

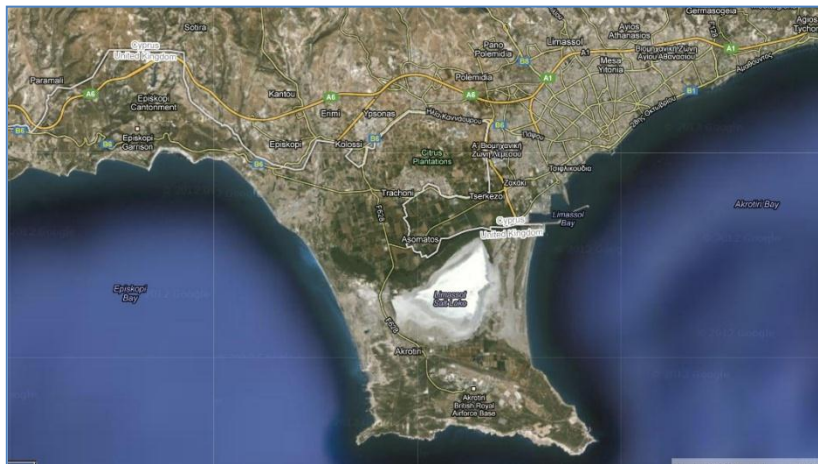


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΝΟΜΩΝ ΤΟΠΟΓΡΑΦΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:

«ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΥΔΑΤΙΚΟΥ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΟΥ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΠΑΡΑΚΤΙΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΑΚΡΩΤΗΡΙΟΥ»



Εκπόνηση: Ευαγόρου Ευαγόρας

Επιβλέπων Καθηγητής: Μαντόγλου Αριστοτέλης

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2012

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία εκπονήθηκε στον Τομέα Έργων Υποδομής και Αγροτικής Ανάπτυξης της Σχολής Αγρονόμων Τοπογράφων Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου υπό την επίβλεψη του καθηγητή Κ^{ου} Αριστοτέλη Μαντόγλου. Θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου σε όλους εκείνους που με στήριξαν μέχρι την ολοκλήρωση αυτής της εργασίας. Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον καθηγητή μου Κ. Μαντόγλου για την υπομονή του και τη στήριξη και καθοδήγησή του σε όλα τα στάδια της εργασίας.

Ευχαριστίες επίσης αντιστοιχούν στον υποψήφιο Διδάκτορα Ε.Μ.Π Γιώργο Κοψιάυτη, του οποίου η βοήθεια ήταν καθοριστική για την εξοικείωση με τα λογισμικά προγράμματα με τα οποία ήρθα σε επαφή στην παρούσα πτυχιακή.

Τελειώνοντας, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα την οικογένειά μου που ήταν στο πλευρό μου και για την ηθική στήριξη κατά τη διάρκεια της εργασίας μέχρι την ολοκλήρωσή της.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικά	σελ. 14
1.2 Υδατικό πρόβλημα.....	σελ. 15
1.3 Σκοπός της διπλωματικής εργασίας	σελ. 16
1.4 Διάρθρωση διπλωματικής εργασίας	σελ. 17

2. ΥΠΟΓΕΙΑ ΝΕΡΑ

2.1 Γενικά	σελ. 21
2.2 Υπεράντληση Υπόγειων Νερών στην Κύπρο	σελ. 22
2.3 Παράμετροι Υπόγειων Υδροφορέων.....	σελ. 25
2.4 Νόμος του Darcy.....	σελ. 27

3. ΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΚΑΙ ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΤΗΣ ΚΥΠΡΟΥ

3.1 Γεωλογία	σελ. 30
3.2 Στρωματογραφική διάρθρωση της Κύπρου.....	σελ. 30
3.3 Σεισμικότητα	σελ. 32
3.4 Υδρογεωλογία	σελ. 33
3.5 Περιγραφή του Υδροφορέα Ακρωτηρίου	σελ. 35

3.5.1 Διαχωρισμός των παράκτιων υδροφορέων –Ορισμοί....	σελ.35
3.5.2 Οριοθέτηση του υδροφορέα Ακρωτηρίου.....	σελ.38
3.5.3 Εκτίμηση πάχους του υδροφορέα	σελ.39
3.5.4 Στοιχεία γεωτρήσεων άντλησης	σελ. 40
3.5.5 Στοιχεία τεχνητού εμπλουτισμού.....	σελ. 40
3.5.6 Υδραυλική αγωγιμότητα του υδροφορέα Ακρωτηρίου...	σελ.41

4.ΠΑΡΑΚΤΙΟΙ ΥΔΡΟΦΟΡΕΙΣ

4.1 Υφαλμύρωση Παράκτιων Υδροφορέων	σελ.44
4.2 Η πολυπλοκότητα του προβλήματος Υφαλμύρωσης Παράκτιων Υδροφορέων	σελ.47
4.3 Επιπτώσεις της Υφαλμύρωσης	σελ.47
4.4 Προσέγγιση Ghyben-Herzberg.....	σελ.48
4.5 Ανάλυση κατά Strack.....	σελ.51
4.6 Μεθοδολογία Προσομοίωσης Παράκτιων Υδροφορέων: Μοντέλο Mantoglou <i>et al</i> (2004).....	σελ.54

5. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΥΔΑΤΙΚΟΥ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ ΣΤΟΝ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΑΚΡΩΤΗΡΙΟΥ

5.1 Υδρολογικός κύκλος.....	σελ.60
5.2 Κατακρήμνιση	σελ.61

5.3 Εξατμισοδιαπνοή	σελ.62
5.4 Επιφανειακή απορροή	σελ. 67
5.5 Κατείσδυση	σελ. 68
5.6 Εκτίμηση Υδατικού Ισοζυγίου Ακρωτηρίου	σελ. 68
5.6.1 Υπολογισμός συνιστωσών υδατικού ισοζυγίου με την μέθοδο Thornthwaite-Mather.....	σελ. 69
5.6.2 Υπολογισμός κατείσδυσης με χρήση εμπειρικών συντελεστών	σελ.94
5.7 Συμπεράσματα.....	σελ. 94

6. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

6.1 Γενικά.....	σελ. 97
6.2 Ο κώδικας Modflow.....	σελ. 97
6.3 Εφαρμογή Μοντέλου Mantoglou et al (2004) στον παράκτιο υδροφόρα του Ακρωτηρίου.....	σελ. 103
6.3.1 Προσδιορισμός της Γεωμετρίας του μοντέλου.....	σελ. 103
6.3.2 Οριακές Συνθήκες (Boundary Conditions).....	σελ. 109
6.3.3 Εισαγωγή παραμέτρων.....	σελ.111
6.3.4 Αρχικές Συνθήκες (Initial Conditions).....	σελ.123
6.3.5 Εκτέλεση (Run).....	σελ.123

7.ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΣΕΝΑΡΙΩΝ ΑΝΤΛΗΣΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΗΤΟΥ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΥ

7.1 Εισαγωγή.....	σελ.129
7.2 Σενάρια Τεχνητού Εμπλουτισμού.....	σελ.129
7.3 Σενάρια μείωσης της αρχικής άντλησης	σελ.136
7.4 Σενάριο Αύξησης τεχνητού εμπλουτισμού και μείωσης της αρχικής άντλησης των γεωτρήσεων κατά 30%	σελ.142

8: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

8.1 Συμπεράσματα από την εκτίμηση του υδατικού ισοζυγίου.	σελ.145
8.2 Συμπεράσματα από την προσομοίωση του παράκτιου υδροφορέα Ακρωτηρίου και των σεναρίων άντλησης και τεχνητού εμπλουτισμού	σελ.146
8.3 Μέτρα Προστασίας και Ανάκαμψης Υδροφορέα.....	σελ.147
Βιβλιογραφία	σελ.150

Πίνακας Εικόνων

ΚΕΦ.1	1.1: Τοποθεσία του παράκτιου υδροφορέα Ακρωτηρίου	Σελ. 16
ΚΕΦ.3	3.1: Γεωλογικός Χάρτης Κύπρου	Σελ. 32
	3.2: Χάρτης Σεισμικών Ζωνών	Σελ. 33
	3.3: Χάρτης συστημάτων υπόγειων υδάτων	Σελ. 35
	3.4: Παράκτιος υδροφορέας Ακρωτηρίου	Σελ. 39
ΚΕΦ.4	4.1: Ζώνη Διεπιφάνειας- α) σε ελεύθερο και β) σε υπό πίεση υδροφόρο στρώμα	Σελ. 44
	4.2: Κώνος άντλησης γύρω από την γεώτρηση	Σελ. 46
	4.3: Προσέγγιση Ghyben-Herzberg	Σελ. 48
	4.4: Ζώνες φρεάτιου υδροφορέα, όπως αυτές χωρίζονται από τη διεπιφάνεια αλμυρού και γλυκού νερού	Σελ. 52
	4.5: Φάσεις της διεπιφάνειας γλυκού-αλμυρού νερού σε υδροφορέα	Σελ. 54
	4.6: Παράκτιος υδροφορέας αντλούμενος από γεώτρηση	Σελ. 55
ΚΕΦ.5	5.1: Καθορισμός ονόματος χρονοσειράς, μεταβλητής, μονάδων μέτρησης και ακρίβειας στο πρόγραμμα Hydrognomon .	Σελ. 77
	5.2: Καθορισμός του χρονικού βήματος .	Σελ. 78
	5.3: Καθορισμός μέσω μηνιαίων τιμών χρονοσειράς .	Σελ. 78
	5.4: Αντιστοιχία χρονοσειράς με το Temperature.	Σελ. 79
	5.5: Επιλογή μεθόδου Thornthwaite και εισαγωγή γεωγραφικού πλάτους.	Σελ. 79
	5.6: Αντιστοίχιση διαθέσιμων χρονοσειρών με τα “Temperature”, “MaxAirTemp”, και “MinAirTemp”	Σελ. 82
	5.7 :Σχηματική παράσταση συνιστωσών υδατικού ισοζυγίου, υπολογισμένων με τη μέθοδο Thornthwaite-Mather.	Σελ.92
	6.1: Διακριτοποίηση υποθετικού υδροφορέα.	Σελ. 99
	6.2: Κόμβοι σε σχηματισμό στο κέντρο του κελιού	Σελ. 100
	6.3: Κόμβοι σε σχηματισμό με κέντρο το σημείο	Σελ. 101
	6.4 : Υδροφορέας Ακρωτηρίου	Σελ. 104
	6.5:Περιοχή μελέτης υδροφορέα Ακρωτηρίου	Σελ. 104

