθοι” πιθανόν της Ιονίου ζώνης (Mountrakis et al. 1983).

Η ιζηματογένεση της ζώνης πραγματοποιήθηκε με απόθεση ασβεστολιθικών και δολομιτικών σχηματισμών που καλύπτουν το μεγαλύτερο μέρος της διαβρωμένης κοίτης του ποταμού Ευρώτα. Η ιζηματογένεση άρχισε από μέσο Τριαδικό και συνεχίστηκε μέχρι το μέσο Κρητιδικό. Τα πετρώματα της ζώνης Γαβροβού – Τρίπολης, περιλαμβάνουν: ασβεστόλιθους (T-Kk) συμπαγείς, (λευκόφαιους έως υποκύανους, μικροκρυσταλλικούς),

κερατόλιθους ερυθροκάστανους (T-Ksch). Η ηλικία των πετρωμάτων είναι Τριαδική - Κρητιδική. Εμφανίζονται στο δυτικό και κεντρικό τμήμα της περιοχής μελέτης (Κακούρος κ. ά., 2009).

Η **ζώνη των Παξών (ή Προαπουλία)**, αντιπροσωπεύεται από την σειρά των ανθρακικών σχηματισμών και από τα ιζήματα της κλαστικής σειράς του φλύσχη που βρίσκονται πάνω από τα στρώματα Τυρού. Τα στρώματα Τυρού δομούνται από δύο υποενότητες, μια ηφαιστο-ιζηματογενή σειρά με τόφους και κλασικά ιζήματα και μια σειρά με εναλλαγές ασβεστολίθων-σχιστολίθων (Α. Αντωνάκος, 2007). Η ζώνη αυτή θεωρείται ότι αντιπροσωπεύει παλιά αλπική ηπειρωτική πλατφόρμα με νηριτική - ανθρακική ιζηματογένεση.

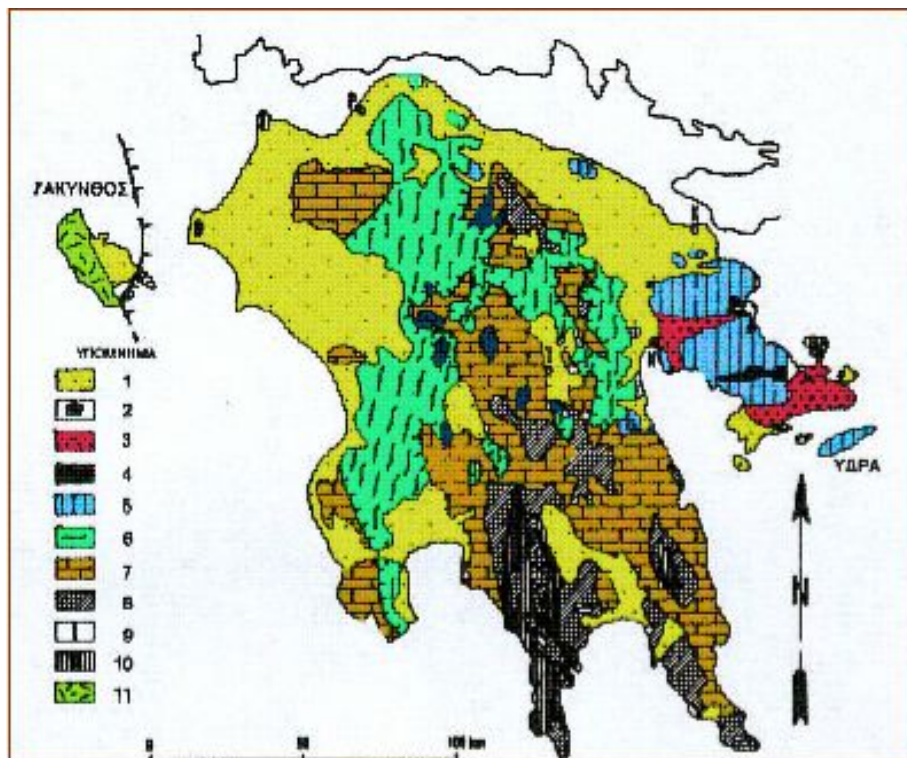
Η **ζώνη της Πίνδου** εμφανίζει σχηματισμούς με τον όρο «Πρώτος Φλύσχος» και πρόκειται για μία κλαστική σειρά από εναλλαγές ψαμμιτών, πηλινών και ραδιολαριτών με ενδιάμεσες στρώσεις λατυποπαγών ασβεστόλιθων. Ακολουθούν οι «πλακώδεις ασβεστόλιθοι» οι οποίοι αποτελούν την πλέον διαδεδομένη φάση της ενότητας στην κεντρική και νότια Πελοπόννησο (Καραλέμας, 2006).

Η **ζώνη της Ιονίου** αποτελείται από τυπικότατο Φλύσχη με χαρακτηριστική έναρξη της φλυσχογένεσης στο ανώτερο Ηώκαινο ως τη βάση του Ολιγοκαίνου. Στη ζώνη αυτή πιθανόν ανήκει και η ενότητα Plattenkalk (Mountrakis et al. 1983). Η ενότητα αυτή, η οποία καταλαμβάνει και το μεγαλύτερο τμήμα του υποβάθρου δυτικά της περιοχής έρευνας, δομείται στη βάση από ένα φυλλιτικό υπόβαθρο ηλικίας Περμίου έως κάτω Τριαδικού με μαύρους ανθρακούχους φυλλίτες έντονα πτυχωμένους, με χαμηλό βαθμό μεταμόρφωσης πάχους έως και 300m ενώ στη συνέχεια ακολουθούν Δολομίτες και δολομιτικοί ασβεστόλιθοι του Παντοκράτορα ηλικίας μέσου Τριαδικού ως κάτω Ιουρασικού και πάχους 450 m περίπου, οι πυριτικοί σχιστόλιθοι, με ηλικία κάτω έως μέσο Ιουρασικό και πάχος ως 40m, οι κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι της Βίγλας, με ηλικία από Ιουρασικό ως Κρητιδικό, τους κρυσταλλικούς πλακώδεις ασβεστολίθους του Ηωκαίνου και τέλος τα στρώματα μετάβασης και ο φλύσχος, με ηλικία από Ηώκαινο ως Ολιγόκαινο (Αντωνάκος, 1997).

Οι λιθολογικοί σχηματισμοί που εμφανίζονται από τους νεώτερους προς τους αρχαιότερους είναι:

⇒ **Λιμναίες αποθέσεις** (κροκαλοπαγή, άμμοι, άργιλοι, μάργες κ.λπ.), σε συνδυασμό με χερσαίες αποθέσεις και κώνους κορημάτων (Ολοκαίνο), που καλύπτουν την κοιλάδα του Ευρώτα. Είναι σχηματισμοί υδροπερατοί, που τροφοδοτούνται άμεσα από τις βροχοπτώσεις, αλλά και πλευρικά από τα νερά των ρεμάτων.

⇒ **Σειρά πλακωδών μαρμάρων** κατά τη διάρκεια της ορογένεσης και μικροκρυσταλλικά μάρμαρα.



Σχήμα 2.6: Γεωλογικό σκαρίφημα της Πελοποννήσου. 1: Νεογενείς-Τεταρτογενείς αποθέσεις, 2: Ηφαίστεια, 3: Κρητιδικό και Παλαιογενείς σχηματισμοί της Αργολίδας, 4: Σχηματισμοί Ηωελληνικού καλύμματος, 5: Αργολική ενότητα, 6: Σειρά Πίνδου, 7: Σειρά Τρίπολης, 8: Σειρά Φυλλιτών, 9: Σειρά Ιόνια, 10: Σειρά Plattenkalk, 11: Σειρά Προαπούλια (Αντωνάκος, 1997, κατά Jacobshagen et al., 1978).

- ⇒ **Σειρά στρωματοδών μαρμάρων**
- ⇒ **Κερατολιθικός ορίζοντας** (Μ. Ιουρασικό) με τεφρόλευκους, και κυψελώδεις πυριτιόλιθους.
- ⇒ **Σειρά συμπαγών μαρμάρων** (Αν. Τριαδικό)
- ⇒ **Σειρά δολομιτωμένων ασβεστόλιθων** (Αν. Ιουρασικό – Κατ. Κρητιδικό) ασβεστόλιθοι, δολομιτικοί ασβεστόλιθοι (σχηματισμοί της ζώνης της Τρίπολης)
- ⇒ **Σειρά οργανογενών ασβεστόλιθων**
- ⇒ **Σειρά δολομιτών** (Μ-Αν. τριαδικό) από τεφροί ως σκοτεινότεφροι, δολομίτες και δολομιτικοί ασβεστόλιθοι.
- ⇒ **Ηφαιστειοζηματογενής σειρά** (στρώματα Τυρού).
- ⇒ **Σειρά στρωμάτων ασθενώς μεταμορφωμένων** και μεταμορφωμένοι αργιλικοί σχιστόλιθοι (στρώματα Τυρού).

⇒ **Φυλλιτική σειρά** που έχει χαλαζιακούς, σερικιτικούς, ανθρακικούς και ταλκικούς φυλλίτες με εναλλαγές διμαρμαρυγιακών σχιστόλιθων και χαλαζιτών.

Σε ό,τι αφορά στη θέση των διαφόρων πετρωμάτων, πρέπει να σημειωθεί ότι ο Ταΰγετος αποτελείται στο μεγαλύτερο μέρος του από ασβεστόλιθους και σχιστόλιθους, εκ των οποίων σημαντική είναι η έκταση που καταλαμβάνουν οι πλακοπαγείς ασβεστόλιθοι. Ο Ταΰγετος αποτελεί μέρος του αλπικοδυναρικού τόξου και είναι ένα από τα λίγα βουνά της Ελλάδας που έμεινε έξω από το νερό κατά τις διαδοχικές περιόδους μεταβολής της στάθμης της θάλασσας.

Ο Πάρνωνας, ανήκει γεωλογικά στη ζώνη Γαβρόβου-Τρίπολης και αποτελείται κυρίως από ασβεστολιθικό υπόστρωμα και εμφανίζει μεγάλη συμμετοχή φυλλιτών. Όπως ο Ταΰγετος, ο Πάρνωνας ήταν απομονωμένος για μακρύ χρονικό διάστημα.

Σε ό,τι αφορά στις πεδινές περιοχές, αξίζει να παρατηρηθεί ότι στη δυτική πλευρά της πεδιάδας του Ευρώτα εμφανίζονται εκτός των λιμναίων και σημαντικές περιοχές με χερσαίες αποθέσεις, που μαρτυρούν έντονα φαινόμενα διάβρωσης του Ταΰγετου κατά τις τελευταίες περιόδους του Τεταρτογενούς (Κακούρος κ. ά., 2009).

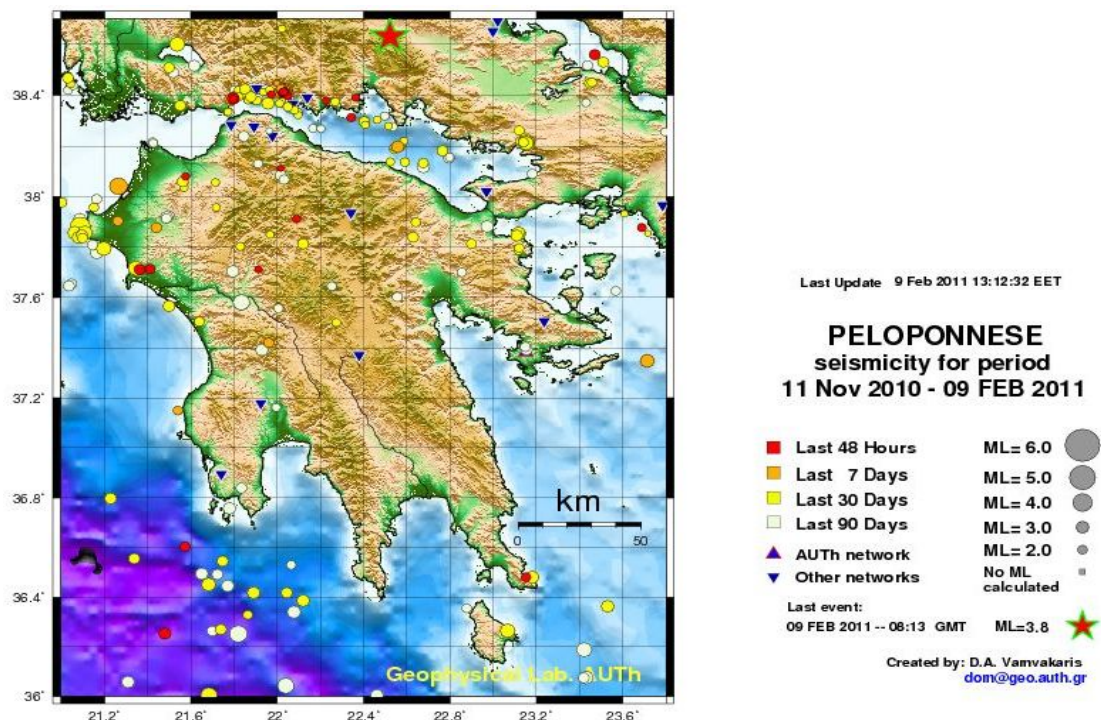
Ιζηματολογία των δελταϊκών αποθέσεων

Γενικά το ίζημα στις δελταϊκές αποθέσεις είναι αργιλοϊλυώδες και ιλυαργιλώδες με μικρά σχετικά ποσοστά άμμου και ποσοστό ανθρακικών κυμαινόμενο από 13-38% με σταδιακή μείωση προς το εσωτερικό του Δέλτα, όπου κυριαρχούν τα χονδρόκοκκα χαρακτηριστικά, συνεπεία της έντονης ποταμοχειμάρριας απόθεσης φερτών υλικών (Κακούρος κ. ά., 2009).

2.2.4 Σεισμικότητα

Πολλές περιοχές της Πελοποννήσου και ειδικά βορειοδυτικά και νότια (Εικ. 2.15), πλήττονται συχνά από σεισμούς. Τα τελευταία τρία χρόνια σημειώθηκαν τέσσερις ισχυροί σεισμοί στην περιοχή (Σαλονικιός κ.ά. 2009):

- ⇒ Ο σεισμός των Κυθήρων, μεγέθους M6.9, (8/1/2006) στη νότια Πελοπόννησο.
- ⇒ Ο σεισμός του Λεωνιδίου, μεγέθους M6.5, (6/1/2008), στις ακτές της νότιας Πελοποννήσου.
- ⇒ Ο σεισμός της Κορώνης μεγέθους M6.7, (14/2/2008), στην θάλασσα κοντά στη νότια Πελοπόννησο.
- ⇒ Ο σεισμός Αχαΐας – Ηλείας μεγέθους M6.5, (8/6/2008), στη βορειοδυτική Πελοπόννησο.



Σχήμα 2.7: Η σεισμικότητα της ευρύτερης περιοχής κατά το τελευταίο διάστημα (<http://geophysics.geo.auth.gr>).

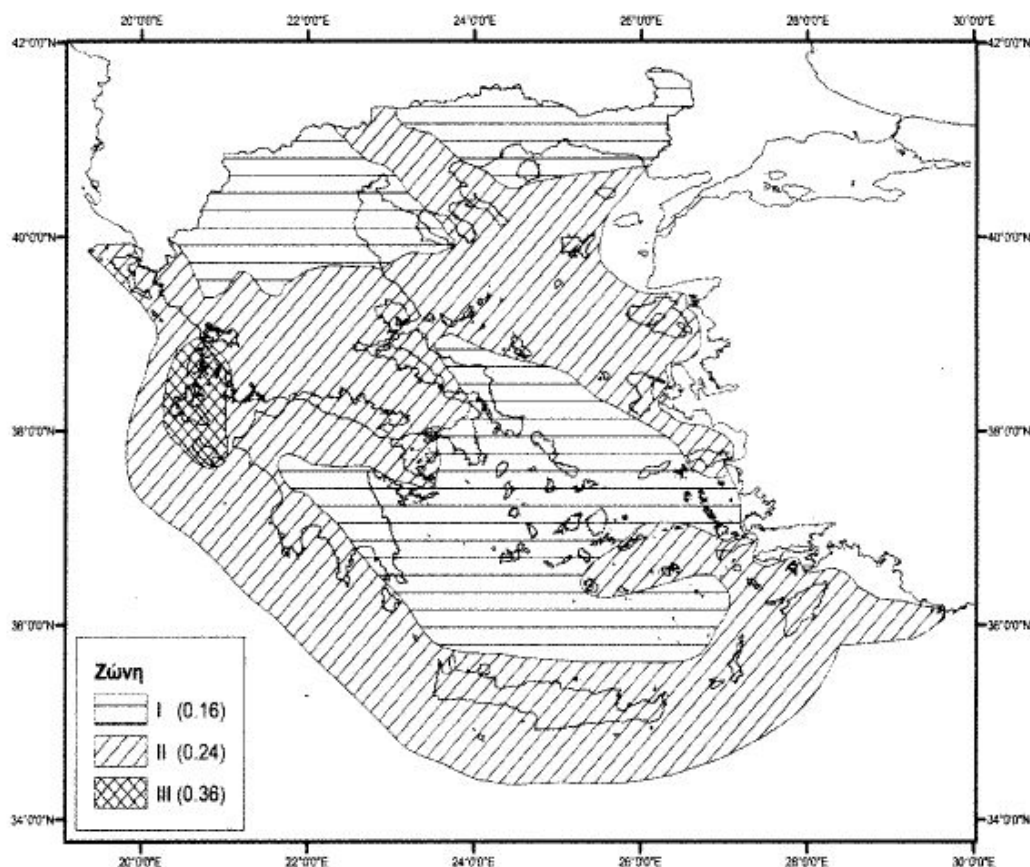
Οι πιο καταστροφικοί, σεισμοί της περιοχής που συνέβησαν παλαιότερα και υπήρξαν θύματα ήταν:

- ⇒ Ο σεισμός της Καλαμάτας (1986), μεγέθους M6.2.
- ⇒ Ο σεισμός του Αιγίου (1995), μεγέθους M6.4

Σύμφωνα με το χάρτη σεισμικής επικινδυνότητας που ενσωματώνεται στον Ελληνικό Αντισεισμικό Κανονισμό του 2000 και δημοσιεύτηκε στο ΦΕΚ 1154B/12.8.2003, ο ελληνικός χώρος κατανέμεται σε τρεις ζώνες σεισμικής επικινδυνότητας (Πιν. 2.2). Οι τιμές των εδαφικών επιταχύνσεων σχεδιασμού, αποτελούν το ποσοστό της επιτάχυνσης της βαρύτητας g, για κάθε ζώνη. Η περιοχή της μελέτης ανήκει στη ζώνη I στο μεγαλύτερο τμήμα της, ενώ ένα τμήμα, στα δυτικά, ανήκει στη ζώνη II (Σχ. 2.8).

Πίνακας 2.2: Σεισμικές ζώνες ελληνικού χώρου.

Σεισμική ζώνη	Εδαφική επιτάχυνση
Ζώνη I	0,16g
Ζώνη II	0,24g
Ζώνη III	0,36g



Σχήμα 2.8: Σεισμικός χάρτης ελληνικού χώρου (ΦΕΚ 1154B/12.8.2003).

Ιστορικά στοιχεία

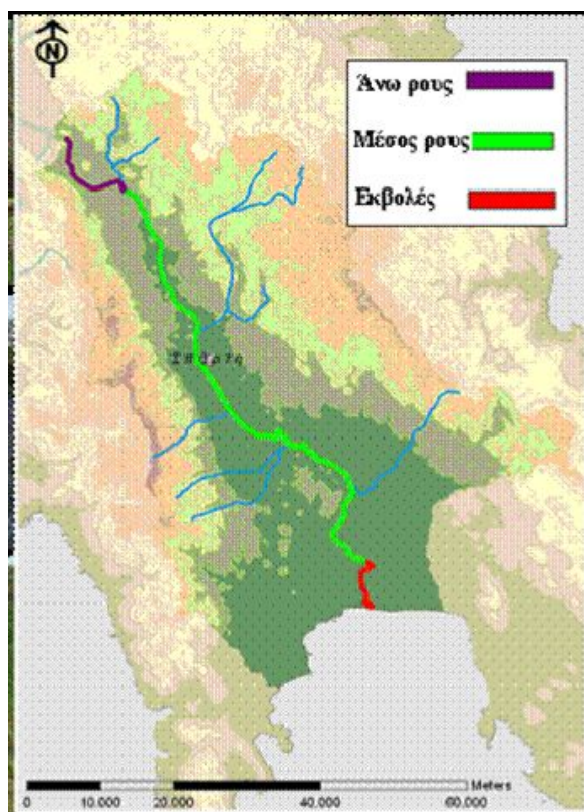
Από ιστορικές πηγές έχει βρεθεί ότι στα αρχαία χρόνια η περιοχή της Λακωνίας έπασχε από ισχυρούς σεισμούς. Η Λακωνία ονομαζόταν Εύσειστος και Καιετάεσσα από τους καιετούς (χάσματα) που υπήρχαν εκεί. Οι πιο καταστρεπτικοί σεισμοί έγιναν το 464 π.Χ. (στον Ευρώτα και τον Ταΰγετο) και το 373 π.Χ. (καταποντισμός της αρχαίας Ελίκης και καταστροφή των Βούρων). Τα ιστορικά στοιχεία που υπάρχουν για το σεισμό του 464 π.Χ.. κάνουν λόγο για τη σφοδρότητά του η οποία ήταν τόσο μεγάλη, που οι κορυφές του Ταΰγετου ράγισαν και ανοίχτηκαν χάσματα σε διάφορα σημεία του. Στο γυμνάσιο της πόλης λίγο πριν από τον σεισμό, λένε, παρουσιάστηκε ένας λαγός. Οι έφηβοι που βγήκαν να τον κυνηγήσουν σώθηκαν, ενώ οι έφηβοι που παρέμειναν μέσα σκοτώθηκαν από την κατάρρευση του κτιρίου. Ο κοινός τάφος των θυμάτων του (20.000), ονομάστηκε Σεισματίας. Η καταστροφή θεωρήθηκε ότι οφειλόταν στην οργή του Ποσειδώνα, που προκάλεσαν οι Σπαρτιάτες γιατί είχαν αποσπάσει από τον βωμό του στο Ταίναρο και θανατώσει είλωτες καταδικασμένους σε θάνατο, που είχαν καταφύγει σ' αυτό το φημισμένο άσυλο (www.earthquakenet.gr/istorikoiseismoι.htm).

Σεισμός και υπόγεια νερά

Έχει παρατηρηθεί συχνά στα σεισμικά φαινόμενα να παγιδεύεται το ελεύθερο νερό με το οποίο τροφοδοτούνται οι υπόγειοι υδροφορείς. Οι σεισμοί, πολλές φορές, μετατοπίζουν το υπόγειο νερό μεταβάλλοντας τον υδρολογικό κύκλο και μειώνοντας την τροφοδοσία των πηγών ή είναι δυνατόν ακόμη και να τις στερέψουν. Τα ορυκτά από τα οποία αποτελούνται τα πετρώματα, περιέχουν ποσότητα νερού. Μόλις τα πετρώματα δεχτούν πιέσεις αλλά και αύξηση της θερμοκρασίας, αλλάζουν τις συνθήκες που συγκρατούν το νερό και το απελευθερώνουν. Απόδειξη για τα παραπάνω, αποτελεί ο ισχυρός σεισμός του 1933 που έπληξε την περιοχή μεταξύ των νησιών Κω και Νισύρου. Λίγες ώρες πριν από τον μεγάλο σεισμό, το πιο χαρακτηριστικό από τα διάφορα φαινόμενα που είχαν εκδηλωθεί, ήταν το γεγονός ότι τα νερά στις πηγές του νησιού, είχαν εξαφανιστεί (www.geodifhs.com).

2.2.5 Υδρογεωλογία

Στην ευρύτερη περιοχή μελέτης (Σχ. 2.9), επικρατούν τρία καρστικά συστήματα (στις περιοχές του Ταΰγετου και του Πάρνωνα) και δύο συστήματα από κοκκώδεις σχηματισμούς. Τα χαρακτηριστικά τους δίνονται στους Πίνακες 2.3 και 2.4 αντιστοίχως.



Σχήμα 2.9: Γενική άποψη της μορφολογίας του ποταμού Ευρώτα, (Νικολαΐδης κ.ά., 2009).

Πίνακας 2.3: Καρστικά πεδία ευρύτερης περιοχής (Μόρφης κ.ά.1997).

Σύστημα	Έκταση [Km ²]	Αποθέματα [m ³ 10 ⁶]	Κύριοι υδροφόροι σχηματισμοί	Εκφόρτιση
Κεντρικού Ταΰγετου	175	32	Μάρμαρα και ασβεστόλιθοι	Πηγές Γοράνων, Τρύπης, Ξηροκαμπίου κ.λ.π.
Πελάνας, Βιβαρίου, Κονιδίτσας	150	65	Κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι	Πηγές Πελάνας και Κονιδίτσας
Κεντρικού Πάρνωνα	420	70	Κρυσταλλικοί ασβεστόλιθοι και μάρμαρα	Πλευρικές μεταγγίσεις στις αποθέσεις της λεκάνης του Ευρώτα (μέσος και άνω ρους)

Πίνακας 2.4: Συστήματα κοκκωδών σχηματισμών (Μόρφης κ.ά.1997).

Σύστημα	Έκταση [Km ²]	Αποθέματα [m ³ 10 ⁶]	Κύριοι υδροφόροι σχηματισμοί
Λεκάνη Άνω ρου Ευρώτα	220	22.5	Τεταρτογενή/Νεογενή
Λεκάνη Μέσου και Κάτω ρου Ευρώτα	275	16	Τεταρτογενή/Νεογενή

Οι υδροφορείς της περιοχής της μελέτης, ανάλογα με τη φύση των γεωλογικών σχηματισμών τους και σύμφωνα και με τα παραπάνω, είναι καρστικοί ή κοκκώδεις. Υπάρχει όμως και ένα τρίτο είδος υδροφορέων οι οποίοι αναπτύσσονται σε μέσο ασυνεχειών, μέσα στο δευτερογενές πορώδες (σε μεταμορφωμένα και πυριγενή πετρώματα λόγω τεκτονισμού, που υπό άλλες συνθήκες θεωρούνται αδιαπέρατα, π.χ. χαλαζίτες) (Νικολαΐδης κ.ά., 2008). Οι κοκκώδεις υδροφορείς (ή φρεάτιοι ή μερικώς υπό πίεση) αναπτύσσονται στα ιζήματα των λεκανών και στον αποσαθρωμένο μανδύα κλαστικών πετρωμάτων (Καραλέμας, 2006).

Η μορφή του υδρογραφικού δικτύου και η γενικότερη γεωλογία της περιοχής, δηλώνει ότι οι πεδινοί υδροφορείς τροφοδοτούνται από τους καρστικούς σχηματισμούς (με πλευρικές μεταγγίσεις) και από το υδρογραφικό δίκτυο του Ευρώτα. Ιδιαίτερη σημασία για την τροφοδότηση από το υδρογραφικό δίκτυο αναμένεται να έχουν οι κώνοι πρόσχωσης (κώνοι κορημάτων) των χειμάρρων που κατεβαίνουν από τα ορεινά (Νικολαΐδης κ.ά., 2009).

2.3 Μετεωρολογία και υδρολογία

2.3.1 Κλιματολογικά στοιχεία

Η λεκάνη απορροής του ποταμού Ευρώτα παρουσιάζει τυπικό μεσογειακό κλίμα με θερμό καλοκαίρι και ψυχρό χειμώνα. Η μέση ετήσια θερμοκρασία φτάνει τους 16 °C, περίπου, ενώ η θερμοβαθμίδα για την ευρύτερη περιοχή έχει προσδιοριστεί σε -0,510 °C/100 m (Σταθμοί Βαμβακού, Έλους και Ασωπού).

Στους πίνακες που ακολουθούν, (Πίν. 2.5 και 2.6), δίνονται οι μέσες τιμές θερμοκρασίας και βροχόπτωσης και μια σειρά από βασικά κλιματικά δεδομένα της περιοχής του Δέλτα του Ευρώτα. Τα κλιματολογικά στοιχεία υπολογίσθηκαν με βάση το βροχομετρικό σταθμό Έλους του Υπουργείου Γεωργίας, που είναι εγκατεστημένος στις παρυφές του οικισμού και σε υψόμετρο 20 m από την επιφάνεια της θάλασσας.

Πίνακας 2.5: Μέσες τιμές θερμοκρασίας (T $^{\circ}\text{C}$) και βροχοπτώσεων (H mm) για την περίοδο 1972-1997 στο Μ.Σ. Έλους (Κακούρος κ. ά., 2009).

	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΙ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ
T	9.71	9.78	11.31	14.22	18.15	22.49	25.05	25.23	22.9	18.78	14.53	11.32
H	93.6	78.1	65.6	39.6	15.5	5.6	8.7	9	16	68.7	96.7	115.9
%*	18.9	15.7	15.7	12.7	11.2	10.6	6.46	2.62	2.54	1.47	1.43	0.9

*Η ποσοστιαία συμμετοχή κάθε μήνα στο μέσο ετήσιο ύψος βροχής.

Πίνακας 2.6: Βασικά κλιματικά χαρακτηριστικά της περιοχής του Δέλτα Ευρώτα (Κακούρος κ. ά., 2009).

Κλιματική παράμετρος	Τιμές
Μέσο ετήσιο ύψος βροχής	613.4 mm
Μέσο μηνιαίο μέγιστο ύψος βροχής*	169.78 mm
Μέσο μηνιαίο ελάχιστο ύψος βροχής	0 mm
Απόλυτο μηνιαίο μέγιστο ύψος βροχής	229.2 mm
Απόλυτο μηνιαίο ελάχιστο ύψος βροχής	0 mm
Απόλυτο μηνιαίο μέγιστο θερμοκρασίας	28 $^{\circ}\text{C}$
Απόλυτο μηνιαίο ελάχιστο θερμοκρασίας	7.7 $^{\circ}\text{C}$
Ετήσιο θερμομετρικό εύρος	15.52 $^{\circ}\text{C}$
Ημέρες χιονιού	1 - 1.4
Ημέρες παγετού	8 - 9
Χαλαζόπτωση	Πολύ σπάνια
Επικρατούντες άνεμοι	B & N

* Τα μέγιστα και τα ελάχιστα υπολογίζονται για τις 10 πιο ακραίες τιμές κάθε κατηγορίας στη περίοδο μετρήσεων.

Από τον Πίνακα 2.5 συμπεραίνουμε ότι στους μήνες Νοέμβριο έως Ιανουάριο πέφτει το 50% της ετήσια βροχόπτωσης.

Τα ορεινά τμήματα της περιοχής παρουσιάζουν βαρύ χειμώνα με σχετικά μεγάλες διακυμάνσεις θερμοκρασίας μεταξύ ψυχρής και θερμής περιόδου και μεταξύ ημέρας και νύχτας. Στα πεδινά κυριαρχούν φαινόμενα ομίχλης κυρίως κατά την διάρκεια του φθινοπώρου και του χειμώνα. Τα φαινόμενα παγετού εμφανίζονται από τον Οκτώβριο μέχρι και τον Απρίλιο (Κακούρος κ. ά., 2009).

Άνεμοι

Οι άνεμοι που επικρατούν στη περιοχή μελέτης είναι:

- ⇒ βόρειοι και βορειανατολικοί άνεμοι μέσης έντασης (από το Νοέμβριο ως το Φεβρουάριο),
- ⇒ νότιοι άνεμοι αρκετά δυνατής έντασης (από το Μάρτιο ως το Μάιο και το Σεπτέμβριο ως τον Οκτώβριο) και
- ⇒ νοτιοδυτικοί άνεμοι, σπανιότερα.

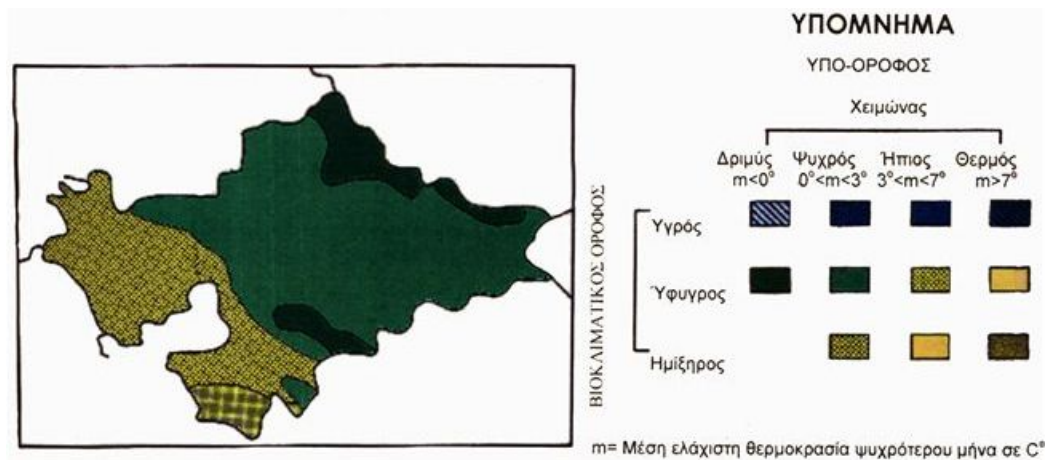
Την περίοδο από το Μάιο ως τον Αύγουστο εμφανίζεται ισχυρό το φαινόμενο της θαλάσσιας αύρας, οπότε επικρατούν τοπικοί νότιοι άνεμοι χαμηλής έντασης. Την ίδια περίοδο εμφανίζονται σποραδικά και ισχυροί βόρειοι άνεμοι (Κακούρος κ. ά., 2009).

2.3.2 Βιοκλίμα

Η έννοια του βιοκλίματος περιλαμβάνει τη συσχέτιση των κλιματικών παραμέτρων και της φυσικής βλάστησης. Η μεθοδολογία για τον καθορισμό του βιοκλίματος μιας περιοχής βασίζεται στις μετρήσεις των μετεωρολογικών παραμέτρων και κυρίως στις μετρήσεις θερμοκρασίας, βροχόπτωσης, υγρασίας και βλάστησης. Με τη μετατροπή των μετεωρολογικών στοιχείων σε βιοκλιματικά, επιτυγχάνεται ο καθορισμός του κλίματος περιοχών που διαφέρουν μεταξύ τους ως προς την ποιοτική σύνθεση της χλωρίδας. Γενικά μπορεί να ειπωθεί, ότι η περιοχή μελέτης εντάσσεται στον ημίξηρο βιοκλιματικό όροφο με χειμώνα θερμό και $m > 7^{\circ}\text{C}$ (Σχ. 2.10), (όπου m = η μέση ελάχιστη θερμοκρασία του ψυχρότερου μήνα). Αναλυτικότερα, σύμφωνα με την κατάταξη του Μαυρομάτη (1980) η ευρύτερη περιοχή της μελέτης παρουσιάζει μια αξιοσημείωτη για τα ελληνικά δεδομένα ταχεία και έντονη μεταβολή του βιοκλιματικού ορόφου από ημίξηρο-θερμό στην περιοχή του Δέλτα Ευρώτα προς τα δυτικά σε υγρό-δριμύ (όρος Ταΰγετος) σε οριζόντια απόσταση 20 Km και προς τα ανατολικά σε υγρό-ήπιο, σε οριζόντια απόσταση 25 Km. Η γεωγραφική διάταξη των ορόφων είναι:

- ⇒ Η παράκτια περιοχή, και σε βάθος που κυμαίνεται από 8-20 Km., ανήκει στο ημίξηρο βιοκλιματικό όροφο, με χειμώνα θερμό και $m > 7^{\circ}\text{C}$ (m =η μέση ελάχιστη θερμοκρασία του ψυχρότερου μήνα)
- ⇒ Η λακωνική πεδιάδα και οι υπώρειες του Ταΰγετου και του Πάρνωνα ανήκουν στον ύφυγρο βιοκλιματικό όροφο με ήπιο χειμώνα, όπου $3^{\circ}\text{C} < m < 7^{\circ}\text{C}$.
- ⇒ Τα μέσα υψόμετρα του Πάρνωνα ανήκουν στον ίδιο όροφο (ύφυγρο), αλλά με δριμύ χειμώνα, όπου $m < 0^{\circ}\text{C}$.
- ⇒ Η περιοχή του Ταΰγετου έχει μια πιο έντονη μετάβαση από τον ύφυγρο όροφο με ήπιο χειμώνα σε υγρό όροφο με ήπιο χειμώνα $3^{\circ}\text{C} < m < 7^{\circ}\text{C}$.

⇒ Οι κορυφές του Ταΰγετου ανήκουν στο υγρό όροφο με δριμύ χειμώνα, όπου $m < 0^{\circ}\text{C}$ (Κακούρος κ. ά., 2009).



Σχήμα 2.10: Βιοκλιματικοί όροφοι (www.gaiasa.gr).

3.3.3 Βροχοπτώσεις

Οι βροχοπτώσεις της ευρύτερης περιοχής της λεκάνη απορροής του Ευρώτα είναι κατανεμημένες σε όλη τη διάρκεια του έτους με μέγιστες τιμές κατά τους μήνες Οκτώβριο ως και Μάρτιο. Ο πιο υγρός μήνας είναι ο Δεκέμβριος και ο πιο ξηρός ο Ιούνιος. Η ευρύτερη περιοχή της μελέτης χαρακτηρίζεται από μια μέση μηνιαία βροχόπτωση της τάξης του 78 mm και από μια μέση ετήσια βροχόπτωση της τάξης του 932 mm. Ο μέσος ετήσιος όγκος νετού ανέρχεται σε $1.444 \times 10^6 \text{ m}^3$, το δε μέσο συνολικό ετήσιο δυναμικό των υδάτων του ποταμού εκτιμάται σε $360 \times 10^6 \text{ m}^3$. Οι βροχοπτώσεις έχουν τάση αύξησης από τα νότια προς τα βόρεια τμήματα και από τα ανατολικά προς στα δυτικά.

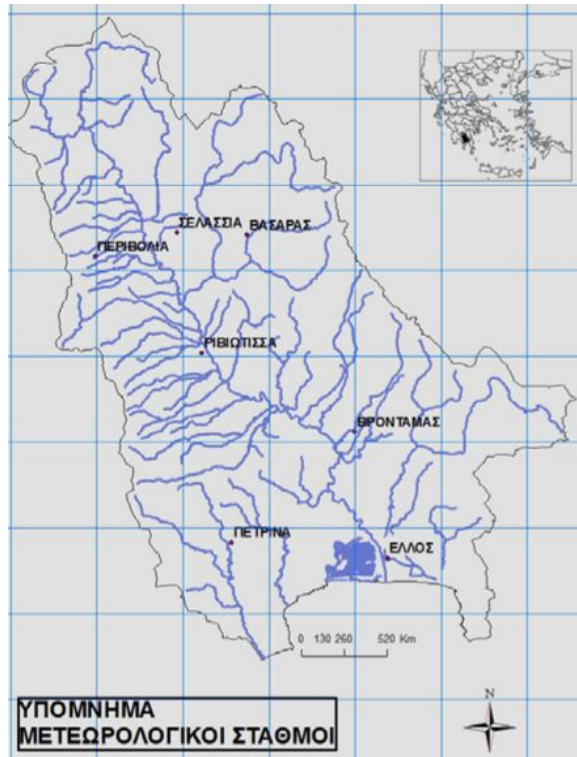
Στην ευρύτερη περιοχή της λεκάνη λειτουργούν επτά βροχομετρικοί σταθμοί που φαίνονται στον Πίνακα 2.7. Στον πίνακα, επίσης, δίνεται το μέσο βροχομετρικό ύψος του κάθε σταθμού και το υψόμετρό τους. Η θέση των σταθμών στη λεκάνη απορροής, φαίνεται στο Σχήμα 2.11.

Πίνακας 2.7: Μέσο βροχομετρικό ύψος σταθμών στη λεκάνη απορροής του Ευρώτα (Νικολαΐδης κ.ά., 2009).

