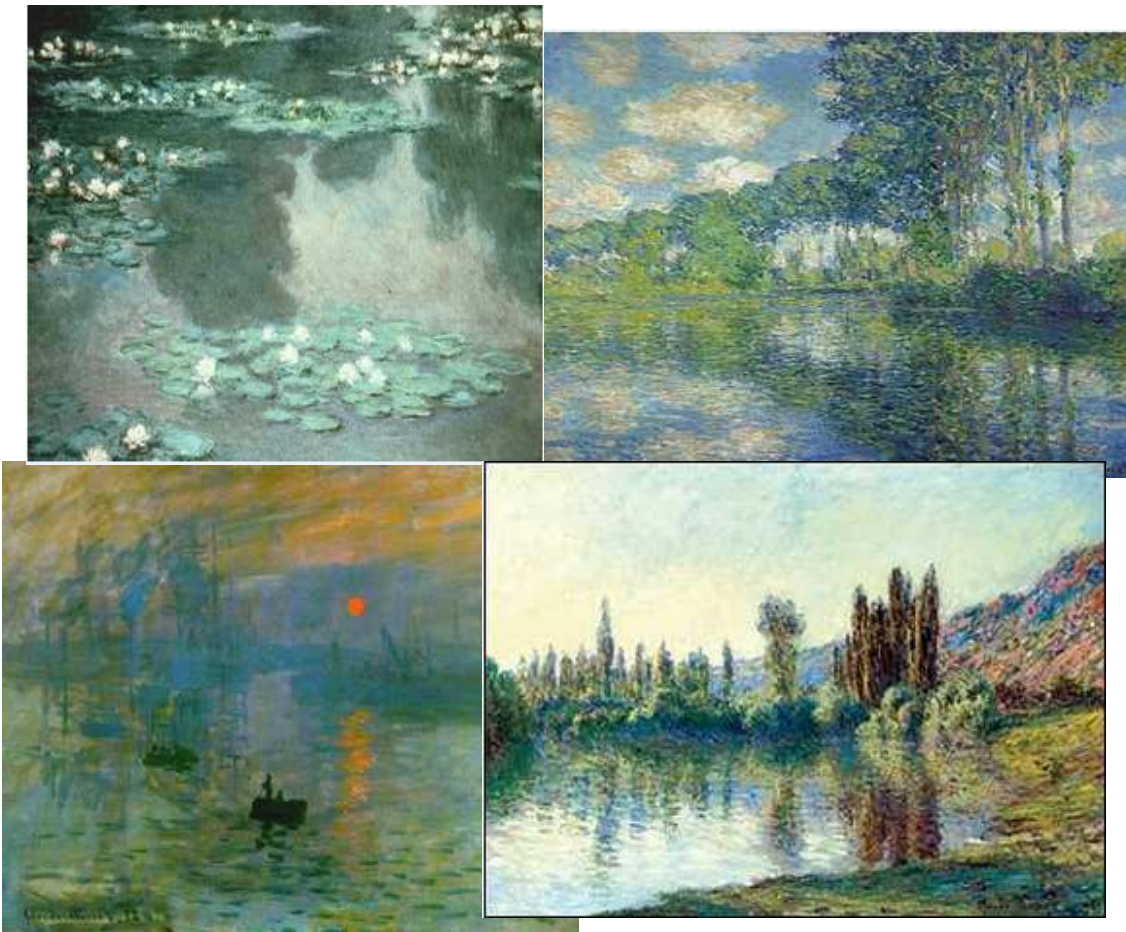


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΡΓΩΝ ΥΠΟΔΟΜΗΣ ΚΑΙ ΑΓΡΟΤΙΚΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ
ΕΜΒΑΘΥΝΣΗ «ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΥΔΑΤΙΚΩΝ ΠΟΡΩΝ»

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:

**ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΠΑΡΑΚΤΙΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΤΗΣ ΛΕΚΑΝΗΣ
ΓΑΔΟΥΡΑ ΣΤΗ Ν. ΡΟΔΟ**



Εκπόνηση: Μυσίρης Παναγιώτης
Επιβλέπων καθηγητής: Μαντόγλου Αριστοτέλης

Αθήνα, Ιούλιος 2010

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία εκπονήθηκε στον Τομέα Έργων Υποδομής και Αγροτικής Ανάπτυξης της Σχολής Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου στα πλαίσια της εμβάθυνσης «Διαχείριση Υδατικών Πόρων» υπό την επίβλεψη του Καθηγητή κ.ο.υ. Αριστοτέλη Μαντόγλου, ο οποίος διατύπωσε το αντικείμενο της εργασίας σύμφωνα με τα ειδικά μου ενδιαφέροντα. Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να του εκφράσω τις θερμές ευχαριστίες μου για την υπομονή του και τη συνεχή του στήριξη και καθοδήγηση σε όλα τα στάδια της εργασίας.

Επίσης θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον Υποψήφιο Διδάκτορα του Ε.Μ.Π. Γιώργο Κοψιάυτη, ο οποίος με βοήθησε σε σημαντικό βαθμό με την εξοικείωση στα διάφορα λογισμικά προγράμματα και τις έννοιες που συνάντησα για πρώτη φορά στην πορεία αυτής της εργασίας και με στήριξε ηθικά όσο κανένας. Ακόμα τον Υποψήφιο Διδάκτορα του Ε.Μ.Π. Γιώργο Κουράκο που έφτιαξε σε περιβάλλον MATLAB το λογισμικό μέσω του οποίου εισάγουμε τα binary (δυναδικά) αρχεία που παράγονται κατά την εκτέλεση του προγράμματος GROUND WATER VISTAS 4 και το οποίο χρησιμοποίησα στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας για την σχεδίαση διαγραμμάτων σχετικών με τον υπόγειο υδροφόρο που εξετάζουμε.

Τελειώνοντας, ιδιαίτερα θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου που ήταν πάντα δίπλα μου και με στήριξε, οικονομικά και ηθικά καθ' όλη την πορεία της συγκεκριμένης Διπλωματικής Εργασίας.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Περιεχόμενα.....	i
Πίνακας Εικόνων.....	iii
Πίνακας Πινάκων.....	iv
Πίνακας Διαγραμμάτων.....	v
Περίληψη.....	vi
Summary.....	viii
Κεφάλαιο 1^ο ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1 Γενικά.....	1
1.2 Αντικείμενο της Διπλωματικής Εργασίας.....	4
1.3 Εργαλεία και Λογισμικό που χρησιμοποιήθηκαν.....	5
1.4 Διάρθρωση διπλωματικής εργασίας.....	5
Κεφάλαιο 2^ο ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΝΗΣΟΥ ΡΟΔΟΥ....	8
2.1 Γεωγραφική Θέση.....	8
2.2 Διοικητική Διαίρεση και Δημογραφικά Στοιχεία.....	10
2.3 Τομείς Οικονομίας.....	12
2.3.1 Πρωτογενής Τομέας Παραγωγής.....	12
2.3.2 Δευτερογενής Τομέας Παραγωγής.....	13
2.3.3 Τριτογενής Τομέας Παραγωγής.....	13
2.4 Κλίμα, Μορφολογία και Φυσικό Περιβάλλον.....	15
Κεφάλαιο 3^ο ΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΚΑΙ ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ..	17
.....	17
3.1 Γεωλογικό Πλαίσιο της Ευρύτερης Περιοχής.....	17
3.2 Υδρολιθολογία.....	20
3.3 Τεκτονική.....	24
3.4 Σεισμικότητα.....	25
3.5 Υδρογεωλογία.....	26
3.6 Εντοπισμός Παράκτιου Υδροφορέα.....	28
3.6.1 Πλευρική Οριοθέτηση Υδροφορέα.....	28
3.6.2 Πιεζομετρία του Υδροφορέα.....	31
3.6.3 Κατακόρυφη Οριοθέτηση και Εκτίμηση Πάχους Υδροφορέα.....	33
3.7 Εκτίμηση Υδραυλικής Αγωγιμότητας Υλικών Υδροφορέα.....	33
Κεφάλαιο 4^ο ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟΥ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ.....	35
4.1 Ο Υδρολογικός Κύκλος.....	35

4.2	Εξίσωση και Παράμετροι του Υδατικού Ισοζυγίου.....	36
4.2.1	Ατμοσφαιρικά Κατακρημνίσματα (P).....	38
4.2.2	Εξατμισοδιαπνοή (E).....	38
4.2.3	Επιφανειακή Απορροή (R_0).....	40
4.2.4	Κατείσδυση (I).....	41
4.3	Περίληψη Διαδικασίας Εκτίμησης Υδατικού Ισοζυγίου στον Παράκτιο Υδροφορέα της Λεκάνης Γαδουρά.....	42
4.3.1	Υπολογισμός Συνιστωσών Υδατικού Ισοζυγίου.....	42
Κεφάλαιο 5^ο ΚΙΝΗΣΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΝΕΡΩΝ ΚΑΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΡΥ- ΠΩΝ.....47		
5.1	Ορισμοί.....	47
5.2	Εξίσωση ροής των υπόγειων νερών.....	50
5.3	Κίνηση των ρύπων στα υπόγεια νερά.....	51
Κεφάλαιο 6^ο ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΩΝ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΝΕ- ΡΩΝ.....57		
6.1	Γενικά.....	57
6.2	Χαρακτηριστικά διαφοροποίησης υπόγειων και επιφανειακών πόρων και στόχοι που εξυπηρετούν οι πρώτοι.....	57
6.3	Υδραυλική των πηγαδιών.....	59
6.4	Μοντέλα προσομοίωσης των υπόγειων ροών.....	63
Κεφάλαιο 7^ο ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ.....69		
7.1	Γενικά.....	69
7.2	Ο Κώδικας SEAWAT.....	70
7.3	Εφαρμογή Μοντέλου στον Παράκτιο Υδροφορέα της Λεκάνης Γαδουρά.....	71
7.3.1	Προσδιορισμός της Γεωμετρίας του Μοντέλου.....	71
7.3.2	Εισαγωγή των τιμών των παραμέτρων των ιδιοτήτων του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα.....	72
7.3.3	Εισαγωγή οριακών συνθηκών (Boundary Conditions).....	74
7.3.4	Ρυθμίσεις.....	78
7.3.5	Εκτέλεση (Run).....	82
Κεφάλαιο 8^ο ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....103		
8.1	Σύντομη ανασκόπηση.....	103
8.2	Γενικά συμπεράσματα από τη μελέτη.....	104

8.3	Συμπεράσματα από την προσομοίωση του παράκτιου υδροφόρου σχηματισμού.....	104
8.4	Προτάσεις για ακριβέστερα αριθμητικά μοντέλα	106
8.5	Μέτρα για την προστασία του υδροφορέα που εξετάζουμε και οφέλη από την εφαρμογή τους.....	107

Βιβλιογραφία.....	110
--------------------------	------------

ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

ΚΕΦ. 2	2.1: Θέση περιοχής μελέτης	Σελ.8
ΚΕΦ. 3	3.1: Απόσπασμα υδρολιθολογικού χάρτη	Σελ.23
	3.2: Υδρογεωλογικές λεκάνες Ν. Ρόδου	Σελ.27
	3.3: Τμήμα γεωλογικού χάρτη με τον υδροφορέα μελέτης	Σελ.29
ΚΕΦ. 4	4.1 : Σχηματικό διάγραμμα του υδρολογικού κύκλου	Σελ.36
	4.2 : Σχηματικό διάγραμμα της εξατμισοδιαπνοής	Σελ.40
	4.3: Σχηματική αναπαράσταση κατείσδυσης	Σελ.42
ΚΕΦ. 5	5.1: Ορισμός αποθηκευτικότητας σε περιορισμένο και σε φρεάτιο υδροφορέα	Σελ.49
ΚΕΦ. 6	6.1: Σχηματική παράσταση μόνιμης ροής από άντληση πηγαδιού σε περιορισμένο υδροφορέα	Σελ.60
	6.2: Σχηματική παράσταση μόνιμης ροής από άντληση πηγαδιού σε φρεάτιο υδροφορέα	Σελ.61
	6.3: Σχηματική απεικόνιση μόνιμης ροής από άντληση πηγαδιού σε περιορισμένο υδροφορέα με διαρροή	Σελ.62
	6.4: Σχηματική παράσταση μη μόνιμης ροής από άντληση πηγαδιού σε περιορισμένο υδροφορέα	Σελ.63
ΚΕΦ. 7	7.1: Απεικόνιση υφάλμυρης ζώνης	Σελ.69
	7.2: Οριακές συνθήκες και χωρική διακριτοποίηση υδροφορέα στο GWV4	Σελ.77
	7.3: Αποτέλεσμα προσομοίωσης: Υπολογισμός α) δυναμικού φ και β) συγκέντρωσης χωρίς αντλήσεις	Σελ.84
	7.4: Αποτέλεσμα προσομοίωσης: Υπολογισμός α) δυναμικού φ και β) συγκέντρωσης με αντλήσεις για το πρώτο σενάριο	Σελ.85
	7.5: Αποτέλεσμα προσομοίωσης: Υπολογισμός α) δυναμικού φ και β) συγκέντρωσης με αντλήσεις	Σελ.87

	για το δεύτερο σενάριο	
	7.6: Αποτέλεσμα προσομοίωσης: Υπολογισμός α) δυναμικού φ και β) συγκέντρωσης με αντλήσεις από τα 3 στρώματα για το τρίτο σενάριο	Σελ.89
	7.7: Αποτέλεσμα προσομοίωσης: Υπολογισμός α) δυναμικού φ και β) συγκέντρωσης με αντλήσεις από τα 9 στρώματα για το τρίτο σενάριο	Σελ.90
	7.8: Αποτέλεσμα προσομοίωσης: Υπολογισμός α) δυναμικού φ και β) συγκέντρωσης χωρίς αντλήσεις για το τέταρτο σενάριο	Σελ.91
	7.9: Αποτέλεσμα προσομοίωσης: Υπολογισμός α) δυναμικού φ και β) συγκέντρωσης με αντλήσεις για το τέταρτο σενάριο	Σελ.92
	7.10: Αποτελέσματα προσομοίωσης: Υπολογισμός α) δυναμικού φ και β) συγκέντρωσης για την 1 ^η δοκιμή του διαχειριστικού σεναρίου	Σελ.94
	7.11: Αποτελέσματα προσομοίωσης: Υπολογισμός α) δυναμικού φ και β) συγκέντρωσης για την 5 ^η δοκιμή του διαχειριστικού σεναρίου	Σελ.95
	7.12: Τρισδιάστατη απεικόνιση του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα	Σελ.97
	7.13: Τρισδιάστατη απεικόνιση των συγκεντρώσεων του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα	Σελ.98
	7.14: Δυσδιάστατη απεικόνιση των συγκεντρώσεων του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα	Σελ.99
	7.15: Δυσδιάστατη απεικόνιση του φορτίου του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα	Σελ.100
	7.16: Δυσδιάστατη απεικόνιση των ισοχλωρίων για τις διάφορες δοκιμές του 1 ^{ου} και 2 ^{ου} σεναρίου	Σελ.101

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

ΚΕΦ. 2	2.1: Δήμοι και Δημοτικά Διαμερίσματα της Νήσου Ρόδου	Σελ.10
	2.2: Μόνιμος Πληθυσμός στα Δημοτικά Διαμερίσματα	Σελ.12
	2.3: Στοιχεία Σταθμού ΕΜΥ Ρόδου	Σελ.15
ΚΕΦ. 3	3.1: Συντεταγμένες και απόλυτη στάθμη γεωτρήσεων και πηγαδιών	Σελ.31
	3.2: Πίνακας τιμών Υδραυλικής Αγωγιμότητας κατά	Σελ.34

	Terzaghi & Peck	
ΚΕΦ. 4	4.1: Μέσος όρος της μέσης μηνιαίας δυνητικής εξατμισοδιαπνοής των δύο μεθόδων	Σελ.44
	4.2: Υδατοϊκανότητα, σημείο μάρανσης και διαθέσιμο νερό εδάφους	Σελ.45
	4.3: Μέση ετήσια κατείσδυση	Σελ.45
ΚΕΦ. 7	7.1: Δεδομένα αντλήσεων	Σελ.83
	7.2: Δεδομένα διαδοχικών δοκιμών αντλήσεων του υδροφορέα στο πρώτο στρώμα	Σελ.86
	7.3: Δεδομένα αθροιστικών αντλήσεων του υδροφορέα	Σελ.88
	7.4: Ομαδοποιημένα δεδομένα αντλήσεων του υδροφορέα	Σελ.93

ΠΙΝΑΚΑΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

ΚΕΦ. 1	1.1: Χρήσεις νερού	Σελ.2
ΚΕΦ. 4	4.1: Μέσο μηνιαίο ύψος βροχής περιόδου 1967-2000	Σελ.43
	4.2: Μέση μηνιαία Θερμοκρασία περιόδου 1967-2000	Σελ.43

Περίληψη

Η σωστή διαχείριση των αναγκών και των αποθεμάτων του νερού παίζει καθοριστικό ρόλο, ιδιαίτερα στις νησιωτικές περιοχές, όπου η αειφορία είναι επιβεβλημένο να συνδυάζεται με:

1. Την αυτονομία στην κάλυψη των αναγκών, και
2. Τους ταχείς ρυθμούς ανάπτυξης σε δυναμικούς τομείς της οικονομίας που εμφανίζουν μεγάλες προοπτικές

Ο παράκτιος υδροφορέας της υδρολογικής λεκάνης Γαδουρά στη Ν. Ρόδο, με έκταση 23 km² αποτελεί την κύρια πηγή για την κάλυψη των υδατικών αναγκών της περιοχής. Λαμβάνοντας ως δεδομένα την αύξηση του μόνιμου πληθυσμού αλλά και την οικονομία του νησιού που βασίζεται κατά κύριο λόγο στον τουρισμό, γίνεται φανερό ότι είναι αναγκαία η μελέτη του σημαντικού αυτού υπόγειου υδροφόρου συστήματος. Για αυτό το λόγο επιχειρείται η προσομοίωση της ροής του υπόγειου νερού, προκειμένου να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα για την υπάρχουσα κατάσταση καθώς και την συνολική δυναμική του συστήματος, ώστε να διαπιστώσουμε σε πιο βαθμό θα δύναται να ικανοποιεί τις συνεχώς αυξανόμενες ανάγκες. Και τέλος για να προταθούν μέτρα που εξασφαλίζουν την βιωσιμότητα των υδάτινων συστημάτων γενικά, αλλά και θα είναι σε θέση να βελτιώσουν την επιβαρυσμένη εικόνα που παρουσιάζει ο παράκτιος υδροφορέας.

Αρχικά εξετάζεται το γεωλογικό και υδρογεωλογικό πλαίσιο του νησιού που παρουσιάζει μια σύνθετη εικόνα και ερευνώνται οι διάφορες υδροφορίες που παρουσιάζονται στα εδάφη του. Η περιοχή μελέτης του παράκτιου υδροφορέα παρουσιάζει ομοιομορφία αφού αποτελείται στο σύνολο της από παράκτιες και αλλουβιακές αποθέσεις. Ακόμα, συνολικά ο υδροφορέας μας οριοθετείται από αδιαπέρατους σχηματισμούς με εξαίρεση το σημείο επαφής με τη θάλασσα.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η μεθοδολογία που εφαρμόστηκε, προκειμένου να συντεθεί και να εκτελεστεί, με τον καλύτερο τρόπο και αναλόγως των διαθέσιμων στοιχείων για τη συγκεκριμένη περιοχή, ένα απλό μοντέλο προσομοίωσης της ροής του παράκτιου υδροφορέα. Το μοντέλο αυτό εφαρμόστηκε στο παράκτιο φρεάτιο υδροφορέα για συνθήκες μόνιμης ροής και βασίζεται στη θεώρηση υφάλμυρης ζώνης μεταξύ γλυκού και θαλασσινού νερού. Η προσομοίωση γίνεται με την εφαρμογή του κώδικα SEAWAT και το αποτέλεσμα είναι ο υπολογισμός του δυναμικού ϕ και των συγκεντρώσεων σε ένα πλήθος σεναρίων, που περιγράφουν την παρούσα

αλλά και μελλοντικές καταστάσεις, με την εισαγωγή αντλήσεων στα φρεάτια και τις γεωτρήσεις τόσο από τα διαθέσιμα στοιχεία όσο και από υποθετικές προσεγγίσεις. Το γραφικό περιβάλλον επικοινωνίας είναι το GWV4 και σε περιβάλλον MATLAB γίνεται η τρισδιάστατη απεικόνιση του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα και διαγράμματα που διευκολύνουν στην συνολική κατανόηση των αρχείων που παράγονται από την εκτέλεση του μοντέλου.

Εν κατακλείδι δίνονται κάποια μέτρα για κατασκευή ενός ακριβέστερου μοντέλου προσομοίωσης αλλά και κάποιες προτάσεις για τη σταδιακή επαναφορά του υδροφορέα που εξετάστηκε αλλά και τη συνδιαχείριση των επιφανειακών και υπογείων υδάτων για την άνοδο της στάθμης και τη σταδιακή αποκατάσταση της υφαλμύρινσης. Επισημαίνουμε τη σημασία των κλιματικών αλλαγών καθώς αυτές συσχετίζονται άμεσα με την διαχείριση των υδροφόρων συστημάτων. Όλα τα παραπάνω αποκτούν ιδιαίτερη σημασία στα νησιά που ανήκουν στις ελλειμματικές περιοχές υδατικών αποθεμάτων.

Summary

The proper management of the water demand and supply is the key issue, especially in the island areas, where sustainability of water resources has to be combined with:

1. The autonomy and covering of water needs, and
2. The fast rates of development in potential sectors of economy, where many projects are possible

The coastal aquifer of the hydrological basin of Gadouras on the island of Rhodes, covering an area of 23 km², is the main source of water supply in the area. Taking for granted the increase of permanent population and also the economy of the island which is based mainly on the tourism, it is clear that the study of this important underground of water wagon system becomes necessary. For this reason attempt a simulation of flow of underground water, so that useful conclusions are inferred on the existing situation and the overall dynamic of the system, to see to what extent it can indulge the growing needs.

Initially the geological and hydro geological frame of island that presents a complex picture is examined and the various aquifers that are developed in its grounds are investigated. The study area of the coastal aquifer presents uniformity as it is consisting of coastal and alluvial deposits as a whole. Our aquifer as a whole is defined by impervious formations expects the point of contact with the sea.

In then, the mythology that was applied is shown, with the best way possible and proportionally the available elements for the particular region so that, a simple model of simulation of flow of coastal aquifer is synthesized and executed. The model was applied to the coastal unconfined aquifer at steady state conditions and which was based on the consideration of brackish zone between freshwater and seawater. The simulation is made with the application of the SEAWAT code and the result is the calculation of potential ϕ and concentrations in a number of scenarios, which describe the present and futures situations, by introducing abstractions in wells and boreholes both the available data and hypothetical approaches. The graphic environment of communication is GWV4 and in environment MATLAB is made the three dimensional display of the underground aquifer and graphs that facilitate the comprehensive understanding of files which are generated by the implementation of the model.

Lastly, a few measures for manufacturing a more precise model of simulation are given and also some opinions out are made for the progressive reintroduction of the aquifer that was examined and the simultaneous management of the surface and underground waters for rise of level water wagon and the progressive re-establishment of salinity. We give the matter of climate changes, because these are related with management of water systems. All these get a particular importance in the islands, because these are belonging in regions with deficit water surplus.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Εισαγωγή

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικά

Η Ελλάδα καθώς και ολόκληρος ο πλανήτης τα τελευταία χρόνια αντιμετωπίζουν ένα τεράστιο οικολογικό πρόβλημα, αυτό της απειλούμενης λειψυδρίας λόγω ελαχιστοποίησης των διαθέσιμων επιφανειακών και υπόγειων υδάτων. Οι αιτίες που δημιούργησαν και συνεχίζουν να οξύνουν το πρόβλημα αυτό αναφορικά είναι η έλλειψη σχεδιασμού, η κακή διαχείριση των υδάτινων αποθεμάτων, η μόλυνση των υδροφορέων, η καταστροφή των δασών, η περιφρόνηση των φυσικών νόμων που διέπουν τον υδρολογικό κύκλο, η μείωση των βροχοπτώσεων λόγω κλιματικών αλλαγών, κ.ά.

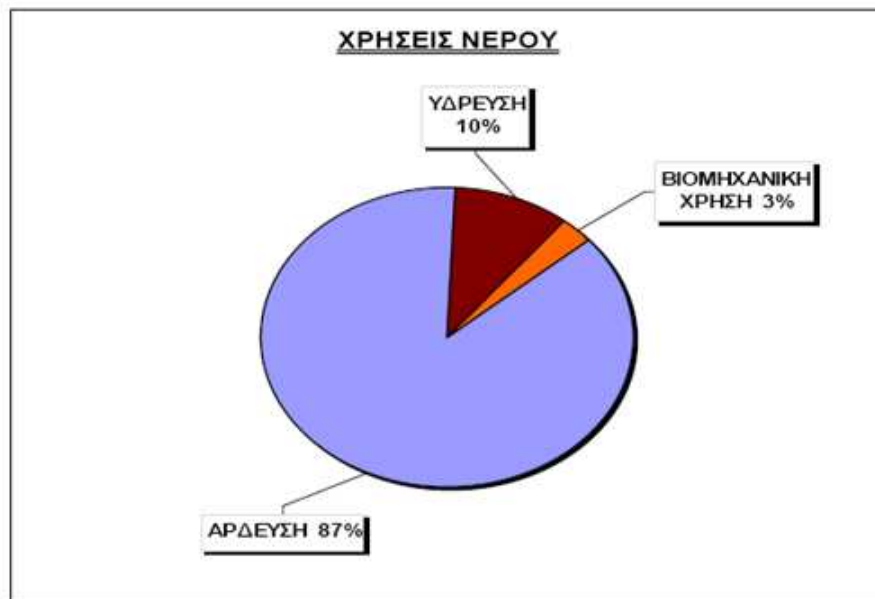
Η χώρα μας παρουσιάζει πολυσχιδή γεωμορφολογική διαμόρφωση, πολύμορφη γεωλογική δομή και έντονη τεκτονική δραστηριότητα και οι οποίες σε συνδυασμό με το κλίμα συντελούν στη χωροχρονική ανισοκατανομή των υδατικών πόρων. Στα παραπάνω προστίθεται η χρονική αντιστροφή της κατανομής της ζήτησης και της υπερσυγκέντρωσης της σε περιορισμένους χώρους με ασήμαντους υδατικούς πόρους, γεγονός που δεν ευνοεί από οικονομοτεχνική άποψη την τεχνικά αξιόπιστη και οικονομικά εφικτή κάλυψη των αναγκών στις διάφορες χρήσεις του νερού.

Η χωρική κατανομή καθιστά την Ανατολική Πελοπόννησο, την Αττική, την Κεντρική Ελλάδα, την Εύβοια και τα νησιά του Αιγαίου ως τα υδατικά διαμερίσματα με τους λιγότερους διαθέσιμους πόρους. Επιπλέον παρατηρείται ότι το 45% του συνόλου των κατακρημνίσεων, λαμβάνει χώρα από τον Δεκέμβριο μέχρι τον Ιανουάριο. Στις περισσότερες περιοχές μάλιστα και ιδιαίτερα στα νησιά του Αιγαίου, οι υπόγειοι υδάτινοι πόροι είναι εξίσου σημαντικοί με τους επιφανειακούς. Το νερό αποτελεί το πολυτιμότερο αγαθό που μας παρέχει η φύση και καθίσταται πολύ σημαντικός παράγοντας για την ανάπτυξη, την υγιεινή διαβίωση, την ίδια τη ζωή. Ωστόσο, αυτή η πηγή ζωής αποτελεί πλέον είδος εν ανεπαρκεία, ενώ και οι λιγοστές ποσότητες νερού που διαθέτουμε δε χαρακτηρίζονται πάντα από την καλύτερη ποιότητα.

Η ορθή διαχείριση του νερού απαιτεί παρεμβάσεις-μετρά σε πολλά επίπεδα, με πρώτη την εξοικονόμηση νερού στην υδροβόρο γεωργία, ωστόσο ο

καθένας μας μπορεί να συμβάλλει με τον τρόπο του στο να περιορισθεί η κακοδιαχείριση που γίνεται σήμερα. Αυτό μπορεί να υλοποιηθεί με δύο κυρίως τρόπους: την αλλαγή νοοτροπίας μέσω της υιοθέτησης των βασικών αρχών της αειφόρου ανάπτυξης καθώς και με τη χρήση απλών τεχνολογιών εξοικονόμησης.

Στη χώρα μας η γεωργία αποτελεί το βασικό καταναλωτή των διαθέσιμων υδάτινων πόρων αφού απορροφά κατά μέσο όρο το 85% της συνολικής κατανάλωσης, ακολουθεί η ύδρευση με ποσοστό 11% ενώ το 4% διατίθεται προς βιομηχανική κατανάλωση.



Διάγραμμα 1.1: Χρήσεις νερού

Η υπεράντληση των υπόγειων υδροφορέων οδήγησε σε σημαντικά προβλήματα ποσοτικής αλλά και ποιοτικής υποβάθμισης τους. Σχετικά με τους παράκτιους υδροφορείς η υπεράντληση οδήγησε σε υφαλμύρωση των υδροφορέων λόγω της διείσδυσης θαλάσσιου νερού ενώ τα στοιχεία δείχνουν ότι στο μέλλον το πρόβλημα αυτό θα οξύνεται. Επίσης έχει αποδειχθεί ότι η στάθμη στους υπόγειους υδροφόρους ορίζοντες μειώνεται κατά 5 μέτρα ετησίως (200 μ. τα τελευταία 40 χρόνια), ενώ το βάθος άντλησης νερού συνεχώς αυξάνεται. Στις μέρες μας το μέσο βάθος άντλησης νερού εκτιμάται στα 300 μ.

Οι παράκτιες περιοχές αποτελούν ένα ιδιαίτερα ελκυστικό περιβάλλον, το οποίο προσφέρεται για ανθρώπινη διαβίωση αλλά και αποτελεί πόλο

τουριστικής έλξης. Συνήθως πρόκειται για πυκνοκατοικημένες περιοχές στις οποίες ο πληθυσμός ασχολείται με τη γεωργία, την κτηνοτροφία και την αλιεία κατά τους χειμερινούς μήνες και με το εμπόριο και το τουρισμό κατά τους θερινούς.

Οι παραπάνω παραγωγικοί τομείς καταναλώνουν τεράστιες ποσότητες γλυκού νερού το οποίο συνήθως προέρχεται από τους υπόγειους υδροφορείς. Σημαντική είναι και η ποσότητα του νερού, που χρησιμοποιείται για την ύδρευση των κατοίκων, ένα μέγεθος που, ειδικά το καλοκαίρι εξαιτίας του τουρισμού, αυξάνεται δραματικά. Η κατανάλωση των υδατικών πόρων, όταν γίνεται χωρίς ορθολογική διαχείριση των αποθεμάτων τους, οδηγεί σε υπεράντληση του νερού και υποβάθμιση της ποιότητάς του.

Η υπεράντληση των υδάτων στις παράκτιες περιοχές προκαλεί τη διείδυση του θαλασσινού νερού στους υπόγειους υδροφορείς, με αποτέλεσμα τη μετατροπή του γλυκού νερού σε υφάλμυρο. Το φυσικό αυτό φαινόμενο καλείται υφαλμύρωση και στην πραγματικότητα πρόκειται για μία μορφή ρύπανσης των υπόγειων νερών. Το εύρος της υφαλμύρωσης του υπόγειου υδροφορέα αποτελεί δείκτη για το μέγεθός της άναρχης και κακής διαχείρισης του υδατικού δυναμικού.

Η υφαλμύρωση αποτελεί ένα ιδιαίτερα σημαντικό περιβαλλοντικό ζήτημα, καθώς το υφάλμυρο νερό δεν είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί από τον άνθρωπο. Ταυτόχρονα η απορρύπανσή του είναι μία διαδικασία εξαιρετικά χρονοβόρα, μιας και μπορεί να διαρκέσει δεκάδες ή εκατοντάδες χρόνια. Το φαινόμενο αυτό έχει σοβαρό κοινωνικό και οικονομικό αντίκτυπο στην ποιότητα ζωής των κατοίκων που ζουν σε παραθαλάσσιες περιοχές.

Όλα τα παραπάνω, σε συνδυασμό με την κακή διαχείριση των υδατικών πόρων στην Ελλάδα, καθιστούν επιτακτική ανάγκη τη διαμόρφωση ενός σχεδίου δράσης για σωστή και ορθολογική διαχείριση των υδάτων, υπό το πρίσμα της αειφόρου ανάπτυξης. Ίσως με τον τρόπο αυτό να διαφυλαχθεί το μέλλον των επόμενων γενεών, ώστε να ζήσουν σε αρμονία με το φυσικό περιβάλλον.

Στο πλαίσιο της ολοκληρωμένης διαχείρισης υπάρχει ανάγκη να προσδιοριστούν οι μέγιστες ποσότητες που μπορούν να αντληθούν από τους υδροφορείς δίχως να αλλοιωθούν τα ποσοτικά και ποιοτικά χαρακτηριστικά τους και να καθοριστεί η σχέση αυτή σαν συνάρτηση των γεωμετρικών και

υδραυλικών παραμέτρων του υδροφορέα καθώς και της κατείδυσης. Για να υπολογιστεί με ακρίβεια η μέγιστη βιώσιμη άντληση σαν ποσοστό της τροφοδοσίας του υδροφορέα, πρέπει να κατανοηθεί καλά η λειτουργία του φυσικού συστήματος και να περιγραφεί με μαθηματικά μοντέλα προσομοίωσης. Κάτι τέτοιο δεν είναι δυνατόν να υλοποιηθεί γιατί η λειτουργία του συστήματος είναι πολύπλοκη και δεν δύναται να περιγραφεί επακριβώς με μαθηματικές εξισώσεις.

Επομένως, εκτός από τα φυσικά μοντέλα που βασίζονται σε φυσικούς νόμους και διαφορικές εξισώσεις ροής και διασποράς, συχνά αρκούμαστε και σε εμπειρικές σχέσεις ή και σε απλά στατιστικά μοντέλα (μοντέλα μαύρου κουτιού). Είναι χρήσιμο πάντως όπου είναι δυνατόν να χρησιμοποιούμε τα φυσικά μοντέλα αφού βοηθούν να κατανοήσουμε την λειτουργία του συστήματος.

Συνοψίζοντας πρέπει να τονίσουμε ότι η απουσία αποτελεσματικής πολιτικής για τη διαχείριση των υδατικών πόρων έχει καθοριστικές επιπτώσεις στο περιβάλλον και στην ανάπτυξη πολλών περιοχών της χώρας μας τα τελευταία χρόνια, δημιουργώντας προβλήματα και αδιέξοδα. Τα προβλήματα αυτά εκδηλώνονται κατά προτεραιότητα στις ευάλωτες από την άποψη του υδατικού ισοζυγίου περιοχές, όπως είναι τα νησιά του Αιγαίου, οι παράκτιοι υγρότοποι και υδροφορείς, καθώς και οι περιοχές μεγάλης αστικής και αγροτικής ανάπτυξης. Αυτό βεβαίως δεν σημαίνει ότι και στην υπόλοιπη Ελλάδα οι επιπτώσεις της κακής διαχείρισης του νερού θα αργήσουν να εμφανιστούν.

1.2 Αντικείμενο της Διπλωματικής Εργασίας

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία πραγματεύεται την προσομοίωση του φρεάτιου παράκτιου υδροφορέα της υδρολογικής λεκάνης Γαδουρά στη νήσο Ρόδο που βρίσκεται στο κεντρικό και ανατολικό τμήμα του νησιού. Στα πλαίσια της διαδικασίας θα πρέπει να ληφθεί υπόψη η ύπαρξη αλμυρού νερού, το οποίο χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερη πυκνότητα και ειδικό βάρος σε σχέση με το γλυκό νερό του υδροφορέα. Ολοκληρώνοντας τη διαδικασία αυτή θα είμαστε σε θέση αφενός να βγάλουμε χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με την κατάσταση που βρίσκεται σήμερα ο παράκτιος υδροφορέας της λεκάνης Γαδουρά στη Ρόδο από άποψη υφαλμύρωσης και αφετέρου να προτείνουμε κάποια μέτρα για τη διαχείριση του βασιζόμενης στις αρχές της αειφόρου ανάπτυξης. Τέλος θα μπορούμε να δώσουμε μια τάξη μεγέθους για τον ρυθμό των αντλήσεων στο σύνολο των

γεωτρήσεων καθώς και να εκτιμήσουμε την συνολική δυναμική του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα. Τα παραπάνω θα υλοποιηθούν μέσα από ένα σύνολο σεναρίων που περιγράφουν την υφιστάμενη αλλά και μελλοντική κατάσταση που δύναται να εμφανιστεί στον υδροφορέα μας.

Βασικό στάδιο της διαδικασίας προσομοίωσης αποτελεί η κατανόηση των γεωλογικών, υδρογεωλογικών και υδρολιθολογικών χαρακτηριστικών του υδροφόρου σώματος που εξετάζεται. Προηγείται λοιπόν η συλλογή και επεξεργασία δεδομένων, όπως στοιχείων σχετικών με το έδαφος του υδροφορέα, μετεωρολογικά στοιχεία όπως βροχόπτωση και θερμοκρασία που έχουν καταγραφεί από τους σταθμούς της Ε.Μ.Υ. στην περιοχή και στοιχεία αντλήσεων από τις γεωτρήσεις που βρίσκονται στον υδροφορέα. Τα συμπεράσματα και οι τιμές που θα εξαχθούν θα περιγράφουν τα χαρακτηριστικά και τη δυναμική του φυσικού υδρογεωλογικού συστήματος.

1.3 Εργαλεία και λογισμικό που χρησιμοποιήθηκαν

Στο κεφάλαιο 7, χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση ο κώδικας SEAWAT και το πρόγραμμα GROUND WATER VISTAS 4 που αποτελεί το γραφικό περιβάλλον του κώδικα στον υπολογιστή προκειμένου να εισαχθούν οι παράμετροι στο μοντέλο. Τέλος δημιουργήθηκαν γραφήματα στη γλώσσα τεχνικού προγραμματισμού MATLAB, η οποία διευκολύνει στην καλύτερη οπτική απεικόνιση των αποτελεσμάτων.

1.4 Διάρθρωση διπλωματικής εργασίας

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναφέρονται κάποια γενικά χαρακτηριστικά της Νήσου Ρόδου όπως η γεωγραφική θέση, η διοικητική διαίρεση, κάποια δημογραφικά δεδομένα και οι παραγωγικοί τομείς. Τέλος γίνεται συνοπτική παρουσίαση για το κλίμα, τη μορφολογία και το φυσικό περιβάλλον του νησιού.

Στο τρίτο κεφάλαιο μελετάται η γεωλογική διαμόρφωση της Νήσου Ρόδου, εξετάζεται η στρωματογραφία της και περιγράφεται η γεωλογική δομή από τα ανώτερα προς τα κατώτερα στρώματα του εδάφους. Στη συνέχεια μελετάται η υδρολιθολογία (διαπερατότητα των σχηματισμών) και το νησί χωρίζεται σε υδρογεωλογικές ενότητες που έχουν κατά καιρούς μελετηθεί. Ακολούθως ορίζονται οι υπόγειοι υδροφορείς και δίνεται μια περιγραφή της ταξινόμησης και των λειτουργιών τους ενώ επισυνάπτεται και ο γεωλογικός χάρτης της περιοχής όπου εντοπίζεται ο υπό μελέτη παράκτιος υδροφορέας.

Στηριζόμενοι σε αυτόν οριοθετούμε πλευρικά τον υδροφόρο σχηματισμό και εξετάζουμε τη πιεζομετρία του υδροφορέα από δεδομένα που προήλθαν από το Ι.Γ.Μ.Ε.. Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με την εκτίμηση του πάχους και της υδραυλικής αγωγιμότητας του υπόγειου υδροφορέα.

Στο τέταρτο κεφάλαιο περιγράφεται ο υδρολογικός κύκλος του νερού καθώς και η διαδικασία εκτίμησής του υδατικού ισοζυγίου στην περιοχή μελέτης. Επισημαίνεται ότι η διαδικασία δεν εφαρμόστηκε γιατί τα αποτελέσματα της υπήρχαν από τη Διπλωματική Εργασία του συμφοιτητή Γαβαλλά Βασίλειου. Επομένως γίνεται μια απλή περιγραφή της γενικής εξίσωσης του υδρολογικού ισοζυγίου και περιγράφονται οι συνιστώσες της όπως η κατακρήμνιση, η εξατμισοδιαπνοή, η επιφανειακή απορροή και η κατείδυση και ο τρόπος προσδιορισμούς τους (πηγή: σύγγραμμα Γ.Π.Α). Τέλος, πραγματοποιείται μια σύντομη περίληψη του τρόπου, των στοιχείων και των παραδοχών με τις οποίες ο συμφοιτητής μου εκτίμησε το υδατικό ισοζύγιο.

Το πέμπτο κεφάλαιο έχει θεωρητικό χαρακτήρα και δίνονται οι ορισμοί των παραμέτρων της κίνησης του υπόγειου νερού που χρησιμοποιούνται εκτενώς στην εργασία. Οι παράμετροι αυτοί είναι το ολικό και ενεργό πορώδες, η υδραυλική αγωγιμότητα, η φυσική διαπερατότητα, η διοχετευτικότητα ή μεταφορικότητα, η αποθηκευτικότητα, η ειδική αποθηκευτικότητα και η ειδική απόδοση. Ορίζεται στη συνέχεια πότε ένα πορώδες μέσο είναι ισοτροπικό και πότε ανισότροπο και πότε καλείται ομογενές και ανομογενές. Τέλος γίνεται αναφορά στην εξίσωση ροής των υπόγειων νερών καθώς και στους μηχανισμούς κίνησης των ρύπων σε αυτά και συγκεκριμένα στη μεταφορά, στη μοριακή διάχυση και στην κινηματική διασπορά.

Στο έκτο κεφάλαιο γίνεται η διάκριση των υδατικών πόρων σε επιφανειακούς και υπόγειους και παρουσιάζονται συνοπτικά τα χαρακτηριστικά διαφοροποίησής τους. Επιπλέον ορίζονται και οι βασικοί στόχοι που εξυπηρετούν οι υπόγειοι υδροφόροι ορίζοντες. Στη συνέχεια μελετάται σε θεωρητικό επίπεδο η υδραυλική των πηγαδιών και συγκεκριμένα εξετάζονται οι σχέσεις που διέπουν τις αντλήσεις τόσο σε φρεάτιους όσο και σε περιορισμένους υδροφορείς καθώς και οι περιπτώσεις μόνιμης ή μη ροής. Τέλος γίνεται μια σύντομη αναφορά στα μοντέλα προσομοίωσης των υπόγειων ροών, στη κατασκευή και εφαρμογή του αριθμητικού μοντέλου καθώς και στις μεθόδους διακριτοποίησης που συνήθως ακολουθούν αυτά. Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με την

αξιολόγηση των παραπάνω μεθόδων και ορίζεται η μέθοδος στην οποία βασίζεται ο αλγόριθμος που εφαρμόστηκε.

Στο έβδομο κεφάλαιο γίνεται λεπτομερής αναφορά στην εφαρμογή της προσομοίωσης στον παράκτιο φρεάτιο υδροφορέα της λεκάνης Γαδουρά στη Ρόδο. Το μοντέλο που επιλέγεται να χρησιμοποιηθεί βασίζεται στη θεώρηση υφάλμυρης ζώνης μεταξύ του γλυκού νερού του υδροφορέα και του αλμυρού νερού της θάλασσας (προσέγγιση μεταβλητής πυκνότητας). Το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε για τη προσομοίωση του υπόγειου υδροφορέα είναι το GROUND WATER VISTAS 4 και ο κώδικας SEAWAT, στον τρόπο λειτουργίας του οποίου γίνεται εκτενής αναφορά, ως υπολογιστικό εργαλείο (υπολογισμός των τιμών δυναμικού φ). Σε περιβάλλον Matlab έγινε παρουσίαση των αποτελεσμάτων. Τέλος αναφέρονται ο προσδιορισμός της γεωμετρίας του μοντέλου, η εισαγωγή οριακών συνθηκών, η εισαγωγή των παραμέτρων που πρέπει να γίνουν στο μοντέλο καθώς και η εκτέλεση της προσομοίωσης.

Η Διπλωματική Εργασία κλείνει με το όγδοο κεφάλαιο στο οποίο γίνεται μια μικρή ανακεφαλαίωση των όσων αναλύθηκαν, αναφέρονται τα συμπεράσματα στα οποία οδηγεί η συνολική μελέτη, κάποιες προτάσεις για την εφαρμογή ακριβέστερων αριθμητικών μοντέλων καθώς και μερικά μέτρα για τη βιωσιμότητα του συγκεκριμένου υδροφόρου συστήματος λαμβάνοντας υπόψη τις επιδράσεις των κλιματικών αλλαγών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Γενικά Χαρακτηριστικά της Νήσου Ρόδου

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΓΕΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΝΗΣΟΥ ΡΟΔΟΥ

2.1 Γεωγραφική Θέση

Η Ρόδος ανήκει στο νησιωτικό σύμπλεγμα του Νομού Δωδεκανήσου στο νοτιοανατολικό τμήμα του Ελληνικού χώρου και είναι το μεγαλύτερο σε μέγεθος νησί του Νομού με έκταση 1398 τ. χλμ., έχει ακτογραμμή μήκους 220 χλμ και βρίσκεται περίπου 460 χλμ νοτιοανατολικά της Αθήνας, 380 χλμ δυτικά της Κύπρου και 18 χλμ νοτιοδυτικά της Τουρκίας.