ΚΕΦ.6	6.6: Χωρική Διακριτοποίηση του υδροφορέα	Σελ. 110
	6.7: Διαπερατόμετρα σταθερού υδραυλικού φορτίου (α) και μεταβλητού υδραυλικού φορτίου (β).	Σελ. 112
	6.8: Καθορισμός νέων γεωτρήσεων	Σελ. 115
	6.9: Εισαγωγή φρεάτων άντλησης στο μοντέλο	Σελ. 116
	6.10: Εισαγωγή πλευρικών εισροών στο μοντέλο	Σελ. 117
	6.11: Εισαγωγή εμπλουτιστικών λιμνών στο μοντέλο	Σελ. 119
	6.12: Εισαγωγή εκροών και διαρροών του ποταμού Κούρη	Σελ. 121
	6.13: Αποτέλεσμα Προσομοίωσης –Υπολογισμός δυναμικού Φ	Σελ. 124
	6.14: Περιοχή υφαλμύρωσης του Υδροφορέα Ακρωτηρίου – Δάκτυλο Πόδα	Σελ. 125
	6.15 Δισδιάστατη απεικόνιση του υδραυλικού φορτίου hf του υδροφορέα Ακρωτηρίου	Σελ. 127
	6.16 Τρισδιάστατη απεικόνιση του υδραυλικού φορτίου hf του υδροφορέα Ακρωτηρίου	Σελ. 127
ΚΕΦ.7	7.1: Αποτέλεσμα προσομοίωσης – 10% Αύξηση τεχνητού εμπλουτισμού	Σελ. 131
	7.2: Δισδιάστατη απεικόνιση υδραυλικού φορτίου hf με 10% αύξηση τεχνητού εμπλουτισμού του υδροφορέα Ακρωτηρίου.	Σελ. 131
	7.3: Τρισδιάστατη απεικόνιση υδραυλικού φορτίου hf με 20% αύξηση τεχνητού εμπλουτισμού του υδροφορέα Ακρωτηρίου.	Σελ. 132
	7.4: Αποτέλεσμα προσομοίωσης – 20% Αύξηση τεχνητού εμπλουτισμού	Σελ. 132
	7.5: Δισδιάστατη απεικόνιση υδραυλικού φορτίου hf με 20% αύξηση τεχνητού εμπλουτισμού του υδροφορέα Ακρωτηρίου.	Σελ. 133
	7.6: Τρισδιάστατη απεικόνιση υδραυλικού φορτίου hf με 20% αύξηση τεχνητού εμπλουτισμού του υδροφορέα Ακρωτηρίου.	Σελ. 133
	7.7: Αποτέλεσμα προσομοίωσης – 30% Αύξηση τεχνητού εμπλουτισμού	Σελ. 134
	7.8: Δισδιάστατη απεικόνιση υδραυλικού φορτίου hf με 30% αύξηση τεχνητού εμπλουτισμού του υδροφορέα Ακρωτηρίου.	Σελ. 134
	7.9: Τρισδιάστατη απεικόνιση υδραυλικού φορτίου hf με 30% αύξηση τεχνητού εμπλουτισμού του υδροφορέα Ακρωτηρίου.	Σελ. 135
	7.10: Αποτέλεσμα προσομοίωσης –Μείωση της αρχικής άντλησης κατά 10%	Σελ. 137
	7.11: Δισδιάστατη απεικόνιση υδραυλικού φορτίου hf με 10% μείωση της αρχικής άντλησης του υδροφορέα Ακρωτηρίου.	Σελ. 138
	7.12: Τρισδιάστατη απεικόνιση υδραυλικού φορτίου hf με 10% μείωση της αρχικής άντλησης του υδροφορέα Ακρωτηρίου.	Σελ. 138

	7.13: Αποτέλεσμα προσομοίωσης –Μείωση της αρχικής άντλησης κατά 20%	Σελ. 139
	7.14: Δισδιάστατη απεικόνιση υδραυλικού φορτίου hf με 10% μείωση της αρχικής άντλησης του υδροφορέα Ακρωτηρίου.	Σελ. 139
	7.15: Τρισδιάστατη απεικόνιση υδραυλικού φορτίου hf με 20% μείωση της αρχικής άντλησης του υδροφορέα Ακρωτηρίου.	Σελ. 140
	7.16: Αποτέλεσμα προσομοίωσης –Μείωση της αρχικής άντλησης κατά 30%	Σελ. 140
	7.17: Δισδιάστατη απεικόνιση υδραυλικού φορτίου hf με 10% μείωση της αρχικής άντλησης του υδροφορέα Ακρωτηρίου.	Σελ. 141
	7.18: Τρισδιάστατη απεικόνιση υδραυλικού φορτίου hf με 30% μείωση της αρχικής άντλησης του υδροφορέα Ακρωτηρίου.	Σελ. 141
	7.19: Αποτέλεσμα προσομοίωσης – Μείωση της αρχικής άντλησης και αύξηση τεχνητού εμπλουτισμού κατά 30% αντίστοιχα.	Σελ. 142
	7.20: Δισδιάστατη απεικόνιση υδραυλικού φορτίου hf με 30% μείωση της αρχικής άντλησης και 30% αύξηση τεχνητού εμπλουτισμού του υδροφορέα Ακρωτηρίου.	Σελ. 143
	7.21: Τρισδιάστατη απεικόνιση υδραυλικού φορτίου hf με 30% μείωση της αρχικής άντλησης και 30% αύξηση τεχνητού εμπλουτισμού του υδροφορέα Ακρωτηρίου.	Σελ. 143

Πίνακας Πινάκων

ΚΕΦ.3	3.1: Διαχωρισμός Υπόγειων υδροφορέων της Κύπρου	Σελ. 37
	3.2: Υδραυλική Αγωγιμότητα του υδροφορέα Ακρωτηρίου	Σελ. 42
ΚΕΦ.5	5.1: Χαρακτηριστικά Στοιχεία μετεωρολογικού σταθμού Ακρωτηρίου	Σελ. 69
	5.2: Μηνιαίες τιμές βροχόπτωσης περιόδου 1973-2011	Σελ. 70
	5.3: Μέσες Τιμές Θερμοκρασίας περιόδου 1973-2011	Σελ. 73
	5.4: Μέση μηνιαία δυνητική εξατμισοδιαπνοή Thornthwaite κατά τη μέθοδο για την περίοδο 1973-2011	Σελ. 80
	5.5: Μέση μηνιαία δυνητική εξατμισοδιαπνοή Hargreaves κατά τη μέθοδο για την περίοδο 1973-2011	Σελ. 83
	5.6: Μέσος όρος των μέσων μηνιαίων τιμών της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής των δύο μεθόδων	Σελ. 85
	5.7: Μέση υπερετήσια δυνητική εξατμισοδιαπνοή με τις μεθόδους Thornthwaite, Hargreaves	Σελ. 86

	5.8: Υδατοϊκανότητα, σημείο μάρανσης και διαθέσιμο νερό εδάφους	Σελ. 88
	5.9: Δεδομένα εισόδου στο WTRBLN	Σελ. 89
	5.10: Δεδομένα εξόδου στο WTRBLN για τον υπολογισμό της κατείσδυσης	Σελ. 90
ΚΕΦ.6	6.1 : Μέσες τιμές αντλήσεων υφιστάμενων γεωτρήσεων	Σελ. 114
	6.2:Αντλήσεις νέων γεωτρήσεων	Σελ. 115
	6.3:Συνολικές ποσότητες τεχνητού εμπλουτισμού	Σελ. 118
	6.4: Εκροές + Διαρροές (m ³) Φράγματος Κούρη	Σελ. 120
ΚΕΦ.7	7.1: Αύξηση τεχνητού εμπλουτισμού κατά 10% - 30%	Σελ.130
	7.2: Τα τρία σενάρια μείωσης άντλησης	Σελ.136
ΚΕΦ.8	8.1: Εκτίμηση Υδατικού ισοζυγίου	Σελ.146

Πίνακας Διαγραμμάτων

ΚΕΦ.5	5.1: Μέσο μηνιαίο ύψος βροχής περιόδου 1973-2011	Σελ. 72
	5.2: Μέση Μηνιαία Θερμοκρασία περιόδου 1973-2011	Σελ. 75
	5.3: Σχηματική παράσταση μέσης μηνιαίας δυνητικής εξατμισοδιαπνοής Thornthwaite	Σελ. 81
	5.4: Σχηματική παράσταση μέσης μηνιαίας δυνητικής εξατμισοδιαπνοής Hargreaves	Σελ. 84

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο υπόγειος παράκτιος υδροφορέας Ακρωτηρίου στη Λεμεσό αποτελεί μία από τις κύριες πηγές για την κάλυψη των αναγκών της πόλης. Λόγω των αυξημένων αντλήσεων που επικρατούν στην περιοχή τα υπόγεια νερά υποβαθμίζονται με αποτέλεσμα την εισροή του νερού της θάλασσας στον υδροφορέα και την πιθανή υφαλμύρωση του.

Με την παρούσα διπλωματική εργασία επιχειρήθηκε η μελέτη του υπόγειου υδροφορέα Ακρωτηρίου, έγινε προσομοίωση της υπόγειας ροής και εξετάστηκαν μερικά σενάρια τεχνητού εμπλουτισμού ούτως ώστε να παρουσιαστούν συμπεράσματα και λύσεις για την προστασία του από το φαινόμενο της υφαλμύρωσης. Το μοντέλο προσομοίωσης της ροής που έχει χρησιμοποιηθεί εφαρμόζεται σε παράκτιους υδροφορείς σε συνθήκες μόνιμης ροής και έχει ως βάση τη θεώρηση της απότομης διεπιφάνειας αλμυρού-γλυκού νερού, στην προσέγγιση Ghyben-Herzberg, στις παραδοχές της οριζόντιας ροής και τέλος στην ανάλυση κατά Strack. Για την προσομοίωση του παράκτιου υδροφορέα Ακρωτηρίου χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο Mantoglou *et al* (2004) το οποίο χρησιμοποιεί το αριθμητικό μοντέλο πεπερασμένων διαφορών Modflow για τον υπολογισμό των τιμών δυναμικού σύμφωνα με την ανάλυση κατά Strack. Το μοντέλο χρησιμοποιεί την εξίσωση Ghyben-Herzberg για την επίτευξη του υπολογισμού της θέσης και της μορφής της διεπιφάνειας. Ο υπολογισμός του πιεζομετρικού φορτίου πραγματοποιήθηκαν σε περιβάλλον Matlab.

Αξιοσημείωτης σημασίας είναι τα συμπεράσματα από την παρούσα διπλωματική. Αναδείχθηκε ότι η βροχόπτωση έχει περιορισμένη συνεισφορά στην τροφοδοσία του υδροφορέα μας σε σύγκριση με άλλες πηγές καθώς επίσης οι υπεραντλήσεις έχουν οδηγήσει στην πτώση του υδροφορέα και προκάλεσαν την διείσδυση της θάλασσας. Σοβαρό πρόβλημα παρατηρήθηκε στην περιοχή του Δέλτα λόγω της μείωσης του φυσικού εμπλουτισμού από τον Κούρη.