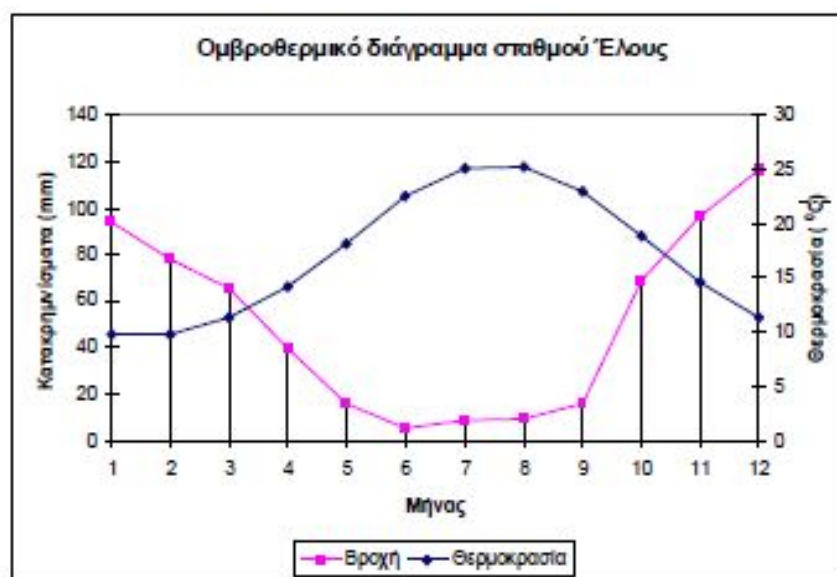
Σταθμός	Υψόμετρο [m]	Μέσος όρος [mm/year] (2000-2008)
Περιβόλια	490	1382
Βασαράς	646	766
Έλος	20	539
Ριβιώτισα	163.5	878
Σελλασία	590	727
Βρονταμάς	280	618
Πέτρινα	20	782

Η περιοχή παρουσιάζει αρκετά μεγάλη ξηρή περίοδο που ξεκινά από τον Απρίλιο και φτάνει ως το Σεπτέμβριο. Η ξηρή περίοδος επεκτείνεται ακόμα και στο βόρειο τμήμα της (Σελλασία), όπου τα κατακρημνίσματα είναι σημαντικά.

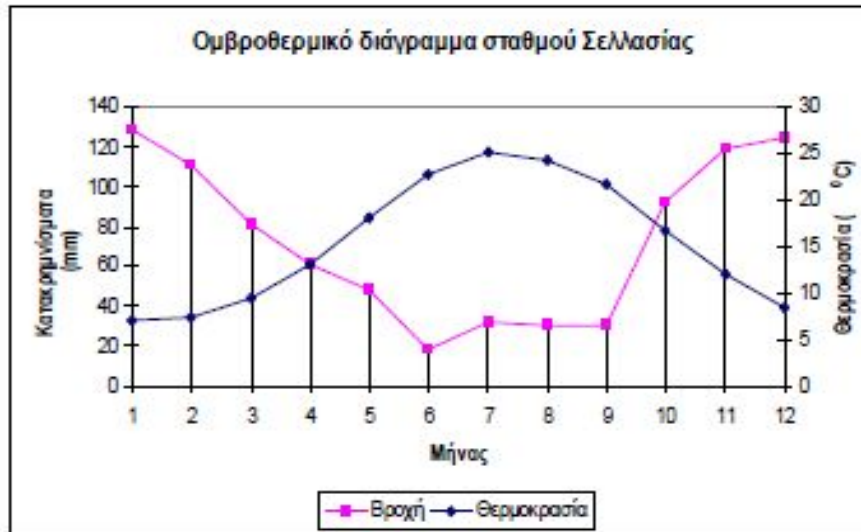
Στα Σχήματα 2.12 και 2.13 δίνονται τα ομβροθερμικά διαγράμματα δύο αντιπροσωπευτικών σταθμών του κλίματος της περιοχής.



Σχήμα 2.11: Μετεωρολογικοί σταθμοί που λειτουργούν στην λεκάνη απορροής του Ευρώτα (Νικολαΐδης κ.ά., 2009).



Σχήμα 2.12: Ομβροθερμικό διάγραμμα μετεωρολογικού σταθμού Έλλους (Κακούρος κ. ά., 2009).



Σχήμα 2.13: Ομβροθερμικό διάγραμμα μετεωρολογικού σταθμού Σελλασίας (Κακούρος κ. ά., 2009).

Υδρολογικό ισοζύγιο

Για τον υπολογισμό του υδρολογικού ισοζυγίου της λεκάνης απορροής του ποταμού Ευρώτα οι κύριες παράμετροι είναι η βροχόπτωση, η εξάτμιση, η κατείσδυση, η καρστική παροχή, η παροχή του ποταμού και οι αντλήσεις. Από αυτές τις παραμέτρους τη μεγαλύτερη αβεβαιότητα έχει ο υπολογισμός του νερού που αντλείται και χρησιμοποιείται για ύδρευση και άρδευση (Νικολαΐδης κ.ά., 2009). Η μέση υπερετήσια δυναμική εξατμισοδιαπνοή της περιοχής έχει καθοριστεί, κατά Thornwaite, σε 668 mm ισοδυνάμου ύψους βροχής (Καράμπελας κ.ά., 1994).

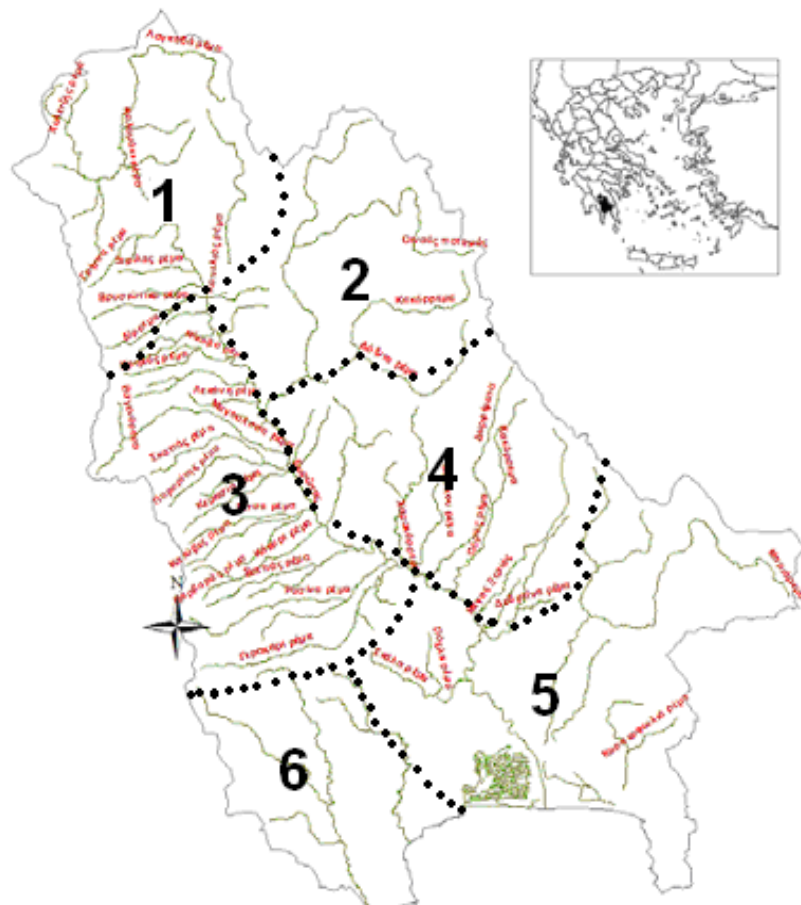
3.3.4 Υδρογραφικό δίκτυο

Το υδρογραφικό δίκτυο της περιοχής μελέτης, επηρεάζεται από την τοπική μορφολογία που έχει καθοριστεί από την τεκτονική δομή και τη φύση των πετρωμάτων. Η τεκτονική δομή είναι εκείνη που καθορίζει και τη διεύθυνση των ποταμών και χειμάρρων. Το ομαλό και σχετικά ήπιο ανάγλυφο της ευρύτερης λεκάνης απορροής των δελταϊκών αποθέσεων, σε συνδυασμό με τις βροχοπτώσεις πάνω στις λεκάνες απορροής, δημιουργούν ευνοϊκές συνθήκες σχηματισμού ποταμοχειμάρρων. Επίσης, λόγω των παραπάνω παραγόντων, το υδρογραφικό δίκτυο είναι πυκνότερο, με κλάδους περισσότερων τάξεων, στο νότιο-κεντρικό τμήμα.

Τα κύρια υδρολογικά συστήματα της περιοχής μελέτης που εκβάλουν στον Δέλτα στο Ευρώτα μπορούν να διαχωριστούν σε τρεις ομάδες υδρολογικών συστημάτων:

- ⇒ Το **υδρολογικό σύστημα του Ευρώτα**, που αποστραγγίζει το μεγαλύτερο τμήμα του ανατολικού Ταυγέτου και του δυτικού Πάρνωνα. Ξεκινάει από την Αρκαδία, και καταλήγει στο Λακωνικό κόλπο. Από την περιοχή της Σκάλας και νότια, ο Ευρώτας εισέρχεται στη δελταϊκή του περιοχή και δεν υπάρχουν υπολεκάνες που συμβάλλουν απευθείας στην κύρια κοίτη του ποταμού.
- ⇒ Το **δελταϊκό σύστημα του Ευρώτα**, στο οποίο εκτός από την κύρια κοίτη του ποταμού συμβάλλουν λεκάνες από το νότιο Πάρνωνα και το ανατολικό περιθώριο του Δέλτα (που καταλήγουν στη περιοχή Έλος), αλλά και από το δυτικό περιθώριο του Δέλτα (που συμβάλλουν στο Βασιλοπόταμο).
- ⇒ Τα **υδρολογικά συστήματα που απορρέουν απευθείας στο Λακωνικό Κόλπο**, από τον Μακρύγιαλο μέχρι τον όρμο της Ελαίας στα ανατολικά, και από την Τρίνησα μέχρι τον όρμο του Στομίου στα δυτικά (Μαριολάκος κ.ά., 2007).

Το βασικό υδρογραφικό δίκτυο της λεκάνης απορροής της περιοχής μελέτης έχει μήκος 1500 Km και μπορεί να διαχωριστεί σε έξι υπολεκάνες που κάθε μια αποτελεί την εκφόρτιση κύριου καρστικού συστήματος (Σχ. 2.14):



Σχήμα 2.14: Οι υπολεκάνες του υδρογραφικού δικτύου της περιοχής, (Νικολαΐδης κ.ά., 2009).

- ⇒ Η πρώτη υπολεκάνη περιλαμβάνει το καρστικό σύστημα του Σκορτσινού και του Βιβαρίου και βρίσκεται στο βόριο-δυτικό άκρο του Ευρώτα.
- ⇒ Η δεύτερη περιλαμβάνει τον μεγαλύτερο σε έκταση παραπόταμο του Ευρώτα τον Οινούντα και βρίσκεται στομβόριο-ανατολικό άκρο της λεκάνης.
- ⇒ Η τρίτη λεκάνη περιλαμβάνει τους καρστικούς σχηματισμούς που εκφορτίζονται στην περιοχή της Σπάρτης.
- ⇒ Η τέταρτη περιλαμβάνει το υπόλοιπο τμήμα του Πάρνωνα (ότι εξαιρείται από τον Οινούντα).
- ⇒ Η πέμπτη υπολεκάνη περιλαμβάνει τους καρστικούς σχηματισμούς του Βρονταμά, Σκάλας, του Βασιλοπόταμου και του Έλους.
- ⇒ Η έκτη περιλαμβάνει το καρστικό του Σμήνους, είναι ανεξάρτητη υδρολογικά από τον Ευρώτα ποταμό.

Οι καρστικοί σχηματισμοί της λεκάνης αντιστοιχούν σχεδόν στο 50% της συνολικής έκτασης της λεκάνης απορροής (περίπου 1194 km²). Οι σχηματισμοί αυτοί εμφανίζουν έντονη υδροπερατότητα και υδροφορία (Νικολαΐδης κ.ά., 2009).

Συγκέντρωσε τα νερά τής θάλασσας σαν σωρό·
έβαλε τις αβύσσους σε αποθήκες.
(Ψαλ. 33,7)

3.1 Μοντέλα προσομοίωσης

3.1.1 Μοντέλα

Με τον όρο μοντέλο εξηγούνται πάρα πολλές διαφορετικές έννοιες. Η ίδια η λέξη μοντέλο χρησιμοποιείται τόσο πολύ, που είναι κάποιες φορές δύσκολο να διακριθεί το πραγματικό νόημά της (Konikow & Bredehoeft, 1992). Στην περίπτωση της μοντελοποίησης της υπόγειας ροής, ο πιο εύστοχος ορισμός είναι να ονομάσουμε μοντέλο ως μία διάταξη σε θέση να αναπαριστάνει προσεγγιστικά την κατάσταση και τις συνθήκες της περιοχής μελέτης που μοντελοποιείται. Μία γενική διάκριση ξεχωρίζει δύο κατηγορίες μοντέλων:

- ⇒ τα **φυσικά μοντέλα** (π.χ. εργαστηριακές στήλες άμμου),
- ⇒ τα **μαθηματικά ή νοητικά μοντέλα**.

Τα φυσικά μοντέλα είναι μία φυσική παρουσίαση του προτύπου και όπως τα εργαστηριακά, προσομοιώνουν την υπόγεια ροή άμεσα. Τα φυσικά μοντέλα μπορεί να είναι **εικονικά** ή **αναλογικά**. Τα εικονικά είναι απλοποιημένες παρουσιάσεις συστημάτων του πραγματικού κόσμου, όπως οι εξομοιωτές βροχόπτωσης και οι πειραματικές λεκάνες απορροής. Τα αναλογικά μοντέλα είναι αυτά τα οποία οι μετρήσεις τους βασίζονται σε διαφορετική υπόσταση από ότι τα πρωτότυπα, όπως η ροή του ηλεκτρικού ρεύματος που αντιπροσωπεύει τη ροή του νερού.

Τα μαθηματικά μοντέλα είναι σύνολα υποθέσεων σχετικών με τη λειτουργία ενός συστήματος, εκφρασμένων υπό μορφή μαθηματικών ή λογικών σχέσεων μεταξύ των αντικειμένων του συστήματος και κωδικοποιημένων σε γλώσσα υπολογιστή (Ευστρατιάδης & Κουτσογιάννης, 2006).

Τα μαθηματικά μοντέλα μπορεί να είναι **αναλυτικά**, βασισμένα στις αρχές της υδραυλικής ή **εμπειρικά**. Τα αναλυτικά στηρίζονται σε ορισμένους γενικούς κανόνες και φυσικούς νόμους. Αντιθέτως, στα εμπειρικά μοντέλα, τα συμπεράσματα που εξάγονται παράγονται από την ανάλυση πειραματικών δεδομένων.

Τα μαθηματικά μοντέλα προσομοιώνουν τη ροή έμμεσα μέσω:

- ⇒ των εξισώσεων που αντιπροσωπεύουν τις φυσικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα στο σύστημα και τις ξεχωρίζουμε ως **θεμελιώδεις εξισώσεις**,

⇒ των εξισώσεων που περιγράφουν τις μεταβλητές των υδραυλικών υψών ή των παροχών κατά μήκος των ορίων του μοντέλου και λέγονται **οριακές συνθήκες**.

Για τα εξαρτημένα από το χρόνο προβλήματα, χρειάζονται επιπλέον μία σειρά από εξισώσεις οι οποίες να περιγράφουν την αρχική κατανομή του υδραυλικού ύψους του συστήματος, τις λεγόμενες **αρχικές συνθήκες** (Anderson & Woessner, 1992).

Στην υδρολογία χρησιμοποιούνται συνήθως δύο κατηγορίες μαθηματικών μοντέλων: τα **προσδιοριστικά** ή **ντετερμινιστικά (deterministic)** και τα **πιθανοκρατικά** ή **στοχαστικά** ή **στατιστικά (stochastic)**.

Τα προσδιοριστικά μοντέλα εκφράζουν τους φυσικούς νόμους που διέπουν τα υδραυλικά φαινόμενα και βασίζονται στην διατήρηση της μάζας, της ορμής, και της ενέργειας. Περιγράφονται από αλγεβρικές ή διαφορικές εξισώσεις και εκφράζουν τη σχέση αιτίου – αποτελέσματος.

Τα πιθανοκρατικά μοντέλα στηρίζονται στους νόμους των πιθανοτήτων και της στατιστικής.

Τα **υδραυλικά μοντέλα** μπορεί επίσης να είναι **χωρικά** ή **χωροχρονικά**. Τα χωρικά μοντέλα μπορούν να περιγράψουν χωρική μεταβολή αλλά όχι και την χρονική μεταβολή. Τα χωροχρονικά μοντέλα έχουν την ικανότητα να περιγράψουν και χωρικές και χρονικές μεταβολές. Είναι μοντέλα πιο σύνθετα και επιλύονται συνήθως με τη χρήση ηλεκτρονικών υπολογιστών (Di Santo, 2001).

Τέλος, οι επιλύσεις υδρολογικών μοντέλων μπορούν να είναι είτε αναλυτικές, είτε αριθμητικές. Οι αναλυτικές επιλύσεις επιτυγχάνονται χρησιμοποιώντας εφαρμοσμένα μαθηματικά ενώ οι αριθμητικές επιλύσεις επιτυγχάνονται με διακριτοποίηση των διαφορικών εξισώσεων, τη μετατροπή τους σε αλγεβρικές και τελικά την επίλυσή τους με τη βοήθεια ηλεκτρονικού υπολογιστή (Di Santo, 2001).

3.1.2 Προσομοίωση

Με τον όρο προσομοίωση νοείται η τεχνική μίμησης ενός συστήματος, όπως εξελίσσεται στον χρόνο. Η προσομοίωση είναι, ουσιαστικά, η διακριτοποίηση του συστήματος με ένα σύνολο στοιχείων που συνδέονται σε συνοριακούς κόμβους. Συνήθως, συνίσταται στην βήμα προς βήμα επίλυση του μαθηματικού μοντέλου, συναρτήσει μιας δυναμικής φόρτισης, $x(t)$, δηλαδή $y(t) = F(x(t))$, $\forall t = 1, 2, \dots, n$ (Ευστρατιάδης & Κουτσογιάννης, 2006).

Τα στάδια εκπόνησης μίας μελέτης προσομοίωσης είναι:

- ⇒ Ορισμός προβλήματος και σχεδιασμός της μελέτης
- ⇒ Συλλογή δεδομένων και ορισμός ιδεατού μοντέλου
- ⇒ Κατασκευή υπολογιστικού μοντέλου
- ⇒ Αποτίμηση
- ⇒ Εκτέλεση πιλοτικών πειραμάτων
- ⇒ Επαλήθευση
- ⇒ Σχεδιασμός πειραματισμού
- ⇒ Εκτέλεση πειραμάτων
- ⇒ Ανάλυση δεδομένων εξόδου
- ⇒ Τεκμηρίωση, παρουσίαση και υλοποίηση των αποτελεσμάτων

Λόγω του δυναμικού χαρακτήρα των μοντέλων προσομοίωσης διακριτών γεγονότων, πρέπει να έχουμε τη δυνατότητα αποθήκευσης της τρέχουσας τιμής του προσομοιωμένου χρόνου, ενώ χρειαζόμαστε και ένα μηχανισμό αύξησής του από μία τιμή σε μία άλλη. Η μεταβλητή του μοντέλου προσομοίωσης που μας δίνει την τρέχουσα τιμή του χρόνου, ονομάζεται ρολόι προσομοίωσης (simulation clock). Η μονάδα χρόνου που χρησιμοποιεί το ρολόι είναι συνήθως η ίδια με αυτή που χρησιμοποιούν οι παράμετροι εισόδου, ενώ γενικά δεν υπάρχει σχέση του χρόνου που καταγράφει το ρολόι, με το χρόνο που απαιτείται για την εκτέλεση του προσομοιωτή στον υπολογιστή. Ιστορικά έχουν επικρατήσει δύο βασικές μέθοδοι για την εξέλιξη του ρολογιού προσομοίωσης: Η εξέλιξη με βάση το χρόνο του επομένου γεγονότος (next-event time advance) και η εξέλιξη σταθερής αύξησης του χρόνου (fixed-increment time advance) (Αναγνωστόπουλος, 2002).

Η προσομοίωση μπορεί να είναι μόνιμης ή χρονικά μεταβαλλόμενης κατάστασης:

Προσομοίωση μόνιμης κατάστασης (steady-state)

Η επίλυση του μαθηματικού μοντέλου του δικτύου, δηλαδή ο υπολογισμός των υδραυλικών χαρακτηριστικών της ροής (παροχές, πιέσεις), γίνεται θεωρώντας σταθερή φόρτιση στους κόμβους (ο έλεγχος γίνεται για τη δυσμενέστερη φόρτιση). Η προσέγγιση αυτή είναι κατάλληλη για εφαρμογές διαστασιολόγησης αγωγών και αντλιών, καθώς και αποτίμησης της υδραυλικής επάρκειας υφιστάμενων δικτύων (Ευστρατιάδης & Κουτσογιάννης, 2006).

Προσομοίωση χρονικά μεταβαλλόμενης κατάστασης (extended-period)

Η επίλυση του μοντέλου γίνεται σε διακριτά χρονικά βήματα, θεωρώντας χρονικά μεταβαλλόμενη φόρτιση. Στόχος είναι ο έλεγχος της δυναμικής λειτουργίας του δικτύου σε

κανονικές και έκτακτες συνθήκες. Η εν λόγω προσέγγιση θεωρείται κατάλληλη για εφαρμογές χωροθέτησης και ελέγχου της επάρκειας δεξαμενών, υπολογισμού της ενέργειας άντλησης και ανάλυσης της δίαιτας των ποιοτικών παραμέτρων του νερού. Η ανάλυση της δίαιτας των ποιοτικών παραμέτρων γίνεται μέσω συνδυασμένων μοντέλων προσομοίωσης τόσο των υδραυλικών όσο και των ποιοτικών χαρακτηριστικών της ροής) (Ευστρατιάδης & Κουτσογιάννης, 2006).

3.1.3 Μοντέλα ροής υπογείων υδάτων

Η μελέτη της κίνησης του νερού σε υπόγειους υδροφορείς ταλανίζεται από την έλλειψη δεδομένων και μετρήσεων. Τόσο οι υδραυλικές, όσο και οι φυσικές ιδιότητες των υδροφορέων, χαρακτηρίζονται από μεγάλη χωρική μεταβλητότητα η οποία στην πραγματικότητα δεν μπορεί να είναι ποτέ πλήρως γνωστή. Η ελάχιστη πληροφορία που απαιτείται για την κατασκευή του πιο στοιχειώδους μοντέλου υπογείων υδάτων είναι η γνώση του υδατικού ισοζυγίου. Αυτή η πληροφορία περιλαμβάνει (Ρόζος, 2010):

- ⇒ την έκταση του υδροφορέα,
- ⇒ τις φορτίσεις (κατείσδυση, αντλήσεις),
- ⇒ τις εκφορτίσεις (πηγές, υπόγειες διαφυγές).

Τα πρώτα αριθμητικά μοντέλα προσομοίωσης παρουσιάστηκαν στη δεκαετία του '50 για προβλήματα αποθεμάτων πετρελαίου. Αυτή η προσπάθεια επεκτάθηκε αργότερα σε υπόγεια προβλήματα διαχείρισης, που σχετίζονται με την ποιότητα και την ποσότητα των υπογείων υδάτων. Στη δεκαετία του '70 τα αριθμητικά μοντέλα προσομοίωσης συνδυάστηκαν με τεχνικές βελτιστοποίησης και έγιναν ένα ισχυρό εργαλείο για την επίλυση προβλημάτων διαχείρισης υπογείων υδάτων. Ο ρόλος της βελτιστοποίησης είναι ο προσδιορισμός της βέλτιστης λειτουργικής λύσης, για ένα συγκεκριμένο σκοπό, λαμβάνοντας υπ' όψιν τους περιορισμούς που υπάρχουν (Καρατζάς κ.ά , 2009).

Τα περισσότερα μοντέλα υπόγειας ροής που χρησιμοποιούνται σήμερα είναι ντετερμινιστικά μαθηματικά μοντέλα και βασίζονται σε πεπλεγμένα αριθμητικά σχήματα τα οποία καταλήγουν σε συστήματα γραμμικών εξισώσεων. Η δομή των μοντέλων αυτών περιστρέφεται γύρω από την αντιστοίχιση της γεωμετρίας του υδροφορέα, των οριακών συνθηκών και των φορτίσεών του στους κατάλληλους συντελεστές αγνώστων και στους σταθερούς όρους του συστήματος (Ρόζος, 2010).

3.1.4 Τρόποι επίλυσης μοντέλων

Επίλυση ενός μοντέλου προσομοίωσης είναι η εύρεση της απόκρισης, y , ενός συστήματος ως συνέπεια συγκεκριμένης φόρτισης, x , με εφαρμογή ενός μαθηματικού μοντέλου $y = F(x)$ (Ευστρατιάδης & Κουτσογιάννης, 2006).

Τα μαθηματικά μοντέλα μπορούν να επιλυθούν αναλυτικά ή αριθμητικά. Και οι δύο αυτοί τρόποι επίλυσης πραγματοποιούνται μέσω υπολογιστικών προγραμμάτων. Η αναλυτική επίλυση συνήθως θεωρεί ένα ομογενές πορώδες μέσο. Ένα μαθηματικό μοντέλο μπορεί να είναι ευκολότερο να εφαρμοσθεί σε σύγκριση με ένα αναλυτικό μοντέλο αν το αναλυτικό εμπλέκει πολύπλοκες επαλληλίες λύσεων. Γενικά, όσο λιγότερο απλουστευμένες υποθέσεις διατυπώνουν το μοντέλο, τόσο πιο πολύπλοκο είναι αυτό. Το σύνολο των εντολών που επιλύουν το αριθμητικό μοντέλο συνθέτουν το υπολογιστικό πρόγραμμα ή τον κώδικα. Ο κώδικας είναι γραμμένος μία φορά και κάθε φορά προσαρμόζεται στην περιοχή που μελετάται. Η εφαρμογή του κώδικα στην εν λόγω περιοχή αποτελεί τη σύνθεση ενός νέου μοντέλου. Το μοντέλο περιλαμβάνει το σύνολο των οριακών και αρχικών συνθηκών καθώς και το ειδικό κομβικό πλέγμα της περιοχής, τις τιμές των ειδικών παραμέτρων της περιοχής και την υδρολογική πίεση (Anderson & Woessner, 1992).

3.1.5 Εφαρμογές

Υπάρχουν γενικά, δύο γνώμες που επικρατούν σχετικά με τα μαθηματικά μοντέλα: ότι α) τα μοντέλα δεν έχουν μεγάλη αξία γιατί χρειάζονται μεγάλο αριθμό δεδομένων και έχουν μεγάλο κόστος και β) ότι τα μοντέλα είναι απαραίτητα όταν πρόκειται για περίπλοκες και εκτενείς αναλύσεις σχετικά με την πρόβλεψη.

Οι περισσότερες εφαρμογές της μοντελοποίησης των υπογείων υδάτων έχουν σκοπό να προβλέψουν τις συνέπειες μιας προτεινόμενης ενέργειας. Οι εφαρμογές της μοντελοποίησης μπορούν να έχουν την έννοια:

- ⇒ **Πρόβλεψης:** Όταν προβλέπουν τη μελλοντική συμπεριφορά του συστήματος και απαιτούν τη βαθμονόμηση του μοντέλου.
- ⇒ **Ερμηνευτική:** Όταν χρησιμοποιούνται ως πλαίσια εργασίας για να μελετήσουν τη δυναμική του συστήματος και ενδεχομένως, να οργανώσουν τα δεδομένα της περιοχής. Δεν είναι αναγκαία η βαθμονόμηση.

⇒ **Γενική:** Όταν χρησιμοποιούνται για την ανάλυση της ροής σε υποθετικά υδρολογικά συστήματα. Θα ήταν επωφελές να διατεθούν ρυθμιστικές κατευθυντήριες γραμμές για τη συγκεκριμένη περιοχή. Δεν είναι αναγκαία η βαθμονόμηση.

Η μοντελοποίηση είναι ένας άριστος τρόπος οργάνωσης και σύνθεσης των δεδομένων αλλά είναι σημαντικό, όμως, να αναγνωρισθεί ότι αποτελεί μόνο έναν από τους πολλούς παράγοντες που χρειάζονται για να προσεγγίσουν απόλυτα τον υδρογεωλογικό προσδιορισμό μιας περιοχής (Anderson & Woessner, 1992).

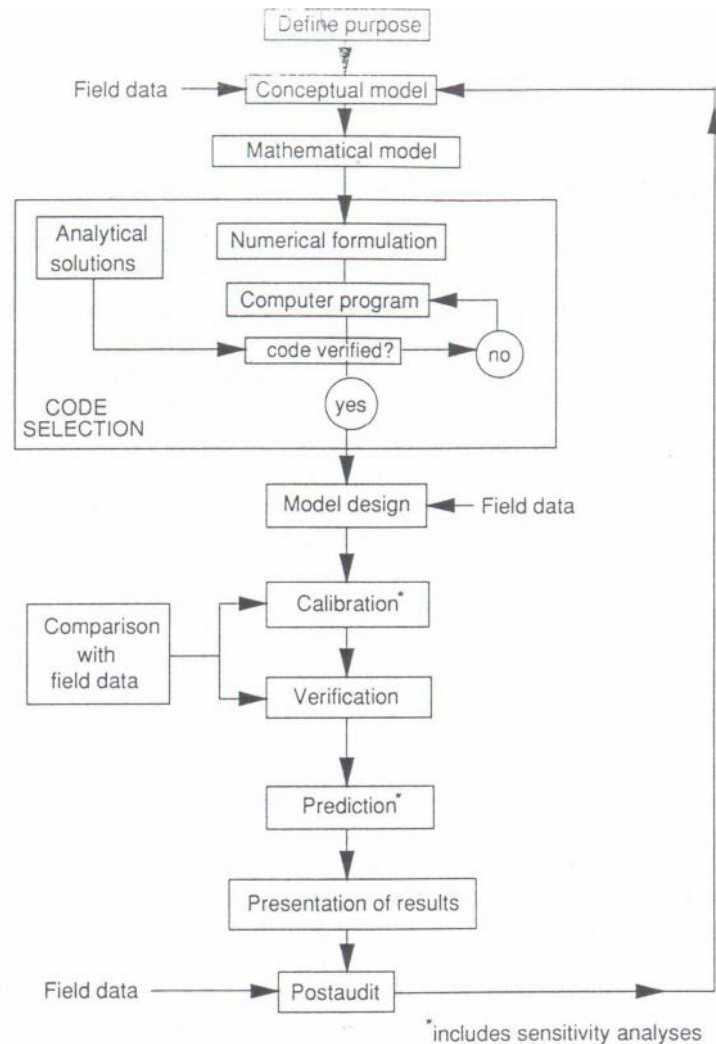
3.1.6 Το πρωτόκολλο της μοντελοποίησης

Όταν προσδιορισθεί ξεκάθαρα ο σκοπός για τον οποίο γίνεται η μοντελοποίηση, ξεκινά μία διαδικασία σχεδιασμού και εφαρμογών. Ένα πρωτόκολλο περιλαμβάνει την επιλογή του κώδικα και της επαλήθευσης, το σχεδιασμό, τη βαθμονόμηση, την ακρίβεια της ανάλυσης και τέλος την πρόβλεψη. Τα βήματα ενός προτεινόμενου πρωτόκολλου μοντελοποίησης είναι (Σχ. 3.1), (Anderson & Woessner, 1992):

- ⇒ Αναγνώριση του σκοπού τον οποίο εξυπηρετεί το μοντέλο
- ⇒ Σχηματισμός του εννοιολογικού μοντέλου του συστήματος
- ⇒ Επιλογή των κατευθυντήριων εξισώσεων και του ηλεκτρονικού κώδικα
- ⇒ Σχεδιασμός του μοντέλου
- ⇒ Βαθμονόμηση
- ⇒ Βαθμονόμηση της ακρίβειας της ανάλυσης
- ⇒ Επαλήθευση του μοντέλου
- ⇒ Πρόβλεψη
- ⇒ Πρόβλεψη της ακρίβειας της ανάλυσης
- ⇒ Παρουσίαση αποτελεσμάτων
- ⇒ Επανελέγχος
- ⇒ Επανασχεδιασμός του μοντέλου

Για το εννοιολογικό μοντέλο και τις κατευθυντήριες εξισώσεις θα γίνει αναφορά στις παραγράφους 3.1.7 και 3.3 αντίστοιχα. Μέρος του σχεδιασμού του μοντέλου, εκτός από το σχεδιασμό του πλέγματος ο οποίος περιγράφεται στην παράγραφο 3.6, αποτελούν οι **αρχικές παράμετροι εισόδου**. Αυτές αντιπροσωπεύουν τις τιμές που θα καθοριστούν αρχικά για όλες τις παραμέτρους. Οι παράμετροι μπορεί να περιλαμβάνουν κατανομή υδραυλικού ύψους,

υδραυλική αγωγιμότητα, μεταβιβασιμότητα, αποθηκευτικότητα, διασπορά, ανατροφοδότηση, άντληση, έγχυση κλπ, κάτι που εξαρτάται από τον τύπο του μοντέλου. Ο κατάλληλος καθορισμός των αρχικών συνθηκών είναι κρίσιμος στα μοντέλα μεταφοράς. Οι τιμές αυτών των παραμέτρων θα πρέπει να παρθούν από μετρήσεις πεδίου στην περιοχή (Donatiello, 2009).



Σχήμα 3.1: Διάγραμμα ροής του πρωτόκολλου μοντελοποίησης (Anderson & Woessner, 1992).

Η **βαθμονόμηση** είναι η επαναληπτική διαδικασία ρύθμισης των παραμέτρων στο μοντέλο, όπως η υδραυλική αγωγιμότητα, η μεταβιβασιμότητα και η διασπορά, με σκοπό να μπορέσει το μοντέλο να προσεγγίσει το πραγματικό σύστημα υπογείων υδάτων. Η βαθμονόμηση ολοκληρώνεται με την σύγκριση των αποτελεσμάτων του μοντέλου με ένα σύνολο από παρατηρήσεις πεδίου και αξιολογείται αναλύοντας τα υπόλοιπα ή τις διαφορές ανάμεσα στις παρατηρούμενες και στις προσομοιωμένες τιμές, σε συγκεκριμένες τοποθεσίες. Η βαθμονόμηση μπορεί να διευθετηθεί με τη μέθοδο δοκιμής και σφάλματος, αλλάζοντας τις

τιμές των παραμέτρων μέχρι να υπάρξει μία καλή προσέγγιση ανάμεσα στην πραγματική συμπεριφορά του συστήματος των υπογείων υδάτων και των αποτελεσμάτων του μοντέλου. Η διαδικασία της βαθμονόμησης περιλαμβάνει την αλλαγή των αρχικών παραμέτρων εισόδου, για την προσομοίωση ενός συνόλου δεδομένων από παρατηρήσεις στο πεδίο. Οι τιμές των παραμέτρων θα πρέπει να συγκριθούν με τις αρχικές παραμέτρους εισόδου και να ελεγχθεί ότι έχουν φυσική υπόσταση και δικαιολογούν την κατάσταση του συστήματος υπογείων υδάτων της περιοχής μελέτης (Donatiello, 2009).

Η **ανάλυση ευαισθησίας** είναι η διαδικασία χαρακτηρισμού των επιδράσεων των αλλαγών στις παραμέτρους ή στις οριακές συνθήκες στη συμπεριφορά του βαθμονομημένου μοντέλου. Η ανάλυση ευαισθησίας μπορεί να πραγματοποιηθεί τόσο πριν όσο και μετά την βαθμονόμηση του μοντέλου. Πριν από την βαθμονόμηση, η ανάλυση ευαισθησίας μπορεί να αναγνωρίσει τους σημαντικότερους παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την διάρκεια της βαθμονόμησης. Όταν ανάλυση ευαισθησίας πραγματοποιείται μετά την βαθμονόμηση, τότε βοηθάει στον καθορισμό των επιδράσεων των παραμέτρων στα αποτελέσματα του μοντέλου. Η ανάλυση ευαισθησίας ολοκληρώνεται με την αλλαγή των παραμέτρων του μοντέλου και των οριακών συνθηκών μέσα σε λογικά όρια και παρατηρώντας τις αλλαγές στα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Όταν συμβαίνει μικρή αλλαγή σε μία παράμετρο να συνεπάγεται μεγάλη αλλαγή στα αποτελέσματα του μοντέλου, τότε το μοντέλο είναι ευαίσθητο σ' αυτή την παράμετρο. Οι ευαίσθητες παράμετροι πρέπει να χαρακτηρίζονται από όσο δυνατόν ακριβέστερα δεδομένα πεδίου για τη μείωση της αβεβαιότητας στα αποτελέσματα του μοντέλου (Donatiello, 2009).

Η **επαλήθευση** είναι η διαδικασία ελέγχου της ακρίβειας των αλγορίθμων που χρησιμοποιούνται για να λυθούν οι απαραίτητες θεμελιώδεις εξισώσεις. Με αυτό τον τρόπο αποδεικνύεται ότι το μοντέλο πραγματικά προσεγγίζει της εξισώσεις των διαδικασιών για τις οποίες εφαρμόζεται. Αυτό μπορεί να ολοκληρωθεί με την λύση ενός προβλήματος χρησιμοποιώντας το μοντέλο και κατόπιν να γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων με αυτές που έχουν ληφθεί από μία αναλυτική λύση ή κάποιο άλλο αριθμητικό μοντέλο που έχει επαληθευτεί. Τα προβλήματα που επιλύονται για επαλήθευση πρέπει να είναι παρόμοια με το πρόβλημα για το οποίο γίνεται η εφαρμογή του μοντέλου. Η **επαλήθευση της ακρίβειας της ανάλυσης** γίνεται για τη χρήση των μοντέλων πρόβλεψης της συμπεριφοράς των υπογείων υδάτων στο μέλλον. Ο έλεγχος συχνά θα εμφανιστεί μετά την ολοκλήρωση της μελέτης της μοντελοποίησης. Όμως, συνηθίζεται σπάνια να πραγματοποιείται συνεχής έλεγχος και στη συνέχεια βελτίωση της προσομοίωσης των υπογείων υδάτων. Ο Konikow (1986) δήλωσε πως αν ένα μοντέλο υπάρχει για να χρησιμοποιηθεί για πρόβλεψη, τότε θα πρέπει περιοδικά να

επαληθεύεται ή να βαθμονομείται ξανά για να συμπεριλάβει νέες πληροφορίες. Ο Konikow (1986) και οι Lewis & Goldstein (1982) έχουν συγκρίνει τα παρατηρούμενα δεδομένα με τα προβλεπόμενα αποτελέσματα σαν αποτέλεσμα προσπάθειας μοντελοποίησης. Οι προβλέψεις των μοντέλων έχουν δείξει ότι υπάρχει επιτυχία σε αρκετές περιπτώσεις. Αυτά τα αποτελέσματα δείχνουν την ανάγκη για επαλήθευση ούτως ώστε να βελτιωθεί η προσομοίωση ή τα αποτελέσματα της εξυγίανσης.

Η **πρόβλεψη** πραγματοποιείται όταν το μοντέλο έχει πλέον βαθμονομηθεί και αξιολογηθεί και είναι σε θέση να προσομοιώσει τη μελλοντική κίνηση του υπόγειου ύδατος και των επικίνδυνων ουσιών ή να προσομοιώσει την αντίδραση του συστήματος των υπογείων υδάτων σε διάφορα σενάρια εξυγίανσης. Κάποιες συνθήκες που είναι εντελώς διαφορετικές από τις συνθήκες της βαθμονόμησης και της αξιολόγησης, όπως υψηλός βαθμός άντλησης ή αποφόρτισης είναι δυνατό να απορρίψουν το μοντέλο ως αναπαράσταση του φυσικού συστήματος.