Εικόνα 2.1: Θέση περιοχής μελέτης

Η πόλη της Ρόδου είναι πρωτεύουσα του ομώνυμου νησιού και του νομού Δωδεκανήσου. Το ευρύτερο Πολεοδομικό Συγκρότημα της πόλης της Ρόδου έχει μόνιμο πληθυσμό 117.007 κατοίκους (ΕΣΥΕ, απογραφή 2001). Σύμφωνα με την τελευταία απογραφή (2001) ωστόσο, η πόλη της Ρόδου έχει επίσημα 53.709 κατοίκους και είναι η μεγαλύτερη πόλη στο Αιγαίο πέλαγος.

Ο πληθυσμός της Ρόδου είναι ανομοιόμορφα κατανεμημένος σε 43 κοινότητες εκ των οποίων μόνο 14 από αυτές έχουν πληθυσμό πάνω από 1000 κατοίκους και οι οποίες βρίσκονται στο βόρειο μέρος του νησιού, περιοχή που σχετίζεται άμεσα με τη σφαίρα επιρροής της πόλης της Ρόδου.

Το κεντρικό τμήμα του νησιού καλύπτεται από ένα μεγάλο ορεινό όγκο, που

αποτελείται από τρία συνεχόμενα βουνά, τον Ατάβυρο στο μέσο, που είναι και το μεγαλύτερο, με υψηλότερη κορυφή αυτή του Αγ. Ιωάννη (1216 μ), τον Προφήτη Ηλία προς το Βορρά και τον Ακραμύτη στο Νότο. Στα παράλια του περιβάλλεται από ομαλές πεδινές εκτάσεις που καταλήγουν στη θάλασσα, με μόνη εξαίρεση τη δυτική πλευρά που παρουσιάζει έντονη κλίση.

Από τα παλαιότερα χρόνια η φύση, η γεωμορφολογία, η γεωλογία, το έδαφος και το κλίμα της Ρόδου ευνόησαν την αγροτική παραγωγή. Σε περιόδους ανεξαρτησίας οι κάτοικοι του νησιού πέρα από την κύρια ενασχόληση τους με το εμπόριο και τη ναυτιλία, δραστηριοποιούνταν και στη παραγωγή αγροτικών προϊόντων τόσο για την αυτοσυντήρησή τους αλλά και για εξαγωγές σε άλλες περιοχές.

Επίσης η αλιεία αποτελούσε βασική απασχόληση των κατοίκων των παραθαλάσσιων οικισμών. Σημαντικές ομάδες γεωργικών καλλιεργειών αποτελούν τα ετήσια φυτά (σιτάρι, κριθάρι), οι δενδρώδεις καλλιέργειες (ελαιόδεντρα, εσπεριδοειδή) και άλλα καρποφόρα όπως αμπέλια, κηπευτικά και κυρίως πρόγραμμα.

Γενικά στο πρωτογενή τομέα παρατηρείται μια στασιμότητα που οφείλεται στην έλλειψη ενός γενικότερου αγροτικού προγραμματισμού και κυρίως στην υπερβολική απασχόληση του ανθρώπινου δυναμικού με τον τουρισμό που αποτελεί πλέον τον σημαντικότερο οικονομικό πόρο του νησιού.

Η κυρίαρχη τάση στη Ρόδο ακολουθεί το μοντέλο της ενασχόλησης με τον τουριστικό τομέα ο οποίος συγκεντρώνεται χωρικά στη «ζώνη» που περικλείεται από τις κοινότητες Παραδείσι - Ρόδος - Αφάντου. Η περιοχή αυτή απαριθμεί το 80% του συνολικού πληθυσμού, εξυπηρετεί όλες τις αναπτυξιακές δραστηριότητες, παράγει ένα σοβαρό κρατικό εισόδημα και πληροί τις προϋποθέσεις για περαιτέρω ανάπτυξη.

2.2 Διοικητική Διαίρεση και Δημογραφικά Στοιχεία

Η Ρόδος διοικητικά χωρίζεται σε δέκα Δήμους, οι οποίοι απαρτίζονται από σαράντα τρία Δημοτικά Διαμερίσματα (Δ.Δ.). Οι Δήμοι και τα Δημοτικά Διαμερίσματα που τους απαρτίζουν παρουσιάζονται αναλυτικά στον ακόλουθο πίνακα.

Δ.Αρχαγγέλου	Δ.Ατταβύρου	Δ.Αφάντου	Δ.Ιαλυσού	Δ.Καλλιθέας	Δ.Καμείρου	Δ.Λινδίων	Δ.Νότιας Ρόδου	Δ.Πεταλούδων	Δ.Ρόδου
Μαλώνος	Έμπωνα	Αφάντου	Ιαλυσού (τ.Τριάντα)	Καλυθιών	Σαλάκου	Λίνδου	Απολακκιάς	Κρεμαστής	Ρόδου
Μασάρων	Μονολίθου	Αρχιπόλεως		Κοσκινού	Φανών	Λάρδου	Μεσαναγρού	Δαματριάς	
Αρχαγγέλου	Σιάνων			Ψίνθου	Απόλλωνα	Λαέρμων	Κατταβιάς	Μαρπισών	
	Αγ.Ισιδώρου				Διμυλιάς	Καλάθου	Λαχανιάς	Θεολόγου	
	Κρητηνιάς				Καλαβάρδα	Πυλώνος	Ασκληπιείου	Παραδεισίου	
					Πλατανίων		Αρνίθας	Παστίδας	
					Σορωνής		Βατίου		
							Γενναδίου		
							Ιστρίου		
							Προφίλιας		

Πίνακας 2.1 : Δήμοι και Δημοτικά Διαμερίσματα της Νήσου Ρόδου (πηγή: ΕΣΥΕ, 2001)

Η Ρόδος σύμφωνα με την απογραφή του 2001, έχει πληθυσμό 117.007 κατοίκους. Μεγαλύτερη πόλη και πρωτεύουσα του νησιού είναι η πόλη της Ρόδου με πληθυσμό 53.709 κατοίκους η οποία είναι και πρωτεύουσα του Νομού Δωδεκανήσων.

Με βάση τα στοιχεία του παρακάτω πίνακα διαπιστώνουμε ότι την περίοδο 1991-2001 εμφανίζεται μια αύξηση του συνολικού πληθυσμού του νομού κατά 16,3% και για τη Ρόδο 19,2% που είναι μεγαλύτερη από την αύξηση του συνολικού πληθυσμού της χώρας, η οποία σύμφωνα με τα παρακάτω στοιχεία, είναι της τάξης του 6,7%. Συμπερασματικά μπορούμε να πούμε ότι όλοι οι Δήμοι της Νήσου Ρόδου, παρουσιάζουν αύξηση του πληθυσμού τους.

Δήμοι	Δημοτικά Διαμερίσματα	Πληθυσμός (1971)	Πληθυσμός (1981)	Πληθυσμός (1991)	Πληθυσμός (2001)
ΣΥΝΟΛΟ ΧΩΡΑΣ				10.252.580	10.939.605
ΝΟΜΟΣ ΔΩΔ/ΣΟΥ				163.476	190.071
ΡΟΔΟΣ				98.181	117.007
Δ. Ρόδου		32.808	40.626	43.558	53.709
	Ρόδου	32.808	40.626	43.558	53.709
Δ. Αρχαγγέλου		4.596	6.241	7.715	7.779
	Αρχαγγέλου	3.020	4.452	5.872	5.752
	Μαλώνος	932	1.129	1.030	1.096
	Μασάρων	644	660	813	931
Δ. Αταβύρου		3.180	3.517	3.584	3.225
	Έμπωνα	1.488	1.300	1.469	1.451
	Αγίου Ισιδώρου	704	600	576	590
	Κρητηνίας	480	847	744	606
	Μονολίθου	196	480	515	334
	Σιάνων	312	290	280	244
Δ. Αφάντου		2.904	4.330	6.306	6.712
	Αφάντου	2.524	3.804	5.634	5.933
	Αρχιπόλεως	380	526	672	779
Δ. Καλλιθέας		3.444	5.866	6.150	10.251
	Καλυθιών	1.776	2.926	3.234	5.861
	Κοσκινού	1.200	2.245	1.975	3.224
	Ψίνθου	468	695	941	1.166
Δ. Καμείρου		3.596	4.725	5.122	5.145
	Σορωνής	788	913	1.232	1.236
	Απόλλωνα	644	885	1.038	997
	Διμυλιάς	360	471	481	515
	Καλαβάρδας	340	590	488	512
	Πλατανίων	160	270	317	383
	Σαλάκου	584	552	594	607
	Φανών	720	1.044	972	895
Δ. Λινδίων		2.264	2.621	3.461	3.633
	Λίνδου	712	936	904	1.091
	Καλάθου	344	397	526	380
	Λαέρμων	496	360	646	446
	Λάρδου	468	580	912	1.212
	Πυλώνος	244	348	473	504

Δ. Πεταλούδων		6.796	8.391	10.637	12.133
	Κρεμαστής	2.308	2.886	3.604	4.585
	Δαματρίας	448	284	469	477
	Θεολόγου	516	723	773	856
	Μαριτσών	1.072	1.149	1.660	1.766
	Παραδεισίου	1.760	2.230	2.531	2.646
	Παστίδας	692	1.119	1.600	1.803
Δ. Νότιας Ρόδου		3.168	3.316	4.455	4.313
	Γενναδίου	408	202	542	655
	Απολακκιάς	544	620	647	415
	Αρνίθας	196	410	302	310
	Ασκληπείου	368	340	650	673
	Βατίου	280	240	375	188
	Ιστρίου	220	270	357	485
	Καπαβίας	556	424	603	590
	Λαχανιάς	156	200	346	341
	Μεσσαναγρού	284	240	322	330
	Προφίλιας	156	370	311	326
Δ. Ιαλυσού		3.440	6.926	7.193	10.107
	Ιαλυσού	3.440	6.926	7.193	10.107

Πίνακας 2.2 : Μόνιμος Πληθυσμός στα Δημοτικά Διαμερίσματα (πηγή: ΕΣΥΕ, 2001)

Η Ρόδος εντάσσεται σε μια ευρύτερη περιοχή, η οποία καλείται Περιφέρεια Νοτίου Αιγαίου, και η οποία αντιπροσωπεύει το 4% της συνολικής έκτασης της χώρας και συγκεντρώνει το 2,5% του συνολικού πληθυσμού με βάση την τελευταία απογραφή της ΕΣΥΕ.

2.3 Τομείς Οικονομίας

2.3.1 Πρωτογενής Τομέας Παραγωγής

Η Χωροταξική Μελέτη που έγινε έδειξε ότι το σύνολο της γεωργικής γης είναι 65.000 στρέμματα, εκ των οποίων το 38% περίπου αφορά αρδευόμενες κηπευτικές καλλιέργειες. Η αρδευόμενη παραγωγική γεωργική γη θεωρείται κατά προτεραιότητα προστατευόμενη εκτός αν γνωμοδοτήσουν διαφορετικά και κατά περίπτωση οι αρμόδιες Διευθύνσεις του Υπουργείου Γεωργίας. Δεδομένου ότι η γεωργική παραγωγή φαίνεται να βρίσκεται σε οριακά επίπεδα από άποψη απόδοσης και απασχόλησης με βάση τα σημερινά

δεδομένα και τις διαπιστωμένες τάσεις, θεωρείται ότι σε πολλές περιπτώσεις η δυνατότητα διαφύλαξης της μη παραγωγικής γεωργικής γης και οι δυνατότητες αξιοποίησης της, μπορούν να αποτελέσουν κατά περίπτωση αντικείμενο διαπραγμάτευσης μεταξύ των τουριστικών επενδυτών και των ιδιοκτητών αυτής της γης.

2.3.2 Δευτερογενής Τομέας Παραγωγής

Η πλειοψηφία των μεταποιητικών - βιοτεχνικών καταστημάτων (65%) και των απασχολουμένων (74%) βρίσκονται εντός του Δήμου Ρόδου και κυρίως γύρω από το λιμάνι της πόλης. Ο εκσυγχρονισμός και η επέκταση των υφιστάμενων μονάδων αλλά ακόμη και οι δυνατότητες προσπέλασης, καθίστανται ήδη προβληματικές. Οι τάσεις δείχνουν την εγκατάσταση βιομηχανικών και βιοτεχνικών μονάδων κυρίως κατά μήκος και εκατέρωθεν της Εθνικής Οδού Ρόδου - Λίνδου κατά άναρχο τρόπο και σε συνδυασμό με άλλες οικιστικές και εμπορικές χρήσεις, γεγονός που δεν συντελεί στην ανάπτυξη του δευτερογενούς τομέα παραγωγής και κατ' επέκταση στην ενίσχυση της τοπικής οικονομίας.

2.3.3 Τριτογενής Τομέας Παραγωγής

Η οικονομία της Ρόδου βασίζεται κατά κύριο λόγο στον τουρισμό με μερικές από τις καλύτερα οργανωμένες ξενοδοχειακές μονάδες να φιλοξενούνται κατά μήκος των ακτών της που θεωρούνται από τις καλύτερες της Μεσογείου. Τα τελευταία χρόνια υπήρξε μεγάλη οικοδομική δραστηριότητα τόσο σε παραθεριστικές κατοικίες όσο και σε τουριστικά συγκροτήματα γεγονός που συντέλεσε στην αύξηση του κατά κεφαλήν εισοδήματος των κατοίκων. Ωστόσο αν δεν υπάρξει μια οργανωμένη πολεοδομική μελέτη ελλοχεύει ο κίνδυνος για αλλοίωση του φυσικού πλούτου και παρακμή του νησιού. Στη Χωροταξική Μελέτη το νησί της Ρόδου χωρίζεται σε δυο περιφέρειες. Η πρώτη είναι η εδαφική περιφέρεια της Ρόδου η οποία περιέχει την πόλη της Ρόδου (οικονομικό κέντρο) και το υπόλοιπο της περιφέρειας της Ρόδου ενώ η δεύτερη αποτελείται από τις υπόλοιπες περιοχές του νησιού.

Εδαφική Περιφέρεια Ρόδου

Με βάση το πληθυσμιακό κριτήριο και την παραδοχή 120 διανυκτερεύσεις ανά κάτοικο (Μέσος Όρος σήμερα 135 διανυκτερεύσεις ανά κάτοικο) η περιοχή της Εδαφικής Περιφέρειας Ρόδου υπερβαίνει τα σταθερότυπα

παραδοχής κατά 12,5% στις διανυκτερεύσεις, κατά 6,6% στον αριθμό κλινών και κατά 35% στην χρήση παραλίων. Πάντως διαπιστώνονται διαφοροποιήσεις μεταξύ των δεικτών της πόλης της Ρόδου και του υπολοίπου της Εδαφικής Περιφέρειας.

Πόλη της Ρόδου

Σύμφωνα με το πληθυσμιακό κριτήριο, οι ξενοδοχειακές κλίνες της πόλης θα μπορούσαν να διπλασιασθούν αλλά τότε θα απαιτούνταν τριπλάσιο μήκος παραλίων από τις διαθέσιμες για την εξυπηρέτηση μόνο του τουριστικού πλήθους. Ταυτόχρονα, θα δημιουργούνταν η ανάγκη να εξασφαλισθεί τετραπλάσια ποσότητα νερού (από 540.000 m³ /ετησίως σε 2.300.000 m³). Συγχρόνως, θα απαιτούντο 691 στρέμματα αστικών οικοπέδων για την κατασκευή των πιο πάνω κλινών, γεγονός που δεν είναι εφικτό. Επομένως φαίνεται ότι η ξενοδοχειακή υποδομή της πόλης έχει φθάσει σε οριακά επίπεδα και δεν κρίνεται απαραίτητη η δημιουργία νέων ξενοδοχειακών κλινών. Αντίθετα θα πρέπει να αναβαθμιστούν υφιστάμενες μονάδες οι οποίες είτε είναι πεπαλαιωμένες είτε δεν λειτουργούν σήμερα για διάφορους λόγους, κυρίως λόγω χαμηλής κατηγορίας και μεγέθους. Οι προβλεπόμενες για αναβάθμιση κλίνες υπολογίζονται σε 3.000 με 3.500 και οι νεόδμητες σε 600 σε μια έκταση 26 στρεμμάτων γης.

Υπόλοιπο περιφέρειας Ρόδου

Οι παράγοντες που αποδεικνύουν σχετικό κορεσμό σε ξενοδοχειακές κλίνες της περιοχής είναι το πληθυσμιακό κριτήριο (297 διανυκτερεύσεις /κάτοικο) και εντατική χρήση των υφιστάμενων παραλίων (100%). Συνεπώς ισχύουν όσα προτείνονται για την πόλη της Ρόδου με εξαίρεση πιθανόν την περιοχή του "Golf" της Αφάντου, όπου προβλέπεται η ολοκλήρωση και επέκταση των ξενοδοχειακών εγκαταστάσεων (αρχικά 600 περίπου κλίνες και 3.500 προβλεπόμενες με βάση τις πρόσφατες προκηρύξεις του ΕΟΤ). Η ανάγκη αναβάθμισης των μονάδων είναι πολύ μικρότερη απ' ότι για τις μονάδες της πόλης αφού στην πλειονότητά τους πρόκειται για νεότερες κατασκευές (Ιαλυσός, Φαληράκι) με μεγάλη ύπαρξη κλινών ΑΑ' και Α' κατηγορίας. Αντίθετα θα πρέπει να επιδοτηθεί η δημιουργία και η παροχή πρόσθετων τουριστικών υπηρεσιών και κοινόχρηστων χώρων σε υφιστάμενες μονάδες εφόσον υπάρχουν οι διαθέσιμοι χώροι.

Υπόλοιπες περιοχές του νησιού

Οι υπόλοιπες περιφέρειες εμφανίζουν δείκτες πολύ χαμηλότερους τόσο από την άποψη του πληθυσμιακού κριτηρίου, των διανυκτερεύσεων και του αριθμού κλινών όσο και από τον βαθμό έντασης στη χρήση των παραλίων.

2.4 Κλίμα, Μορφολογία και Φυσικό Περιβάλλον

Κλίμα

Το κλίμα της Ρόδου είναι Μεσογειακό, τα καλοκαίρια παρατηρείται έντονη ηλιοφάνεια με σχεδόν μηδενικές βροχοπτώσεις, ενώ το χειμώνα τα καιρικά φαινόμενα είναι ήπια. Στους θερινούς μήνες οι βόρειοι άνεμοι που φυσάνε απαλύνουν την έντονη ζέστη. Η υγρασία είναι έντονη όλες της περιόδους ενώ το φθινόπωρο και το χειμώνα σημειώνονται έντονες βροχοπτώσεις.

Τα κυριότερα στοιχεία του μετεωρολογικού σταθμού της ΕΜΥ στη Ρόδο που έχουν παρατηρηθεί κατά την χρονική περίοδο 1955-1997 φαίνονται ταξινομημένα σε μηνιαίο χρονικό βήμα στον παρακάτω πίνακα:

ΜΗΝΕΣ	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΜΕΣΗ (°C)	ΒΡΟΧΟΠΤΩΣΗ (mm)	ΥΓΡΑΣΙΑ (%)	ΕΝΤΑΣΗ ΑΝΕΜΟΥ (Knots)
Ιανουάριος	11.9	149.6	70.1	7.6
Φεβρουάριος	12.1	105.7	69.1	8.6
Μάρτιος	13.6	75.6	68.7	8.6
Απρίλιος	16.6	27.8	66.5	8.8
Μάιος	20.5	18.6	64.4	8.4
Ιούνιος	24.7	2.3	58.5	10.2
Ιούλιος	26.9	0.4	57.6	11.6
Αύγουστος	27.1	0.2	59.9	11.2
Σεπτέμβριος	24.6	5.8	61.4	9.6
Οκτώβριος	20.8	65.5	67.5	6.6
Νοέμβριος	16.5	94.1	71.4	6.1
Δεκέμβριος	13.4	157.4	72.4	7.3
ΕΤΟΣ	19.1	703.0	65.6	8.7

Πίνακας 2.3: Στοιχεία Σταθμού ΕΜΥ Ρόδου (πηγή ΕΜΥ, 2008)

Μορφολογία

Χαρακτηριστική είναι η ανάπτυξη ενός άξονα ΒΔ – ΝΑ κατεύθυνσης, που χωρίζει το νησί σε δύο τμήματα, δυτικό και ανατολικό. Τα πεδινά τμήματα του νησιού αποτελούν το 25% της συνολικής έκτασης. Η σημαντικότερη πεδινή έκταση του νησιού είναι η πεδιάδα της Απολλακιάς που διασχίζεται από βαθιές κοιλάδες και χαραδρώσεις. Η ενδοχώρα παρουσιάζει μεγάλο ποσοστό δασοκάλυψης σε σχέση με τα υπόλοιπα νησιά του Αιγαίου.

Φυσικό Περιβάλλον

Στη Ρόδο συναντάμε τρεις βασικούς τύπους οικοσυστημάτων: τα δάση, τις θαμνώδεις εκτάσεις και τους υγροτόπους. Τα δάση καλύπτουν ένα ποσοστό 40% της επιφάνειας και αποτελούνται κυρίως από πεύκα και κυπαρίσσια. Οι θαμνώδεις εκτάσεις καλύπτουν το 35% της επιφάνειας και αποτελούνται από δύο τύπους οικοσυστημάτων, τις φυτοκοινωνίες των αείφυλλων πλατύφυλλων και της μακίας βλάστησης που συντίθεται από αραιή θαμνώδη βλάστηση φρύγανων. Οι υψηλές θαμνώδεις εκτάσεις συναντώνται στις υγρές περιοχές στο βόρειο τμήμα του νησιού και σε μεγάλα υψόμετρα.

Το φυσικό περιβάλλον με το μεγαλύτερο ενδιαφέρον στο νησί είναι η Κοιλάδα των Πεταλούδων και η ευρύτερη δασική περιοχή που είναι ενταγμένη στο δίκτυο NATURA. Ο βιότοπος των Πεταλούδων συνθέτει ένα μοναδικό τοπίο με χιλιάδες πεταλούδες πάνω στους κορμούς των δέντρων ιδιαίτερα τους καλοκαιρινούς μήνες όπου αναζητούν δροσιά, υγρασία και τροφή. Στην κοιλάδα, έχουν κατασκευασθεί γεφυράκια, τεχνητές λιμνούλες και δρόμοι που διευκολύνουν την περιήγηση σε αυτό το μοναδικό μέρος το οποίο καλύπτει μια έκταση 6000 τετραγωνικών μέτρων.

Τέλος πρέπει να αναφερθούμε στις Επτά Πηγές που αποτελούν περιοχή ιδιαίτερου φυσικού περιβάλλοντος, διανύονται από τον ποταμό Λουτάνη και το ανάγλυφο της περιοχής ποικίλλει και εναλλάσσεται από λόφους και επίπεδες εκτάσεις.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Γεωλογικές και Υδρογεωλογικές Συνθήκες

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΚΑΙ ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

3.1 Γεωλογικό Πλαίσιο της Ευρύτερης Περιοχής

Στην γεωλογική διαμόρφωση της Νήσου Ρόδου συμβάλλουν 3 γεωλογικές ενότητες, στη στρωματογραφία της παρατηρείται η ύπαρξη αυτόχθονος σειράς από Μεσοζωικούς ασβεστόλιθους, φλύσχη και τεταρτογενείς αποθέσεις και από την εμφάνιση αλλόχθονος επωθημένης σειράς τριών τεκτονικών ζωνών της Πίνδου, του Παρνασσού και του Γαβρόβου.

Η γεωλογική δομή από τα ανώτερα προς τα κατώτερα στρώματα είναι η ακόλουθη:

Ανώτερη αυτόχθονη

ΤΕΤΑΡΤΟΓΕΝΕΣ

Αλλούβια (a) : Προσχώσεις από αργίλους, αμμάργιλους και κροκαλοπαγή. Αποτελούν αποθέσεις των ρεμάτων και των πεδινών περιοχών στις εκβολές των ρεμάτων.

ΠΛΕΙΣΤΟΚΑΙΝΟ

Πόρος (πουρί) (p) : χερσαίες αποθέσεις Ελούβιον, κίτρινες, εύθραυστες, μερικές φορές συμπαγείς και πλευρικά κορήματα.

Σχηματισμός Σγουρός (s) (sp) : εναλλαγές μαργών και χαλαρών κροκαλοπαγών και άμμων. Γκριζοπράσινες μάργες. Επικάθεται ασυμφώνως επί των “λεβαντινίων αποθέσεων”. Μέγιστο πάχος 180 m.

ΝΕΟΓΕΝΕΣ

Λεβαντίνια ιζήματα (Lf) : Εναλλαγές λιμναίων αποθέσεων με ηπειρωτικές αποθέσεις. Αποτελούνται από ποτάμιες αποθέσεις με κροκαλοπαγή, χαλίκια, άμμους και γκριζες μάργες με απολιθώματα. Κάθονται με ασυμφωνία επί του συστήματος Βατί. Πάχος μερικών εκατοντάδων μέτρων.

ΟΜΑΔΑ ΒΑΤΙ

Ψαμμίτης Μεσαναγρού (Ms) : Συνίσταται από ψαμμίτη, αργιλόμαργα και κροκαλοπαγή. Τα ιζήματα αυτά είναι γενετικά συνδεδεμένα με αιωρήματα ρευμάτων. Η κύρια ροή των παλαιορευμάτων ήταν από δυτικά προς ανατολικά. Προς Βορά μεταπίπτει προς τον σχηματισμό “Θαρρί” πάχους 500 - 600m. Στη βάση παρουσιάζει κροκαλοπαγές πάχους 100m με κροκάλες από οφειόλιθο, ασβεστόλιθο και ραδιολαρίτη. Προς τα πάνω μεταπίπτει σε σκοτεινοπράσινη αμμάργίλο, με φακούς κροκαλοπαγών από οφειόλιθους και ψαμμίτες.

Σχηματισμός Θαρρί (Th) : Έχει πάχος 500-600m. Στη βάση παρουσιάζει κροκαλοπαγές πάχους 100m με κροκάλες από οφειόλιθο, ασβεστόλιθο και ραδιολαρίτη. Προς τα πάνω μεταπίπτει σε σκοτεινοπράσινη αμμάργίλο, με φακούς κροκαλοπαγών από οφειόλιθους και ψαμμίτες.

Ρεύματα τέφρας και σποδού Ντάλι (D) : Πυροκλαστική απόθεση από ρυολιθικό μάγμα με πάχος 5 m. Βρίσκονται είτε στη βάση του ψαμμίτη Μεσαναγρού είτε εντός των στρωμάτων της οροφής των μαργών του Αγ. Μηνά.

Μάργες Αγ. Μηνά (Mn) : Μάργες και αργιλώδεις μάργες με ενδιαστρώσεις ψαμμιτών και πάχος 315m.

Κροκαλοπαγές Κοριάτι (Kc) : Κροκαλοπαγές χαλαρό ή μέτρια συγκολλημένο, με κροκάλες οφειόλιθου, ασβεστόλιθου και ραδιολαριτών. Ποτάμια και δελταϊκή απόθεση με πάχος 160 m.

Κατώτερη αυτόχθονη και παρααυτόχθονη ενότητα

Φλύσχης Καταβιάς

Το σύστημα αυτό του φλύσχη έχει μεγάλο πάχος 1500m περικλείει μικροπανίδα από το Ηώκαινο μέχρι και το Κατώτερο Ολιγόκαινο. Διακρίνονται έξι μέλη του Φλύσχη. Από κάτω προς τα πάνω διακρίνονται τα μέλη Σιάνα (**Kf**), Λαέρμα (**Ki**) και Σταφυλία (**Ks**) που αποτελούν συνεχή στρωματογραφική σειρά που κάθετα σε ασυμφωνία στην “ομάδα του Αττάβυρου” και καταλαμβάνουν το κεντρικό μέρος της νήσου από τη Λίνδο μέχρι το όρος Αττάβυρος. Στη Λίνδο παρουσιάζεται ελαφρώς μεταμορφωμένος και χαρτογραφήθηκαν σαν ενιαίος σχηματισμός με την

ονομασία “Κάλαθος μέλος” (**Kx**). Στο νότιο τμήμα υπάρχει μία άλλη σειρά φλύσχη με δύο μέλη : Το μέλος Καράκια (**Kk**) και το ανώτερο μέλος ”μεγάλο Κάλαβρο” (**Km**). Εμφανίζονται καλυπτόμενα σε μερικές θέσεις από την ανώτερη σειρά του φλύσχη των Μελών Σιάνα, Λαέρμα και Σταφυλία.

ΟΜΑΔΑ ΑΤΑΒΥΡΟΥ

ΗΩΚΑΙΝΟ

Μαργαϊκός ασβεστόλιθος Κακόσκαλας (Km) : Μαργαϊκός ασβεστόλιθος και μάργα πάχους 80m με πυριτικούς κονδύλους. Εντός του σχηματισμού αυτού υπάρχει ενδιάστρωση νουμουλιτοφόρου ασβεστόλιθου.

ΚΡΗΤΙΔΙΚΟ – ΗΩΚΑΙΝΟ

Ασβεστόλιθος Ακραμύτη (Ak) : Περικλείει και στρώσεις με πυριτικούς κονδύλους. Λεπτοπλακώδης έως μεσοπλακώδης ασβεστόλιθος. Πάχος 480 m ενώ στην περιοχή του Αττάβυρου έχει πάχος 800 m.

ΙΟΥΡΑΣΙΚΟ

Πυριτικοί Ασβεστόλιθοι Ατεμάρη (An) : Τεφρός μαργαϊκός ασβεστόλιθος με ενδιάμεσα στρώματα πυρίτη και πάχος 170 m.

Αλλόχθονη ενότητα

ΣΕΙΡΑ ΠΙΝΔΟΥ

ΟΜΑΔΑ ΠΡΟΦΗΤΗ ΗΛΙΑ ΤΡΙΑΔΙΚΟ – ΙΟΥΡΑΔΙΚΟ

Ασβεστόλιθοι Μαλώνας (M) : Λεπτοπλακώδης ασβεστόλιθος με πυριτικούς κονδύλους και ραδιολαρίτες. Ηλικία Κάτω Λιάσιο έως Σενώνιο. Πάχος 200 m.

Πυριτικός ασβεστόλιθος Ελαφόκαμπου (E) : Λεπτοστρωματώδης ασβεστόλιθος χρώματος τεφρού , πορφυρού, ερυθρού και κίτρινου και δολομιτικός ασβεστόλιθος με πυριτικούς κονδύλους. Ηλικία Λιάσιον. Πάχος 250 m.

ΣΕΙΡΑ ΠΑΡΝΑΣΣΟΥ

ΠΑΛΑΙΟΚΑΙΝΟ – ΗΩΚΑΙΝΟ

Φλύσχης Αρχιπόλεως (Ar) : Στο ανώτερο και μέσο τμήμα κυριαρχεί τεφροπράσινος ψαμμίτης ενώ στο κατώτερο τμήμα κυριαρχούν κοκκινωπές και καστανές μάργες. Πάχος 100m.

ΤΡΙΑΔΙΚΟ - ΗΩΚΑΙΝΟ ΟΜΑΔΑ ΑΡΧΑΓΓΕΛΟΥ

Ασβεστόλιθος Σάλακα (Sl) (Sa) : Ασβεστόλιθοι και δολομίτες. Πάχος 700m.

Ασβεστόλιθος Κουμούλι (K) : Ασβεστόλιθοι λεπτοπλακώδεις. Περιέχουν ενδιαστρώσεις μαργαϊκής αργίλου καστανοπράσινης. Πάχος 55m.

ΣΕΙΡΑ ΓΑΒΡΟΒΟΥ – ΤΡΙΠΟΛΕΩΣ

ΚΡΗΤΙΔΙΚΟ

Ασβεστόλιθος Λίνδου (L) : Ασβεστόλιθοι παχυστρωματώδεις κρυσταλλικοί. Μέγιστο πάχος 450m. Περιέχουν εις το μέσον ενδιαστρώσεις μικριτικού ασβεστολίου πάχους 40m.

ΠΥΡΙΓΕΝΗ ΠΕΤΡΩΜΑΤΑ ΙΟΥΡΑΣΙΚΟ – ΚΡΗΤΙΔΙΚΟ

Διαβάσες και ραδιολαρίτες Κοπριάς (Kd) : Διαβάσες σκούρου καφέ χρώματος και ραδιολαρίτες με ξενόλιθους από αμφιβολίτες, γάββρους, σερπεντίνες και πολύμικτα κροκαλοπαγή καθώς και ασβεστόλιθους.

Οφιόλιθοι (O) : Αποτελείται από πράσινο γάββρο, διαβάση και σερπεντίνη.

3.2 Υδρολιθολογία

Η σύνθετη και περίπλοκη λιθογεωλογία της Ρόδου οφείλεται κατά κύριο στην μεγάλη έκταση και στο πλήθος των γεωλογικών σχηματισμών αλλά και στην τεκτονική διάρθρωση με τις πτυχωσιγενείς ορογενετικές κινήσεις, τις έντονες τεκτονικές διαρρήξεις και τις επωθήσεις τριών αλλόχθονων ζωνών με αποτέλεσμα τη δημιουργία μεγάλων διαφοροποιήσεων, οι οποίες παρατηρούνται ακόμα και μέσα στον ίδιο γεωλογικό σχηματισμό. Τα

παραπάνω καθιστούν δύσκολο το έργο της κατάταξης των σχηματισμών σε κατηγορίες όσον αφορά την υδροπερατότητα τους.

Μια γενική κατάταξη των στρωματογραφικών ενοτήτων θα μπορούσε να είναι η κάτωθι:

Τεταρτογενές: Αποτελούνται από προσχώσεις από αργίλους, αμμάργιλους και κροκαλοπαγή. Παρουσιάζονται σε μικρό πάχος που δεν ξεπερνά τα 20 μ και θεωρείται ημιπερατός έως αδιαπέρατος σχηματισμός.

Σύστημα λεβαντινίων ιζημάτων: Εναλλαγές κροκαλοπαγών, ψαμμιτών και μαργών μεγάλου πάχους. Διαπερατός σχηματισμός κατά τα κροκαλοπαγή του μέρη και σχεδόν αδιαπέρατος κατά το μαργαϊκό μέρος.

Σχηματισμός Σγουρός: Εναλλαγές χαλαρών κροκαλοπαγών και άμμων με αργιλικά πετρώματα.

Σύστημα Βάτι: Εναλλαγές μαργών με ψαμμίτες και κροκαλοπαγή. Γενικά αδιαπέρατα πετρώματα εκτός των κροκαλοπαγών ενδιαστρώσεων.

Εκρηξιγενή πετρώματα: Αποτελούνται από σύστημα διαβασών, ραδιολαριτών και οφιόλιθων. Γενικά θεωρούνται αδιαπέρατα πετρώματα. Πιθανόν να παρουσιάζουν δευτερογενή ρηξιγενή διαπερατότητα.

Φλύσχη με κροκαλοπαγείς, αργιλοκροκαλοπαγείς και στρώσεις. Ουσιαστικά παρουσιάζεται σαν υδατοστεγανός σχηματισμός και είναι διαπερατός μόνο κατά τα κροκαλοπαγή μέρη του.

Ασβεστόλιθοι Λίνδου: Παρουσιάζουν έντονη καρστικοποίηση σε τέτοιο βαθμό ώστε έχουν δημιουργηθεί και σπήλαια.

Ασβεστόλιθοι Προφήτου Ηλία: Επίσης ασβεστόλιθοι που παρουσιάζουν έντονη καρστικοποίηση.

Ασβεστόλιθοι Αρχαγγέλου: Ασβεστόλιθοι επωθημένοι επί των στρωμάτων του φλύσχη που στο δάπεδο του στρώματος εμφανίζονται ισχυρές υδροφορίες.

Φλύσχη Κατταβιάς: Σε γενικές γραμμές με πολύ χαμηλή διαπερατότητα λόγω των ψαμμιτικών ενδιαστρώσεων.

Ασβεστόλιθοι του όρους Αττάβυρου: Καρστικοποιημένοι ασβεστόλιθοι. Εκφορτώνουν κατευθείαν στη θάλασσα.

Αναλυτικά οι επιμέρους στρωματογραφικοί ορίζοντες κατατάσσονται ως προς την υδροπερατότητα τους ως κάτωθι :

Σχηματισμοί με περατότητα ελάχιστη έως πολύ χαμηλή (συντελεστής κατείσδυσης $\Sigma.K. \leq 3 \%$)

Διαβάσες και ραδιολαρίτες Κοπριάς : (**Kd**)
Οφιόλιθοι : (**O**)

Σχηματισμοί με περατότητα πολύ χαμηλή έως χαμηλή ($3 \% < \Sigma.K. \leq 8 \%$)

Λεβαντίνια ιζήματα : (**lf**)
Ψαμμίτης Μεσαναγρού : (**Ms**)
Μάργες Αγ. Μηνά : (**Mn**)
Σχηματισμός Θαρί : (**Th**)
Φλυσχικό μέλος μεγάλο Κάλαβρο : (**Km'**)
Φλυσχικό μέλος Καράκια : (**Kk**)
Φλυσχικό μέλος Σταφυλία : (**Ks**)
Φλυσχικό μέλος Λαέρμα : (**Kl**)
Φλυσχικό μέλος Σιάνα : (**Kf**)
Φλυσχικό μέλος Κάλαθος μέλος : (**Kx**)
Πυριτικοί Ασβεστόλιθοι Ατεμάρη : (**An**)
Φλύσσης Αρχιπόλεως : (**Ar**)

Σχηματισμοί με περατότητα χαμηλή έως μέτρια ($8 \% < \Sigma.K. \leq 20 \%$)

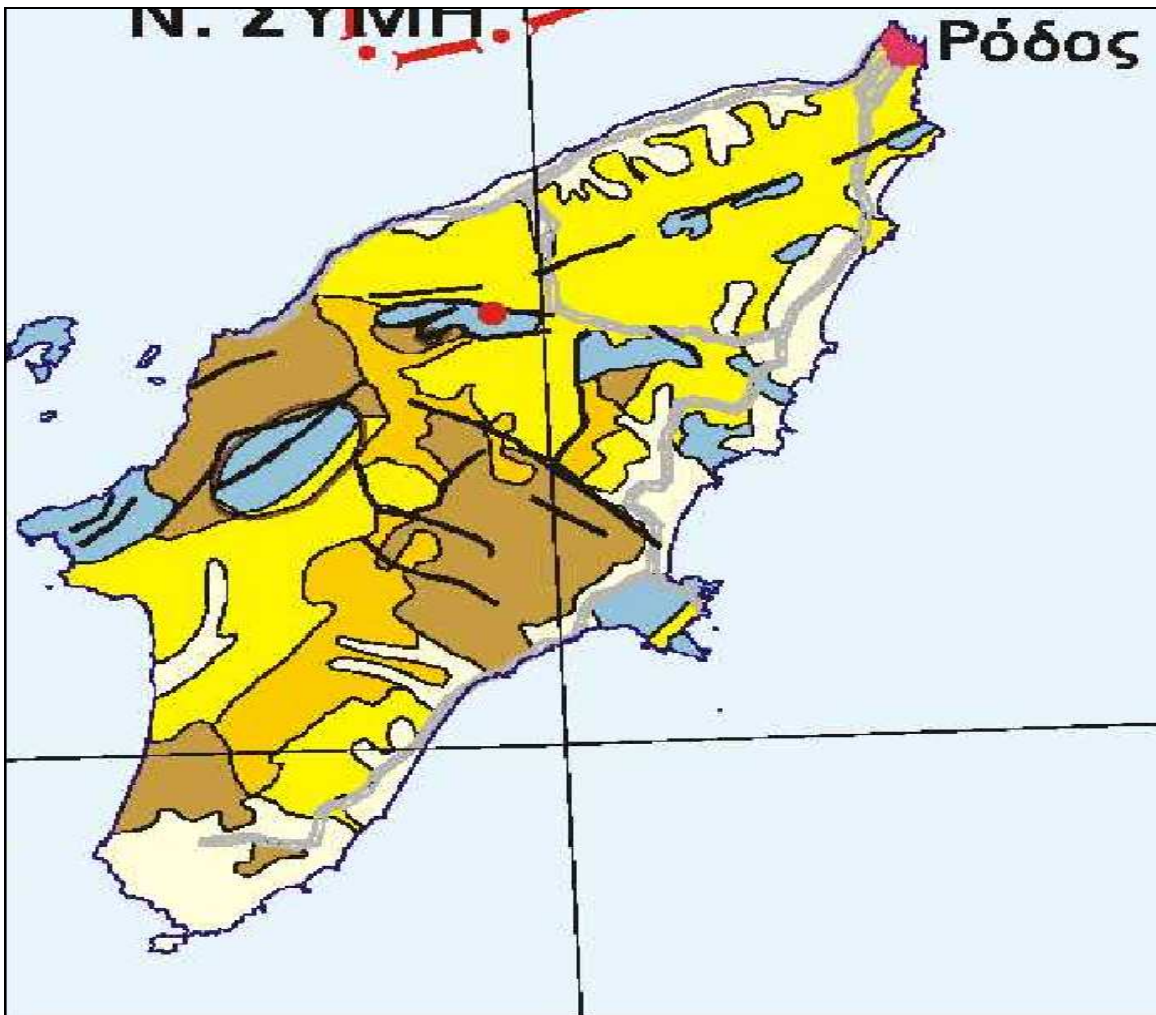
Αλούβια : (**a**)
Μάργες, άμμοι, χάλικες Σχηματισμού Σγουρού : (**s**)
Λεβαντίνια ιζήματα : (**Lf**)
Ασβεστόλιθος Λίνδου : (**L**)
Ασβεστόλιθοι Μαλόνας : (**M**)

Σχηματισμοί με περατότητα μέτρια έως υψηλή ($\Sigma.K > 20 \%$)

Πώρος (πουρί) : (**p**)
Πορώδης ασβεστόλιθος Σχηματισμού Σγούρου : (**sp**)

Κροκαλοπαγές Κοριάτι : **(Κε)**
Πυριτικός ασβεστόλιθος Ελαφόκαμπου : **(Ε)**
Ασβεστόλιθος Σάλακα : **(SI)**
Ασβεστόλιθος Κουμούλι : **(Κ)**
Κροκαλοπαγές Κοριάτι : **(Κε)**

Στη συνέχεια παρατίθεται απόσπασμα του υδρολιθολογικού χάρτη του Υπουργείου Ανάπτυξης (Διεύθυνση Υδατικού Δυναμικού), “Σχέδιο Προγράμματος Διαχείρισης των Υδατικών Πόρων της Χώρας”. Συντάχθηκε από τους Γεωλόγους Χ. Σμυρνιώτη, Β. Περλέρο, Λ. Γεωργαλά σε κλίμακα 1:1.000.000.



- την ενδιάμεση ενότητα από 3 διακριτές επωθήσεις

A) την ανώτερη επωθημένη σειρά της ομάδας του Προφήτη Ηλία. Αποτελείται από ασβεστόλιθους του σχηματισμού Μάλονας της ζώνης της Πίνδου

B) την ενδιάμεση επωθημένη σειρά από τους ασβεστόλιθους της Λίνδου που ανήκουν στην ζώνη Γαβρόβου - Τριπόλεως φλύσχη Αρχιπόλεως και

Γ) την κατώτερη επωθημένη σειρά της ομάδας του Αρχαγγέλου που αποτελείται από τον φλύσχη Αρχιπόλεως και τους ασβεστολίθους του Σάλακα και Κουμούλι που ανήκουν στην ζώνη Παρνασσού

- την κατώτερη αυτόχθονη ενότητα που αποτελείται από τον φλύσχη Καταβίας και τα ανθρακικά πετρώματα της ομάδας του Αττάβουρου.

Οι τεκτονικές αυτές ενότητες συνδέονται με 3 διακεκριμένες τεκτονικές φάσεις:

- Την μεγάλης εκτάσεως τεκτονική φάση συμπιεστικών δυνάμεων που δημιούργησαν πτυχωσιγενείς δομές, έντονη ρηγμάτωση και κυρίως προξένησαν την μετανάστευση των επωθημένων τριών ζωνών επί των πετρωμάτων της αυτοχθόνου σειράς. Τα ρήγματα της φάσεως αυτής δεν επηρέασαν τα πετρώματα της ανώτερης ενότητας.

- Μία τεκτονική φάση που επηρέασε τα πετρώματα της ομάδας ΒΑΤΙ αλλά όχι όμως και τα λεβαντίνια ιζήματα.

- Και τέλος μία φάση ορογεννετικών κινήσεων που επηρέασε όλα τα πετρώματα της νήσου (εκτός βεβαίως από τις αλλουβιακές σύγχρονες αποθέσεις).