ABSTRACT

The coastal aquifer of Akrotiri in Limassol, Cyprus is one of the main sources of water in the area. However, due to increase of pumping, the quality of groundwater is reduced which results in seawater intrusion into the aquifer.

The purpose of this study is to investigate the coastal aquifer of Akrotiri. In particular we apply models of simulation of water flow and then we examine different recharge and pumping scenarios. An artificial recharge scenario is examined in order to avoid seawater intrusion.

The simulation model selected for flow predictions is applicable in steady-state conditions and based on a sharp fresh-saltwater interface assumption. It is based on the Ghyben-Herzberg's assumption and on Strack's horizontal flow analysis.

The model and program developed and applied by Mantoglou *et al* (2004), while Matlab was used for calculation of hydraulic heads.

It can be concluded that the rain has limited contribution to recharge the aquifer in contrast to other sources. The over pumping has led to the fall of the aquifer causing the penetration of the sea. Last but not least, from the simulation of the results there are significant indications of salinity in the southern part of the aquifer.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικά

Η γεωλογική θέση της Κύπρου, η οποία βρίσκεται στο σταυροδρόμι των τριών ηπείρων καθώς και οι πολύπλοκες γεωλογικές διεργασίες που έδρασαν κατά τη γένεση της Κύπρου, την κατέστησαν ένα “παράθυρο” μέσα από το οποίο έγινε δυνατή η κατανόηση της εξέλιξη των ωκεανών και του πλανήτη Γη γενικότερα (Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης, 2000).

Η Κύπρος είναι ανεξάρτητη νησιωτική χώρα της Ανατολικής Μεσογείου και αποτελεί κράτος της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Είναι το τρίτο μεγαλύτερο νησί της Μεσογείου και βρίσκεται ανατολικά της Ρόδου. Μετά από εξέταση των διαθέσιμων στοιχείων της υδρογεωλογικής έρευνας του νησιού, συμπεραίνουμε ότι τα υπόγεια νερά παρέχουν πέραν του 50% περίπου του νερού που χρησιμοποιούμε. Αποτελεί ένα από τα κυριότερα αποθέματα νερού που χρησιμοποιούμε εδώ και χρόνια.

Το κλίμα του νησιού μας σε συνδυασμό με την πολυσχιδή γεωμορφολογική της εικόνα, τη γεωλογική δομή της και τον τεκτονισμό συμβάλλουν στη χωροχρονική ανισοκατανομή των υδατικών πόρων. Η γεωργία του τόπου μας με τις ξηροθερμικές της συνθήκες εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την άρδευση. Οι συνήθεις υδατικοί πόροι τόσο επιφανειακοί όσο και υπόγειοι έχουν σχεδόν εξαντληθεί. Ταυτόχρονα, οι περισσότερες περιοχές καλύφθηκαν με συστήματα άρδευσης μεγάλης αποδοτικότητας. Με την ολοένα αυξανόμενη έλλειψη καλής ποιότητας νερού και τη ζήτηση του για ανθρώπινη κατανάλωση αλλά και για άλλες χρήσεις, υπάρχει πιεστική ανάγκη χρήσης κατώτερης ποιότητας νερού για γεωργική χρήση. Η πίεση γίνεται ακόμα μεγαλύτερη με τις ανομβρίες που παρατηρούνται τα τελευταία χρόνια. Για αυτό το λόγο η χρήση του ανακυκλωμένου νερού για γεωργικούς σκοπούς αντιμετωπίζεται στην Κύπρο σαν μέρος του σχεδιασμού και της ανάπτυξης (Κύρου, 2007).

1.2 Υδατικό πρόβλημα

Στην Κύπρο το πρόβλημα της υδατικής ανεπάρκειας διαγνώστηκε και αντιμετωπίστηκε έγκαιρα. Το σύνθημα 'Ούτε σταγόνα νερού στη θάλασσα καθόρισε την υδατική πολιτική της Κυβέρνησης της νεοσύστατης Κυπριακής Δημοκρατίας και των κυβερνήσεων που ακολούθησαν.

Μεγάλη σημασία δίνεται στην ορθολογική αξιοποίηση των υδατικών πόρων η οποία είναι η σημερινή αποθηκευτική ικανότητα των φραγμάτων που ανέρχεται στα 327,5 ΕΚΜ νερού, σε σύγκριση με 6 ΕΚΜ που ήταν το 1960. Το υδατικό πρόβλημα στην Κύπρο και η επιδείνωση που παρατηρείται σε αυτό είναι άρρηκτα συνδεδεμένο με τις κλιματικές αλλαγές. Η μέχρι πρόσφατα εξάρτηση του νησιού από τον ετήσιο όγκο βροχόπτωσης και η πολιτική «αποθήκευσης» των αναγκαίων ποσοτήτων νερού οδήγησε την Κυπριακή Δημοκρατία σε μια πολιτική κατασκευής φραγμάτων, ευελπιστώντας ότι θα υπήρχε αρκετή βροχόπτωση για να καλύψει τις ετήσιες ανάγκες αλλά και για την αποθήκευση ή και εμπλουτισμό των υπόγειων υδάτων του νησιού.

Βασικός στόχος της πολιτικής ήταν και παραμένει η ανέγερση φραγμάτων στις κατάλληλες τοποθεσίες και η αποθήκευση σε αυτά της μεγαλύτερης δυνατής ποσότητας νερού από εκείνη που χύνεται και χάνεται στη θάλασσα με σκοπό την κάλυψη των αναγκών σε περιόδους ολιγομβρίας ή ανομβρίας. Με την πάροδο των χρόνων, και αφού το πρόβλημα δεν μπορούσε να αντιμετωπιστεί επαρκώς, δημιουργήθηκαν μονάδες αφαλάτωσης όπου επεξεργάζονται το θαλασσινό νερό και καλύπτουν τις υδρευτικές ανάγκες κάποιων περιοχών. Μεγάλη συμβολή στην κάλυψη των αρδευτικών αναγκών του νησιού έχει και η επεξεργασία αστικών λυμάτων η οποία εφαρμόστηκε τα τελευταία χρόνια. Με τριτοβάθμια επεξεργασία των αστικών λυμάτων παράγεται μια αξιόλογη ποσότητα νερού, το οποίο χρησιμοποιείται για την άρδευση διαφόρων καλλιεργειών. Οι τρεις αυτές μέθοδοι αποτέλεσαν τις βασικές λύσεις για το μεγάλο πρόβλημα των υδατικών πόρων του νησιού (Χρίστου, 2010).

1.3 Σκοπός της Διπλωματικής Εργασίας

Περιοχή μελέτης της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί ο υδροφορέας Ακρωτηρίου που βρίσκεται στην Κύπρο στην επαρχία Λεμεσού. Σκοπός της εργασίας είναι η προσομοίωση του υπό μελέτη παράκτιου δελταϊκού, αλλουβιακού υδροφορέα που έχει έκταση 50,5km².



Εικόνα 1.1: Τοποθεσία του παράκτιου υδροφορέα Ακρωτηρίου

Η προσομοίωση ενός παράκτιου υδροφορέα είναι σύνθετη επειδή κατά την εφαρμογή του μοντέλου πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η θάλασσα αφού αποτελεί ταμιευτήρα αλμυρού νερού, το οποίο χαρακτηρίζεται από μεγαλύτερη πυκνότητα και ειδικό βάρος σε σχέση με το γλυκό νερό. Τα μαθηματικά ομοιώματα αποτελούν ένα δυναμικό, αξιόπιστο και διεθνώς αναγνωρισμένο εργαλείο το οποίο παρέχει σημαντική βοήθεια στην υδρογεωλογική μελέτη και διαχείριση των υδατικών πόρων μιας περιοχής. Για την επίλυση του συστήματος για αυτή την μελέτη δημιουργείται ένα συμβατικό μοντέλο προσομοίωσης, βασιζόμενο στο μοντέλο Mantoglou et al το οποίο και επιλύει το πρόβλημα ροής με τη μέθοδο πεπερασμένων διαφορών.

Κατά την μελέτη του προβλήματος της υπαλμύρωσης του υδροφορέα ορίζεται ένα ακριβές μοντέλο προσομοίωσης λαμβάνοντας υπόψη το σχήμα του υδροφορέα και τα υδραυλικά χαρακτηριστικά του. Εκτελούνται επίσης, διάφορα σενάρια άντλησης και τεχνητού εμπλουτισμού, από τα όποια προκύπτουν σημαντικά συμπεράσματα.

1.4 Διάρθρωση της Διπλωματικής Εργασίας

Περιοχή μελέτης της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί ο υδροφορέας Ακρωτηρίου που βρίσκεται στη Λεμεσό. Για τη διεξοδική ανάλυση του θέματος της διπλωματικής εργασίας, η εργασία διαρθρώθηκε σε οκτώ κεφάλαια. Στο παρόν εισαγωγικό κεφάλαιο δίνεται μια γενική παρουσίαση του θέματος και των στόχων της εργασίας καθώς και η δομή της.

Στο δεύτερο κεφάλαιο που έχει θεωρητικό χαρακτήρα, δίνονται οι ορισμοί για κάποιες παραμέτρους της κίνησης του υπόγειου νερού που θα χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια της εργασίας. Τέτοιες παράμετροι είναι το ολικό και ενεργό πορώδες, η υδραυλική αγωγιμότητα, η φυσική διαπερατότητα, η μεταφορικότητα, η αποθηκευτικότητα, η ειδική αποθηκευτικότητα. Γίνεται επίσης αναφορά στο νόμο του Darcy ο οποίος ισχύει στην περίπτωση του προσχωματικού υδροφορέα που μελετάται και στην εξίσωση της συνέχειας καθώς επίσης και περιγραφή της θεωρίας της οριζόντιας ροής.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά για τις γεωλογικές και υδρογεωλογικές συνθήκες της Κύπρου, π.χ. σεισμικότητα, στρωματογραφική διάρθρωση, γεωλογία και υδρογεωλογία καθώς και χαρακτηριστικά στοιχεία για τον υδροφορέα που εξετάζεται. Αυτά αφορούν στην οριοθέτησή του, εκτίμηση πάχους, υδραυλική αγωγιμότητα, τις εκροές και διαρροές του φράγματος Κούρη και τις υφιστάμενες γεωτρήσεις και τεχνητού εμπλουτισμού .