Όσον αφορά στην **παρουσίαση των αποτελεσμάτων** θα πρέπει να μελετηθεί το εύρος των πιθανών τιμών των διαδικασιών που πραγματοποιήθηκαν και ο βαθμός αξιοπιστίας στα αποτελέσματα της μοντελοποίησης. Όλα τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης θα πρέπει να αξιολογηθούν για να εξασφαλισθεί ότι είναι ρεαλιστικά με φυσιολογικές τιμές μέσα σε λογικά όρια (Donatiello, 2009).

3.1.7 Το εννοιολογικό μοντέλο

Η μαθηματική περιγραφή ενός δικτύου διανομής γίνεται με το μετασχηματισμό του φυσικού συστήματος σε ένα εννοιολογικό μοντέλο, βάσει του οποίου το σύνολο των συνιστωσών του δικτύου αναπαρίσταται με την μορφή ιδεατών κόμβων και κλάδων. Οι κόμβοι αποτελούν σημεία εισροής ή εκροής νερού ή αλλαγής της γεωμετρίας του δικτύου και οι κλάδοι αποτελούν στοιχεία μεταφοράς νερού (Ευστρατιάδης & Κουτσογιάννης, 2006).

Το εννοιολογικό μοντέλο ροής είναι μία γραφική απεικόνιση του υπόγειου συστήματος ροής. Ο σκοπός της δημιουργίας του εννοιολογικού μοντέλου είναι η απλούστευση των προβλημάτων της περιοχής και η οργάνωση των δεδομένων της, έτσι, ώστε να μπορεί να μελετηθεί πιο άμεσα. Η απλούστευση είναι αναγκαία επειδή η πλήρης συγκρότηση της υπό μελέτη περιοχής δεν είναι εφικτή. Το εννοιολογικό μοντέλο παρουσιάζεται συνήθως με τη μορφή διατομής ή διαγράμματος με κουτιά και είναι αυτό που καθορίζει τις διαστάσεις του αριθμητικού μοντέλου και το σχεδιασμό του πλέγματος. Η κατασκευή του πρέπει να είναι τέτοια ώστε να εξασφαλίζεται τόσο η ευκολία στην ανάλυση, όσο και η απαιτούμενη

πολυπλοκότητα για τη σωστή αναπαράσταση της συμπεριφοράς του συστήματος και για ακριβείς προβλέψεις του αριθμητικού μοντέλου (Anderson & Woessner, 1992).

3.1.8 Η κατασκευή του εννοιολογικού μοντέλου

Το πρώτο βήμα για την κατασκευή του μοντέλου είναι ο ορισμός της περιοχής της μελέτης, δηλαδή ο προσδιορισμός των ορίων του μοντέλου. Τα μαθηματικά μοντέλα, όπως είδαμε, απαιτούν τον προσδιορισμό των οριακών συνθηκών, καθώς και των υδραυλικών υψών κατά μήκος των ορίων του συστήματος. Όπου είναι δυνατόν, τα φυσικά υδρογεωλογικά όρια του συστήματος θα πρέπει να χρησιμοποιούνται ως όρια του μοντέλου. Ωστόσο, για μερικά προβλήματα θα ήταν αναγκαίο να περιορισθεί το επίκεντρο της περιοχής σε μικρότερη έκταση απ' ότι αν ήταν περιορισμένο στα όρια ενός φυσικού υδροφόρου. Και στις δύο περιπτώσεις, όταν τυποποιείται ένα εννοιολογικό μοντέλο, θα πρέπει να προσδιορισθούν τα πραγματικά υδρολογικά όρια του συστήματος. Υπάρχουν τρία βασικά βήματα σε αυτή την τυποποίηση (Anderson & Woessner, 1992):

- ⇒ ο προσδιορισμός των υδροστρατιγραφικών μονάδων,
- ⇒ ο προσδιορισμός του υδατικού προϋπολογισμού και
- ⇒ ο προσδιορισμός του συστήματος ροής.

Προσδιορισμός των υδροστρατιγραφικών μονάδων

Οι υδατοστρατιγραφικές μονάδες του μοντέλου προσδιορίζονται από τα στοιχεία των γεωλογικών και υδρογεωλογικών πληροφοριών. Πιο συγκεκριμένα, προκύπτουν από το συνδυασμό των γεωλογικών χαρτών και των τομών, των πηγαδιών και των γεωτρήσεων της περιοχής.

Οι υδατοστρατιγραφικές μονάδες αποτελούνται από γεωλογικές μονάδες με όμοιες υδρογεωλογικές ιδιότητες και είναι περισσότερο χρήσιμες για την προσομοίωση γεωλογικών συστημάτων σε τοπική κλίμακα. Αρκετοί γεωλογικοί σχηματισμοί μπορούν να περιληφθούν σε μία μοναδική υδατοστρατιγραφική μονάδα ή ένας μόνος σχηματισμός μπορεί να διαιρεθεί σε περισσότερα υδατικά στρώματα (Anderson & Woessner, 1992).

Προσδιορισμός του υδατικού προϋπολογισμού

Η προέλευση του υδατικού φορτίου του συστήματος, το μέγεθος των εισροών και εκροών καθώς και η αναμενόμενες διευθύνσεις, οι διέξοδοι της ροής και αλλαγές στην αποθηκευτικότητα του συστήματος, αποτελούν μέρος του εννοιολογικού μοντέλου. Οι εισροές περιλαμβάνουν υπόγεια υδατικά φορτία από βροχοπτώσεις, υπερχειλίσσεις ή

φορτίσεις από επιφανειακά υδάτινα στρώματα. Οι εκροές μπορούν να περιλάβουν αναβλυζόμενες ροές, ροές από ρέματα και χείμαρρους, εξατμισοδιαπνοή και άντληση. Ο υδατικός προϋπολογισμός πρέπει να προσδιορίζεται από τα δεδομένα της περιοχής με σκοπό να συνοψίζει τις ποσότητες των παραπάνω ροών και τις μεταβολές της αποθήκευσής τους. Κατά τη βαθμονόμηση, το ισοζύγιο που προκύπτει από τα δεδομένα του πεδίου συγκρίνεται με αυτό που προκύπτει από το μοντέλο (Anderson & Woessner, 1992).

Προσδιορισμός του συστήματος ροής

Η υδατοστρατιγραφία σχηματίζει το σκελετό του μοντέλου. Οι υδρολογικές πληροφορίες που εισάγονται ως δεδομένα μοντέλου θεμελιώνουν την κίνηση του υπόγειου νερού του συστήματος. Σε αυτή την ανάλυση χρησιμοποιούνται οι υδρολογικές πληροφορίες των βροχοπτώσεων, της εξάτμισης και της επιφανειακής απορροής, καθώς και τα δεδομένα των υδρολογικών υψών, γεωχημικές πληροφορίες, όπως οι συγκεντρώσεις κάποιων κατιόντων (π.χ. Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^{+}) και ανιόντων (π.χ. SO_4^{-2} , HCO_3^{-} , Cl^{-}), η θερμοκρασία και το pH. Οι μετρήσεις της στάθμης του νερού χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση των γενικών κατευθύνσεων της υπόγειας ροής, τον εντοπισμό των ζωνών πλήρωσης και εκκένωσης του υδατικού φορτίου και τη σύνδεση μεταξύ των υπόγειων υδροφορέων και των επιφανειακών συστημάτων ροής. Ο προσδιορισμός του συστήματος ροής μπορεί να βασιστεί μεμονωμένα στα φυσικά υδρολογικά δεδομένα, αλλά είναι καλό να χρησιμοποιηθούν δεδομένα γεωχημείας και υδατικής χημείας, όπου είναι δυνατόν, έτσι ώστε να ενισχυθεί το μοντέλο (Anderson & Woessner, 1992).

3.2 Τύποι μοντέλων

3.2.1 Γενικά

Υπάρχουν πολλοί τρόποι για να ταξινομηθούν τα μοντέλα της υπόγειας ροής. Τα διάφορα μοντέλα υπογείων υδάτων, που υπάρχουν, λαμβάνουν υπόψη σταθερές ή μεταβλητές συνθήκες, περιορισμένους ή ελεύθερους υδροφορείς και μία, δύο ή τρεις διαστάσεις.

Τα μοντέλα μπορεί να είναι μεταβαλλόμενα ή σε σταθερή κατάσταση (steady state), οριοθετημένα ή μη, και μίας ή δύο ή τριών διαστάσεων. Στον κανονισμό του πλέγματος ενός αριθμητικού μοντέλου η πιο σημαντική ταξινόμηση βασίζεται στις χωρικές διαστάσεις του. Με αυτή την έννοια αυτή, τα μοντέλα, ανάλογα με τη χωρική τους διάταξη και τη δομή του πλέγματός τους, μπορεί να είναι (Anderson & Woessner, 1992):

- ⇒ δισδιάστατα επιφανειακά μοντέλα (two - dimensional areal models)
- ⇒ δισδιάστατα profile μοντέλα (two - dimensional profile models)
- ⇒ ημι-τριδιάστατα μοντέλα (quasi three- dimensional models)
- ⇒ τριδιάστατα μοντέλα (three- dimensional models)

3.2.2 Δισδιάστατα επιφανειακά μοντέλα

Με τα δισδιάστατα επιφανειακά μοντέλα προσομοιώνονται κατάλληλα οι παρακάτω τύποι υδροφορέων:

- ⇒ οι περιορισμένοι υδροφορείς (confined aquifers)
- ⇒ οι περιορισμένοι υδροφορείς με διαρροή (leaky confined aquifers)
- ⇒ οι ελεύθεροι υδροφορείς (unconfined aquifers)
- ⇒ οι μεικτοί υδροφορείς (mixed aquifer systems)

Περιορισμένοι υδροφορείς

Στην προσομοίωση περιορισμένων υδροφορέων (confined aquifer), καθορίζεται η μεταβιβασιμότητα και ο συντελεστής αποθηκευτικότητας για κάθε κόμβο, κελί ή στοιχείο. Η μεταβολή της μεταβιβασιμότητας μπορεί να αντιπροσωπεύει τις αλλαγές στην υδραυλική αγωγιμότητα ή το πάχος του υδροφορέα. Σε ένα δισδιάστατο επιφανειακό μοντέλο η ανισοτροπία στη μεταβιβασιμότητα παρουσιάζεται από την διαφορά της στις κατευθύνσεις x και y (T_x, T_y). Η υδραυλική αγωγιμότητα μπορεί να εκτιμηθεί από πίνακες, ενώ οι τιμές της μεταβιβασιμότητας και του συντελεστή αποθηκευτικότητας από τα τεστ άντλησης (Anderson & Woessner, 1992).

Περιορισμένοι υδροφορείς με διαρροή

Ο όρος της διαρροής (leakance) δίνεται από τη σχέση:

$$\text{Leakance} = K_z / b'$$

Όπου:

K_z , η κάθετη υδραυλική αγωγιμότητα του αδιαπέρατου στρώματος,

b' , το πάχος του αδιαπέρατου στρώματος.

Σε ένα σύστημα περιορισμένου υδροφορέα με διαρροή (leaky confined aquifer), το αδιαπέραστο στρώμα και ο παρακείμενος υδροφορέας που τροφοδοτεί τον περιορισμένο υδροφορέα δεν προσομοιώνεται στο μοντέλο αλλά εκπροσωπείται από τον παραπάνω όρο.

Το μοντέλο υποθέτει ότι το υδραυλικό ύψος είναι σταθερό με τον χρόνο (Anderson & Woessner, 1992).

Ελεύθεροι υδροφορείς

Στην προσομοίωση ελεύθερου υδροφορέα (unconfined aquifer) γίνεται, συνήθως, χρήση των παραδοχών Dupuit. Οι παραδοχές εξασφαλίζουν οριζόντια ροή με την προϋπόθεση ότι δεν υπάρχουν αλλαγές στο υδραυλικό ύψος σε σχέση με το βάθος και μετατρέπουν ένα τρισδιάστατο πρόβλημα σε ένα δισδιάστατο και ένα δισδιάστατο σε ένα μονοδιάστατο (Anderson, & Woessner, 1992).

Τα δισδιάστατα profile και τα τρισδιάστατα μοντέλα χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση ελεύθερων υδροφορέων όταν η κάθετη κλίση του υδραυλικού ύψους είναι αρκετά μεγάλη. Το μοντέλο υπολογίζει τη στάθμη του υπόγειου νερού για κάθε κόμβο. Στην προσομοίωση χρειάζονται τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας, ειδικής απόδοσης και ύψους από το επίπεδο αναφοράς. Όταν δεν κρίνεται κατάλληλο να χρησιμοποιηθούν οι παραδοχές του Dupuit τότε, ένα δισδιάστατο profile ή ένα τρισδιάστατο μοντέλο μπορούν να αντικατασταθούν από ένα δισδιάστατο μοντέλο (Anderson & Woessner, 1992).

Μεικτοί υδροφορείς

Ένα μεικτό σύστημα υδροφορέα (mixed aquifer system), μπορεί να περιέχει αυτός συνδυασμούς από αυτός τρεις τύπους υδροφορέων που αναφέρθηκαν παραπάνω (Anderson & Woessner, 1992).

3.2.3 Ήμι-τρειςδιάστατα μοντέλα

Ένα ήμι-τρειςδιάστατο μοντέλο προσομοιώνει μια ακολουθία υδροφορέων στους οποίους παρεμβάλλονται αδιαπέρατα στρώματα. Ακριβώς όπως και στα δισδιάστατα επιφανειακά μοντέλα περιορισμένου υδροφορέα με διαρροή, έτσι και στα ήμι-τρειςδιάστατα μοντέλα, τα περιοριστικά στρώματα και το υδραυλικό ύψος δεν απεικονίζονται. Η επίδραση αυτών των στρωμάτων προσομοιώνεται από τον όρο αυτός διαρροής, L .

Αγνοώντας την οριζόντια ροή στα αδιαπέρατα στρώματα προκαλείται λιγότερο από 5% διαφορά στο υδραυλικό ύψος των προσομοιωμένων επιπέδων, ενώ η διαφορά της υδραυλικής αγωγιμότητας μεταξύ υδροφορέα και αδιαπέρατων στρωμάτων είναι μεγέθους τουλάχιστον δύο τάξεων (Newman & Witherspoon, 1969). Όταν υπάρχει διαφορά τάξης μεγέθους μικρότερη από δύο, ανάμεσα στην υδραυλική αγωγιμότητα του αδιαπέραστου στρώματος και

του υδροφορέα, τότε προτιμάται η χρήση του ημι-τριδιάστατου μοντέλου (Anderson & Woessner, 1992).

3.2.4 Δισδιάστατα profile και τρισδιάστατα μοντέλα

Τα δισδιάστατα profile και τα τρισδιάστατα μοντέλα χρησιμοποιούνται για να προσομοιώσουν ελεύθερους υδροφορείς όταν η κάθετη κλίση του υδραυλικού ύψους είναι σημαντική. Τόσο οι πεπερασμένες διαφορές όσο και τα πεπερασμένα στοιχεία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την προσομοίωση αλλά τα πεπερασμένα στοιχεία είναι πιο αποτελεσματικά σε περίπτωση που υπάρχει κίνηση αυτός στάθμης του νερού. Και οι δύο αυτές κατηγορίες μοντέλων έχουν τα ίδια δεδομένα με ένα δισδιάστατο επιφανειακό μοντέλο με την μόνη διαφορά ότι οι παράμετροι πρέπει να είναι ξεχωριστές για κάθε στρώμα του μοντέλου. Τα δισδιάστατα profile ανήκουν σε μια ειδική κατηγορία μοντέλων. Τα δεδομένα αυτός είναι παρόμοια με τα δισδιάστατα επιφανειακά και τα τρισδιάστατα (Anderson & Woessner, 1992).

3.3 Θεμελιώδεις εξισώσεις ροής

Η ροή των υπογείων υδάτων κυβερνάται από τη σχέση που προκύπτει από το μαθηματικό συνδυασμό της εξίσωσης του υδραυλικού ισοζυγίου (αρχή διατήρηση της μάζας ή εξίσωση συνέχειας) και του νόμου του Darcy. Η βασική μορφή της εξίσωσης της υπόγειας ροής θεμελιώθηκε από τους Jacob (1944, 1950), Cooper (1966), Domenico (1972) (Λαμπράκης, 2010).

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} - R^* \quad (3.1)$$

Όπου:

h , το υδραυλικό ύψος,

S , ο συντελεστής αποθηκευτικότητας,

K_x , K_y και K_z , οι συνιστώσες αυτός υδραυλικής αγωγιμότητας,

S_s , η ειδική αποθηκευτικότητα,

R^* , αυτός γενικός όρος εμπλουτισμού ή άντλησης ο οποίος είναι θετικός σε περίπτωση εμπλουτισμού και δηλώνει την εισροή στο σύστημα ανά μονάδα όγκου υδροφορέα ανά μονάδα χρόνου. Για την προσομοίωση άντλησης $R^* = -W^*$.

Για τη διατύπωση αυτός παραπάνω εξίσωσης χρησιμοποιείται αυτός κύβος αναφοράς, πορώδους υλικού, ο οποίος είναι αρκετά μεγάλος ώστε να θεωρείται αντιπροσωπευτικός του πορώδους μέσου αλλά και αρκετά μικρός ώστε η μεταβολή του υδραυλικού ύψους μέσα σε αυτόν να είναι σχετικά μικρή. Αυτός ο κύβος είναι γνωστός ως αντιπροσωπευτικός στοιχειώδης όγκος (Representative Elementary Volume, REV), (Σχ. 3.2). Ο όγκος του κύβου ισούται με:

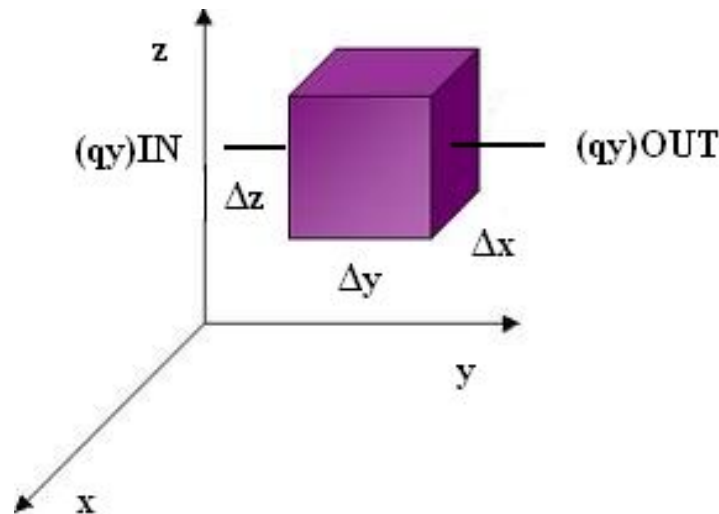
$$V = \Delta_x \Delta_y \Delta_z,$$

Η ροή διαμέσω του όγκου αναφοράς εκφράζει το ρυθμό εκφόρτισης, q . Το q είναι ένα διάνυσμα και το μέγεθός του εκφράζεται με τους όρους των τριών συνιστωσών στους τρεις άξονες q_x , q_y και q_z και για το οποίο ισχύει:

$$\mathbf{q} = q_x \mathbf{i}_x + q_y \mathbf{i}_y + q_z \mathbf{i}_z,$$

Όπου:

$\mathbf{i}_x$, $\mathbf{i}_y$, $\mathbf{i}_z$, τα μοναδιαία διανύσματα στους άξονες x , y και z αντιστοίχως.



Σχήμα 3.2: Αντιπροσωπευτικός στοιχειώδης όγκος (Representative Elementary Volume, REV).

Η εξίσωση του υδατικού ισοζυγίου ή αρχή διατήρησης της μάζας εκφράζεται γενικά:

$$\text{Εκροή} - \text{Εισροή} = \text{Μεταβολή του όγκου}$$

Θεωρώντας ότι: α) η ροή πραγματοποιείται κατά μήκος του άξονα y του όγκου αναφοράς, β) η επιφάνεια διαμέσου της οποίας λαμβάνει χώρα η ροή είναι η $\Delta x \Delta z$, γ) η εισροή ισούται με $(q_y)_{IN}$ και δ) η εκροή ισούται με $(q_y)_{OUT}$, η διαφορά του ογκομετρικού ρυθμού εκροής μείον τον ογκομετρικό ρυθμό εισροής κατά μήκος του άξονα y ισούται με:

$$[(q_y)_{OUT} - (q_y)_{IN}] \Delta x \Delta z$$

που επίσης μπορεί να γραφτεί:

$$\frac{(q_y)_{OUT} - (q_y)_{IN}}{\Delta y} (\Delta x \Delta y \Delta z)$$

και μετατρέποντας την εξίσωση σε μερική διαφορική η αλλαγή του ρυθμού ροής κατά μήκος του άξονα y είναι:

$$\frac{\partial q_y}{\partial y} (\Delta x \Delta y \Delta z)$$

Η συνολική μεταβολή του όγκου εκφράζεται με τη σχέση:

$$\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) \Delta x \Delta y \Delta z = \text{μεταβολή του όγκου} \quad (3.2)$$

Αν εισάγουμε και τον όρο εμπλουτισμού ή άντλησης, R^* :

$$\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} - R^* \right) \Delta x \Delta y \Delta z = \text{μεταβολή του όγκου} \quad (3.3)$$

Η μεταβολή του όγκου ισούται με την ειδική αποθηκευτικότητα S_s , η οποία ορίζεται ως ο όγκος αποθηκευμένου νερού που απελευθερώνεται ανά μονάδα αλλαγής υδραυλικού ύψους και ανά μονάδα όγκου του υδροφορέα:

$$S_s = - \frac{\Delta V}{\Delta h \Delta x \Delta y \Delta z}$$

Ο ρυθμός της μεταβολής του όγκου αναφοράς ισούται με:

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = -S_s \frac{\Delta h}{\Delta t} \Delta x \Delta y \Delta z \quad (3.4)$$

Το μείον προκύπτει από την παραδοχή ότι το ΔV είναι θετικό όταν το Δh είναι αρνητικό, ή με άλλα λόγια, ότι το νερό απελευθερώνεται όταν το υδραυλικό ύψος μειώνεται. Από το συνδυασμό των (3.3) και (3.4) και διαιρώντας με $\Delta x \Delta y \Delta z$ έχουμε:

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} = -S_s \frac{\partial h}{\partial t} + R^* \quad (3.5)$$

Η παραπάνω εξίσωση αποτελεί την τελική μορφή του ισοζυγίου της μάζας του νερού. Στην πράξη όμως, γίνεται αντικατάσταση του q από το νόμο του Darcy. Ο νόμος του Darcy

όπως είδαμε, ισχύει για τη ροή των υπογείων υδάτων σε πορώδη μέσα επειδή το είδος αυτό της ροής χαρακτηρίζεται από μεγάλη βραδύτητα (Ρόζος, 2010):

$$q_x = -K \frac{\partial h}{\partial x}$$

Όπου:

q , ειδική παροχή,

K , αγωγιμότητα υδροφορέα,

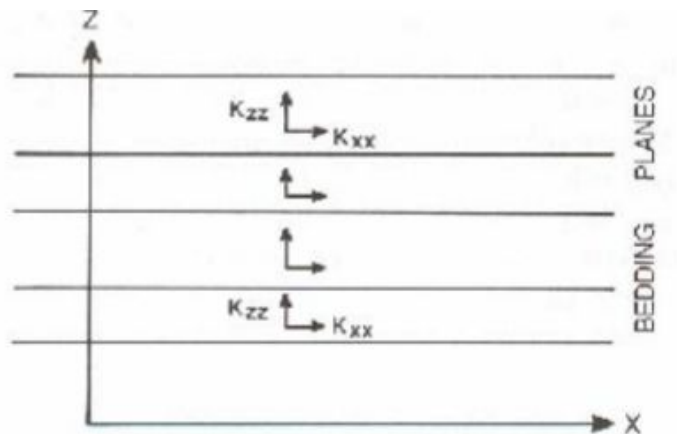
h , πιεζομετρικό φορτίο.

Η παραπάνω εξίσωση γραμμένη για τις τρεις διαστάσεις γράφεται:

$$\begin{aligned} q_x &= -K_x \frac{\partial h}{\partial x} \\ q_y &= -K_y \frac{\partial h}{\partial y} \\ q_z &= -K_z \frac{\partial h}{\partial z} \end{aligned} \quad (3.6)$$

Αυτή η αντικατάσταση γίνεται επειδή η (3.5) δεν είναι καθόλου εύχρηστη λόγω του q το οποίο δεν είναι άμεσα μετρήσιμο σε αντίθεση με το υδραυλικό ύψος, h , που μετριέται άμεσα. Η αντικατάσταση δίνει τη σχέση (3.1).

Η εξίσωση (3.1), θεωρεί ότι τα K_x , K_y και K_z είναι συγγραμμικά με τους άξονες x , y και z (Σχ. 3.3).

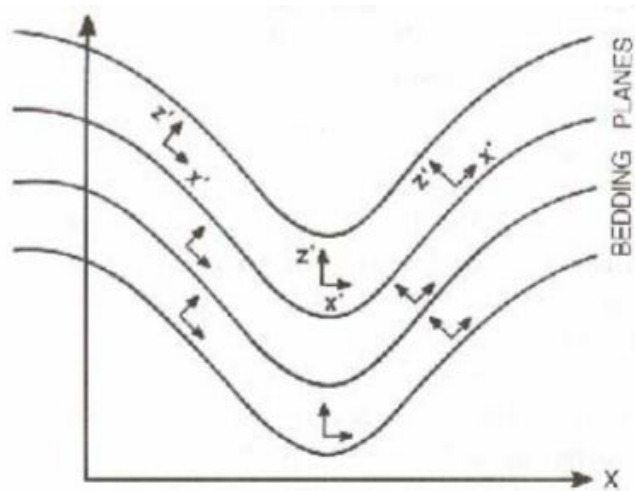


Σχήμα 3.3: Προσανατολισμός του συστήματος συντεταγμένων. Οι άξονες x, z είναι ευθυγραμμισμένοι με τις κύριες διευθύνσεις της υδραυλικής αγωγιμότητας, (Anderson & Woessner, 1992).

Αν η γεωλογία δεν επιτρέπει την ευθυγράμμιση των κύριων διευθύνσεων της υδραυλικής αγωγιμότητας με ένα ορθογωνικό σύστημα συντεταγμένων, τότε χρησιμοποιείται μια τροποποιημένη μορφή της εξίσωσης του συστήματος που περιέχει όλα τα στοιχεία του πίνακα της υδραυλικής αγωγιμότητας (K) και γράφεται ως εξής:

$$\overline{K} = \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} & K_{xz} \\ K_{yz} & K_{yy} & K_{yz} \\ K_{zx} & K_{zy} & K_{zz} \end{bmatrix}$$

Οι υδραυλικές αγωγιμότητες μπορούν να μετρηθούν κατά τη διάρκεια ενός τεστ άντλησης (Quinones & Aponte, 1989 - Maslia & Randolph, 1987). Όταν οι κύριες διευθύνσεις είναι γνωστές, γίνεται στροφή των συντεταγμένων με τέτοιο τρόπο ώστε να μηδενίζονται τα στοιχεία του πίνακα που βρίσκονται εκτός της κύριας διαγωνίου. Αυτό επιτυγχάνεται ορίζοντας ένα συνολικό σύστημα συντεταγμένων για ολόκληρη της περιοχή μελέτης και τοπικά συστήματα συντεταγμένων για κάθε κελί ή στοιχείο του πλέγματος (Σχ. 3.4). Στα τοπικά συστήματα τα στοιχεία εκτός της κύριας διαγωνίου είναι μηδενικά. Μέσω της στροφής των συντεταγμένων, είναι δυνατό να μετατραπούν εξισώσεις σχετικές με τα κύρια στοιχεία της υδραυλικής αγωγιμότητας στο τοπικό σύστημα, αντίστοιχες με στοιχεία της υδραυλικής αγωγιμότητας στο συνολικό σύστημα (Anderson & Woessner, 1992).



Σχήμα 3.4: Ορισμός συνολικού συστήματος (x, z). Τα τοπικά συστήματα (x', z') ευθυγραμμίζονται με τις κύριες διευθύνσεις της υδραυλικής αγωγιμότητας (Anderson & Woessner, 1992).

3.4 Προσέγγιση των συστημάτων υπόγειας ροής

Υπάρχουν δύο διαφορετικές εννοιολογικές προσεγγίσεις για τη μελέτη των υπογείων υδατικών συστημάτων (Anderson & Woessner, 1992):

- ⇒ η προσέγγιση του συστήματος ως **υδροφορέας** (aquifer viewpoint)
- ⇒ η προσέγγιση ως **σύστημα συνεχούς ροής** (flow system viewpoint)

3.4.1 Προσέγγιση ως υδροφορέας

Ο υδροφορέας είναι μία μονάδα πορώδους υλικού ικανός να αποθηκεύει και να μεταβιβάζει μεγάλες ποσότητες νερού στα πηγάδια. Σε ένα περιορισμένο υδροφορέα η κίνηση του νερού καθυστερείται από το πορώδες υλικό. Σε ένα ελεύθερο υδροφορέα, αντιθέτως, υπάρχει το ανώτερο όριο που είναι ο υδροφόρος ορίζοντας. Η θεώρηση του συστήματος ως υδροφορέας είναι κατάλληλη για αναλύσεις ροής που σχετίζονται με την άντληση των πηγαδιών και είναι βασική για πολλές αναλυτικές λύσεις. Σ' αυτές τις περιπτώσεις η παραδοχή που γίνεται είναι ότι η υπόγεια ροή είναι εντελώς οριζόντια διαμέσου των υδροφορέων και εντελώς κάθετη διαμέσου των αδιαπέρατων στρωμάτων. Η ικανότητα του υδροφορέα να μεταβιβάζει το υπόγειο υδατικό φορτίο περιγράφεται από την υδραυλική του αγωγιμότητα. Η υδραυλική αγωγιμότητα ενός περιορισμένου υδροφορέα είναι σταθερή όταν ο υδροφορέας είναι ομοιογενής και με σταθερή πυκνότητα, ενώ ένας ελεύθερος υδροφορέας έχει υδραυλική αγωγιμότητα η οποία μεταβάλλεται χωρικά επειδή η κορεσμένη ζώνη εξαρτάται από την ανύψωση του υδροφόρου ορίζοντα. Παρόλα αυτά, στις αναλυτικές επιλύσεις, η υδραυλική αγωγιμότητα θεωρείται σταθερή ενώ στις συνθήκες του πεδίου μεταβάλλεται χωρικά επειδή στην πραγματικότητα οι υδροφορείς είναι πάντα ετερογενείς (Anderson & Woessner, 1992).

Η προσέγγιση του συστήματος ως υδροφορέα βασίζεται στην έννοια του περιορισμένου και ελεύθερου υδροφορέα και αποτελεί τη βάση πολλών αναλυτικών μεθόδων, όπως των μεθόδων Theim, Theis και Jacob. Η άποψη του υδροφορέα προσομοιώνει τη ροή σε περιορισμένους και ελεύθερους υδροφορείς και την προσεγγίζει ως **συστήματα δισδιάστατης ροής**. Στους περιορισμένους υδροφορείς με διαρροή η ροή προσεγγίζεται ως ημι-τριδιάστατη όπου η κάθετη ροή μέσα από τα περιοριστικά στρώματα αντιπροσωπεύεται από τη διαρροή, που προσθέτει ή αφαιρεί, ποσότητα ύδατος από τους υποκείμενους ή υπερκείμενους υδροφορείς του περιορισμένου υδροφορέα. Το ποσό της διαρροής εξαρτάται από την υδραυλική κλίση του περιορισμένου υδροφορέα, από το πάχος και την κάθετη διαπερατότητά του περιοριστικού στρώματός του.

Στις περιπτώσεις που θεωρούμε τα υδραυλικά συστήματα ως υδροφορείς, οι ισοδυναμικές γραμμές χαράζονται μόνο για τον περιορισμένο υδροφορέα, κατά την προσομοίωση, ενώ στα αδιαπέρατα στρώματα δεν υπολογίζονται ούτε τα υδραυλικά ύψη, ούτε και η οριζόντια ροή γιατί δεν είναι προσομοιωμένα (Anderson & Woessner, 1992).

Εξίσωση του συστήματος ως περιορισμένου υδροφορέα

Η εξίσωση που χρησιμοποιείται για την προσέγγιση του συστήματος ως υδροφορέα είναι:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(T_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) = S \frac{\partial h}{\partial t} - R + L \quad (3.7)$$

Όπου:

T_x , T_y , οι συνιστώσες του συντελεστή μεταβιβασιμότητας στους άξονες x και y. (Οι όροι T_x και T_y μέσα στα μερικά διαφορικά επιτρέπουν την χωρική μεταβολή τους (ετερογένεια), ενώ οι διαφορετικοί δείκτες για τις δύο διευθύνσεις επιτρέπουν την εφαρμογή της εξίσωσης σε ανισότροπους υδροφορείς όπου $T_x \neq T_y$).

S , ο συντελεστής αποθηκευτικότητας.

R , ο όρος εμπλουτισμού ή άντλησης που αναφέρθηκε παραπάνω.

L , η διαρροή διαμέσου του αδιαπέρατου στρώματος για την οποία ισχύει:

$$L = -K'_z \frac{h_{source} - h}{b'}$$

Όπου:

K_z , η κάθετη υδραυλική αγωγιμότητα του αδιαπέρατου στρώματος,

b' , το πάχος του αδιαπέρατου στρώματος,

h_{source} , το υδραυλικό ύψος της πηγής που βρίσκεται στην άλλη πλευρά του αδιαπέρατου στρώματος.

Η παραπάνω εξίσωση (3.7) αφορά στη ροή περιορισμένου υδροφορέα και οι όροι που βρίσκονται στο αριστερό μέλος της αντιπροσωπεύουν την οριζόντια ροή διαμέσου αυτού. Η εξίσωση προκύπτει από την (3.1) θέτοντας $\partial h / \partial z = 0$, πολλαπλασιάζοντας με το b' προσθέτοντας τον όρο της διαρροής και θέτοντας $b'S_s = S$ και $b'R^* = R$ (Anderson & Woessner, 1992).

Εξίσωση του συστήματος ως ελεύθερου υδροφορέα

Όταν ο υδροφορέας είναι ελεύθερος τότε η εξίσωση (3.7) εφαρμόζεται ακολουθώντας τις παραδοχές Dupuit, σύμφωνα με τις οποίες:

- ⇒ οι γραμμές ροής είναι οριζόντιες και οι ισοδυναμικές γραμμές κάθετες και
- ⇒ η υδραυλική κλίση ακολουθεί την κλίση του υδροφόρου ορίζοντα και δεν εξαρτάται από το βάθος.

Τότε, η εξίσωση παίρνει τη μορφή:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x h \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y h \frac{\partial h}{\partial y} \right) = S_y \frac{\partial h}{\partial t} - R \quad (3.8)$$

Η εξίσωση (3.8) αποτελεί τη μη γραμμική εξίσωση δισδιάστατης ροής του Boussinesq (1904) και προέκυψε με αντικατάσταση $T_x=K_x h$ και $T_y=K_y h$, θεωρώντας τον όρο της διαρροής, L , μηδενικό και το συντελεστής αποθηκευτικότητας, S , ίσο με την ειδική απόδοση, S_y . Η μεταβιβασιμότητα δεν είναι σταθερή επειδή συνεχώς μεταβάλλεται το κορεσμένο πάχος του υδροφορέα (Λαμπράκης, 2010).

3.4.2 Προσέγγιση ως σύστημα συνεχούς ροής

Η προσέγγιση του συστήματος ως σύστημα συνεχούς ροής συνεπάγεται τον προσδιορισμό της τρισδιάστατης κατανομής της ροής, της υδραυλικής αγωγιμότητας και των ιδιοτήτων της αποθηκευτικότητας σε κάθε σημείο του συστήματος, χωρίς να χρειάζεται να γίνει αναγνώριση των υδροφορέων και των περιοριστικών στρωμάτων του (Anderson & Woessner, 1992).

Σ' αυτή την προσέγγιση η ροή μπορεί να προσεγγιστεί και ως δισδιάστατη και ως τρισδιάστατη αφού είναι προσδιορισμένες και οι κάθετες και οι οριζόντιες συνιστώσες της ροής. Ο γενικός τύπος της εξίσωσης που διέπει το σύστημα όταν θεωρείται ως σύστημα ροής είναι:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} - R^* \quad (3.9)$$

3.5 Αριθμητικές μέθοδοι επίλυσης

3.5.1 Γενικά

Οι μερικές διαφορικές εξισώσεις που περιγράφουν την ροή των υπογείων υδάτων και την μεταφορά ουσιών μπορούν να λυθούν με μαθηματικό τρόπο χρησιμοποιώντας είτε αναλυτικές είτε αριθμητικές μεθόδους. Τα πλεονεκτήματα μιας αναλυτικής μεθόδου, όταν είναι εφικτό να εφαρμοστεί μία τέτοια λύση, είναι ότι συνήθως παρέχει μία ακριβής λύση της κυρίας εξίσωσης και είναι, τις περισσότερες φορές, σχετικά απλό και αποτελεσματικό να χρησιμοποιηθεί (Κουμπούρης, 2005).

Όταν οι παραπάνω εξισώσεις (3.1) και (3.7) απλοποιηθούν, τότε μπορούν να επιλυθούν και αναλυτικά. Η απλούστευση συνήθως συνεπάγεται ότι θεωρείται ομοιογένεια και μονοδιάστατη ή δισδιάστατη ροή. Με εξαίρεση τις εφαρμογές στα υδραυλικά πηγάδια, οι αναλυτικές λύσεις ροής δεν χρησιμοποιούνται εκτεταμένα στις πρακτικές εφαρμογές. Οι αριθμητικές επιλύσεις είναι πολύ πιο εύχρηστες και διαδεδομένες σε σχέση με τις αναλυτικές που τις περισσότερες φορές είναι πολύπλοκες. Στην μοντελοποίηση της κίνησης των υπογείων υδάτων χρησιμοποιούνται οι εξής αριθμητικές μέθοδοι:

- ⇒ Οι πεπερασμένες διαφορές (Finite differences)
- ⇒ Τα πεπερασμένα στοιχεία (Finite elements)
- ⇒ Οι ολοκληρωμένες πεπερασμένες διαφορές (Integrated finite differences)
- ⇒ Η μέθοδος της οριακής ολοκληρωμένης εξίσωσης (Boundary integral equation method)
- ⇒ Τα αναλυτικά στοιχεία (Analytic elements)

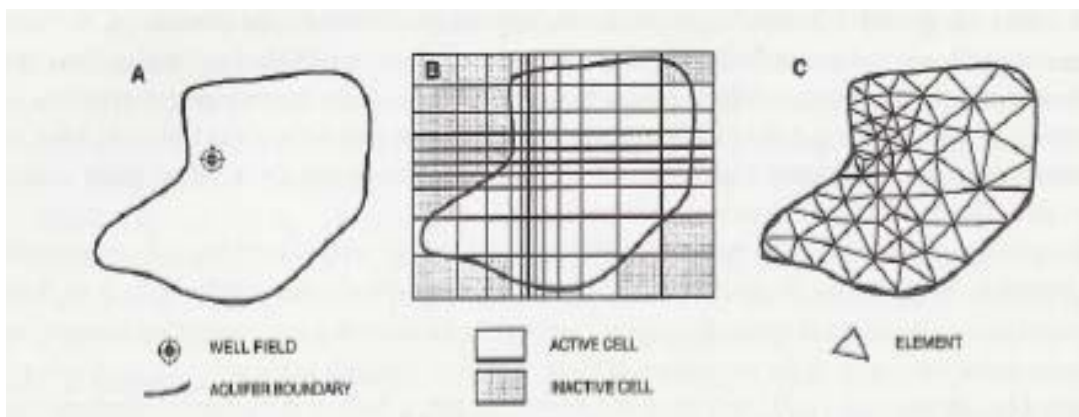
Η μέθοδος της οριακής ολοκληρωμένης εξίσωσης και τα αναλυτικά στοιχεία, είναι σχετικά καινούριες μέθοδοι και δεν χρησιμοποιούνται εκτενώς. Το βασικό τους πλεονέκτημα είναι πως, για ομοιογενείς περιοχές, μπορούν να παρέχουν ακριβείς λύσεις χωρίς να χρειάζεται η διακριτοποίηση. Η μέθοδος των ολοκληρωμένων πεπερασμένων διαφορών σχετίζεται στενά με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

Οι μέθοδοι που έχουν γίνει αποδεκτές για την επίλυση της εξίσωσης ροής των υπογείων υδάτων και αποτελούν το συχνότερο και πιο διαδεδομένο τρόπο επίλυσης των προβλημάτων της υπόγειας ροής, είναι η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών και η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων. Καθεμία από αυτές περιλαμβάνει ένα πλήθος υποκατηγοριών και εναλλακτικών εφαρμογών. Περιεκτικές επεξεργασίες των εφαρμογών αυτών των αριθμητικών μεθόδων για τα προβλήματα των υπογείων υδάτων παρουσιάζονται από τον Remson et al. (1971) και τους Wang & Anderson (1982).