3.4 Σεισμικότητα

Η Ρόδος όπως και η ευρύτερη περιοχή των Δωδεκανήσων χαρακτηρίζονται από πολύ υψηλή σεισμικότητα. Ο Εγκέλαδος έχει χτυπήσει αρκετές φορές τη Ρόδο και παρακάτω παρουσιάζονται οι μεγαλύτερες δονήσεις που έχει δεχτεί το νησί. Το 1481 εκδηλώθηκε πολύ ισχυρός σεισμός που προκάλεσε εκτεταμένες καταστροφές ενώ τη καταστροφή συμπλήρωσε το ισχυρό τσουνάμι που έπληξε το λιμάνι και την παράκτια ζώνη της πόλης της Ρόδου. Ακολούθησε ο σεισμός της 26ης Ιουνίου 1926 με μέγεθος 7,5 Ρίχτερ και ο οποίος έγινε αισθητός σε όλη την Α. Μεσόγειο και κατάστρεψε ολοκληρωτικά τον Αρχάγγελο και τον Πυλώνα της Ρόδου σκοτώνοντας 4 ανθρώπους και επιφέροντας σοβαρές καταστροφές σε πολλά μέρη του

νησιού. Τελευταίο μεγάλο φαινόμενο που έπληξε το νησί ήταν στις 25 Απριλίου 1957 με μέγεθος 7 Ρίχτερ. Οι δύο τελευταίες σεισμικές δονήσεις δεν προκάλεσαν τσουνάμι λόγω του μεγάλου βάθους της εστίας του. Στην διάρκεια της περιόδου 1903-2006 σημειώθηκαν σεισμικές δονήσεις με μέγεθος μεγαλύτερο των 6.0 βαθμών της κλίμακας Richter σε διάφορες γεωγραφικές θέσεις της ευρύτερης περιοχής των Δωδεκανήσων που επηρέασαν άμεσα τη Ρόδο.

3.5 Υδρογεωλογία

ΒΟΡΕΙΑ ΡΟΔΟΣ

Στο νησί παρατηρούνται δύο τύποι υδροφορίας:

1) Εντός των προσχώσεων των παρόχθιων σχηματισμών και των Λεβαντινίων στρωμάτων αναπτύσσεται ασθενής υδροφορία λόγω της παρουσίας αργίλων και μαργών. Αντλήσεις εντός του σχηματισμού αποδίδουν συνήθως 10 έως 15 m³/h. Τα στρώματα αυτά εγκλείουν ενστρώσεις κροκαλοπαγών και ψαμμιτών που φιλοξενούν υδατικά αποθέματα τα οποία υδρομαστεύονται με πηγάδια και γεωτρήσεις. Σε περιοχές με έντονη τουριστική παρουσία κατά τους θερινούς (Φαληράκι) οι υπεραντλήσεις για την κάλυψη των αναγκών σε νερό οδήγησαν σε πτώση της στάθμης σε αρνητικά υψόμετρα με αποτέλεσμα τη διείσδυση της θάλασσας και την υφαλμύρωση των υδάτων.

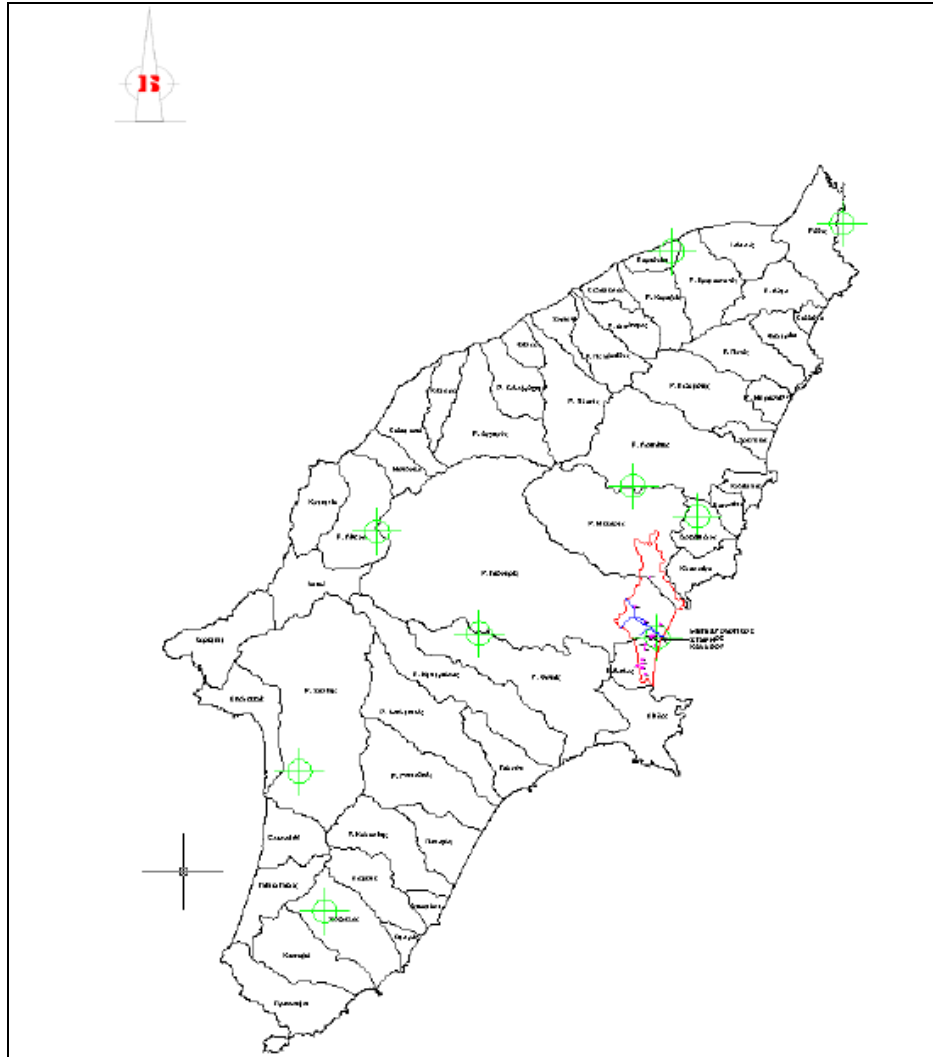
2) Στα ασβεστολιθικά πετρώματα των αλλόχθονων σειρών συναντώνται μεγάλες υδροφορίες οι οποίες μπορούν να αποδώσουν σημαντικές παροχές (περιοχή Αρχάγγελου, Προφήτη Ηλία). Οι γεωτρήσεις που ανοίχτηκαν στο όρος Αττάβυρο και στην περιοχή της Λίνδου έδειξαν την άμεση επικοινωνία των ασβεστόλιθων με την θάλασσα γεγονός που καταδεικνύει τον κίνδυνο υφαλμύρωσης. Στην περιοχή του Αρχάγγελου και του Προφήτη Ηλία οι ασβεστόλιθοι παρουσιάζουν πολύ ισχυρή υδροφορία, δημιουργούν πηγές επαφής ή μεταγγίζουν τα νερά τους στα λεβαντίνια πετρώματα και είναι σε θέση να δώσουν παροχές της τάξεως των 200 m³/h.

ΝΟΤΙΑ ΡΟΔΟΣ

Η περιοχή της Νότιας Ρόδου διαθέτει υδρογεωλογική ομοιομορφία καθώς αποτελείται από στεγανές και εν μέρει ημιπερατές νεογενείς ιζηματογενείς αποθέσεις με κυρίαρχη παρουσία των αργιλικών πετρωμάτων και

περιορισμένη εμφάνιση ψαμμιτικών και κροκαλοπαγών στρώσεων περιορισμένης έκτασης.

Στη περιοχή της Νότιας Ρόδου η υδρογεωλογία σε συνδυασμό με τις χαμηλές βροχοπτώσεις δεν ευνοούν τον σχηματισμό υπόγειων υδροφόρων οριζόντων. Αντίθετα οι επιφανειακές απορροές είναι αυξημένες και συμβαίνουν σε μικρό χρονικό διάστημα ύστερα από την έναρξη της βροχόπτωσης λόγω της γρήγορης στράγγισης την οποία διευκολύνει η γεωμορφολογία της περιοχής. Το υδρογραφικό δίκτυο παρουσιάζει δενδριτική μορφή στις περιοχές αδιαπέρατων πετρωμάτων (φλύσχης, μαργαϊκά πετρώματα). Ολοκληρώνοντας, εξαίρεση αποτελούν οι αλλουβιακοί υδροφορείς του Ασκληπιού και του Γενναδίου που παρουσιάζουν αξιόλογη υδροφορία.



Εικόνα 3.2: Υδρογεωλογικές λεκάνες Ν. Ρόδου (πηγή: Π. Γιαννουλόπουλος, 2008)

3.6 Εντοπισμός Παράκτιου Υδροφορέα

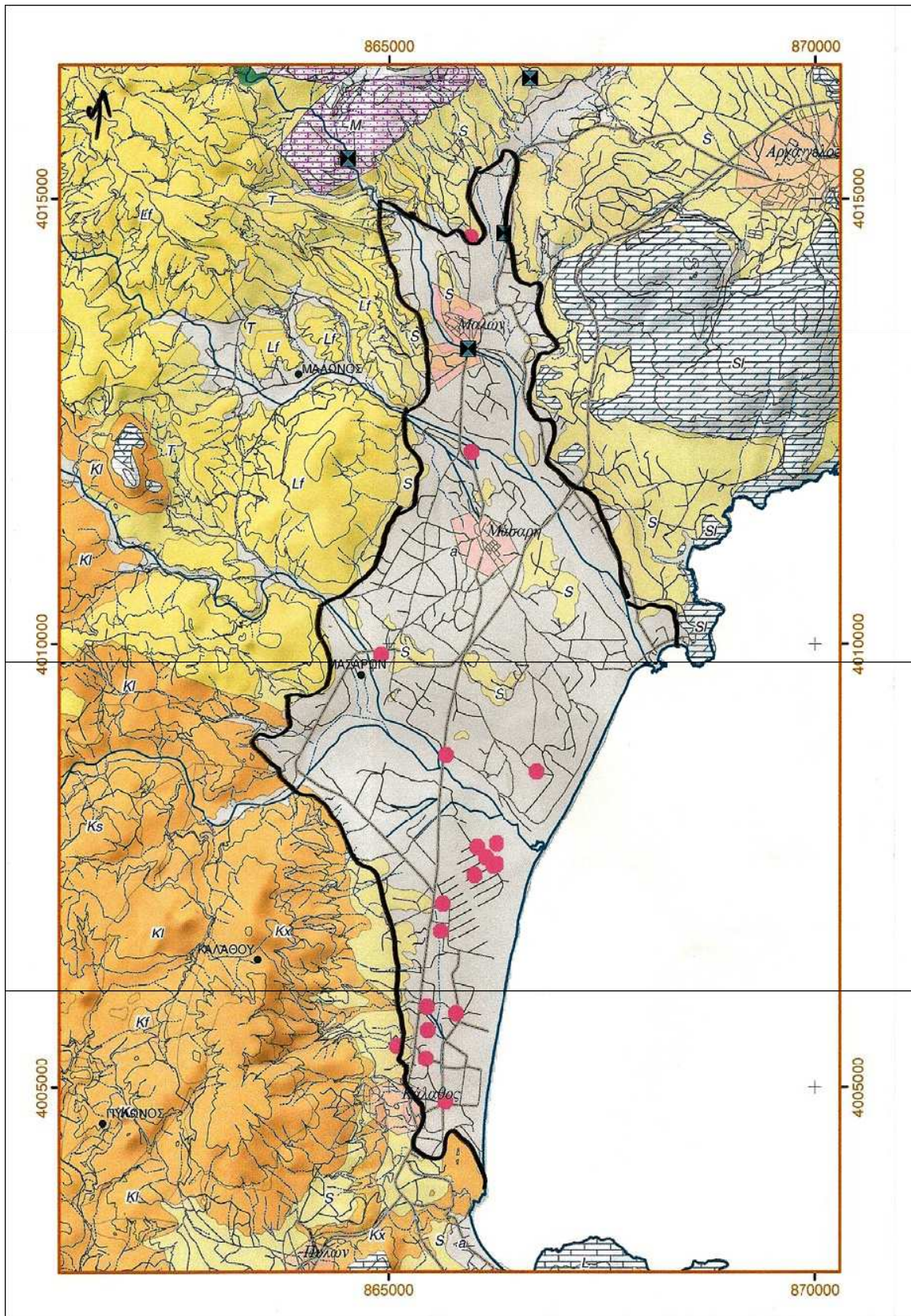
3.6.1 Πλευρική Οριοθέτηση Υδροφορέα

Η περίπτωση που εξετάζουμε αφορά ένα φρεάτιο προσχωματικό υδροφορέα ο οποίος αποτελείται από αποθέσεις στερεών υλικών από τα νερά του χειμάρρου Γαδουρά.

Με βάση τη γεωλογική ομαδοποίηση του χάρτη που παραθέτουμε παρακάτω και όσων αναφέρουμε σε προηγούμενες παραγράφους του κεφαλαίου, ο υδροφορέας οριοθετήθηκε πλευρικά (Εικόνα 3.3):

ΥΠΟΜΝΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΚΟΥ ΧΑΡΤΗ

□ (Is). Υλικά κατολισθήσεων
■ (talus). Πλευρικά κορήματα
■ (fans). Αλλουβιακά ριπίδια
□ (a). Πρόσφατες αλλουβιακές και παράκτες αποθέσεις
□ (el). Ελλούβιακές αποθέσεις
□ (p). Πύρος: Τύπος ασβεστοφλοιώδους παλαιοεδάφους
□ (sp). Σχηματισμός "Σγούρου": Παρώδεις ασβεστόλιθοι (Coquina)
□ (S). Σχηματισμός "Σγούρου": Γκριζοπράσινες μάργες με άμμους και χαλίκια
□ (Lf). Λεβαντίνια ιζήματα: Ποταμοχειμάρρια κροκαλοπαγή, χάλικες άμμοι και ιλυώδης μάργα
□ (Ll). Λεβαντίνια ιζήματα: Λιμναιές μάργες άμμοι και χάλικες
□ (Ms). Ψαμμίτης "Μεσαναγρού". Από λλιθικό ψαμμίτη, αργιλική μάργα και πολύμικτο κροκαλοπαγές
□ (Mm). Μάργα του "Αγ. Μηνά": Μέργα με λεπτές ψαμμιτικές και ιλυώδεις παρεμβολές
□ (Kc). Κροκαλοπαγή "Κοριάτη", μέτρια συγκολλημένο προερχόμενο από ποτάμιο δελταϊκό περιβάλλον
□ (T). Σχηματισμός "Θαρή": Στη βάση πολύμικτο κροκαλοπαγές. Μεταβαίνει σε αμμώδη άργιλο προς τα πάνω
□ (Kp'). Φλύσχης Καταβιάς: μέλος "Μεγάλο Κάλαβρο"
□ (Kk). Φλύσχης Καταβιάς: μέλος "Καράκια"
□ (Ks). Φλύσχης Καταβιάς: μέλος "Σταφύλια"
□ (Kl). Φλύσχης Καταβιάς: μέλος "Λαέρμα"
□ (Kf). Φλύσχης Καταβιάς: μέλος "Σιάνα"
□ (Kx). Φλύσχης Καταβιάς: μέλος "Κάλαθος"
□ (Km). Μαργαϊκός ασβεστόλιθος "Κακοσκάλας"
□ (Ak). Ασβεστόλιθος του "Ακραμύτη"
□ (Am). Σειρά "Μέρμικα": καλά εστρωμένος πυριτικός ασβεστολουπίτης (μικριτικός ασβεστόλιθος)
□ (An). Πυριτικός υβευιτύλιθος του "Αγγκεμύμι"
□ (M). Σχηματισμός "Μανόλας". Ασβεστόλιθοι με πυριτικούς κονδύλους, μάργα και πυριτικούς ασβεστόλιθους
□ (E). Πυριτικός ασβεστόλιθος του "Ελαφόκαμπου": Ασβεστόλιθος με ενστρωσεις δολομιτικών ασβεστόλιθων
□ (Ar). Φλύσχης της Αρχήπολης
□ (Sl). Ασβεστόλιθοι του "Σαλάκα". Συμπαγής ασβεστόλιθος, δολομίτης και δολομιτικός ασβεστόλιθος
□ (Sa). Σειρά Αλίμνιας: Ασβεστόλιθοι με παρεμβολές σχιστολίθων
□ (K). Σχηματισμός Κουμούλη: Κρυσταλλικός ασβεστόλιθος με παρεμβολές σχιστολίθων
□ (L). Ασβεστόλιθος Λίνδου. Κρυσταλλικός ασβεστόλιθος με παρεμβολές μαργαϊκού ασβεστόλιθου
□ (Kd). Διαβάσεις - ραδιολαρίτες "Κοπριάς".
□ (O). Οφιόλιθοι: πράσινοι γάβροι, διαβάσεις και σερπεντίνιτες



Εικόνα 3.3: Τμήμα γεωλογικού χάρτη με τον υδροφορέα μελέτης (Π. Γιαννουλόπουλος, 2009)

α) Βάσει φυσικών ορίων

Τα φυσικά εξωτερικά όρια είναι καλώς προσδιορισμένες γεωλογικές ενότητες οι οποίες επηρεάζουν μόνιμα την υπόγεια ροή (Kresic N., 2006). Ο υπόγειος υδροφόρος ορίζοντας που εξετάζεται γειτνιάζει με πρακτικά αδιαπέρατους γεωλογικούς σχηματισμούς, οι οποίοι εμφανίζονται στο τμήμα δυτικά του υδροφορέα όπου κυριαρχεί ο φλύσχης Καταβιάς με ελάχιστη διαπερατότητα λόγω των ψαμμιτικών ενδιαστρώσεων ενώ στο υπόλοιπο κομμάτι υπάρχει η παρουσία των λεβαντινίων ιζημάτων του σχηματισμού Σγουρού με έντονη παρουσία αργιλικών σχηματισμών και στο οποίο δεν πραγματοποιείται σημαντική ροή νερού. Από τους γεωλογικούς σχηματισμούς που συναντάμε διαπιστώνουμε ότι ο υδροφορέας μας είναι αδιαπέρατος με εξαίρεση το βορειοανατολικό τμήμα όπου συναντάται ο σχηματισμός ασβεστόλιθοι του Σάλακα και ο οποίος έρχεται σε άμεση επαφή με τις αλλουβιακές αποθέσεις. Στη θέση αυτή πιθανόν ο υδροφορέας να δέχεται πλευρική τροφοδοσία από τον καρστικό υδροφορέα των ασβεστόλιθων, ωστόσο πρόκειται για θέση πολύ περιορισμένης έκτασης και η τροφοδοσία θεωρείται αμελητέα για τις ανάγκες του μοντέλου που θα εφαρμοστεί για τη προσομοίωση. Συνοψίζοντας μπορούμε να πούμε ότι ο υδροφορέας μας πλευρικά περιβάλλεται από αδιαπέρατους σχηματισμούς με εξαίρεση την επιφάνεια που έρχεται σε επαφή με τη θάλασσα (σταθερού υδραυλικού φορτίου).

β) Βάσει υδραυλικών ορίων

Τα υδραυλικά όρια προκύπτουν από το δίκτυο ροής και μπορούν να τοποθετηθούν κατά μήκος επιλεγμένων γραμμών ροής ή κατά μήκος ισοδυναμικών ή πιεζομετρικών γραμμών. Συνεπώς τα υδραυλικά όρια αποτελούν μη μόνιμες δομές οι οποίες μεταβάλλονται χρονικά. Ο προσδιορισμός της θέσης τους αν και γίνεται με βάση τα δίκτυα ροής, εντούτοις τοποθετείται τεχνητά από τον ερευνητή και έτσι αποτελεί υποκειμενικό στοιχείο.

Με βάση τα παραπάνω είναι ξεκάθαρο ότι τα φυσικά όρια είναι προτιμότερα από τα υδραυλικά. Παρόλα αυτά τα υδραυλικά όρια μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την πλευρική οριοθέτηση του υδροφορέα σε περίπτωση που τα φυσικά όρια δεν είναι προσδιορίσιμα.

3.6.2 Πιεζομετρία του υδροφορέα

Οι διακυμάνσεις της πιεζομετρικής στάθμης είναι ενδεικτικές του ρυθμού φυσικής αποστράγγισης και επαναπλήρωσης των υπόγειων υδροφόρων οριζόντων καθώς και του ρυθμού της εκμετάλλευσης των υδατικών τους αποθεμάτων από ανθρώπινες ενέργειες. Οι μεγάλες διακυμάνσεις της στάθμης κατά τη διάρκεια των θερινών υδρολογικών εξαμήνων φανερώνουν τον υπέρμετρο βαθμό εκμετάλλευσης τους πέρα από αυτόν που επιτρέπουν τα υδραυλικά τους χαρακτηριστικά. Αυτή η κατάσταση οδηγεί στη συνεχή πτώση της πιεζομετρικής τους στάθμης στο πέρασ συνεχών υδρολογικών ετών και κατ' επέκταση στην υποβάθμισή των ποιοτικών και ποσοτικών χαρακτηριστικών τους.

Στο πίνακα που ακολουθεί παρατηρούμε τις θέσεις και τις σταθμημετρήσεις των γεωτρήσεων και πηγαδιών της περιοχής (πηγή: Δρ. Υδρογεωλόγος του Ι.Γ.Μ.Ε. Παναγιώτης Γιαννουλόπουλος).

Όνομα Υδροσημείου	X	Y	Z	Βάθος Στάθμης	Πιεζομετρία
Γ102	866029,190	4007705,570	4,33	1,12	3,21
Γ103	866261,550	4007517,020	3,22	3,84	-0,62
Γ103A	866220,220	4007498,560	3,59	4,75	-1,16
Γ104	866260,520	4007746,260	3,7	4,15	-0,45
Γ121	865628,330	4007072,560	6,33	11,84	-5,51
Γ131	865960,180	4012150,790	44,73	26,51	18,22
Γ132	864904,800	4009876,040	25,94	20,995	4,945
Γ181	865454,970	4005647,250	6,67	9,52	-2,85
Γ47	865659,190	4004839,640	3,91	4,14	-0,23
Γ49	865443,840	4005913,210	10,55	9,5	1,05
Γ50	865608,030	4006757,920	7,4	7,47	-0,07
Γ52	866133,200	4007591,450	3,84	1,15	2,69
Γ53	865092,970	4005471,310	23,47	23,13	0,34
Γ54	865432,780	4005329,000	5,11	4,48	0,63
Φ2	866319,000	4006990,000	2	5,525	-3,525
Φ7	866732,770	4008563,380	4,57	3,88	0,69
Φ9	865662,740	4008751,650	11,92	5,87	6,05

Πίνακας 3.1: Συντεταγμένες και απόλυτη στάθμη γεωτρήσεων και πηγαδιών

Στον πίνακα 3.1 παρατηρούμε ότι από τις 17 σταθμημετρήσεις οι 8 παρουσιάζουν αρνητικό πιεζομετρικό φορτίο και βρίσκονται στο νότιο τμήμα του υδροφορέα γεγονός που ευνοεί την εισροή της θάλασσας και όπως θα δούμε και στο 7^ο κεφάλαιο είναι αυτές που πλήττονται περισσότερο από την επέκταση του μετώπου της υφαλμύρωσης.

Οι διακυμάνσεις της πιεζομετρικής γραμμής οφείλονται σε φυσικές και τεχνητές αιτίες. Τα αίτια των φυσικών διακυμάνσεων εντοπίζονται στις μεταβολές των βροχοπτώσεων, της εξατμισοδιαπνοής, της ατμοσφαιρικής πίεσης, της παλίρροιας και οι οποίες προκαλούν κυκλικές φυσικές διακυμάνσεις σε αντίθεση με τους σεισμούς, τις καθιζήσεις, τις κατολισθήσεις και τις κατακρημνίσεις οι οποίες προκαλούν τυχαίες φυσικές διακυμάνσεις. Τα αίτια των τεχνητών διακυμάνσεων αφορούν ανθρώπινες παρεμβάσεις ευρείας κλίμακας, όπως η κατασκευή μεγάλων φραγμάτων, υπερεντατικών αντλήσεων, κατασκευή αποστραγγιστικών έργων, διάνοιξη μεταλλευτικών στοών και ο τεχνητός εμπλουτισμός, και οι οποίες αλλοιώνουν την ισορροπία των φυσικών συστημάτων

Η εκμετάλλευση των υπόγειων υδάτων κυρίως μέσω φρεάτων ιστορικά χρονολογείται από αρχαιοτάτων χρόνων. Αρχικά υπήρχε μια απροθυμία ως προς την εκμετάλλευση τους, ωστόσο στις μέρες μας διαφαίνεται μια τάση αλόγιστης άντλησης τους παγκοσμίως. Η ανεξέλεγκτη αύξηση της εκμετάλλευσης των υπόγειων αποθεμάτων παρατηρείται σε μεγάλο βαθμό και στη χώρα μας με αποτέλεσμα να είναι ορατός ο κίνδυνος υποβάθμισης τους. Για το λόγο αυτό υπάρχει κάποιο όριο ασφαλείας, το οποίο καλείται ασφαλής απόδοση και ορίζεται ως η ετήσια ποσότητα νερού που μπορεί να αντληθεί χωρίς να προκαλεί ανεπιθύμητα αποτελέσματα (Todd, 1959), τα οποία αναφορικά είναι τα εξής:

1. Διείσδυση του θαλασσινού νερού στο υπόγειο γλυκό νερό, δημιουργία υφάλμυρης ζώνης και υποβάθμιση των ποιοτικών χαρακτηριστικών του υδροφορέα
2. Καθιζήσεις εδαφών
3. Αύξηση του κόστους άντλησης με γραμμική αναλογία
4. Πρόκληση αστοχίας σε γειτονικά αβαθέστερες γεωτρήσεις δημιουργώντας ουσιαστικά και νομικά προβλήματα
5. Μείωση της επιφανειακής απορροής των ποταμών η οποία μπορεί να θέσει σε κίνδυνο τα οικοσυστήματά και να περιορίσει τις απολήψεις επιφανειακού νερού
6. Μείωση της επιφανειακής ή υπόγειας τροφοδοσίας των λιμνών ή των υγροτόπων οδηγεί σε μείωση της στάθμης και της έκτασης τους θέτοντας σε κίνδυνο τα οικοσυστήματά και περιορίζοντας τις τυχόν απολήψεις νερού από αυτά
7. Μείωση της εκροής υπόγειου γλυκού νερού προς τη θάλασσα μπορεί να έχει δυσμενείς συνέπειες στα παράκτια οικοσυστήματα

Μεγάλος αριθμός περιοχών της Ελλάδας αλλά και παγκοσμίως υφίστανται τις συνέπειες της κακής εκμετάλλευσης των υπόγειων νερών. Το εύρος των υδρολογικών επιπτώσεων και οι οικονομικές, κοινωνικές, περιβαλλοντικές και νομικές συνέπειές τους δεν είναι εύκολο να εκτιμηθούν λόγω της πολυπλοκότητας όλου του προβλήματος. Είναι προφανές ότι και το μέγεθος της ασφαλούς άντλησής δεν μπορεί να είναι εξ αρχής γνωστό αλλά η εκτίμησή του διαρκώς βελτιώνεται παράλληλα με την γνώση των παραμέτρων που συνδέονται με αυτό.

3.6.3 Κατακόρυφη Οριοθέτηση και Εκτίμηση Πάχους Υδροφορέα

Μετά την οριζόντια οριοθέτηση του υδροφορέα σημαντικό είναι να εκτιμηθεί το πάχος αυτού. Στο φρεάτιο παράκτιο υδροφορέα της υδρολογικής λεκάνης Γαδουρά μπορεί να θεωρηθεί ως οροφή του η επιφάνεια του εδάφους.

Η τρίτη διάσταση δεν είναι εύκολο να εκτιμηθεί και βασίζεται σε σημειακές πληροφορίες όπως το βάθος των υδρογεωτρήσεων ή σε απλή περιγραφή της λιθολογίας. Στοιχεία σχετικά με την εκτίμηση της βάσης του υδροφορέα δεν υπάρχουν οπότε η προσέγγιση του γίνεται λαμβάνοντας υπόψη τα χαρακτηριστικά των γεωλογικών σχηματισμών και το βάθος των υδρογεωτρήσεων. Το πάχος του υπό εξέταση υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα εκτιμάται ότι ανέρχεται σε **50 μέτρα**.

3.7 Εκτίμηση Υδραυλικής Αγωγιμότητας Υλικών Υδροφορέα

Υδραυλική Αγωγιμότητα **K** καλείται η ευκολία ή δυσκολία με την οποία ένα ρευστό, στην περίπτωση μας το νερό, ρέει μέσα στους πόρους ενός πορώδους μέσου, εκφράζεται σε μονάδες ταχύτητας και εξαρτάται από τη φύση του πορώδους μέσου, τις διαστάσεις των πόρων και τις ιδιότητες του ρευστού.

Η γεωλογική δομή του υδροφορέα μας αποτελείται από αλλουβιακές και παράκτιες αποθέσεις στις οποίες κυριαρχούν αργιλοαμμώδη υλικά με χαλίκια μεσαίου μεγέθους και άμμος, και χαλαροί ψαμμίτες αντίστοιχα.

Η εκτίμηση της υδραυλική αγωγιμότητα έγινε με τη βοήθεια βιβλιογραφίας λόγω έλλειψης εργαστηριακών μετρήσεων και κυμαίνεται από 10^{-5} m/s έως 10^{-3} m/s σύμφωνα με τον πίνακα Terzaghi & Peck.

Υδραυλική Αγωγιμότητα K (m/sec)	Χαρακτηρισμός
$10^{-3} \leq K$	ΥΨΗΛΗ
$10^{-5} \leq K < 10^{-3}$	ΜΕΤΡΙΑ
$10^{-7} \leq K < 10^{-5}$	ΧΑΜΗΛΗ
$10^{-9} \leq K < 10^{-7}$	ΠΟΛΥ ΧΑΜΗΛΗ
$K < 10^{-9}$	ΠΡΑΚΤΙΚΑ ΑΔΙΑΠΕΡΑΤΟΣ ΣΧΗΜΑΤΙΣΜΟΣ

Πίνακας 3.2: Πίνακας τιμών Υδραυλικής Αγωγιμότητας κατά Terzaghi & Peck (1967)

Η διακύμανση από 10^{-5} m/sec έως 10^{-3} m/sec αντιστοιχεί σε τιμές υδραυλικής αγωγιμότητας από 0,864 m/day έως 86,4 m/day. Η τελική επιλογή μας για την προσομοίωση του υδροφορέα ήταν $K_x = K_y = 15 \text{ m/d}$ και $K_z = 15 \text{ m/d}$ την οποία θεωρούμε ομοιογενή σε όλη την έκταση του υδροφορέα γεγονός που απορρέει από τη μελέτη του παραπάνω γεωλογικού χάρτη.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Διαδικασία Εκτίμησης Υδρολογικού Ισοζυγίου

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΥΔΡΟΛΟΓΙΚΟΥ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ

4.1 Ο Υδρολογικός Κύκλος

Η κυκλική κίνηση του νερού από τα επιφανειακά υδροσυστήματα, όπως τις θάλασσες, τις λίμνες, τους ποταμούς κλπ, στην ατμόσφαιρα και από εκεί με τις κατακρημνίσεις στη γη, όπου συλλέγεται και επιστρέφει πίσω σε αυτά, αναφέρεται σαν υδρολογικός κύκλος του νερού. Ο κύκλος αυτός μπορεί να συντομευτεί κατά μερικά στάδια, π.χ. όταν η κατακρήμνιση πέσει κατ' ευθείαν πάνω στη θάλασσα, στις λίμνες ή στον ρου των ποταμών.

Ο χρόνος πραγματοποίησης ενός κύκλου δεν είναι πάντα ο ίδιος. Κατά τη διάρκεια μιας ξηρασίας φαίνεται να έχει διακοπεί, ενώ κατά τη διάρκεια μιας πλημμύρας φαίνεται ότι είναι συνεχής. Η έντασή και η συχνότητα του κύκλου εξαρτώνται από τη γεωγραφική θέση και το κλίμα της περιοχής, επειδή η λειτουργία του είναι αποτέλεσμα της ηλιακής ακτινοβολίας, που μεταβάλλεται με το γεωγραφικό πλάτος και την εποχή του έτους.

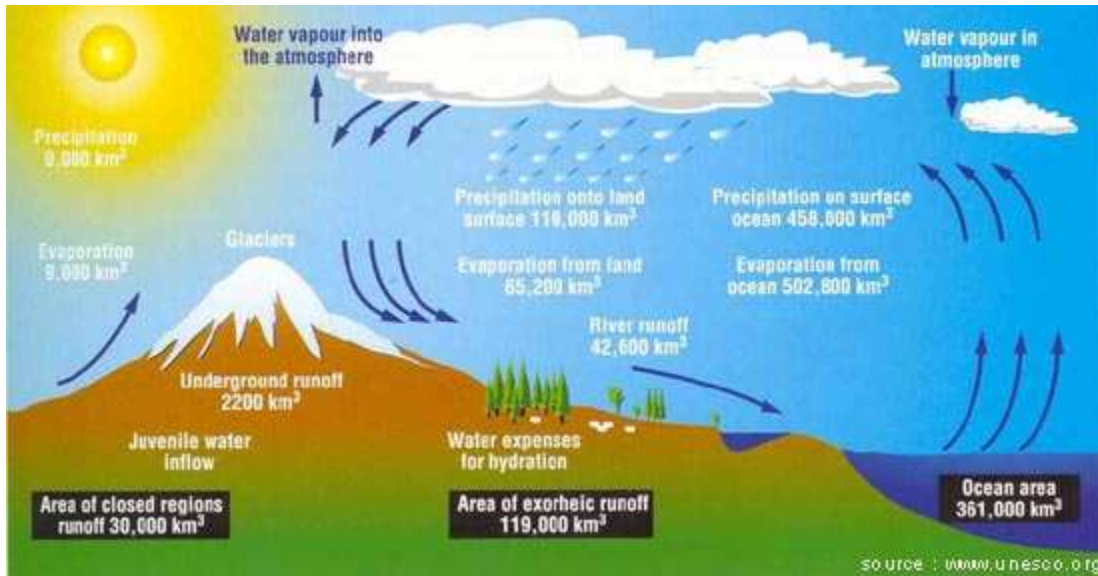
Η κίνηση του νερού από την επιφάνεια της Γης στην ατμόσφαιρα και πάλι στην επιφάνεια καθορίζει το κλίμα και είναι πολύ σημαντική για την οικολογική ισορροπία του πλανήτη.

Το νερό των επιφανειακών υδροσυστημάτων εξατμίζεται με τη βοήθεια της ηλιακής ακτινοβολίας και σύννεφα υδρατμών κινούνται πάνω από την ξηρά. Οι κατακρημνίσεις πέφτουν στο έδαφος σαν χιόνι, χαλάζι, ή βροχή και το νερό αρχίζει να ρέει επιφανειακά μέσα από τα ρυάκια και τα ποτάμια πίσω προς τη θάλασσα. Ένα μέρος του διηθείται στο έδαφος και κινείται προς τα κάτω ή διεισδύει μέσα στη κορεσμένη ζώνη του εδάφους, όπου δημιουργείται ο φρεάτιος ορίζοντας.

Ένα μέρος του νερού που διηθείται τροφοδοτεί επίσης και τα φυτά. Στη συνέχεια από τις φυλλώδεις επιφάνειες των φυτών γίνεται η διαπνοή. Το υπόγειο νερό στη κορεσμένη ζώνη, ρέει αργά με κατεύθυνση προς τις κοίτες των ποταμών ή των λιμνών και καμιά φορά κατευθείαν στη θάλασσα, και ο κύκλος αρχίζει να επαναλαμβάνεται.

Σε αυτόν τον συνεχή κύκλο της κίνησης του νερού, οι ωκεανοί αποτελούν την κύρια πηγή νερού, η ατμόσφαιρα δρα σαν το μέσο της κίνησης και η

ξηρά αποτελεί τον αποδέκτη της ωφέλιμης για τον άνθρωπο ποσότητας νερού. Γενικά πάνω και μέσα στη λιθόσφαιρα συνδέονται άμεσα με την κίνηση του νερού στον υδρολογικό κύκλο δυο τρόποι εμφάνισης νερού, πρόκειται για το επιφανειακό και το υπόγειο νερό. Το τελευταίο περιλαμβάνει το νερό τόσο της ακόρεστης όσο και το νερό τη κορεσμένης ζώνης.



Εικόνα 4.1 : Σχηματικό διάγραμμα του υδρολογικού κύκλου

4.2 Εξίσωση και Παράμετροι του Υδατικού Ισοζυγίου

Μετά τα παραπάνω ο κύκλος του νερού μπορεί να εκφραστεί με την μαθηματική εξίσωση, η οποία είναι γνωστή και σαν τύπος του υδρολογικού ισοζυγίου:

$$P=E+R \quad (4.1)$$

Όπου: P=ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα

E=εξατμισοδιαπνοή και

R=απορροή

Τα δεύτερα μέλη της εξίσωσης εκφράζονται είτε σε mm, είτε σε μονάδες όγκου (m^3), είτε σε εκατοστιαία ποσοστά επί των κατακρημνισμάτων.

Η πιο πάνω βασική εξίσωση του υδρολογικού ισοζυγίου εφαρμόζεται μόνον όταν αφορά μεγάλα χρονικά διαστήματα, πολλές δεκαετίες, και η μέση τιμή των παραμέτρων που θα υπολογισθεί θεωρείται πραγματική. Σε περιπτώσεις

που αφορά μικρά χρονικά διαστήματα, ετήσια ή μεγαλύτερα, όπου οι τιμές των κατακρημνισμάτων, της εξατμισοδιαπνοής και της απορροής επηρεάζονται άμεσα από τις εποχιακές μεταβολές, τότε η βασική εξίσωση παίρνει την ακόλουθη μορφή:

$$P=E+R_0+I \quad (4.2)$$

Όπου: R_0 =επιφανειακή απορροή και
 I = η κατείσδυση

Το μετεωρικό νερό κατεισδύει στο υπέδαφος και φθάνει στους υπόγειους υδροφόρους ορίζοντες. Ένα μέρος αυτού επανέρχεται στην επιφάνεια μέσα από τις πηγές και συμμετέχει στην επιφανειακή απορροή της υδρολογικής λεκάνης, ενώ ένα μέρος αυτού παραμένει στους υδροφόρους ορίζοντες και εμπλουτίζει αυτούς συμπληρώνοντας έτσι τα αποθέματα της περιοχής.

Εάν στην περιοχή βρίσκονται αστικές ή βιομηχανικές περιοχές, όπου είναι απαραίτητη η χρήση του υπόγειου νερού που αντλείται από πηγάδια ή γεωτρήσεις η εξίσωση του υδρολογικού ισοζυγίου έχει την ακόλουθη μορφή:

$$P=E+R_0 + (Q_0-B) \quad (4.3)$$

Όπου: Q = το ποσοστό του νερού κατείσδυσης που προστέθηκε στα υπόγεια αποθέματα και
 B = το ποσοστό του υπόγειου νερού που αντλήθηκε για διάφορες χρήσεις

Οι δυο πιο πάνω παράμετροι έχουν ιδιαίτερη σημασία στην εκτίμηση του υδρολογικού ισοζυγίου όταν αυτό αφορά έναν ετήσιο κύκλο. Κατά την χειμερινή περίοδο ο εμπλουτισμός των υπόγειων νερών είναι υψηλότερος καθώς τόσο η εξατμισοδιαπνοή όσο και η κατανάλωση του υπόγειου νερού μειώνεται. Κατά την θερινή περίοδο όμως συμβαίνει το αντίθετο. Πολλές φορές σε περιόδους παρατεταμένης ανομβρίας διαπιστώνεται ακόμη και μείωση των αποθεμάτων του υπόγειου νερού. Στην εκτίμηση του υδρολογικού ισοζυγίου μιας υδρολογικής λεκάνης θα πρέπει επίσης να λαμβάνεται υπόψη και ο όγκος των χρησιμοποιούμενων επιφανειακών νερών που προέρχονται από την ίδια λεκάνη και οι υπόγειες πλευρικές εκροές ή εισροές σε γειτονικές λεκάνες.

4.2.1 Ατμοσφαιρικά Κατακρημνίσματα (P)

Ο εμπλουτισμός των υπόγειων νερών συντελείται κυρίως από το ποσοστό της κατείσδυσης των ατμοσφαιρικών κατακρημνισμάτων. Στη δίαιτα των υπόγειων νερών συμβάλλουν επίσης και τα επιφανειακά υδροσυστήματα, όπως λίμνες, ποταμοί, κλπ. Το φαινόμενο αυτό έχει τοπικό χαρακτήρα και εξαρτάται από τις υδρογεωλογικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή. Ανάλογα με τις συνθήκες θερμοκρασίας τα μετεωρικά κατακρημνίσματα φθάνουν στην επιφάνεια της γης με την μορφή βροχής, χιονιού, χαλάζι, ομίχλης κλπ. Από υδρογεωλογικής πλευράς ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχει η συχνότητα των κατακρημνισμάτων σε μια περιοχή. Έντονη βροχοπτώση που συμβαίνει σε μικρό χρονικό διάστημα συνδέεται με υψηλό ποσοστό επιφανειακής απορροής. Αντίθετα συνεχείς βροχοπτώσεις χαμηλής έντασης συμβάλλουν αποτελεσματικά στον εμπλουτισμό των υπόγειων νερών, καθότι ένα σημαντικό ποσοστό αυτών κατεισδύει στο υπέδαφος.

4.2.2 Εξατμισοδιαπνοή (E)

Ένα σημαντικό ποσοστό των κατακρημνισμάτων εξατμίζεται στην ατμόσφαιρα πριν ακόμη το νερό πέσει στην επιφάνεια του εδάφους και ολοκληρώσει τον υδρολογικό κύκλο του. Το φυσικό αυτό φαινόμενο, όπου το νερό μεταβαίνει από την υγρή στην αέρια φάση καλείται εξάτμιση. Στο φαινόμενο της εξάτμισης υπόκεινται τόσο τα επιφανειακά νερά όσο και τα αβαθή υπόγεια νερά που βρίσκονται πολύ κοντά στην επιφάνεια του εδάφους. Οι σπουδαιότεροι παράγοντες που συμβάλλουν στην εξέλιξη του φαινομένου της εξάτμισης είναι : η θερμοκρασία του νερού, η θερμοκρασία και η απόλυτη υγρασία της ατμόσφαιρας, ο άνεμος που απομακρύνει τους υδρατμούς από τη μια περιοχή στην άλλη, η ποσότητα των διαλυμένων στο νερό αλάτων, το βάθος επιφάνειας του υπόγειου νερού, η δομή και η σύσταση του εδάφους, η ένταση και η εποχική περίοδος των βροχοπτώσεων.

Το ποσοστό της εξάτμισης που συντελείται στην ατμόσφαιρά πριν ακόμη η βροχή πέσει στην επιφάνεια της γης είναι πολύ δύσκολο να υπολογιστεί. Εκτιμάται ότι το ποσοστό αυτό ξεπερνά το 50% του όγκου της βροχής που πέφτει στην επιφάνεια και το οποίο μπορεί να μετρηθεί. Στον όρο εξατμισοδιαπνοή υπεισέρχονται δύο φυσικά φαινόμενα, δηλαδή το φαινόμενο της εξάτμισης, που συντελείται στην επιφάνεια του εδάφους και στις ελεύθερες υδάτινες επιφάνειες, και το φαινόμενο της διαπνοής που συντελείται από την υπάρχουσα βλάστηση και τις αναπτυσσόμενες

καλλιέργειες της περιοχής. Από πρακτική σκοπιά είναι δύσκολο να ξεχωρίσει κανείς τις απώλειες του νερού που σχετίζονται με την εξάτμιση και την διαπνοή.

Η εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής γίνεται με βάση την εξίσωση του υδρολογικού ισοζυγίου ή εφαρμόζονται εμπειρικοί τύποι που προσφέρουν ένα προσεγγιστικό αποτέλεσμα. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται πιο συχνά υπολογίζουν όχι την πραγματική εξατμισοδιαπνοή (E_{eff}) αλλά την δυνητική εξατμισοδιαπνοή (E_{pot}).

Σαν δυνητική εξατμισοδιαπνοή ορίζεται η ποσότητα του νερού που μπορεί να χαθεί από την επιφάνεια του εδάφους με τις διεργασίες της εξάτμισης και της διαπνοής εάν στο υπέδαφος υπάρχει αρκετή επάρκεια νερού για την πλήρη ικανοποίηση της ζήτησης νερού.

Στην βιβλιογραφία παρουσιάζεται ένας μεγάλος αριθμός εμπειρικών τύπων για την εκτίμηση δυνητικής και πραγματικής εξατμισοδιαπνοής. Εμείς παρουσιάζουμε ενδεικτικά δυο εξισώσεις του Thornthwaite και Turc για τον προσδιορισμό της δυνητικής και πραγματικής εξατμισοδιαπνοής αντίστοιχα.

$$E_{pot} = 1.6 * \left(\frac{10 * T}{I} \right)^a \quad (4.4)$$

Όπου : E_{pot} = Δυνητική εξατμισοδιαπνοή

I = Άθροισμα των μηνιαίων δεικτών δυνητικής εξατμισοδιαπνοής (i)

T = Μέση θερμοκρασία για το μήνα που εξετάζουμε

$a=0,49239+1792*10^{-5}*I-771*10^{-7}*I^2+675*10^{-9}*I^3$

$i=0,2*T^{1,514}$

$$E_{eff} = \frac{P}{\sqrt{0.90 + \left(\frac{P}{L} \right)^2}} \quad (4.5)$$

Όπου E_{eff} = Πραγματική εξατμισοδιαπνοή

P = Μέσο ετήσιο ύψος βροχής

T = Μέση ετήσια θερμοκρασία σε βαθμούς C°

$L=300+25*T\alpha+0,05*T^3$

Υπολογίζοντας την δυνητική εξατμισοδιαπνοή θα πρέπει να προσέξουμε εάν αυτή προκύπτει μικρότερη από τις βροχοπτώσεις, τότε αυτή θα είναι και η πραγματική εξατμισοδιαπνοή. Εάν η δυνητική εξατμισοδιαπνοή προκύπτει μεγαλύτερη από της βροχοπτώσεις τότε η πραγματική εξατμισοδιαπνοή ισούται ανάλογα με το μήνα είτε μόνο με τις βροχοπτώσεις είτε με τις βροχοπτώσεις συν το ποσοστό ελάττωσης της εδαφικής υγρασίας.