Προχωρώντας στο τέταρτο κεφάλαιο επισημαίνεται η πολυπλοκότητα του προβλήματος υπαλμύρωσης στα παράκτια υδροφόρα στρώματα και οι παράγοντες στους οποίους οφείλεται αυτό. Το μέγεθος και η θέση της διεπιφάνειας αλμυρού και γλυκού νερού που σχηματίζεται στις παράκτιες περιοχές διερευνήθηκε για πρώτη φορά από τους Badon Ghyben (1888) και Herzberg (1901) οι οποίοι κατέληξαν στην πασίγνωστη *εξίσωση Ghyben – Herzberg*. Στη συνέχεια και με στόχο την επίτευξη μιας αποτελεσματικότερης επίλυσης, ο *Strack*(1976), εισήγαγε την έννοια ενιαίου δυναμικού ϕ και για τις δύο ζώνες, αλμυρού – γλυκού και αμιγώς γλυκού νερού, ώστε να απαιτείται η επίλυση μιας μόνο εξίσωσης που ισχύει και για τις δύο ζώνες. Το κεφάλαιο κλείνει με την αναφορά

στο μοντέλο που θα χρησιμοποιηθεί για την προσομοίωση του φρεάτιου υδροφορέα που θα μελετηθεί, γνωστό ως το μοντέλο Mantoglou.

Στο πέμπτο κεφάλαιο αναφέρονται γενικά στοιχεία υδρολογίας και πιο συγκεκριμένα περιγράφεται ο υδρολογικός κύκλος του νερού. Στόχος αυτού του κεφαλαίου είναι να προσδιοριστεί το υδατικό ισοζύγιο στην περιοχή μελέτης. Για το λόγο αυτό δίνεται μια περιγραφή της γενικής εξίσωσης του υδατικού ισοζυγίου και περιγράφονται αναλυτικά οι συνιστώσες του όπως η κατακρήμνιση, η εξατμισοδιαπνοή, η επιφανειακή απορροή και η κατείσδυση. Η εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής μπορεί να γίνει με μεθόδους συνδυασμού όπως Penman – Monteith, με τις απλοποιήσεις και παραδοχές από άλλους όπως Doorenbos and Pruitt, Priestley and Taylor αλλά και με εμπειρικές μεθόδους όπως των Thornthwaite, Blaney – Criddle, Turc και Hargreaves. Η μέθοδος που έχει χρησιμοποιηθεί είναι των Thornthwaite-Mother και εκείνη του Hargreaves. Τα δεδομένα βροχόπτωσης και θερμοκρασίας ήταν διαθέσιμα και λήφθηκαν από την Μετεωρολογική Υπηρεσία Κύπρου (2012). Μετά από εισαγωγή των στοιχείων βροχόπτωσης και θερμοκρασίας που βρέθηκαν για το μετεωρολογικό σταθμό του Ακρωτηρίου, που βρίσκεται κοντά στον υπό εξέταση υδροφορέα, στο λογισμικό «Υδρογνώμων», το οποίο είναι ένα εργαλείο διαχείρισης και ανάλυσης των υδρολογικών πληροφοριών, προέκυψαν οι τιμές της μέσης μηνιαίας δυνητικής εξατμισοδιαπνοής.

Στο έκτο κεφάλαιο, δίνεται λεπτομερής αναφορά για τον κώδικα Modflow, το αριθμητικό μοντέλο πεπερασμένων διαφορών. Ο τρόπος λειτουργίας του είναι αποκλειστικά ως ένα υπολογιστικό εργαλείο (υπολογισμός των τιμών δυναμικού ϕ , όπως ορίζεται από τον Strack) και στη συνέχεια σε περιβάλλον Matlab, με τη βοήθεια της εξίσωσης Ghyben – Herzberg, υπολογίζεται τελικά η θέση και η μορφή της διεπιφάνειας γλυκού – αλμυρού νερού. Αναφέρονται επίσης ο προσδιορισμός της γεωμετρίας του μοντέλου, η εισαγωγή οριακών συνθηκών και βελτιώσεις αυτών, η εισαγωγή των παραμέτρων που πρέπει να γίνει στο μοντέλο και τελικά η εκτέλεση της προσομοίωσης.

Ακολουθεί το έβδομο κεφάλαιο στο οποίο έχουμε μελετήσει τρία σενάρια τεχνητού εμπλουτισμού, τρία σενάρια μείωσης της άντλησης και συνδυασμός αυτών των δυο σεναρίων. Τα αποτελέσματα τα οποία αναμένουμε να έχουμε είναι η αντιμετώπιση της υπαλμύρισης του υδροφορέα μας.

Η διπλωματική αυτή κλίνει με το όγδοο κεφάλαιο όπου παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που οδηγεί η μελέτη του παράκτιου υδροφορέα αλλά και τα μέτρα προστασίας και ανάκαμψης υδροφορέα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΥΠΟΓΕΙΑ ΝΕΡΑ

2. ΥΠΟΓΕΙΑ ΝΕΡΑ

2.1 Γενικά

Οι υπόγειοι υδατικοί πόροι διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην οικονομία του νησιού. Η συμβολή τους είναι ιδιαίτερα καθοριστική για τη γεωργική ανάπτυξη κατά τους θερινούς μήνες όπου η βροχόπτωση ελαχιστοποιείται και η ροή των ποταμών σταματά, με αποτέλεσμα μεγάλες γεωργικές εκτάσεις να αρδεύονται με άντληση από τα υπόγεια νερά. Εξάλλου η ύδρευση των πόλεων και χωριών της Κύπρου στηρίζεται, σε μεγάλο βαθμό, στα υπόγεια νερά.

Τα υπόγεια νερά βρίσκονται κάτω από την επιφάνεια της γης και μπορούν να συλλεχθούν μέσω φρεάτων, σηράγγων ή αποστραγγιστικών αγωγών ή ρέουν προς την επιφάνεια μέσω πηγών (Νάνου, 2006).

Καθώς η ανάπτυξη μιας περιοχής εξαρτάται πρωτίστως από τη διαθεσιμότητα φυσικών πόρων, η αειφορική διαχείριση των πόρων αυτών θα πρέπει να αποτελεί το πρώτο μέλημα κάθε κοινωνίας, με σκοπό τη διατήρηση και τη βελτίωση των συνθηκών ζωής. Το νερό είναι αναντικατάστατος φυσικός πόρος, απαραίτητος για τη ζωή. Η ποσότητα του νερού που υπάρχει στον πλανήτη παραμένει σταθερή στο πέρασμα των αιώνων και βρίσκεται σε μια συνεχή εναλλαγή μεταξύ των διαφόρων φάσεων του νερού, γνωστή ως υδρολογικός κύκλος (Λατινόπουλος, 2006). Οι μεγαλύτερες ποσότητες νερού βρίσκονται στη θάλασσα και καταλήγουν στην ξηρά ως ατμοσφαιρικά κατακρημνίσματα με την εξάτμιση και τη μεταφορά υδρατμών.

Από την άλλη, τα επιφανειακά νερά των ποταμών και οι διαδρομές που ακολουθούν τα υπόγεια νερά έχουν ως κατάληξη κάποιο φυσικό αποδέκτη, τη θάλασσα. Οι υπόγειοι υδροφορείς αποτελούν κύρια πηγή νερού σε περιοχές παρακείμενες στη θάλασσα. Η εντατική εκμετάλλευση των υπόγειων υδατικών αποθεμάτων από τους παράκτιους υδροφορείς εγκυμονεί κινδύνους εισβολής του θαλασσινού νερού μέσα σε γλυκούς υδροφορείς, υπό τη μορφή αλμυρής σφήνας. Κατά συνέπεια, ελλοχεύουν κίνδυνοι από την ακαταλληλότητα χρησιμοποίησης του γλυκού υπόγειου νερού για ύδρευση ή άρδευση.

Επιπλέον, τα υπόγεια νερά συντηρούν τους παράκτιους υγρότοπους και επιτείνουν τις ευεργετικές ιδιότητες τους για τους οργανισμούς του αβαθούς θαλάσσιου

περιβάλλοντος. Η διαφορά πυκνότητας που υπάρχει ανάμεσα στο αλμυρό και το γλυκό νερό έχει ως αποτέλεσμα το αλμυρό νερό, ως βαρύτερο που είναι, να εισέρχεται κάτω από το γλυκό, σχηματίζοντας μια ενδιάμεση υφάλμυρη ζώνη μέσης πυκνότητας. Σε αυτή τη ζώνη το αλμυρό νερό αναμιγνύεται με το γλυκό το οποίο κινούμενο προς τη θάλασσα, προκαλεί την επανακυκλοφορία της ροής του αλμυρού νερού κατά μήκος της ζώνης ανάμιξης. Το πάχος και η θέση της ζώνης αυτής ποικίλει και σε συνθήκες ισορροπίας εξαρτάται από το είδος, τις διαστάσεις και τις υδρολογικές παραμέτρους του υδροφορέα, καθώς και από την παροχή του γλυκού νερού που εκρέει προς τη θάλασσα. Αυτή η υδραυλική ισορροπία που υπάρχει μπορεί να διαταραχθεί σημαντικά με αποτέλεσμα τη μετακίνηση της σφήνας του θαλασσινού νερού προς την ενδοχώρα, είτε με μείωση της παροχής του γλυκού νερού προς τη θάλασσα κατά την περίοδο συνεχόμενων ξηρών υδρολογικών ετών, είτε με άνοδο της στάθμης της θάλασσας.

Ένας τρίτος παράγοντας που μπορεί να μεταβάλλει αυτή την ισορροπία είναι η παρατεταμένη άντληση του υπόγειου νερού για την κάλυψη των υδρευτικών και αρδευτικών αναγκών οι οποίες στις παράκτιες περιοχές είναι συνήθως μεγάλες. Για την προστασία των υπόγειων υδροφορέων από τη διείσδυση του θαλασσινού νερού απαιτείται η συνδυασμένη διαχείριση επιφανειακών και υπόγειων υδάτων. Μέχρι τη δεκαετία του 1970, τα υπόγεια νερά αποτελούσαν τις κύριες πηγές νερού τόσο για ύδρευση όσο και για άρδευση με αποτέλεσμα τα υδροφόρα στρώματα σε πολλές περιοχές της Κύπρου, να αρχίσουν να εξαντλούνται ή και να γίνονται ακατάλληλα με την εισροή θαλασσιού νερού. Με την αύξηση του πληθυσμού, του τουριστικού ρεύματος και τη βιομηχανική ανάπτυξη, η ζήτηση νερού αυξανόταν όλο και περισσότερο και η παροχή ικανοποιητικών ποσοτήτων κατάλληλου πόσιμου νερού δεν ήταν πλέον εφικτή.

2.2 Υπεράντληση Υπόγειων Νερών στην Κύπρο

Στην Κύπρο υπάρχουν οι υπόγειοι υδατικοί πόροι, δηλαδή τα υπόγεια νερά που βρίσκονται κάτω από το έδαφος και τους επιφανειακούς υδατικούς πόρους –τα νερά που ρέουν στα ποτάμια. Σύμφωνα με έκθεση του Δημητρίου Χ. (2008) για το Τμήμα Αναπτύξεως Υδάτων, αυτοί οι υδατικοί πόροι εμπλουτίζονται από τις βροχές γι' αυτό και θεωρούνται οι φυσικοί υδατικοί πόροι. Τα τελευταία χρόνια όμως λόγω της μείωσης της βροχόπτωσης είχε παρατηρηθεί έλλειψη νερού από τους διαθέσιμους υδατικούς πόρους και έτσι καταλήγουμε στην αξιολόγηση μη συμβατών υδατικών πόρων.