3.5.2 Σύγκριση μεθόδων πεπερασμένων διαφορών και πεπερασμένων στοιχείων

Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών αποτελεί ειδική περίπτωση της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων Pinder & Gray (1976), Wang & Anderson (1977). Παρόλ' αυτά μεταξύ τους υπάρχει μια βασική διαφορά στη φιλοσοφία τους: η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών υπολογίζει την τιμή του υδραυλικού ύψους σε κάθε κόμβο. Η συγκεκριμένη τιμή αποτελεί επίσης το μέσο όρο του υδραυλικού ύψους του κελιού που βρίσκεται γύρω από τον κόμβο χωρίς να γίνεται απολύτως καμία υπόθεση σχετικά με τη μορφή της διακύμανσης του

υδραυλικού ύψους από τον ένα κόμβο στον επόμενο. Αντίθετα, η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων καθορίζει με ακρίβεια τη διακύμανση του υδραυλικού ύψους μέσα σε ένα στοιχείο με χρήση παρεμβολής. Τα υδραυλικά ύψη υπολογίζονται στους κόμβους για ευκολία, αλλά καθορίζονται παντού με τη χρήση βασικών συναρτήσεων. Γενικά, είναι αποδεκτό ότι η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών είναι ευκολότερη στην κατανόηση και τον προγραμματισμό και απαιτεί λιγότερα δεδομένα. Αντίθετα, η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων απαιτεί τη χρήση πιο εξειδικευμένων μαθηματικών, αλλά, για μερικά προβλήματα, μπορεί να είναι περισσότερο ακριβής αριθμητικά από τις πρότυπες μεθόδους των πεπερασμένων διαφορών. Ένα κύριο πλεονέκτημα της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων είναι η ελαστικότητα του πλέγματός της, η οποία επιτρέπει μία κλειστή χωρική προσέγγιση των ανώμαλων ορίων του υδροφορέα και των ζωνών των παραμέτρων μέσα στον υδροφορέα όταν αυτές λαμβάνονται υπόψη. Όμως, η κατασκευή και η συγκεκριμενοποίηση ενός συνόλου δεδομένων είναι πολύ πιο δύσκολες για ένα μη ομαλό πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων απ' ό,τι για ένα ομαλό (κανονικό) ορθογωνικό πλέγμα πεπερασμένων διαφορών (Σχ. 3.5) (Κουμπούρης, 2005).



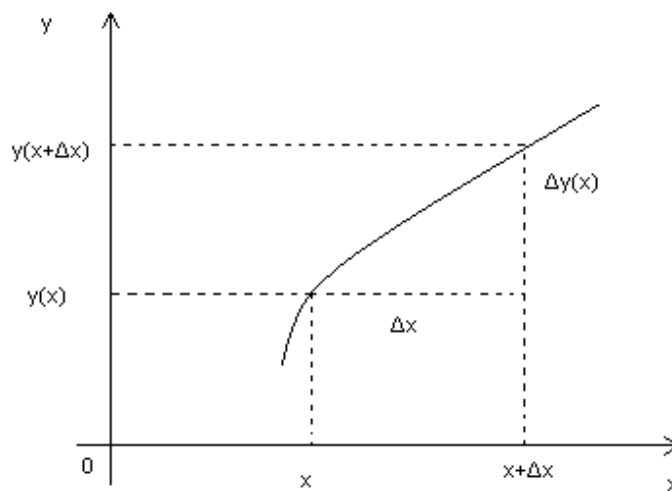
Σχήμα 3.5: Υποθετική εφαρμογή σε υδροφορέα, A, με μη ομαλά όρια από πλέγματα, B: πεπερασμένων διαφορών και C: πεπερασμένων στοιχείων (Konikow, 1996, από Κουμπούρης, 2005).

Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών θεωρείται καλύτερη για την προσέγγιση ακανόνιστων σχηματικά ορίων καθώς και ευκολότερη στην προσαρμογή των θέσεων των ορίων και του μεγέθους κάθε στοιχείου ξεχωριστά. Ακόμη, τα πεπερασμένα στοιχεία είναι καλύτερα στο χειρισμό εσωτερικών ορίων και μπορούν να προσομοιώσουν σημειακές πηγές, δεξαμενές, επιφάνειες διαρροής και κινούμενους υδροφόρους ορίζοντες καλύτερα από τις πεπερασμένες διαφορές. Η επιλογή της μεθόδου επίλυσης μεταξύ των πεπερασμένων

διαφορών και των πεπερασμένων στοιχείων εξαρτάται από τον τύπο του προβλήματος που πρέπει να επιλυθεί και από τις προτιμήσεις του χρήστη (Anderson & Woessner, 1992).

3.5.3 Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών

Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών (Finite Differences Method), είναι από τις παλαιότερες και πλέον συνηθισμένες υπολογιστικές τεχνικές επίλυσης μερικών διαφορικών εξισώσεων. Θεωρείται απλούστερη σε σχέση με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων και σε θεωρητικό και σε μαθηματικό επίπεδο και είναι πιο εύκολο να προγραμματισθεί. Είναι χαρακτηριστικά συνδεδεμένη με ένα σχετικά απλό, ορθογωνικό πλέγμα, το οποίο διευκολύνει πολύ την εισαγωγή των δεδομένων. Πεπερασμένη διαφορά (Σχ. 3.6) ονομάζεται η διαφορά $f(x + \Delta x) - f(x) = y(x + \Delta x) - y(x)$ και σημειώνεται με $\Delta y(x) = y(x + \Delta x) - y(x)$. Το σύμβολο Δ ονομάζεται τελεστής διαφοράς, ενώ η πρώτη διαφορά Δx ονομάζεται διαφορά διαστήματος (<http://androulakis.bma.upatras.gr>).



Σχήμα 3.6: Απεικόνιση πεπερασμένης διαφοράς (<http://androulakis.bma.upatras.gr>).

Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών προσεγγίζει τις πρώτες παραγώγους στις μερικές διαφορικές εξισώσεις σαν πηλίκα διαφορών (οι διαφορές μεταξύ των τιμών των ανεξάρτητων μεταβλητών σε παρακείμενους κόμβους με αντιστοιχία στην απόσταση μεταξύ των κόμβων, και σε δύο διαδοχικά χρονικά διαστήματα με αντιστοιχία στην διάρκεια αύξησης του χρονικού βήματος). Σύμφωνα με αυτή τη μεθοδολογία, το συνεχές πεδίο ορισμού R , όπου ορίζεται η μερική διαφορική εξίσωση αντικαθίσταται από ένα πεπερασμένο αριθμό σημείων R_h , όπου $R_h \subseteq R$ και παράλληλα το όριο S του πεδίου ορισμού

αντικαθίσταται από ένα πεπερασμένο αριθμό σημείων S_h που μπορεί να ανήκουν ή και να μην ανήκουν στο $R+S$. Για κάθε σημείο P του R_h διατυπώνετε μία αλγεβρική εξίσωση που περιλαμβάνει την τιμή της εξαρτημένης μεταβλητής στο σημείο P και σε γειτονικά σημεία του P εντός των R_h και S_h . Η αλγεβρική εξίσωση ονομάζεται εξίσωση πεπερασμένων διαφορών και αποτελεί προσέγγιση της μερικής διαφορικής εξίσωσης στο σημείο P . Η μεθοδολογία διατύπωσης και η μορφή της αλγεβρικής εξίσωσης εξαρτώνται άμεσα από την εφαρμοζόμενη μέθοδο πεπερασμένων διαφορών. Εάν υπάρχουν N σημεία στο R_h προκύπτει ένα σύστημα N αλγεβρικών εξισώσεων με N αγνώστους. Αν το σύστημα έχει μοναδική λύση, που συνήθως έχει, οι τιμές της εξαρτημένης μεταβλητής που προκύπτουν θεωρούνται προσεγγιστικές σε σχέση με αυτές της αναλυτικής λύσης. Η καλή ή κακή προσέγγιση ανάμεσα στην υπολογιστική (αριθμητική) και πραγματική (αναλυτική αν υπάρχει) λύση εξαρτάται από την μέθοδο πεπερασμένων διαφορών που εφαρμόζεται και αξιολογείται μελετώντας την σύγκλιση, την ευστάθεια και την συνοχή του αριθμητικού σχήματος.

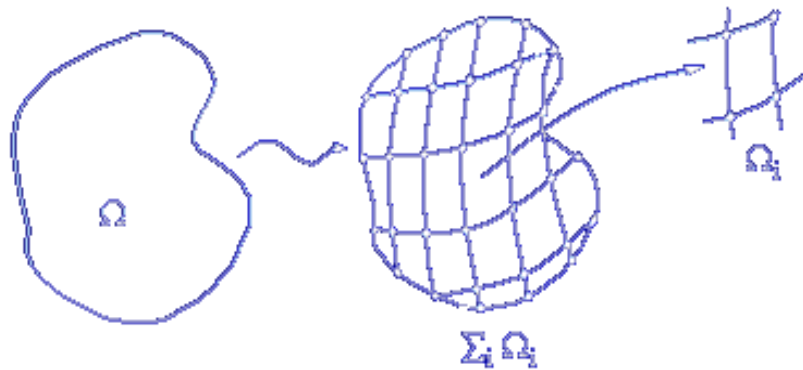
Η προϋπόθεση για την εφαρμογή της μεθόδου πεπερασμένων διαφορών είναι η αντικατάσταση της διαφορικής εξίσωσης με μια προσεγγιστική αλγεβρική εξίσωση, έτσι ώστε ο H/Y με τη βοήθεια προγραμμάτων να υπολογίζει τη λύση του προβλήματος. Με την αντικατάσταση του συνεχούς πεδίου ορισμού με ένα σύνολο σημείων ή με τη διακριτοποίηση όπως ονομάζεται του συνεχούς πεδίου ορισμού καθίσταται εφικτή η προσέγγιση της εξαρτημένης μεταβλητής με τη διακριτή της τιμή. Αντίστοιχα, είναι απαραίτητο να διατυπωθούν αλγεβρικές εκφράσεις που να προσεγγίζουν τις μερικές παραγώγους της διαφορικής εξίσωσης. Οι εκφράσεις αυτές ονομάζονται εκφράσεις πεπερασμένων διαφορών και προκύπτουν με δύο κυρίως τρόπους: τη σειρά Taylor και την πολυωνυμική προσέγγιση (Καραμάνος, 2009).

3.5.4 Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων (FEM, Finite Element Method) αποτελεί μία εξέλιξη της μεθόδου Galerkin και βασίζεται στο γεγονός ότι μπορεί να επιτευχθεί μία πολύ καλή προσέγγιση της λύσης όταν συνδυαστούν πολλές συναρτήσεις, απλής μορφής, με ένα συστηματικό τρόπο (Καραμάνος, 2009). Η μέθοδος αυτή είναι μία εξέλιξη των μητρωϊκών μεθόδων αριθμητικής επίλυσης διαφορικών εξισώσεων και η βασική της έννοια είναι η ίδια με τη μητρωϊκή ανάλυση, δηλαδή η δυνατότητα προσομοίωσης του πραγματικού συστήματος με συστατικά στοιχεία τα οποία συνδέονται σε ένα πεπερασμένο αριθμό κόμβων.

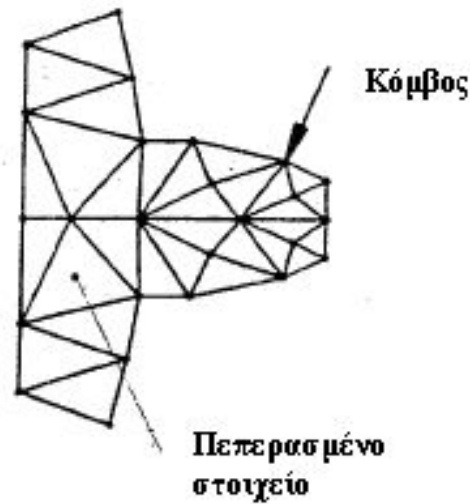
Στη συνέχεια πληθώρα εργασιών, και προγραμμάτων H/Y, έκαναν τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων ένα απαραίτητο, και δυναμικό εργαλείο ανάλυσης για τις κατασκευές.

Το χαρακτηριστικό της μεθόδου των πεπερασμένων στοιχείων είναι η χρήση διδιάστατων και τρισδιάστατων στοιχείων για την προσομοίωση συνεχών μέσων. Μια από τις πρώτες δημοσιεύσεις στις οποίες παρουσιάστηκε η ιδέα αυτή είναι των Turner, Clough, Martin, και Torpp (1956), ορισμένα όμως χαρακτηριστικά της είχαν ήδη περιγραφεί από τους Courant (1943), Hrenikoff (1941), McHenry (1943) και άλλους. Ακολούθησαν πολλές δημοσιεύσεις, συμπεριλαμβανομένων και αυτών του Αργύρη και των συνεργατών του την περίοδο 1954-60. Ο όρος πεπερασμένα στοιχεία προκύπτει από το γεγονός ότι το πεδίο ορισμού υποδιαιρείται σε ένα καθορισμένο νούμερο υποσυνόλων (Σχ. 3.7) στα οποία οι διαφορικές εξισώσεις που καθορίζουν το πρόβλημα, επιλύονται με προσεγγιστικό τρόπο.



Σχήμα 3.7: Πεδίο ορισμού πεπερασμένων στοιχείων (www.ingegneriastutturale.net).

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων χρησιμοποιεί υποθετικές συναρτήσεις της ανεξάρτητης μεταβλητής και παραμέτρους για την αξιολόγηση ισοδύναμων μορφών ολοκλήρωσης των μερικών διαφορικών εξισώσεων. Οι Huyakorn και Pinder (1983) παρουσιάζουν μία περιεκτική ανάλυση της εφαρμογής των μεθόδων των πεπερασμένων στοιχείων σε προβλήματα υπογείων υδάτων (Ε. Κουμπούρης 2005). Η μέθοδος FEM προσομοιώνει τον υδροφορέα, χωρίζοντάς τον σε ένα σύνολο από στοιχεία ή κομμάτια. Στην θεωρία, τα στοιχεία, μπορούν να είναι διαφορετικών σχημάτων και μεγεθών. Τα περισσότερα υπολογιστικά προγράμματα που χρησιμοποιούν την FEM χρησιμοποιούν και ένα μόνο είδος σχήματος για τα στοιχεία, το οποίο είναι συνήθως τριγωνικό (Σχ. 3.8) ή τετραγωνικό.



Σχήμα 3.8: Τριγωνικό πλέγμα πεπερασμένων στοιχείων (<http://www.lucapiancastelli.ing.unibo.it>)

3.6 Σχεδιασμός πλέγματος

3.6.1 Γενικά

Οι περισσότερες αριθμητικές μέθοδοι απαιτούν την συγκεκριμενοποίηση ενός δικτύου κόμβων ή κελιών μέσα στα όρια του μοντέλου. Ο κατάλληλος σχεδιασμός αυτού του δικτύου είναι σημαντικός για την ακριβή αναπαράσταση των ορίων, των πηγών και των εξόδων και άλλων χαρακτηριστικών γνωρισμάτων. Ένας καλός σχεδιασμός δικτύου βοηθάει στην εξασφάλιση της ακρίβειας των αποτελεσμάτων στις περιοχές με το μεγαλύτερο ενδιαφέρον, μειώνοντας το μέγεθος των κόμβων σ' αυτές τις περιοχές και βελτιώνοντας έτσι την επίλυση του προβλήματος (www.dtsc.ca.gov).

Σε ένα αριθμητικό μοντέλο το βασικό πρόβλημα ορισμού του συστήματος ροής είναι η διακριτικοποίηση των κόμβων σε συνδυασμό με τις πεπερασμένες διαφορές ή τα πεπερασμένα στοιχεία. Το πλέγμα των κόμβων (grid), μαζί με τα πεπερασμένα στοιχεία ή τα κελιά πεπερασμένων διαφορών, αποτελεί το πλαίσιο εργασίας του αριθμητικού μοντέλου. Το εννοιολογικό μοντέλο καθορίζει πόσα επίπεδα απαιτούνται. Το δίκτυο κόμβων ή κελιών για μία προσομοίωση θα πρέπει σε ικανοποιητικό βαθμό να αντικατοπτρίζει τις οριακές συνθήκες και την γεωμετρία και να παρέχει τις απαραίτητες λεπτομέρειες για τις περιοχές με το μεγαλύτερο ενδιαφέρον. Οι Mercer & Faust απαριθμούν τις ακόλουθες οδηγίες για τον σχεδιασμό του πλέγματος:

- ⇒ Εντοπισμός των κόμβων των πηγαδιών κοντά στην φυσική τοποθεσία ενός πηγαδιού άντλησης ή κοντά στο κέντρο ενός πεδίου πηγαδιών.

- ⇒ Ακριβής εντοπισμός των ορίων. Για μακρινά όρια, το πλέγμα μπορεί να απλωθεί, αλλά πρέπει να αποφευχθούν τα μεγάλα κενά κοντά σε μικρά.
- ⇒ Οι κόμβοι πρέπει να τοποθετηθούν πιο κοντά σε περιοχές όπου υπάρχουν μεγάλες χωρικές αλλαγές στην μεταβιβασιμότητα ή στο υδραυλικό ύψος.
- ⇒ Ευθυγράμμιση των αξόνων του πλέγματος στις κύριες διευθύνσεις της ανισοτροπίας.

Το πλέγμα πρέπει να είναι ευθυγραμμισμένο με τις κύριες συνιστώσες του διανύσματος της υδραυλικής αγωγιμότητας στους άξονες x , y και z (δηλαδή με τα K_x , K_y , K_z). Εάν αυτό δεν είναι δυνατό και υπάρχει έντονο φαινόμενο της ανισοτροπίας, τότε στη βασική μαθηματική εξίσωση θα πρέπει να προστεθούν και οι εκτός διαγωνίου όροι του διανύσματος της υδραυλικής αγωγιμότητας όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη παράγραφο. Επίσης, στο μοντέλο πεπερασμένων διαφορών το πλέγμα θα πρέπει να προσανατολίζεται με τέτοιο τρόπο ώστε όσο το δυνατόν περισσότεροι κόμβοι να πέφτουν εντός των ορίων της περιοχής μελέτης (www.dtsc.ca.gov).

Η απόσταση που επιλέγεται μεταξύ των κόμβων είναι πολύ σημαντική και εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως η αναμενόμενη καμπυλότητα του υδροφόρου ορίζοντα ή της δυναμομετρικής επιφάνειας, η μεταβολή των υδραυλικών υψών, η μεταβλητότητα των χαρακτηριστικών του υδροφορέα, η έκταση της προς μοντελοποίηση περιοχής και οι αλλαγές σε άντληση, εμπλουτισμό ή εκφόρτιση ποταμών (Anderson & Woessner, 1992).

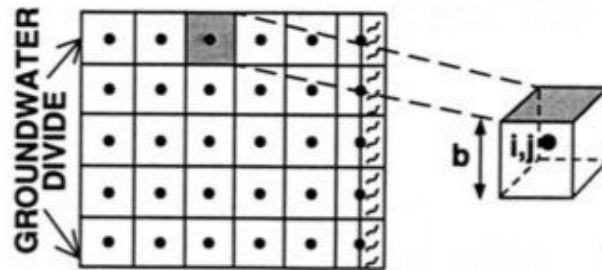
3.6.2 Τύποι πλέγματος πεπερασμένων διαφορών και πεπερασμένων στοιχείων

Υπάρχουν δύο τύποι κατηγορίας πλέγματος για τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών και τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων:

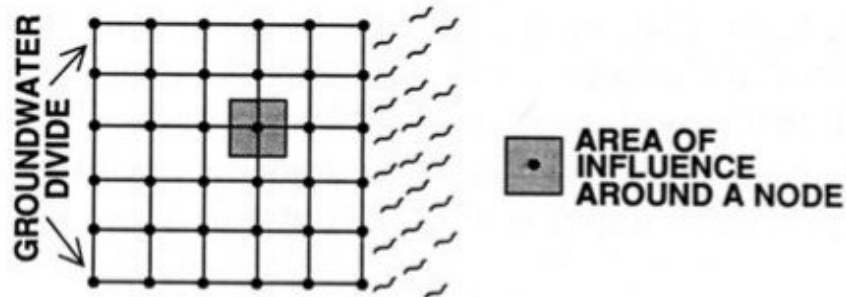
- ⇒ Το **δισδιάστατο κεντροθετημένο πλέγμα** ή **στοιχείο-κεντρικό πλέγμα (block-centered grid)**.
- ⇒ Το **δισδιάστατο πλέγμα κεντρικών κόμβων** ή **δίκτυο-κεντρικό πλέγμα (mesh-centered grid)**.

Η διαφορά μεταξύ των δύο πλεγμάτων βρίσκεται στον τρόπο με τον οποίο χειρίζονται τις οριακές συνθήκες ροής. Στην πρώτη περίπτωση τα σημεία (ή κόμβοι) τοποθετούνται στο κέντρο των κλειστών τμημάτων (ή κελιών), τα οποία σχηματίζονται από τις γραμμές του πλέγματος, ενώ οι οριακές συνθήκες ροής τοποθετούνται πάντα στις πλευρές των τετραγώνων (Σχ. 3.9). Στη δεύτερη περίπτωση οι κόμβοι θεωρείται ότι είναι τοποθετημένοι

στις διασταυρώσεις των γραμμών του πλέγματος και οι οριακές συνθήκες συμπίπτουν με τους κόμβους (Σχ. 3.10). Το εύρος των προγραμμάτων χρησιμοποιεί τα μοντέλα πεπερασμένων διαφορών με τη χρήση των στοιχείο-κεντρικών πλεγμάτων

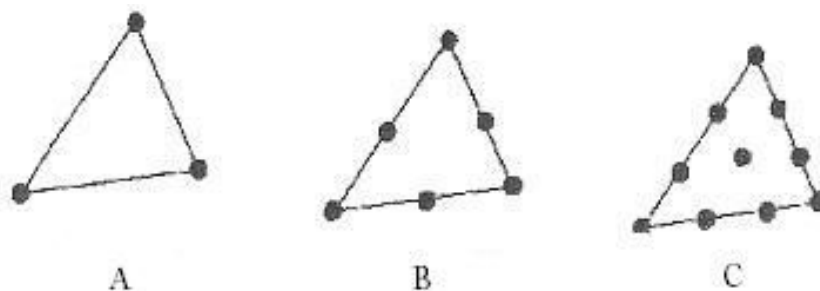


Σχήμα 3.9: Στοιχείο-κεντρικό πλέγμα πεπερασμένων διαφορών και πεπερασμένων στοιχείων, (Anderson & Woessner, 1992).



Σχήμα 3.10: Δίκτυο-κεντρικό πλέγμα πεπερασμένων διαφορών και πεπερασμένων στοιχείων, (Anderson & Woessner, 1992).

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων επιτρέπει μεγαλύτερη ευελιξία στο σχεδιασμό του πλέγματος. Τα δισδιάστατα στοιχεία είναι τριγωνικά (Σχ. 3.11) ή τετραγωνικά ενώ τα τρισδιάστατα είναι τετράεδρα, εξάεδρα ή πρίσματα. Η συνάρτηση της παρεμβολής η οποία προσδιορίζει τα υδραυλικά ύψη μέσα στο στοιχείο, καθορίζει εάν το στοιχείο θα είναι γραμμικό, τετραγωνικό ή κυβικό. Το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο στοιχείο είναι το γραμμικό.



Σχήμα 3.11: Δισδιάστατα τριγωνικά πεπερασμένα στοιχεία, A: γραμμικό, B: τετραγωνικό, C: κυβικό, (Huyakorn & Pinder, 1983).

Τα δεδομένα που απαιτείται να εισαχθούν είναι περισσότερα απ' ότι σε ένα πλέγμα πεπερασμένων διαφορών και περιλαμβάνουν την αρίθμηση των κόμβων και των στοιχείων, τις συντεταγμένες (x, y, z) κάθε κόμβου και τους κόμβους που σχετίζονται με κάθε στοιχείο. Κάθε στοιχείο αντιμετωπίζεται πρώτα ξεχωριστά και στη συνέχεια οι εξισώσεις όλων των στοιχείων συνδυάζονται σε μια γενική εξίσωση. Για την ελαχιστοποίηση των αριθμητικών λαθών απαιτείται ο λόγος της μέγιστης προς την ελάχιστη διάσταση κάθε στοιχείου, να είναι κοντά στη μονάδα ή γενικά να μην ξεπερνάει το πέντε (Anderson & Woessner, 1992).

3.7 Οριακές συνθήκες

3.7.1 Χειρισμός οριακών συνθηκών

Η προσεγγιστική έκφραση των παραγώγων των εξισώσεων ροής με τη βοήθεια των πεπερασμένων διαφορών και των πεπερασμένων στοιχείων μετατρέπει το πρόβλημα της επίλυσης των διαφορικών εξισώσεων σε αναζήτηση σειράς διακεκριμένων τιμών της λύσης σε ορισμένα σημεία του χώρου και του χρόνου, δηλαδή στους κόμβους του πλέγματος. Η διαδικασία αυτή προϋποθέτει τη γνώση των τιμών στα όρια του πλέγματος, είτε αυτά αναφέρονται στο χώρο (οριακές συνθήκες) είτε στο χρόνο (αρχικές συνθήκες). Ωστόσο η ενσωμάτωση των οριακών συνθηκών στις διακριτοποιημένες εξισώσεις απαιτεί προσοχή γιατί μπορεί να προκαλέσει σημαντικές ανακρίβειες στην αριθμητική επίλυση (Ρόζος, 2010).

3.7.2 Είδη οριακών συνθηκών

Τα μαθηματικά μοντέλα ορίζονται από:

- ⇒ τις θεμελιώδεις εξισώσεις,
- ⇒ τις οριακές συνθήκες και
- ⇒ τις αρχικές συνθήκες.

Οι αρχικές συνθήκες είναι η κατάσταση του πεδίου ροής. Οι οριακές συνθήκες αποτελούν τη μαθηματική έκφραση των ιδιοτήτων του πεδίου ροής στα σύνορά του και προσδιορίζουν τις εξαρτημένες μεταβλητές (υδραυλικό ύψος) ή τα παράγωγα των εξαρτημένων μεταβλητών (ροή), στα όρια του πεδίου υπό μελέτη. Η διαφορά μεταξύ αρχικών και οριακών συνθηκών είναι ότι οι αρχικές περιγράφουν την τιμή μιας παραμέτρου σε κάποιο αρχικό χρόνο ίσο με μηδέν ενώ οι οριακές συνθήκες ορίζουν την αλληλεπίδραση της περιοχής υπό μελέτη με το εξωτερικό της περιβάλλον.

Η σωστή επιλογή των οριακών συνθηκών είναι καθοριστική για το σχεδιασμό του μοντέλου. Στην προσομοίωση σταθερής κατάστασης, *steady state*, οι οριακές συνθήκες ορίζουν σε μεγάλο βαθμό το πρότυπο της ροής του μοντέλου. Οι οριακές συνθήκες επηρεάζουν τις λύσεις των μεταβαλλόμενων μοντέλων όταν η επίδραση των φορτίσεων του μοντέλου εκτείνεται στα όρια του πεδίου. Σ' αυτή την περίπτωση, τα όρια πρέπει να επιλεγθούν έτσι ούτως ώστε η προσομοιωμένη επίδραση να είναι ρεαλιστική.

Τα όρια μπορεί να είναι:

- ⇒ φυσικά,
- ⇒ υδραυλικά ή υδρογεωλογικά.

Τα φυσικά όρια ενός συστήματος υπόγειας ροής οφείλονται σε φυσικές υπόγειες παρουσίες νερού και σχηματίζονται από αδιαπέρατα βραχώδεις σώματα ή μεγάλα σώματα επιφανειακού νερού. Τα υδραυλικά ή υδρογεωλογικά όρια σχηματίζονται σαν αποτέλεσμα υδρολογικών συνθηκών και είναι, στην ουσία, νοητά όρια που περικλείουν τους διαχωρισμούς των υπογείων υδάτων και τις οριογραμμές των ποταμών (Anderson & Woessner, 1992).

Η θέση των οριακών συνθηκών μέσα στο πλέγμα εξαρτάται από τον τρόπο που είναι κεντραρισμένες οι πεπερασμένες διαφορές και από το ίδιο το πλέγμα στην περίπτωση των πεπερασμένων στοιχείων.

Οι τρεις βασικές οριακές συνθήκες της υπόγειας ροής αντιπροσωπεύονται από τους τρεις τύπους μαθηματικών συνθηκών που ακολουθούν:

- ⇒ 1^{ου} είδους: **Συνθήκη Dirichlet** ή σταθερού υδραυλικού ύψους, (Specified head boundaries - Dirichlet conditions).
- ⇒ 2^{ου} είδους: **Συνθήκη Neumann** ή σταθερής ροής (Specified flow boundaries - Neumann conditions).
- ⇒ 3^{ου} είδους: **Συνθήκη Cauchy** (Head-dependent flow boundaries - Cauchy or mixed conditions).

Η συνθήκη Dirichlet αναφέρεται σε σημεία του πεδίου για τα οποία είναι γνωστό το υδραυλικό φορτίο. Η συνθήκη Neumann αναφέρεται σε σημεία του πεδίου με γνωστή την παροχή. Η συνθήκη Cauchy ή μικτή οριακή συνθήκη συνδυάζει τις οριακές συνθήκες του υδραυλικού ύψους και της υδραυλικής ροής και αναφέρεται στα σημεία από τα οποία οι διερχόμενες παροχές εξαρτώνται, με μία γραμμική σχέση, από τα υδραυλικά φορτία αυτών των σημείων (Ρόζος, 2010).

3.7.3 Προσδιορισμός ορίων

Για τον καθορισμό των ορίων λαμβάνονται υπόψη όλα τα χαρακτηριστικά του συστήματος ροής όπως οι εισροές και οι εκροές, έτσι ώστε η μορφή της ροής του μοντέλου να αντιπροσωπεύει τις συνθήκες του πεδίου. Έτσι, η χρήση των φυσικών ορίων είναι προτιμότερη επειδή αποτελούν τα σταθερά στοιχεία του συστήματος ροής. Τα φυσικά όρια συνήθως είναι:

- ⇒ Αδιαπέρατα πετρώματα.
- ⇒ Σημεία όπου υπάρχει διαφορά στην υδραυλική αγωγιμότητα πάνω από δύο τάξεις μεγέθους. Σε αυτή την περίπτωση η υδραυλική αγωγιμότητα προκαλεί διάθλαση στις γραμμές της ροής τέτοια ώστε στα στρώματα με μεγαλύτερη υδραυλική αγωγιμότητα η ροή ουσιαστικά να θεωρείται οριζόντια και στα στρώματα με μικρότερη να θεωρείται κάθετη (Freeze & Witherspoon, 1967- Neuman & Witherspoon 1969).
- ⇒ Επιφανειακά υδάτινα στρώματα τα οποία διεισδύουν ολικά σε υπόγειους υδροφορείς και αποτελούν όρια συγκεκριμένου υδραυλικού ύψους.
- ⇒ Τερματικά τμήματα υδροφορέα όπου εμφανίζονται αδιαπέρατα πετρώματα μηδενικής ροής.
- ⇒ Ελαττωματικές ζώνες και εισροές αλμυρού νερού σε παράκτιους υδροφορείς.

Σε περίπτωση που δεν είναι εφικτό να χρησιμοποιηθούν τα φυσικά όρια του συστήματος στο σχεδιασμό του δικτύου, τότε είναι δυνατό να προσδιορισθούν με απόκλιση άλλα τμήματα γειτονικά της περιοχής ενδιαφέροντος που να μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως όρια μηδενικής ροής. Αυτά μπορεί να είναι απομακρυσμένα όρια και υδραυλικά όρια. Τα απομακρυσμένα όρια χρησιμοποιούνται σε παροδικές προσομοιώσεις και είναι δυνατόν να είναι τοποθετημένα αυθαίρετα και μακριά από το κέντρο του πλέγματος, με αποτέλεσμα το υδραυλικό ύψος να μην επηρεάζεται από τις πιέσεις που δέχεται το σύστημα κατά την διάρκεια της προσομοίωσης αλλά και η ροή γύρω από τα όρια να παραμένει αμετάβλητη. Μια τέτοια περίπτωση αποτελεί η άντληση νερού μέσω πηγαδιών και υπάρχει περιορισμένος χρόνος, καθώς και όταν υπάρχει εισροή νερού από παρακείμενη πηγή όπως ποτάμι. Τα υδραυλικά όρια δεν συμπίπτουν με τα τοπικά και χρησιμοποιούνται για να επιλύσουν μικρότερα προβλήματα. Μπορεί να είναι συγκεκριμένου υδραυλικού ύψους, μηδενικής ροής ή συγκεκριμένης οριακής ροής αλλά μοιάζει με τον τύπο της ροής που λαμβάνει χώρα σε μεγαλύτερα προβλήματα και λέγονται τεχνητά όρια (Anderson & Woessner, 1992).

Τα υδραυλικά όρια μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να παράγουν σταθερές συνθήκες ροής όταν χρειάζεται να γίνει βαθμονόμηση του μοντέλου. Παρ' όλα αυτά, μπορεί να μην είναι αποδεκτά για δυναμικά προβλήματα ή για προβλέψιμες προσομοιώσεις με σταθερές συνθήκες και αυτό διότι το μοντέλο υποθέτει οι συνθήκες στα όρια δεν αλλάζουν από τις αρχικές τους τιμές εκτός και αν αλλάξουν από τον χρήστη του μοντέλου. Κάτω από δυναμικές συνθήκες στο πεδίο, τα υδραυλικά ύψη κατά μήκος των υδραυλικών ορίων μπορεί να αλλάξουν λόγω των πιέσεων που δέχονται από το σύστημα και επειδή το μοντέλο δεν επιτρέπει αυτή την αλλαγή, το αποτέλεσμα που θα προκύψει στο εσωτερικό του πλέγματος θα είναι λανθασμένο. Σε αυτή την περίπτωση είτε διευρύνονται τα όρια της υπό μελέτη περιοχής είτε επιλέγονται διαφορετικές τιμές για τις οριακές συνθήκες (Anderson & Woessner, 1992).

3.7.4 Προσομοίωση ορίων

Σε πλέγματα πεπερασμένων στοιχείων και δικτυο-κεντρικά πλέγματα πεπερασμένων διαφορών, οι κόμβοι και τα όρια συμπίπτουν. Σε στοιχείο-κεντρικά πλέγματα πεπερασμένων διαφορών, οι οριακές συνθήκες σταθερού υδραυλικού ύψους λαμβάνονται στους κόμβους, ενώ οι οριακές συνθήκες ροής λαμβάνονται στις πλευρές των τετραγώνων.

Προσδιορισμός υδραυλικού ύψους - Οριακές συνθήκες 1^{ου} είδους:

Η προσομοίωση για τις οριακές συνθήκες 1^{ου} είδους γίνεται θέτοντας το υδραυλικό ύψος στους κόμβους των ορίων ίσο με τις τιμές που έχουν μετρηθεί. Όταν το όριο είναι ποτάμι, τότε το υδραυλικό ύψος κατά μήκος του ορίου μεταβάλλεται χωρικά, ενώ όταν είναι λίμνη ή πηγή, το όριο χαρακτηρίζεται από σταθερό υδραυλικό ύψος. Σε δισδιάστατες προσομοιώσεις, οι κόμβοι συγκεκριμένου υδραυλικού ύψους αντιπροσωπεύουν επιφανειακά υδάτινα σώματα που διεισδύουν ολοκληρωτικά στον υδροφορέα ή το κάθετο μέσο υδραυλικό ύψος. Σε τρισδιάστατα μοντέλα, οι κόμβοι αυτοί αντιπροσωπεύουν τα επίπεδα της στάθμης του νερού ή επιφανειακά υδάτινα σώματα. Σημειώνεται ότι τα καθορισμένα όρια υδραυλικού ύψους αναπαριστούν ανεξάντλητες πηγές νερού και ότι στο υπόγειο σύστημα είναι δυνατόν να συμβαίνουν εισροές και εκροές χωρίς να μεταβάλλεται το υδραυλικό ύψος, κάτι που δε συμβαίνει στην πραγματικότητα. Φυσικά, μπορεί να αλλάξει η τιμή του υδραυλικού ύψους στα όρια καθώς γίνεται η προσομοίωση, αρκεί η καινούρια τιμή να μπορεί να αιτιολογηθεί (Anderson & Woessner, 1992).

Προσδιορισμός ροής - Οριακές συνθήκες 2^{ου} είδους:

Η προσομοίωση για τις οριακές συνθήκες 2^{ου} είδους περιγράφουν την ροή σε μάζες επιφανειακού νερού, τη ροή από πηγές, την υπόγεια ροή και τη διαρροή από και προς τα υπόγεια πετρώματα, η οποία θεωρείται σταθερή. Τις περισσότερες φορές είναι προτιμότερες οι συνθήκες σταθερού υδραυλικού ύψους για το λόγο ότι είναι πιο εύκολες στον υπολογισμό αλλά και στη βαθμονόμηση. Στα μοντέλα πεπερασμένων διαφορών, τα όρια καθορισμένης ροής χρησιμοποιούνται για να προσομοιώσουν πηγάδια άντλησης ή εμπλουτισμού με συγκεκριμένο ρυθμό άντλησης. Στα μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων, ο χρήστης τοποθετεί τη ροή μεταξύ δύο κόμβων και το μοντέλο την επανατοποθετεί (Anderson & Woessner, 1992).

Προσδιορισμός υδραυλικού ύψους εξαρτώμενο από τη ροή - Οριακές συνθήκες 3^{ου} είδους:

Στην προσομοίωση για τις οριακές συνθήκες 3^{ου} είδους η ροή διαμέσου του ορίου εξαρτάται από την διαφορά μεταξύ της τιμής του υδραυλικού ύψους που τίθεται από τον χρήστη, στην μια πλευρά του ορίου, και του υδραυλικού ύψους που υπολογίζεται από το μοντέλο στην άλλη πλευρά. Η διαφορά στα μοντέλα πεπερασμένων διαφορών και πεπερασμένων στοιχείων βρίσκεται στο ότι στα μεν πρώτα υπολογίζεται η ροή για κάθε κελί, στα δε δεύτερα για κάθε κόμβο. Η διαρροή από ή προς ένα ποτάμι, λίμνη ή αποθηκευτικό σώμα μπορεί να προσομοιωθεί χρησιμοποιώντας συνθήκες ροής εξαρτώμενης από το υδραυλικό ύψος και ο ρυθμός διαρροής δίνεται από την σχέση:

$$L = Q_L / A = K'_z / b' (h_{\text{source}} - h)$$

Όπου:

Q_L , η ογκομετρική παροχή,

A , η επιφάνεια του κελιού διαμέσου της οποίας λαμβάνει χώρα η διαρροή,

h_{source} , το υδραυλικό ύψος στην πηγή (ποτάμι ή λίμνη),

h , το υδραυλικό ύψος στον ακριβώς από κάτω ή γειτονικό με την πηγή υδροφορέα,

K'_z , η κάθετη υδραυλική αγωγιμότητα της κοινής επιφάνειας,

b' , το πάχος της κοινής επιφάνειας.