Εικόνα 4.2 : Σχηματικό διάγραμμα της εξατμισοδιαπνοής

4.2.3 Επιφανειακή Απορροή (Ro)

Σημαντικό μέρος από τα ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα που φθάνουν στην επιφάνεια του εδάφους ρέουν επιφανειακά μέσα από το υδρογραφικό δίκτυο της υδρολογικής λεκάνης. Ο όγκος του νερού που ρέει επιφανειακά εξαρτάται από την ένταση και την διάρκεια της βροχόπτωσης, από την περατότητα του εδάφους, από την φυτοκάλυψη της περιοχής, από τις φυσιογραφικές παραμέτρους της λεκάνης, από την γεωμετρική ανάπτυξη του υδρογραφικού δικτύου και από το βάθος της επιφάνειας του φρεάτιου ορίζοντα της περιοχής. Γενικά η απορροή συνίσταται από ένα μέρος των κατακρημνισμάτων που πέφτουν απευθείας στην επιφάνεια των υδρορευμάτων, από ένα μέρος νερού που ρέει μόνον στην επιφάνεια του εδάφους και δεν διηθείται σε αυτό και από ένα μέρος υπόγειου νερού που έρχεται στην επιφάνεια μέσα από τις πηγές. Ο όγκος νερού υπολογίζεται από τον ακόλουθο τύπο:

$$Q=F*v \quad (4.6)$$

Όπου Q = Όγκος νερού απορροής

F = Επιφάνεια διατομής του υδατορεύματος και

v = Ταχύτητα ροής

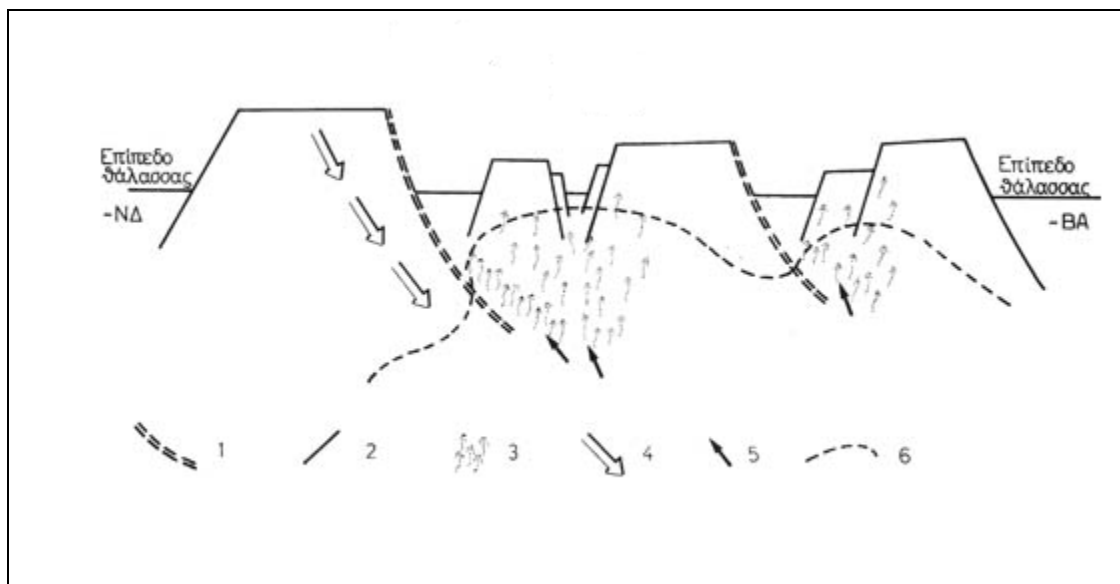
Λόγω της κλιματολογίας της Ν. Ρόδου το φαινόμενο της επιφανειακής απορροής εκτιμάται ότι είναι εποχιακού χαρακτήρα. Σχετικά αυξημένες τιμές αναμένονται τους χειμερινούς μήνες οπότε και λαμβάνουν χώρα οι περισσότερες κατακρημνίσεις ενώ ταυτόχρονα οι τιμές της εξάτμισης είναι μειωμένες. Αντίθετα σχεδόν μηδενικές τιμές επιφανειακής απορροής αναμένονται κατά τους καλοκαιρινούς μήνες όπου οι βροχοπτώσεις ελαττώνονται και η εξάτμιση αυξάνεται.

4.2.4 Κατείσδυση (I)

Με τον όρο κατείσδυση εννοούμε το σύνολο των διαδικασιών με τις οποίες το νερό της βροχής διεισδύει στο έδαφος και εν συνεχεία διηθείται προς βαθύτερα στρώματα, αναπληρώνοντας έτσι την φυσική υγρασία ή προστίθεται στους υδροφόρους ορίζοντες. Το νερό που προστίθεται στους υδροφόρους ορίζοντες αποτελεί την ενεργή κατείσδυση η οποία έχει και την μεγαλύτερη σημασία στην υδρογεωλογία. Επίσης ένα ποσοστό του νερού κατείσδυσης είναι δυνατόν να επιστρέψει στην επιφάνεια μιας λεκάνης μέσα από τις πηγές όταν οι γεωλογικές συνθήκες και η τοπογραφία το επιτρέπουν.

Οι παράγοντες που επηρεάζουν την κατείσδυση μπορούν να χωριστούν σε δυο κατηγορίες. Η μια περιλαμβάνει τα φυσικά χαρακτηριστικά μιας περιοχής και η άλλη τους κλιματικούς παράγοντες οι οποίοι ποικίλουν ευρέως από εποχή σε εποχή και από έτος σε έτος. Οι σημαντικότεροι από αυτούς είναι: η υγρασία και η κλίση του εδάφους, η ένταση και η διάρκεια της βροχόπτωσης, η πάκτωση του εδάφους, ο αέρας που είναι εγκλωβισμένος στους πόρους του εδάφους, η φυτοκάλυψη του εδάφους, η θερμοκρασία του νερού, η εποχή του έτους, η λιθολογική σύσταση του εδάφους κλπ.

Ο υπολογισμός του συντελεστή κατείσδυσης μπορεί να γίνει έμμεσα από την εξίσωση του υδρολογικού ισοζυγίου ή άμεσα με την βοήθεια εγκαταστάσεων όπως λυσίμετρα και διάνοιξη ορυγμάτων, από την σύγκριση πιεζομετρικών χαρτών της υψηλής και χαμηλής στάθμης μιας περιοχής, όπου η πτώση της στάθμης οφείλεται στη φυσική κίνηση του υπόγειου νερού και επίσης από τις παροχές των πηγών.



Εικόνα 4.3: Σχηματική αναπαράσταση κατεΐσδυσης

Όσα προηγήθηκαν στο κεφάλαιο αυτό προέρχονται από το σύγγραμμα «Γεωλογία και Γεωμορφολογία» του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών.

4.3 Περίληψη Διαδικασίας Εκτίμησης Υδατικού Ισοζυγίου στον Παράκτιο Υδροφορέα της Λεκάνης Γαδουρά

Όσα παρατίθενται από εδώ και έως το τέλος του κεφαλαίου αποτελούν τμήμα της διπλωματικής εργασίας του Γαβαλλά Βασίλειου. Οι μέθοδοι που ακολούθησε για τον προσδιορισμό του υδατικού ισοζυγίου ήταν η Εμπειρική μέθοδος Thornthwaite – Mather, η Εμπειρική μέθοδος Turc και η χρήση εμπειρικών συντελεστών. Η επιλογή έγινε με βάση την διαθεσιμότητα δεδομένων για την περιοχή μελέτης και τα υπάρχοντα υπολογιστικά προγράμματα.

4.3.1 Υπολογισμός συνιστωσών υδατικού ισοζυγίου

Τα δεδομένα βροχοπτώσεων και θερμοκρασίας λήφθηκαν από το σταθμό της Καλάθου, ο οποίος βρίσκεται στη μέση σχεδόν του υδροφορέα μας. Η βροχόπτωση είναι η πρώτη συνιστώσα του υδατικού ισοζυγίου μιας περιοχής. Από την Ε.Μ.Υ. συγκεντρώθηκαν οι μηνιαίες τιμές των βροχοπτώσεων για μια σειρά υδρολογικών ετών από το 1967 έως και το 2000. Στη συνέχεια παρουσιάζεται σχηματικά το μέσο ύψος βροχής ανά μήνα για την περίοδο 1967 – 2000.



Διάγραμμα 4.1: Μέσο μηνιαίο ύψος βροχής περιόδου 1967-2000

Η μέση υπερετήσια τιμή της περιόδου 1967-2000 βρέθηκε ίση με **888,7 mm**. Επίσης παρατηρούμε ότι ο μήνας με τη μεγαλύτερη βροχόπτωση είναι ο Ιανουάριος (197,6 mm) και ο πιο άνυδρος μήνας είναι ο Αύγουστος με μηδενική βροχόπτωση (0 mm).

Η δεύτερη συνιστώσα του υδατικού ισοζυγίου είναι η εξατμισοδιαπνοή για τον προσδιορισμό της οποίας απαιτούνται οι μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες της περιόδου που εξετάζουμε. Από την Ε.Μ.Υ. συγκεντρώθηκαν τα δεδομένα για τη μέση μηνιαία θερμοκρασία της περιόδου 1967-2000 και παρουσιάζονται σχηματικά στο παρακάτω διάγραμμα.



Διάγραμμα 4.2: Μέση μηνιαία Θερμοκρασία περιόδου 1967-2000

Παρατηρούμε ότι θερμότερος μήνας για είναι ο Αύγουστος (27,6 C°) και ψυχρότερος ο Ιανουάριος (11,4 C°).

Ο υπολογισμός της εξατμισοδιαπνοής έγινε με τη βοήθεια του λογισμικού «Υδρογνώμων» το οποίο είναι ένα εργαλείο διαχείρισης και ανάλυσης των υδρολογικών πληροφοριών.

Οι τιμές της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής για την περίοδο 1967-2000 προσδιορίστηκαν με τις μεθόδους **Thornthwaite** και **Hargreaves**. Οι δύο μέθοδοι μειονεκτούν καθώς η μια υπερεκτιμά και η άλλη υποεκτιμά τις τιμές δυνητικής εξατμισοδιαπνοής για αυτό το λόγο χρησιμοποιήθηκε ο μέσος όρος.

ΜΕΣΗ ΜΗΝΙΑΙΑ ΔΥΝΗΤΙΚΗ ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗ												
Thornthwaite	19,8	20,1	32,8	58,2	97,7	138,3	168,9	160,2	118,6	78,1	42,0	26,3
Hargreaves	80,9	94,6	144,5	192,4	248,8	276,6	295,3	270,7	210,2	152,6	99,4	79,1
M.O.	50,4	57,4	88,7	125,3	173,3	207,5	232,1	215,5	164,4	115,3	70,7	52,7

Πίνακας 4.1: Μέσος όρος της μέσης μηνιαίας δυνητικής εξατμισοδιαπνοής των δύο μεθόδων

Σαν μέση υπερετήσια τιμή δυνητικής εξατμισοδιαπνοής λήφθηκε ο μέσος όρος των τιμών των δύο μεθόδων που είναι ίσος με:

$$E_{pot} = \frac{961,3 + 2145,1}{2} = 1553,2 \text{ mm.}$$

Έτσι λοιπόν, για την περίοδο 1967 – 2000 η μέση ετήσια δυνητική εξατμισοδιαπνοή στον παράκτιο υδροφορέα της λεκάνης Γαδουρά, του οποίου η έκταση υπολογίζεται ίση με $E = 23188076 \text{ m}^2$, είναι ίση με:

$$E_{pot} (m^3) = E_{pot}(m) * E (m^2) =>$$

$$E_{pot} (m^3) = 1,5532 \text{ m} * 23188076 \text{ m}^2 =>$$

$$E_{pot} = 36015720 \text{ m}^3 = 36 * 10^6 \text{ m}^3$$

Ακόμα ο συντελεστής φυτοκάλυψης για το παράκτιο τμήμα της λεκάνης, όπου έχουμε θαμνώδεις εκτάσεις και πολλές δενδρώδεις καλλιέργειες θεωρήθηκε ίσος με $K_c = 0,55$ και η επιφανειακή απορροή ίση με το 10 % της βροχόπτωσης εφόσον δεν ήταν διαθέσιμα στοιχεία μετρημένων απορροών.

Τα απαραίτητα δεδομένα για την εφαρμογή της μεθόδου Thornthwaite – Mather είναι η διαθέσιμη υδατοϊκανότητα της εδαφικής κατατομής καθώς και οι μηνιαίες τιμές ύψους βροχής, επιφανειακής απορροής, δυνητικής εξατμισοδιαπνοής και συντελεστές βλάστησης.

Η διαθέσιμη υδατοϊκανότητα της εδαφικής κατατομής υπολογίζεται ως διαφορά μεταξύ της υδατοϊκανότητας FC (field capacity) και του σημείου μάρανσης WP (wilting point). Επομένως για τον εδαφικό τύπο του υδροφορέα που εξετάζουμε προκύπτει ο παρακάτω πίνακας:

Εδαφικός Τύπος	Υδατοϊκανότητα (FC)	Σημείο Μάρανσης (WP)	Διαθέσιμο νερό
	Μέση Τιμή	Μέση Τιμή	Μέση Τιμή
Πηλώδες – Αμμοαργιλοπηλώδες έδαφος (SL – SCL)	18,8	8,3	10,5

Πίνακας 4.2: Υδατοϊκανότητα, σημείο μάρανσης και διαθέσιμο νερό εδάφους (% κ.ο.)

Με τη βοήθεια του προγράμματος WTRBLN που συντάχθηκε από τον υποψήφιο διδάκτορα, Κουράκο Γεώργιο προσδιορίστηκε η κατεΐσδυση. Το εξαγόμενο αποτέλεσμα που ενδιαφέρει εμάς συγκεντρώνεται στον παρακάτω πίνακα:

ΜΗΝΕΣ	Κατεΐσδυση (mm)
Ιανουάριος	150,15
Φεβρουάριος	113,97
Μάρτιος	53,147
Απρίλιος	0
Μάιος	0
Ιούνιος	0
Ιούλιος	0
Αύγουστος	0
Σεπτέμβρης	0
Οκτώβριος	0
Νοέμβριος	0
Δεκέμβριος	14,294
Ετήσια κατεΐσδυση	331,56

Πίνακας 4.3: Μέση ετήσια κατεΐσδυση

Η κατείσδυση για την έκταση (E) του υδροφορέα που εξετάζουμε θα είναι ίση με:

$$I (m^3) = I (m) \cdot E (m^2) \Rightarrow$$

$$I(m^3) = 0,33156 m \cdot 23188076 m^2 \Rightarrow$$

$$I = 7688238 m^3 = 7,69 \cdot 10^6 m^3/\acute{\epsilon}τος$$

Σημειώνεται ότι η κατείσδυση προσδιορίστηκε ακόμα με τις μεθόδους Turc και των εμπειρικών συντελεστών ωστόσο η ακρίβεια τους είναι πολύ μικρότερη από την παραπάνω μέθοδο. Υπάρχει σίγουρα αβεβαιότητα για τα αποτελέσματα που μας έδωσε η εμπειρική μέθοδος Thornthwaite – Mather και οφείλεται στο γεγονός ότι δεν διατίθεντο πιο ακριβή στοιχεία για την εξάτμιση, τη διαπνοή και μετρήσεις για την επιφανειακή απορροή η οποία θεωρήθηκε ίση με το 10 % της βροχόπτωσης. Παρόλα αυτά αποδεχόμαστε τα αποτελέσματα της αφού για τα δεδομένα που έχουμε μπορεί να προσφέρει μια καλή εκτίμηση του νερού που κατεισδύει για να εμπλουτίσει τον υδροφορέα που μελετάται.

Ολοκληρώνοντας η μετατροπή των ποσοτήτων κατείσδυσης σε διαθέσιμα υπόγεια υδατικά αποθέματα προέκυψε πολλαπλασιάζοντας με ένα συντελεστή που κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 0,6 – 0,8 στη γενική περίπτωση. Επομένως η κατείσδυση που υπολογίστηκε για τον υπόγειο παράκτιο υδροφορέα με τη μέθοδο Thornthwaite – Mather είναι **7688238 m³** και το διαθέσιμο υδατικό απόθεμα (τροφοδοσία υδροφορέα) είναι **6150590 m³** ή **6,15 * 10⁶ m³/έτος**.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Κίνηση Υπόγειων Νερών και Μεταφορά Ρύπων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΚΙΝΗΣΗ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΝΕΡΩΝ ΚΑΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΡΥΠΩΝ

5.1 Ορισμοί

Στις παραγράφους που ακολουθούν δίνονται βασικοί ορισμοί των παραμέτρων της κίνησης του υπόγειου νερού.

Ολικό πορώδες ή πορώδες n (porosity) ενός υδροφορέα ονομάζεται ο λόγος του όγκου των κενών προς τον συνολικό όγκο του δείγματος.

$$\left. \begin{array}{l} V_{\kappa} = \text{όγκος κενών} \\ V_s = \text{όγκος στερεών} \\ V_t = V_{\kappa} + V_s = \text{συνολικός όγκος δείγματος} \end{array} \right\} \Rightarrow n = \frac{V_{\kappa}}{V_t} = 1 - \frac{V_s}{V_t} \quad (5.1)$$

Οι παράμετροι που επηρεάζουν το πορώδες είναι το σχήμα των κενών μεταξύ των κόκκων του εδάφους, το μέγεθος, η διαβάθμιση και η διάταξη αυτών, το υλικό πλήρωσης των κενών και τέλος η γεωλογική ιστορία του εδάφους.

Ενεργό πορώδες n_{eff} (effective porosity) λαμβάνει υπόψη μόνο τους πόρους που είναι συνδεδεμένοι μεταξύ τους και ουσιαστικά συντελούν στη ροή του υπόγειου νερού. Η έννοια του ενεργού πορώδους είναι περισσότερο συνυφασμένη με την έννοια της διαπερατότητας.

Υδραυλική αγωγιμότητα K (hydraulic conductivity) εκφράζει τη δυσκολία ή την ευκολία με την οποία ένα ρευστό ρέει μέσα στους πόρους ενός πορώδους μέσου. Εκφράζεται σε μονάδες ταχύτητας και εξαρτάται από το πορώδες μέσο αλλά και από το ρευστό. Δεν πρέπει να συγχέεται με την διαπερατότητα.

Φυσική Διαπερατότητα κ (permeability) εξαρτάται μόνο από τις ιδιότητες του πορώδους μέσου και συνδέεται με την υδραυλική αγωγιμότητα με τη σχέση:

$$K = \kappa \frac{\gamma}{\mu} = \kappa \frac{g}{\nu} \quad (5.2)$$

όπου μ = δυναμική συνεκτικότητα, ν = κινηματική συνεκτικότητα και γ = ειδικό βάρος.

Μεταφορικότητα ή Διοχευτικότητα T (transmissivity) είναι μια από τις πιο χαρακτηριστικές παραμέτρους των υπόγειων υδροφορέων και ορίζεται σαν τη παροχή νερού που περνάει από ένα μοναδιαίο πλάτος του υδροφορέα κατά μήκος όλου του πάχους του, εξαιτίας μιας μοναδιαίας κλίσης του υδραυλικού φορτίου.

$$T = K b \quad (5.3)$$

Οι μονάδες που μετριέται είναι σε m^2/day . Η έννοια της μεταφορικότητας αφορά τις διδιάστατες οριζόντιες ροές στους εκτεταμένους υδροφορείς. Όταν το φαινόμενο εξελίσσεται σε χώρο τριών διαστάσεων η μεταφορικότητα T δεν έχει φυσική σημασία και έτσι χρησιμοποιείται η υδραυλική αγωγιμότητα K για την περιγραφή της κίνησης των υπόγειων ροών.

Η **αποθηκευτικότητα S** (storativity) είναι μια παράμετρος που διαφέρει στους φρεάτιους και στους περιορισμένους υδροφορείς.

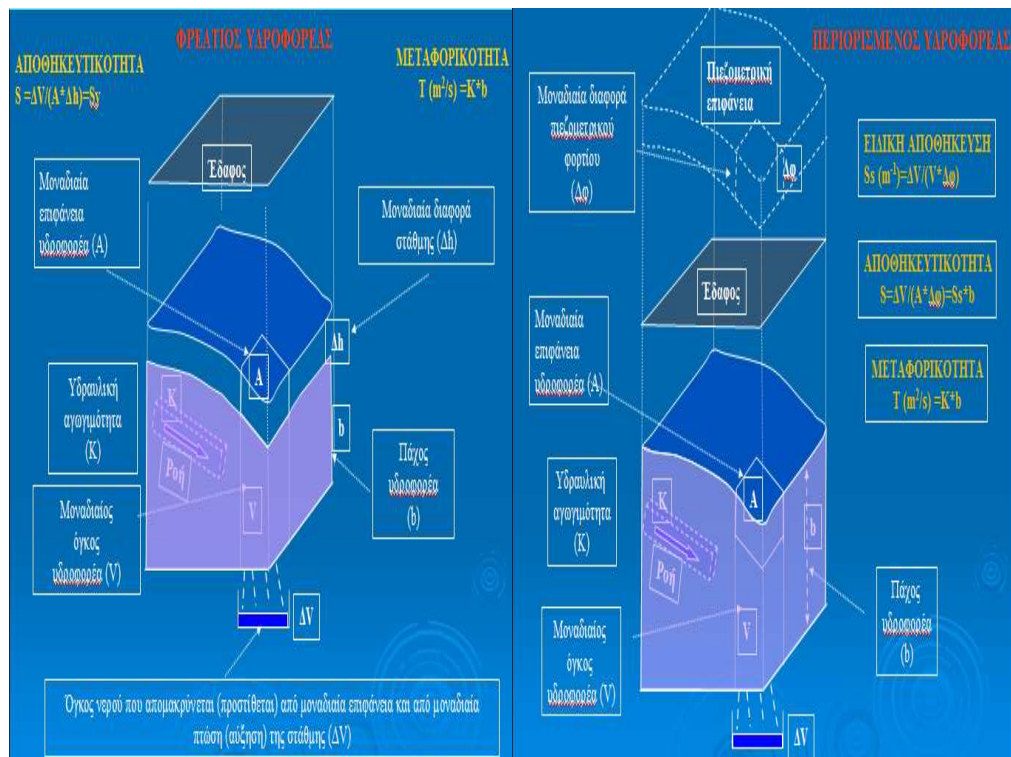
Σε έναν περιορισμένο υδροφορέα ορίζεται από τον όγκο ΔU του νερού που απομακρύνεται ή προστίθεται από τη μονάδα οριζόντιας επιφάνειας A του υδροφορέα εξαιτίας μοναδιαίας πτώσης ή αύξησης του πιεζομετρικού φορτίου $\Delta\phi$. Ορίζεται από τη σχέση:

$$S = \Delta U / A \Delta\phi \quad (5.4)$$

και είναι αδιάστατο μέγεθος. Είναι φανερό ότι στους υπό πίεση υδροφορείς, η αποθηκευτικότητα εξαρτάται από τη συμπιεστότητα του νερού και από την ελαστικότητα του στερεού σκελετού του πετρώματος που το περικλείει.

Σε ένα φρεάτιο υδροφορέα ορίζεται με τον ίδιο τρόπο θεωρώντας ότι εξαιτίας μιας ροής ένας όγκος νερού ΔU απομακρύνεται από μια συγκεκριμένη έκταση A με αποτέλεσμα η ελεύθερη επιφάνεια να πέσει χαμηλότερα, έστω κατά Δh . Τότε ισχύει:

$$S = \Delta U / A \Delta h \quad (5.5)$$



Εικόνα 5.1: Ορισμός αποθηκευτικότητας σε περιορισμένο και σε φρεάτιο υδροφορέα

Ειδική αποθηκευτικότητα S_s (specific storativity) ενός περιορισμένου υδροφορέα είναι ο όγκος του νερού που απελευθερώνεται ή προσλαμβάνεται ανά μονάδα όγκου του υδροφορέα και ανά μονάδα πτώσης ή αύξησης του πιεζομετρικού φορτίου.

Ειδική απόδοση S_y (specific yield), είναι ο όγκος του νερού που στραγγίζει με βαρύτητα από ένα αρκετά κορεσμένο δείγμα διά του συνολικού όγκου του δείγματος.

Στην παραδοχή της οριζόντιας ροής χρησιμοποιούνται η αποθηκευτικότητα S και η διοχετευτικότητα T ενώ στη τριδιάστατη ροή χρησιμοποιούνται η ειδική αποθηκευτικότητα S_s και η υδραυλική αγωγιμότητα K .

Συνεπώς χρησιμοποιώντας την έννοια του αντιπροσωπευτικού στοιχειώδους όγκου αναφοράς, το πραγματικό πορώδες μέσω αντικαθίσταται από ένα άλλο ιδεατό συνεχές μέσο, στο οποίο μπορούν πλήρως να καθοριστούν τιμές όλων των ιδιοτήτων του σε κάθε μαθηματικό σημείο του πεδίου ροής. Ομογενές θεωρείται ένα πορώδες μέσο όταν η διαπερατότητά του είναι ίδια σε όλα τα σημεία του. Αν η τιμή της μεταβάλλεται στο χώρο το μέσο λέγεται ανομογενές. Στην περίπτωση που η διαπερατότητα σε κάθε σημείο

του χώρου του είναι ανεξάρτητη από τη διεύθυνση το μέσο ονομάζεται ισότροπο. Στην αντίθετη περίπτωση λέγεται ανισότροπο.

5.2 Εξίσωση ροής των υπόγειων νερών

Σύμφωνα με τον Darcy, η κίνηση του υπόγειου νερού πραγματοποιείται από θέσεις υψηλότερων προς θέσεις χαμηλότερων ενεργειακών στάθμεων. Καθώς το νερό κινείται διαμέσου του εδαφικού σκελετού, δυνάμεις τριβών που εμφανίζονται στα τοιχώματα προκαλούν ενεργειακές απώλειες, οι οποίες έχει βρεθεί ότι είναι ανάλογες προς την ταχύτητα με την οποία κινείται το νερό.

Ο νόμος του Darcy, μονοδιάστατα, διατυπώνεται με την ακόλουθη μορφή:

$$q = \frac{Q}{A} = K \cdot J \quad (5.6)$$

όπου q: ειδική παροχή, K: υδραυλική αγωγιμότητα και J: υδραυλική κλίση.

Η παραπάνω σχέση τροποποιείται κατάλληλα και περιγράφει τη ροή σε χώρο τριών διαστάσεων και στην απλή περίπτωση ομογενούς και ισότροπου μέσου παίρνει τη μορφή:

$$\begin{aligned} q_x &= K \cdot J_x = -K \frac{\theta\phi}{\theta x} = n \cdot V_x \\ q_y &= K \cdot J_y = -K \frac{\theta\phi}{\theta y} = n \cdot V_y \\ q_z &= K \cdot J_z = -K \frac{\theta\phi}{\theta z} = n \cdot V_z \end{aligned} \quad (5.7)$$

όπου n: πορώδες, V: ταχύτητα και φ: πιεζομετρικό φορτίο.

Σύμφωνα με την εξίσωση συνέχειας, η μάζα του νερού σε διαφορικό όγκο διατηρείται, δηλαδή η μάζα που εισέρχεται μείον τη μάζα που εξέρχεται ανά μονάδα χρόνου, ισούται με τη μεταβολή της μάζας στον διαφορικό όγκο. Η εξίσωση συνέχειας έχει τη γενική μορφή:

$$\frac{\theta(\rho n)}{\theta t} = - \left(\frac{\theta(\rho q_x)}{\theta x} + \frac{\theta(\rho q_y)}{\theta y} + \frac{\theta(\rho q_z)}{\theta z} \right) \quad (5.8)$$

όπου ρ: πυκνότητα του ρευστού, η οποία μπορεί να εμφανίζει χωροχρονικές διακυμάνσεις.

Συνδυάζοντας την εξίσωση συνέχειας με το νόμο του Darcy, προκύπτει η εξίσωση ροής και η οποία στην περίπτωση ισότροπου και ανομογενή υδροφορέα έχει τη μορφή:

$$S_s \frac{\theta\varphi}{\theta t} = \frac{\theta}{\theta x} \left(K \frac{\theta\varphi}{\theta x} \right) + \frac{\theta}{\theta y} \left(K \frac{\theta\varphi}{\theta y} \right) + \frac{\theta}{\theta z} \left(K \frac{\theta\varphi}{\theta z} \right) \quad (5.9)$$

όπου S_s η ειδική αποθηκευτικότητα του υδροφορέα

Στην περίπτωση ανισότροπου και ανομογενή υδροφορέα, η παραπάνω εξίσωση ροής τροποποιείται ως εξής:

$$S_s \frac{\theta\varphi}{\theta t} = \frac{\theta}{\theta x} \left(K_{xx} \frac{\theta\varphi}{\theta x} \right) + \frac{\theta}{\theta y} \left(K_{yy} \frac{\theta\varphi}{\theta y} \right) + \frac{\theta}{\theta z} \left(K_{zz} \frac{\theta\varphi}{\theta z} \right) \quad (5.10)$$

Οι παραπάνω εξισώσεις ροής ισχύουν σε περιπτώσεις μη μόνιμης ροής.

Σε συνθήκες μόνιμης ροής, ο όρος $S_s \frac{\theta\varphi}{\theta t} = 0$ και έτσι προκύπτουν οι πιο κάτω εξισώσεις:

$$\frac{\theta}{\theta x} \left(K \frac{\theta\varphi}{\theta x} \right) + \frac{\theta}{\theta y} \left(K \frac{\theta\varphi}{\theta y} \right) + \frac{\theta}{\theta z} \left(K \frac{\theta\varphi}{\theta z} \right) = 0 \quad (5.11)$$

για ισότροπο και ανομογενή υδροφορέα, ενώ για ανισότροπο και ανομογενή η εξίσωση ροής γράφεται:

$$\frac{\theta}{\theta x} \left(K_{xx} \frac{\theta\varphi}{\theta x} \right) + \frac{\theta}{\theta y} \left(K_{yy} \frac{\theta\varphi}{\theta y} \right) + \frac{\theta}{\theta z} \left(K_{zz} \frac{\theta\varphi}{\theta z} \right) = 0 \quad (5.12)$$

5.3 Κίνηση των ρύπων στα υπόγεια νερά

Το κεφάλαιο αυτό εξετάζει την κίνηση ρύπων στα υπόγεια νερά όταν οι ρύποι είναι διαλυτοί στο νερό και κινούνται μαζί με αυτό. Διακρίνουμε 4 πηγές ρύπων. Η πρώτη αφορά πηγές ρύπανσης που ενυπάρχουν στο φυσικό περιβάλλον καθώς το νερό έρχεται σε επαφή με αυτές, πχ. ραδιενεργά πετρώματα, μέταλλα, υφαλμύρωση παρακτίων υδροφορέων, κλπ. Η δεύτερη πηγή είναι τα αστικά απόβλητα, για παράδειγμα από διαρροές από αγωγούς

ακαθάρτων (βακτηρίδια, ιοί, κλπ.). Η τρίτη πηγή είναι τα βιομηχανικά απόβλητα όπως τα βαριά μέταλλα, τοξικά απόβλητα, κλπ. Τέλος η τέταρτη πηγή ρύπων προέρχεται από τη χρήση γεωργικών φαρμάκων και λιπασμάτων στη γεωργία.

Οι κύριοι μηχανισμοί κίνησης ρύπων στα υπόγεια νερά είναι 1) η μεταφορά, 2) η μοριακή διάχυση, 3) η μηχανική διασπορά, 4) οι διάφορες αλληλεπιδράσεις μεταξύ του πορώδους μέσου (εδάφους) και διαλύματος και 5) χημικές αντιδράσεις καθώς και φαινόμενα διάσπασης των ρύπων.

Στόχος του κεφαλαίου αυτού είναι να παρουσιάσει τους νόμους που διέπουν την κίνηση και συγκέντρωση ρύπων στις υπόγειες ροές. Οι νόμοι αυτοί εκφράζονται υπό μορφή διαφορικών εξισώσεων με μερικές παραγώγους που περιγράφουν την διατήρηση της μάζας και την κίνηση των ρύπων και οι οποίες μπορούν να επιλυθούν με αναλυτικές ή αριθμητικές μεθόδους όταν οι αρχικές και οι οριακές συνθήκες του προβλήματος είναι γνωστές. Χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις αυτές μπορούν να γίνουν προγνώσεις για την κίνηση των ρύπων στα υπόγεια νερά.

Εξετάζουμε συντηρητικούς ρύπους δηλαδή ρύπους που δεν αντιδρούν μεταξύ τους ή με το έδαφος, όπως δηλαδή υλοποιήθηκε το μοντέλο προσομοίωσης του υπόγειου υδροφορέα της λεκάνης Γαδουρά. Δηλαδή υπάρχει μια μοναδική ρευστή φάση σε μορφή διαλύματος και, ανάλογα με την ποσότητα των ρύπων, τα φυσικά χαρακτηριστικά του διαλύματος (πυκνότητα, κλπ) μπορεί να μεταβάλλονται. Στην περίπτωση απουσίας χημικών διεργασιών υπάρχουν τρεις μηχανισμοί κίνησης ρύπων στα υπόγεια νερά: α) μεταφορά, β) μοριακή διάχυση και γ) κινηματική διασπορά.

Μεταφορά ρύπων με τη μέση ροή νερού

Η μάζα ρύπου που εισέρχεται μείον την μάζα που εξέρχεται από τις πλευρές του ορθογωνίου που είναι κάθετες στον άξονα των x ανά μονάδα χρόνου ισούται με τη διαφορά

$$c q_x dydz - \left[c q_x + \frac{\theta(c q_x)}{\theta x} dx \right] dydz = - \frac{\theta(c q_x)}{\theta x} dx dydz \quad (5.13)$$

Όπου c = ογκομετρική συγκέντρωση ρύπου

$q = (q_x, q_y, q_z)$ το διάνυσμα της ειδικής παροχής (ταχύτητα Darcy)

Αντίστοιχά ισχύουν στους άξονες y και z . Επομένως η εισροή – εκροή ρύπου ανά μονάδα χρόνου από όλες τις επιφάνειες του ορθογωνίου δίνεται από το άθροισμα:

$$E_{in} - E_{out} = -\frac{\theta(cq_x)}{\theta x} dx dy dz - \frac{\theta(cq_y)}{\theta y} dx dy dz - \frac{\theta(cq_z)}{\theta z} dx dy dz \quad (5.14)$$

Η μεταβολή της μάζας του ρύπου εντός του ορθογωνίου ανά μονάδα χρόνου ισούται με:

$$M = \frac{\theta(cn dx dy dz)}{\theta t} = \frac{\theta(cn)}{\theta t} dx dy dz \quad (5.15)$$

όπου n = το πορώδες του εδάφους

Η εξίσωση διατήρησης της μάζας του ρύπου στο ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο λέει ότι «η εισροή - εκροή ρύπου ανά μονάδα χρόνου από τις επιφάνειες του ορθογωνίου ισούται με τη μεταβολή της μάζας ρύπου εντός του ορθογωνίου ανά μονάδα χρόνου». Επομένως εξισώνοντας τις παραπάνω σχέσεις και απλοποιώντας το $dx dy dz$ παίρνουμε την εξίσωση διατήρησης της μάζας του ρύπου όταν υπάρχει μόνο μεταφορά ρύπων με τη μέση κίνηση του νερού

$$\frac{\theta(cn)}{\theta t} + \frac{\theta(cq_x)}{\theta x} + \frac{\theta(cq_y)}{\theta y} + \frac{\theta(cq_z)}{\theta z} = 0 \quad (5.16)$$

Μοριακή Διάχυση

Λόγω της μεταβολής της συγκέντρωσης ρύπων c μεταξύ των διαφόρων σημείων του ρευστού δημιουργείται μια κίνηση των ρύπων από μεγάλες συγκεντρώσεις προς μικρότερες συγκεντρώσεις λόγω της συνεχούς κίνησης των μορίων του διαλύματος. Ο νόμος του Fick για ισοτροπική μοριακή διάχυση διατυπώνεται ως εξής:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_x &= -D_d^* c \frac{\theta c}{\theta x} \\ \varphi_y &= -D_d^* c \frac{\theta c}{\theta y} \\ \varphi_z &= -D_d^* c \frac{\theta c}{\theta z} \end{aligned} \right\} \quad (5.17)$$

Όπου $\varphi = (\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z)$ η μάζα ρύπου
 D_d^* = συντελεστής μοριακής διάχυσης

Η εισροή μείον την εκροή μάζας ρύπου στον άξονα των x ανά μονάδα χρόνου είναι η διαφορά:

$$\varphi_x n dydz - (n\varphi_x + \frac{\theta(n\varphi_x)}{\theta x} dx) dydz = -\frac{\theta(n\varphi_x)}{\theta x} dx dydz \quad (5.18)$$

Αντίστοιχά ισχύουν στους άξονες y και z . Επομένως η εισροή – εκροή ρύπου ανά μονάδα χρόνου από όλες τις επιφάνειες του ορθογωνίου δίνεται από το άθροισμα:

$$E_{in} - E_{out} = -\frac{\theta(n\varphi_x)}{\theta x} dx dydz - \frac{\theta(n\varphi_y)}{\theta y} dx dydz - \frac{\theta(n\varphi_z)}{\theta z} dx dydz \quad (5.19)$$

Η μεταβολή της μάζας του ρύπου εντός του ορθογωνίου ισούται με

$$M = \frac{\theta(cndxdydz)}{\theta t} = \frac{\theta(cn)}{\theta t} dx dydz \quad (5.20)$$

όπου n = το πορώδες του εδάφους

Εφαρμόζοντας την εξίσωση διατήρησης της μάζας του ρύπου στο ορθογώνιο παραλληλεπίπεδο και απλοποιώντας το $dx dy dz$ έχουμε την εξής εξίσωση διατήρησης της μάζας του ρύπου όταν υπάρχει μόνο μοριακή διάχυση:

$$-\left[\frac{\theta(n\varphi_x)}{\theta x} + \frac{\theta(n\varphi_y)}{\theta y} + \frac{\theta(n\varphi_z)}{\theta z} \right] = \frac{\theta(cn)}{\theta t} \quad (5.21)$$

Αν έχουμε ταυτόχρονα μεταφορά ρύπων με τη μέση ροή και μοριακή διάχυση θα πρέπει να αθροίσουμε τις επιμέρους εισροές και εκροές ρύπων και προκύπτει η παρακάτω εξίσωση:

$$nD_d^* \left(\frac{\theta^2 c}{\theta x^2} + \frac{\theta^2 c}{\theta y^2} + \frac{\theta^2 c}{\theta z^2} \right) - \frac{\theta(cq_x)}{\theta x} - \frac{\theta(cq_y)}{\theta y} - \frac{\theta(cq_z)}{\theta z} = \frac{\theta(cn)}{\theta t} \quad (5.22)$$

Κινηματική Διασπορά

Στην εξίσωση μεταφοράς ρύπων υπεισέρχεται η μέση ταχύτητα ροής u όπου $u=q/n$. Όμως τοπικά οι ταχύτητες ροής μεταβάλλονται γύρω από την μέση τιμή της ταχύτητας. Το πεδίο των τοπικών ταχυτήτων ροής είναι περίπλοκο και άγνωστης υφής. Το γεγονός αυτό δεν έχει ληφθεί καθόλου υπόψη στην ανάλυση της μεταφοράς ρύπων όπου χρησιμοποιείται μόνο η μέση τιμή της ταχύτητας ροής. Οι μεταβολές των τοπικών ταχυτήτων ροής δημιουργούν επιπλέον διασπορά αφού ορισμένα μόρια του ρύπου κινούνται με μικρές και άλλα μόρια με μεγάλες ταχύτητες. Η διασπορά αυτή ονομάζεται κινηματική διασπορά και οφείλεται στην ετερογένεια του πορώδους και στη μεταβλητότητα των μικροσκοπικών καθώς και των μακροσκοπικών ταχυτήτων στο πορώδες μέσο σε όλες τις δυνατές κλίμακες.

Όπως και στην περίπτωση της μοριακής διάχυσης, θεωρούμε ότι η κινηματική διασπορά ακολουθεί το νόμο του Fick. Ο νόμος αυτός εκφράζεται ως εξής:

$$\varphi = -D \text{grad } c \quad (5.23)$$

Όπου $\varphi = (\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z)$ η μάζα ρύπου

D είναι ένας συμμετρικός τανυστής ο οποίος ισούται

$$D = \begin{pmatrix} D_{xx} & D_{xy} & D_{xz} \\ D_{yx} & D_{yy} & D_{yz} \\ D_{zx} & D_{zy} & D_{zz} \end{pmatrix}$$

Ο ένας από τους κύριους άξονες του D βρίσκεται στην κατεύθυνση της μέσης ταχύτητας ροής u , ενώ οι άλλοι δύο κύριοι άξονες βρίσκονται σε κατεύθυνση κάθετη στην ταχύτητα ροής. Οι συντελεστές του D εξαρτώνται από τις μέσες τιμές της ταχύτητας ροής. Στους κύριους άξονες το μητρώο D γράφεται

$$D = \begin{pmatrix} D_L & 0 & 0 \\ 0 & D_T & 0 \\ 0 & 0 & D_T \end{pmatrix} \quad (5.24)$$

όπου D_L ονομάζεται επιμήκης συντελεστής μηχανικής διασποράς στην διεύθυνση της μέσης ροής και D_T ονομάζεται εγκάρσιος συντελεστής

μηχανικής διασποράς σε κατεύθυνση κάθετη στην διεύθυνση της μέσης ροής. Ο συντελεστής μηχανικής διασποράς είναι ανισοτροπικός με $D_L > D_T$. Οι συντελεστές μηχανικής διασποράς θεωρούνται ότι είναι ανάλογοι της μέσης ταχύτητας ροής $u = u_x$, δηλαδή

$$\left. \begin{aligned} D_L &= a_L u \\ D_T &= a_T u \end{aligned} \right\} (5.25)$$

όπου a_L και a_T ονομάζονται «ανοιγμένοι συντελεστές διασποράς».

Εάν εκτός από την μηχανική διασπορά έχουμε και μοριακή διάχυση, στους συντελεστές της μηχανικής διασποράς πρέπει να προστεθεί και η συμβολή της μοριακής διάχυσης

$$D_h = \begin{pmatrix} D_{xx} & D_{xy} & D_{xz} \\ D_{yx} & D_{yy} & D_{yz} \\ D_{zx} & D_{zy} & D_{zz} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} D_d^* & 0 & 0 \\ 0 & D_d^* & 0 \\ 0 & 0 & D_d^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} D_{xx} + D_d^* & D_{xy} & D_{xz} \\ D_{yx} & D_{yy} + D_d^* & D_{yz} \\ D_{zx} & D_{zy} & D_{zz} + D_d^* \end{pmatrix} (5.26)$$

Και στους κύριους άξονές:

$$D_h = \begin{pmatrix} D_L + D_d^* & 0 & 0 \\ 0 & D_T + D_d^* & 0 \\ 0 & 0 & D_T + D_d^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} D_{hL} & 0 & 0 \\ 0 & D_{hT} & 0 \\ 0 & 0 & D_{hT} \end{pmatrix} (5.27)$$

Η εξίσωση διασποράς ρύπων προκύπτει εάν προσθέσουμε την επίδραση της κινηματικής διασπορά στην περίπτωση της απλής μοριακής διάχυσης με μεταφορά και είναι η παρακάτω:

$$\operatorname{div}(n D_h \operatorname{grad} c - cq) = \frac{\theta(cn)}{\theta t} (5.28)$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Μοντέλα Προσομοίωσης των Υπόγειων Νερών

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΤΩΝ ΥΠΟΓΕΙΩΝ ΝΕΡΩΝ

6.1 Γενικά

Το νερό που υπάρχει στη φύση και που χρησιμοποιείται από τον άνθρωπο για διάφορες χρήσεις διακρίνεται σε επιφανειακό και υπόγειο. Επιφανειακό νερό είναι το νερό των λιμνών και των ποταμών ενώ το υπόγειο νερό είναι το νερό που είναι αποθηκευμένο ή κινείται στο έδαφος. Έτσι λοιπόν και ο γενικός όρος υδατικοί πόροι που αφορά τους εκμεταλλεύσιμους όγκους νερού, διαχωρίζεται σε επιφανειακούς και υπόγειους υδατικούς πόρους. Επειδή η ζήτηση για νερό συνεχώς αυξάνεται σε παγκόσμια κλίμακα ενώ ταυτόχρονα η κατανομή υδατικών πόρων είναι γενικά ανομοιόμορφη, τόσο χωρικά όσο και χρονικά, η μελέτη όλων των σχετικών προβλημάτων αποτελεί ένα τεράστιο επιστημονικό αντικείμενο.