Τα παραδείγματα έχουν ως εξής:

- A) Αξιοποίηση θαλάσσιου νερού μέσω αφαλάτωσης για σκοπούς ύδρευσης
- B) Αξιοποίηση του νερού που προέρχεται από τα κεντρικά αποχετευτικά συστήματα
- Γ) Χρησιμοποίηση των υπόγειων νερών ως μέσο γεωτρήσεων.

Σημαντική επιβάρυνση των υδατικών πόρων αποτελούν και οι υπεραντλήσεις που έγιναν για να καλύψουν τα υδατικά ελλείμματα. Όλοι οι υδροφορείς της χώρας μας υπεραντλούνται για δεκαετίες. Αυτό παρουσιάζεται στην έκθεση του ΤΑΥ και υποβλήθηκε στην Ευρωπαϊκή Ένωση από την Κυπριακή Δημοκρατία αναφορικά με την Επισκόπηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων στα νερά από ανθρώπινες δραστηριότητες. Αναφέρεται ότι οι 15 υδροφορείς της Κύπρου υπεραντλούνται κατά 40% πέραν της σημερινής αιφόρου απόδοσής τους. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα σε όλους σχεδόν τους υδροφορείς να παρουσιάζεται μια έντονη πτωτική τάση της στάθμης του υπόγειου νερού και σε αρκετούς τάση υποβάθμισης της ποιότητάς τους. Η υπεράντληση στην περιοχή ανέρχεται στα 31 εκατομμύρια κυβικά μέτρα νερού το χρόνο. Τα τελευταία 50 χρόνια, υπολογίζεται ότι έχουν υπεραντληθεί περίπου 1500 εκατομμύρια κυβικά μέτρα νερού. Η υπεράντληση στους υδροφορείς της ενδοχώρας είχε σαν αποτέλεσμα την πτωτική τάση της στάθμης του υπόγειου νερού, τη μείωση ή και την εξάντληση των αποθεμάτων, την αύξηση του κόστους άντλησης και πολλές φορές την υποβάθμιση της ποιότητας του υπόγειου νερού. Τα αποθέματα σε πολλούς από αυτούς τους υδροφορείς έχουν συγκεντρωθεί εκεί με αργούς ρυθμούς και η αναπλήρωσή τους είναι αργή και πρακτικά αδύνατη.

Επιπλέον, η υπεράντληση των παραλιακών υδροφορέων και η πτώση της στάθμης του υπόγειου νερού κάτω από ένα κρίσιμο επίπεδο, οδηγεί στη διείσδυση θαλάσσιου νερού σε αυτούς και στην υφαλμύρωση τους. Για την ανάκαμψη αυτών των υδροφορέων και για να αποκατασταθεί η καλή ποσοτική και ποιοτική τους κατάσταση απαιτείται η πάροδος πολλών χρόνων. Στο διάστημα αυτό θα πρέπει να μειωθεί η άντληση και η ποσότητα του νερού που θα εμπλουτίσει τον υδροφορέα. Για να επιτευχθεί η απομάκρυνση του θαλάσσιου νερού, τα υπόγεια νερά θα πρέπει να εμπλουτιστούν με πολλαπλάσιο νερό από αυτό που έχει αντληθεί.

Το Τμήμα Αναπτύξεως Υδάτων έχει την ευθύνη για τη διαχείριση όλων των επιφανειακών και των υπόγειων νερών στην Κύπρο και έχει οργανώσει για περισσότερα από 30 χρόνια ένα εκτενές δίκτυο παρακολούθησης για τα υπόγεια νερά που αποτελείται από 1350 σημεία παρακολούθησης ποσότητας -στάθμης- και 200 σημεία παρακολούθησης ποιότητας νερού. Από τα σημεία αυτά λαμβάνονται μετρήσεις 2 με 6 φορές το χρόνο. Με βάση τις μετρήσεις από το δίκτυο παρακολούθησης στον Υδροφορέα Κοκκινοχωριών, στις περιοχές Ξυλοφάγου και Λιοπετρίου, η στάθμη του νερού φτάνει τα 50 μέτρα κάτω από τη θάλασσα. Στην περίπτωση που η στάθμη του νερού της θάλασσας είναι ψηλότερη από τη στάθμη του νερού μέσα στον υδροφορέα, προκαλείται εισροή θαλάσσιου νερού εντός του υδροφορέα, η οποία είναι ανάλογη με την υψομετρική διαφορά της στάθμης. Στις περιοχές αυτές, το μέτωπο του θαλάσσιου νερού είναι περίπου 5 χιλιόμετρα μέσα στον υδροφορέα. Στον υδροφορέα Κιτίου, σε μια μικρή έκταση, παρατηρούνται στάθμες νερού 1-2 μέτρα κάτω από τη στάθμη της θάλασσας. Επιπλέον, στη μισή περίπου έκταση του υδροφορέα Ακρωτηρίου παρατηρούνται στάθμες νερού 1-2 μέτρα κάτω από τη στάθμη της θάλασσας, που υποδεικνύει ότι τα αποθέματα καλής ποιότητας νερού που έχουν απομείνει σήμερα είναι ελάχιστα.

Η ανακοπή της περαιτέρω υποβάθμισης της ποιότητας των υπόγειων υδατικών πόρων και η σταθερή βελτίωσή τους μέχρι την τελική επίτευξη της καλής ποσοτικής και ποιοτικής κατάστασης τους στην Κύπρο, μπορεί να επιτευχθεί με πολύ προσεκτική διαχείριση που εστιάζεται κυρίως σε δύο μεθόδους. Πρώτο, με τη δραστική μείωση της άντλησης στα επίπεδα της αειφόρου απόδοσης των υδροφορέων και δεύτερο με την αύξηση του εμπλουτισμού τους με φυσικές και τεχνητές μεθόδους. Το ανακυκλωμένο νερό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τεχνητό εμπλουτισμό των υδροφορέων.

2.3 Παράμετροι Υπόγειων Υδροφορέων

Οι παράμετροι του υδροφορέων που καθορίζουν την κίνηση του νερού είναι οι ακόλουθοι:

1. Υδραυλική Αγωγιμότητα K (LT^{-1})

Εκφράζεται η ευκολία ή η δυσκολία με την οποία ένα ρευστό ρέει μέσα στους πόρους του πορώδους μέσου. Αξίζει να σημειωθεί ο νόμος του Darcy που έχει διαστάσεις ταχύτητας και εξαρτάται από τις ιδιότητες του ρευστού και του πορώδους μέσου (Νάνου, 2006).

2. Διαβιβαστικότητα ($L^2 T^{-1}$)

Αφορά το γινόμενο του πάχους B ενός ομογενούς και ισότροπου περιορισμένου υδροφορέα επί την υδραυλική αγωγιμότητα K και συμβολίζεται ως εξής: $T = K \cdot B$

Η διοχετευτικότητα έχει νόημα μόνο για δισδιάστατη ή οριζόντια ροή και χρησιμοποιείται για τους υπό πίεση υδροφορείς. Μπορεί να επεκταθεί και σε μη ομογενή ή μεταβλητού πάχους B στρώματα.

3. Ομογένεια και Ισοτροπία Υδροφορέων

Αναφέρονται στην ιδιότητα της φυσικής διαπερατότητας. Ένα πορώδες μέσο θεωρείται ομογενές εάν η διαπερατότητα είναι ίδια σε όλα τα σημεία του αλλιώς το πορώδες μέσο ονομάζεται ανομοιογενές. Όταν η διαπερατότητα σε ένα συγκεκριμένο σημείο του χώρου είναι ανεξάρτητη από την ασκούμενη διεύθυνση, τότε το πορώδες μέσο είναι ισότροπο. Αλλιώς θεωρείται ως ανισότροπο. Η έννοια της ισοτροπίας για δισδιάστατα πεδία ροής επεκτείνεται στις ιδιότητες της υδραυλικής αγωγιμότητας και της διοχετευτικότητας (Νάνου, 1996).

4. Αποθηκευτικότητα (L^{-1})

Βασιζόμενο στον τρόπο με τον οποίο ένας υδροφορέας προσλαμβάνει ή αποδίδει νερό, διακρίνεται σε αποθηκευτικότητα περιορισμένου υδροφορέα ή ελαστική αποθηκευτικότητα. Αυτή διαχωρίζεται ως ακολούθως:

- Ειδική αποθηκευτικότητα (S_o): Είναι ο όγκος του νερού ο οποίος απελευθερώνεται ανά μονάδα όγκου του υδροφορέα όπως επίσης και ανά μονάδα πτώσης του πιεζομετρικού φορτίου. Αποτελεί αδιάστατο μέγεθος το οποίο φαίνεται από τη σχέση:

$$S_o = \frac{\Delta V_T}{V_T \Delta \Phi} \quad (2.1)$$

- Αποθηκευτικότητα υδροφορέα (S_s): Ισούται με τον όγκο νερού που απελευθερώνεται ανά μονάδα οριζόντιας επιφάνειας του υδροφορέα και ανά μονάδα πτώσης του πιεζομετρικού φορτίου $\Delta \Phi$. Θεωρείται μικρότερη από την φρεάτια αποθηκευτικότητα και χρησιμοποιείται στη δισδιάστατη ροή. Αποτελεί αδιάστατο μέγεθος και παρουσιάζεται στην ακόλουθη σχέση:

$$S_s = \frac{\Delta V_T}{A \Delta \Phi} \quad (2.2)$$

- Αποθηκευτικότητα φρεάτιου υδροφορέα (S): Είναι ο όγκος του νερού που απελευθερώνεται ανά μονάδα οριζόντιας επιφάνειας του υδροφορέα και ανά μονάδα πτώσης της στάθμης της ελεύθερης επιφάνειας. Αποτελεί αδιάστατο μέγεθος και περιγράφεται ως εξής:

$$S = \frac{\Delta V_w}{A \Delta h} \quad (2.3)$$

2.4 Νόμος του Darcy

Ο νόμος του Darcy περιγράφει το ρυθμό με τον οποίο ένα υγρό ρέει μέσα από ένα διαπερατό μέσο. Ορίζει ότι το ποσοστό αυτό είναι ανάλογο προς την κάθετη πτώση σε υψόμετρο μεταξύ δύο σημείων σε μεσοπρόθεσμα και έμμεσα ανάλογη προς την απόσταση μεταξύ τους. Ο νόμος χρησιμοποιείται για να περιγράψει τη ροή του νερού από το ένα μέρος του υδροφόρου ορίζοντα στο άλλο, καθώς επίσης και τη ροή του πετρελαίου μέσω του ψαμμίτη και χαλικιού

Ακολουθώντας το νόμο του Darcy, η κίνηση του υπόγειου νερού πραγματοποιείται από θέσεις υψηλότερων προς θέσεις χαμηλότερων ενεργειακών στάθμεων. Η ενεργειακή στάθμη καθορίζεται από το πιεζομετρικό ύψος και αποτελεί άθροισμα των υψών, της θέσης και της πίεσης. Η εξίσωση που περιγράφεται έχει ως εξής: $\varphi = \gamma p z +$. Κατά την κίνηση του υπόγειου νερού διαμέσου του εδαφικού σκελετού, δυνάμεις τριβών που εμφανίζονται στα τοιχώματα προκαλούν ενεργειακές απώλειες, οι οποίες είναι ανάλογες ως προς την ταχύτητα με την οποία κινείται το νερό (Νάνου, 2006).