Συνθήκες μηδενικής ροής

Οι συνθήκες μηδενικής ροής λαμβάνουν χώρα όταν δεν υπάρχει ροή κατά μήκος των ορίων, ενώ τα όρια της μηδενικής ροής παρουσιάζονται σε αδιαπέρατους βράχους,

ελαττωματικές ζώνες, υπόγεια χωρίσματα ή ακόμη σε περιοχές όπου το θαλασσίνο νερό έρχεται σε επαφή με παράκτιους υδροφορείς. Σε αυτή την περίπτωση, τα υπόγεια νερά του υδροφορέα εκφορτίζονται στην θάλασσα διαμέσου μιας ζώνης διασποράς. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος απαιτείται ένα μοντέλο που να επιτρέπει την εισαγωγή των αλληλεπιδράσεων που προέρχονται από την διάχυση και την διασπορά του θαλασσινού νερού.

Στα μοντέλα πεπερασμένων διαφορών τα όρια μηδενικής ροής προσομοιώνονται με τον μηδενισμό της μεταβιβασιμότητας ή της υδραυλικής αγωγιμότητας στα μη ενεργά κελιά έξω από τα όρια. Στα περισσότερα μοντέλα θεωρείται μηδενική ροή στα όρια και μόνο ο χρήστης του μοντέλου μπορεί να παρέμβει και να αλλάξει αυτές τις συνθήκες (Anderson & Woessner, 1992).

Περικύκλωσε τα ύδατα με όρια,
μέχρι τη συντέλεια του φωτός και του σκοταδιού.
(Ιώβ 26,10)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΚΩΔΙΚΑ PTC

4.1 Περιγραφή του λογισμικού Argus One και του κώδικα PTC

4.1.1 Το λογισμικό Argus One

Το λογισμικό Argus One είναι ένα γεωγραφικό σύστημα πληροφοριών (GIS) που χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση των υπογείων υδάτων με χρήση αριθμητικών μεθόδων. Το Argus One παρέχει τη βάση στην οποία οι διάφορες πληροφορίες συντίθενται και εισάγονται στα αριθμητικά μοντέλα. Το πρόγραμμα αυτό, δημιουργεί πλέγματα πεπερασμένων στοιχείων ή πεπερασμένων διαφορών και παρέχει τη δυνατότητα εισαγωγής ψηφιακών χαρτών, δημιουργίας ορίων της περιοχής και αυτόματης δημιουργίας πλεγμάτων πεπερασμένων στοιχείων και πεπερασμένων διαφορών με γραφικό τρόπο. Επιπλέον, μπορεί να συνδυάσει διαφορετικές μεταβλητές στο πλέγμα ή στα στοιχεία και στους κόμβους του πλέγματος, όπως οριακές και αρχικές συνθήκες, συγκεντρώσεις κ.λ.π.. Τέλος παρέχει τη δυνατότητα γραφικής παρουσίασης των αποτελεσμάτων. Η μεγάλη ποικιλία μοντέλων υπογείων υδάτων που υποστηρίζει το Argus One έχει σαν αποτέλεσμα να αποτελεί το ιδανικό περιβάλλον μοντελοποίησης της ροής υπογείων υδάτων, βασισμένων στο GIS. Ένα από τα μοντέλα που υποστηρίζει το Argus One, είναι και ο κώδικας PTC που θα δούμε παρακάτω.

Η χρήση του Argus One βασίζεται στα διάφορα επίπεδα (layers) τα οποία είναι διαφανή φύλλα εργασίας και το καθένα περιέχει πληροφορίες. Ο χρήστης μπορεί να επεξεργαστεί τις πληροφορίες οι οποίες αποθηκεύονται στα επίπεδα και δημιουργούνται χρησιμοποιώντας μαθηματικές και ορθολογικές συναρτήσεις, συναρτήσεις του χώρου καθορίζοντας έτσι τις σχέσεις μεταξύ των επιπέδων. Επιπλέον, το Argus One μπορεί να συνθέσει αυτόματα νέες πληροφορίες ή αλλαγές στα πλέγματα σύμφωνα με τους κανόνες του μοντέλου. Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να εισάγει, να ψηφιοποιήσει και να μεταβάλλει κάθε είδους πληροφορία όπως οριακές συνθήκες, σημειακές πηγές, δεξαμενές, τοπογραφία και φυσικές παράμετροι. Με τις πληροφορίες αυτές καθορίζεται το περίγραμμα της περιοχής της μελέτης, η πυκνότητα του πλέγματος, ενώ στη συνέχεια μπορεί να υπολογισθεί το πάχος του σχηματισμού κ.α.. Από το Layer Data είναι δυνατή η εισαγωγή και η ανάγνωση διαφόρων στοιχείων σχετικά με το πλέγμα και δεδομένα από άλλα προγράμματα (www.argusint.com/index.html).

4.1.2 Ο κώδικας PTC

Ο κώδικας μεταφοράς του Princeton, PTC (Princeton Transport Code), είναι ένα υβριδικό τρισδιάστατο μοντέλο πεπερασμένων στοιχείων και πεπερασμένων διαφορών το οποίο προσομοιώνει τη ροή υπογείων υδάτων και τη μεταφορά ρύπων. Ο κώδικας PTC είναι αποτέλεσμα συνεισφορών πολλών ατόμων στο πανεπιστήμιο του Princeton. Αρχικά αναπτύχθηκε σε δύο διαστάσεις, από τους Pinder & Gray και αργότερα ο κώδικας επεκτάθηκε στον τρισδιάστατο χώρο από τον Babu (Babu et al., 1997).

Ο κώδικας PTC καθορίζει τα χαρακτηριστικά ενός υπόγειου συστήματος ροής επιλύοντας την παρακάτω μερική διαφορική εξίσωση με την οποία υπολογίζεται το υδραυλικό ύψος h :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - S \frac{\partial h}{\partial t} + \sum_{i=1}^r Q_i \delta(x - x_i) \delta(y - y_i) \delta(z - z_i) = 0$$

Όπου:

K_{xx} , η υδραυλική αγωγιμότητα στην οριζόντια x διεύθυνση [LT^{-1}],

K_{yy} , η υδραυλική αγωγιμότητα στην οριζόντια y διεύθυνση [LT^{-1}],

K_{zz} , η υδραυλική αγωγιμότητα στην κάθετη z διεύθυνση [LT^{-1}],

S , ο συντελεστής ειδικής αποθήκευσης [L^{-1}],

Q_i , η παροχή της πηγής ή του ταμιευτήρα στο σημείο i ,

δ , η συνάρτηση δέλτα,

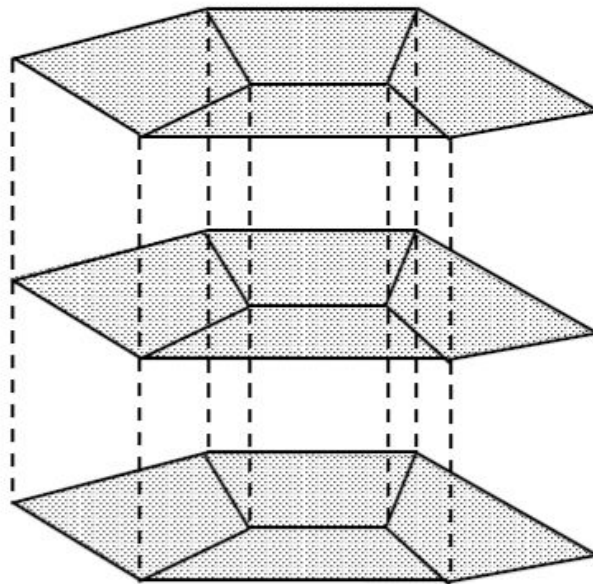
r , ο αριθμός των πηγών ή των ταμιευτήρων.

Για ευκολία, ο τελευταίος όρος της εξίσωσης θα συντμηθεί σε Q . Η παραπάνω εξίσωση επιλύεται αριθμητικά από τον κώδικα PTC χρησιμοποιώντας μεθόδους πεπερασμένων στοιχείων και διαφορών.

Ο PTC χρησιμοποιεί ένα μοναδικό αλγόριθμο διαχωρισμού, ο οποίος μειώνει σημαντικά τον υπολογιστικό φόρτο. Ο αλγόριθμος αυτός περιλαμβάνει διαχωρισμό της περιοχής ελέγχου σε παράλληλα οριζόντια επίπεδα. Μέσα σε καθένα από τα επίπεδα χρησιμοποιείται διακριτοποίηση πεπερασμένων στοιχείων, η οποία επιτρέπει ορθή απεικόνιση πεδίων ακανόνιστου σχήματος. Τα επίπεδα συνδέονται κάθετα με διακριτοποίηση πεπερασμένων διαφορών (Babu et al., 1997).

Ο κώδικας PTC προσαρμόζει και τους τρεις τύπους οριακών συνθηκών που είδαμε στο 3^ο κεφάλαιο (παρ. 3.7) στην εξίσωση της ροής. Οι οριακές συνθήκες μπορούν να αλλαχθούν από το χρήστη κατά τη διάρκεια της πραγματοποίησης μίας προσομοίωσης. Η προεπιλεγμένη οριακή συνθήκη για όλα τα όρια είναι η μηδενική δρώσα δύναμη. Αυτό υπονοεί έναν περιορισμένο υδροφορέα με αδιαπέρατο βυθό και πλάγια σύνορα. Επιλέγοντας διαφορετικές οριακές συνθήκες εντός του πεδίου, ο χρήστης μπορεί να αναπαραστήσει διαφορετικές υδρολογικές συνθήκες.

Ο κώδικας PTC πραγματοποιεί κάθετη διακριτοποίηση για τις χωρικές παραγώγους στη διεύθυνση z, με τη χρήση οριζόντιου πλέγματος πεπερασμένων στοιχείων σε στρώματα τα οποία αντικαθίστανται από κόμβους εναποτίθενται το ένα πάνω στο άλλο (Σχ.4.1) (Babu et al., 1997).



Σχήμα 4.1: Οριζόντιο δίκτυο πεπερασμένων στοιχείων (Babu et al., 1997).

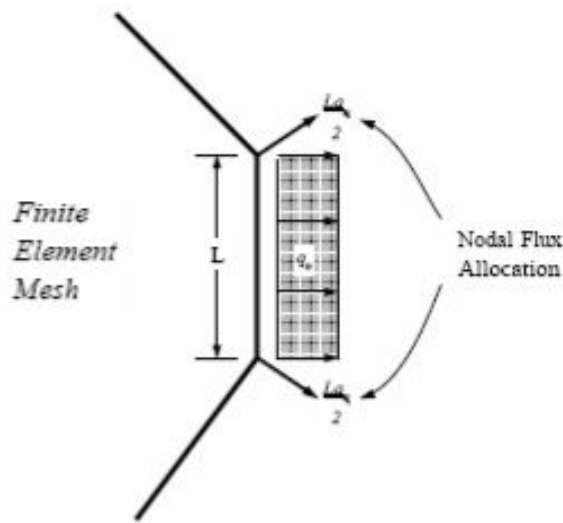
4.1.3 Οριακές συνθήκες σταθερού υδραυλικού ύψους

Οι συνθήκες σταθερού υδραυλικού ύψους (1^{ου} είδους) επιτυγχάνονται προσδιορίζοντας τους κόμβους και τις τιμές των υδραυλικών υψών που είναι ορισμένα σε αυτούς. Ο κώδικας αυτομάτως ορίζει ως σταθερές τις στήλες και τις γραμμές του πίνακα συντελεστών που σχετίζεται με αυτούς τους κόμβους. Όταν οι κόμβοι σταθερού υδραυλικού ύψους απαλειφθούν από την εξίσωση του πίνακα τότε μένουν $(N \times M - N_c)$ εξισώσεις με $(N \times M - N_c)$ αγνώστους, όπου N_c είναι ο συνολικός αριθμός των κόμβων με οριακές συνθήκες σταθερού υδραυλικού ύψους (Babu et al., 1997).

4.1.4 Οριακές συνθήκες σταθερής ροής

Η μέθοδος πεπερασμένων στοιχείων παρέχει έναν απλό τρόπο για τον καθορισμό των οριακών συνθηκών σταθερής ροής (2^{ου} είδους). Η κομβική κατανομή της ροής (Σχήμα 4.2), η οποία θεωρείται σταθερή κατά μήκος ενός στοιχείου μήκους L υπολογίζεται ολοκληρώνοντας τη διαφορική εξίσωση:

$$-\int_{\sigma} \left[K_{xx} \frac{\partial \bar{h}}{\partial x} l_x + K_{yy} \frac{\partial \bar{h}}{\partial y} l_y \right] \omega_i d\sigma = -\int_{\sigma} q_n \omega_i d\sigma$$



Σχήμα 4.2: Κομβική κατανομή της ροής διαμέσου ενός στοιχείου μήκους L (Babu et al., 1997).

4.1.5 Συνθήκες για τον υδροφόρο ορίζοντα

Ο καθορισμός των συνθηκών για τον υδροφόρο ορίζοντα απαιτεί την εισαγωγή δύο οριακών συνθηκών για το επίπεδο του νερού στο πάνω στρώμα:

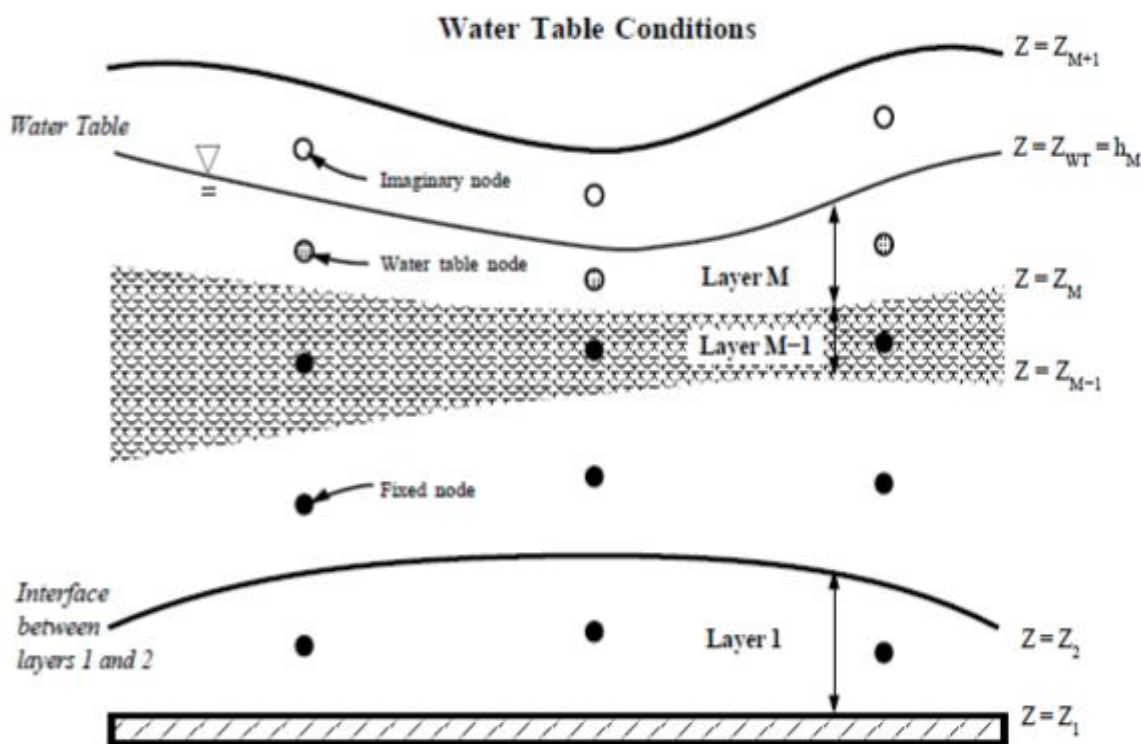
Η πρώτη οριακή συνθήκη δηλώνει ότι το επίπεδο του νερού στο ανώτερο επίπεδο, h_M , καθορίζει το πάχος του υδροφορέα στο ανώτερο στρώμα, $z_{WT}-z_M$. Σε κάθε κόμβο θα πρέπει να ισχύει:

$$(z_{WT})_i = (h_M)_i$$

Κατά τη διάρκεια του υπολογισμού των υδραυλικών υψών, το πρόγραμμα ελέγχει αν οι τιμές του h_M στους κόμβους βρίσκονται μέσα στο ακόλουθο εύρος υψομέτρων:

$$z_M \leq h_M \leq z_{M+1}$$

Η σχηματική αναπαράσταση του υδροφόρου ορίζοντα εικονίζεται στο σχήμα 4.3. Το καθορισμένο επίπεδο του ανώτερου ορίου της ροής της περιοχής θα πρέπει να δίνεται από την εξίσωση $Z_{w+1}(x, y, t)$ και το πραγματικό επίπεδο της στάθμης του νερού, από την εξίσωση $Z_{WT}(x, y, t)$ (Babu et al., 1997).



Σχήμα 4.3: Συνθήκες στάθμης υδροφόρου ορίζοντα. Η επιφάνεια ορίζεται από τις εξισώσεις $z = z_1$, $z = z_2$, κλπ., και είναι καθορισμένα όρια στο χώρο, και καθορίζουν τα στρώματα, (Babu et al., 1997).

Το μοντέλο PTC εμφανίζει ένα μήνυμα στην περίπτωση όπου η παραπάνω συνθήκη παραβιάζεται. Στη συνέχεια η εκτέλεση αυτή τερματίζεται. Η παραπάνω σχέση πρέπει να ικανοποιεί και τις οριακές συνθήκες για το υδραυλικό ύψος.

Η δεύτερη οριακή συνθήκη περιγράφει την μεταβλητή απόκριση του υδροφόρου ορίζοντα στη διήθηση και εκφράζεται με την ακόλουθη εξίσωση:

$$S_y \frac{\partial h}{\partial t} + K_z \frac{\partial h}{\partial z} - R$$

Ο όρος S_y συμβολίζει την ειδική απόδοση κοντά στον υδροφόρο ορίζοντα.

4.2 Εισαγωγή δεδομένων στο PTC

4.2.1 Αρχικά δεδομένα

Η δημιουργία ενός νέου αρχείου, PTC project, γίνεται από το μενού PTEs του Argus ONE και ανοίγεται ένα παράθυρο διαλόγου, το PTC Configuration (Εικ. 4.1), για την εισαγωγή των βασικών αρχικών συνθηκών του υδροφορέα και του κώδικα PTC. Το παράθυρο PTC Configuration έχει δύο κεντρικές επιλογές:

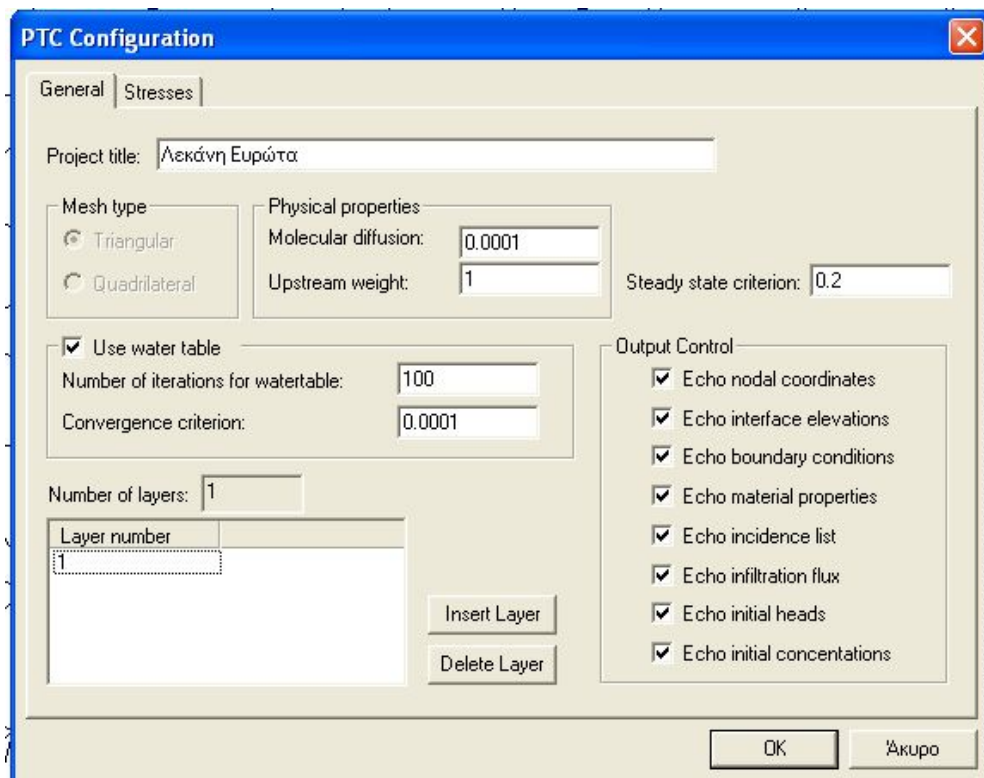
- ⇒ την επιλογή General
- ⇒ την επιλογή Stresses

Επιλογή General

Με την επιλογή General εισάγονται τα παρακάτω δεδομένα:

- ⇒ Ο **τίτλος** της εργασίας (Project Title).
- ⇒ Το **είδος του πλέγματος** (Mesh Type), που περιλαμβάνει δύο επιλογές:
 - ⇒ το τριγωνικό πλέγμα (Triangular) και
 - ⇒ το τετραγωνικό (Quadrilateral).
- Ο τριγωνικός τύπος θεωρείται καλύτερος από τον τετραγωνικό γιατί προσομοιώνει καλύτερα τις οριακές συνθήκες και επιλέγεται αυτόματα σε περίπτωση που δεν επιλεγεί κανένας από τους δύο τύπους πλέγματος.
- ⇒ Οι **φυσικές ιδιότητες του υδροφορέα** (Physical proprieties):
 - ⇒ τη μοριακή διάχυση (Molecular diffusion) και
 - ⇒ το βάρος στα ανάντη (Upstream weight).
- ⇒ Το **κριτήριο σταθερής κατάστασης** (Steady state criterion) που χρησιμοποιείται για να δούμε πότε φτάνουμε σε σταθερή κατάσταση μέσα στον υδροφορέα.
- ⇒ Η επιλογή για το **είδος του υδροφορέα**: αν είναι ελεύθερος ή περιορισμένος (Use water table). Αν είναι ελεύθερος τότε τσεκάρουμε τη συγκεκριμένη επιλογή, διαφορετικά την αφήνουμε κενή. Επίσης πρέπει να σημειώσουμε ότι αν ο υδροφορέας είναι ελεύθερος και τσεκάρουμε τη συγκεκριμένη επιλογή, τότε θα πρέπει να συμπληρώσουμε και τις δύο επιλογές που περιλαμβάνει αυτό το τμήμα:
 - ⇒ τον **αριθμό των επαναλήψεων** που θα χρησιμοποιηθεί για την επίλυση του υδροφορέα (Number of iterations for water table) και
 - ⇒ το **κριτήριο σύγκλισης** για τις παραπάνω επαναλήψεις (Convergence criterion).

Όλα τα παραπάνω στοιχεία για την περιοχή της μελέτης φαίνονται στην εικόνα 4.1.



Εικόνα 4.1: PTC Configuration, επιλογή General.

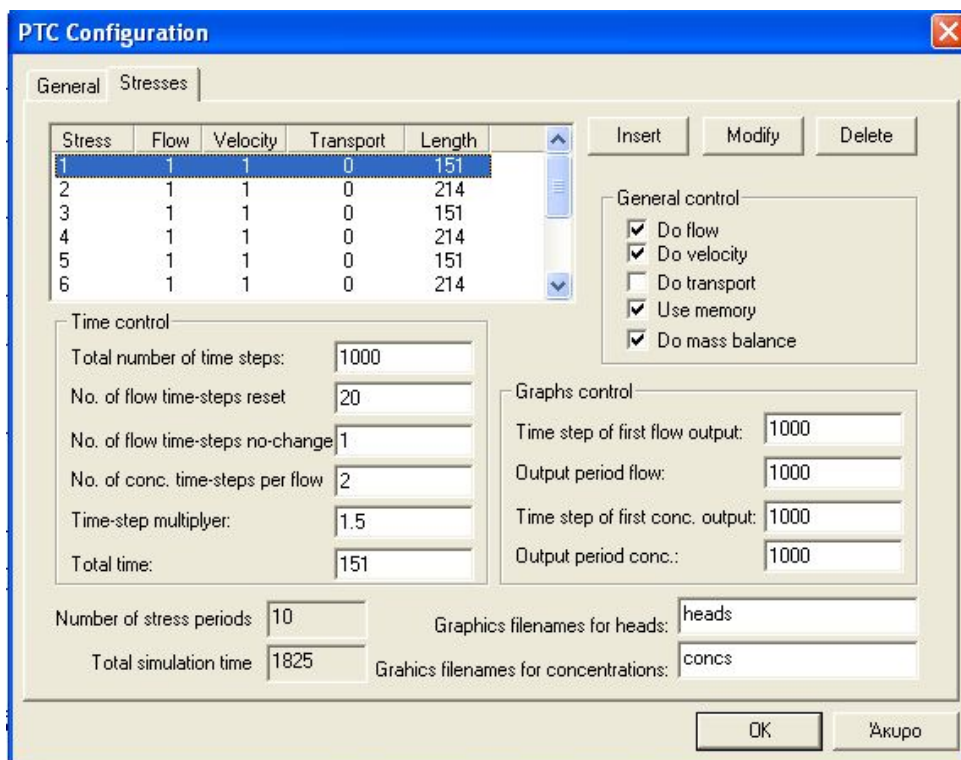
- ⇒ Οι επιλογές για τον **έλεγχο των δεδομένων εξόδου**, (Output control):
- ⇒ τις συντεταγμένες των κόμβων (Echo nodal coordinates),
 - ⇒ τις ανυψώσεις της διεπιφάνειας των στρωμάτων (Echo interface elevations),
 - ⇒ τις οριακές συνθήκες (Echo boundary conditions),
 - ⇒ τις ιδιότητες των υλικών των γεωλογικών στρωμάτων (Echo material properties),
 - ⇒ τη λίστα των επιπτώσεων (Echo incidence list),
 - ⇒ τη δρώσα δύναμη της διήθησης, τη βροχή (Echo infiltration flux),
 - ⇒ τα αρχικά υδραυλικά ύψη (Echo initial head),
 - ⇒ τις αρχικές συγκεντρώσεις (Echo initial concentrations).

Οι παραπάνω επιλογές θεωρούνται απαραίτητες και τσεκάρονται όλες.

- ⇒ Τέλος, με την επιλογή General καθορίζεται ο **αριθμός των στρωμάτων** από τα οποία αποτελείται ο υδροφορέας (Number of layers). Αν είναι περισσότερα από ένα, τότε προσθέτονται και τα υπόλοιπα, με την αρίθμηση να ξεκινάει από το βαθύτερο στο ρηχότερο στρώμα.

Επιλογή Stresses

Σ' αυτήν την επιλογή καθορίζεται ο αριθμός των χρονικών περιόδων μελέτης και όλες οι παράμετροι που έχουν να κάνουν με τον κώδικα PTC και που ενδεχομένως αλλάζουν έπειτα από την εκτέλεση κάποιας εργασίας. Η επιλογή Stresses, (Εικ. 4.2), περιλαμβάνει επιπλέον γενικά αρχικά δεδομένα πριν από την κωδικοποίηση. Τα δεδομένα αυτά αφορούν σε παραμέτρους που αλλάζουν με τη φόρτιση του μοντέλου.



Εικόνα 4.2: PTC Configuration, επιλογή Stresses.

⇒ Το πάνω δεξιό μέρος του παράθυρου διαλόγου εμφανίζει ένα πίνακα που δείχνει τον **αριθμό των περιόδων** των φορτίσεων που δέχεται το μοντέλο. Ανάλογα με την εργασία που εκτελείται μπορεί να προστεθεί ή να αφαιρεθεί περίοδος φόρτισης από τις επιλογές "Insert" και "Delete". Η παράμετρος "Length" του πίνακα αναφέρεται στο συνολικό αριθμό των χρονικών βημάτων ροής.

Επίσης, από την επιλογή "Modify" υπάρχει η δυνατότητα μετατροπής των δεδομένων και των συνθηκών που έχουν καθοριστεί για μία τέτοια περίοδο εργασίας. Αρκεί να επιλεγεί η συγκεκριμένη περίοδος, από τον παραπάνω πίνακα και αφού αλλαχθούν οι παράμετροι να πατηθεί η επιλογή Modify ούτως ώστε οι αλλαγές να αποθηκευτούν.

Για την παρούσα εργασία έχουν καθοριστεί δύο Stresses period: ένα για τη θερινή περίοδο και ένα για τη χειμερινή. Η θερινή περιλαμβάνει την περίοδο από τον Απρίλιο έως και τον Οκτώβριο, 214 ημέρες, και η χειμερινή την περίοδο από το Νοέμβριο έως και το Μάρτιο, 151 ημέρες. Το πρόγραμμα θα εκτελεστεί για πέντε χρόνια, δηλαδή 10 Stresses που αναλογούν σε συνολικό χρόνο προσομοίωσης 1825 ημέρες.

⇒ Στο **γενικό πίνακα ελέγχου** (General control), του παράθυρου “Stresses” δίνεται η δυνατότητα διάφορων εργασιών κατά την εκτέλεση του μοντέλου οι οποίες περιλαμβάνουν:

- ⇒ Do flow: πραγματοποίηση ή μη των υπολογισμών των εξισώσεων ροής.
- ⇒ Do velocity: πραγματοποίηση ή μη των υπολογισμών για την ταχύτητα.
- ⇒ Do transport: πραγματοποίηση ή μη των υπολογισμών των εξισώσεων μεταφοράς.
- ⇒ Use memory: χρησιμοποίηση ή μη της εικονικής μνήμης. (Αυτή η επιλογή πρέπει να είναι τσεκαρισμένη).
- ⇒ Do mass balance: πραγματοποίηση ή μη των εξισώσεων ισοζυγίου μάζας. (Αυτή η επιλογή πρέπει να είναι τσεκαρισμένη).

Στην παρούσα μελέτη η επιλογή “Do transport” δεν είναι τσεκαρισμένη γιατί δεν θα υπάρξει μεταφορά ρύπων.

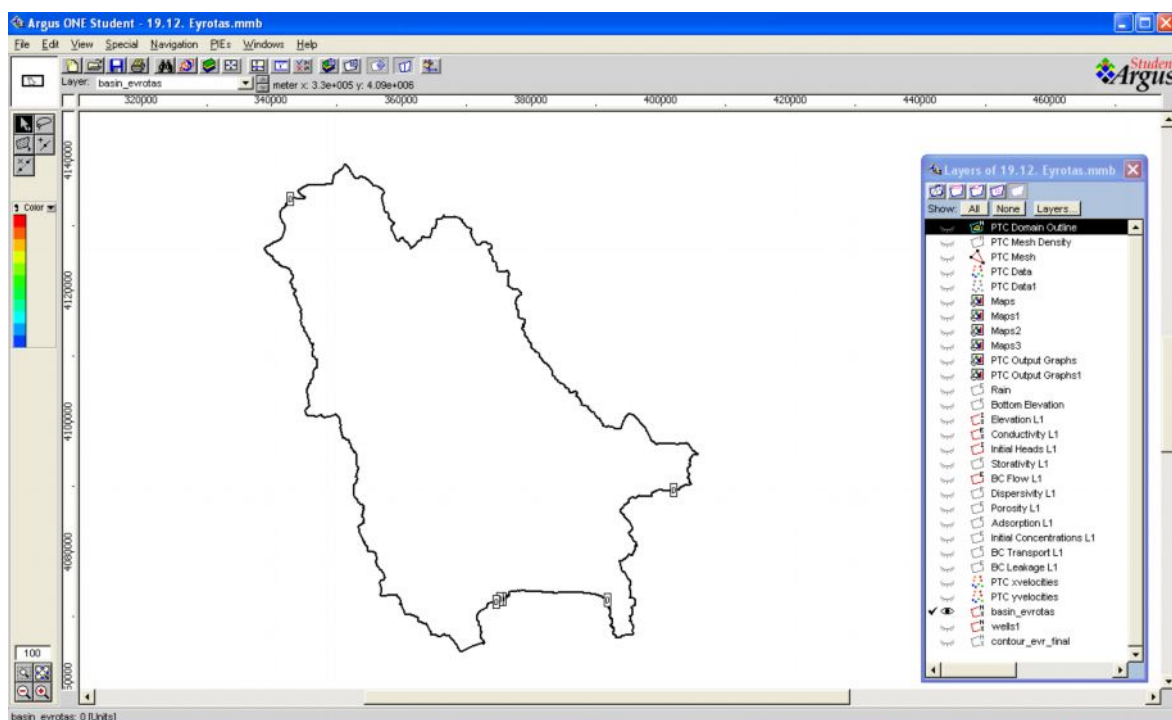
⇒ Τον **πίνακα ελέγχου των χρονικών παραμέτρων** των εργασιών που πρόκειται να πραγματοποιηθούν (Time control):

- ⇒ Total number of time steps: ο συνολικός αριθμός χρονικών βημάτων για την πραγματοποίηση της συγκεκριμένης περιόδου εργασίας, δηλαδή για πόσο χρονικό διάστημα εκτελείται κάθε φορά η προσομοίωση.
- ⇒ Number of flow time-steps reset: ο αριθμός των χρονικών βημάτων ροής μετά την πάροδο των οποίων το χρονικό βήμα θα αλλάξει, εφόσον θα πολλαπλασιαστεί με τον πολλαπλασιαστή που δίνεται παρακάτω.
- ⇒ Number of flow time-steps no-change: ο αριθμός των χρονικών βημάτων για τη ροή, μετά την πάροδο των οποίων το χρονικό βήμα πλέον δεν θα αλλάξει, λόγω της παρουσίας του πολλαπλασιαστή.
- ⇒ Number of concentration time-steps per flow: ο αριθμός των χρονικών βημάτων για τον υπολογισμό των συγκεντρώσεων για κάθε χρονικό βήμα ροής.
- ⇒ Time-step multiplier: ο πολλαπλασιαστής που χρησιμοποιείται στα κουτιά δύο και τρία.

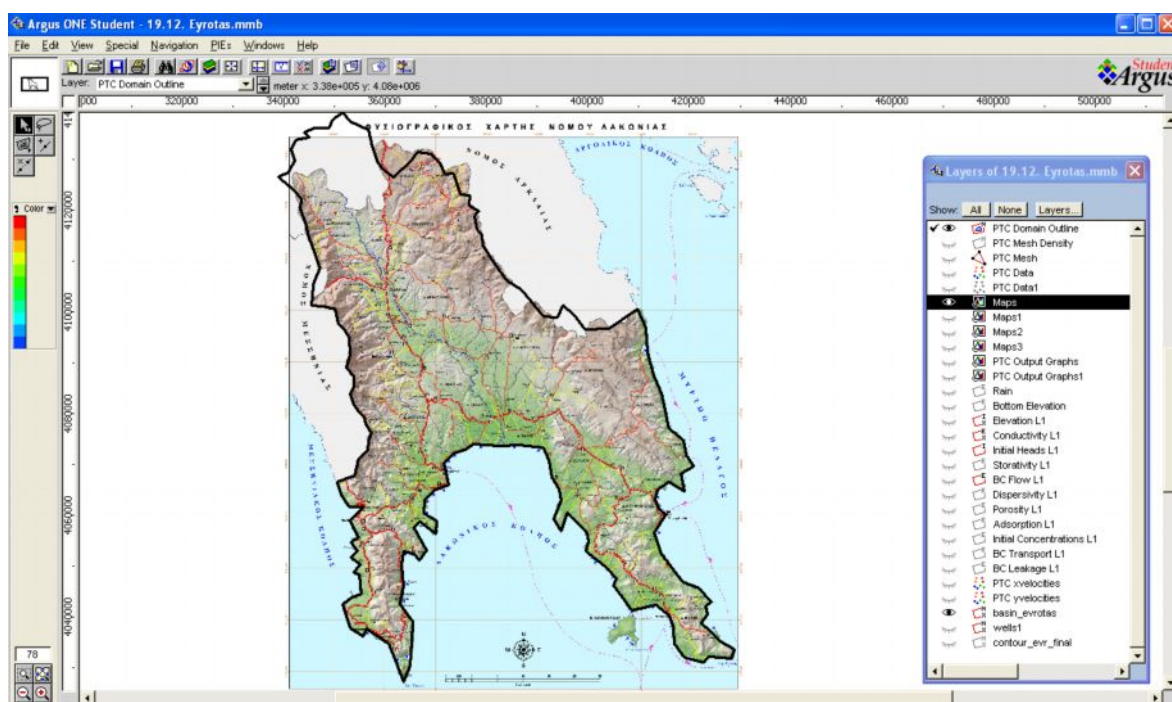
- ⇒ Total time: ο συνολικός χρόνος που απαιτείται για την πραγματοποίηση της συγκεκριμένης περιόδου της εργασίας.
- ⇒ Τον **έλεγχο των γραφικών** που προκύπτουν από τα εξαγόμενα αποτελέσματα (Graphs control):
 - ⇒ Time step of first flow output: το χρονικό βήμα για το οποίο εμφανίζονται τα πρώτα αποτελέσματα για τη ροή σε μορφή γραφικών.
 - ⇒ Output period flow: η περίοδος για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων της ροής με μορφή γραφικών.
 - ⇒ Time step of first concentration output: το χρονικό βήμα μετά από το οποίο εμφανίζονται τα πρώτα αποτελέσματα για τη συγκέντρωση σε μορφή γραφικών.
 - ⇒ Output period concentration: η περίοδος για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων της συγκέντρωσης με μορφή γραφικών.
- ⇒ Τέλος, τα τέσσερα πινακάκια στο κάτω μέρος του παραθύρου, συντελούν σε ένα **γενικό έλεγχο**, όσον αφορά στην προσομοίωση και στις ονομασίες διάφορων αρχείων με τα παρακάτω δεδομένα:
 - ⇒ Number of stress period: ο συνολικός αριθμός περιόδων εργασίας.
 - ⇒ Total simulation time: ο συνολικός χρόνος προσομοίωσης για την εργασία στο σύνολο των περιόδων.
 - ⇒ Graphics filenames for head: η ονομασία αρχείων γραφικών για τα υδραυλικά ύψη.
 - ⇒ Graphics filenames for concentration: η ονομασία αρχείων γραφικών για τις συγκεντρώσεις (PTC manual).

4.2.2 Περίγραμμα περιοχής

Το περίγραμμα της περιοχής της μελέτης PTC Domain Outline σχεδιάστηκε στο αντίστοιχο layer πάνω από το φύλλο χάρτη της περιοχής το οποίο ψηφιοποιήθηκε κατάλληλα και πάνω από ένα υπάρχον περίγραμμα της λεκάνης απορροής το οποίο εισήχθη στο Layer Basin (Εικ. 4.3). Ο χάρτης εισάγεται στο Layer Maps από τα file Place image *.TIF. Ο χάρτης ρυθμίστηκε από το Rotate and Scale για να είναι στην ίδια κλίμακα με το περίγραμμα της λεκάνης και παράλληλα μετακινήθηκε για να συμπίπτει ακριβώς με αυτό. Το περίγραμμα σχεδιάζεται γραμμή – γραμμή διαλέγοντας από το menu του Layer PTC Domain Outline το κλειστό περίγραμμα “Close contour” (Εικ. 4.4).



Εικόνα 4.3: Το περίγραμμα της λεκάνης απορροής στο Layer Basin.