6.2 Χαρακτηριστικά διαφοροποίησης υπόγειων και επιφανειακών πόρων και στόχοι που εξυπηρετούν οι πρώτοι

Τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά που διαφοροποιούν τους υπόγειους από τους επιφανειακούς πόρους μπορούν να συνοψισθούν ως εξής:

1. Κατανομή στον χώρο: Ενώ τα επιφανειακά νερά εμφανίζονται τοπικά (λίμνες) ή ακολουθούν συγκεκριμένη πορεία (ποτάμια), τα υπόγεια νερά καταλαμβάνουν τεράστιες εκτάσεις. Από άποψη λοιπόν εγκαταστάσεων για την εκμετάλλευση τους τα επιφανειακά νερά απαιτούν πολλές φορές ιδιαίτερα δαπανηρά συστήματα μεταφοράς ενώ τα υπόγεια ικανοποιούν σχετικά εύκολα την τοπική ζήτηση με απευθείας αντλήσεις.
2. Χρονική μεταβλητότητα: Σε αντίθεση με τα επιφανειακά, τα υπόγεια νερά παρουσιάζουν πολύ μικρή μεταβλητότητα στη διάρκεια του χρόνου. Έτσι τα υδάτινα αποθέματα που αποθηκεύονται στο έδαφος είναι συνήθως μεγάλα και μπορούν να καλύψουν τις ανάγκες σε διάφορες χρονικές περιόδους.
3. Κόστος εγκαταστάσεων και λειτουργίας: Ενώ τα έργα συλλογής επιφανειακών νερών έχουν τεράστιο κόστος (φράγματα, ταμιευτήρες, αγωγοί μεταφοράς κλπ.) το κόστος λειτουργίας τους είναι συνήθως μικρό. Αντίθετα το κόστος των εγκαταστάσεων εκμετάλλευσης των υπόγειων νερών (γεωτρήσεις, αντλιοστάσια κλπ.) είναι πολύ χαμηλό, ενώ το κόστος

της λειτουργίας και της συντήρησης τους είναι σημαντικό, ιδιαίτερα όταν η άντληση γίνεται από βαθιά υδροφόρα στρώματα.

4. Ποιότητα του νερού: Πρόκειται για πολύ σημαντικό θέμα στην εκμετάλλευση και διαχείριση των υδάτινων πόρων. Ειδικά για τα υπόγεια νερά, που κατ' αρχήν είναι λιγότερο εκτεθειμένα στη ρύπανση από τα επιφανειακά, η διαδικασία εξυγίανσης, εφόσον διαπιστωθεί κάποιο φαινόμενο ρύπανσης, είναι πολύ δύσκολή και εξαιρετικά δαπανηρή.

Τέλος, θα πρέπει να τονισθεί ότι τα υδροφόρα στρώματα στο έδαφος δεν αποτελούν μόνο πηγές παροχής νερού αλλά εξυπηρετούν πολλαπλούς στόχους.

1. Αποτελούν πηγές παροχής νερού: Είναι η πιο βασική βεβαίως λειτουργία. Λόγω της επαναπλήρωσης των αποθεμάτων με τις κατακρημνίσεις τα υπόγεια νερά θεωρούνται ανανεώσιμοι πόροι.

2. Συνιστούν δεξαμενές αποθήκευσης: Ιδιαίτερα τα επιφανειακά υδροφόρα στρώματα λόγω της άμεσης δυνατότητας ανανέωσης των αποθεμάτων αλλά και των τεράστιων όγκων τους μπορούν να αποθηκεύσουν εξαιρετικά μεγάλες ποσότητες. Η αποθηκευτική ικανότητα των στρωμάτων αυτών μπορεί να αυξηθεί ακόμα περισσότερο με την τεχνική του τεχνητού εμπλουτισμού.

3. Λειτουργούν ως αγωγοί μεταφοράς: Η λειτουργία αυτή μπορεί να ενεργοποιηθεί μόνο με την παρέμβαση του ανθρώπινου παράγοντα (π.χ. με μεταβολή των τοπικών υδραυλικών συνθηκών).

4. Μπορούν να λειτουργήσουν ως φίλτρα καθαρισμού: Με διάφορες τεχνικές τεχνητού εμπλουτισμού ακάθαρτα επιφανειακά νερά μπορούν να διηθηθούν στο έδαφος για μερικό ή πλήρη καθαρισμό τους.

5. Μπορούν να ρυθμίσουν παροχές επιφανειακών νερών: Η λειτουργία αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί τόσο στα ποτάμια όσο και στις πηγές με τη ρύθμισή της στάθμης των υπόγειων νερών (π.χ. με αντλήσεις) στα υδροφόρα στρώματα που επικοινωνούν υδραυλικά με επιφανειακά νερά.

6.3 Υδραυλική των πηγαδιών

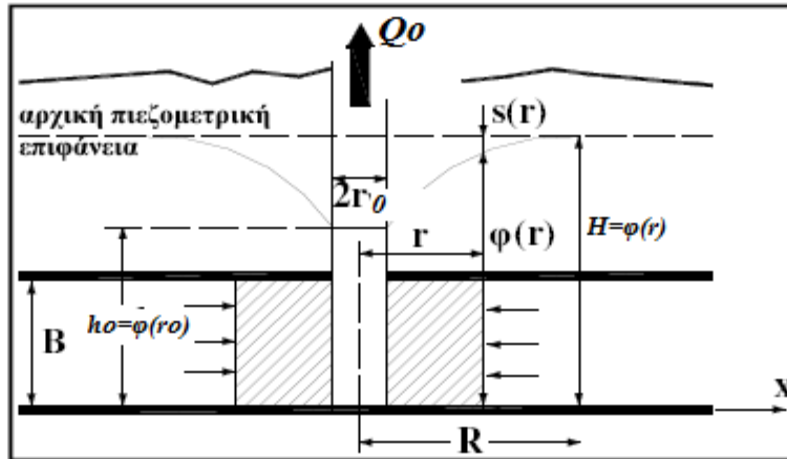
Οι διάφορες περιπτώσεις ροών που προκαλούνται από αντλήσεις υπόγειου νερού μέσα από πηγάδια μπορούν να ταξινομηθούν ανάλογα: α) με το αν η ροή είναι μόνιμη ή μη μόνιμη και β) με το αν η ροή γίνεται σε περιορισμένο ή φρεάτιο υδροφορέα. Σε οποιαδήποτε περίπτωση πάντως η μελέτη του προβλήματος ξεκινά θεωρώντας την αρχική θέση της πιεζομετρικής ή της ελεύθερης επιφάνειας πριν αρχίσει η διαδικασία της άντλησης. Στη συνέχεια το πρόβλημα λύνεται με άγνωστη μεταβλητή την πτώση της στάθμης $s(x,y,t)$ της πιεζομετρικής ή της ελεύθερης επιφάνειας. Το μέγεθος αυτό ορίζεται σε κάθε σημείο (x,y) του υδροφορέα και για κάθε χρονική στιγμή t , ως η κατακόρυφη απόσταση μεταξύ της αρχικής και της υπόψη θέσης της αντίστοιχής επιφάνειας.

Η βασική υπόθεση που γίνεται σε όλα τα προβλήματα άντλησης με πηγάδια που παρουσιάζονται παρακάτω είναι ότι η ροή γίνεται κατά την οριζόντια διεύθυνση και ότι το πηγάδι διανοίγεται και κατά συνέπεια αντλεί μέχρι τον αδιαπέρατο πυθμένα του υδροφορέα. Το σφάλμα πάντως στην τιμή της πτώσης στάθμης που μπορεί να παρουσιασθεί σε παρεκκλίσεις των παραπάνω υποθέσεων εκτείνεται σε απόσταση όχι μεγαλύτερη του διπλάσιου πάχους του υδροφορέα.

Στη συνέχεια δίνονται συνοπτικά οι αναλυτικές σχέσεις υπολογισμού της πτώσης στάθμης για διάφορους τύπους προβλημάτων. Πρέπει να σημειωθεί ότι η παράμετρος R , η οποία εμφανίζεται στις σχέσεις των μόνιμων ροών αποτελεί την ακτίνα επιρροής του πηγαδιού, δηλαδή την απόσταση εκείνη πέρα από την οποία η ροή δεν μεταβάλλεται εξαιτίας της συγκεκριμένης άντλησης. Ακόμα όλα τα παρακάτω προβλήματα υποτίθενται ότι αφορούν ροές σε άπειρης έκτασης ομογενείς υδροφορείς.

Μόνιμη ροή από άντληση πηγαδιού σε περιορισμένο υδροφορέα

Η σχηματική παράσταση του προβλήματος δίνεται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 6.1: Σχηματική παράσταση μόνιμης ροής από άντληση πηγαδιού σε περιορισμένο υδροφορέα

Η σχέση υπολογισμού της πτώσης στάθμης είναι: $s = \frac{Q_0}{2\pi T} \cdot \ln \frac{R}{r}$ (6.1)

Η παραπάνω σχέση ονομάζεται και σχέση του Dupuit ενώ παραλλαγή της, γνωστή ως η σχέση του Thiem, συνδέει τις πτώσεις στάθμης σε δυο θέσεις του υδροφορέα:

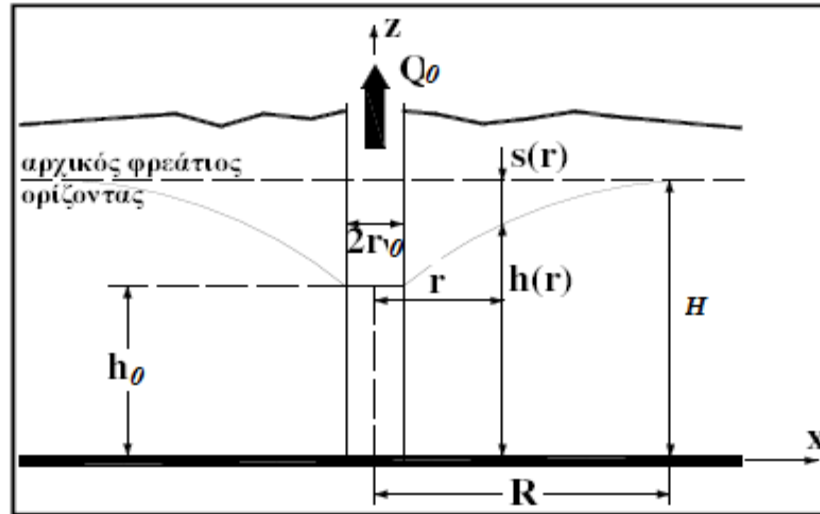
$$s_1 - s_2 = \frac{Q_0}{2\pi T} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (6.2)$$

Τέλος, αν είναι γνωστή η πτώση στάθμης s_0 στην παρειά του πηγαδιού r_0 , τότε μπορούμε να υπολογίσουμε την πτώση στάθμης s σε οποιαδήποτε απόστασή r από το κέντρο του πηγαδιού με τη σχέση:

$$s - s_0 = \frac{Q}{2\pi T} \cdot \ln \frac{r_0}{r} \quad (6.3)$$

Μόνιμη ροή από άντληση πηγαδιού σε φρεάτιο υδροφορέα

Η σχηματική παράσταση του προβλήματος δίνεται στην ακόλουθη εικόνα:



Εικόνα 6.2: Σχηματική παράσταση μόνιμης ροής από άντληση πηγαδιού σε φρεάτιο υδροφορέα

Με την αποδοχή της υπόθεσης του Dupuit για οριζόντια ροή η πτώση στάθμης μπορεί να υπολογισθεί από τη σχέση:

$$H^2 - h^2 = \frac{Q_0}{\pi K} \cdot \ln \frac{R}{r} \quad (6.4)$$

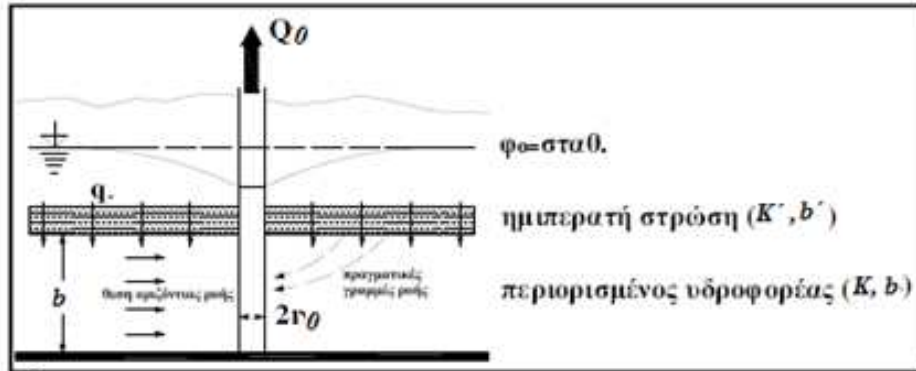
Αν και πάλι χρησιμοποιηθούν τα στοιχεία του πηγαδιού καταλήγουμε στην παρακάτω σχέση που είναι γνωστή ως σχέση Dupuit – Forchheimer:

$$H^2 - h_0^2 = \frac{Q_0}{\pi K} \cdot \ln \frac{R}{r_0} \quad (6.5)$$

Αν τέλος υποτεθεί ότι το μέγεθος της πτώσης στάθμης είναι μικρό σε σχέση με το κορεσμένο πάχος του υδροφορέα τότε μπορούν να χρησιμοποιηθούν χωρίς σημαντικό λάθος οι γραμμικές σχέσεις του περιορισμένου υδροφορέα.

Μόνιμη ροή από άντληση πηγαδιού σε περιορισμένο υδροφορέα με διαρροή

Υπάρχουν πολλές δυνατές παραλλαγές του προβλήματος στο οποίο το ένα όριο του υδροφορέα είναι ημιπερατό. Η σχηματική απεικόνιση μιας εξ' αυτών που θα αναλυθεί δίνεται στην ακόλουθη εικόνα:



Εικόνα 6.3: Σχηματική απεικόνιση μόνιμης ροής από άντληση πηγαδιού σε περιορισμένο υδροφορέα με διαρροή

Θα πρέπει σε αυτό το σημείο να σημειωθεί ότι η αντίσταση του ημιπερατού στρώματος c ισούται με το γινόμενο $b' \cdot K'$ ενώ ο παράγοντας διαρροής λ που εμφανίζεται στις παρακάτω σχέσεις ισούται με $(T \cdot c)^{1/2}$. Η σχέση υπολογισμού της πτώσης στάθμης είναι λοιπόν:

$$s = \frac{Q_0}{2 \pi T} \cdot K_0 \cdot \frac{r}{\lambda} \quad (6.6)$$

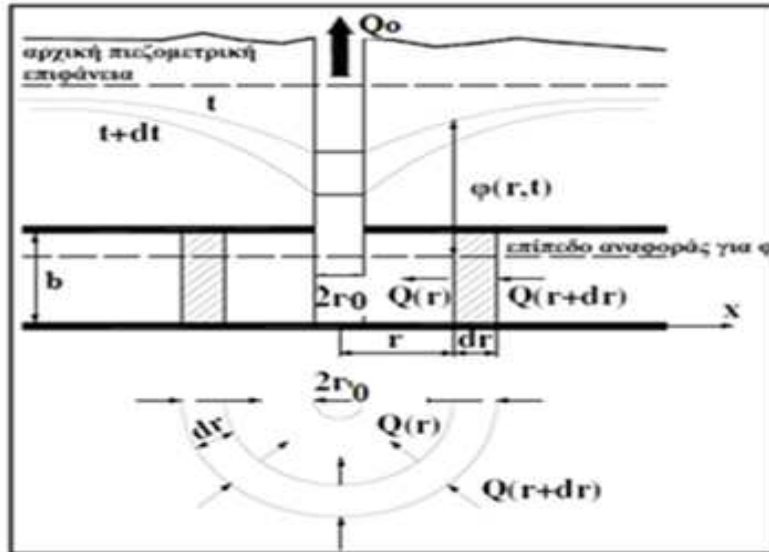
Όπου K_0 είναι η τροποποιημένη συνάρτηση του Bessel δεύτερου είδους. Για σημεία κοντά στο πηγάδι και γενικά για $r/\lambda < 0.2$ η πιο εύχρηστη σχέση:

$$s = \frac{Q_0}{2 \pi T} \cdot \ln \frac{1.123 \lambda}{r} \quad (6.7)$$

δίνει εκτιμήσεις της πτώσης στάθμης με σφάλμα μικρότερο του 1%.

Μη μόνιμη ροή από άντληση πηγαδιού σε περιορισμένο υδροφορέα

Η σχηματική παράσταση του προβλήματος δίνεται στην ακόλουθη εικόνα:



Εικόνα 6.4: Σχηματική παράσταση μη μόνιμης ροής από άντληση πηγαδιού σε περιορισμένο υδροφορέα

Η γενική λύση για την πτώση στάθμης είναι: $s(r,t) = \frac{Q_0}{4\pi T} \cdot w(u)$ (6.8)

όπου $W(u)$ είναι η συνάρτηση πηγαδιού για περιορισμένο υδροφορέα. Η $W(u)$ δεν έχει αναλυτική σχέση υπολογισμού, όμως τιμές της μπορούν να βρεθούν είτε άμεσα μέσω μιας προσεγγιστικής σχέσης είτε με παρεμβολή από σχετικούς πίνακες. Για μικρές τιμές της u , π.χ. για $u < 0.01$ η πτώση της στάθμης μπορεί να δοθεί από τον προσεγγιστικό τύπο:

$$s(r,t) = \frac{Q_0}{4\pi T} \cdot \ln \frac{2.25 \cdot T \cdot t}{r^2 \cdot s} \quad (6.9)$$

6.4 Μοντέλα προσομοίωσης των υπόγειων ροών

Στο τμήμα αυτό δίνονται συνοπτικά στοιχεία που αφορούν το σκοπό, την κατασκευή και την εφαρμογή των αριθμητικών μοντέλων που προσομοιώνουν προβλήματα υπόγειων ροών. Η περιγραφή των κύριων μεθοδολογιών επίλυσης των μοντέλων αυτών που ακολουθεί περιλαμβάνει

τα απαραίτητα μόνο στοιχεία για την κατανόηση των αρχών τους καθώς και τα ιδιαίτερα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα τους.

Η ανάγκη χρήσης αριθμητικών μεθόδων για την προσομοίωση των φυσικών φαινομένων στα οποία κυριαρχούν οι υπόγειες ροές προκύπτει από την αδυναμία των αναλυτικών λύσεων να καλύψουν με αξιοπιστία τα πρακτικά προβλήματα διαφόρων εφαρμογών. Οι λόγοι της αδυναμίας αυτής μπορούν να συνοψισθούν στα εξής: α) Δεν είναι δυνατό να βρεθούν αναλυτικές λύσεις για τις γενικές μορφές των εξισώσεων ιδίως για δισδιάστατα και τρισδιάστατα προβλήματα. β) Δεν είναι δυνατό να περιγραφούν πεδία ροής με σύνθετη ή ακανόνιστη γεωμετρία ορίων. γ) Είναι πολύ δύσκολο να επιλυθούν σύνθετα προβλήματα, όπως έντονη ετερογένεια των παραμέτρων, λειτουργία συστημάτων πηγαδιών κλπ.

Σύμφωνα με τα παραπάνω σκοπός των αριθμητικών μοντέλων προσομοίωσης είναι η μελέτη και η πρόγνωση της εξέλιξης σύνθετων φαινομένων σχετικών με υπόγειες ροές (π.χ. εκμετάλλευση και διαχείριση υπόγειων πόρων, προστασία από την υφαλμύρωση παράκτιων υδροφορέων, υποβιβασμός στάθμης για αποστράγγιση εδαφών κλπ.).

Κατασκευή και εφαρμογή αριθμητικών μοντέλων

Για την κατασκευή ενός αριθμητικού μοντέλου προσομοίωσης των φυσικών φαινομένων σε ένα σύστημα υπόγειων νερών πρέπει κατ' αρχήν να καθορισθούν όσο πιο αξιόπιστα γίνεται οι γεωλογικές του ενότητες και οι υδρολογικές παράμετροι του υπό μελέτη πεδίου. Στη συνέχεια πρέπει να προσδιορισθούν οι κύριες φυσικές διεργασίες που επικρατούν και να επιλεγούν ανάλογα οι φυσικοί νόμοι που τις διέπουν. Οι νόμοι αυτοί συνήθως εκφράζονται με μαθηματικό τρόπο μέσω διαφορικών εξισώσεων.

Το μαθηματικό λοιπόν πρόβλημα ή, όπως αλλιώς λέγεται, το θεωρητικό μοντέλο του συστήματος καθορίζεται όταν περιγραφούν οι φυσικοί νόμοι με τις κατάλληλες διαφορικές εξισώσεις ενώ παράλληλα, με τη βοήθεια υδρογεωλογικών και υδρολογικών ερευνών, καθορισθούν τα όρια και οι οριακές συνθήκες του πεδίου ροής. Για να επιλυθούν οι διαφορικές εξισώσεις με αριθμητικές μεθόδους το σύστημα (πεδίο) διακριτοποιείται και οι εξισώσεις προσεγγίζονται με αλγεβρικές εξισώσεις σ' έναν πεπερασμένο αριθμό σημείων του πεδίου. Η αριθμητική λοιπόν λύση του μαθηματικού προβλήματος αφορά στην επίλυση των αλγεβρικών εξισώσεων, που για πρακτικά προβλήματα είναι συνήθως της τάξεως των χιλιάδων. Η όλη

διαδικασία της επίλυσης σχηματοποιείται μ' ένα αριθμητικό κώδικα ή , όπως συνηθίζεται απλά να λέγεται , μ' ένα πρόγραμμα ηλεκτρονικού υπολογιστή που χαρακτηρίζεται -καταχρηστικά- ως αριθμητικό μοντέλο. Το πραγματικό αριθμητικό μοντέλο είναι αυτό που περιγράφηκε, δηλαδή η αναπαράσταση (προσομοίωση) του πραγματικού συστήματος και των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα σ' αυτό με τις αριθμητικές (αλγεβρικές) σχέσεις που το προσεγγίζουν και που η αξιοπιστία του εξαρτάται κατά κύριο λόγο από την ορθή αρχική διαμόρφωση του θεωρητικού μοντέλου.

Πριν να εφαρμοσθεί ένα αριθμητικό μοντέλο σε οποιοδήποτε πρακτικό πρόβλημα πρέπει πρώτα να αξιολογηθεί, κυρίως σε ότι αφορά τα αριθμητικά σφάλματα που πιθανά δημιουργεί και που μπορεί να προέρχονται τόσο από την επίλυση του συστήματος των αλγεβρικών εξισώσεων όσο και από σφάλματα στον αριθμητικό κώδικα. Η διαδικασία αυτή γίνεται συνήθως με σύγκριση των αποτελεσμάτων του αριθμητικού μοντέλου με τα αντίστοιχα μιας αναλυτικής λύσης για απλές περιπτώσεις προβλημάτων. Σε μια δεύτερη φάση ελέγχου το αριθμητικό μοντέλο πρέπει να ελεγχθεί αν πράγματι προσομοιώνει τα φυσικά φαινόμενα τα οποία κατασκευάστηκε να αναπαράγει. Αυτή η διαδικασία υλοποιείται συγκρίνοντας τα αποτελέσματα του μοντέλου με αντίστοιχες μετρήσεις στο εργαστήριο ή στο πεδίο. Επειδή αποκλίσεις μεταξύ μετρήσεων και αριθμητικών αποτελεσμάτων παρουσιάζονται σχεδόν πάντοτε εξαιτίας ελλιπών δεδομένων πεδίου ή σφαλμάτων μετρήσεων, η διαδικασία ολοκληρώνεται με τη λεγόμενη ρύθμιση του μοντέλου. Η σύγχρονη αντίληψη για τη ρύθμισή των αριθμητικών μοντέλων επικεντρώνεται στην αυτοματοποιημένη τροποποίηση και προσαρμογή των φυσικών παραμέτρων με διάφορες μεθόδους που συνιστούν το λεγόμενο πρόβλημά ταυτοποίησης ή αντίστροφο πρόβλημα.

Η τελευταία φάση όλης της διαδικασίας είναι αυτή της εφαρμογής του μοντέλου στην οποία αποκλειστικός στόχος είναι η προσομοίωση των φυσικών φαινομένων ενός πραγματικού συστήματος και ειδικότερα η διερεύνηση ή η πρόγνωση των πιο δυσμενών συνήθως καταστάσεων του.

Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών

Η πιο παλιά μέθοδος διακριτοποίησης των διαφορικών εξισώσεων είναι αυτή των πεπερασμένων διαφορών. Στόχος της μεθόδου είναι να μετατραπεί η διαφορική εξίσωση σε εξίσωση διαφορών, δηλαδή αλγεβρική, πράγμα που

επιτυγχάνεται με την προσέγγιση των μερικών παραγώγων με όρους διαφορών.

Για να υλοποιηθεί η αριθμητική διακριτοποίηση της διαφορικής εξίσωσης πρέπει να γίνει πρώτα η διακριτοποίηση του πεδίου ροής. Σε ένα δισδιάστατο ή τρισδιάστατο πρόβλημα μπορεί να ορισθεί στο επίπεδο x-y ή x-y-z αντίστοιχα το πεδίο ροής, τότε η διακριτοποίηση του γίνεται με τη χάραξη ενός ορθογωνικού δικτύου γραμμών σε δυο ή τρεις διαστάσεις που καλείται κανάβος. Οι ισοδιαστάσεις του κανάβου ορίζονται ανάλογα με τη φύση του προβλήματος και μπορούν να αυξάνουν ή να μειώνονται τοπικά. Τέλος για τα μη μόνιμα προβλήματα ροής το συνολικό χρονικό διάστημα μελέτης τους διακριτοποιείται επίσης σε χρονικά βήματα.

Η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών μπορεί να εφαρμοσθεί με επιτυχία σε προβλήματα δυο ή και τριών διαστάσεων. Γενικά όμως δεν θεωρείται η καλύτερη εξαιτίας της δέσμευσής από τον κανάβο που πρέπει να είναι ορθογωνικής μορφής, αλλά και σε ορισμένες περιπτώσεις, από τη δυσκολία στην ακριβή αριθμητική διακριτοποίηση των εξισώσεων.

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων

Τα βασικά στοιχεία της μεθόδου αυτής που την καθιστούν πολύ εύχρηστη και ιδιαίτερα αποτελεσματική είναι: α) Αναπαριστάνονται με φυσικό τρόπο τα ακανόνιστα γεωμετρικά όρια των πεδίων και οι οριακές συνθήκες β) Προσομοιώνονται η ακρίβεια, η ετερογένεια και η ανισοτροπία των πεδίων ροής γ) Ειδικές περιοχές όπου υπάρχουν ή αναμένονται έντονες μεταβολές του φορτίου προσομοιώνονται με ακρίβεια καθώς είναι πολύ εύκολη η τοπική μόνο πύκνωση των σημείων του κανάβου

Για τη κατασκευή με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων ενός τυπικού προβλήματος υπόγειας ροής διακριτοποιείται κατ' αρχήν το πεδίο με τον χωρισμό του σε ένα αριθμό στοιχείων. Τα στοιχεία είναι διάφορα επίπεδα σχήματα, τα πιο εύχρηστα από τα οποία είναι τα τρίγωνα (τριγωνικά στοιχεία). Μετά την κατασκευή του κανάβου ακολουθεί η επιλογή μιας συνάρτησής παρεμβολής που περιγράφει τη μεταβολή της εξαρτημένης μεταβλητής σε κάθε στοιχείο σαν συνάρτηση των τιμών της στους κόμβους. Με τη συναρμολόγηση στη συνέχεια όλων των πεπερασμένων στοιχείων ώστε να δημιουργηθεί το πεδίο ροής υλοποιείται και η αλληλεπίδραση των επιμέρους συναρτήσεων στη συνολική προσέγγιση για όλο το πεδίο.

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων εφαρμόζεται τόσο σε δισδιάστατα όσο και σε τρισδιάστατα προβλήματα. Ειδικά για τα δισδιάστατα προβλήματα το πεδίο ροής μπορεί να είναι είτε οριζόντια είτε κατακόρυφη τομή και κατά συνέπεια καλύπτεται όλο το φάσμα των πρακτικών εφαρμογών.

Η μέθοδος των οριακών στοιχείων

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου των οριακών στοιχείων απέναντι στις μεθόδους «πεδίου» όπως χαρακτηρίζονται οι μέθοδοι πεπερασμένων διαφορών και πεπερασμένων στοιχείων είναι: α) Η μεγάλη ακρίβεια των αποτελεσμάτων στο εσωτερικό του πεδίου β) Η χαρακτηριστική απλότητα εισαγωγής δεδομένων του φυσικού προβλήματος γ) Τα συστήματα των αλγεβρικών εξισώσεων που προκύπτουν από τη διακριτοποίηση των διαφορικών εξισώσεων έχουν μικρό μέγεθος. Στα μειονεκτήματα της μεθόδου περιλαμβάνονται η δυσκολία περιγραφής έντονα ετερογενών πεδίων και η έλλειψη απλότητας στη επίλυση μη μόνιμων ροών. Τελικά η μέθοδος είναι ιδιαίτερα εύχρηστη σε ειδικές κατηγορίες προβλημάτων και ιδιαίτερα όταν λειτουργούν συστήματα πηγαδιών.

Η εξίσωση της υπόγειας ροής σε ένα πεδίο που περικλείεται από μια κλειστή καμπύλη καταλήγει στην εξίσωση Laplace για το πιεζομετρικό φορτίο. Η εφαρμογή των αρχών της μεθόδου στηρίζεται στη χρήση των συναρτήσεων Green και στη μετατροπή επιφανειακών ολοκληρωμάτων σε επικαμπύλια. Ο αριθμητικός υπολογισμός του ολοκληρώματος αυτού γίνεται διακριτοποιώντας την οριακή καμπύλη σε ένα αριθμό ευθύγραμμων τμημάτων που καλούνται οριακά στοιχεία, κατά μήκος των οποίων η μεταβλητή του πιεζομετρικού φορτίου προσεγγίζεται από μια ειδικής μορφής συνάρτηση. Έτσι γνωρίζοντας είτε την τιμή του πιεζομετρικού φορτίου είτε της παραγωγού του στα διάφορα τμήματα του ορίου επιλύεται ένα σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων για τον προσδιορισμό των παραπάνω αγνώστων τιμών σε κάθε οριακό στοιχείο και στη συνέχεια υπολογίζονται οι τιμές του πιεζομετρικού φορτίου σε ένα πρακτικά άπειρο αριθμό εσωτερικών στοιχείων.

Αξιολόγηση των αριθμητικών μεθόδων προσομοίωσης

Η εξίσωση μιας υπόγειας ροής μπορεί να επιλυθεί αριθμητικά με μια από τις τρεις μεθόδους: πεπερασμένων διαφορών, πεπερασμένων στοιχείων και οριακών στοιχείων.

Σε ότι αφορά την αριθμητική τεχνική που χρησιμοποιείται, η μέθοδος των πεπερασμένων διαφορών είναι η πιο απλή, κατανοητή και από υπολογιστική άποψη άμεσα εφαρμόσιμη. Σε αυτή την τεχνική στηρίζεται και ο κώδικας SEAWAT μέσω του οποίου επιλύθηκε η προσομοίωση του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα της λεκάνης Γαδουρά.

Η μέθοδος των πεπερασμένων στοιχείων επιτρέπει μια σημαντικά πιο εύελκτη διακριτοποίηση του πεδίου και του ορίου του, σε σύγκριση με τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών. Η διακριτοποίηση της διαφορικής εξίσωσης γίνεται με την ελαχιστοποίηση του σφάλματος που προκύπτει από μια ολοκληρωματική σχέση. Για τα μη μόνιμα προβλήματα η μεθοδολογία αυτή οδηγεί σε μια κανονική διαφορική εξίσωση για κάθε κόμβο του δικτύου, που στη συνέχεια μετατρέπεται σε σύστημα αλγεβρικών εξισώσεων με την εφαρμογή σχέσεων πεπερασμένων διαφορών ως προς το χρόνο.

Το μεγαλύτερο πλεονέκτημα της μεθόδου των οριακών στοιχείων αποτελεί η μείωση των διαστάσεων του προβλήματος κατά μια (π.χ. ένα δισδιάστατο πρόβλημά λύνεται ως μονοδιάστατο). Για περιπτώσεις μόνιμων φαινομένων σε υδροφορείς των οποίων οι υδρολογικές παράμετροι παρουσιάζουν ομογένεια σε μεγάλες εκτάσεις η μέθοδος αυτή είναι η καλύτερη επιλογή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7
Εφαρμογή Προσομοίωσης

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

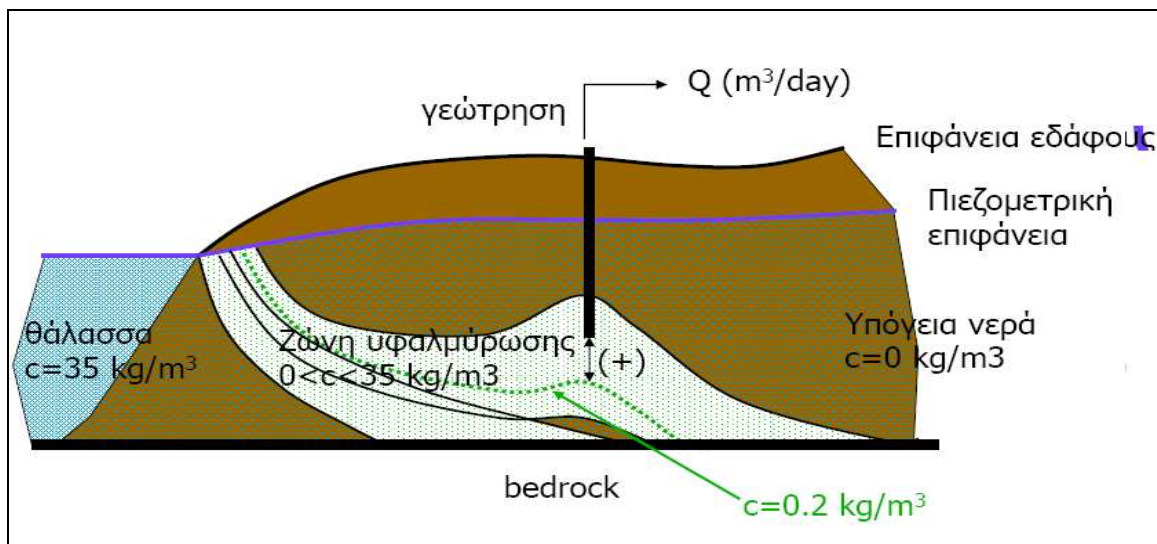
ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

7.1 Γενικά

Με βάση τα όσα προαναφέρθηκαν γίνεται κατανοητό ότι η προσομοίωση ενός παράκτιου υδροφορέα αποτελεί μια ιδιαίτερα σύνθετη διαδικασία. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το θαλασσινό νερό έχοντας μεγαλύτερη πυκνότητα και ειδικό βάρος σε σχέση με το γλυκό νερό του υδροφορέα, εμποδίζει την κίνηση του δεύτερου προς τη θάλασσα.

Όσο αναφορά την προσομοίωση των υπόγειων νερών υπάρχουν αρκετά μοντέλα που ειδικεύονται σε αυτό το κομμάτι όπως τα MODFLOW, FLOWPATH, MT3D, SURFER, Mantoglou et al και το SEAWAT στο οποίο βασίστηκε αποκλειστικά η προσομοίωση του παράκτιου φρεάτιου υδροφορέα της λεκάνης Γαδουρά στη νήσο Ρόδο.

Το συγκεκριμένο μοντέλο (SEAWAT) βασίζεται στη θεώρηση υφάλμυρης ζώνης μεταξύ γλυκού και αλμυρού νερού, όπου οι τιμές των συγκεντρώσεων κυμαίνονται μεταξύ 0 και 35 kg/m^3 και εκτιμάται ότι προσομοιώνει επιτυχώς έναν φρεάτιο παράκτιο υδροφορέα σε συνθήκες μόνιμης ροής (θεωρία μεταβλητής πυκνότητας). Στην εικόνα που ακολουθεί διακρίνεται η ζώνη υφαλμύρωσης ενός παράκτιου υδροφορέα.



Εικόνα 7.1: Απεικόνιση υφάλμυρης ζώνης

7.2 Ο Κώδικας SEAWAT

Η αρχική ιδέα για τη δημιουργία του SEAWAT το οποίο αποτελεί συνδυασμό του MODFLOW και MT3D σε ένα ενιαίο πρόγραμμα για την τρισδιάστατη προσομοίωση της ροής υπόγειου νερού μεταβλητής πυκνότητας τεκμηριώθηκε για πρώτη φορά από Guo και Bennett (1998). Αργότερα, ως μέρος ενός σχεδίου του φορέα Γεωλογικών Ερευνών των Ηνωμένων Πολιτειών για να ποσοτικοποιηθούν τα υποθαλάσσια νερά, το πρόγραμμα SEAWAT βελτιώθηκε και ενημερώθηκε (Langevin και Guo, 1999).

Το πρόγραμμα SEAWAT αναπτύχθηκε για την τρισδιάστατη προσομοίωση της ροής υπόγειων υδάτων μεταβλητής πυκνότητας σε πορώδη υλικά. Ο κώδικας αναπτύχθηκε από το συνδυασμό των προγραμμάτων MODFLOW και MT3DMS σε ένα ενιαίο πρόγραμμα που λύνει το συνδυασμό ροής και διαλυτής ουσίας με εξισώσεις μεταφοράς και χρησιμοποιεί μια διαδικασία για να συνδέσει την εξίσωση της ροής του νερού με την εξίσωση μεταφοράς της διαλυτής ουσίας. Αρχικά επιλύεται η εξίσωση ροής για κάθε χρονικό βήμα και τα αποτελέσματα του πεδίου ταχυτήτων χρησιμοποιούνται για την επίλυση της εξίσωσης μεταφορών της διαλυτής ουσίας. Αυτή η διαδικασία με την επίλυση εναλλάξ των εξισώσεων ροής και μεταφοράς επαναλαμβάνεται έως ότου η περίοδος αναφοράς και η προσομοίωση ολοκληρωθούν. Οι εξισώσεις ροής και μεταφοράς επιλύονται πολλές φορές για το ίδιο χρονικό βήμα μέχρι η μέγιστη διαφορά της πυκνότητας στο υγρό μεταξύ δύο διαδοχικών επαναλήψεων να είναι μικρότερη από την ανοχή που καθορίζει ο χρήστης.

Το υπόγειο νερό περιέχει διαλυμένα συστατικά, όπως άλατα που βρίσκονται συνήθως στο θαλασσινό νερό. Σε σχετικά χαμηλές συγκεντρώσεις τα διαλυμένα συστατικά δεν επηρεάζουν ουσιωδώς την πυκνότητα στο υγρό. Καθώς η διαλυτή συγκέντρωση αυξάνεται η μάζα των διαλυμένων συστατικών μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την πυκνότητα του υγρού. Αν η χωρική διακύμανση στην πυκνότητα του υγρού είναι ελάχιστη, ανεξάρτητα από την πραγματική τιμή της πυκνότητας, οι μαθηματικές μέθοδοι για τον ποσοτικό προσδιορισμό και τη μορφή της ροής του νερού είναι σχετικά απλές. Σε παράκτιους υδροφορείς όπου οι διαφοροποιήσεις της πυκνότητας στο υγρό είναι μεγάλες η μελέτη της ροής του νερού είναι περίπλοκη διότι οι διακυμάνσεις στη πυκνότητα μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά τα ποσοστά και τα πρότυπα της ροής του υγρού. Σε πολλές υδρογεωλογικές μελέτες η ακριβής αναπαράσταση της μεταβλητής πυκνότητας της ροής του

νερού είναι απαραίτητη για να χαρακτηρίσει και να προβλέψει το ρυθμό ροής του νερού, τη διαδρομή και το χρόνο παραμονής αυτού.

7.3 Εφαρμογή Μοντέλου στον Παράκτιο Υδροφορέα της Λεκάνης Γαδουρά

7.3.1 Προσδιορισμός της Γεωμετρίας του Μοντέλου

Κατασκευή Κανάβου του Μοντέλου (model grid)

Η υλοποίηση του κανάβου κατά το σχεδιασμό του μοντέλου στον υπολογιστή γίνεται με την εντολή (επιλογή: File → New).

Στο πρόγραμμα Ground Water Vistas 4 σχηματίζεται από δύο ζεύγη παραλλήλων γραμμών, κάθετα μεταξύ τους, τα οποία σχηματίζουν τα κελιά. Επισημαίνεται ότι η αύξηση του δείκτη k των επιπέδων του κανάβου του GWV4 αντιστοιχεί σε μείωση του υψομέτρου z γιατί τα επίπεδα αριθμούνται από πάνω προς τα κάτω. Μάλιστα ο κανάβος του GWV4 σχετίζεται με τις καρτεσιανές συντεταγμένες έτσι ώστε:

- Οι στήλες (J) να αντιστοιχούν στον άξονα τεταγμένων x
- Οι γραμμές (I) να αντιστοιχούν στον άξονα τεταγμένων y
- Τα επίπεδα (K) να αντιστοιχούν στον κατακόρυφο άξονα z

Η μορφή του κανάβου μπορεί να είναι ομοιόμορφη, όταν τα κελιά που τον αποτελούν είναι ίδιων διαστάσεων, είτε ανομοιόμορφη όταν το μέγεθος των κελιών ποικίλει. Ο ομοιόμορφος κανάβος ενδείκνυται ως προς την αρτιότητα του μοντέλου και αποτελεί καλή επιλογή όταν τα δεδομένα του συστήματος είναι ομοιόμορφα κατανεμημένα και μας ενδιαφέρει η συνολική του μελέτη. Αντίθετα ανομοιόμορφος κανάβος χρησιμοποιείται όταν τα δεδομένα που υπάρχουν αφορούν συγκεκριμένα τμήματα του υδροφορέα όπως στην περίπτωση μεταφοράς ρύπων όπου μας ενδιαφέρουν κάποιες συγκεκριμένες θέσεις της περιοχής. Εάν και εφόσον αποφασιστεί να χρησιμοποιηθεί ανομοιόμορφος κανάβος τότε θα πρέπει να ακολουθείται ένας σημαντικός κανόνας για τη σωστή μαθηματική επίλυση του μοντέλου. Το μέγεθος του κελιού και στις τρεις διαστάσεις δεν μπορεί να διαφέρει πάνω από 1,5 φορά του μεγέθους των γειτονικών κελιών.

Για τις ανάγκες της προσομοίωσης του παράκτιου υδροφορέα της λεκάνης Γαδουρά στη Ρόδο εφαρμόζεται ομοιόμορφος κανάβος, διότι τα δεδομένα

εισαγωγής θεωρούνται καλώς κατανεμημένα και δεν υπάρχει συγκεκριμένο τοπικό ενδιαφέρον με εξαίρεση τη θέση της υφάλμυρης ζώνης.

Σχετικά με τον οριζόντιο κανάβο οι διαστάσεις των κελιών που θα χρησιμοποιηθούν είναι 100 m x 100 m οπότε το μέγεθος του κανάβου είναι 5100 m x 11600 m. Το πλήθος των γραμμών είναι 116 και των στηλών 51. Όσο αναφορά το κατακόρυφο πλέγμα ο αριθμός των επιπέδων που ορίστηκαν είναι 10 με την οροφή του υδροφορέα να αντιστοιχεί στο υψόμετρο 0 και τη βάση του στο -50 m. Τέλος ο κανάβος του GWV4 έχει σημείο αναφοράς την επάνω αριστερή γωνία με πραγματικές συντεταγμένες σε σύστημα συντεταγμένων ΕΓΣΑ '87 (863350,4015550).

7.3.2 Εισαγωγή των τιμών των παραμέτρων των ιδιοτήτων του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα

Η εισαγωγή των παραμέτρων των ιδιοτήτων του υδροφορέα κατά το σχεδιασμό του μοντέλου στον υπολογιστή γίνεται με την εντολή (επιλογή: File → New).

Οριζόντια Υδραυλική Αγωγιμότητα (Horizontal Hydraulic Conductivity)

Στις περισσότερες περιπτώσεις η υδραυλική αγωγιμότητα K αποτελεί την κρισιμότερη και πιο ευαίσθητη παράμετρο του μοντέλου. Ο ακριβέστερος τρόπος εκτίμησης της τιμής της είναι μέσω κατάλληλων εργαστηριακών μετρήσεων ή επί τόπου δοκιμών εισπιέσεων. Σε κάποιες περιπτώσεις μπορεί να προσδιοριστεί με εκτέλεση διαδοχικών προσομοιώσεων εφαρμόζοντας διαφορετική τιμή K κάθε φορά (μέθοδος trial and error).

Στην περίπτωση της παρούσας εργασίας τέτοια δεδομένα απουσιάζουν και η τιμή της υδραυλικής αγωγιμότητας διατηρήθηκε ίδια με αυτή της διπλωματικής εργασίας του Γαβαλλά Βασιλείου και ίση με 15m/d για την οριζόντια διεύθυνση (x,y) και 1,5m/d για την κατακόρυφη, δηλαδή το 10% της οριζόντιας.

Αποθηκευτικότητα (Storage)

Η αποθηκευτικότητα σε ένα φρεάτιο υδροφορέα δείχνει τον όγκο νερού ΔU που απομακρύνεται από μια συγκεκριμένη έκταση A με αποτέλεσμα η ελεύθερη επιφάνεια να πέσει χαμηλότερα κατά Δh εξαιτίας μιας ροής.