Ο Νόμος του Darcy μονοδιάστατα διατυπώνεται στην ακόλουθη μορφή:

$$q = \frac{Q}{A} = K \cdot J \quad (2.4)$$

Όπου q είναι η ταχύτητα του Darcy και ο όγκος του νερού που περνά από μια μοναδιαίου εμβαδού διατομή η οποία είναι κάθετη στη διεύθυνση της ροής.

Το K είναι ο συντελεστής υδραυλικής αγωγιμότητας και το J η υδραυλική κλίση που εκφράζεται ως εξής:

$$J = \frac{\Phi_1 - \Phi_2}{L} = \frac{\Delta \varphi}{L} \quad (2.5)$$

Έχει αποδειχθεί ότι ο νόμος του Darcy ισχύει εάν πληρούνται οι παρακάτω προϋποθέσεις:

- ✓ Να ισχύει η προσέγγιση του ισοδύναμου συνεχούς μέσου
- ✓ Οι δυνάμεις αδράνειας να είναι αρκετά μικρές
- ✓ Η ροή να είναι μονοφασική (ομογενές υγρό)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3:
ΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΚΑΙ ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

3. ΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΚΑΙ ΥΔΡΟΓΕΩΛΟΓΙΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΤΗΣ ΚΥΠΡΟΥ

3.1 Γεωλογία

Η γεωλογία υπήρξε πρωταρχικός παράγοντας στη διαμόρφωση του φυσικού περιβάλλοντος του νησιού, οδηγώντας έμμεσα στις συνθήκες απερίμωσης, εφόσον επηρεάζει τόσο τη διαβρωσιμότητα και το βάθος των εδαφών όσο και την υδρολογία. Η γεωλογία της Κύπρου έχει ως πυρήνα το οφιολιθικό σύμπλεγμα του Τροόδους, ηλικίας 92 εκατομμυρίων χρόνων. Τα πετρώματα του Τροόδους αποτελούν ένα κομμάτι αρχαίου ωκεάνιου φλοιού που άρχισε να αναδύεται από τη θάλασσα πριν 10 εκατομμύρια χρόνια (Αργυρόπουλο, 2005).

Η γεωλογική εξέλιξη της Κύπρου σε παλαιότερο χρόνο ήταν υποθαλάσσια και σε αυτή προέχουν τρία κύρια τεκτονικά επεισόδια:

- 1) Η γένεση του συμπλέγματος του Τροόδους πάνω από μια ωκεάνια ζώνη καταβύθισης και η κατά τον ίδιο χρόνο προσκόλληση σε αυτό παλαιότερων πετρωμάτων ηλικίας 200-275 εκατομμυρίων χρόνων στα Νότια και Δυτικά περιθώριά του.
- 2) Η τεκτονική ηρεμία που επικράτησε από 75-100 χρόνια και χαρακτηρίζεται από την υποθαλάσσια εναπόθεση πελαγικών ασβεστολιθικών ιζημάτων και τη βαθμιαία μείωση του βάθους των θαλασσών.
- 3) Η προσκόλληση της οροσειράς της Κερύνειας στη Βόρεια πλευρά του συμπλέγματος του Τροόδους και η ανύψωση της νήσου στη σημερινή της μορφή.

3.2 Στρωματογραφική διάρθρωση της Κύπρου

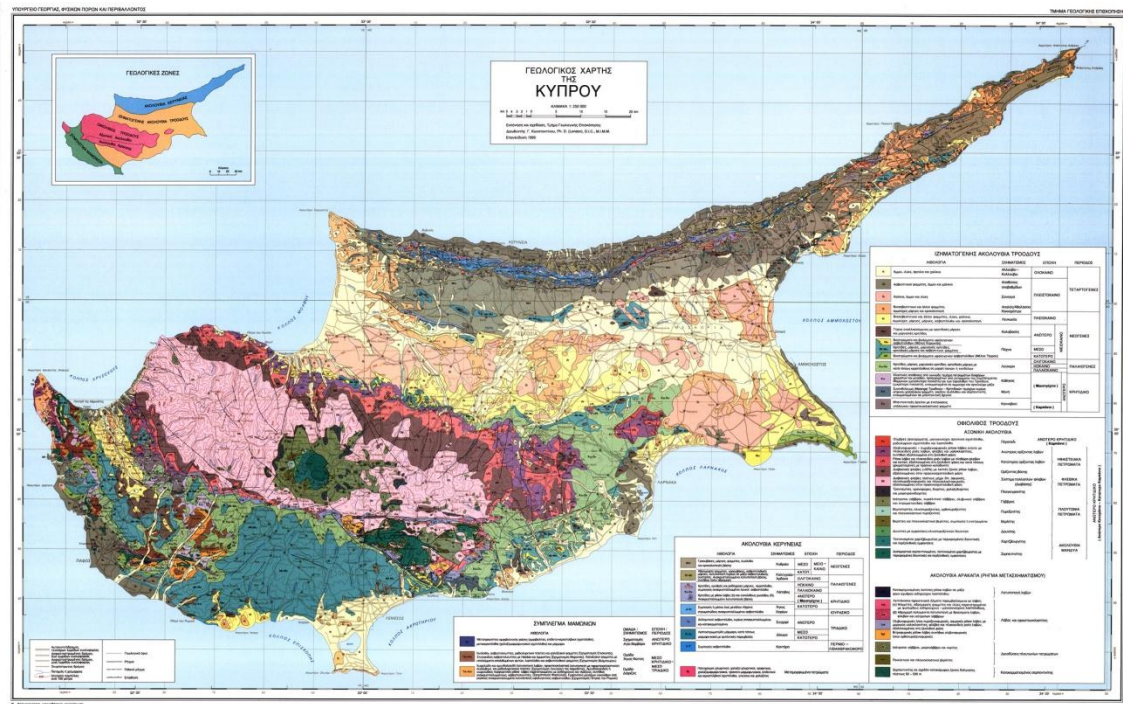
Η Κύπρος χωρίζεται σε τρεις γεωτεκτονικές ζώνες: την Οροσειρά του Τροόδους και την προέκταση της κάτω από τη Μεσαορία, τη ζώνη των Μαμωνιών και την Οροσειρά του Πενταδακτύλου, η οποία αποτελείται βασικά από αλλόχθονους σχηματισμούς (Εκπαιδευτικό Εργαλείο Κυπριακής Γεωλογικής Κληρονομιάς, 2004).

Η γεωτεκτονική ζώνη του Τροόδους υποδιαιρείται στον οφιόλιθο και στην ιζηματογενή ακολουθία. Τα πετρώματα της ζώνης αυτής καλύπτουν έκταση 8100km², από τα οποία

τα 5620 km² καλύπτονται από την ιζηματογενή ακολουθία. Οι οφιόλιθοι του Τρόδους περιβάλλονται από ασβεστολιθικές αποθέσεις, κυρίως μάργες και κρητίδες, με παρεμβολές από ασβεστολιθικές φλέβες και γύψο. Η Οροσειρά του Πενταδακτύλου στον Βορρά αποτελείται από συμπαγείς ασβεστόλιθους, δολομίτες και μάρμαρα με ασυμφωνίες από μάργες και κρητίδες. Κλαστικές αποθέσεις μεγάλου βάθους καλύπτουν αυτούς τους σχηματισμούς οι οποίοι καλύπτονται από σχηματισμούς φλύσχη μεγάλου βάθους προς το Βορρά και το Νότο. Τα πετρώματα στην περιοχή της Πάφου αποτελούνται από ιζηματογενή και οφιολιθικά πετρώματα γηραιότερα από αυτά στο Τρόδος όπως σερπεντινίτες, λάβες, κερατόλιθοι, αμφιβολίτες, άργιλο και μάρμαρα. Η πεδιάδα της Μεσαορίας ανάμεσα στα όρη Τρόδος και Πενταδάκτυλος και το παράκτιο πεδίο αποτελούνται από Τεταρτογενείς Αποθέσεις (άμμος, ιλύ, ψαμμίτες, ασβεστόλιθους και μάργες).

Ακολούθως, η γεωτεκτονική ζώνη των Μαμμωνιών έχει ηλικία από το μέσο Τριαδικό μέχρι και το ανώτερο Κρητιδικό (230-275 εκατομμύρια χρόνια) και πρόκειται για μια ξεχωριστή συγκέντρωση εκρηξιγενών, ιζηματογενών και μεταμορφωμένων πετρωμάτων με πολύπλοκη τεκτονική. Αξίζει να σημειωθεί ότι στη ζώνη αυτή παρόλο που επικρατεί έντονος τεκτονισμός διακρίνονται τρεις στρωματογραφικές σειρές και είναι οι ακόλουθες:

- Η σειρά των εκρηξιγενών και ιζηματογενών πετρωμάτων του Διαρίζου
- Η σειρά πελαγικών ιζηματογενών πετρωμάτων της ομάδας Αγίου Φωτίου
- Η σειρά των σχιστόλιθων και μαρμάρων της Αγίας Βαρβάρας



Εικόνα 3.1: Γεωλογικός Χάρτης Κύπρου (Πηγή: Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης)

3.3 Σεισμικότητα

Ο χάρτης σεισμικών δραστηριοτήτων παρουσιάζει τα επίκεντρα 674 σεισμών, οι οποίοι καταγράφηκαν στον ευρύτερο κυπριακό χώρο από το 1905 μέχρι το 1996 (χάρτης 4). Από το χάρτη μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι η Κύπρος επηρεάζεται σε μεγάλο βαθμό από τη σεισμική δραστηριότητα που παρουσιάζει η υποθαλάσσια περιοχή της Νοτιοδυτικής Κύπρου κατά μήκος του κυπριακού τόξου, δηλαδή κατά μήκος της ζώνης καταβύθισης της Αφρικάνικης λιθοσφαιρικής πλάκας κάτω από την Ευρασιατική λιθοσφαιρική πλάκα. Η περιοχή της Λεμεσού είναι η πιο σεισμογενής και έχει καταγράψει ακόμη και πρόσφατα σεισμούς έντασης 5.7 βαθμών στην κλίμακα ρίχτερ (23 Φεβρουαρίου 1995) και 6.7 βαθμών στην κλίμακα ρίχτερ (9 Οκτωβρίου 1996).