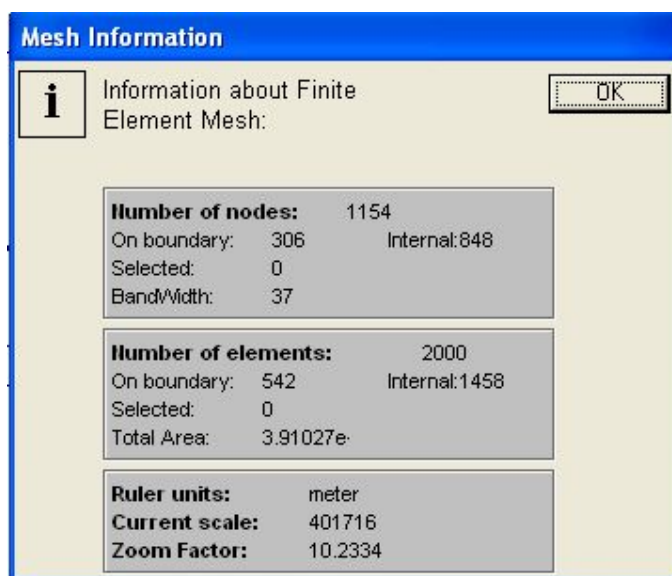


Εικόνα 4.4: Το περίγραμμα της περιοχής στο PTC Domain Outline.

4.2.3 Κατασκευή πλέγματος

Η κατασκευή του πλέγματος στον κώδικα PTC βασίζεται στη θεωρία των πεπερασμένων στοιχείων. Το Argus ONE student version επιτρέπει τη δημιουργία μέχρι 2000 στοιχείων. Στο

παράδειγμα της μελέτης έχουν δημιουργηθεί ακριβώς 2000 στοιχεία και 1154 κόμβοι (Εικ. 4.5). Αφού έχει σχεδιαστεί το περίγραμμα της περιοχής και ό,τι άλλο σχεδιαστικό δεδομένο κρίνεται απαραίτητο, κατασκευάζεται το πλέγμα του συστήματος στο Layer PTC Mesh, (Εικ. 4.6), χρησιμοποιώντας το μαγικό ραβδί magic wand από τα εργαλεία του παράθυρου που εμφανίζεται και επιλέγοντάς το μέσα στο περίγραμμα. Το πλέγμα που θα δημιουργηθεί θα είναι πιο πυκνό στα σημεία όπου έχει δοθεί σχεδιαστική έμφαση τοποθετώντας, για παράδειγμα, πηγάδια άντλησης. Στο παράδειγμα της παρούσας μελέτης δεν ήταν δυνατή περαιτέρω πύκνωση επειδή είχε εξαντληθεί όλος ο αριθμός των στοιχείων, όπως αναφέρθηκε. Για τη βελτιστοποίηση του πλέγματος χρησιμοποιείται η εντολή “Optimize Bandwidth” η οποία ελαχιστοποιεί τις αποστάσεις μεταξύ των κόμβων.

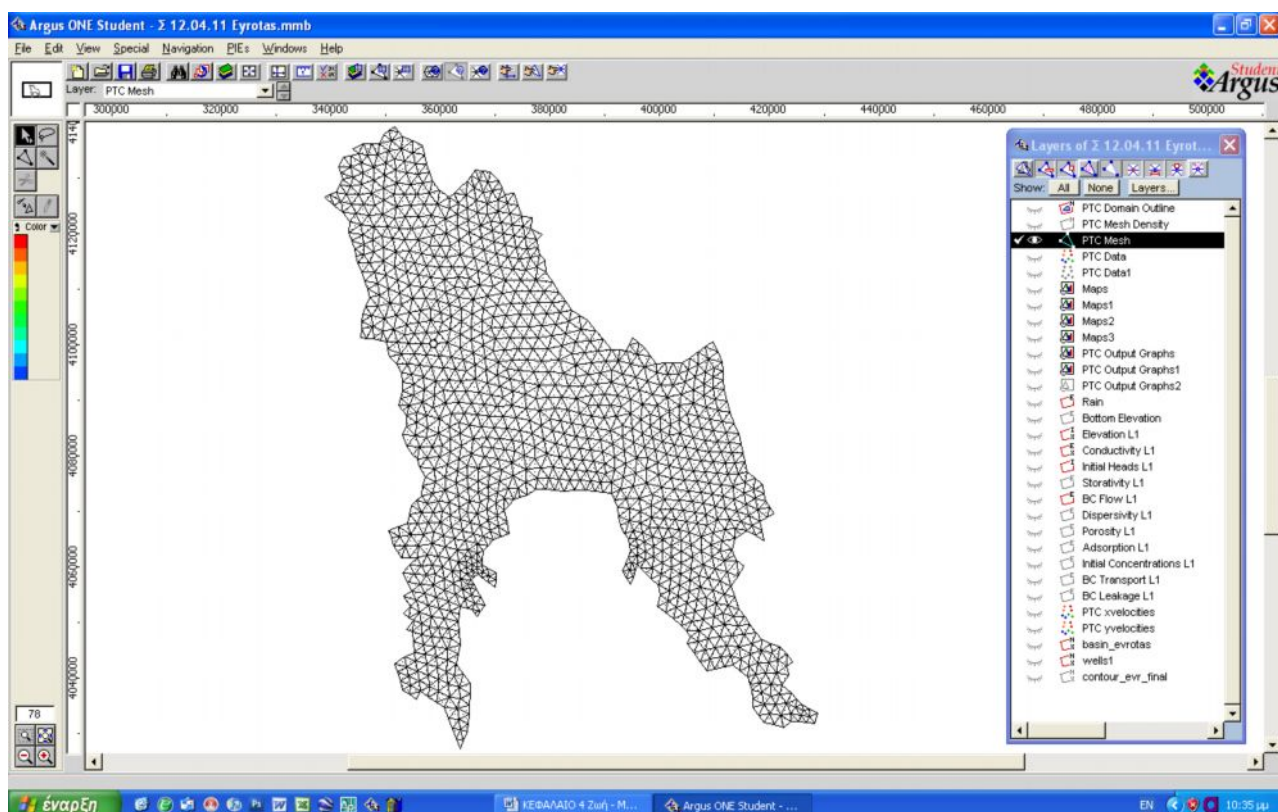


Εικόνα 4.5: Παράθυρο πληροφοριών για το πλέγμα.

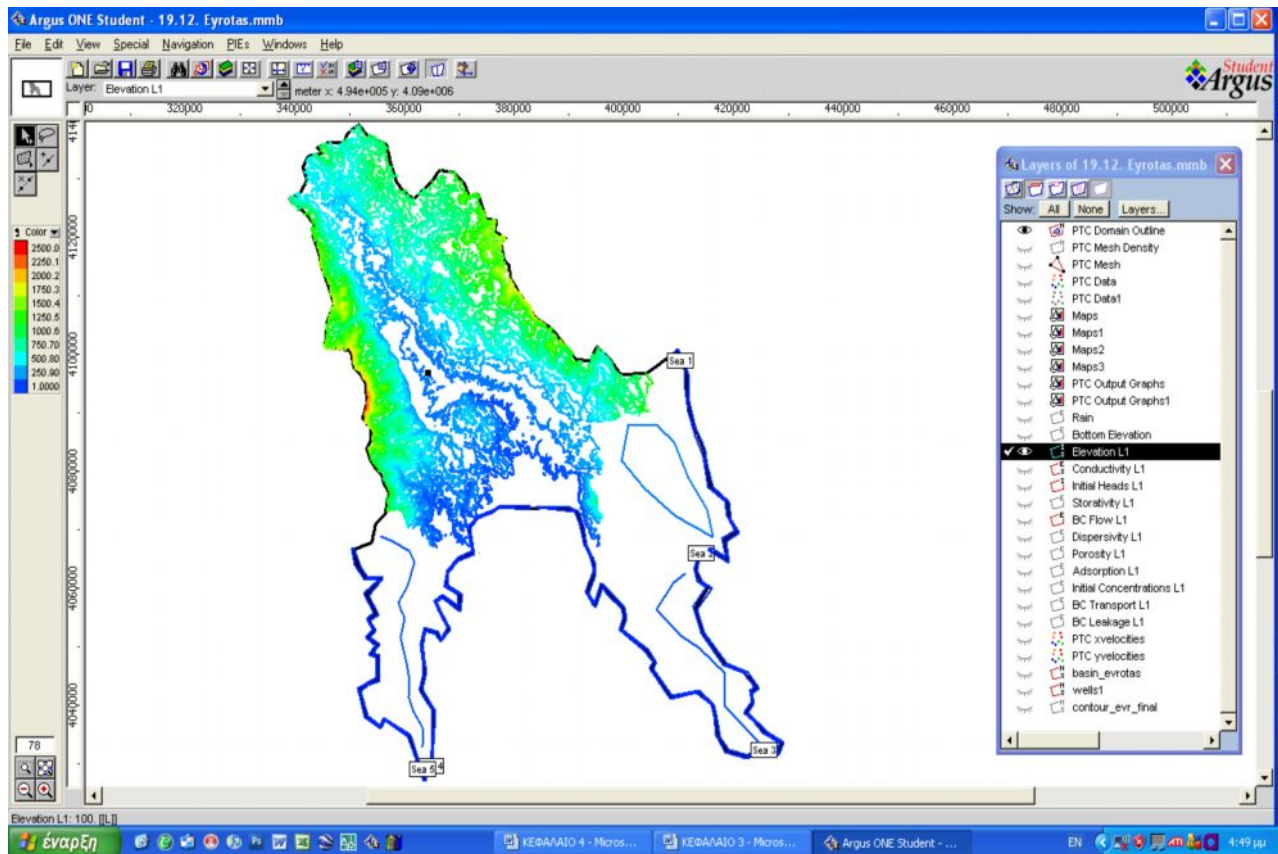
4.2.4 Υψόμετρα

Τα υψόμετρα της περιοχής μελέτης περάστηκαν ψηφιοποιημένα από ένα αρχείο GIS στο Layer Elevation (Εικ. 4.7). Κατά την ψηφιοποίηση λήφθηκε υπόψη το βάθος του υδροφορέα το οποίο καθορίστηκε στα 100 m. Με σημείο αναφοράς τον πυθμένα (Bottom Elevation) στα 100 m κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας, οι τιμές όλων των υψομέτρων είναι αυξημένες κατά 100 m στο Layer Elevation.

Για την προσομοίωση της περιοχής χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος “Interpolation” η οποία επιτρέπει τη γραμμική παρεμβολή μεταξύ των σημείων, ώστε να προσδιοριστούν οι τιμές των υψομέτρων σε όλους τους κόμβους του πλέγματος.



Εικόνα 4.6: Το πλέγμα της περιοχής μελέτης στο Layer PTC mesh.

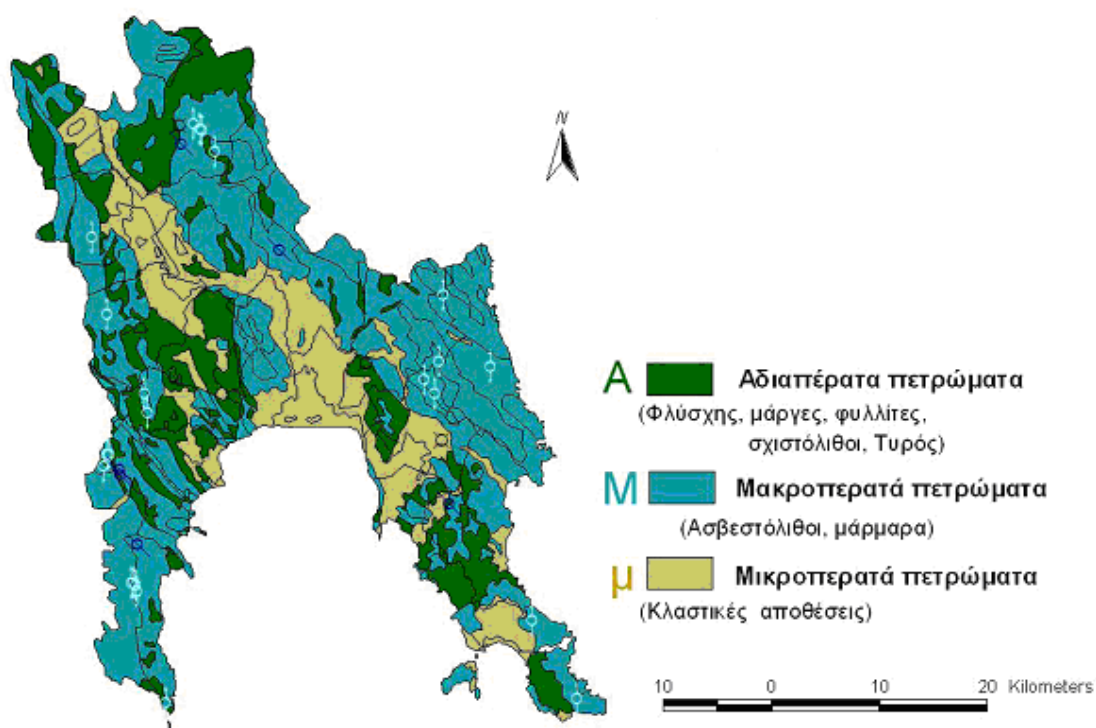


Εικόνα 4.7: Οι ισοψείς καμπύλες στο Layer Elevation.

4.2.5 Υδραυλική αγωγιμότητα

Οι τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας περάστηκαν ψηφιοποιημένες στο Layer Conductivity από ένα αρχείο GIS στο οποίο είχαν καταγραφεί.

Οι σχηματισμοί που εμφανίζονται στην περιοχή μελέτης (Σχ. 4.4), η οποία θεωρήθηκε ομοιογενής, και οι αντίστοιχες υδραυλικές αγωγιμότητες αναγράφονται στον πίνακα 4.1. Οι τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας λήφθηκαν από ένα εύρος βιβλιογραφικών πηγών όπως: Bredehoeft & Pinder (1973), Konikow & Bredehoeft (1974), Davis (1969), Norris (1979), Naymik & Barcelona (1981), Domenico & Schwartz (1990), Keller (1960) κ.ά. και θεωρήθηκαν, όπως συνηθίζεται, ίδιες στις κατευθύνσεις x και y, και μίας τάξης μεγέθους μικρότερη κατά τη διεύθυνση z.



Σχήμα 4.4: Κατανομή κυριότερων γεωλογικών σχηματισμών (Μαριολάκος κ.ά., 2007).

4.2.6 Οριακές συνθήκες

Οι οριακές συνθήκες εισάγονται στο Layer BC Flow L1 και αποτελούνται από στοιχεία που καθορίζονται από τα φυσικά όρια της περιοχής μελέτης (θάλασσα, ορεινοί όγκοι) ή έχουν γνωστά χαρακτηριστικά υδραυλικά μεγέθη (ποτάμι, πηγάδια άντλησης) (Πιν. 4.2). Οι οριακές συνθήκες πρώτου είδους απαιτούν την ύπαρξη απεριορίστων ποσοτήτων νερού (θάλασσα,

ποτάμι). Οι συνθήκες δευτέρου είδους πλεονεκτούν επειδή δεν προκαλούν αλλοιώσεις στο σύστημα υπόγειας ροής.

Πίνακας 4.1: Σχηματισμοί περιοχής μελέτης και τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας.

Σχηματισμοί	Υδραυλική αγωγιμότητα[m/sec]		
	x	y	z
Ασβεστόλιθοι	10^{-8}	10^{-8}	10^{-9}
Δολομίτες	10^{-8}	10^{-8}	10^{-9}
Δολομίτες & δολ/τικοί ασβεστόλιθοι	10^{-8}	10^{-8}	10^{-9}
Οργανογενή ασβεστόλιθοι	10^{-7}	10^{-7}	10^{-8}
Φυλλίτες	10^{-12}	10^{-12}	10^{-13}
Χαλαζιακοί, σερικιτικοί, ανθρακικοί & ταλκικοί φυλλίτες	10^{-12}	10^{-12}	10^{-13}
Φλύσχης	10^{-6}	10^{-6}	10^{-7}
Μάρμαρα	10^{-10}	10^{-10}	10^{-11}
Σχιστόλιθοι	10^{-12}	10^{-12}	10^{-13}
Αργιλικό σχιστόλιθοι	10^{-11}	10^{-11}	10^{-12}
Ανθρακικό υλικό	10^{-6}	10^{-6}	10^{-7}
Πλευρικά κορήματα: συνεκτικά έως χαλαρά από ασβ/κές λατύπες	10^{-6}	10^{-6}	10^{-7}
Τόφροι & τοφίτες	10^{-6}	10^{-6}	10^{-7}
Κροκαλοπαγή	10^{-6}	10^{-6}	10^{-7}
Λατυποπαγή	10^{-6}	10^{-6}	10^{-7}
Αλλούβια	10^{-3}	10^{-3}	10^{-4}
Άμμοι, χαλίκια	10^{-3}	10^{-3}	10^{-4}
Ασβεστόλιθοι & μάργες	10^{-8}	10^{-8}	10^{-9}
Ηφαιστειακά πετρώματα	10^{-6}	10^{-6}	10^{-7}
Τόφροι & τοφίτες με ενστρώσεις αργιλικών σχιστόλιθων	10^{-6}	10^{-6}	10^{-7}
Οφιόλιθοι	10^{-11}	10^{-11}	10^{-12}
Λιμναίες αποθέσεις	10^{-4}	10^{-4}	10^{-5}
Παράκτιες αποθ.: άμμοι & κορήματα	10^{-6}	10^{-6}	10^{-7}
Ποτάμιες αναβαθμίδες: ερυθρές & αργ/χες άμμοι, κροκάλες, χαλίκια	10^{-6}	10^{-6}	10^{-7}
Παράκτιοι σχ/μοί: ασβεστολιθικές κροκάλες	10^{-6}	10^{-6}	10^{-7}
Θαλάσσιοι σχ/μοί: ασβεστοψ/τικοί άργιλοι, τέφρες, μάργες	10^{-6}	10^{-6}	10^{-7}
Προσχώσεις κοιλάδων: αμμούχες άργιλοι, άμμοι	10^{-3}	10^{-3}	10^{-4}
Ερυθρές άργιλοι, αργιλούχες άμμοι	10^{-6}	10^{-6}	10^{-7}

Πίνακας 4.2: Οριακές συνθήκες περιοχής μελέτης.

Όρια	Οριακή συνθήκη
Θάλασσα	1 ^{ου} είδους
Ποτάμι	1 ^{ου} είδους
Πηγάδια άντλησης	2 ^{ου} είδους
Ορεινοί όγκοι	2 ^{ου} είδους - 1 ^{ου} είδους

Προσδιορισμός της θάλασσας και του ποταμού

Το ποτάμι και η θάλασσα αποτελούν οριακές συνθήκες πρώτου είδους. Τα στοιχεία αυτά σχεδιάζονται σαν κλειστά περιγράμματα περικλείοντας τους κόμβους στους οποίους ανήκουν. Ο σχεδιασμός πραγματοποιείται στο Layer BC Flow L1 έχοντας ενεργοποιημένο το χάρτη όπου φαίνονται αυτά τα στοιχεία. Οι τιμές που δίνονται στο κάθε περίγραμμα είναι οι τιμές των υδραυλικών υψών, αφού πρόκειται για συνθήκες πρώτου είδους, για κάθε stress. Για τη θάλασσα η τιμή είναι παντού 100 m ενώ για το ποτάμι βλέπουμε από το Layer Elevation το υψόμετρο του κάθε κόμβου και αφαιρούμε 1,0 m θεωρώντας το ως το μέσο όρο του ύψους του ποταμού. Για τις θερινές περιόδους αφαιρούμε επιπλέον 0,5 m λόγω της πτώση στάθμης του ποταμού (Εικ. 4.8).

Contour Information

Please enter value for this contour:

OK Cancel

Contour is: Closed
 Number of vertices: 4
 Contour area: 92053.5
 Contour perimeter: 1215.81

Contour name: Primo

Icon: None

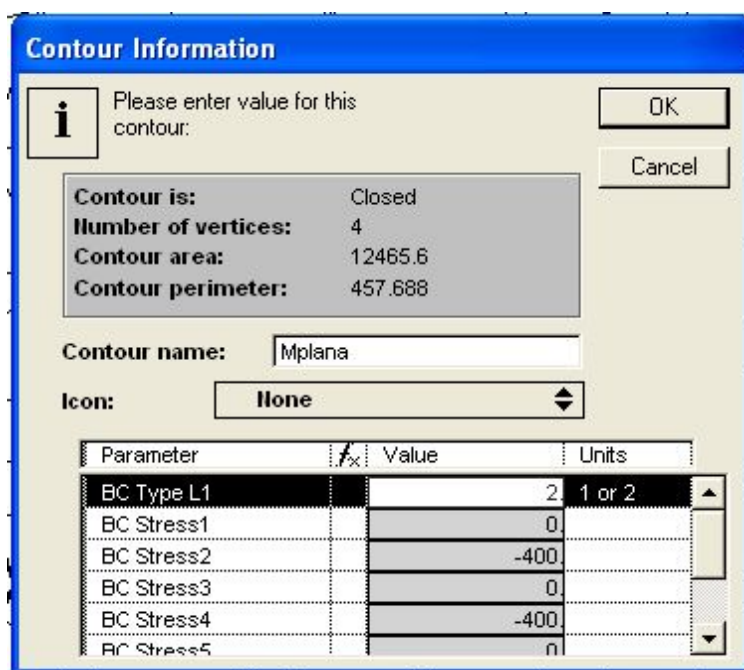
Parameter	Value	Units
BC Type L1	1	1 or 2
BC Stress1	444	
BC Stress2	443.5	
BC Stress3	444	
BC Stress4	443.5	
BC Stress5	444	

Εικόνα 4.8: Τιμές για τον πρώτο κόμβο του ποταμού.

Προσδιορισμός των πηγών

Τα πηγάδια προσδιορίζονται ως οριακές συνθήκες δευτέρου είδους. Τα πηγάδια άντλησης που χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο είναι ύδρευσης ή άρδευσης. Τα πρώτα χρησιμοποιούνται όλο το χρόνο ενώ τα δεύτερα μόνο τους ξηρούς μήνες του χρόνου κατά τους οποίους οι βροχοπτώσεις είναι μειωμένες και οι αρδευτικές ανάγκες αυξημένες. Η άντληση καθορίστηκε να έχει τιμές από 500 έως 200 m³/d. Τα πηγάδια άντλησης σχεδιάζονται (στο Layer BC Flow L1) περικλείοντας με περίγραμμα τον κόμβο στον οποίο ανήκουν και δίνοντας τιμές άντλησης για την κάθε περίοδο στο παράθυρο διαλόγου που εμφανίζεται (Εικ. 4.9). Κατόπιν, αντιγράφονται στο Layer Initial Heads L1 όπου εισάγονται

οι τιμές των αρχικών υδραυλικών υψών τους. Οι τιμές αυτές προκύπτουν αφαιρώντας από το υψόμετρο των πηγών τις τιμές της στάθμης τους μετρημένες κατά την περίοδο της πρώτης παρατήρησης (καλοκαίρι 2004). Τα δεδομένα για τις πηγάδια άντλησης που χρησιμοποιήθηκαν εμφανίζονται στον πίνακα 4.3.



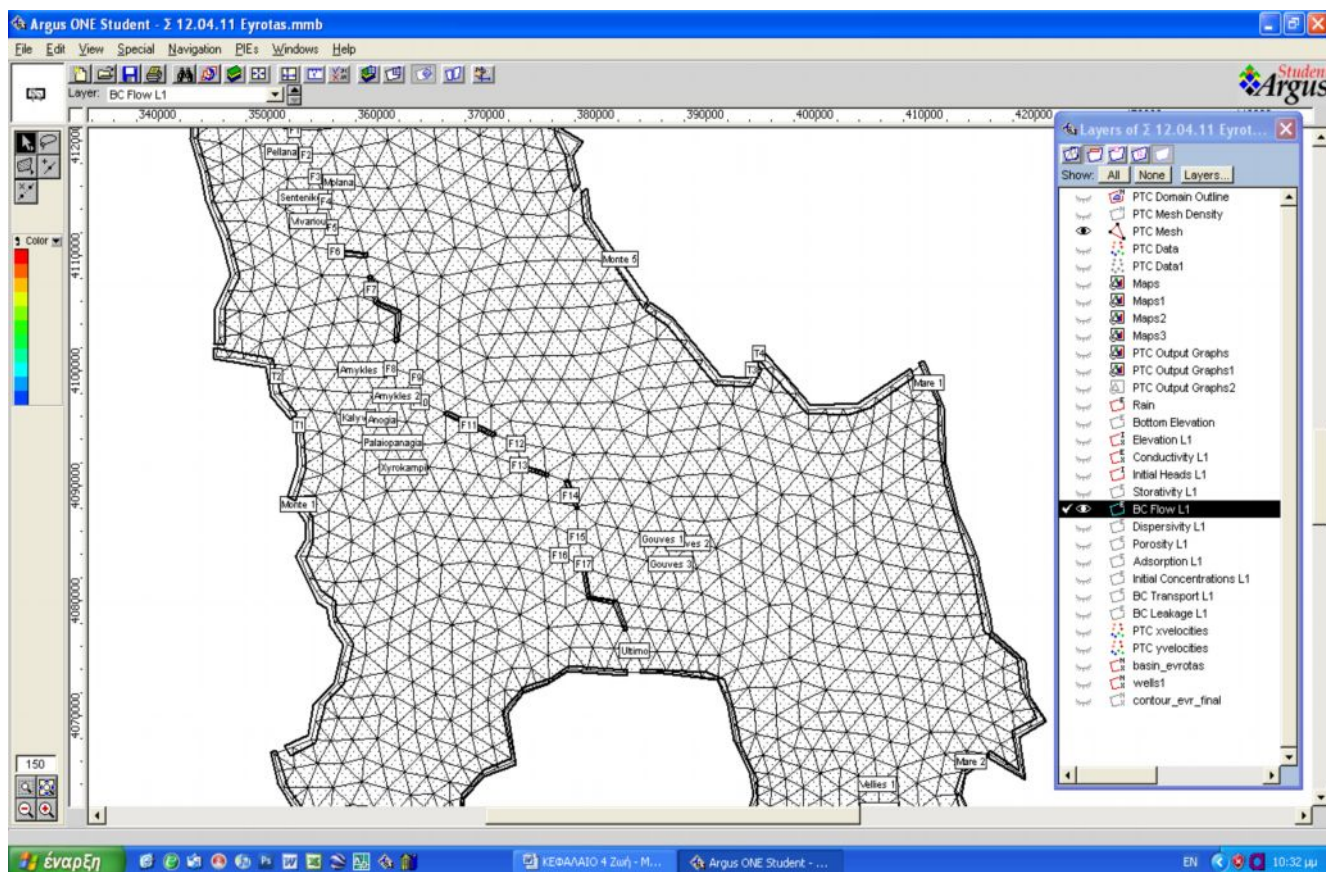
Εικόνα 4.9: Παράθυρο πληροφοριών για την πηγή “Μπλάνας”.

Πίνακας 4.3: Δεδομένα για τις πηγάδια άντλησης που χρησιμοποιήθηκαν.

Πηγάδια άντλησης		Κόμβος	Αντληση [m ³ /d]	Χρήση	Αρχικό Υδραυλικό Ύψος
Δυτικά	Πελλάνα	83	300	Y/A	493,10
	Σεντενίκου	110	400	A	383,05
	Μπλάνα	103	400	A	385,95
	Βιβαρίου	126	400	Y/A	397,05
	Αμύκλες 1	257	400	A	282,35
	Αμύκλες 2	280	500	A	283,07
	Καλύβια	296	200	A	810,20
	Ανώγεια	297	200	A	313,90
	Παλαιοπαναγιά	316	300	A	328,40
	Ξηροκάμπι	335	300	Y/A	315,50
Νότιο-ανατολικά	Γούβες 1	500	300	A	111,65
	Γούβες 2	528	200	Y/A	121,80
	Γούβες 3	527	500	A	30,70
	Βελλιές 1	915	500	Y/A	79,45
	Βελλιές 2	939	500	A	147,15

Ορεινοί όγκοι

Οι ορεινοί όγκοι σχεδιάζονται όπως όλα τα παραπάνω στοιχεία που περιγράφηκαν και θα χρησιμοποιηθούν ως οριακές συνθήκες δευτέρου είδους για τη βαθμονόμηση του μοντέλου. Δηλαδή θα εισάγονται τιμές παροχής τέτοιες ώστε να επιτευχθεί η βαθμονόμηση του μοντέλου. Οι οριακές συνθήκες της περιοχής μελέτης εμφανίζονται στην εικόνα 4.10.



Εικόνα 4.10: Σχηματική απεικόνιση οριακών συνθηκών.

4.2.7 Βροχή

Για την εισαγωγή των δεδομένων της βροχής σχεδιάστηκαν δύο τμήματα της περιοχής (Σχ. 4.5):

- ⇒ το βόριο τμήμα της λεκάνης που συγκλίνει στους δύο ορεινούς όγκους της περιοχής μελέτης,
- ⇒ το νότιο και κεντρικό που καλύπτει τα πεδινά τμήματα της περιοχής.

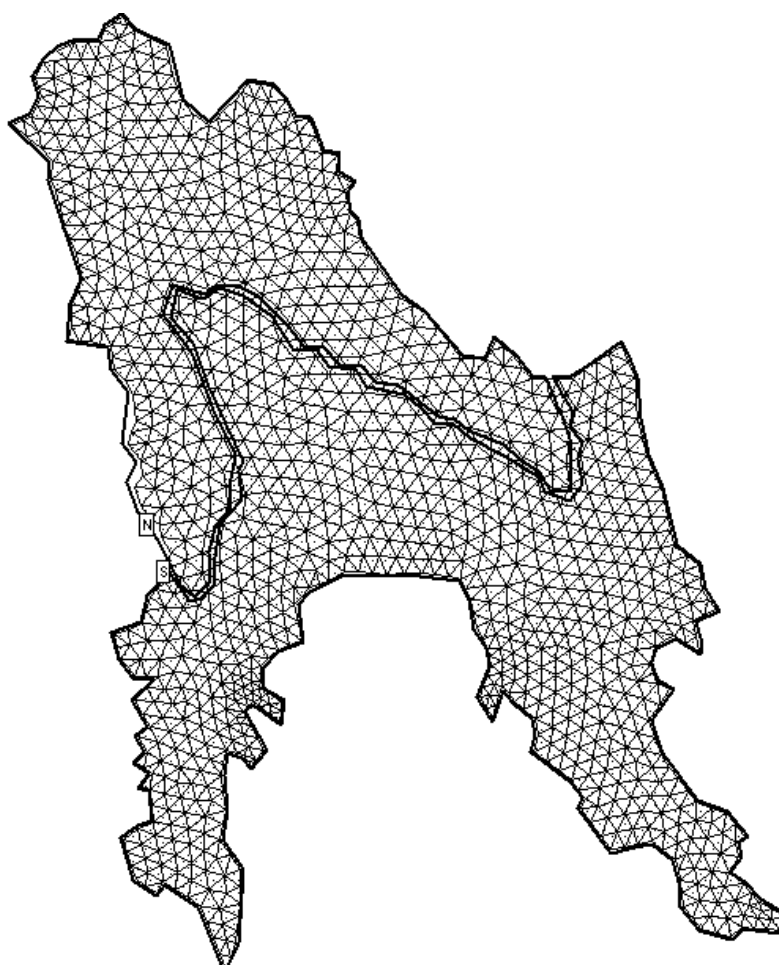
Αυτή η διαφοροποίηση επιτρέπει την εισαγωγή διαφορετικών δεδομένων βροχής ανεξάρτητα από τα Stresses period. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν αναγράφονται στους πίνακες 4.4 και 4.5.

Πίνακας 4.4: Ετήσια δεδομένα βροχής.

Τμήμα	Ετήσια βροχή [mm]	Νοέμβριος-Μάρτιος	Απρίλιος-Οκτώβριος
Βόριο	950	570 mm=0,57 m	380 mm =0,38 m
Νότιο	650	460 mm=0,46 m	190 mm =0,19 m

Πίνακας 4.5: Δεδομένα διήθησης.

Τμήμα	Νοέμ.-Μάρτ. [m/d]	Απρ.-Οκτώβ. [m/d]	Διήθηση 30% Νοέμ.-Μάρτ. [m/d]	Διήθηση 30% Απρ.-Οκτώβ. [m/d]
Βόριο	0,00378	0,00178	0,001134	0,000534
Νότιο	0,00305	0,00089	0,000915	0,000267

**Σχήμα 4.5:** Διαχωρισμός περιοχών για την εισαγωγή δεδομένων βροχής.

Λοιπά στοιχεία

Σε όλη την περιοχή μελέτης θεωρήθηκαν ενιαίες οι τιμές της αποθηκευτικότητας και του πορώδους. Η αποθηκευτικότητα θεωρήθηκε ίση με 0,1 και το πορώδες ίσο με 0,2.

Επίσης, σε όλη την περιοχή δόθηκε μία γενική τιμή υπόβαθρου της υδραυλικής αγωγιμότητας ίση με 0,0864 m/d για τις διευθύνσεις x και y, και 0,00864 m/d για τη διεύθυνση z.

4.2.8 Βαθμονόμηση

Η βαθμονόμηση του μοντέλου πραγματοποιήθηκε δίνοντας τιμές παροχής (συνθήκη 2^{ου} είδους) στους ορεινούς όγκους που σχεδιάστηκαν περικλείοντας τους οριακούς κόμβους του πλέγματος της περιοχής μελέτης. Κατά τη διαδικασία της βαθμονόμησης συγκρίνονται οι τιμές των υδραυλικών υψών που εξάγει το μοντέλο, κατά την εκτέλεση του PTC, στους κόμβους όπου υπάρχουν δεδομένα πεδίου για τη βελτιστοποίηση του συστήματος πετυχαίνοντας όσο το δυνατόν μικρότερη απόκλιση ανάμεσα σε αυτές τις τιμές. Στην παρούσα εργασία γνωστοί κόμβοι είναι οι γεωτρήσεις για τις οποίες υπάρχουν οι μετρήσεις των σταθμών. Οι τιμές του μοντέλου έχουν συγκριθεί με τις τιμές του Οκτώβρη του 2009 όπου τερματίζεται η περίοδος μελέτης (stress 10) (Πιν. 4.6). Οι τιμές των δεδομένων και του μοντέλου (Πιν. 4.6) καθώς και η συσχέτιση των τιμών τους (R^2) απεικονίζονται στο διάγραμμα του σχήματος 4.6.

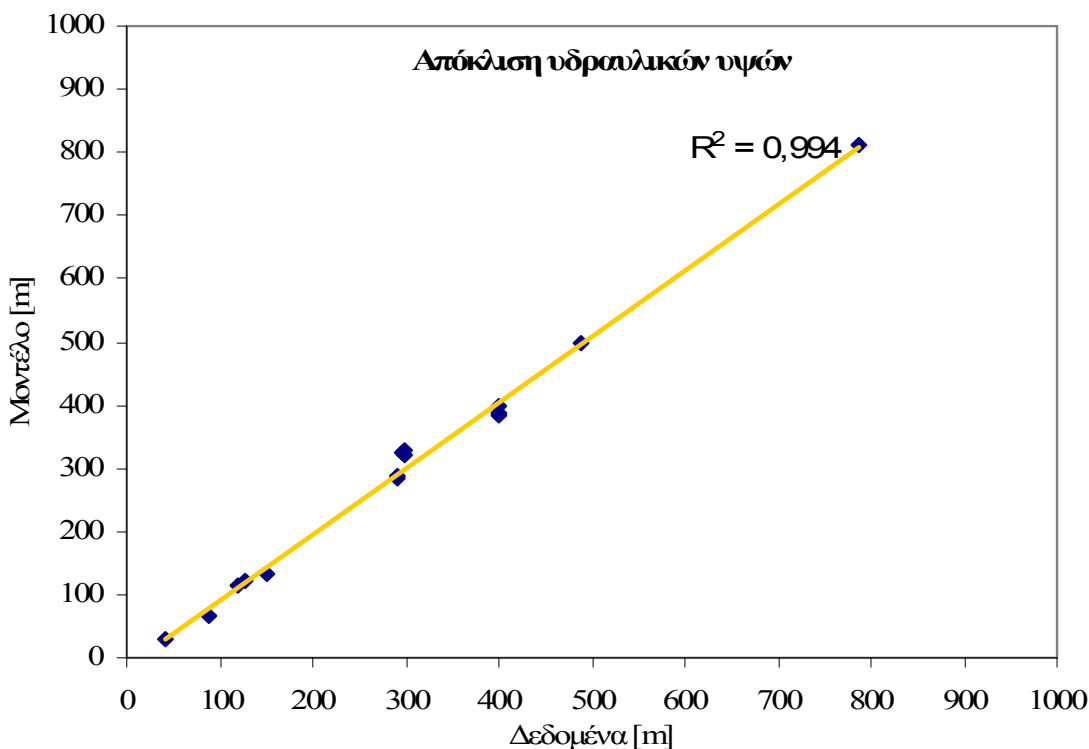
Πίνακας 4.6: Τιμές υδραυλικών υψών δεδομένων πεδίου και μοντέλου.

Πηγάρδια άντλησης		Τιμές δεδομένων [m]	Τιμές μοντέλου [m]
Δυτικά	Πελλάνα	496,83	487,62
	Σεντενίκου	385,42	399,77
	Μπλάνα	388,64	399,74
	Βιβαρίου	397,75	400,03
	Αμύκλες 1	286,81	290,59
	Αμύκλες 2	285,42	291,60
	Καλύβια	810,65	786,43
	Ανώγεια	326,20	295,16
	Παλαιοπαναγιά	329,20	299,86
	Ξηροκάμπι	322,60	299,92
Νότιο- ανατολικά	Γούβες 1	113,55	120,04
	Γούβες 2	121,75	128,21
	Γούβες 3	30,56	40,78
	Βελλιές 1	66,70	88,64
	Βελλιές 2	134,10	151,16

*Τιμές υδραυλικών υψών 2009.

Σημειώνεται ότι το μοντέλο βαθμονομήθηκε και με τη χρήση οριακών συνθηκών 1^{ου} είδους, σε ορισμένους, κατά τόπους, κόμβους. Οι δύο βαθμονομήσεις έδωσαν τις ίδιες τιμές υδραυλικών υψών για τους κόμβους που ανήκουν τα πηγάρδια άντλησης. Η διαφοροποίηση

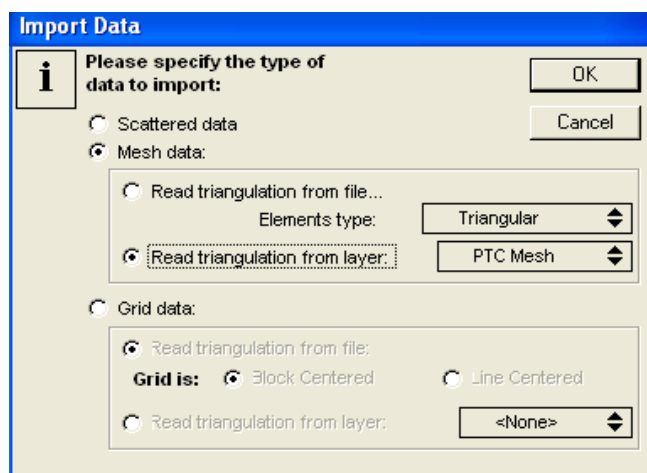
στις τιμές των υδραυλικών υψών παρουσιάζεται έντονα ακριβώς πάνω στους οριακούς κόμβους και μειώνεται όσο απομακρυνόμαστε από αυτούς, αρκετά απότομα, όπως θα δούμε στα διαγράμματα όπου παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του μοντέλου.



Σχήμα 4.6: Απόκλιση τιμών υδραυλικών υψών δεδομένων και μοντέλου.