Για τις τιμές των παραμέτρων επιλέχθηκε να διατηρηθούν οι προεπιλογές του προγράμματος όσο αναφορά τα $S=S_y=0.01$ ενώ η τιμή του ενεργού πορώδους εκτιμήθηκε προσεγγιστικά βάσει της επικρατούσας κοκκομετρίας των υλικών του υδροφορέα καθώς και βιβλιογραφικών δεδομένων. Η διακύμανση της προέκυψε μεταξύ των τιμών 0.10 – 0.15, οπότε θα πάρουμε μια μέση τιμή της τάξης του 0.12.

Τροφοδοσία υδροφορέα (Recharge)

Η τιμή της τροφοδοσίας προς το υδροφόρο σύστημα που εξετάζουμε, δηλαδή της κατείσδυσης ορίστηκε στο κεφάλαιο 4 και είναι ίση με 331.56 mm/έτος δηλαδή 0.00091 m/d.

Στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας εξετάστηκε και η περίπτωση που η τροφοδοσία μειωθεί στο μισό (0.000455 m/d) εξαιτίας κλιματολογικών μεταβολών, γεωλογικών αλλοιώσεων, ανθρωπογενών παρεμβάσεων κλπ. Το σημείο αυτό συνδέεται και με τα συμπεράσματα, όπου γίνεται αναφορά στα μέτρα που πρέπει να λαμβάνονται για την πρόληψη ακραίων φαινομένων και καταστάσεων ώστε να είμαστε σε θέση να καλύψουμε τη ζήτηση που θα παρουσιαστεί και τα επόμενα χρόνια. Θα πρέπει να τονίσουμε ότι αυτό είναι ένα από τα σενάρια που θα παρουσιαστούν στη συνέχεια.

Διασπορά (Dispersivity)

Η διασπορά αυτή ονομάζεται κινηματική διασπορά και οφείλεται στην ετερογένεια του πορώδους και στη μεταβλητότητα των μικροσκοπικών καθώς και των μακροσκοπικών ταχυτήτων στο πορώδες μέσο σε όλες τις δυνατές κλίμακες. Αυτή διακρίνεται σε διαμήκη, εγκάρσια και κατακόρυφη και οι τιμές είναι αντίστοιχα 10, 1, 0.1 δηλαδή η κάθε μια είναι το 10% της προηγούμενης. Η επιλογή αυτή έγινε ύστερα από συζήτηση με τον καθηγητή και τους υποψήφιους διδάκτορες.

Επισημαίνεται ότι σε όσες παραμέτρους δεν έγινε αναφορά διατηρήθηκαν οι προεπιλογές του προγράμματος είτε διότι δεν έχουν μεγάλη επίδραση στο μοντέλο μας είτε γιατί δεν υπήρχαν διαφορετικά δεδομένα.

Οι ορισμοί όλων των παραπάνω έγιναν στην καρτέλα του προγράμματος Ground Water Vistas 4 που φαίνεται παρακάτω:

Initialize Model Grid

Horizontal Model Grid				Vertical Model Grid			
Number of Rows	116			Number of Layers	1		
Number of Columns	51			Model Bottom Elevation	-50		
Uniform X Spacing	100			Model Top Elevation	0		
Uniform Y Spacing	100			<input type="checkbox"/> Layers are flat	Layer Elevations		

Default Parameter Values							
						No. Zones	
K	Kx	15	Ky	15	Kz	1.5	10
Storage	S	0.01	Sy	0.01	Porosity	0.12	10
Leakance		0.01					10
Recharge	Rate	0.00091	Conc.	0			10
ET	Rate	0	Extinction	0			10
Dispersivity	Long.	10	Transverse	1	Vertical	0.1	10
Sorption	Kd	0	Density	157			10
Initial Conc.		0					10

Maximum Number of Stress Periods: 1

World Coordinates of Model Origin: X: 863350, Y: 4015550, Rotation: 0

MODFLOW... ModelCad EVS... TMR... Flowpath... OK Cancel

7.3.3 Εισαγωγή Οριακών Συνθηκών (Boundary Conditions)

Με τον όρο οριακές συνθήκες εννοούνται οι συνθήκες ροής που επικρατούν στις θέσεις των ορίων του υδροφορέα. Συνηθέστερες κατηγορίες οριακών συνθηκών είναι (Bear J., 1979, Νάνου Α., 2006):

- Τα όρια δεδομένου πιεζομετρικού φορτίου ή συνθήκες Dirichlet ή οριακές συνθήκες πρώτου τύπου
- Τα όρια δεδομένης εισροής ή εκροής ή συνθήκες Neumann ή οριακές συνθήκες δεύτερου τύπου

- Τα ημιπερατά όρια ή συνθήκη Cauchy ή μικτή οριακή συνθήκη τρίτου τύπου
- Επιφάνεια διήθησης.

Στο πρόγραμμα GWV4 συναντάμε διαφορές επιλογές οριακών συνθηκών (Σταθερού φορτίου, Σταθερής ροής, ποτάμια, ρέματα κλπ) οι οποίες παρουσιάζονται με την επιλογή: BSc → Options.

Τα κελιά αυτά χρησιμοποιούνται για την περιγραφή των ορίων του μοντέλου που έχουν γνωστά υδραυλικά φορτία, όπως στις θέσεις που ο υδροφορέας έρχεται σε επαφή με υδάτινες επιφάνειες ή είναι αδιαπέρατος. Η τιμή του υδραυλικού φορτίου των κελιών αυτών δίδεται από την αρχή στο μοντέλο και δεν αλλάζει κατά τη διάρκεια μιας περιόδου προσομοίωσης.

Η τοποθέτηση οριακών συνθηκών γίνεται με την επιλογή: BSc → Insert. Με αυτό τον τρόπο μπορούμε να εισάγουμε οριακές συνθήκες σε ένα κελί (single cell), σε μια ορθογώνια περιοχή (window), κατά μήκος μιας ψηφιοποιημένης γραμμής (digitize polyline) και σε μια ψηφιοποιημένη περιοχή (digitize polygon).

Εξωτερικά Όρια

1. Αδιαπέρατοι σχηματισμοί (No Flow)

Η εισαγωγή τους έγινε με τον τρόπο που αναφέρθηκε παραπάνω και αφορά κελιά στα οποία η ροή είναι μηδενική.

2. Σταθερού φορτίου (Constant Head)

Τα κελιά σταθερού φορτίου αναφέρονται στη θάλασσα και κατά την εισαγωγή τους ορίσαμε τη τιμή του φορτίου 0 και της συγκέντρωσης 35 kg/m³, όπως φαίνεται και στη πιο κάτω καρτέλα:

Constant Value Boundary Condition

Data for Each Boundary Cell within the Window

Spatial Location

Row number: 40

Column number: 31

Layer number: 1

Reach number: 0

Boundary Characteristics

Head at Boundary: 0

Concentration at Boundary: 35

Head Value is Constant or Specified

Concentration Value is Constant or Specified

All Component Concentrations are Constant

Store Data for More Than One Component

Options

Steady-state Boundary Condition

Computed Boundary Condition

Transient Data

Component C...

OK

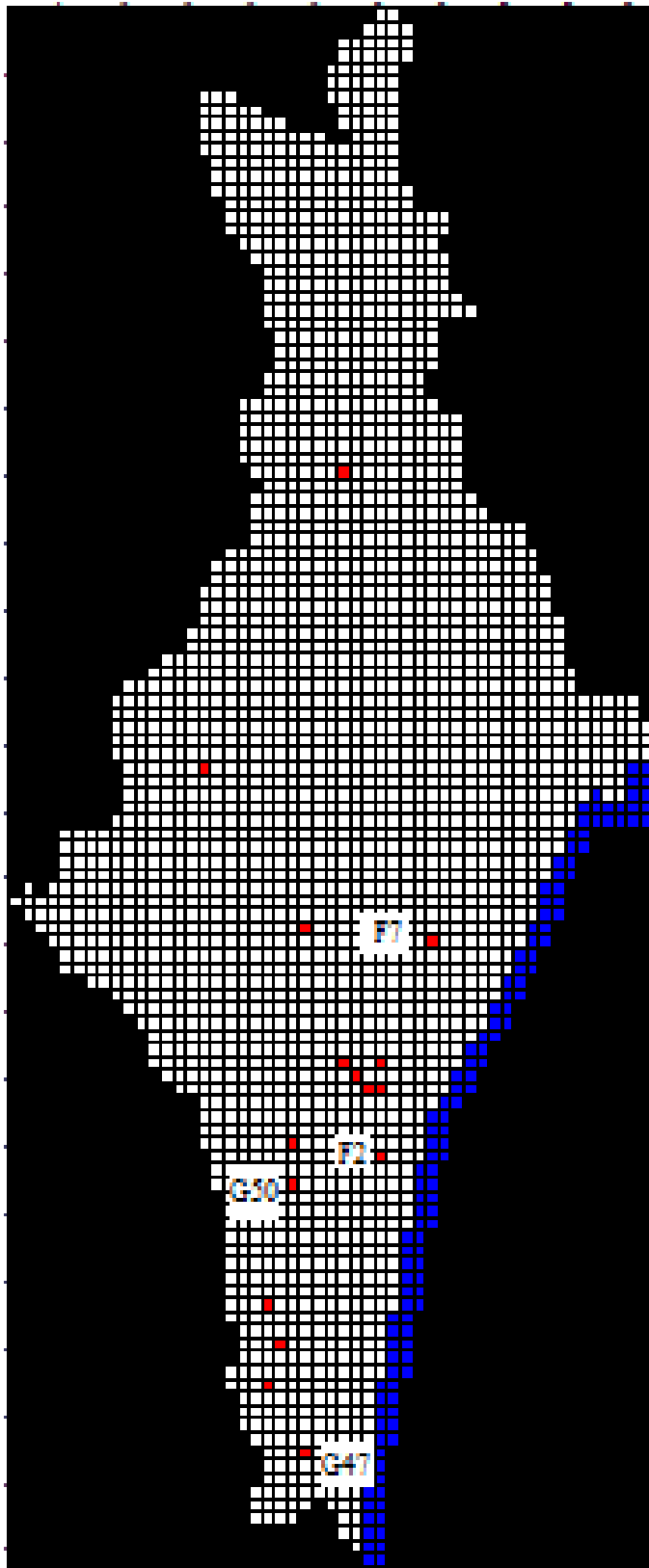
Color

Cancel

Title

Replace Select Option when Editing an Existing Boundary Condition

Συνοψίζοντας τα όσα αναφέρθηκαν και μιλώντας πιο συγκεκριμένα, ως ανενεργά χαρακτηρίζονται τα κελιά που δεν λαμβάνουν μέρος στην προσομοίωση του συστήματος, δηλαδή εκείνα που αντιστοιχούν στους αδιαπέρατους σχηματισμούς που οριοθετούν πλευρικά τον υδροφορέα στα βόρεια, δυτικά και νότια και είναι εκείνα με το μαύρο χρώμα, τα ενεργά είναι εκείνα με το άσπρο χρώμα και τα κελιά σταθερού φορτίου (θάλασσα) με μπλε χρώμα στα νοτιοανατολικά. Κατά σύμβαση με τις οδηγίες του προγράμματος και σε συνεννόηση με τον υποψήφιο διδάκτορα Κοψιαύτη Γεώργιο ορίσαμε μόνο την ακτογραμμή της θάλασσας με συνθήκες σταθερού φορτίου ενώ στο εσωτερικό της θεωρήσαμε ότι έχουμε αδιαπέρατους σχηματισμούς. Η παραπάνω σύμβαση δεν είναι απαραίτητο να ακολουθηθεί.

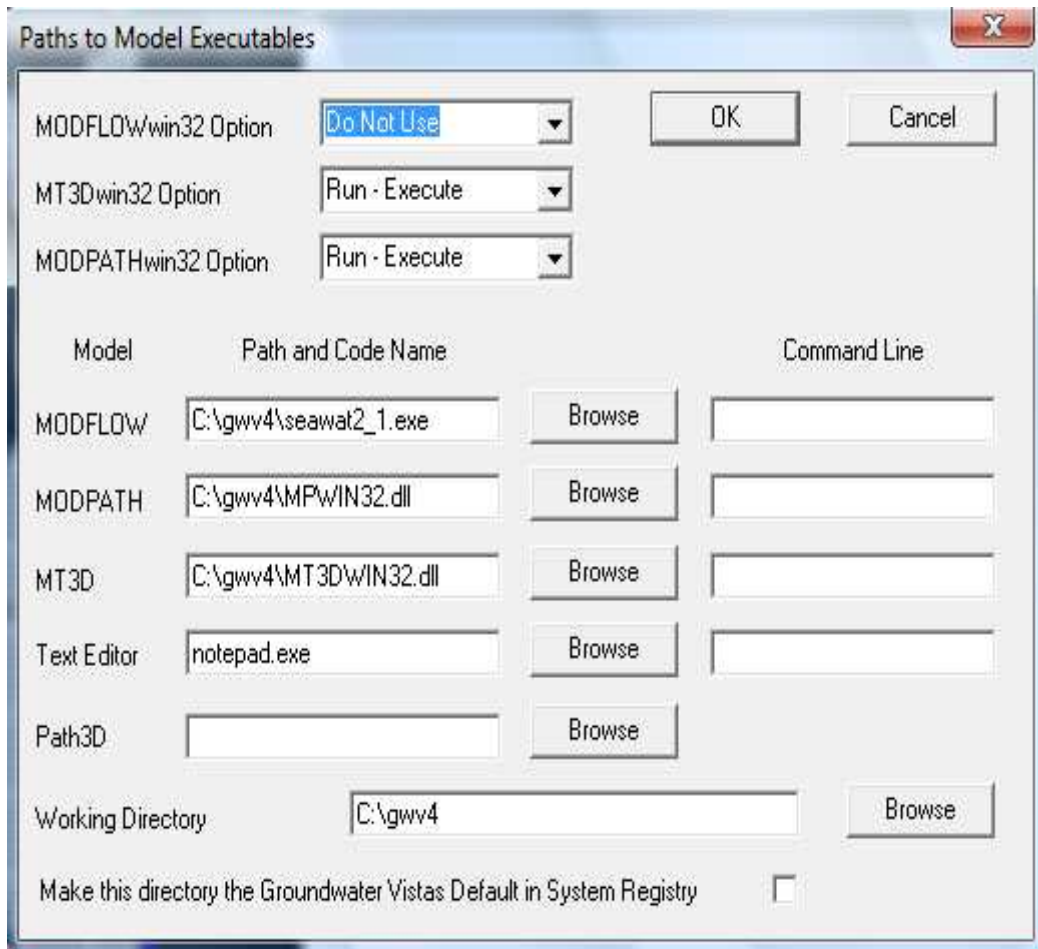


Εικόνα 7.2: Οριακές συνθήκες και χωρική διακριτοποίηση υδροφορέα στο GWV4

7.3.4 Ρυθμίσεις

Πριν τρέξουμε το πρόγραμμα θα πρέπει να ορίσουμε κάποιες ρυθμίσεις-επιλογές οι οποίες είναι απαραίτητες. Στη συνέχεια παρατίθενται οι καρτέλες μέσω των οποίων ορίζονται αυτές και εξηγείται η χρήση τους.

Στο πρόγραμμα GWV4 επιλέγουμε Model → Paths to Models και αλλάζουμε το MODFLOW^{win32} option από "run - execute" σε "do not use". Επιπλέον αλλάζουμε το modflow program σε seawat2_1.exe. Με αυτό τον τρόπο εξασφαλίζουμε ότι τα paths του μοντέλου είναι σωστά. Τέλος ορίζουμε το χώρο εργασίας στο οποίο θα αποθηκευτούν τα αποτελέσματα (working directory).



Στο πρόγραμμα GWV4 επιλέγουμε Model → Modflow → Packages και ορίζουμε το όνομα του αρχείου που θα σωθούν τα Modflow αποτελέσματα καθώς και την έκδοση του Modflow που είναι ο Seawat.

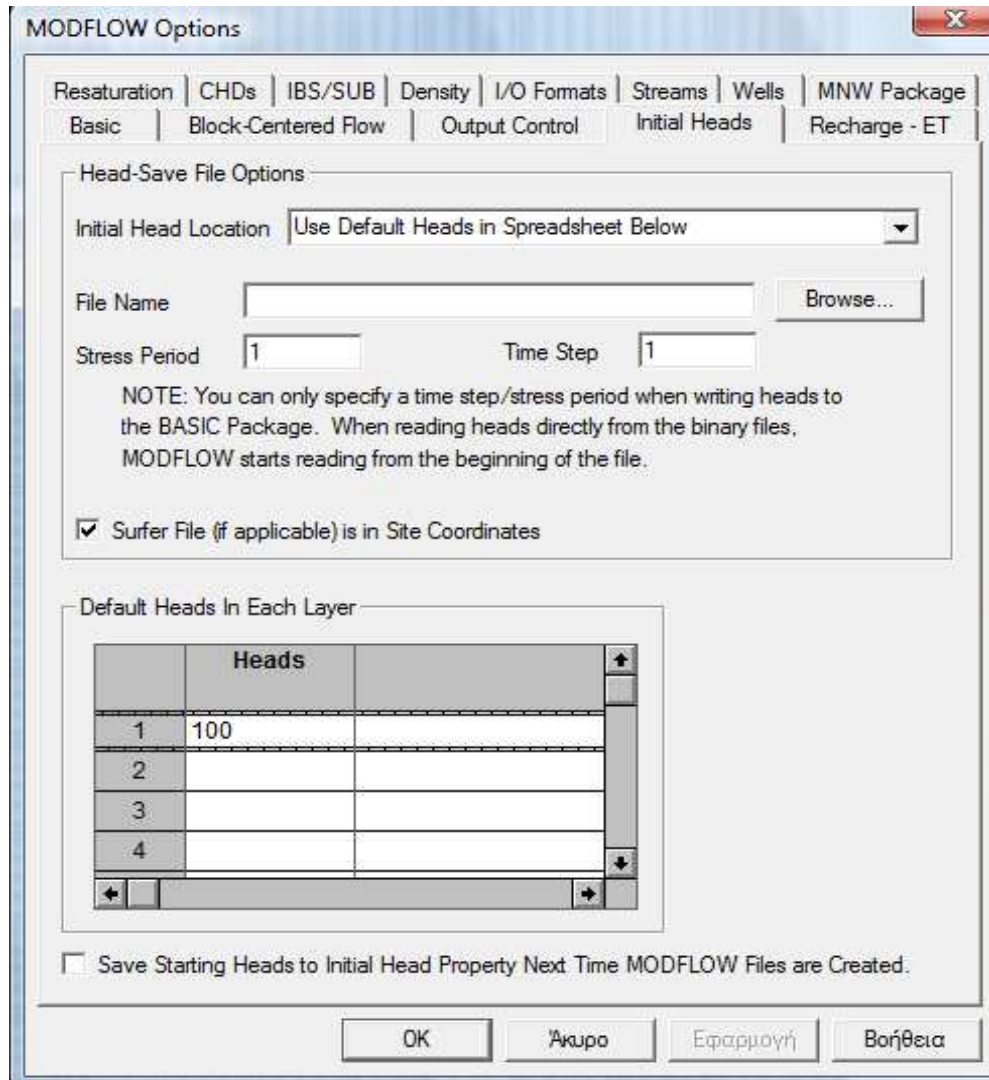
The screenshot shows the 'MODFLOW Packages' dialog box. The 'Root File Name' is 'GADOURA_25' and the 'MODFLOW Version' is 'SEAWAT'. The 'Run MODFLOW96 in Double Precision' checkbox is unchecked. The table below lists various packages with their unit numbers, 'Create?' checkboxes, 'Cell-by-Cell Flow' options, and 'UNIT Location' values.

Package	Unit No.	Create?	Cell-by-Cell Flow Unit No.	UNIT Location (Edit Output)
Basic	1	<input checked="" type="checkbox"/>		
BCF	11	<input checked="" type="checkbox"/>	50	
Output Control	22	<input checked="" type="checkbox"/>		
Solver	19	<input checked="" type="checkbox"/>	PCG2	13
Well	12	<input checked="" type="checkbox"/>	54	
River	0	<input type="checkbox"/>	0	
Drain	0	<input type="checkbox"/>	0	
General Head	0	<input type="checkbox"/>	0	
Stream	0	<input type="checkbox"/>	0	14
Recharge	18	<input checked="" type="checkbox"/>	51	
ET	0	<input type="checkbox"/>	0	
Wall	0	<input type="checkbox"/>		16
CHD	0	<input type="checkbox"/>		20
MNW	0	<input type="checkbox"/>	0	

At the bottom, there are checkboxes for 'Create Map File', 'Create Path3D Files', 'MT3D Flow Output' (with value 22), and 'Automatically Reset Package Units' (checked).

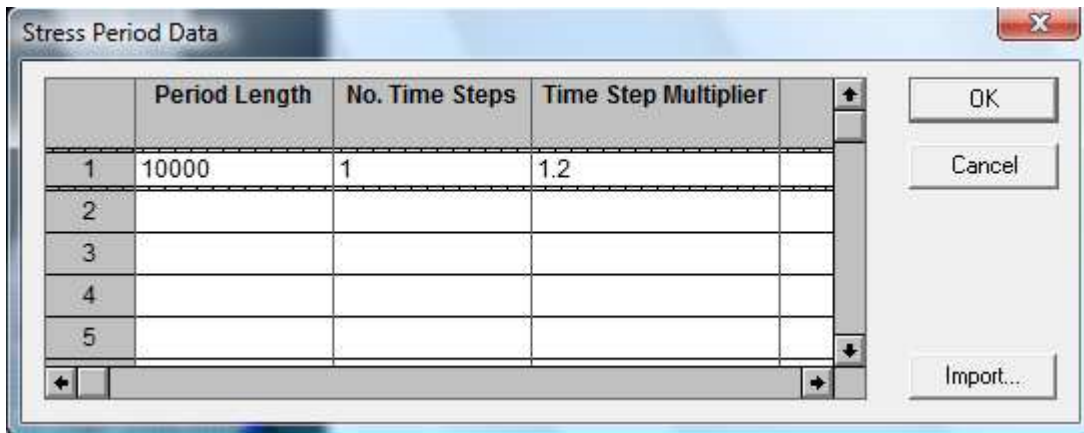
Στο πρόγραμμα GWV4 επιλέγουμε Model → Modflow → Packages Options και ορίζουμε στην καρτέλα Density στην επιλογή Maximum Brine Concentration ίσο με 35kg/m^3 . Εάν πρόκειται για πρώτη εκτέλεση του προγράμματος δεν κάνουμε κάτι άλλο. Ωστόσο στα μοντέλα προσομοίωσης υλοποιούνται διαδοχικές δοκιμές (συνήθως 5) πριν ακόμα εισαχθούν οι αντλήσεις έτσι ώστε να έχουμε κάποιες αρχικές συνθήκες και επιθυμούμε να διατηρήσουμε τις συνθήκες της προηγούμενης δοκιμής. Για το σκοπό αυτό στη καρτέλα Initial Heads επιλέγουμε στο Initial Head location το

“Read Heads Directly from binary head save file” και από το Browse εισάγουμε το όνομα του αρχείου των φορτίων της προηγούμενης δοκιμής και τσεκάρουμε το τετραγωνάκι κάτω αριστερά. Επιστρέφουμε πάλι στην ίδια καρτέλα και επιλέγουμε στο Initial Head location το “Use Initial Heads Property data”.

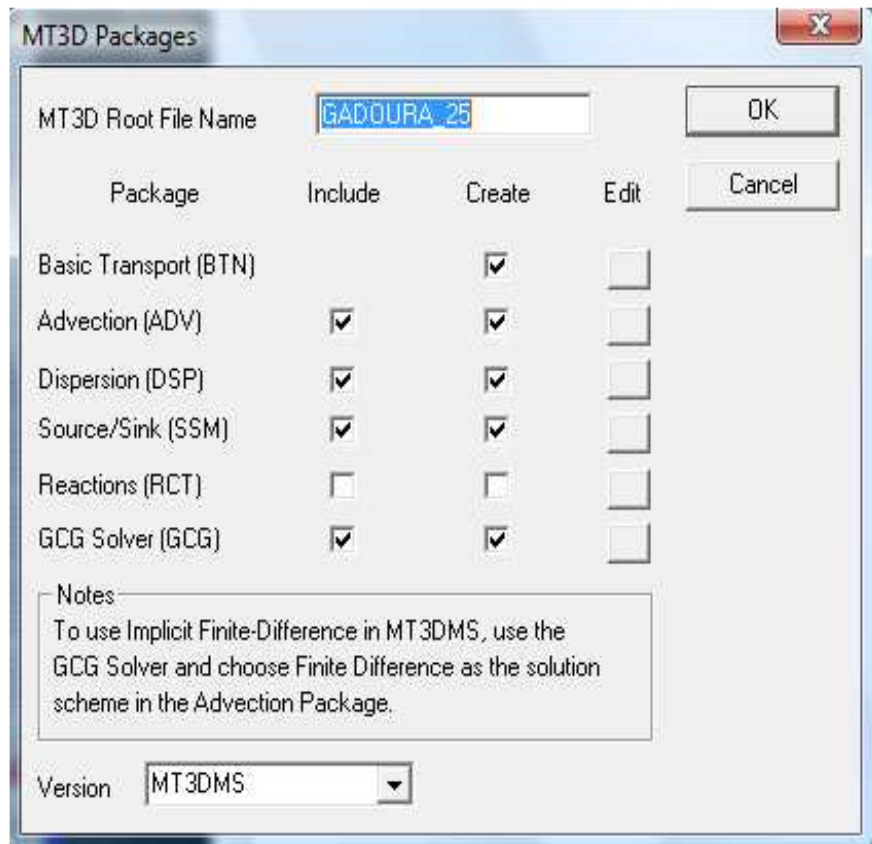


Στο πρόγραμμα GWV4 επιλέγουμε Model → Modflow → Stress Period set up και ορίζουμε την παράμετρο του χρόνου δηλαδή το σύνολο των ημερών που θα εκτελεστεί η προσομοίωση, το χρονικό βήμα και τον πολλαπλασιαστή. Στα μοντέλα που οι αντλήσεις είναι μηδενικές (για να πάρουμε κάποιες αρχικές συνθήκες) εφαρμόζουμε διαδοχικές δοκιμές 40000 ημερών η κάθε μια. Αντίθετα σε μοντέλα με αντλήσεις εφαρμόζουμε μια επανάληψη σε συνολικό διάστημα 10000 ημερών. Τα παραπάνω χρονικά διαστήματα

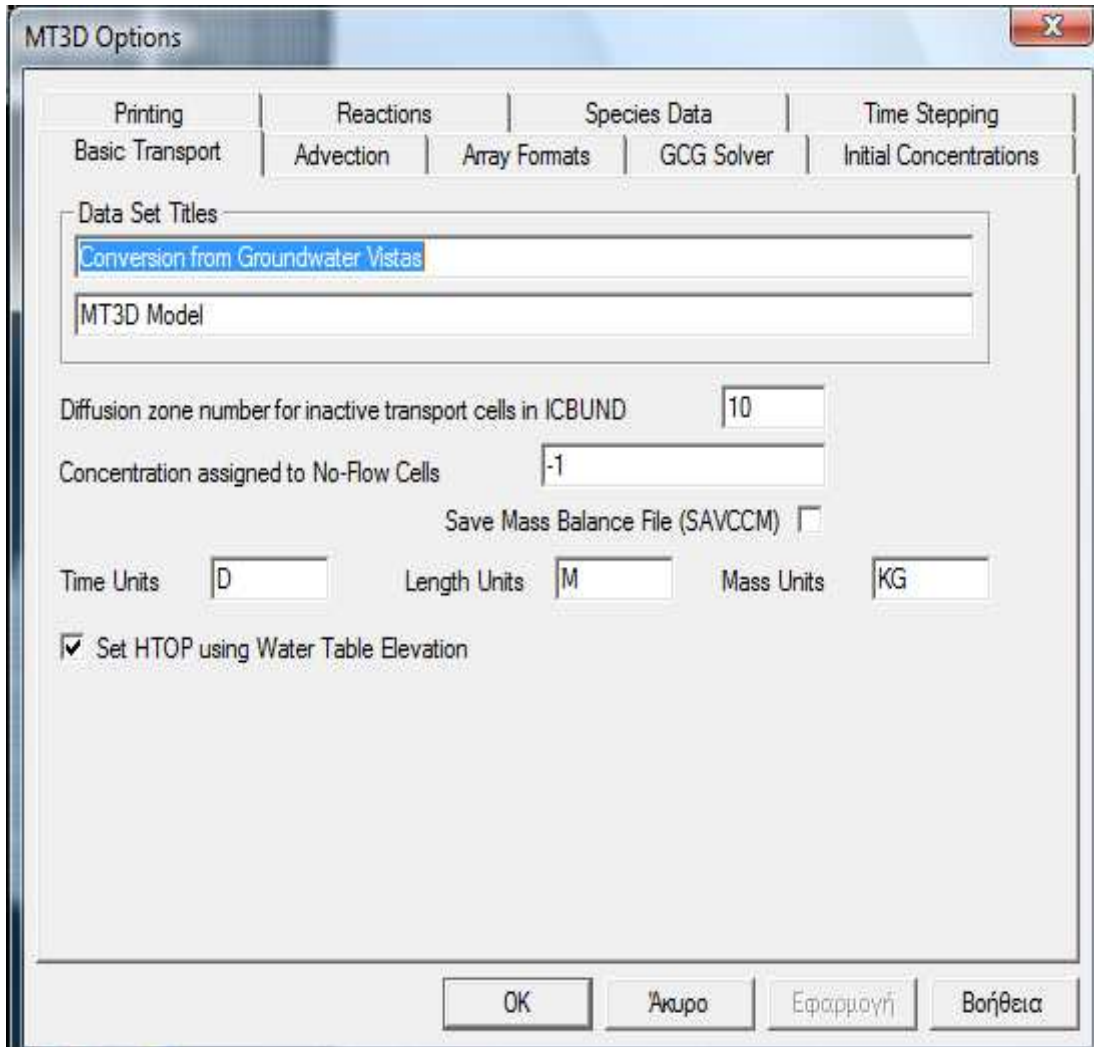
ορίζονται έτσι συνήθως, ωστόσο δεν αποκλείονται και εναλλακτικές επιλογές.



Στο πρόγραμμα GWV4 επιλέγουμε Model → MT3D → Packages ορίζουμε το όνομα του αρχείου MT3D και απενεργοποιούμε τα εικονίδια της επιλογής Reactions γιατί θεωρούμε ότι δεν υπάρχουν αλληλεπιδράσεις μεταξύ του ρύπου και του εδάφους.



Στο πρόγραμμα GWV4 επιλέγουμε Model → MT3D → General Options ορίζουμε στην καρτέλα Basic Transport τις μονάδες του μήκους, χρόνου και μάζας σε m, days και kg αντίστοιχα. Επιπλέον στις περιπτώσεις που θέλουμε να διατηρήσουμε τις συνθήκες της προηγούμενης δοκιμής στην καρτέλα Initial Concentrations από το Browse φορτώνουμε το αρχείο MT3D0001.UCN αυτής της δοκιμής και τοποθετούμε το χρονικό βήμα αυτής στην επιλογή Transport time step.



7.3.5 Εκτέλεση (Run)

Στο πρόγραμμα GWV4 επιλέγουμε Model → SEAWAT → Create Datasets για να δημιουργηθούν τα αρχεία εισόδου και στη συνέχεια επιλέγουμε Model → SEAWAT → Run SEAWAT έτσι ώστε να εκτελεστεί το πρόγραμμα και παραχθούν τα δεδομένα εξόδου. Το πρόγραμμά παράγει ένα μεγάλο αριθμό δεδομένων από τα οποία μας ενδιαφέρουν τα αρχεία του φορτίου και

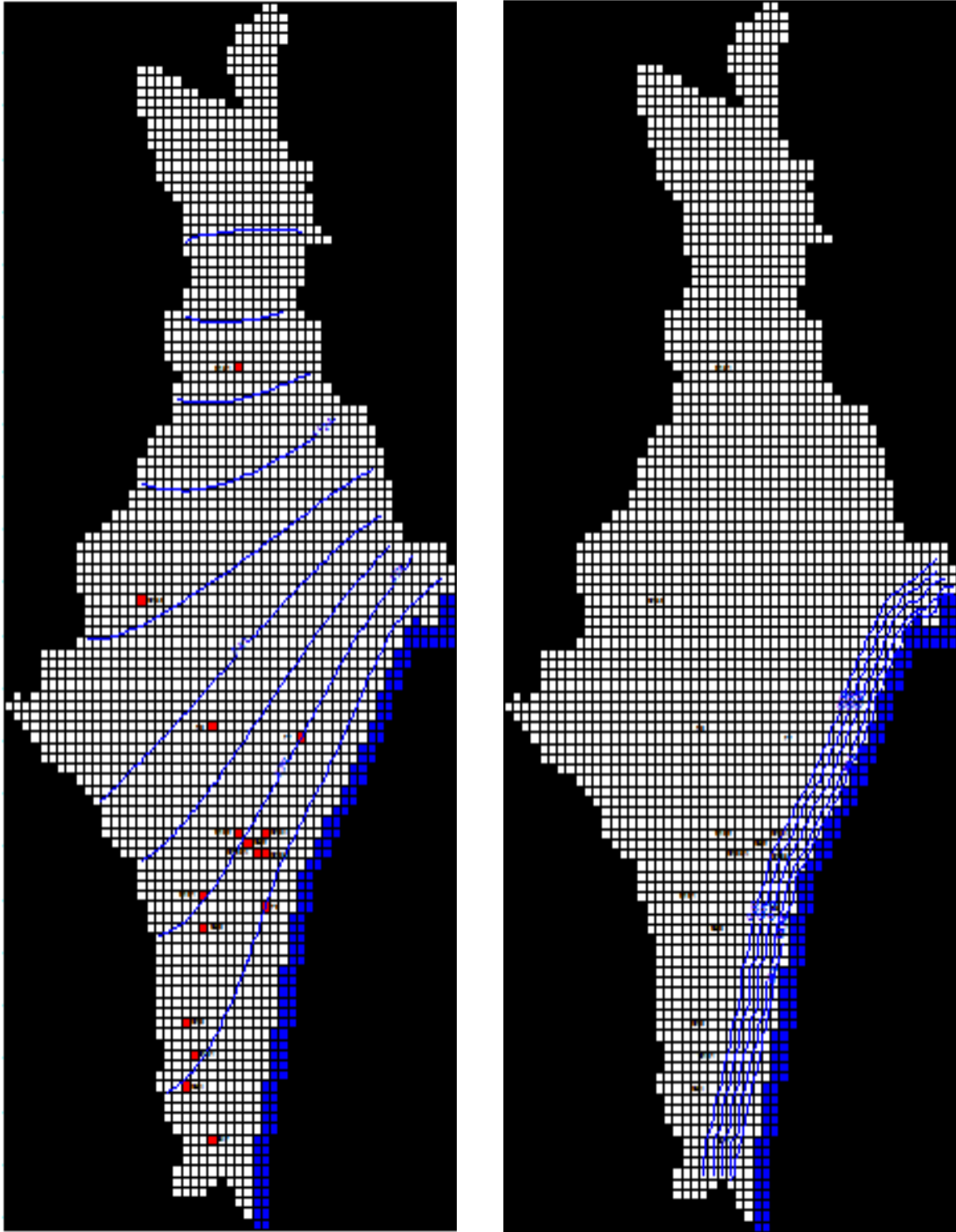
της συγκέντρωσης. Όταν ολοκληρωθεί η διαδικασία εμφανίζεται η καρτέλα Import Model Results από την οποία μπορούμε να φορτώσουμε τα αρχεία που μας ενδιαφέρουν.

Αφού ολοκληρωθούν οι 5 διαδοχικές επαναλήψεις χωρίς αντλήσεις συνολικής διάρκειας 200000 ημερών επιστρέφουμε στο αρχικό μοντέλο (εικόνα 7.4) και ορίζουμε στα φρεάτια άντλησης της πραγματικές υδρομαστεύσεις όπως αυτές δόθηκαν από τον Δρ. Υδρογεωλόγο του Ι.Γ.Μ.Ε. Γιαννουλόπουλο Παναγιώτη. Συγκεκριμένα βρέθηκε ότι η γεώτρηση Γ54 αντλεί 80 m³/h για 12 ώρες λειτουργίας ημερησίως και η Γ47 αντλεί 150 m³/h για 10 ώρες λειτουργίας την ημέρα. Τα ποσοστά αυτά των αντλήσεων μεταφράζονται σε 960 και 1500 m³/day αντίστοιχα. Μας γνωστοποιήθηκε επίσης ότι οι γεωτρήσεις που βρίσκονται ψηλότερα στον υδροφόρο (Γ121, Γ50) αντλούν περίπου 3000 m³/day, με τα οποία γεμίζονται πλοία μεταφοράς ύδατος για την εξυπηρέτηση άλλων νησιών. Οι γεωτρήσεις που βρίσκονται χαμηλότερα (Γ54, Γ181, Γ47) αντλούν περίπου 3000 m³/day, με τα οποία γίνεται η ύδρευση του Δημοτικού Διαμερίσματος της Καλάθου. Τέλος αφού εισάγουμε τα πραγματικά δεδομένα τρέχουμε το πρόγραμμα για 10000 ημέρες διατηρώντας τις συνθήκες της τελευταίας δοκιμής. Αυτό αποτελεί και το πρώτο σενάριο το οποίο υλοποιήθηκε. Κλείνοντας θα πρέπει να αναφέρουμε ότι η συνολική άντληση που επιβάλαμε στον υπόγειο υδροφόρο ορίζοντα είναι 6000 m³/d.

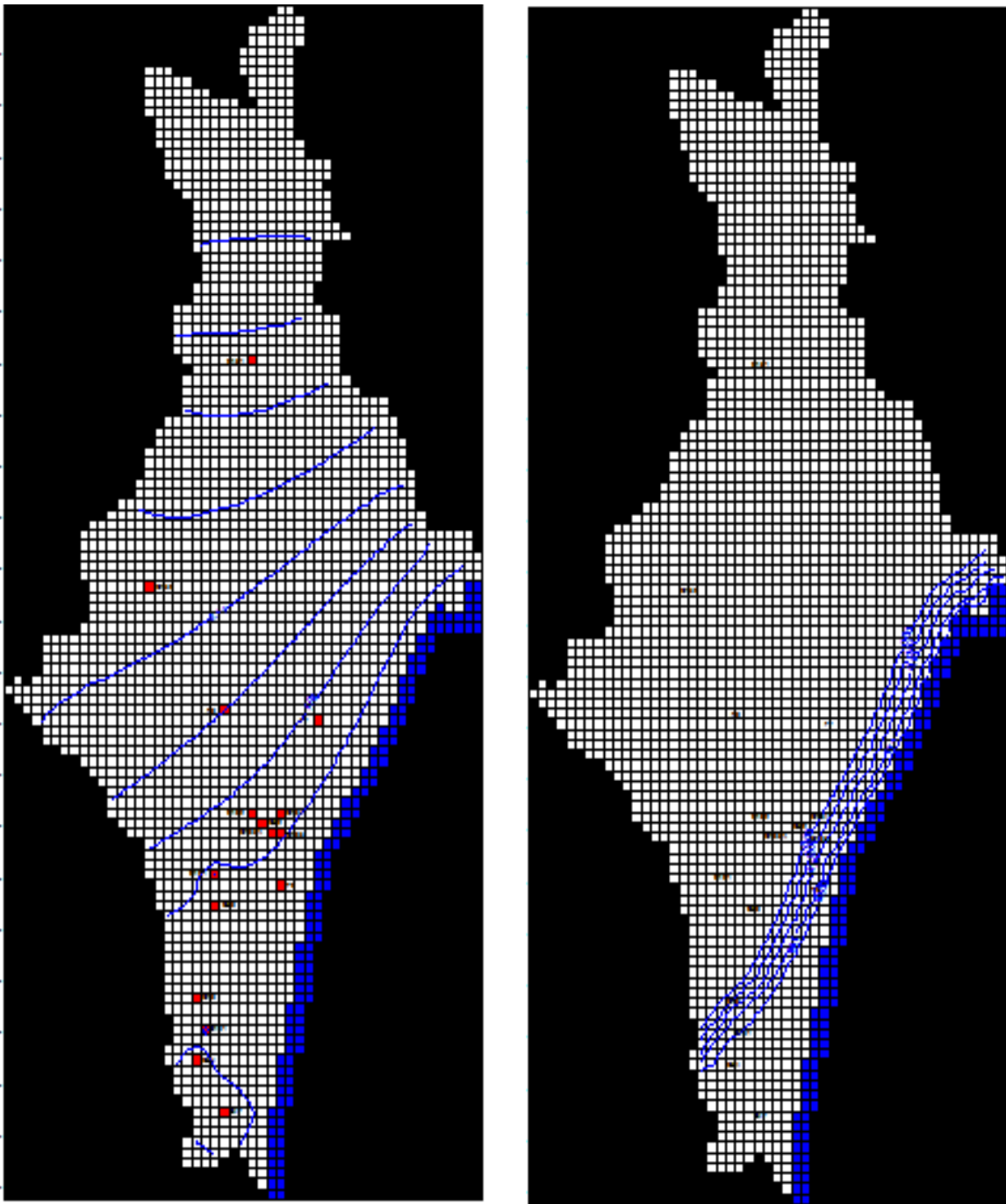
Γεωτρήσεις	Άντληση (m ³ / day)
Γ121	- 2000
Γ50	- 1000
Γ181	- 540
Γ54	- 960
Γ47	- 1500

Πίνακας 7.1: Δεδομένα αντλήσεων

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα τη προσομοίωσης του υδροφόρου μας χωρίς και με αντλήσεις όπως αυτά προέκυψαν από την εφαρμογή του μοντέλου.



Εικόνα 7.3: Αποτέλεσμα προσομοίωσης: Υπολογισμός α) δυναμικού φ και β) συγκέντρωσης χωρίς αντλήσεις



Εικόνα 7.4: Αποτέλεσμα προσομοίωσης: Υπολογισμός α) δυναμικού φ και β) συγκέντρωσης με αντλήσεις για το πρώτο σενάριο

Θα πρέπει να σημειώσουμε ότι κατά την κατασκευή του αριθμητικού μοντέλου έγιναν οι εξής παραδοχές: α) Εισάγαμε αντλήσεις στα φρεάτια και τις γεωτρήσεις που γνωρίζαμε τα πραγματικά στοιχεία ενώ στα υπόλοιπα τις θεωρήσαμε μηδενικές και β) Θεωρήσαμε ότι οι υδρομαστεύσεις

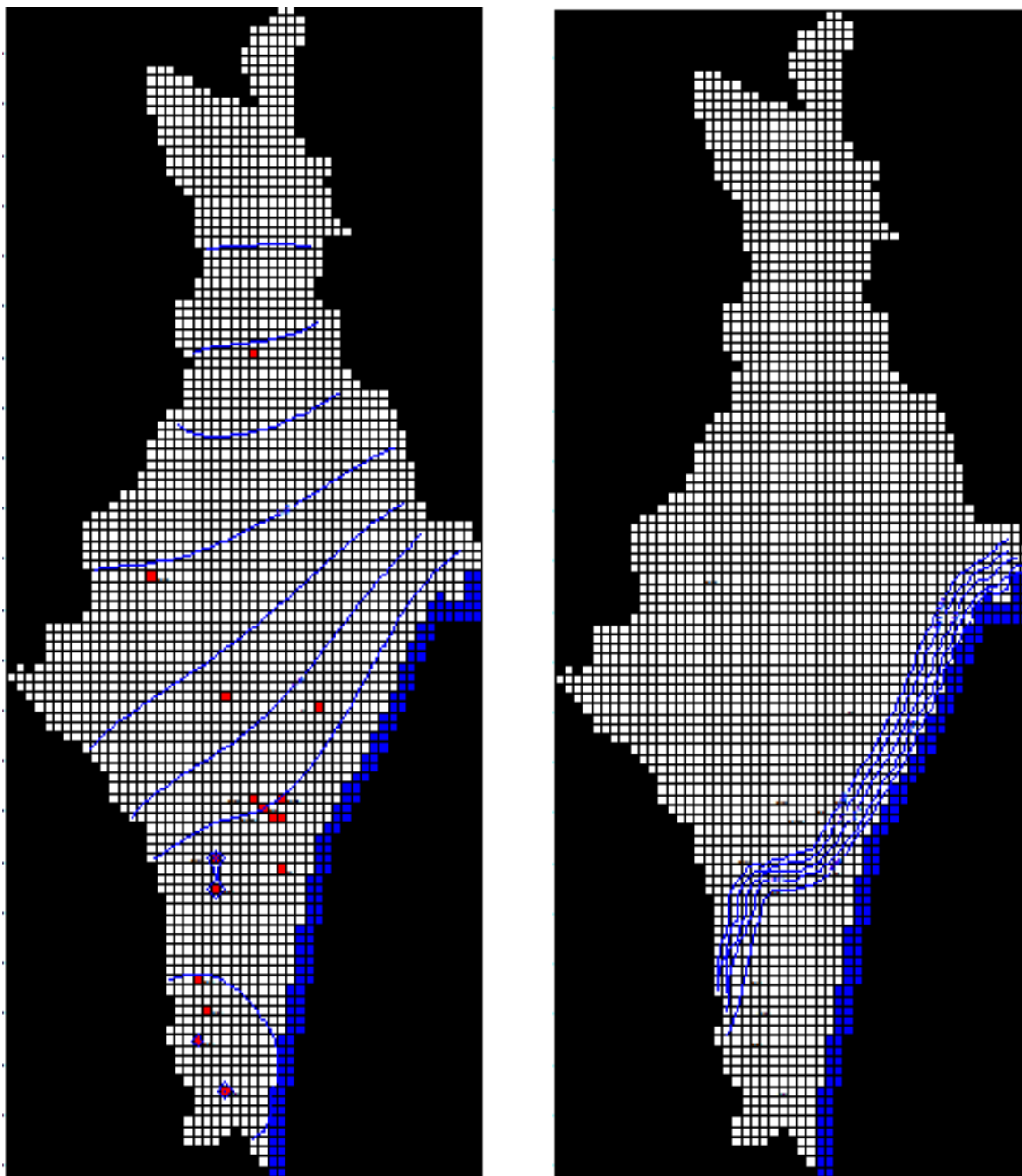
πραγματοποιούνται από το ανώτερο στρώμα του υδροφορέα. Κατά την εφαρμογή του μοντέλου πήραμε κάποιες αρχικές συνθήκες και στη συνέχεια προσθέσαμε τις αντλήσεις. Με τις παραπάνω παραδοχές μοντελοποιούμε την παρούσα κατάσταση και έτσι αποκτούμε τις απαιτούμενες πληροφορίες, ώστε να είμαστε σε θέση να εξάγουμε συμπεράσματα και να προτείνουμε λύσεις για την βελτίωση της εικόνας που παρουσιάζει ο υδροφορέας μας.