Με βάση τον χάρτη Μέγιστων Παρατηρήσεων Εντάσεων και Σεισμικών Ζωνών της Κύπρου, η περιοχή της Λεμεσού κατατάσσεται στη ζώνη 3 που είναι και η περισσότερο σεισμογενής. Η περιοχή παρουσιάζει συντελεστές μέγιστης εδαφικής επιτάχυνσης A_{max} της τάξης του 0.25 σε ποσοστό g.



Εικόνα 3.2: Χάρτης Σεισμικών Ζωνών (Πηγή: Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης)

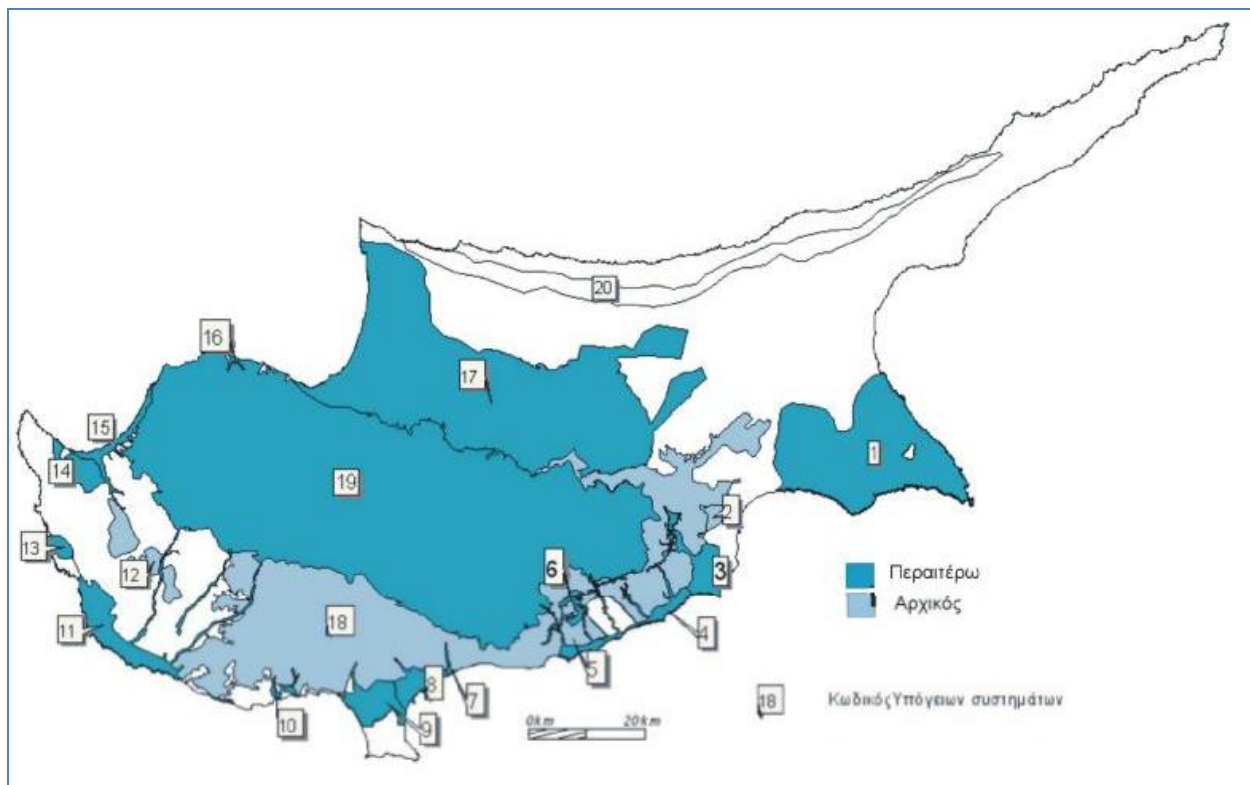
3.4 Υδρογεωλογία

Στην Κύπρο υπάρχουν τρεις κατηγορίες υδροφόρων. Στην πρώτη που είναι και η σημαντική ανήκουν οι κλαστικοί υδροφόροι που αναπτύσσονται στις Πλειστοκαινικές και σύγχρονες χειμαρρώδεις, αλλουβιακές και δελταικές αποθέσεις, καθώς και σε θαλάσσιες αναβαθμίδες. Χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιων υδροφόρων είναι οι υδροφορείς της Δυτικής και Νοτιοανατολικής Μεσαορίας, του Ακρωτηρίου και οι χειμάρριοι υδροφόροι της Πάφου. Στη δεύτερη κατηγορία ανήκουν οι καρστικοί και ψευδοκαρστικοί υδροφορείς όπως αυτοί του Πενταδακτύλου και του Μαρωνιού αντίστοιχα. Η τρίτη κατηγορία αφορά τα υδροφόρα συστήματα σε διερρηγμένα πετρώματα όπως αυτά του οφιολιθικού συμπλέγματος του Τροόδους και των κρητίδων.

Οι περισσότεροι υδροφορείς του νησιού είναι φρεάτιοι, και είναι ανεπτυγμένοι σε ποτάμια ή παράκτιες αλλουβιακές αποθέσεις. Αυτοί είναι οι μεγαλύτεροι και οι πιο δυναμικοί υδροφορείς, οι οποίοι ανατροφοδοτούνται κυρίως από τις παροχές ποταμών και τις βροχοπτώσεις. Υπάρχουν τρεις μεγάλοι παράκτιοι υδροφορείς οι οποίοι περιλαμβάνουν όλες τις κάθετες κοίτες των ποταμών. Ο σημαντικότερος είναι αυτός της Δυτικής Μεσαορίας (Μόρφου) ο οποίος αναπτύσσεται κυρίως εντός των αλλουβιακών,

ποτάμιων και δελταϊκών αποθέσεων του χειμάρρου Σερράχη. Ο δεύτερος μεγαλύτερος υδροφορέας είναι αυτός της Νότιο-Ανατολικής Μεσσαορίας- Κοκκινοχωρίων και ο τρίτος είναι αυτός του Ακρωτηρίου, ο οποίος είναι ο υπό μελέτη υδροφορέας.

Τα παράκτια τμήματα αυτών των υδροφορέων συνίστανται από άμμο, ιλύ, ασβεστόλιθους, κροκαλοπαγή πετρώματα και άργιλο. Οι κοίτες των ποταμών αποτελούνται από αλλουβιακές αποθέσεις, κροκάλες, άμμο και ιλύ. Αυτοί οι υδροφορείς είναι φρεάτιοι και έχουν βάθος γύρω στα 30 μέτρα. Εκτός από το μεγάλο αλλά όχι και τόσο παραγωγικό υδροφορέα των τροαδικών μαγματικών βράχων, οι άλλοι υδροφορείς αποτελούνται από γύψο, ψαμμίτες, ασβεστόλιθους και κρητίδες. Αυτοί οι υδροφορείς είναι κυρίως φρεάτιοι και σε κάποια τμήματα ημιπερατοί ή υπό πίεση. Αυτά τα τμήματα είναι καλυμμένα από στρώματα ιλύος και λάσπης ή από αμμώδη μάργα. Παρατηρήθηκε ότι ο υδροφορέας του όρους Τροόδους, έχει αναπτυχθεί γενικά σε οφιόλιθους χαμηλής διαπερατότητας και τοπικά σε μέτρια διαπερατές διαρρηγμένες ζώνες μαγματικών βράχων και για αυτό είναι υπό-πίεση σε κάποια τμήματα. Για τον χαρακτηρισμό των συστημάτων υπογείων υδάτων, όλοι οι υδροφορείς της Κύπρου έχουν ομαδοποιηθεί σε 20 συστήματα υπόγειων υδάτων, με βάση τη λιθολογία, τα υδραυλικά χαρακτηριστικά, τις πιέσεις και την σπουδαιότητα του κάθε υδροφορέα (Αργυρόπουλος, 2005).



Εικόνα 3.3: Χάρτης συστημάτων υπόγειων υδάτων (Πηγή: Τμήμα Αναπτύξεως Υδάτων)

3.5 Περιγραφή του Υδροφορέα Ακρωτηρίου

3.5.1 Διαχωρισμός των παράκτιων υδροφορέων - Ορισμοί

Με τον όρο υδροφορέας εννοείται ο γεωλογικός σχηματισμός, ο οποίος περιέχει νερό και επιτρέπει την κίνηση σημαντικών ποσοτήτων νερού εντός αυτού κάτω από φυσικές συνθήκες περιβάλλοντος (Bear, 1979).

Οι υπόγειοι υδροφορείς, οι γεωλογικοί σχηματισμοί οι οποίοι συγκεντρώνουν το μεγαλύτερο μέρος των εκμεταλλεύσιμων υδατικών πόρων, μπορεί να είναι χαλαροί υδροφορείς που αποτελούνται από ανεξάρτητους κόκκους είτε ρωγματωμένοι (βραχώμαζα η οποία περιέχει μεγάλο αριθμό από ρωγμές).

Ανάλογα με την ύπαρξη ελεύθερης επιφάνειας νερού οι υδροφορείς διακρίνονται σε:

- Περιορισμένους ή υπό πίεση υδροφορείς (confined or pressure aquifers). Οι περισσότεροι υδροφορείς περιορίζονται προς τα άνω και προς τα κάτω από αδιαπέρατους σχηματισμούς και δεν παρουσιάζουν ελεύθερη επιφάνεια. Η ροή σε αυτού του τύπου υδροφορείς είναι ανάλογη της ροής σε κλειστούς αγωγούς υπό πίεση. Η στάθμη του νερού που διανοίγεται είναι ψηλότερη από το επάνω όριο της στρώσης και απεικονίζει το πιεζομετρικό ύψος στο σημείο. Αξίζει να σημειωθεί ότι εάν το πιεζομετρικό ύψος είναι ψηλότερα από την επιφάνεια του εδάφους τότε ο υδροφορέας χαρακτηρίζεται ως αρτεσιανός. Η τροφοδότηση ενός περιορισμένου υδροφορέα γίνεται από κάποια περιοχή κοντά στα όρια που παρουσιάζει ελεύθερη επιφάνεια και δέχεται νερά της βροχής.
- Φρεάτιους ή μη περιορισμένους υδροφορείς (phreatic or unconfined aquifers). Οι φρεάτιοι υδροφορείς περιορίζονται προς τα κάτω από αδιαπέρατη στρώση και προς τα πάνω τα υπόγεια νερά έχουν ελεύθερη επιφάνεια. Η τροφοδότηση τους γίνεται απ' ευθείας από την επιφάνεια του εδάφους μέσω του φρεάτιου ορίζοντα, εκτός και αν υπάρχει από πάνω άλλη αδιαπέρατη στρώση.