4.2.9 Εκτέλεση του μοντέλου

Η εκτέλεση του μοντέλου πραγματοποιείται στο Mesh Layer και επιλέγοντας από το μενού PIES την εντολή Run PTC και το φάκελο στον οποίο θα αποθηκευτούν τα αρχεία του Output. Η εξέλιξη της εκτέλεσης απεικονίζεται σε ένα παράθυρο DOS. Μετά την εκτέλεση της προσομοίωσης, κλείνει το παράθυρο DOS και είναι δυνατή η γραφική απεικόνιση των τελικών υδραυλικών υψών και των ταχυτήτων ροής. Για τα διαγράμματα των υδραυλικών υψών επιλέγεται το Layer PTC Data και από το File η εντολή Import PTC Data και Text File. Αμέσως μετά εμφανίζεται ένα παράθυρο διαλόγου (Εικ. 4.11) όπου προσδιορίζεται ο τύπος των αποτελεσμάτων που εισάγονται και διαλέγεται το αρχείο για το οποίο θα δημιουργηθεί το γράφημα.

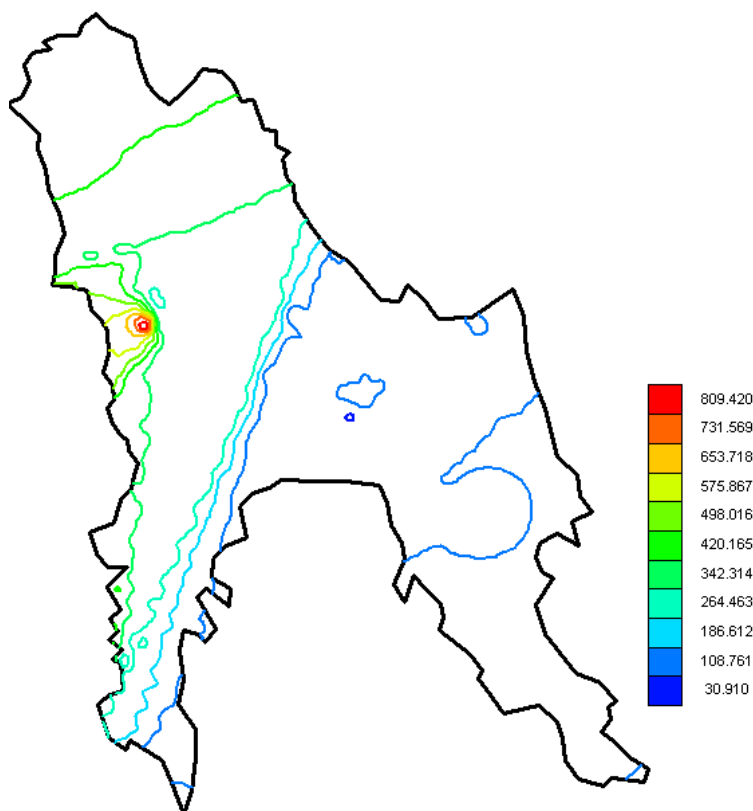


Εικόνα 4.11: Παράθυρο διαλόγου για την εισαγωγή δεδομένων.

4.3 Αποτελέσματα

4.3.1 Υδραυλικά ύψη

Οι τιμές των αρχικών υδραυλικών υψών της λεκάνης απορροής της μελέτης έχουν βασιστεί στα αρχικά υδραυλικά ύψη των πηγαδιών άντλησης και με τη μέθοδο “Interpolation” καθορίστηκαν για όλη την περιοχή. Το αντίστοιχο διάγραμμα εμφανίζεται στο σχήμα 4.7.

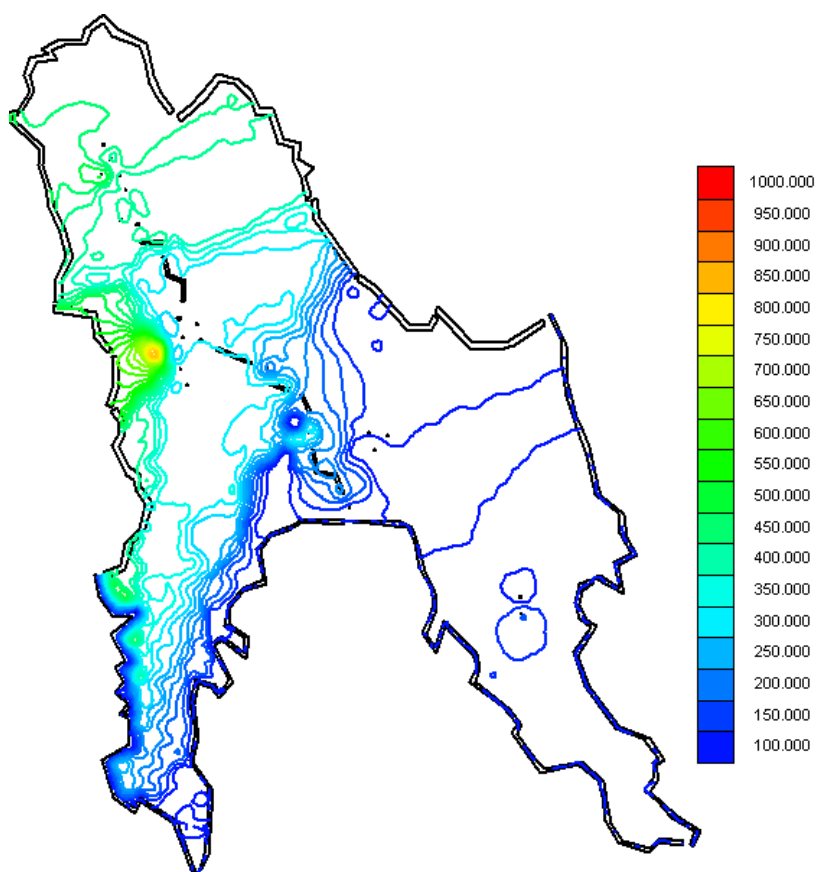


Σχήμα 4.7: Αρχικά υδραυλικά ύψη της λεκάνης απορροής της περιοχής μελέτης.

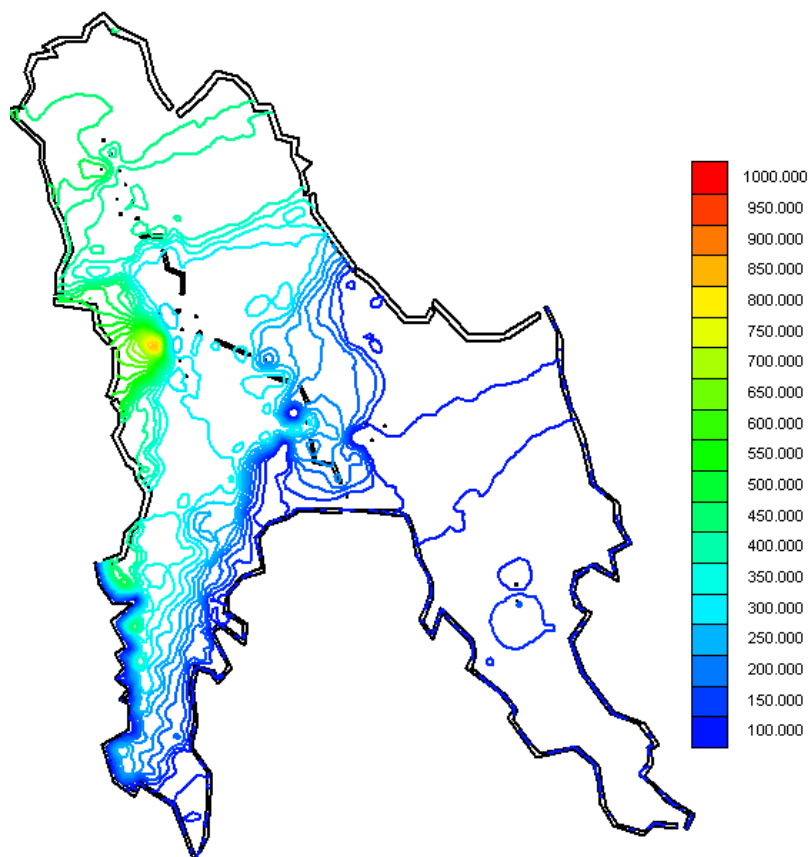
Από τα αποτελέσματα της εφαρμογής του μοντέλου στη λεκάνη απορροής της περιοχής μελέτης, γίνεται αντιληπτό ότι κατά τη διάρκεια των πέντε ετών, για τα οποία εκτελέστηκε το μοντέλο, το βορειοδυτικό τμήμα της λεκάνης δεν παρουσιάζει αισθητή διαφοροποίηση στις τιμές των υδραυλικών υψών όπως προκύπτει και από τα διαγράμματα των σχημάτων 4.8 έως 4.11. Αυτό φάνηκε και από τα δεδομένα των σταθμών των γεωτρήσεων της εν λόγω περιοχής που χρησιμοποιήθηκαν, οι οποίες είχαν πολύ περιορισμένη ή καθόλου πτώση στάθμης. Αντιθέτως, το νοτιοανατολικό τμήμα της λεκάνης απορροής, παρουσιάζει αισθητή πτώση στις τιμές των υδραυλικών υψών. Αυτό ίσως να οφείλεται στη μείωση των βροχοπτώσεων και στην αύξηση της θερμοκρασίας των τελευταίων χρόνων, σε συνδυασμό με την αύξηση των υδατικών και αρδευτικών αναγκών, καθώς πρόκειται για πεδινή αγροτική περιοχή. Το βορειοδυτικό τμήμα της λεκάνης απορροής αποτελείται από ορεινές περιοχές του Ταΰγετου, με υψόμετρο άνω των 2000 m περίπου, παρουσιάζοντας υψηλές βροχοπτώσεις κατά τη διάρκεια όλου του έτους και σημαντικές χιονοπτώσεις, οι οποίες επιτρέπουν τη συνεχή τροφοδότηση των παρακείμενων υπόγειων υδροφορέων. Επίσης, οι γεωτρήσεις της περιοχής είναι πολύ κοντά σε αυτά τα ορεινά τμήματα, γεγονός που διευκολύνει την τροφοδότησή τους και την καθιστά συνεχή και άμεση. Αντίθετα, το νοτιοανατολικό τμήμα υστερεί σε χιονοπτώσεις, οι βροχοπτώσεις είναι πιο περιορισμένες σε σχέση με το δυτικό τμήμα και η ξηρή περίοδος έχει παραταθεί λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας των τελευταίων χρόνων με αποτέλεσμα την αύξηση των αρδευτικών αναγκών.

Σε αυτό το σημείο, αξίζει να αναφερθούν τα διαγράμματα των υδραυλικών υψών όταν στο μοντέλο πραγματοποιήθηκε **βαθμονόμηση, κατά τόπους, και με οριακές συνθήκες 1^{ου} είδους**. Τα διαγράμματα φαίνονται στα σχήματα 4.12 και 4.13 και είναι φανερό η αμεσότητα με την οποία δρουν σε σχέση με τις οριακές συνθήκες 2^{ου} είδους, κατά τις οποίες το σύστημα επηρεαζόταν μόνο όταν οι διαφοροποιήσεις των τιμών της ροής ήταν πολύ μεγάλες. Αντιθέτως, χρησιμοποιώντας κατά τόπους οριακές συνθήκες 1^{ου} είδους, το σύστημα επηρεαζόταν άμεσα ακόμα και όταν οι διαφοροποιήσεις των υδραυλικών υψών δεν ήταν πολύ μεγάλες.

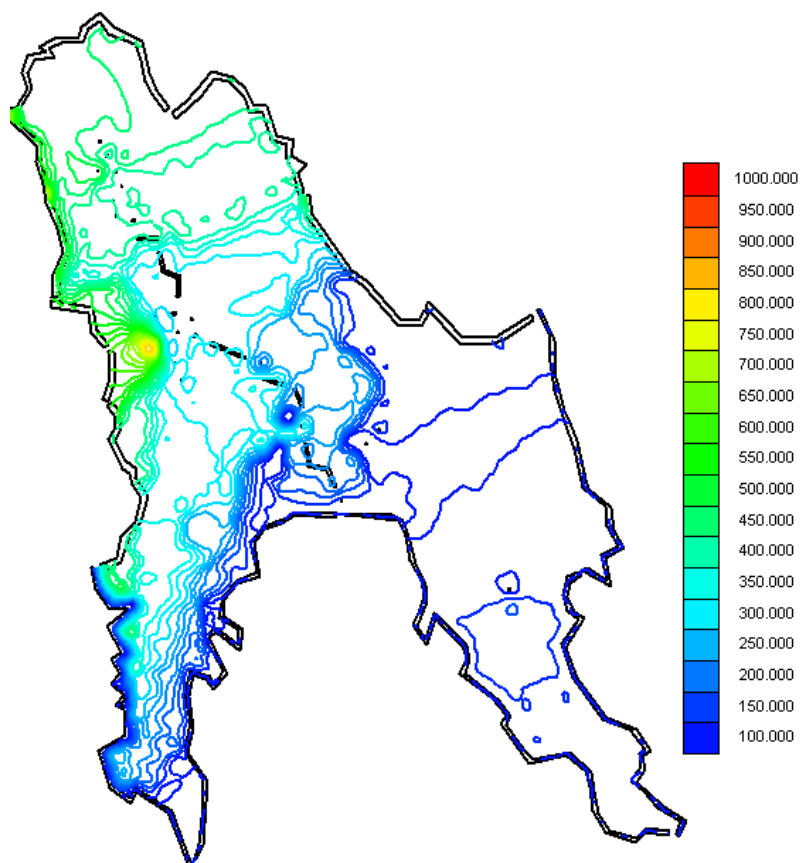
Οι μεγάλες τιμές των υδραυλικών υψών που παρατηρούνται στο αριστερό τμήμα των ορίων της λεκάνης, όπου εμφανίζονται οι γραμμές με τις κόκκινες αποχρώσεις (Σχ. 4.12 και 4.13), αντιστοιχούν σε υψόμετρα άνω των 2000 m και κατά τη βαθμονόμηση, οι οριακοί κόμβοι αυτού του τμήματος χρειάστηκε να καθοριστούν με τιμές υδραυλικού ύψους έως και 900 m. Στο ανατολικό τμήμα, υψόμετρου έως 1000 m, οι οριακοί κόμβοι καθορίστηκαν με τιμές υδραυλικού ύψους περίπου 500 m.



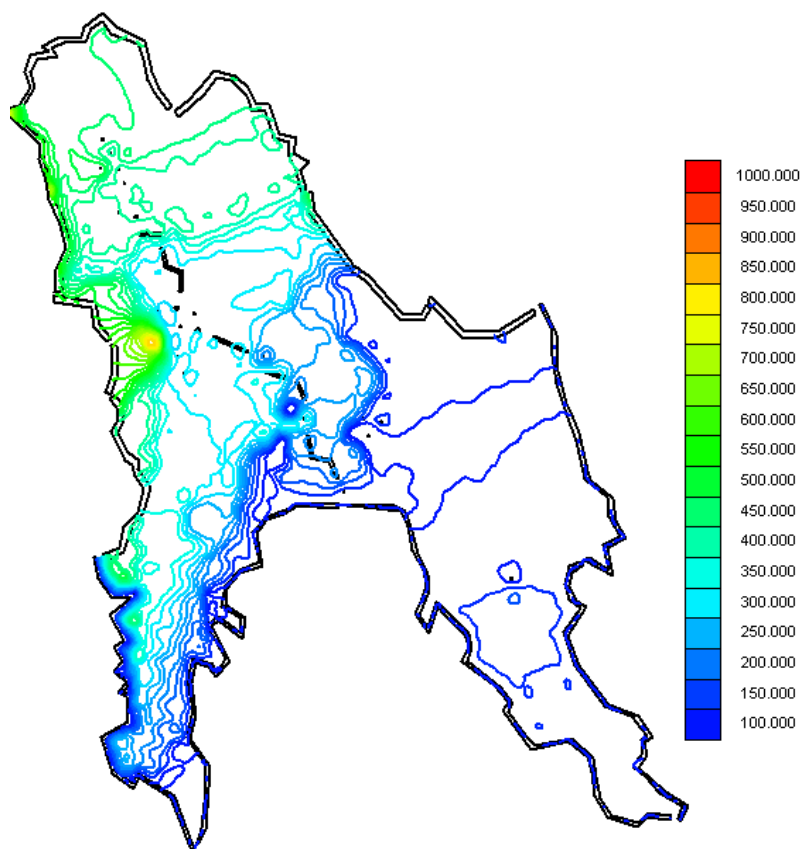
Σχήμα 4.8: Υδραυλικά ύψη χειμερινής περιόδου 2004.



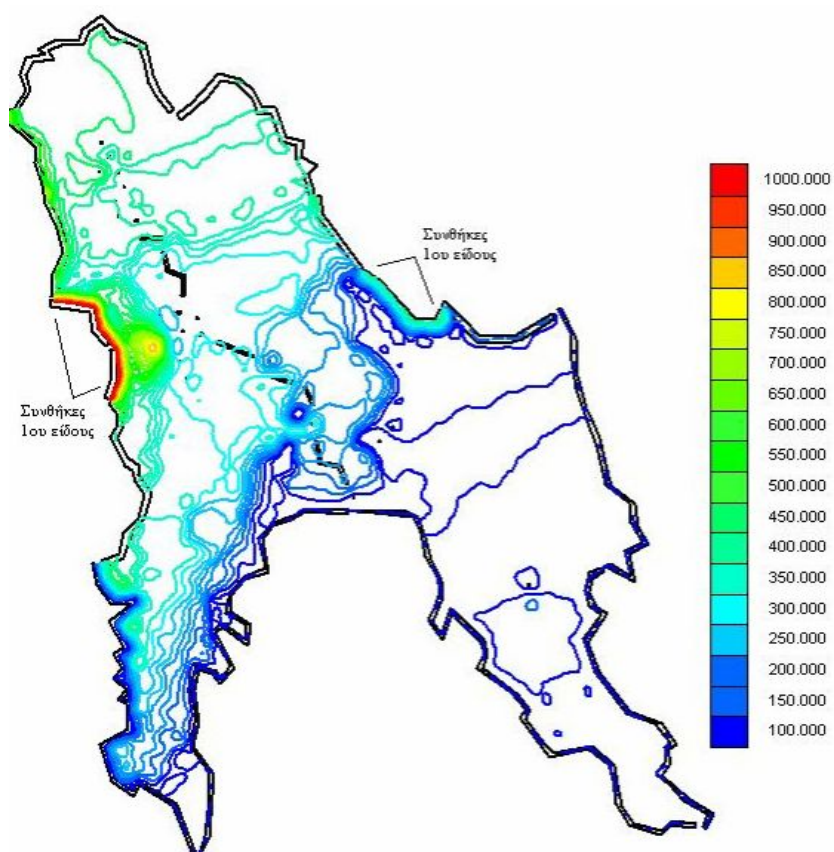
Σχήμα 4.9: Υδραυλικά ύψη θερινής περιόδου 2004.



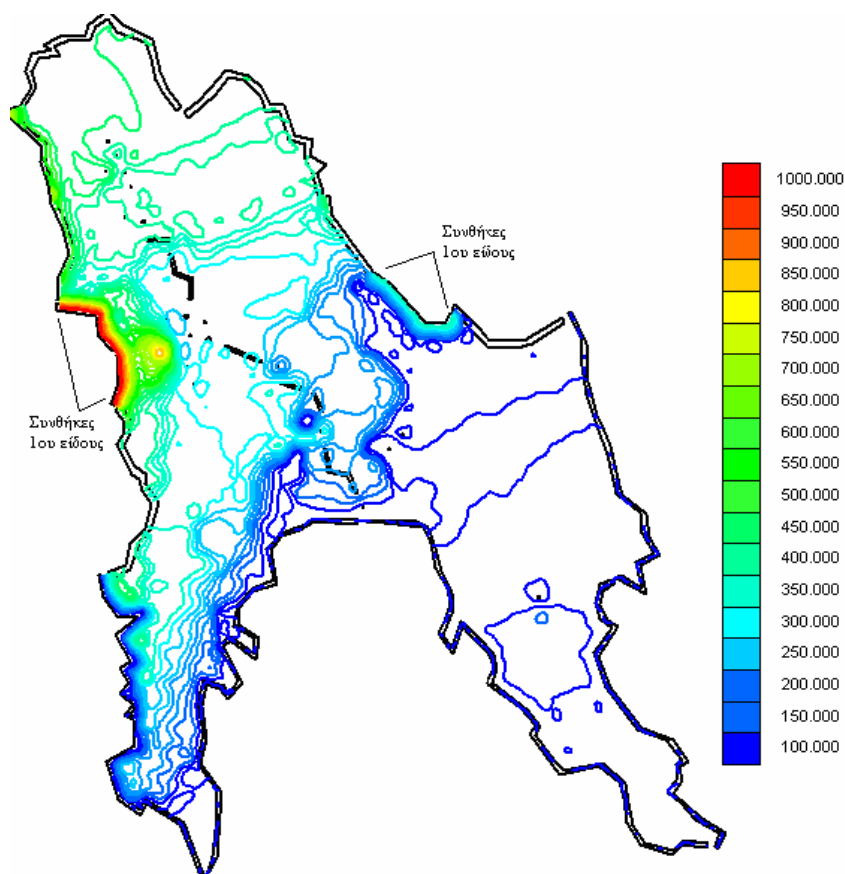
Σχήμα 4.10: Υδραυλικά ύψη χειμερινής περιόδου 2009.



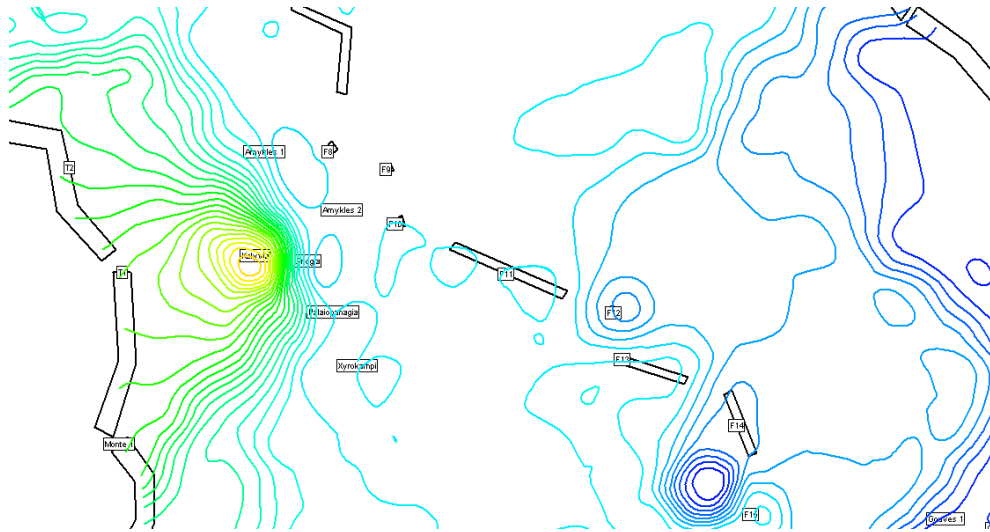
Σχήμα 4.11: Υδραυλικά ύψη θερινής περιόδου 2009.



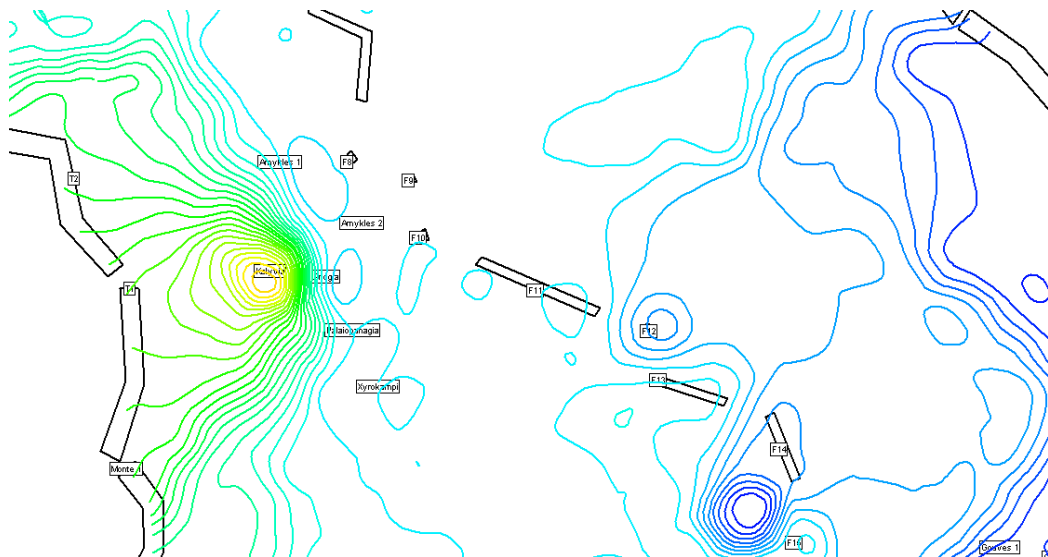
Σχήμα 4.12: Υδραυλικά ύψη χειμερινής περιόδου 2009 με χρήση οριακών συνθηκών 1^{ου} είδους.



Σχήμα 4.13: Υδραυλικά ύψη θερινής περιόδου 2009 με χρήση οριακών συνθηκών 1^{ου} είδους.



Σχήμα 4.14: Λεπτομέρεια υδραυλικών υψών χειμερινής περιόδου 2009.



Σχήμα 4.15: Λεπτομέρεια υδραυλικών υψών θερινής περιόδου 2009.

Οι περιοχές γύρω από τα πηγάδια άντλησης, φαίνεται ότι δεν παρουσιάζουν μεγάλες τοπικές διακυμάνσεις στις τιμές των υδραυλικών υψών, γεγονός που παρατηρήθηκε και κατά τη βαθμονόμηση του μοντέλου. Προφανώς από κανένα πηγάδι, από αυτά που χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο, δεν αντλείται τόσο μεγάλη ποσότητα ύδατος ώστε να επηρεάζει άμεσα το τοπικό σύστημα αλλά υπάρχει ήπια και ομαλή άντληση σε συνδυασμό με αρκετές ποσότητες υδατικών αποθεμάτων.

Όσον αφορά στις εποχικές διακυμάνσεις των υδραυλικών υψών, δεν παρατηρούνται σημαντικές αυξομειώσεις στις τιμές τους. Όπως φαίνεται από τα παραπάνω διαγράμματα, η διαμόρφωση των ισοπιεζομετρικών γραμμών είναι η ίδια και οι διαφορές των τιμών των

υψών από χειμερινή σε θερινή περίοδο είναι της τάξεως κάτω των 50 μέτρων, μέγεθος που δεν μπορεί να γίνει εύκολα αντιληπτό από τα διαγράμματα. Ωστόσο στα σχήματα 4.14 και 4.15, που αντιστοιχούν στο κεντρικό τμήμα του ποταμού Ευρώτα, διακρίνεται η μικρή εποχική διαφοροποίηση των τιμών των υδραυλικών υψών.

4.3.2 Ταχύτητες ροής

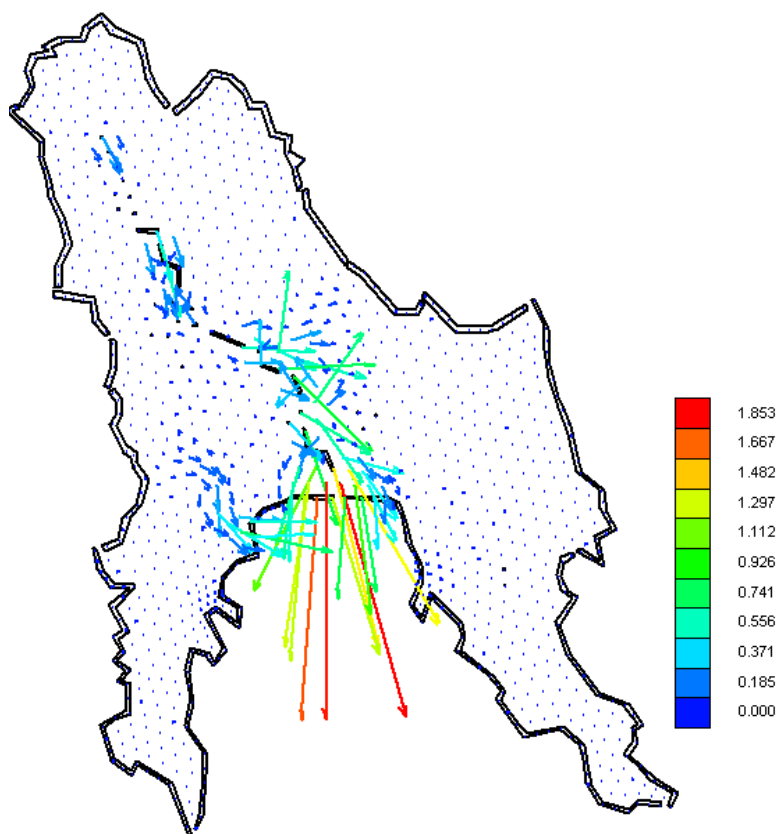
Για τη δημιουργία των διαγραμμάτων των ταχυτήτων ροής ενεργοποιείται το Layer PTC xvelocities και με τη διαδικασία: File - Import PTC xvelocities - Tex File εισάγεται το αρχείο PTC Mesh xvel το οποίο περιέχει τη συνιστώσα V_x της ταχύτητας στην κατεύθυνση x . Με τον ίδιο τρόπο εισάγεται και η συνιστώσα V_y .

Τα διαγράμματα των ταχυτήτων ροής της περιοχής μελέτης της πρώτης περιόδου, (χειμώνας), και της δεύτερης, (καλοκαίρι), φαίνονται στα σχήματα 4.16 και 4.17 αντίστοιχα. Η ταχύτητα είναι ανάλογη της υδραυλικής αγωγιμότητας και επηρεάζεται άμεσα από αυτήν. Παρατηρούμε ότι στα τμήματα της περιοχής όπου οι γεωλογικοί σχηματισμοί έχουν μικρή διαπερατότητα, (μάρμαρα, φλύσχης, φυλλίτες) που βρίσκονται κυρίως βορειοδυτικά και βορειοανατολικά, οι ταχύτητες είναι πολύ μικρές, ενώ κατά μήκος του ποταμού Ευρώτα, όπου υπάρχουν κυρίως σχηματισμοί παράκτιων αποθέσεων και πλευρικών κορημάτων, οι ταχύτητες μεγαλώνουν και φθάνουν να είναι ακόμα μεγαλύτερες στην περιοχή του Δέλτα του ποταμού όπου οι σχηματισμοί είναι ακόμα πιο διαπερατοί. Οι ταχύτητες ροής δεν παρουσιάζουν εμφανείς εποχικές διακυμάνσεις όπως φαίνεται και από τα διαγράμματα των παραπάνω σχημάτων. Οι ταχύτητες ροής, όπως αναμενόταν, εμφανίζουν μικρή αύξηση γύρω από τα πηγάδια άντλησης. Τα διαγράμματα των ταχυτήτων ροής είναι όμοια και για τα δύο είδη οριακών συνθηκών που χρησιμοποιηθήκαν.

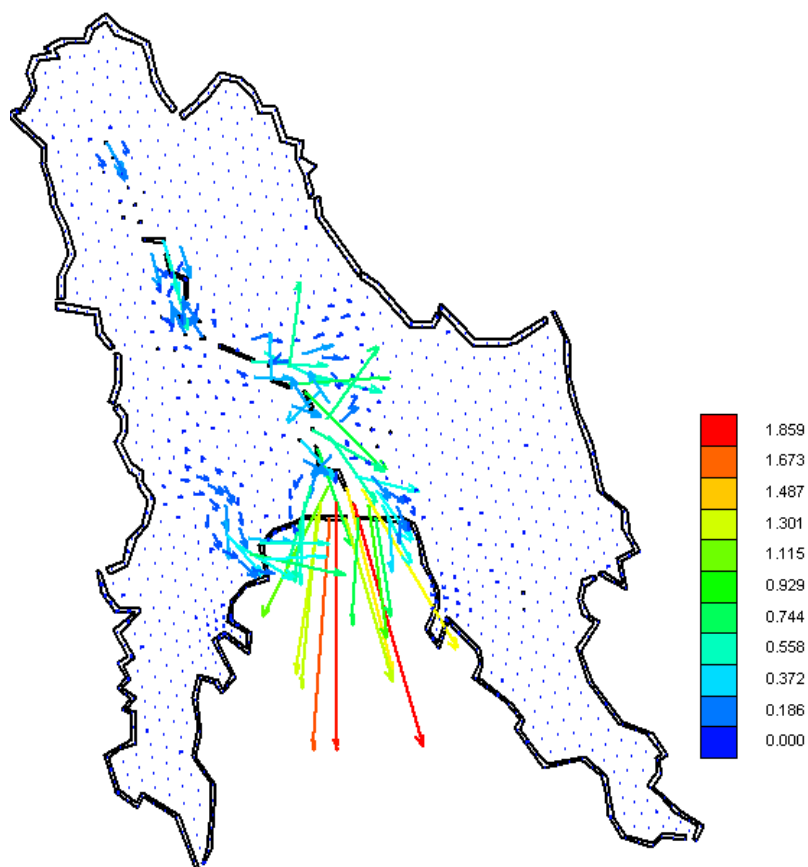
4.3.3 Σενάρια συνθηκών άντλησης

Το μοντέλο, όπως κατασκευάστηκε για την περιοχή μελέτης, εφαρμόστηκε και εκτελέστηκε θεωρώντας δύο σενάρια συνθηκών άντλησης:

- ⇒ στο 1^ο σενάριο θεωρείται ότι οι νότιο-ανατολικές γεωτρήσεις της λεκάνης δεν αντλούν σε καμία περίοδο και
- ⇒ στο 2^ο σενάριο θεωρείται ότι όλες οι σχεδιασμένες γεωτρήσεις της λεκάνης απορροής δεν αντλούν σε καμία περίοδο.



Σχήμα 4.16: Ταχύτητες ροής θερινής περιόδου 2009.



Σχήμα 4.17: Ταχύτητες ροής χειμερινής περιόδου 2009.

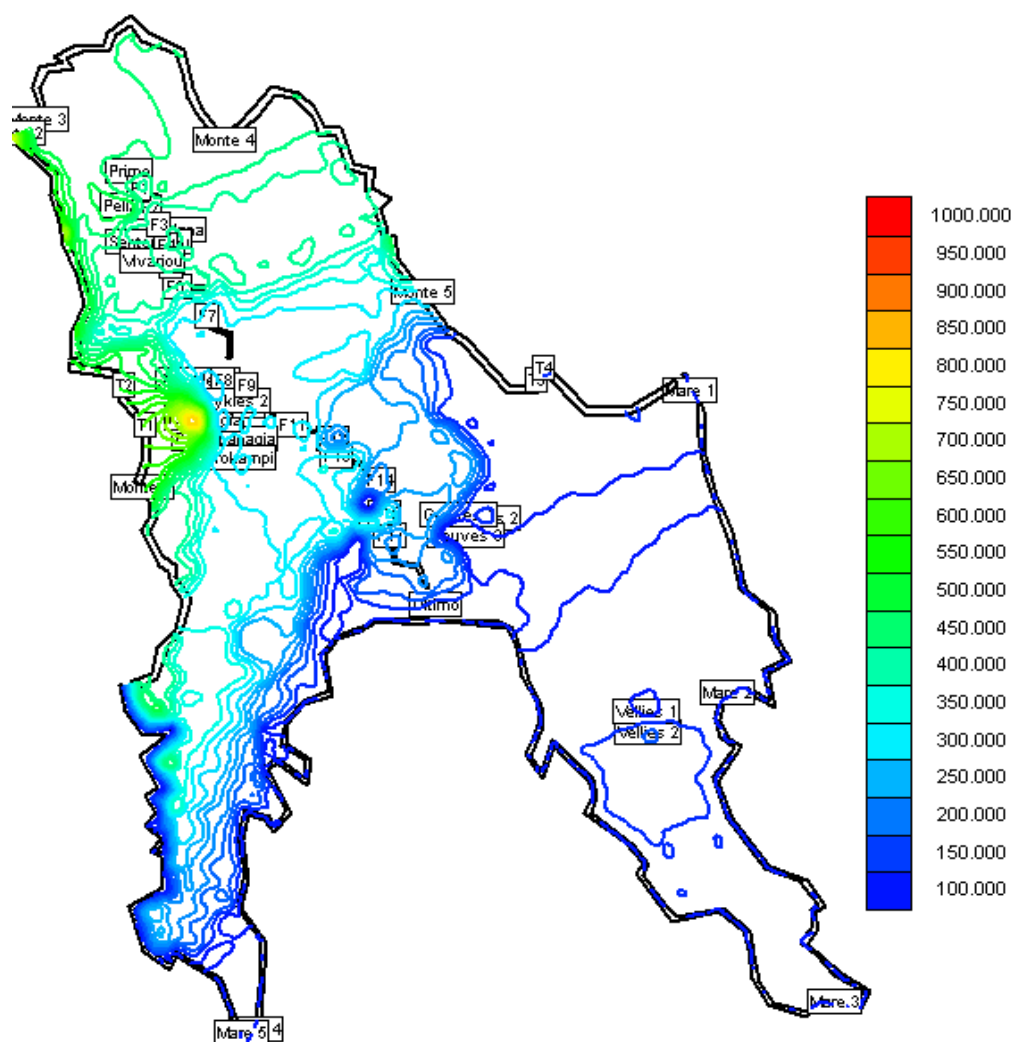
Εφαρμόζοντας τα δύο παραπάνω σενάρια αποδείχτηκε ότι το συνολικό σύστημα υπογείων υδάτων της λεκάνης απορροής της μελέτης, δεν επηρεάζεται πολύ από τις συνθήκες μηδενικής άντλησης όπως διακρίνεται και από τα διαγράμματα των σχημάτων 4.18 έως 4.20, τα οποία αναφέρουμε ενδεικτικά επειδή, από τη μία άποψη η γενική εικόνα των υδραυλικών υψών της λεκάνης απορροής παραμένει η ίδια και από την άλλη, οι μεταβολές, που οπωσδήποτε υπάρχουν στα υδραυλικά ύψη, δεν είναι ορατές λόγω της κλίμακας τους σε σχέση με την τάξη μεγέθους τους. Γενικά, το γεγονός ότι η περιοχή δεν επηρεάζεται πολύ από τα σενάρια, συμβαίνει λόγω της έκτασής της και λόγω της μεγάλης ποσότητας των υδατικών αποθεμάτων της σε σχέση με τον αριθμό των πηγαδιών άντλησης που χρησιμοποιήθηκαν από το πρόγραμμα.

Στο δυτικό τμήμα της λεκάνης, όπου υπάρχουν και περισσότερα πηγάδια άντλησης, κατά το δεύτερο σενάριο, διακρίνεται η διαφοροποίηση στη διαμόρφωση των ισοπιεζομετρικών γραμμών στα διαγράμματα των σχημάτων 4.21 και 4.22. Η μεγαλύτερη αύξηση στην τιμή του υδραυλικού ύψους αντιστοιχεί στην πηγή της Πελλάνας (0,57 m), ενώ τα πηγάδια άντλησης που βρίσκονται στην κοίτη του ποταμού Ευρώτα (Μπλάνα, Σεντενίκου και Αμύκλες), παρουσιάζουν ελάχιστα εκατοστά αύξηση υδραυλικού ύψους. Οι λόγοι που συμβαίνει αυτό είναι δύο: ο πρώτος είναι ότι το πρόγραμμα επηρεάζεται πολύ σε αυτά τα σημεία από τις οριακές συνθήκες του ποταμού και ο δεύτερος, ότι επειδή αυτά τα πηγάδια άντλησης βρίσκονται πολύ κοντά στο ποτάμι, οι υδροφορείς τους τροφοδοτούνται συνεχώς με νερό, με ρυθμό περίπου ίδιο με το ρυθμό άντλησης. Εξάλλου, οι παράκτιοι σχηματισμοί είναι αρκετά διαπερατοί, γεγονός που διευκολύνει την τροφοδότηση και το ρυθμό της.