Το δεύτερο σενάριο ακολουθεί τις ίδιες παραδοχές και ο σκοπός του είναι ο προσδιορισμός της μέγιστης παροχής που μπορούμε να αντλήσουμε από κάθε μια από τις παραπάνω γεωτρήσεις – φρεάτια για τα οποία διαθέτουμε δεδομένα. Η διαδικασία που ακολουθήθηκε στηρίζεται σε μια επαναληπτική μέθοδο κατά την οποία αυξάνουμε περιοδικά κάθε άντληση με έναν πολλαπλασιαστή 1.1. Εφόσον ο υδροφορέας μπορούσε να ανταποκριθεί στις αντλήσεις που του εισάγαμε, στη συνέχεια ελέγχονταν σε μια νέα δοκιμή με αυξημένες αντλήσεις. Στο πίνακα που ακολουθεί βλέπουμε τις δοκιμές στις οποίες υποβλήθηκε ο υδροφορέας.

ΕΠΑΝΑΛΗΨΕΙΣ			ΔΟΚΙΜΗ 1	ΔΟΚΙΜΗ 2	ΔΟΚΙΜΗ 3	ΔΟΚΙΜΗ 4	ΔΟΚΙΜΗ 5	ΔΟΚΙΜΗ 6	ΔΟΚΙΜΗ 7
ΓΕΩΤΡΗΣΗ	ΣΤΗΛΗ	ΓΡΑΜΜΗ	ΑΝΤΛΗΣΗ	ΑΝΤΛΗΣΗ	ΑΝΤΛΗΣΗ	ΑΝΤΛΗΣΗ	ΑΝΤΛΗΣΗ	ΑΝΤΛΗΣΗ	ΑΝΤΛΗΣΗ
Γ121	23	85	-2000	-2200	-2420	-2662	-2928	-3221	-3543
Γ50	23	88	-1000	-1100	-1210	-1331	-1464	-1611	-1772
Γ181	22	100	-540	-594	-653	-719	-791	-870	-957
Γ54	21	103	-960	-1056	-1162	-1278	-1406	-1546	-1701
Γ47	24	108	-1500	-1650	-1815	-1997	-2196	-2416	-2657

Πίνακας 7.2: Δεδομένα διαδοχικών δοκιμών αντλήσεων του υδροφορέα στο πρώτο στρώμα

Στην 7^η δοκιμή ο υπόγειος υδροφόρος ορίζοντας δεν μπόρεσε να ανταποκριθεί στις αντλήσεις που του εισάγαμε. Επομένως οι αντλήσεις της 6^η δοκιμής αποτελούν τη μέγιστη δυναμική του, έχοντας ως δεδομένο πάντοτε τις παραδοχές που ακολουθήθηκαν. Ωστόσο αυτό δεν σημαίνει ότι αυτή είναι και η συνολική δυναμική του. Όπως θα δούμε και παρακάτω ο υδροφορέας μας δίνει τη δυνατότητα να εισάγουμε αντλήσεις σε φρεάτια και γεωτρήσεις στα οποία θεωρούμε ότι είναι μηδενικές, λόγω έλλειψης στοιχείων και παρατηρήσεων. Θα πρέπει να επισημάνουμε ότι η αθροιστική άντληση που εισάγαμε στον υδροφορέα είναι 9663 m³/d και το σύνολο των ημερών 10000. Γίνεται αντιληπτό ότι εάν μεταβληθεί ο αριθμός των ημερών (η οποιαδήποτε άλλη παραδοχή) τα αποτελέσματα που θα παίρναμε θα ήταν διαφορετικά. Τέλος παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης όπως αυτά προέκυψαν κατά την 6^η δοκιμή.



Εικόνα 7.5: Αποτέλεσμα προσομοίωσης: Υπολογισμός α) δυναμικού ϕ και β) συγκέντρωσης με αντλήσεις για το δεύτερο σενάριο

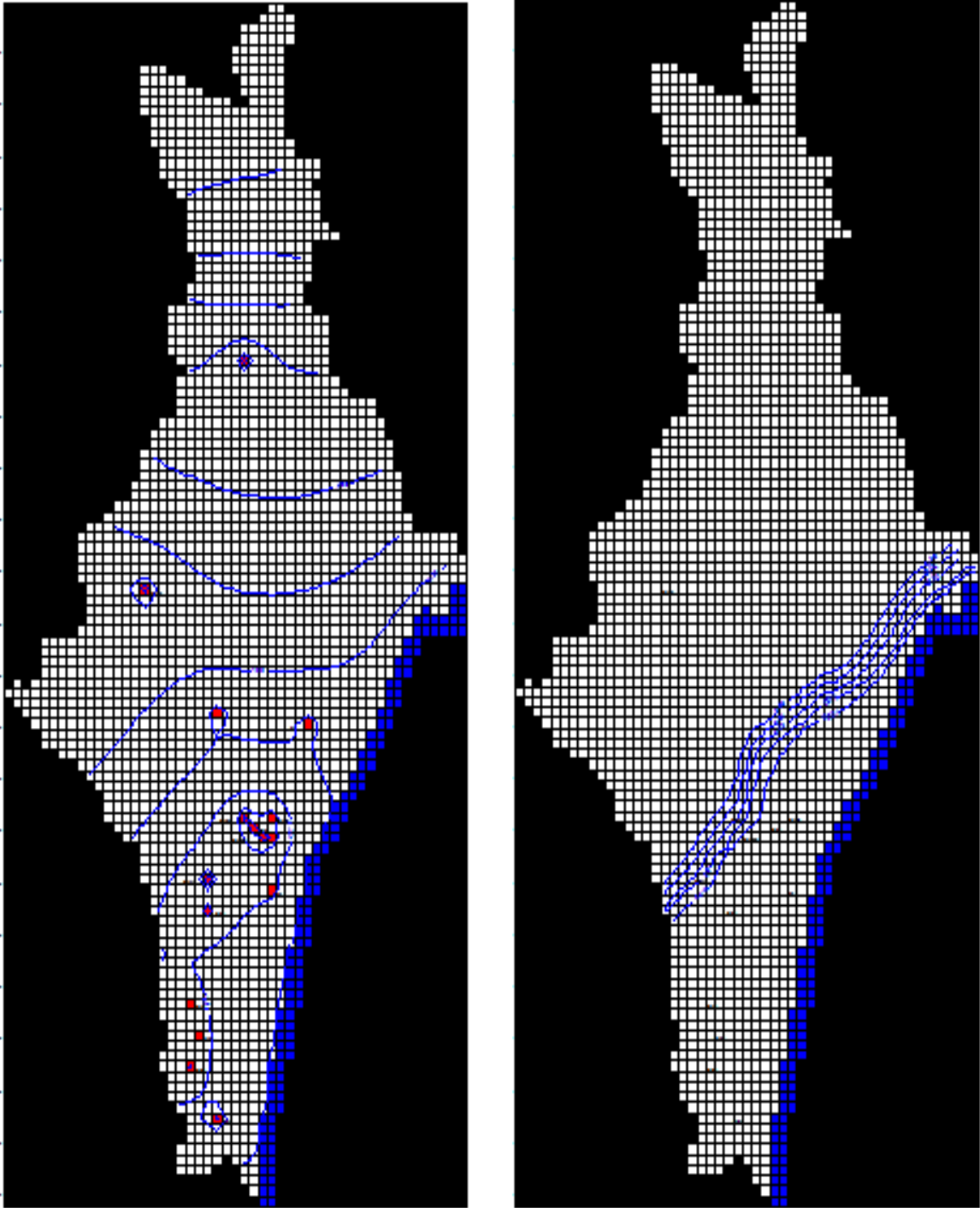
Το τρίτο σενάριο αποτελείται από ένα σύνολο διαδοχικών επαναλήψεων και διαφορετικών παραδοχών τόσο κατά την κατασκευή όσο και κατά την εφαρμογή του μοντέλου. Συγκεκριμένα οι παραδοχές που ακολουθήθηκαν κατά την κατασκευή των μοντέλων είναι οι εξής: α) Εισάγουμε αντλήσεις στο σύνολο των γεωτρήσεων και των φρεατίων, διατηρώντας τα μεγέθη που είναι πραγματικά και θεωρώντας υποθετικές τιμές στα υπόλοιπα και β) Θεωρήσαμε ότι οι υδρομαστεύσεις μπορούν να πραγματοποιηθούν από

οποιοδήποτε επίπεδο του υδροφορέα. Στις γεωτρήσεις και τα φρεάτια που δεν υπήρχαν πραγματικά δεδομένα η εισαγωγή αντλήσεων έγινε με γνώμονα τη θέση στην οποία βρίσκονταν, δηλαδή σε αυτές που είναι σε μεγαλύτερη απόσταση από τη θάλασσα ορίσαμε μεγαλύτερες παροχές και το αντίθετο σε αυτές που είναι πιο κοντά. Αυτό έγινε σε μια προσπάθεια να «μειώσουμε» την πιθανότητα εκτενούς υφαλμύρωσης. Όσο αναφορά την εφαρμογή του μοντέλου, αφού πήραμε κάποιες αρχικές συνθήκες με μηδενικές αντλήσεις στη συνέχεια εισάγαμε τις αντλήσεις μοιράζοντας αυτές εξίσου σε 3, 5, 7 και 9 στρώματα. Το χρονικό διάστημα που τρέξαμε το πρόγραμμα ήταν 10000 ημέρες και τελικά βρέθηκε ότι για την περίπτωση που εξετάζουμε, ότι η συνολική άντληση κάθε γεώτρησης – φρεατίου είναι ανεξάρτητη από τα επίπεδα – στρώματα που επιλέγουμε να αντλήσουμε. Στη συνέχεια παρατίθενται ένα δείγμα από τις δοκιμές που εφαρμόστηκαν, όπου φαίνεται η συνολική άντληση κάθε γεώτρησης – φρεατίου και απεικονίζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης όπως αυτά προέκυψαν κατά την εφαρμογή του μοντέλου σε 3 και 9 στρώματα. Ολοκληρώνοντας την περιγραφή του παραπάνω σεναρίου θα πρέπει να αναφέρουμε ότι η αθροιστική άντληση που εισάγαμε στον υδροφορέα είναι 26532 m³/d (2^η δοκιμή), δηλαδή τριπλάσια περίπου από αυτή του δεύτερου σεναρίου, και μπορεί να θεωρηθεί ότι προσεγγίζει ικανοποιητικά τη συνολική δυναμική του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα.

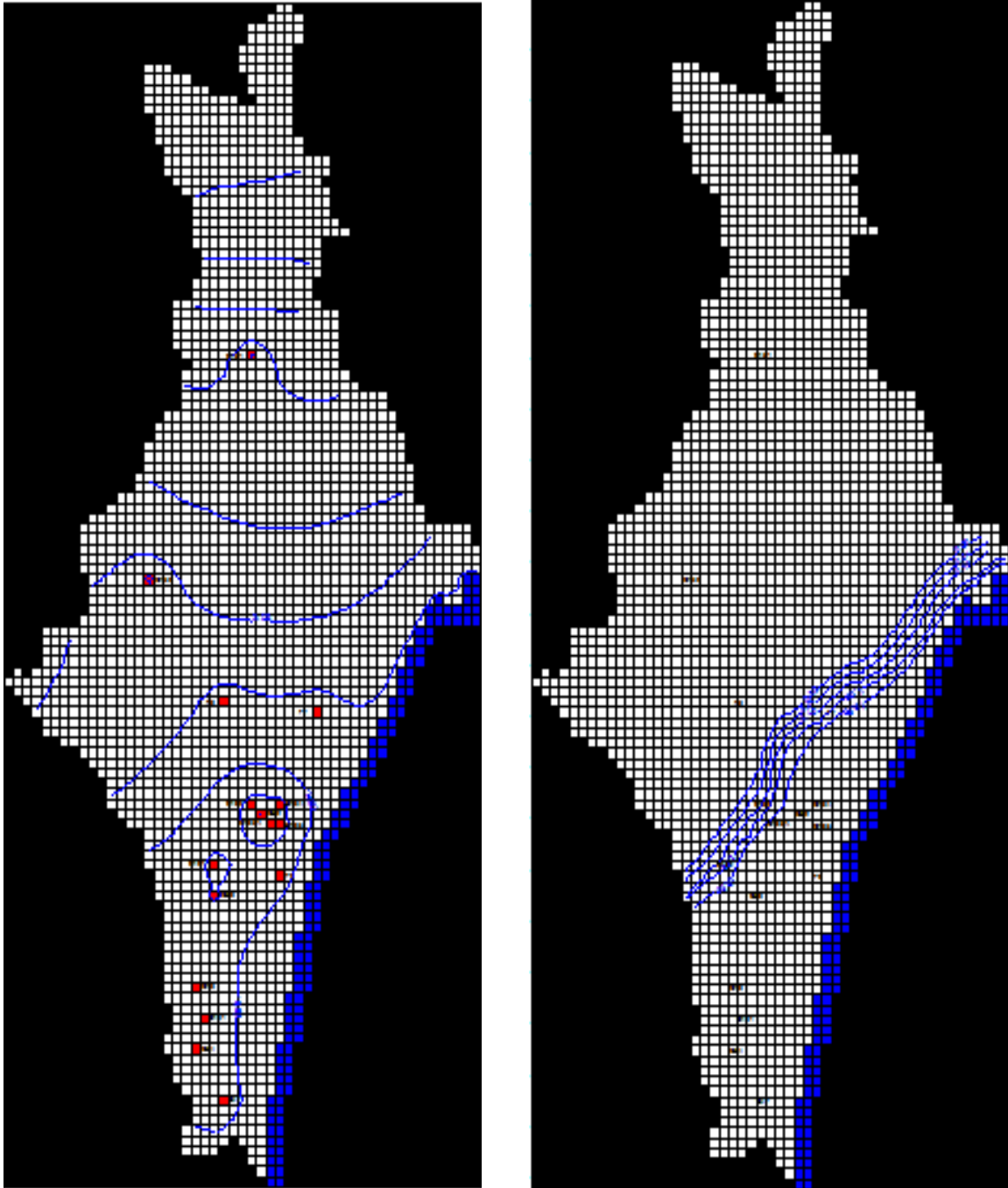
ΕΠΑΝΑΛΗΨΕΙΣ			ΔΟΚΙΜΗ 1	ΔΟΚΙΜΗ 2	ΔΟΚΙΜΗ 3
ΓΕΩΤΡΗΣΗ	ΣΤΗΛΗ	ΓΡΑΜΜΗ	ΑΝΤΛΗΣΗ	ΑΝΤΛΗΣΗ	ΑΝΤΛΗΣΗ
Γ121	23	85	-2000	-2400	-2880
Γ50	23	88	-1000	-1200	-1440
Γ181	22	100	-540	-648	-778
Γ54	21	103	-960	-1152	-1382
Γ47	24	108	-1500	-1800	-2160
Γ131	27	35	-3000	-3600	-4320
Γ132	16	57	-2500	-3000	-3600
Φ9	24	69	-1500	-1800	-2160
Φ7	34	70	-1350	-1620	-1944
Γ102	27	79	-1600	-1920	-2304
Γ104	30	79	-1150	-1380	-1656
Γ52	28	80	-1250	-1500	-1800
Γ103	30	81	-950	-1140	-1368
Γ103A	29	81	-1100	-1320	-1584
Φ2	30	86	-820	-984	-1181
Γ19	21	97	-890	-1068	-1282

Πίνακας 7.3: Δεδομένα αθροιστικών αντλήσεων του υδροφορέα

Στη 3^η δοκιμή ο υδροφορέας μας δεν μπόρεσε να ανταποκριθεί στις αντλήσεις που του εισάγαμε. Είναι προφανές ότι το πρόβλημα της υφαλμύρωσης οξύνθηκε σε σχέση με τα προηγούμενα σενάρια, ωστόσο σκοπός των αριθμητικών μοντέλων είναι η διερεύνηση ή η πρόγνωση των πιο δυσμενών συνήθως καταστάσεων των συστημάτων που μελετούν.



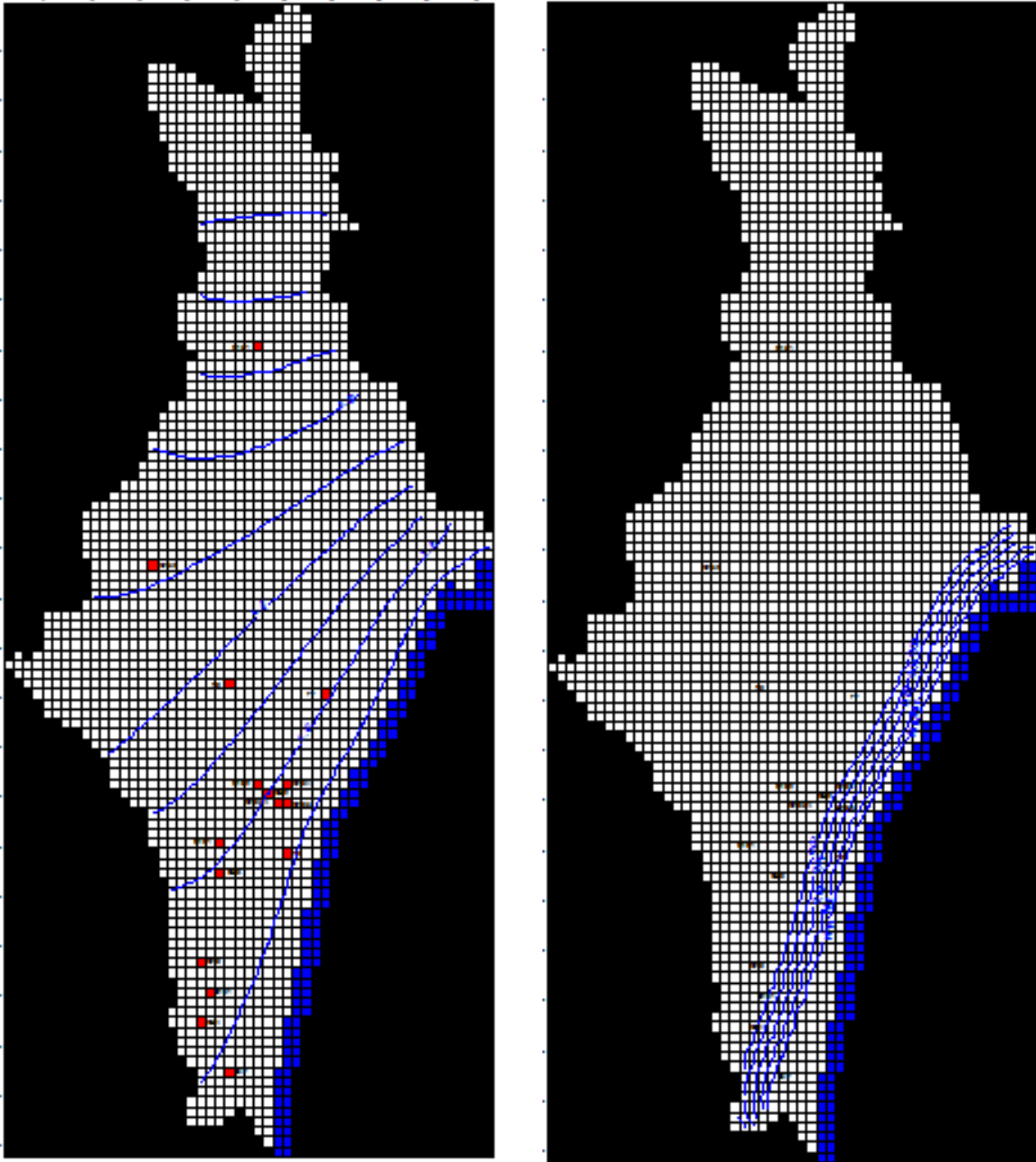
Εικόνα 7.6: Αποτέλεσμα προσομοίωσης: Υπολογισμός α) δυναμικού φ και β) συγκέντρωσης με αντλήσεις από τα 3 στρώματα για το τρίτο σενάριο



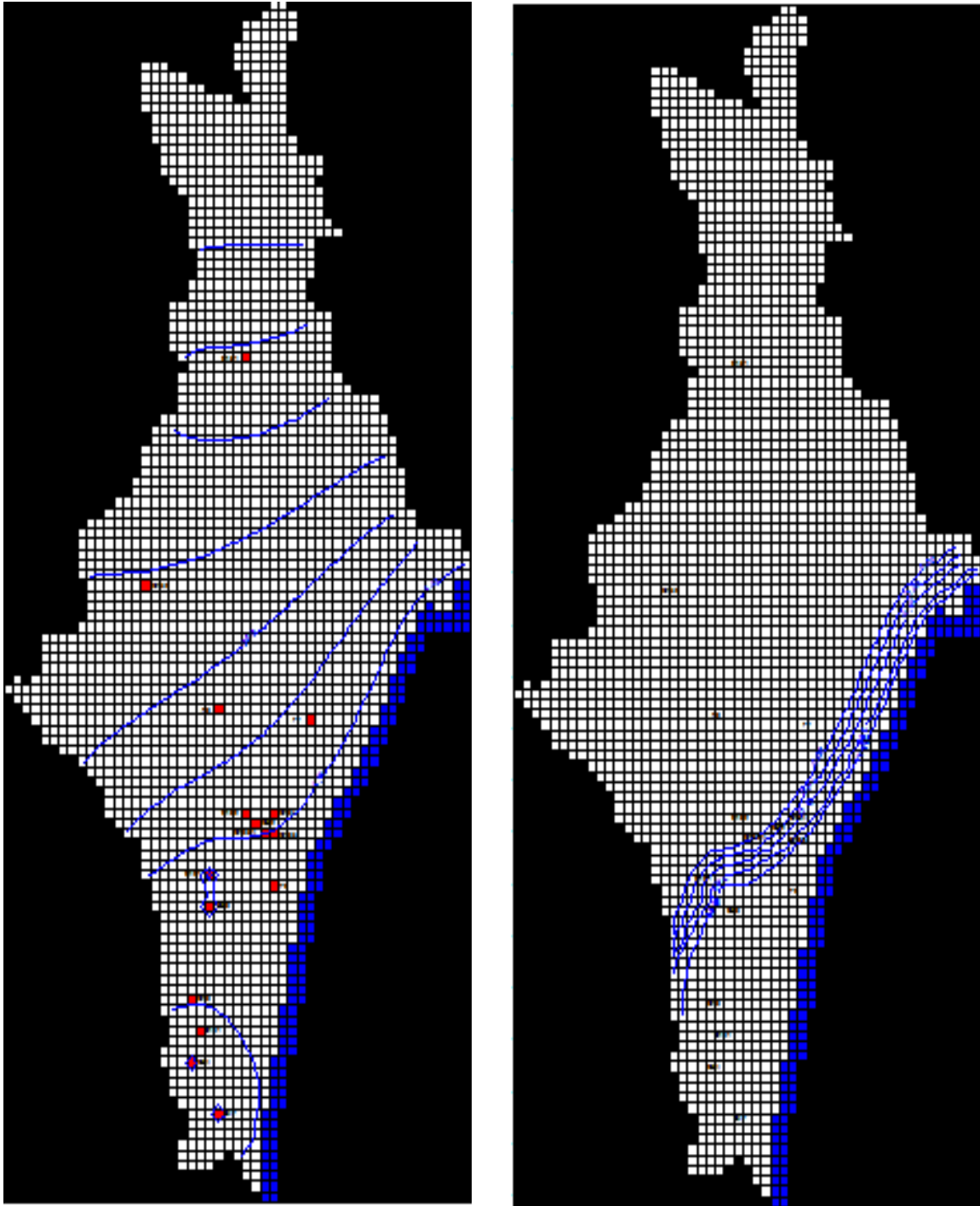
Εικόνα 7.7: Αποτέλεσμα προσομοίωσης: Υπολογισμός α) δυναμικού ϕ και β) συγκέντρωσης με αντλήσεις από τα 9 στρώματα για το τρίτο σενάριο

Το τέταρτο σενάριο ακολουθεί τις παραδοχές του πρώτου σεναρίου, δηλαδή εισάγουμε μόνο πραγματικά δεδομένα αντλήσεων, όπως αυτά δόθηκαν από το Ι.Γ.Μ.Ε, και τα οποία θεωρούμε ότι πραγματοποιούνται μόνο στο ανώτερο στρώμα. Επιπλέον πριν την εισαγωγή των αντλήσεων παίρνουμε κάποιες αρχικές συνθήκες. Η μόνη διαφορά έγκειται στο γεγονός ότι

θεωρούμε ότι έχουμε μισή τροφοδοσία από αυτή που εφαρμόστηκε σε όλες τις προηγούμενες περιπτώσεις, δηλαδή 0.000455 m/d . Η περίπτωση αυτή εξετάστηκε στα πλαίσια των έντονων κλιματικών αλλαγών που συναντάμε σήμερα παγκοσμίως και οι οποίες θα πρέπει να αντιμετωπίζονται πολύ προσεχτικά αφού είναι σε θέση να διαφοροποιήσουν τα υδάτινα και όχι μόνο οικοσυστήματα. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης παρουσιάζονται στην εικόνα που ακολουθεί.



Εικόνα 7.8: Αποτέλεσμα προσομοίωσης: Υπολογισμός α) δυναμικού ϕ και β) συγκέντρωσης χωρίς αντλήσεις για το τέταρτο σενάριο



Εικόνα 7.9: Αποτέλεσμα προσομοίωσης: Υπολογισμός α) δυναμικού ϕ και β) συγκέντρωσης με αντλήσεις για το τέταρτο σενάριο

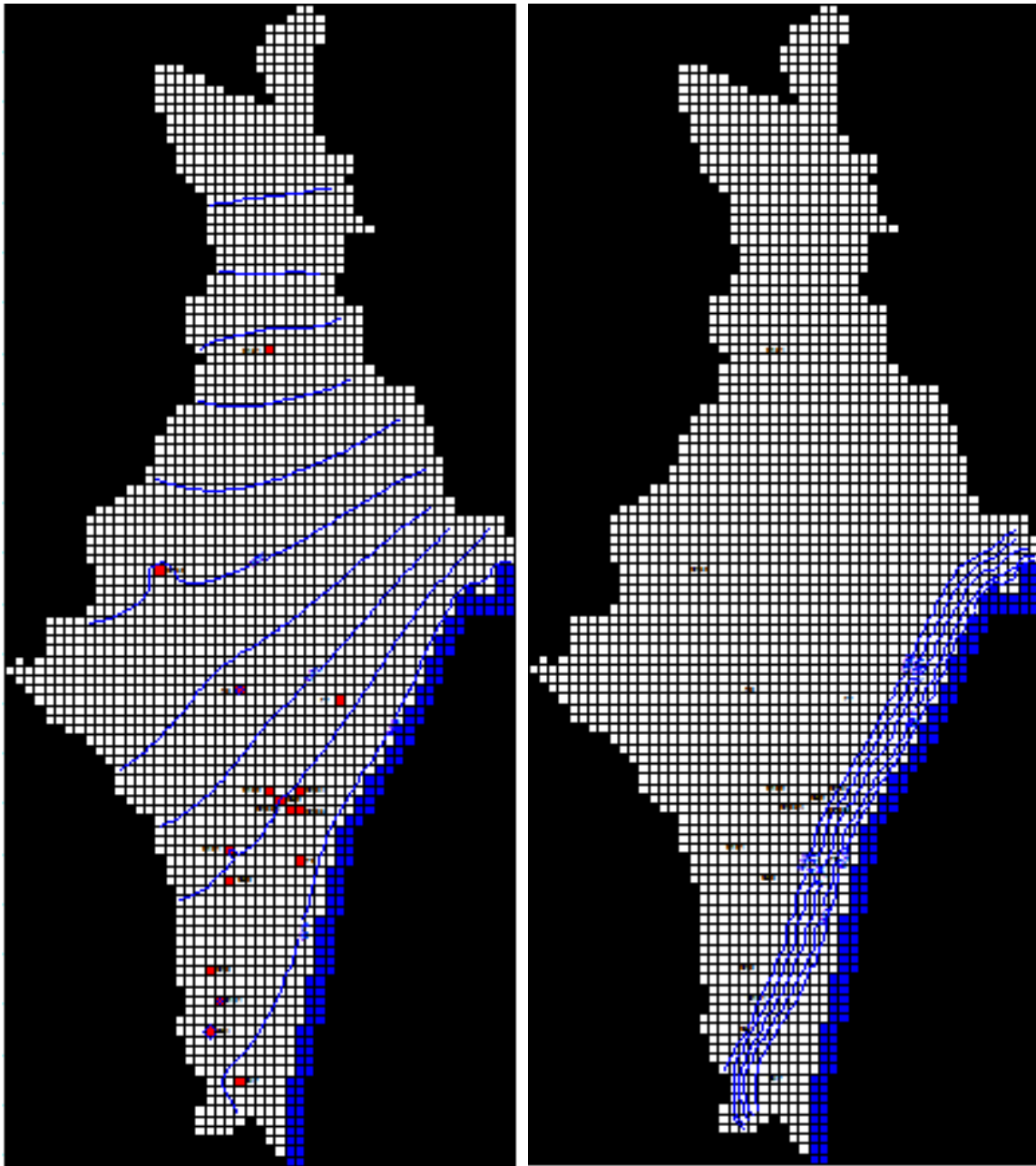
Το πέμπτο και τελευταίο σενάριο αποτελεί ένα είδους διαχειριστικού σχεδιασμού, ως προς τον τρόπο που θα πρέπει να αντλούμε ώστε να ελαχιστοποιήσουμε τις επιπτώσεις της υφαλμύρωσης. Και για να αποσαφηνίσουμε την παραπάνω έκφραση, το κριτήριο ήταν ο αριθμός των

γεωτρήσεων που θα εκθέτονταν σε υφαλμύρωση ή η ισοχλώρια των 0.5 kg/m³ να μην ξεπεράσει το φρεάτιο Φ2. Ακολουθεί τις παραδοχές του 1^{ου} σεναρίου, δηλαδή εισάγονται αντλήσεις μόνο στο πρώτο στρώμα και ορίζονται κάποιες αρχικές συνθήκες, με τη διαφορά ότι ομαδοποιούνται οι γεωτρήσεις και δίνεται ίδια παροχή υδρομάστευσης. Στο πίνακα που ακολουθεί δίνεται ένα μέρος των δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν καθώς και ο τρόπος ομαδοποίησης. Θα πρέπει να επισημάνουμε ότι για την επαναληπτική μέθοδο χρησιμοποιήσαμε ένα πολλαπλασιαστή 1.2.

ΟΜΑΔΑ-ΕΠΑΝΑΛΗΨΕΙΣ				ΔΟΚΙΜΗ 1	ΔΟΚΙΜΗ 2	ΔΟΚΙΜΗ 3	ΔΟΚΙΜΗ 4	ΔΟΚΙΜΗ 5	ΔΟΚΙΜΗ 6	ΔΟΚΙΜΗ 7
1	ΓΕΩΤΡΗΣΗ	ΣΤΗΛΗ	ΓΡΑΜΜΗ	ΑΝΤΛΗΣΗ	ΑΝΤΛΗΣΗ	ΑΝΤΛΗΣΗ	ΑΝΤΛΗΣΗ	ΑΝΤΛΗΣΗ	ΑΝΤΛΗΣΗ	ΑΝΤΛΗΣΗ
	Γ131	27	35	-1173	-1407	-1688	-2026	-2431	-2917	-3500
	Γ132	16	57	-1173	-1407	-1688	-2026	-2431	-2917	-3500
	Φ9	24	69	-1173	-1407	-1688	-2026	-2431	-2917	-3500
2	Φ7	34	70	-100	-120	-144	-173	-208	-250	-300
	Γ102	27	79	-100	-120	-144	-173	-208	-250	-300
	Γ104	30	79	-100	-120	-144	-173	-208	-250	-300
	Γ52	28	80	-100	-120	-144	-173	-208	-250	-300
	Γ103	30	81	-100	-120	-144	-173	-208	-250	-300
	Γ103A	29	81	-100	-120	-144	-173	-208	-250	-300
	Φ2	30	86	-100	-120	-144	-173	-208	-250	-300
3	Γ121	23	85	-302	-362	-434	-521	-625	-750	-900
	Γ50	23	88	-302	-362	-434	-521	-625	-750	-900
	Γ19	21	97	-302	-362	-434	-521	-625	-750	-900
	Γ131	27	35	-302	-362	-434	-521	-625	-750	-900
	Γ54	21	103	-302	-362	-434	-521	-625	-750	-900
	Γ47	24	108	-302	-362	-434	-521	-625	-750	-900

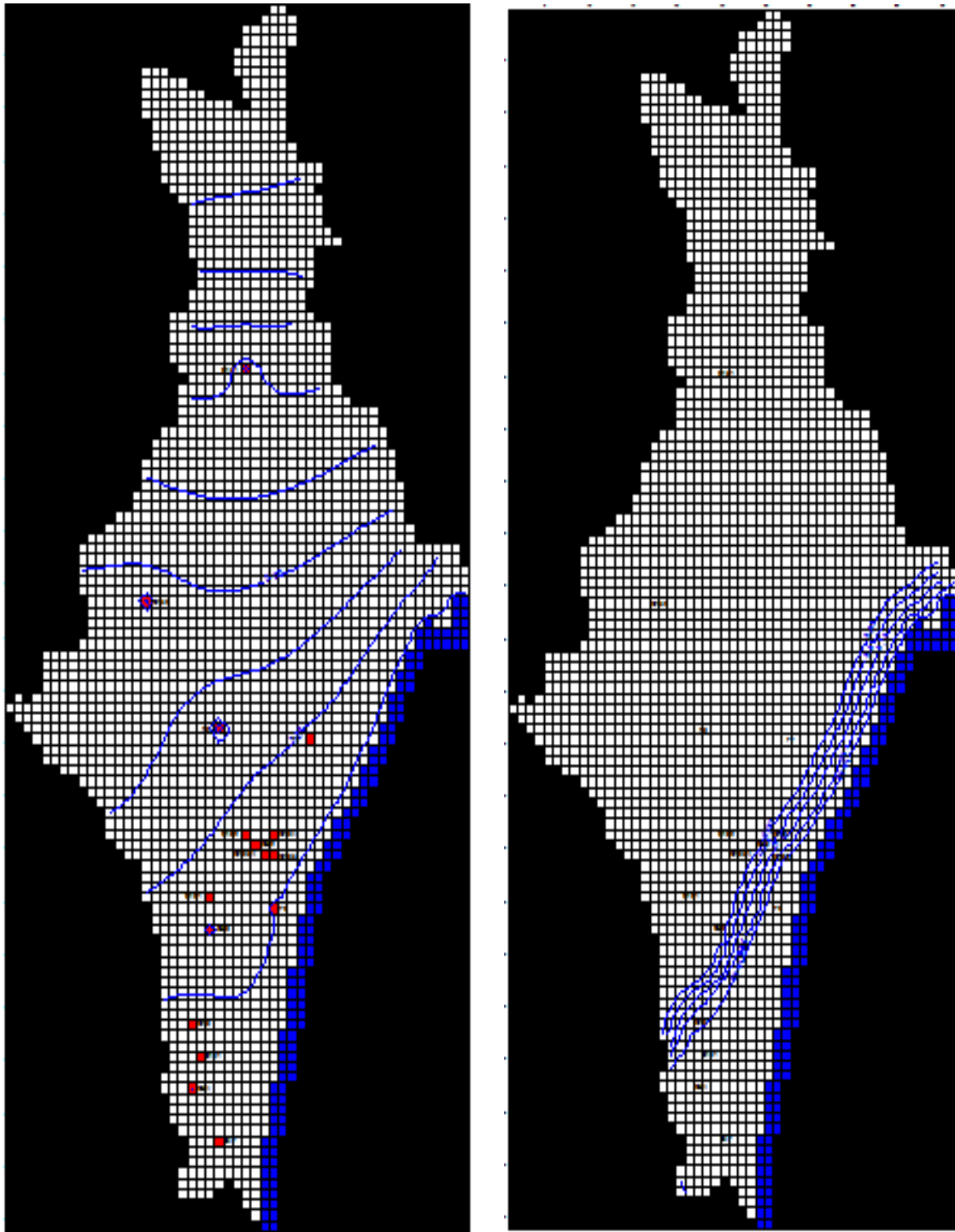
Πίνακας 7.4: Ομαδοποιημένα δεδομένα αντλήσεων του υδροφορέα

Στα πλαίσια αυτού του σεναρίου βρέθηκε η κατανομή των αντλήσεων στο σύνολο του υδροφορέα (δοκιμή 1), η οποία καλύπτει τις υπάρχουσες ανάγκες και ελαχιστοποιεί το πρόβλημα της υφαλμύρωσης. Η συνολική άντληση είναι 6031 m³/d και το πρόβλημα της υφαλμύρωσης έχει περιοριστεί αποκλειστικά στη νοτιότερη γεώτρηση του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης δίνονται στην ακόλουθη εικόνα.



Εικόνα 7.10: Αποτελέσματα προσομοίωσης: Υπολογισμός α) δυναμικού ϕ και β) συγκέντρωσης για την 1^η δοκιμή του διαχειριστικού σεναρίου

Τέλος θα πρέπει να παραθέσουμε τα αποτελέσματα της προσομοίωσης για την 5^η δοκιμή όπου η συνολική άντληση έχει διπλασιαστεί (δυνατότητα να καλυφθούν μεγαλύτερες ανάγκες των κατοίκων) ενώ η υφαλμύρωση είναι περίπου αντίστοιχη με αυτή του 1^{ου} σεναρίου (πραγματικά δεδομένα). Η 6^η και 7^η δοκιμή απορρίφθηκαν διότι δεν ανταποκρίνονταν στα κριτήρια.



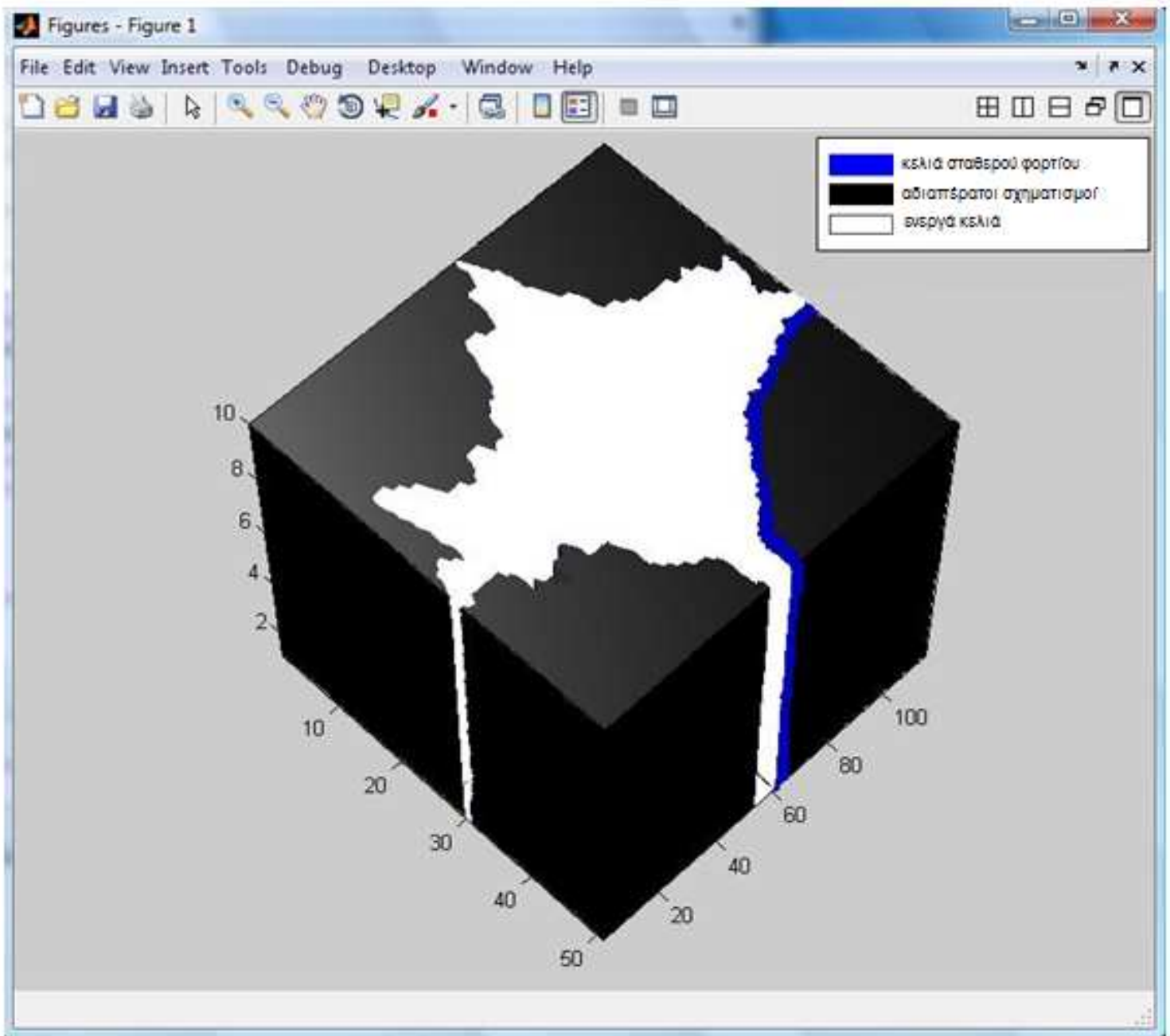
Εικόνα 7.11: Αποτελέσματα προσομοίωσης: Υπολογισμός α) δυναμικού ϕ και β) συγκέντρωσης για την 5^η δοκιμή του διαχειριστικού σεναρίου

Στο σύνολο τους τα σενάρια που εφαρμόστηκαν δημιουργούν προβλήματα στην ποιότητα και στην ποσότητα του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα, ασφαλώς μεγαλύτερη το καλοκαίρι συγκριτικά με το χειμώνα. Όπως έχουμε

αναφέρει και σε προηγούμενο κεφάλαιο, αποκλειστικός στόχος των αριθμητικών μοντέλων είναι η προσομοίωση των φυσικών φαινομένων ενός πραγματικού συστήματος και ειδικότερα η διερεύνηση ή η πρόγνωση των πιο δυσμενών συνήθως καταστάσεων του. Με εξαίρεση το διαχειριστικό σενάριο, του οποίου σκοπός είναι η ορθότερη διαχείριση των υδάτινων αποθεμάτων, όλα τα προηγούμενα, σε σχέση με την υπάρχουσα κατάσταση, οδήγησαν σε μια μετάθεση του μετώπου της υφάλμυρης ζώνης προς το εσωτερικό του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα, δημιουργώντας περαιτέρω προβλήματα υφαλμύρωσης και πλήττοντας ολόένα και μεγαλύτερο αριθμό γεωτρήσεων - φρεατίων. Τα προβλήματα αυτά καλούμαστε να τα περιορίσουμε αν όχι να τα μηδενίσουμε. Ο τρόπος και τα μέτρα δίνονται στο επόμενο κεφάλαιο και στηρίζονται στις αρχές της αειφόρου ανάπτυξης. Τα υδάτινα αποθέματα όσα και να είναι, πάντα θα υπάρχει ο κίνδυνος συρρίκνωσης ή εξάντλησης τους. Αυτό που πρέπει να αλλάξει είναι ο τρόπος με τον οποίο αντιμετωπίζουμε τα πράγματα, δηλαδή ολόκληρη η φιλοσοφία και η στάση μας. Ο μοναδικός δρόμος είναι η συμφιλίωση με το φυσικό περιβάλλον και η εναρμόνιση με τις αρχές της ορθής διαχείρισης.

Σε αυτό το σημείο κρίνεται σκόπιμο να αναφέρουμε και να παραθέσουμε τις τρισδιάστατες απεικονίσεις αλλά και τα δυσδιάστατα διαγράμματα που δημιουργήθηκαν για την καλύτερη απόδοση και την ορθότερη κατανόηση των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από την εφαρμογή του εκάστοτε αριθμητικού μοντέλου. Οι παρακάτω εικόνες προέκυψαν μετά την επεξεργασία με τη γλώσσα τεχνικού προγραμματισμού MATLAB των δυαδικών αρχείων (binary) του φορτίου και της συγκέντρωσης, όπως αυτές δημιουργήθηκαν κατά την εφαρμογή των μοντέλων.