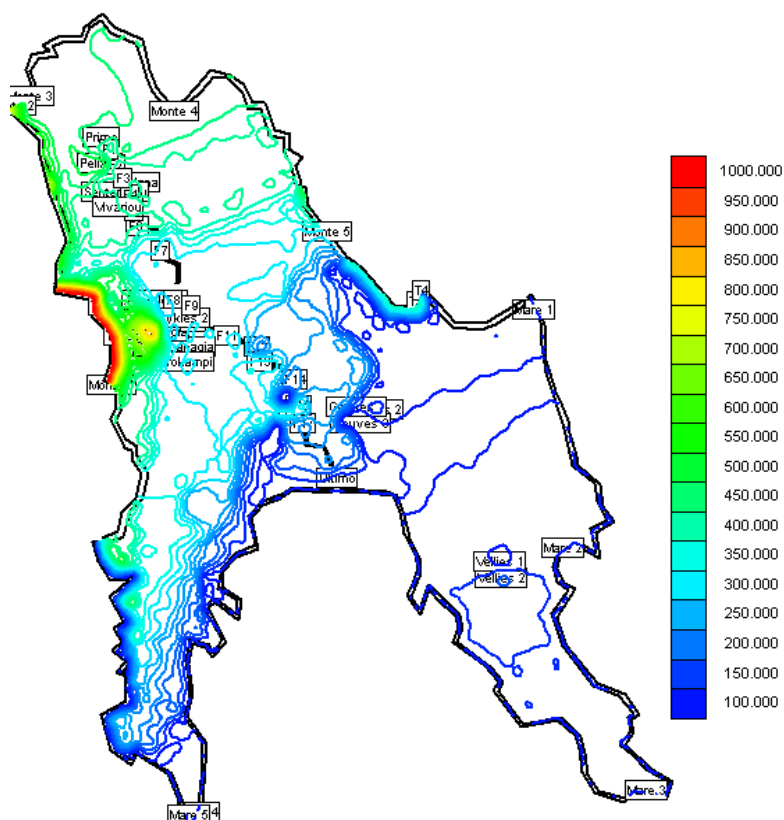
Το νοτιοανατολικό τμήμα της λεκάνης, τόσο κατά το πρώτο όσο και κατά το δεύτερο σενάριο, για το οποία τα νοτιοανατολικά πηγάδια δεν αντλούν, δεν είναι σε θέση να επηρεαστεί, όπως διακρίνεται και από τα διαγράμματα των σχημάτων 4.23 και 4.24. Η διαμόρφωση των ισοπιεζομετρικών γραμμών είναι η ίδια με αυτήν που εμφανίζεται όταν τα πηγάδια αντλούν. Αυτό συμβαίνει επειδή προφανώς ο αριθμός των πηγαδιών είναι πολύ μικρός για να καταφέρει να επηρεάσει τη γύρω περιοχή. Οι τιμές των υδραυλικών υψών αυξάνονται σημειακά στους κόμβους που ανήκουν τα πηγάδια άντλησης, με μέσο όρο αύξησης μεγαλύτερο σε σχέση με την αύξηση των υδραυλικών υψών των δυτικών πηγών. Αυτό συμβαίνει γιατί οι υπόγειοι υδροφορείς που τροφοδοτούν αυτά τα πηγάδια άντλησης δεν έχουν τόσο μεγάλα υδατικά αποθέματα όσο εκείνα των δυτικών υδροφορέων, οι οποίοι αντιστοιχούν σε ορεινές περιοχές του Ταΰγετου, με υψόμετρο 2000 m περίπου, και κατά συνέπεια με συνεχή παροχή ροής και υψηλές τιμές (βροχή και χιόνι). Επίσης, το

νοτιοανατολικό τμήμα της λεκάνης δεν τροφοδοτείται τόσο εύκολα όσο το δυτικό γιατί απέχει αρκετά από οροσειρά του Πάρνωνα. Η αύξηση αυτή των τιμών δεν μπορεί να διακριθεί από τα διαγράμματα γιατί οι αποχρώσεις στις ισοπιεζομετρικές γραμμές τους στο Layer Graphs αλλάζουν αμυδρά κάθε 50 m (με $\delta=25$).

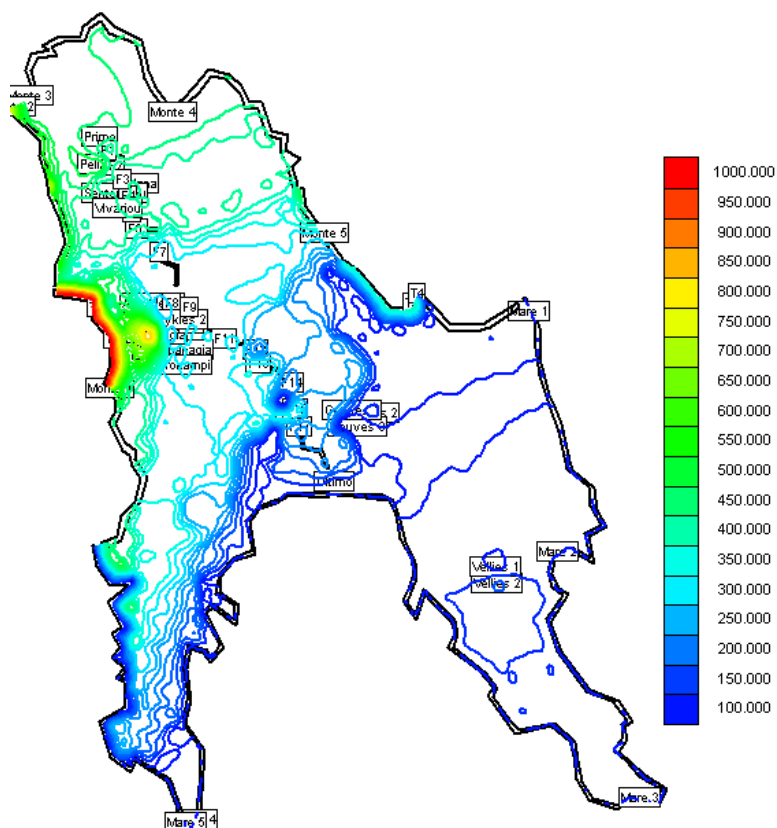
Στο νοτιοανατολικό τμήμα της λεκάνης η μεγαλύτερη αύξηση εμφανίζεται στην πηγή “Βελλιές 1” (1,17 m), ενώ τα άλλα πηγάδια άντλησης της περιοχής εμφανίζουν διαφορές περίπου 0,20 m. Η παραπάνω διαφορά της πηγής “Βελλιές 1” σε σχέση με τις άλλες οφείλεται στο ότι η συγκεκριμένη πηγή είχε την πιο μεγάλη τιμή άντλησης ($500 \text{ m}^3/\text{d}$) και η άντληση γινόταν σε όλη τη διάρκεια του έτους, ενώ οι υπόλοιπες είχαν ή μικρότερη τιμή άντλησης ή αντλούσαν μόνο το καλοκαίρι.



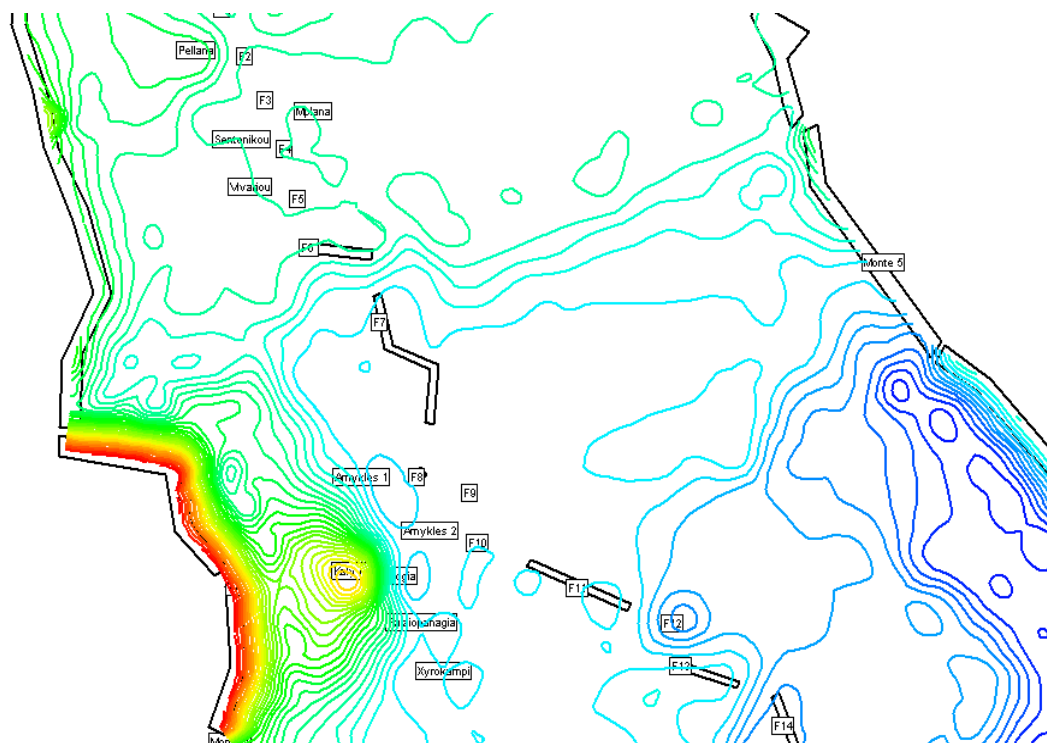
Σχήμα 4.18: Διάγραμμα υδραυλικών υψών για το 1^ο σενάριο, θερινής περιόδου 2009, (συνθήκες 2^{ου} είδους).



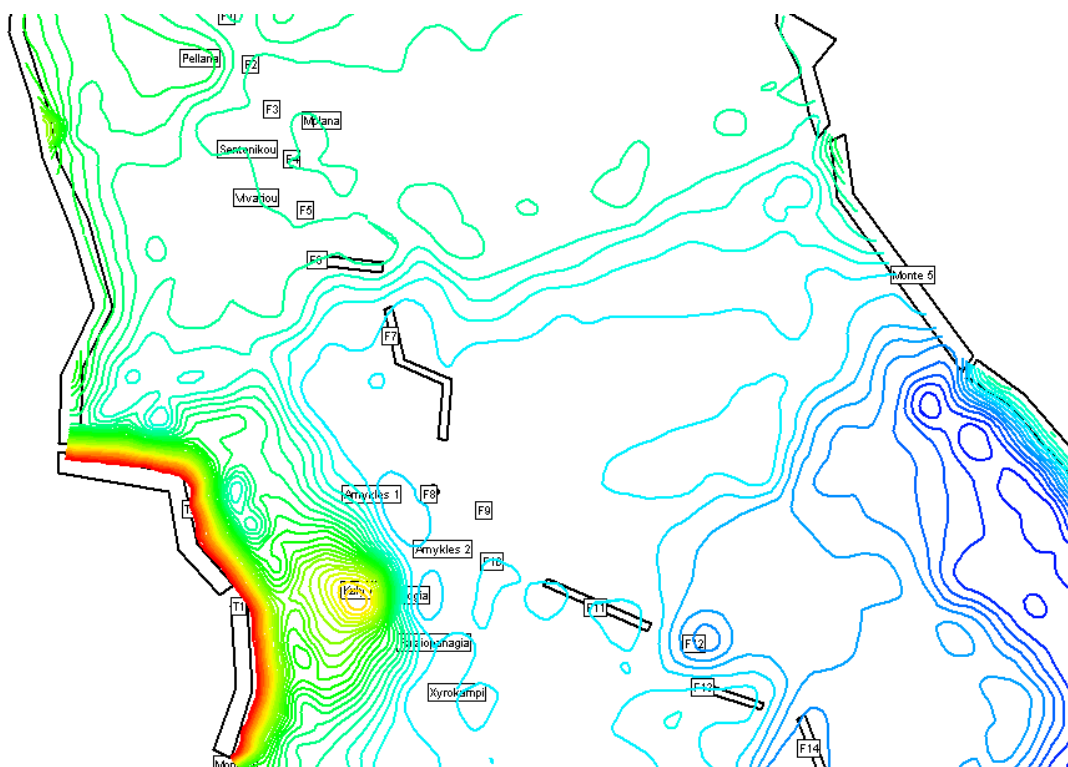
Σχήμα 4.19: Διάγραμμα υδραυλικών υψών για το 1^ο σενάριο, θερινής περιόδου 2009, (με χρήση συνθηκών 1^{ου} είδους).



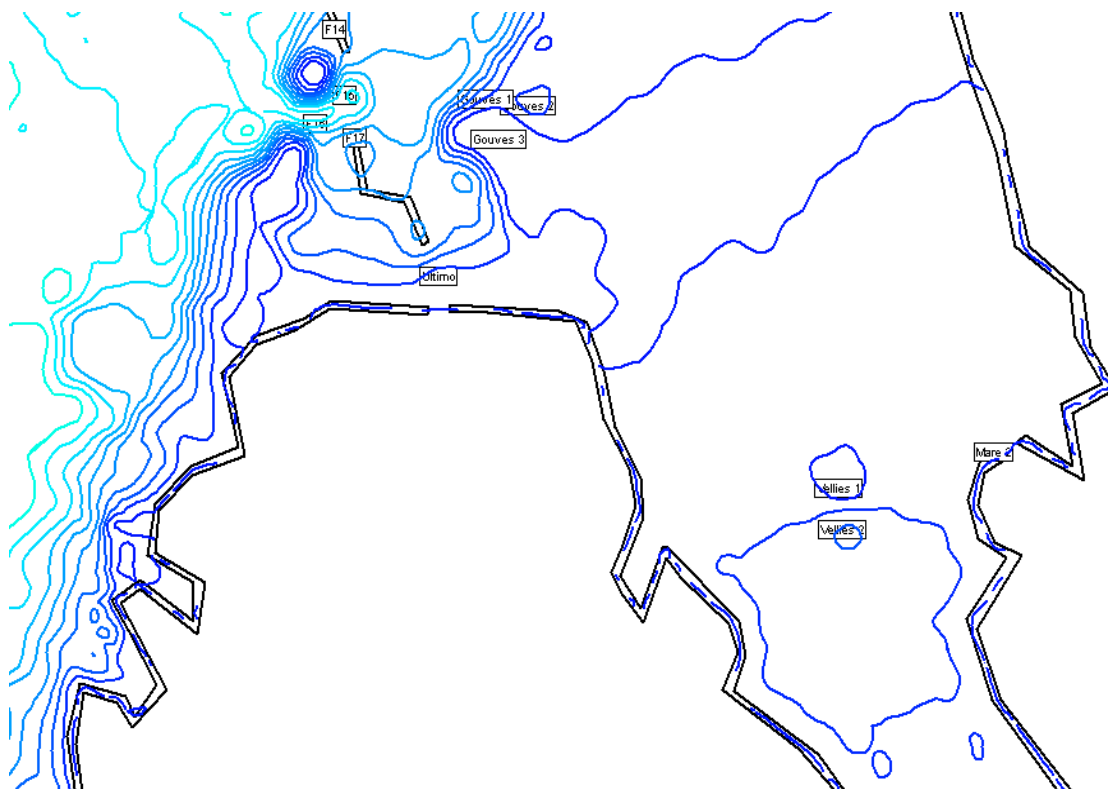
Σχήμα 4.20: Διάγραμμα υδραυλικών υψών για το 2^ο σενάριο, θερινής περιόδου 2009, (με χρήση συνθηκών 1^{ου} είδους).



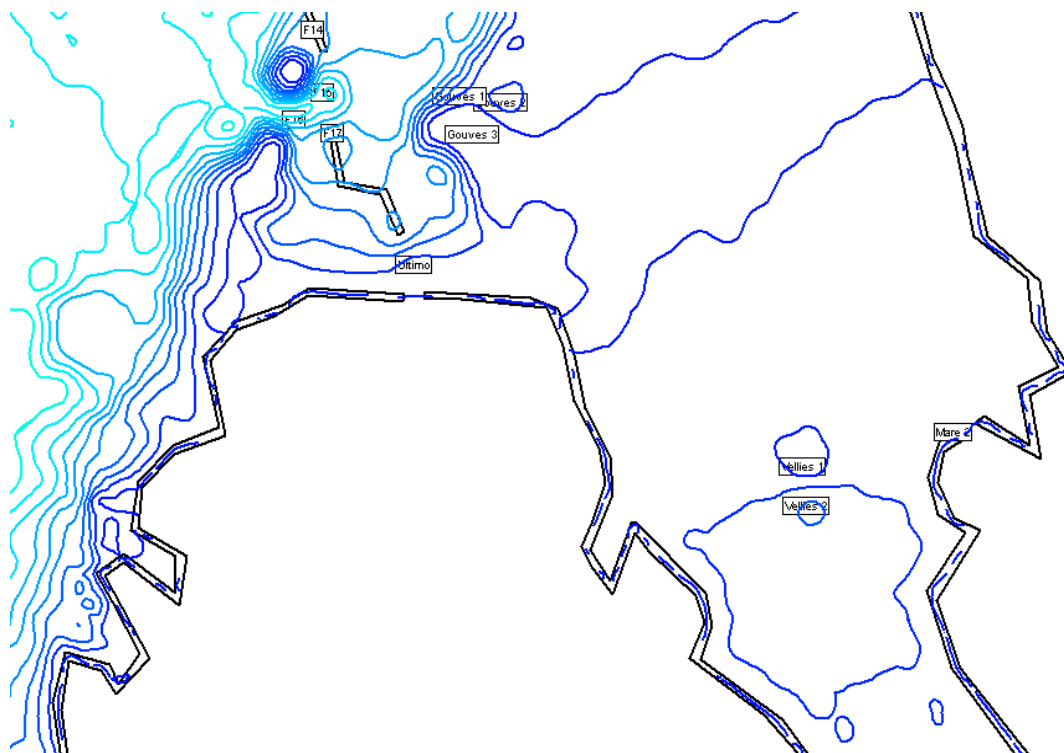
Σχήμα 4.21: Λεπτομέρεια υδραυλικών υψών δυτικών πηγών, με το 2^ο σενάριο.



Σχήμα 4.22: Λεπτομέρεια υδραυλικών υψών δυτικών πηγών, με άντληση.



Σχήμα 4.23: Λεπτομέρεια υδραυλικών υψών νοτιοανατολικών πηγών, με το 2^ο σενάριο.



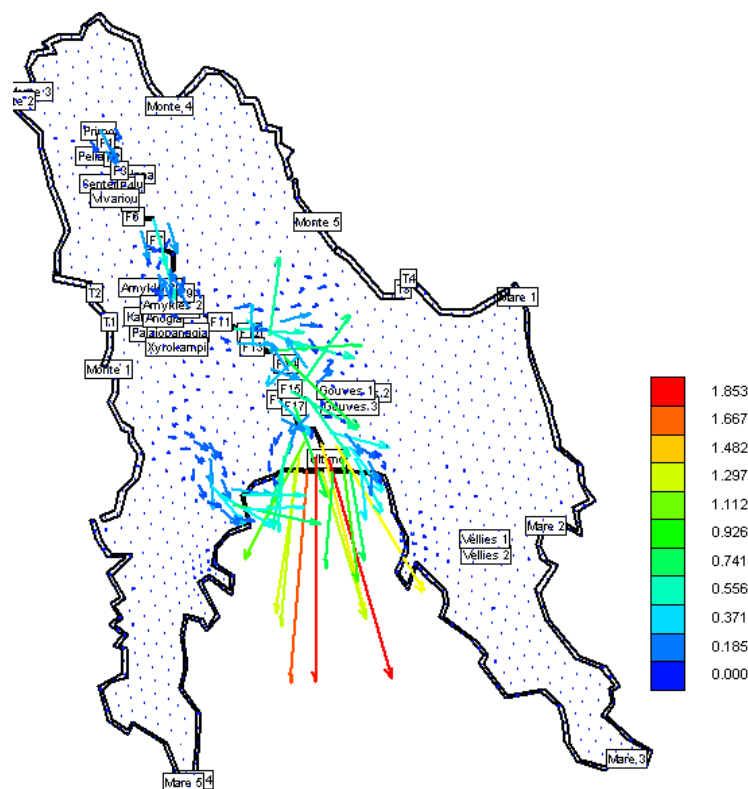
Σχήμα 4.24: Λεπτομέρεια υδραυλικών υψών νοτιοανατολικών πηγών, με άντληση.

Συνοψίζοντας μπορεί να ειπωθεί ότι:

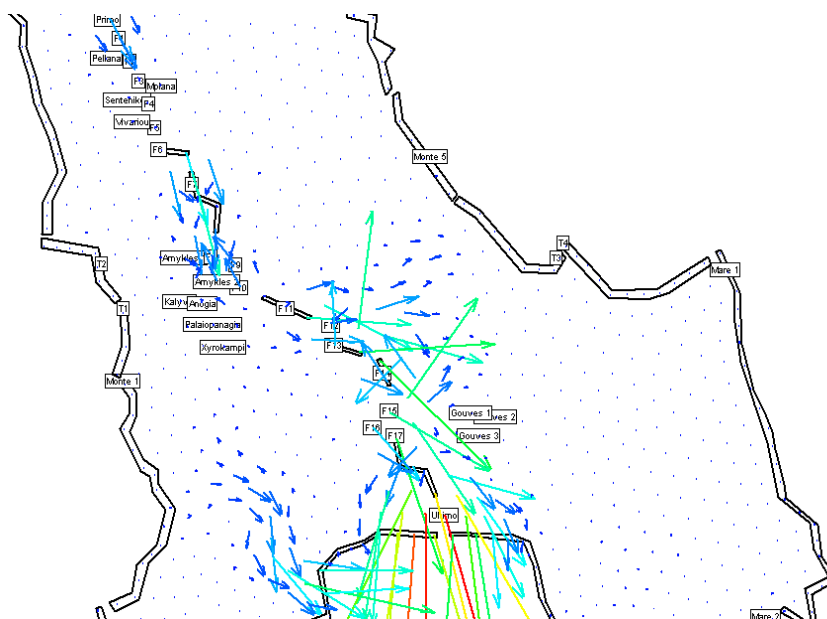
- ⇒ στο δυτικό τμήμα της λεκάνης απορροής διαμορφώνονται διαφορετικά οι ισοπιεζομετρικές γραμμές κατά τις συνθήκες μηδενικής άντλησης γιατί ο αριθμός των πηγαδιών άντλησης (δέκα), είναι σε θέση να επηρεάσει τη γύρω περιοχή, παρόλο που τα μεμονωμένα πηγάδια εμφανίζουν μικρή αύξηση υδραυλικού ύψους επειδή υπάρχει συνεχής τροφοδότηση των υδροφορέων τους ενώ,
- ⇒ στο νοτιοανατολικό τμήμα οι ισοπιεζομετρικές γραμμές δεν παρουσιάζουν διαφοροποίηση γιατί ο αριθμός των πηγών άντλησης (πέντε), δεν είναι σε θέση να επηρεάσει τη γύρω περιοχή, παρόλο που τα μεμονωμένα πηγάδια εμφανίζουν μεγαλύτερη αύξηση υδραυλικού ύψους επειδή οι υδροφορείς τους τροφοδοτούνται δυσκολότερα.

Όσον αφορά στην εποχική διακύμανση που αφορά στα δύο παραπάνω σενάρια, υπάρχει μικρή αύξηση στις τιμές των υδραυλικών υψών του χειμώνα, η οποία οφείλεται αποκλειστικά στη βροχόπτωση και δεν μπορεί να διακριθεί από τα διαγράμματα για το λόγο που αναφέρθηκε και παραπάνω.

Το ίδιο χαμηλή διαφορά, η οποία, επίσης, δεν μπορεί να διακριθεί από τα διαγράμματα, ισχύει και στην τάξη των ταχυτήτων ροής, οι οποίες μειώνονται γύρω από τα πηγάδια που δεν αντλούν (Σχ. 4.25 και 4.26).



Σχήμα 4.25: Διάγραμμα ταχυτήτων ροής.



Σχήμα 4.26: Λεπτομέρεια διαγράμματος ταχυτήτων ροής.

Ποιός είναι, λοιπόν, αυτός που και τους ανέμους
προστάζει, και το νερό, και υπακούν σ' αυτόν;
(Λουκάς 8,25)

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η λεκάνη απορροής του ποταμού Ευρώτα αποτελεί ένα εκτεταμένο και πολύπλοκο υδατικό σύστημα. Η ορθολογική και ολοκληρωμένη διαχείριση της λεκάνης θα αποτρέψει την πτώση του υπογείου υδροφόρου ορίζοντά της, καθώς υπάρχουν μεγάλες ποσότητες υπόγειων υδατικών αποθεμάτων.

Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία παρατηρήθηκε ότι κατά τα έτη 2004 έως 2009, για τα οποία μελετήθηκε το σύστημα υπογείων υδάτων, δεν υπάρχει αξιοσημείωτη πτώση του υπογείου υδροφόρου ορίζοντα, τουλάχιστον στο μεγαλύτερο τμήμα της λεκάνης απορροής. Η πτώση που παρατηρήθηκε ήταν περισσότερο αισθητή στο νοτιοανατολικό τμήμα της περιοχής μελέτης. Το παραπάνω γεγονός οφείλεται στη μείωση των βροχοπτώσεων και στην αύξηση της θερμοκρασίας, των τελευταίων χρόνων, σε συνδυασμό με την αύξηση των υδατικών και αρδευτικών αναγκών.

Όσον αφορά στην εποχική διακύμανση των υδραυλικών υψών, παρατηρήθηκε ότι είναι σχετικά μικρή, προφανώς επειδή τα υδατικά αποθέματα της λεκάνης είναι αρκετά μεγάλα.

Κατά τα δύο σενάρια που εφαρμόστηκαν, με συνθήκες μηδενικής άντλησης των πηγαδιών, παρατηρήθηκε αύξηση των τιμών των υδραυλικών υψών στους αντίστοιχους κόμβους όπου ανήκαν τα πηγάδια άντλησης. Τα πηγάδια που επηρεασθήκαν περισσότερο ήταν εκείνα που βρίσκονται στο νοτιοανατολικό τμήμα της περιοχής ενώ, λιγότερο επηρεασθήκαν τα πηγάδια που βρίσκονται κοντά στον ποταμό Ευρώτα.

Η γενική εικόνα των ισοπιεζομετρικών γραμμών της λεκάνης διαφοροποιήθηκε αισθητά κατά την εφαρμογή των σεναρίων στο δυτικό τμήμα της, όπου υπήρχαν περισσότερα πηγάδια ενώ, παρέμεινε όμοια στο νοτιοανατολικό τμήμα της, όπου τα πηγάδια που χρησιμοποιήθηκαν ήταν πολύ λιγότερα.

Η χρήση επιπλέον δεδομένων, ειδικά για τις πηγές (αντλήσεις, στάθμες), θα ήταν ακόμη πιο ευνοϊκή για τα αποτελέσματα της μοντελοποίησης, θα εξάλειφε την αβεβαιότητα που υπήρχε κατά τη διαδικασία κυρίως της βαθμονόμησης του μοντέλου και θα καθιστούσε πιο ολοκληρωμένη την εικόνα της κατάστασης των υπογείων υδάτων της περιοχής.

Τα αποτελέσματα του μοντέλου για την περιοχή μελέτης σε συνδυασμό με την απόκλιση των τιμών του μοντέλου και των μετρήσεων του πεδίου, που παρατηρήθηκε κατά τη βαθμονόμηση, οδηγούν στο συμπέρασμα ότι το σύστημα δεν αποτελείται από έναν ενιαίο υδροφορέα, αλλά από περισσότερους υδροφορείς, οι οποίοι λειτουργούν ανεξάρτητα και κατά συνέπεια δεν επικοινωνούν μεταξύ τους.

Η παρούσα εργασία αποτελεί μία πρώτη προσέγγιση του συστήματος υπόγειας ροής, με περιορισμένη πληροφορία από το πεδίο. Η ύπαρξη των επιμέρους συστημάτων υπόγειας ροής της περιοχής μελέτης, μπορεί να αποτελέσει αντικείμενο νέας ερευνητικής εργασίας με σκοπό τον εντοπισμό και την οριοθέτησή τους. Παρόλα αυτά, η παρούσα εργασία δεν παύει να αποτελεί υπόβαθρο ολοκληρωμένου σχεδιασμού της λεκάνης απορροής του ποταμού Ευρώτα, τόσο όσο επέτρεπε η έκδοση “Argus ONE student”, με ακριβή χωροθέτηση των στατικών της στοιχείων, (υδραυλικές αγωγιμότητες, υψόμετρα κλπ), και λιγότερο ακριβή των δυναμικών της στοιχείων (πηγές, στάθμες) λόγω, κυρίως, του εύρους της.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνική βιβλιογραφία

- Αναγνωστόπουλος Δ., 2002. *Προσομοίωση, (Σημειώσεις)*, Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Πληροφορικής.
- Αντωνάκος Α., 1997. *Ρύπανση και μόλυνση του υπόγειου υδροφόρου της ευρύτερης περιοχής Σπάρτης από ανθρωπογενείς δραστηριότητες*, Διατριβή Μεταπτυχιακής Ειδίκευσης, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Γεωλογίας.
- Γεωργίου Κ. & Π. Δεληπέτρου, 2000. *Τα ενδημικά, υπενδημικά απειλούμενα και προστατευόμενα φυτά της Ελληνικής χλωρίδας*, (Ηλεκτρονική βάση δεδομένων «Χλωρίς»), 8^ο Επιστημονικό Συνέδριο Ελληνικής Βοτανικής Εταιρείας, Πάτρα.
- Ευστρατιάδης Α. & Δ. Κουτσογιάννης, 2006. *Μοντέλα προσομοίωσης δικτύων, (Σημειώσεις)*, Ε.Μ.Π, Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος.
- Κακούρος Π. κ. ά., 2009. *Ειδική Περιβαλλοντική Μελέτη Δέλτα Ευρώτα*, στο πλαίσιο του κοινοτικού προγράμματος LIFE-Nature «Implementation of Management Plans for Pylos Lagoon and Evrotas Delta, Natura 2000 Sites, Greece».
- Καραλέμας Ν., 2006. *Μηχανισμοί λειτουργίας των πηγών του Ανατολικού Ταυγέτου*, Μεταπτυχιακή Διατριβή, Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος.
- Καραμάνος Σ., 2009. *Η Μέθοδος των Πεπερασμένων Στοιχείων (Σημειώσεις)*, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.
- Καράμπελας Ν., 1994. *Μελέτη λιμνοδεξαμενών Νομού Λακωνίας*, Τεχνική Έκθεση, Υπουργείο Γεωργίας, Διεύθυνση τεχνικών μελετών και κατασκευών.
- Καρατζάς Γ. Π, Β. Αλεξοπούλου & Ν. Ι. Νικολός, 2009. *Διαχείριση Υπογείων Υδάτων με Συνδυασμό Προσομοίωσης και Μεθόδων Βελτιστοποίησης*, Πολυτεχνείο Κρήτης.
- Κουμπούρης Ε., 2005. *Ανάλυση ευαισθησίας του μοντέλου προσομοίωσης PTC στον υπόγειο υδροφορέα της περιοχής λιμένα Χερσονήσου Ηρακλείου*, Διπλωματική εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος.
- Κουτσογιάννης Δ. & Θ. Ξανθόπουλος, 1999. *Τεχνική Υδρολογία*, Ε.Μ.Π., Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος.
- Λαμπράκης Ν., 2010. *Εφαρμοσμένη υδρογεωλογία (Σημειώσεις)*, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Γεωλογίας.

- Λαμπράκης Ν., 2010. *Περιβαλλοντική υδρογεωλογία - Εξισώσεις υπόγειας ροής, (Σημειώσεις)*, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τμήμα Γεωλογίας.
- Μαριολάκος Η. κ.ά., 2007. *Στρατηγικός Σχεδιασμός Αντιπλημμυρικής Προστασίας Νομού Λακωνίας*, Ερευνητικό πρόγραμμα, Εθνικό & Καποδοστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Γεωλογίας & Γεωπεριβάλλοντος.
- Μαριολάκος Η., 2006. *Ο Ποταμός Ευρώτας – Μυθολογική Εξέλιξη*, Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος.
- Μαριολάκος Η., 2010. *Αρχαία Ελλάδα και νερό (Παρουσίαση)*, Εθνικό & Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Γεωλογίας & Γεωπεριβάλλοντος.
- Μηλιαρέσης Γ., 2004. *Εξατμισοδιαπνοή, (Σημειώσεις)*, Πανεπιστήμιο Πατρών, Τομέας Γεωλογίας και Γεωφυσικής.
- Νάνου Α., 2007. *Υδραυλική και υδρολογία υπογείων νερών, (Σημειώσεις)*, Ε.Μ.Π., Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος.
- Νικολαΐδης Ν. Π., 2008. *Ελεγχόμενη φυσική αποκατάσταση ρύπων στη λεκάνη απορροής του ποταμού Ευρώτα*, Τεχνική έκθεση 221σ. + Παράρτημα 61σ., στο πλαίσιο του προγράμματος LIFE Environment.
- Νικολαΐδης Ν., Ν. Σκουλικίδης, Β. Παπαδουλάκης Κ. Τσακίρης & Ν. Καλογεράκης, 2009. *Διαχειριστικά Σχέδια Πιλοτικής Αγροτικής Λεκάνης Ευρώτα Ποταμού*, Τεχνική έκθεση 122σ., *Ολοκληρωμένη διαχείριση υδατικών πόρων λεκάνης απορροής ποταμού Ευρώτα – Σχέδια διαχείρισης*, στο πλαίσιο του προγράμματος LIFE Environment.
- Νικολαΐδης Ν., Ν. Σκουλικίδης, Β. Παπαδουλάκης Κ. Τσακίρης & Ν. Καλογεράκης, 2009. *Στρατηγικό Σχέδιο Διαχείρισης Υδατικών Πόρων της Λεκάνης Απορροής του Ποταμού Ευρώτα και της Παράκτιας Ζώνης του - Περιβαλλοντικοί Στόχοι και Μέτρα*, Τεχνική έκθεση 55σ., στο πλαίσιο του προγράμματος LIFE Environment.
- Νικολαΐδης Ν., Ν. Σκουλικίδης, Κ. Τσακίρης & Ν. Καλογεράκης, 2006. *Προκαταρκτικό σχέδιο διαχείρισης της λεκάνης απορροής ποταμού Ευρώτα και της παράκτιας ζώνης*, Τεχνική έκθεση 242σ. + Παράρτημα 79σ., στο πλαίσιο του προγράμματος LIFE Environment.
- Πανταζίδου Μ., 2007., *Αποκατάσταση Ρυπασμένων Χώρων, (Σημειώσεις)*, Ε.Μ.Π., Τομέας Γεωτεχνικής.
- Ρόζος Ε., 2010. *Υδρολογική προσομοίωση της ροής σε υδροφορείς υψηλής αβεβαιότητας*, Διδακτορική διατριβή, Ε.Μ.Π., Τομέας Υδατικών Πόρων και Περιβάλλοντος.
- Σαλονικιός Θ., Χ. Καρακώστας, Β. Λεκίδης, Μ. Δημοσθένους & Τ. Μακάριος, 2009. *Αξιοποίηση έξι σεισμών στην Πελοπόννησο για τη συσχέτιση φασματικών επιταχύνσεων με*

την απόκριση του δομημένου περιβάλλοντος, 16^ο Συνέδριο Σκυροδέματος, ΤΕΕ, ΕΤΕΚ, 21-23/10/ 2009, Πάφος, Κύπρος.

- Σφήκας Γ., 1996. *Τα Ενδημικά Φυτά της Ελλάδας*, Εκδόσεις Μπάστας – Πλέσσας.
- Τσακίρης Γ., 2006. *Υδραυλικά έργα Σχεδιασμός & Διαχείριση*, Τόμος II: Εγγειοβελτιωτικά έργα, Εκδόσεις Συμμετρία.
- ΦΕΚ 1154Β/12.8.2003.

Ξένη βιβλιογραφία

- Anderson M. P. and W.W. Woessner, 1992. *Applied groundwater modeling: simulation of flow and advective transport*, Academic Press, Orlando, Florida.
- Babu, D. K., G. F. Pinder, A. Niemi, D. P Ahlfeld & S. A., Stothoff, 1997. *Chemical transport by three-dimensional groundwater flows*, Princeton University.
- Becciu G., (2000). *Modelli di trasformazione afflussi-deflussi*, DIIAR, Politecnico di Milano.
- Chiesa G., 1992. *Glossario di idrogeologia*, Geo-graph.
- Citrini D. & G. Nosedà, 1987. *Idraulica*, CEA.
- Datei C., 1999. *Idraulica*, Edizioni Cortina, Padova.
- Desio A., 1973. *Geologia applicata all'ingegneria*, Hoepli, Milano.
- Di Santo A., 2001. *Impianti speciali idraulici, (Appunti)*, DIAC, Politecnico di Bari, Sezione di Ingegneria delle acque.
- Donatiello L., 2009. *Simulazione (Appunti)*, Università di Bologna, Dipartimento di Scienze dell'Informazione.
- Fidelibus M. D., 2003. *Idrogeologia applicata, (Appunti)*, DICA, Politecnico di Bari, Sezione di Ingegneria geotecnica e geoambientale.
- Fratino U., 2001. *Idraulica, (Appunti)*, DIAC, Politecnico di Bari, Sezione di Ingegneria delle acque.
- Gradstein F., J. Ogg & A. Smith, 2004. *A Geologic Time Scale*, University of Cambridge.
- Konikow L. F., 1986. *Predictive accuracy of a ground-water model - lessons from a post-audit*, Ground Water.
- Mitchell J. K. & K. Soga, 2005. *Fundamentals of soil behavior*, (3rd edition), Wiley.
- Moisello U., 1999. *Idrologia tecnica*, La Goliardica Pavese.
- Olivares J. L., Argus ONE-PTC interface, v. 2.2 User's guide.

- Perlman H., X. Μακρόπουλος & Δ. Κουτσογιάννης, 2005. *Ο υδρολογικός κύκλος*, USGS United State Geological Survey.
- Rinaldi M., 2010. *Le acque sotterranee (Appunti)*, DICEA, Università di Firenze.
- Tulipano L. & G. Sappa, 2008. *Lezioni di Idrogeologia Applicata*, DICEA, Università degli Studi di Roma.

Ιστοσελίδες

- <http://androulakis.bma.upatras.gr>
- <http://arcadia.ceid.upatras.gr>
- <http://blogs.isidavinci.it>
- <http://chestofbooks.com/flora-plants/flowers/British-Wild-Flowers>
- <http://freedom.dicea.unifi.it>
- <http://ga.water.usgs.gov/edu/watercyclegreek.html>
- <http://geoingegneria.dits.uniroma1.it>
- <http://geophysics.geo.auth.gr>
- <http://geo-sector.geology.upatras.gr>
- <http://greeknaturephotography.blogspot.com>
- <http://hydrogis.geology.upatras.gr>
- <http://imnh.isu.edu>
- <http://it.wikipedia.org>
- <http://itia.ntua.gr/el/docinfo/115/>
- <http://oceanworld.tamu.edu/resources/environment-book/groundwater.html>
- <http://stipsi-electra.blogspot.com>
- <http://users.otenet.gr>
- http://whatcom.wsu.edu/ipm/manual/rasp/pesticides_water.html
- <http://www.diac.poliba.it>
- <http://www.istorikathemata.com>
- <http://www.lucapiancastelli.ing.unibo.it>
- <http://www.mani.org.gr/hlorida/79crocos/cr.htm>
- <http://www.unibo.it>
- www.aquaworld-crete.com
- www.argusint.com/index.html

- www.diasnews.com
- www.dicea.unifi.it
- www.diiar.polimi.it/costruzidra
- www.dtsc.ca.gov
- www.earthquakenet.gr/istorikoiseismoι.htm
- www.ellinikoarxeio.com
- www.envifriendly.tuc.gr
- www.evrotas.gr
- www.gaiasa.gr
- www.geo.auth.gr
- www.geodifhs.com
- www.goodquarry.com
- www.infovisual.info
- www.ingegneriastrutturale.net
- www.kathimerini.gr
- www.medsos.gr
- www.messinia-guide.gr
- www.minenv.gr
- www.notospress.gr
- www.ornithologiki.gr
- www.radford.edu
- www.sciencelearn.org.nz
- www.summagallicana.it
- www.treehugger.com
- www.trekearth.com
- www.tubus-bauer.com