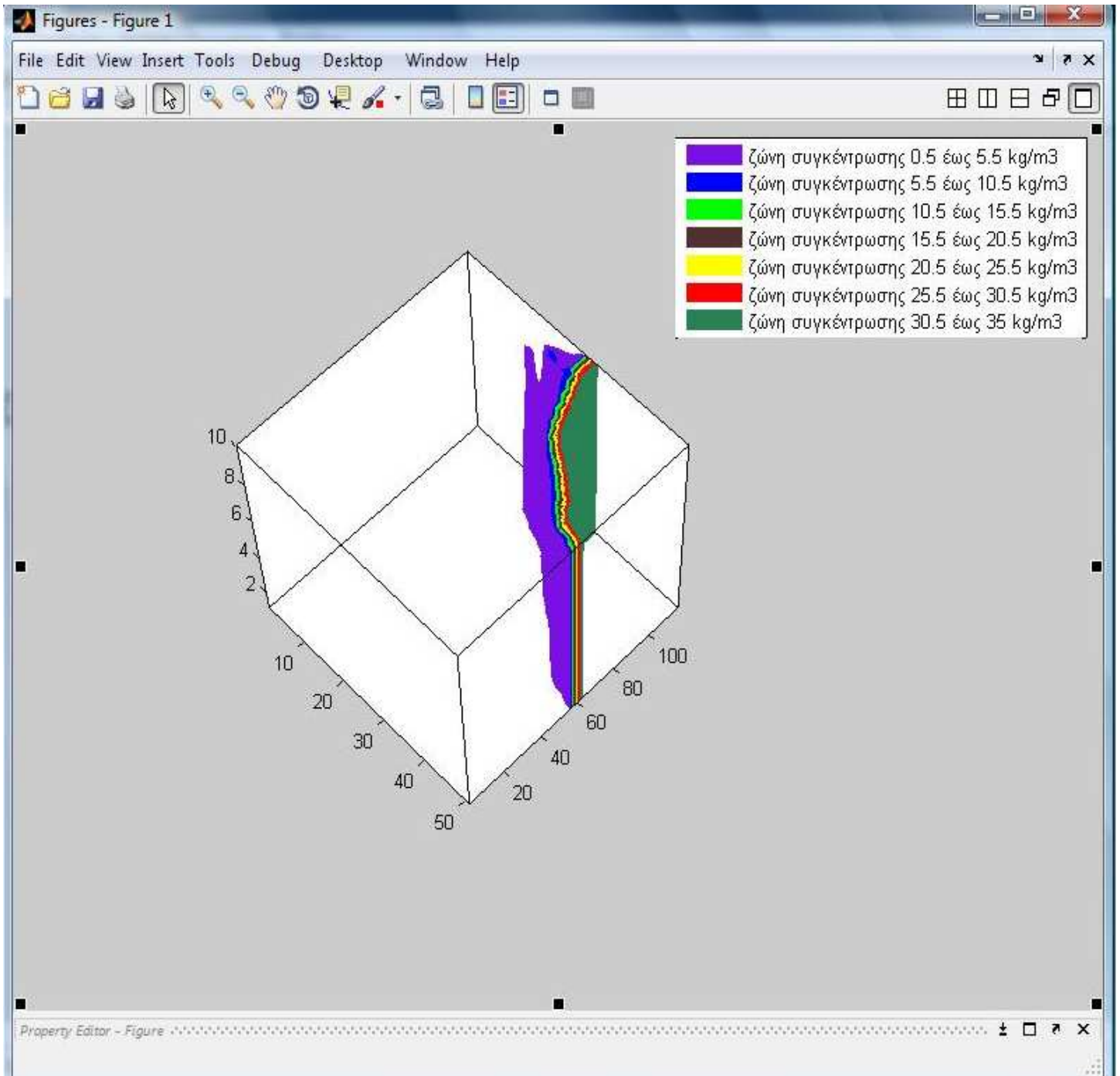
Στην ακόλουθη εικόνα παρουσιάζονται οι οριακές συνθήκες του υδροφορέα σε τρισδιάστατη μορφή. Στο αποτέλεσμα μπορούμε να διακρίνουμε τα ανενεργά κελιά, δηλαδή τα κελιά που δεν λαμβάνουν μέρος στην προσομοίωση του συστήματος και αντιστοιχούν στους αδιαπέρατους σχηματισμούς που οριοθετούν πλευρικά τον υδροφορέα στα βόρεια, δυτικά και νότια και είναι εκείνα με μαύρο χρώμα, τα ενεργά είναι εκείνα με το άσπρο χρώμα και τα κελιά σταθερού φορτίου (θάλασσα) με μπλε χρώμα στα νοτιοανατολικά. Όπως έχουμε προαναφέρει, πίσω από την ακτογραμμή βρίσκεται η θάλασσα ωστόσο πρέπει να επισημάνουμε ότι για λόγους λειτουργίας του προγράμματος GWV4 θεωρήσαμε ότι υπάρχουν ανενεργά κελιά.



Εικόνα 7.12: Τρισδιάστατη απεικόνιση του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα

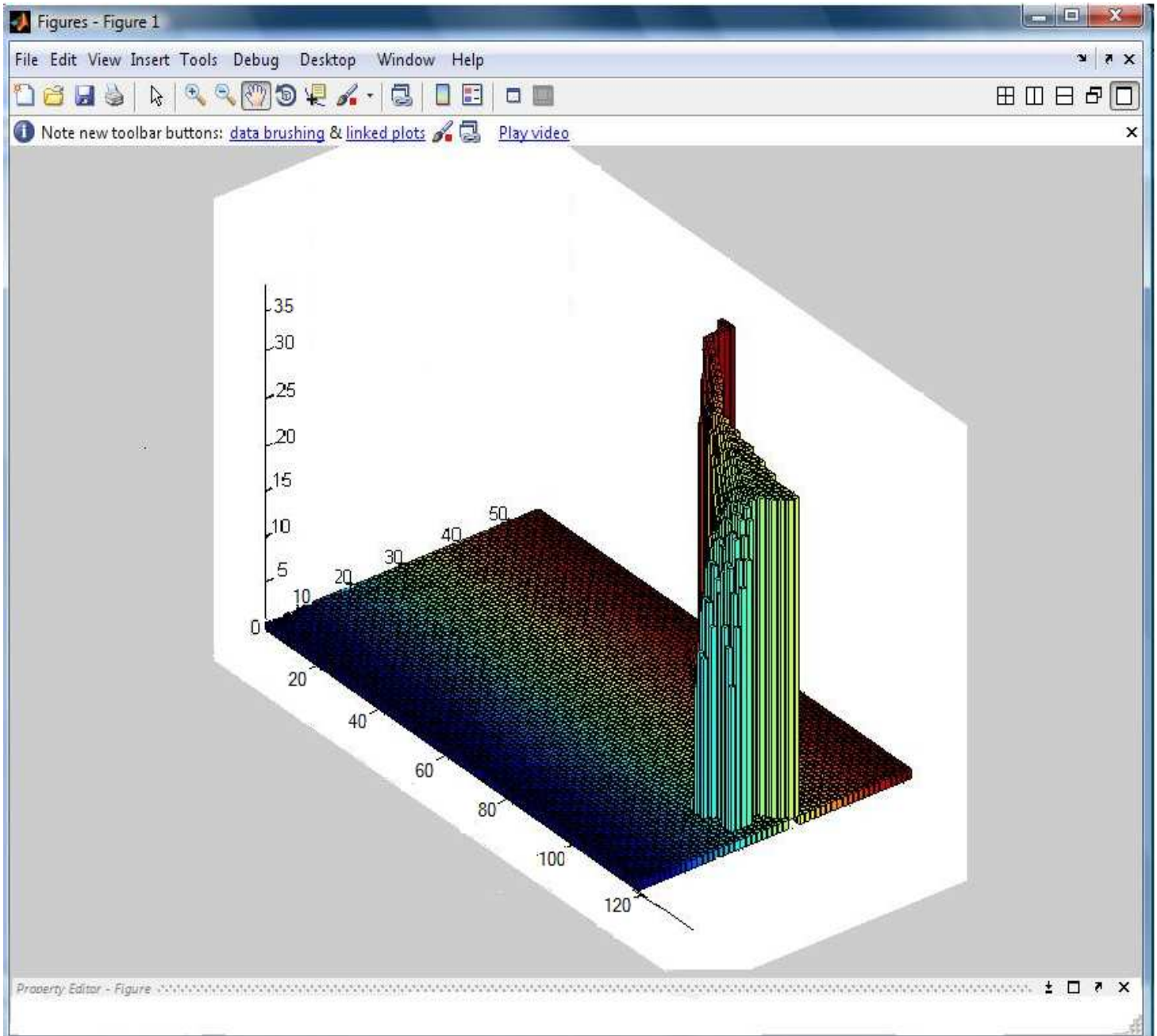
Η παρακάτω εικόνα αποτελεί μια απόπειρα για την τρισδιάστατη παρουσίαση των συγκεντρώσεων, όπως αυτές προέκυψαν κατά την εκτέλεση του πρώτου αριθμητικού μοντέλου. Σε αυτή παρατηρούμε τις ζώνες συγκεντρώσεων όπως αυτές δημιουργήθηκαν κατά την εφαρμογή του αλγόριθμου, και συγκεκριμένα απεικονίζονται οι ζώνες από $0.5 - 5.5 \text{ kg/m}^3$, $5.5 - 10.5 \text{ kg/m}^3$, $10.5 - 15.5 \text{ kg/m}^3$, $15.5 - 20.5 \text{ kg/m}^3$, $20.5 - 25.5 \text{ kg/m}^3$, $25.5 - 30.5 \text{ kg/m}^3$ και $30.5 - 35 \text{ kg/m}^3$. Η διακριτοποίηση έγινε κατά αυτό τον τρόπο ώστε να είναι ευδιάκριτες και να περιοριστούν τα σφάλματα

απεικόνισης των ζωνών που δημιουργήθηκαν. Είναι προφανές ότι μεταξύ των σχηματιζόμενων ζωνών εμπεριέχονται ισοσταθμικές επιφάνειες που αντιστοιχούν σε ενδιάμεσες συγκεντρώσεις. Το αποτέλεσμα από την εφαρμογή του αλγόριθμου δίνεται στη συνέχεια.



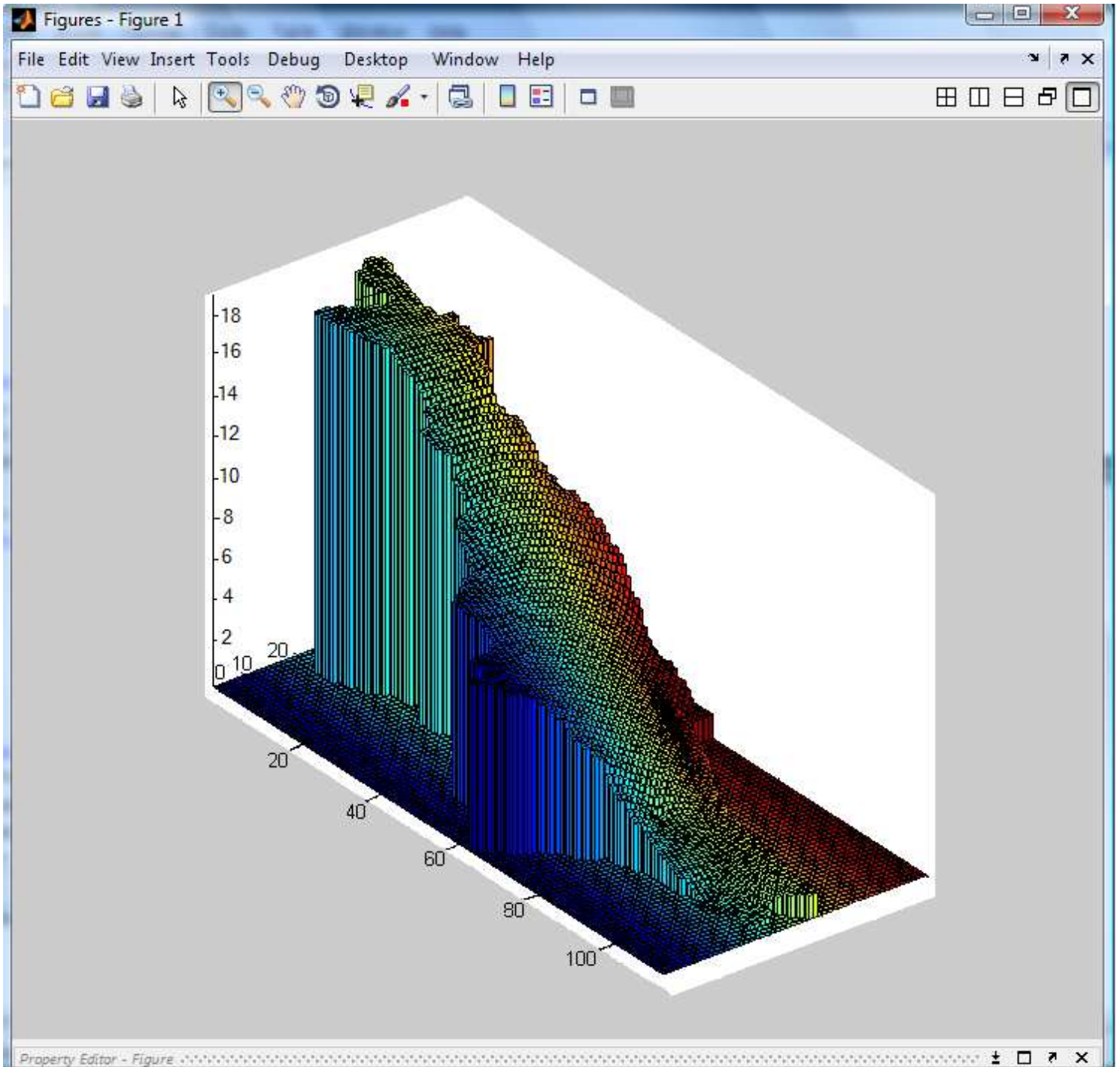
Εικόνα 7.13: Τρισδιάστατη απεικόνιση των συγκεντρώσεων του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα

Στην συνέχεια δίνεται μια δυσδιάστατη απεικόνιση της συγκέντρωσης για το κατώτατο στρώμα (10 layer) όπως αυτή προέκυψε από την εφαρμογή του αριθμητικού μοντέλου για τα πραγματικά δεδομένα (1^ο σενάριο). Το παρακάτω διάγραμμα αποτελεί ουσιαστικά ένα ραβδόγραμμα που μας δείχνει τη συγκέντρωση σε κάθε κελί της διακριτοποιημένης περιοχής. Είναι λογικό πλησίον της ακτογραμμής (υφάλμυρη ζώνη) να συναντάμε συγκεντρώσεις που παρουσιάζουν διακύμανση από 0 έως 35 kg/m³.



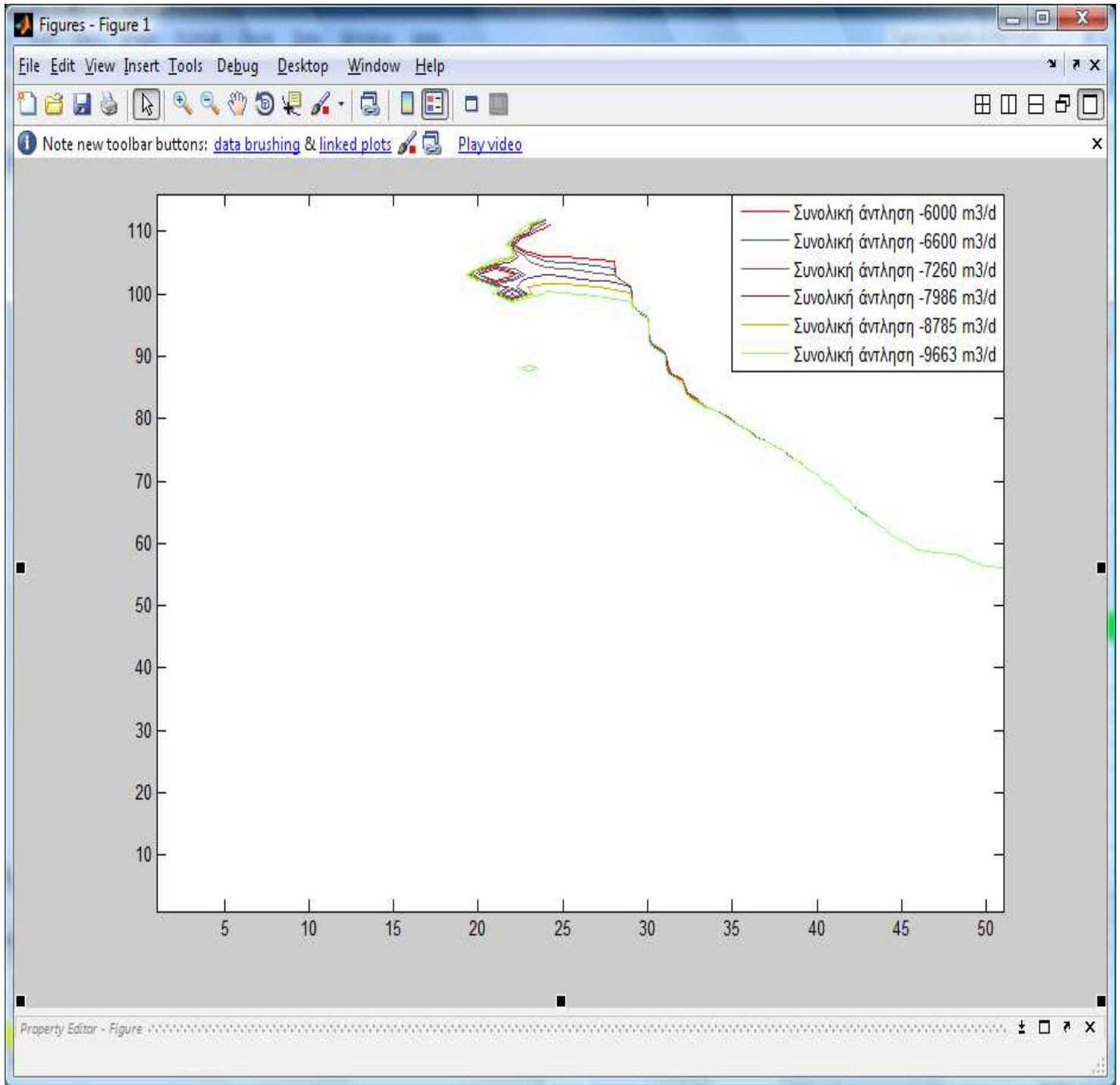
Εικόνα 7.14: Δυσδιάστατη απεικόνιση των συγκεντρώσεων του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα

Η επόμενη εικόνα παρουσιάζει τη τιμή του φορτίου (m) σε κάθε κελί της διακριτοποιημένης περιοχής. Πρόκειται ουσιαστικά για μια δυσδιάστατη απεικόνιση των αποτελεσμάτων όπως αυτά προέκυψαν από την εφαρμογή του αριθμητικού μοντέλου για το 1^ο σενάριο και αφορούν το ανώτατο στρώμα του υδροφόρου ορίζοντα.



Εικόνα 7.15: Δυσδιάστατη απεικόνιση του φορτίου του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα

Στο τελευταίο μας διάγραμμα απεικονίζονται οι ισογλώριες των 0.5 kg/m^3 όπως αυτές προέκυψαν από τις εφαρμογές των αριθμητικών μοντέλων που δημιουργήθηκαν στα πλαίσια των δοκιμών του 1^{ου} και 2^{ου} σεναρίου..



Εικόνα 7.16: Δυσδιάστατη απεικόνιση των ισογλωρίων για τις διάφορες δοκιμές του 1^{ου} και 2^{ου} σεναρίου

Παρατηρούμε ότι καθώς αυξάνονται οι αντλήσεις υπάρχει μια μετακίνηση της ισοχλώριας προς το εσωτερικό του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα και μάλιστα στη περιοχή που είναι συγκεντρωμένες οι γεωτρήσεις όπου εισάγουμε τις αντλήσεις. Συναντάμε δηλαδή μια συστηματική αύξηση του προβλήματος της υφαλμύρωσης. Οι ισοχλώριες αυτές αφορούν το κατώτατο στρώμα του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα

Στο σύνολο τους τα σχέδια και διαγράμματα που δημιουργήθηκαν αφορούν το 1^ο σενάριο (πραγματικά δεδομένα). Αυτό έγινε σε μια προσπάθεια να αποδώσουμε με ακρίβεια και αξιοπιστία την υπάρχουσα κατάσταση. Είναι λογικό ότι τροποποιώντας λίγο τους αλγόριθμους από τους οποίους προέκυψαν μπορούμε να αποδώσουμε κατά αντιστοιχία και τα υπόλοιπα σενάρια.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

Συμπεράσματα - Προτάσεις

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

8.1 Σύντομη ανασκόπηση

Στα κεφάλαια που προηγήθηκαν, αρχικά ορίστηκε η γεωγραφική θέση του νησιού στον ελληνικό χώρο. Όσο αναφορά την διοικητική οριοθέτηση του, αυτό χωρίζεται σε 10 Δήμους οι οποίοι απαρτίζονται από 43 Δημοτικά Διαμερίσματα και οι οποίοι παρουσιάζουν αύξηση στο μόνιμο πληθυσμό με βάση τις επίσημες απογραφές της ελληνικής στατιστικής υπηρεσίας κατά τα έτη 1991 και 2001.

Συγκριτικά με τους παραγωγικούς τομείς είναι προφανείς η μεγάλη ανάπτυξη που παρουσιάζει ο τριτογενής τομέας παραγωγής. Στο σύνολο του το νησί αποτελεί πόλο τουριστικής έλξης και σε αυτό έχει επικεντρωθεί ολόκληρη η οικονομική ανάπτυξη της περιοχής. Το κλίμα της Ρόδου είναι Μεσογειακό με υψηλές θερμοκρασίες και μελτέμια κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού και ήπια καιρικά φαινόμενα κατά τη διάρκεια του χειμώνα.

Στη γεωλογική διαμόρφωση της Νήσου Ρόδου συμβάλλουν 3 γεωλογικές ενότητες. Στο νησί συναντάμε δύο τύπου υδροφορίες, η πρώτη στο βόρειο τμήμα είναι ασθενής εντός των προσχώσεων των παρόχθιων σχηματισμών και των Λεβαντινίων στρωμάτων λόγω της λιθολογικής τους σύστασης εκ της παρουσίας αργίλων και μαργών, και η δεύτερη πολύ ισχυρή υδροφορία στα ασβεστολιθικά πετρώματα των αλλόχθονων σειρών όπως στην περιοχή του Αρχάγγελου, του προφήτη Ηλία και στον σχηματισμό Σγουρού. Στο νότιο τμήμα υπάρχει υδρογεωλογική ομοιομορφία καθώς αποτελείται από στεγανές κατά βάση νεογενείς ιζηματογενείς αποθέσεις οι οποίες σε κάποια σημεία διαφοροποιούνται σε ημιπερατές. Η έλλειψη ευνοϊκών συνθηκών αποτελεί ανασταλτικό παράγοντα για τον σχηματισμό υπόγειων υδροφόρων. Ο παράκτιος υδροφορέας της λεκάνης Γαδουρά που μελετάται, γεωγραφικά οριοθετείται στο κεντρικό και ανατολικό μέρος του νησιού και περιβάλλεται από πρακτικά αδιαπέρατους σχηματισμούς.

Οι σταθμημετρήσεις του πίνακα στο 3^ο κεφάλαιο δείχνουν ότι 8 από τις 17 απόλυτες στάθμες είναι αρνητικές, δηλαδή σε αρκετά σημεία η στάθμη του υδροφορέα βρίσκεται κάτω από το επίπεδο της θάλασσας. Τέλος το πάχος του υδροφορέα εκτιμάται από τα βάθη στα οποία κυμαίνονται οι γεωτρήσεις στην περιοχή στα 50 μέτρα και λόγω απουσίας εργαστηριακών ή επιτόπου μετρήσεων η υδραυλική αγωγιμότητα των υλικών του ορίστηκε στη τάξη

των 15 m/d κατά την οριζόντια διεύθυνση και 1.5 m/d κατά την κατακόρυφη διεύθυνση.

8.2 Γενικά συμπεράσματα από τη μελέτη

Σε αυτό το σημείο είναι καλό να αναφέρουμε κάποια γενικά συμπεράσματα όπως αυτά προκύπτουν από την συνολική μελέτη. Η παρουσίαση των συμπερασμάτων ακολουθεί τη δομή των κεφαλαίων.

1. Ο πρωτογενής και κυρίως ο τριτογενής τομέας παραγωγής είναι ο βασικός καταναλωτής των διαθέσιμων υδάτινων πόρων
2. Το βάθος άντλησης των γεωτρήσεων συνεχώς αυξάνεται. Το μέσο βάθος άντλησης κυμαίνεται σε 300m (συνολική εκτίμηση για τη χώρα μας)
3. Ο τουρισμός αποτελεί σημαντικό οικονομικό πόρο για το νησί και έχει συμβάλει στη βελτίωση του κατά κεφαλήν εισοδήματος των κατοίκων
4. Από τους γεωλογικούς σχηματισμούς που συναντάμε διαπιστώνουμε ότι ο υδροφορέας μας είναι αδιαπέρατος με εξαίρεση το βορειοανατολικό τμήμα του όπου ίσως να δέχεται πλευρική τροφοδοσία (αμελητέα για το μοντέλο που εξετάζουμε)
5. Η γεωλογική δομή του υδροφορέας μας αποτελείται από αλλουβιακές και παράκτιες αποθέσεις στις οποίες κυριαρχούν αργιλοαμμώδη υλικά με χαλίκια μεσαίου μεγέθους και άμμος, και χαλαροί ψαμμίτες αντίστοιχα
6. Η κατείσδυση που δέχεται ο υδροφορέας μας είναι 331,56 mm/έτος
7. Τα αριθμητικά μοντέλα προσομοίωσης στοχεύουν στη μελέτη και πρόγνωση της εξέλιξης σύνθετων φαινομένων σχετικών με τις υπόγειες ροές. Αναπαριστούν το πραγματικό σύστημα με αριθμητικές σχέσεις και κυρίως ερευνούν και προβλέπουν τις πιο δυσμενής καταστάσεις του

8.3 Συμπεράσματα από την προσομοίωση του παράκτιου υδροφόρου σχηματισμού

Στο 6^ο και 7^ο κεφάλαιο παρουσιάστηκε η μεθοδολογία και οι τεχνικές που ακολουθήθηκαν προκειμένου να συνταχθεί και να εφαρμοσθεί, με τον καλύτερο τρόπο και αναλόγως των διαθέσιμων στοιχείων για τη

συγκεκριμένη περιοχή, ένα μοντέλο προσομοίωσης της ροής του παράκτιου υδροφορέα της υδρολογικής λεκάνης Γαδουρά στη νήσο Ρόδο. Επομένως τώρα είναι το κατάλληλο σημείο ώστε να παρουσιάσουμε τα συμπεράσματα που προέκυψαν:

1. Σε παράκτιους υδροφορείς όπου οι διαφοροποιήσεις της πυκνότητας στο υγρό είναι μεγάλες η μελέτη της ροής του νερού είναι περίπλοκη διότι οι διακυμάνσεις στη πυκνότητα μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά τα ποσοστά και τα πρότυπα της ροής του υγρού
2. Η εφαρμογή ομοιόμορφου κανάβου ενδείκνυται ως προς την αρτιότητα του μοντέλου και αποτελεί καλή επιλογή όταν τα δεδομένα του συστήματος είναι ομοιόμορφα κατανεμημένα και μας ενδιαφέρει η συνολική μελέτη
3. Από τα αποτελέσματα του 1^{ου} σεναρίου (πραγματικά δεδομένα) παρατηρούμε ότι το μέτωπο της υφαλμύρωσης, έχει επεκταθεί προς το εσωτερικό του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα πλήττοντας τις 3 νοτιότερες γεωτρήσεις, δίχως όμως να ξεπερνά το φρεάτιο Φ2 (πλησιέστερο στη θάλασσα)
4. Η απεικόνιση των αποτελεσμάτων του 2^{ου} σεναρίου (αύξηση των τιμών των πραγματικών αντλήσεων του 1^{ου} σεναρίου) δείχνει ότι το μέτωπο της υφαλμύρωσης έχει διεισδύσει ακόμα βαθύτερα προς το εσωτερικό του υδροφορέα (οριακά δεν ξεπερνά το φρεάτιο Φ2) πλήττοντας μεγαλύτερο αριθμό γεωτρήσεων (τις 5 νοτιότερες)
5. Η εφαρμογή του 3^{ου} σεναρίου (εισαγωγή αντλήσεων σε όλα τα φρεάτια και τις γεωτρήσεις) οδηγεί στη ρύπανση του μεγαλύτερου αριθμού των γεωτρήσεων, με την υφάλμυρη ζώνη να επεκτείνεται έως το φρεάτιο Φ7. Μόνο οι πιο απομακρυσμένες γεωτρήσεις από την ακτογραμμή δεν δείχνουν να επηρεάζονται (συνολικά 5). Επιπλέον παρατηρείται ότι η συνολική άντληση κάθε γεώτρησης σταθεροποιείται στις τιμές που δίνονται στο πίνακα του 7^{ου} κεφαλαίου ανεξάρτητα από τον αριθμό των επιπέδων που αντλούμε
6. Στο 4^ο σενάριο (υποδιπλασιασμός ης τροφοδοσίας) το μέτωπο της υφαλμύρωσης επεκτείνεται έως τη γεώτρηση Γ50, δηλαδή ξεπερνά το φρεάτιο Φ2 (πλησιέστερο της ακτογραμμής), πλήττοντας τις 6 νοτιότερες γεωτρήσεις (δηλαδή διπλάσιο αριθμό γεωτρήσεων με ίδια δεδομένα άντλησης, αυτά του 1^{ου} σεναρίου). Θα πρέπει να τονίσουμε ότι η νοτιότερη

γεώτρηση (Γ47) παρουσιάζει σημάδια ρύπανσης ακόμα και όταν έχουμε μηδενικές αντλήσεις με τη μισή τροφοδοσία, κάτι που δεν παρατηρείται σε κανένα από τα άλλα σενάρια όπου η τροφοδοσία είναι αυτή που προσδιορίστηκε από την εκτίμηση του υδατικού ισοζυγίου

7. Τα αποτελέσματα του 5^{ου} σεναρίου δείχνουν ότι η υφάλμυρη ζώνη δεν ξεπερνά το φρεάτιο Φ2, ενώ σημάδια ρύπανσης συναντώνται μόνο στη νοτιότερη γεώτρηση Γ47. Βλέπουμε δηλαδή να καλύπτεται η υπάρχουσα ζήτηση (σύμφωνα με τα πραγματικά δεδομένα του 1^{ου} σεναρίου) και συγχρόνως να περιορίζεται το πρόβλημα της υφαλμύρωσης. Αλλά και στην άλλη δοκιμή, που παρουσιάζουμε στα πλαίσια αυτού του σεναρίου, παρατηρούμε ότι η έκταση της υφαλμύρωσης είναι όμοια με αυτή του 1^{ου} σεναρίου ενώ συγχρόνως μπορούν να καλυφθούν διπλάσιες ανάγκες

8. Από τα αποτελέσματα του 1^{ου} και 2^{ου} σεναρίου παρατηρούμε, ότι καθώς αυξάνεται ο ρυθμός των αντλήσεων, η ισοχλώρια των 0.5 kg/m³ κινείται προς το εσωτερικό του υδροφορέα

9. Οι τιμές του δυναμικού φ μειώνονται καθώς κινούμαστε από το βόρειο προς το νότιο τμήμα του υδροφορέα και αυτό είναι λογικό αφού το σύνολο των γεωτρήσεων – φρεατίων είναι συγκεντρωμένο στο κεντρικό και νότιο τμήμα

10. Όσο αυξάνουμε τις παροχές άντλησης, στα πλαίσια κάθε σεναρίου, τόσο μεγαλύτερη είναι η πτώση της ελεύθερης επιφάνειας

8.4 Προτάσεις για ακριβέστερα αριθμητικά μοντέλα

Είναι πολύ σημαντικό να γίνουν κατανοητοί οι περιορισμοί αυτού του μοντέλου, όπως άλλωστε ισχύει και για κάθε μοντέλο υπόγειων υδάτων. Αυτοί οφείλονται είτε σε αμιγώς «τεχνικές δυσκολίες», όπως η ακρίβεια των υπολογισμών που προσφέρει το λογισμικό που χρησιμοποιείται, είτε στο ίδιο το υδρογεωλογικό καθεστώς που περιγράφεται από το μοντέλο. Πέρα όμως από τα παραπάνω, στην περίπτωση του υδροφορέα που εξετάσαμε, υπάρχουν πρόσθετες παραδοχές και υποθέσεις που προσθέτουν σφάλματα στην ακρίβεια του μοντέλου.

Με δεδομένες τις πληροφορίες που παρουσιάστηκαν στο 6^ο κεφάλαιο θα διατυπώσω κάποιες προτάσεις που θα καθιστούν το υπό κατασκευή μοντέλο περισσότερο ακριβές. Αυτές είναι:

1. Η ύπαρξη χωροχρονικά περισσότερων μετρήσεων της στάθμης του υδροφόρου ορίζοντα
2. Η εκτέλεση μιας επαναληπτικής διαδικασίας αντλητικών δοκιμών μέσω φρεάτων παρατήρησης στον υδροφόρο ορίζοντα και οι οποίες αποτελούν το βέλτιστο τρόπο προσδιορισμού των χαρακτηριστικών του
3. Η πραγματοποίηση εργαστηριακών μετρήσεων ή επιτόπου δοκιμών εισπίεσεων για τον προσδιορισμό της υδραυλικής αγωγιμότητας K
4. Η ύπαρξη τομών γεωτρητικών ερευνών ώστε να διαχωριστούν οι διαφορετικοί γεωλογικοί σχηματισμοί. Έτσι το μοντέλο θα μπορεί να σχεδιαστεί με διάφορα στρώματα διαφορετικών χαρακτηριστικών και πάχους. Στη περίπτωση μας η διακριτοποίηση του υπόγειου υδροφόρου ορίζοντα έγινε με απλό διαχωρισμό σε 10 ισοπαχή επίπεδα

Ένα μοντέλο βασισμένο στις παραπάνω προτάσεις, θεωρείται ικανό να περιγράψει με αρκετή ακρίβεια τις διαδικασίες της υπόγειας ροής ενός υδροφορέα και έτσι μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εργαλείο για την πρόγνωση μελλοντικών καταστάσεων, με στόχο τη διασφάλιση των ποιοτικών (αποτροπή υφαλμύρωσης) και ποσοτικών χαρακτηριστικών του υδάτινου συστήματος.

8.5 Μέτρα για την προστασία του υδροφορέα που εξετάζουμε και οφέλη από την εφαρμογή τους

Με βάση τα επιμέρους συμπεράσματα στα διάφορα στάδια της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας παρατίθενται στο σημείο αυτό κάποια μέτρα για την εξασφάλιση της βιωσιμότητας του υδάτινου συστήματος που μελετάμε.

1. Ακρως απαραίτητο είναι ένα πρόγραμμα διαχείρισης και προστασίας των υδατικών πόρων ως βάση για την λήψη αποφάσεων
2. Εφαρμογή ενός διαχειριστικού σεναρίου αντίστοιχου με αυτό που περιγράφηκε
3. Διενέργεια υδρογεωλογικών ερευνών στις πεδινές εκτάσεις της νήσου Ρόδου
4. Εγκατάσταση μονάδων αφαλάτωσης θαλασσινού νερού

5. Ίδρυση σταθμού παρατήρησης, καταγραφής και αξιολόγησης πρωτογενών στοιχείων
6. Εφαρμογή τεχνητού εμπλουτισμού και επαναχρησιμοποίηση υδατικών πόρων
7. Βελτίωσης του δικτύου ύδρευσης με στόχο την ελαχιστοποίηση των απωλειών νερού
8. Κατασκευή έργων μεσαίας κλίμακας ικανών να αποθηκεύσουν ποσότητες νερού
9. Ευαισθητοποίηση του κοινού στο θέμα της διαχείρισης των πόρων

Τα παραπάνω μέτρα είναι σύμφωνα με την πρόσφατη σχετική Οδηγία της Ε.Ε. για τις μεθόδους αειφορικής διαχείρισης των υπόγειων υδατικών πόρων. Η εφαρμογή τους είναι σε θέση να οδηγήσει σε μια σειρά από σημαντικούς στόχους, που θεωρούνται ζωτικής σημασίας για διατήρηση και προστασία του υδάτινου συστήματος που εξετάζουμε, και είναι οι ακόλουθοι .

1. Άνοδος της στάθμης και αναχαίτιση του φαινομένου της υφαλμύρωσης
2. Αναβάθμιση της ποιότητας των υπόγειων νερών και βελτίωση των χαρακτηριστικών τους
3. Μείωση των απωλειών νερού και αύξηση των διαθέσιμων αποθεμάτων
4. Επαναχρησιμοποίηση των επιφανειακών υδατικών πόρων, αξιοποίηση της επιφανειακής απορροής και αύξηση της διήθησης

Τέλος, πρέπει να τονίσουμε τη στενή συσχέτιση των κλιματικών αλλαγών με τον τομέα της διαχείρισης και προστασίας των υδατικών πόρων. Όλο και συχνότερα γινόμαστε μάρτυρες ακραίων φυσικών γεγονότων (περιόδους μεγάλης ξηρασίας) και τα οποία σε συνδυασμό με τη μη ορθολογική διαχείριση των υδάτινων πόρων μπορούν να θέσουν σε κίνδυνο τα υδάτινα συστήματα. Ο σχεδιασμός της αντιμετώπισης τέτοιων φαινομένων πρέπει να είναι διαρκείς. Η εφαρμογή σεναρίων προσομοίωσης με μειωμένη τροφοδοσία μπορεί να μας δώσει την κατεύθυνση για το πώς πρέπει να

τροποποιηθούν οι υφιστάμενες αντλήσεις έτσι ώστε να προληφθούν φαινόμενα υφαλμύρωσης.

Τα προβλήματα όμως δεν υποχωρούν, τα βήματα είναι δειλά και οι συγκρούσεις έντονες. Το θέμα είναι πολυδιάστατο, έχει την ρίζα του στην αναπτυξιακή πολιτική που ακολουθήθηκε και ακολουθείται, στην ταύτιση της ανάπτυξης με την οικονομική μεγέθυνση και την μεγιστοποίηση της απόδοσης και του κέρδους, στην εκμετάλλευση της ανθρώπινης εργασίας και της φύσης. Η κρισιμότητα των θεμάτων διαχείρισης υδατικών πόρων εντείνεται από τις επιλογές χωρίς σχεδιασμό και πρόβλεψη, την υποτίμηση των προβλημάτων ποιότητας και ποσότητας των υδατικών πόρων και την καθυστέρηση εισαγωγής του περιβαλλοντικού παράγοντα στον αναπτυξιακό σχεδιασμό και στην διαδικασία της αγοράς. Η πολιτική αειφόρου διαχείρισης του περιβάλλοντος όσο και αν έχει παγκόσμια χαρακτηριστικά αποτελεί το καταλληλότερο εργαλείο για το σχεδιασμό πολιτικής σε οποιαδήποτε περιοχή.

Βιβλιογραφία

Anderson M. and Woessner W., (1992), Applied Groundwater Modeling: Simulation of Flow and Advective Transport, Academic Press

Bear J. and Verruijt A., (1987), Modeling Groundwater Flow and Pollution, D. Reidel Publishing Company

Γιαννουλόπουλος Π., «Υπόγεια Υδραυλική και Μαθηματικά Μοντέλα στο Αργολικό πεδίο», Διδακτορική διατριβή, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων και Γεωργικής Μηχανικής, Τομέας Διαχείρισης Υδατικών Πόρων, Αθήνα, 2000

Carrera Jesus & Neuman P. Shlomo, Estimation of Aquifer Parameters Under Transient and Steady State Conditions: 2. Uniqueness, Stability and Solution Algorithms, Water Resources Research, Vol. 22, No. 2, February 1986b

Δερμιτζάκης Μ. & Λέκκας Σ., (1991), Διερευνώντας τη Γη – Εισαγωγή στη Γενική Γεωλογία, Β' Έκδοση

James O. Rumbaugh and Douglas B. Rumbaugh, (2000), 3D – Groundwater Modeling with GWV4

Καλλέργης Γ., Εφαρμοσμένη – Περιβαλλοντική Υδρογεωλογία, Τόμος Α' και Β', Δεύτερη Έκδοση, Έκδοση Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδας, Αθήνα

Κουτσογιάννης Δ. & Ξανθόπουλος Θ., (1999), «Τεχνική Υδρολογία», Ε.Μ.Π., Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας υδατικών πόρων, Αθήνα

Mc Donald M. and Harbaugh A., (1988), A Modular Three – Dimensional Finite – Difference Ground Water Flow Model, U.S. Geological Survey

Μαντόγλου Α. , «Υδρολογία Υπόγειων Νερών και Μεταφορά Ρύπων», Ε.Μ.Π, Μεταπτυχιακό πρόγραμμα: Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων, Νοέμβριος 2006

Μαντόγλου Α., «Προσομοίωση και διαχείριση παράκτιων υδροφορέων» Διαχείριση φυσικών καταστροφών, Ημερίδα, Δεκέμβριος 2007

Μαντόγλου Α., Κουράκος Γ., «Θεωρητική τεκμηρίωση μοντέλου ανάλυσης παράκτιων υδροφορέων», Γ' Κοινοτικό Πλαίσιο Στήριξης 2000-2006: Επιχειρησιακό Πρόγραμμα Ανταγωνιστικότητα, Ολοκληρωμένη Διαχείριση Υδατικών Συστημάτων σε Σύζευξη με Εξελιγμένο Υπολογιστικό Σύστημα, Τεύχος 4β, Αθήνα, 2005

Mantoglou A., Papantoniou M., & Giannouloupoulos P., (2004), “Management of coastal Aquifers based on nonlinear optimization and evolutionary algorithms”, Journal of Hydrology

Mantoglou A. and P. Giannouloupoulos, «Sustainable Yield of Coastal Aquifers Using Simulation and Optimization: Application to Santorini Island», International Conference “Protection and Restoration of the Environment VII”, Mykonos, Greece, 2004

Ναλμπάντης Ι., «Προστασία και διαχείριση Υδατικών Πόρων», Ε.Μ.Π, Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Αθήνα 2007

Νάνου – Γιάνναρου Α., (2006), Εισαγωγή στα Υπόγεια Νερά, Ε.Μ.Π., Αθήνα

Παπανικολάου Δ., (1986), Γεωλογία της Ελλάδας

Παπαζάχος Β. & Παπαζάχου Κ., (1989), Οι σεισμοί της Ελλάδος, Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη

Παπαντωνίου Μ., (2003), «Διαχείριση Παράκτιων Υδροφορέων – Βελτιστοποίηση Αντλήσεων», Διπλωματική Εργασία Διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Επιστήμη και Τεχνολογία Υδατικών Πόρων»

Σαμπατακάκης Π., (2001), «Υπόγεια Νερά – Το παρόν και το μέλλον στα νησιά του Αιγαίου», Πρακτικά Συμποσίου «Αιγαίο – Νερό – Βιώσιμη ανάπτυξη», Πάρος

Σταμάτης Γ. και Παυλόπουλος Κ., «Γεωλογία και Γεωμορφολογία», Γ.Π.Α, Τμήμα Αξιοποίησης Φυσικών Πόρων και Γεωργικής Μηχανικής

Στράντζαλης Κ., Διπλωματική εργασία, «Προσδιορισμός Υδάτινου Ισοζυγίου Υπόγειου Παράκτιου Υδροφορέα της Ν. Θήρας υπό την Επίδραση Έντονων Κλιματικών Αλλαγών», ΕΜΠ, Αθήνα 2008

Τσακίρης Γ., (1995), «Υδατικοί Πόροι: Ι. Τεχνική Υδρολογία», Ε.Μ.Π., Σχολή Αγρονόμων και Τοπογράφων Μηχανικών, Αθήνα

Τσακίρης Γ., (2006), «Υδραυλικά Έργα, Σχεδιασμός και Διαχείριση – Τόμος ΙΙ: Εγγειοβελτιωτικά Έργα», Αθήνα

Todd D., (1980), Groundwater Hydrology, Second Edition, John Wiley & Sons Inc, New York

ΥΔΡΟΕΡΕΥΝΑ Α.Ε. (1995) «Οριστική Υδρογεωλογική Μελέτη Ν. Ρόδου και Σύνταξη Μαθηματικού Μοντέλου». Υπουργείο Γεωργίας, Γεν. Δ/νση Εγγειοβελτιωτικών Έργων και Γεωργικών Διαρθρώσεων, Δ/νση Γεωλογίας – Υδρολογίας

Χαρμανίδης Φ., (2001), «Ελλειμματικό Υδατικό Ισοζύγιο στα νησιά των Κυκλάδων - Επιτακτική ανάγκη ολοκληρωμένης υδατικής πολιτικής και Διαχείρισης (Το παράδειγμα της Πάρου)», Ι.Γ.Μ.Ε., Αθήνα

Διαδικτυακοί τόποι

<http://ga.water.usgs.gov/edu/earthgwaquifer.html>

<http://www.statistics.gr/>

<http://www.livepedia.gr/>

http://mycourses.ntua.gr/course_description/index.php?cidReq=PSTGR1023