Αυτά τα 20 συστήματα υπόγειων υδάτων της Κύπρου, με βάση τα προαναφερθέντα, διακρίνονται στον πιο κάτω πίνακα :

Πίνακας 3.1: Διαχωρισμός Υπόγειων υδροφορέων της Κύπρου (Πηγή :Τ.Α.Υ)

Κωδικός	Όνομα	Τύπος υδροφορέα
1	Κοκκινοχώρια	Φρεάτιος-ημιπερατός σε τμήματα
2	Γύψοι Αραδίππου	Φρεάτιος-Ημιπερατός
3	Κίτι Περιβόλια –κοίτη ποταμού Τρέμινθος	Φρεάτιος
4	Παράκτιο πεδίο και κοίτες Σοφτάδες – Ζύγι	Φρεάτιος
5	Γύψοι Μαρώνι	Υπό πίεση
6	Κρητίδες Μαρί-Καλό Χωριό και ψαμμίτες Χοιροκοιτίας	Ημιπερατός/φρεάτιος
7	Κοίτη ποταμού Γερμασόγειας	Φρεάτιος
8	Λεμεσός	Φρεάτιος
9	Ακρωτήρι	Φρεάτιος
10	Παραμάλι και Αυδήμου	Φρεάτιος
11	Παράκτιο πεδίο και κοίτες Πάφου	Φρεάτιος σε τμήματα ημιπερατός
12	Γύψοι Λετύμβου Γιόλου	Φρεάτιος έως ημιπερατός
13	Ασβεστόλιθοι Πέγειας	Φρεάτιος έως ημιπερατός
14	Ασβεστόλιθοι Ανδρολίκου	Φρεάτιος έως ημιπερατός
15	Παράκτιο πεδίο και κοίτες Χρυσοχούς -Γιαλιά	Φρεάτιος, ημιπερατός σε τμήματα
16	Πύργος	Φρεάτιος
17	Κεντρική και δυτική Μεσαορία	Φρεάτιος / ημιπερατός / υπό πίεση
18	Σχηματισμοί Λεύκαρα - Πάχνα	Υπό πίεση / ημιπερατός/ φρεάτιος
19	Περιοχή Τρόοδες	Υπό πίεση / φρεάτιος / ημιπερατός

3.5.2 Οριοθέτηση του υδροφορέα Ακρωτηρίου

Από αυτούς τους είκοσι υπόγειους υδροφορείς, θα ασχοληθούμε με τον Υδροφορέα Ακρωτηρίου, ο οποίος είναι ο τρίτος μεγαλύτερος υδροφορέας του νησιού μας, που δυστυχώς, όπως συνέβη και με μερικούς άλλους, έχει αντληθεί σε υπερβολικό βαθμό, καθιστώντας την επαναφορά του στα φυσιολογικά επίπεδα πολύ δύσκολη .

Ο υδροφορέας Ακρωτηρίου αναπτύσσεται κυρίως σε θαλάσσιες και ποτάμιες αλλουβιακές αποθέσεις που έχουν δημιουργηθεί στην Πλειόκαινο, Πλειστόκαινο και Ολόκαινο εποχή. Οι αποθέσεις αυτές αποτελούνται από άμμους, χαλίκια, ψαμμίτες, ιλύες και μάργες και όλους τους μεταξύ τους χαρακτηρισμούς . Ο υδροφορέας χωρίζεται σε δύο περιοχές, την ανατολική και τη δυτική. Η δυτική περιοχή εκτείνεται από την περιοχή του Αγίου Ερμογένη (Κούριο) μέχρι το Τραχώνι και λίγο Δυτικότερα της κοινότητας Ασωμάτου. Η ανατολική περιοχή αρχίζει περίπου από το νέο λιμάνι Λεμεσού και φτάνει μέχρι το Τραχώνι. Ο διαχωρισμός του υδροφορέα δεν είναι μόνο γεωγραφικός αλλά και υδρογεωλογικός. Η δυτική περιοχή αφενός δημιουργήθηκε με αποθέσεις του ποταμού Κούρη και αφετέρου ένα μεγάλο μέρος του εμπλουτισμού της εξαρτάται από τον ποταμό αυτό. Η ανατολική περιοχή δημιουργήθηκε σε κάποιο βαθμό με αποθέσεις του ποταμού Γαρύλλη και εμπλουτίζεται μερικώς από τον ποταμό αυτό και άλλους μικρούς χείμαρρους της περιοχής .

Δυτικά – βορειοδυτικά της Αλυκής σχηματίζονται τα λεγόμενα Έλη Φασουρίου ή το λιβάδι Ακρωτηρίου, ένας πολύ σημαντικός υδροβιότοπος για την Κύπρο. Τα έλη αυτά έχουν υδραυλική επικοινωνία με τον υδροφορέα που τους επιτρέπει να τροφοδοτούνται με υπόγειο νερό και να σχηματίζουν λίμνες. Η στάθμη του νερού στα έλη είναι βασικά η στάθμη του υπόγειου νερού στην περιοχή που αποτελεί την επιφανειακή εμφάνιση του υπόγειου νερού. Η στάθμη και η διακύμανση της στις γεωτρήσεις γύρω από τα έλη και στα ίδια τα έλη συμπίπτουν, γεγονός που επιβεβαιώνει την άμεση σύνδεσή τους .

Το νότιο σύνορο του υδροφορέα σχηματίζεται από την ακτογραμμή των κόλπων Επισκοπής και Λεμεσού και την βόρεια όχθη της Αλυκής. Ανατολικά ο υδροφορέας συνορεύει με τον υδροφορέα Λεμεσού. Το σύνορο αυτό είναι τεχνητό και αποφασίστηκε για πρακτικούς λόγους περισσότερο. Ο υδροφορέας Λεμεσού αποτελεί συνέχεια του

υδροφορέα Ακρωτηρίου. Το όριο είναι μια τεχνητή γραμμή που την δεδομένη στιγμή αποτελούσε ένα σύνορο μη ροής, κάθετη με τις πιεζομετρικές γραμμές (Νικολαΐδης, 2010).



Εικόνα 3.4: Παράκτιος υδροφορέας Ακρωτηρίου

3.5.3 Εκτίμηση πάχους του υδροφορέα

Η μέτρηση του πάχους του υδροφορέα είναι πρωταρχικής σημασίας. Ο υπό εξέταση υδροφορέας Ακρωτηρίου είναι φρεάτιος και μπορεί να θεωρηθεί ως οροφή του η επιφάνεια του εδάφους. Με βάση τις έρευνες που έχουν γίνει με θέμα τον υδροφορέα Ακρωτηρίου των Νικολαΐδη (2010) και Koussis et al (2010), θεωρείται για την παρούσα μελέτη ότι το πάχος του υδροφορέα ανέρχεται σε 50 μέτρα. Τέλος, το αδιαπέρατο δάπεδο του υδροφορέα σχηματίζεται από μάργες, κρητίδες και μαργαϊκές κρητίδες των σχηματισμών Πάχνας και Αθαλάσας.

3.5.4 Στοιχεία γεωτρήσεων άντλησης

Σήμερα μεγάλο μέρος των αναγκών άρδευσης καλύπτεται με τριτοβάθμια επεξεργασμένα λύματα της Λεμεσού. Η μέση άντληση για άρδευση την περίοδο αυτή ανέρχεται περίπου στα $1,5 \cdot 10^6$ m³/έτος . Ο κύριος όγκος άντλησης προορίζεται για την ύδρευση και τη βιομηχανία και ο μέσος όρος της την τελευταία δεκαετία ανέρχεται στα $8,1 \cdot 10^6$ m³/έτος. Τις προηγούμενες δεκαετίες σε περιόδους ολιγομβρίας, η συνολική άντληση έφτασε μέχρι τα $20 \cdot 10^6$ m³/έτος. Η μέση άντληση ανερχόταν στα $14 \cdot 10^6$ m³/έτος με $15 \cdot 10^6$ m³/έτος.

Στον υδροφορέα υπάρχουν περίπου 400 αδειούχες γεωτρήσεις που ένα μεγάλο ποσοστό τους είτε αντλεί, είτε μπορεί να αντλήσει εάν τους παραχωρηθεί η σχετική άδεια. Σε αυτές περιλαμβάνονται οι γεωτρήσεις άρδευσης και ύδρευσης/βιομηχανίας. Μέχρι και σήμερα λειτουργούν περιοδικά γεωτρήσεις ύδρευσης των Αγγλικών Βάσεων των κοινοτήτων Ύψωνα-Πολεμιδιών, Ερήμης-Κολοσσίου, Τραχωνίου, Ασωμάτου και Επισκοπής. Οι γεωτρήσεις αυτές πλην αυτών της Επισκοπής, βρίσκονται μέσα στην παλαιοκοίτη του Κούρη, ανατολικά του λόφου της Παναγίας της Βουναρκώτησας.

3.5.5 Στοιχεία τεχνητού εμπλουτισμού

Ο τεχνητός εμπλουτισμός των υδροφορέων στοχεύει κυρίως στην αποθήκευση πλεονασμάτων επιφανειακών νερών, στην ενίσχυση των αποθεμάτων νερού και στην προστασία τους από την υπεράντληση ή ρύπανση, που πολλές φορές οφείλεται στη διείσδυση θαλάσσιου νερού σε παράκτιους υδροφορείς.

Στο Ακρωτήρι υφιστάμενες κυβερνητικές γεωτρήσεις που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για εμπλουτισμό, βρίσκονται στην περιοχή του Δέλτα του Κούρη. Οι γεωτρήσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε μόνο για εμπλουτισμό και περιοδική άντληση για αποκατάσταση της απόδοσής τους, είτε να έχουν διπλό ρόλο. Κατά την περίοδο της μέγιστης παροχής ανακυκλωμένου νερού για εμπλουτισμό, οι γεωτρήσεις πρέπει να χρησιμοποιούνται για εμπλουτισμό. Κατά την περίοδο της μέγιστης ζήτησης

για άρδευση, οι γεωτρήσεις να χρησιμοποιούνται για σκοπούς άντλησης και παροχής νερού για άρδευση. Ο αγωγός στον οποίο συνδέονται οι γεωτρήσεις μπορεί να χρησιμοποιείται είτε για σκοπούς εμπλουτισμού, είτε για σκοπούς μεταφοράς του νερού που αντλείται από τις γεωτρήσεις.

Ανατολικά του Δέλτα δεν υπάρχουν κυβερνητικές γεωτρήσεις που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για σκοπούς τεχνητού εμπλουτισμού με το ανακυκλωμένο νερό. Θα πρέπει να ανορυχθούν νέες και αυτό παρουσιάζει μια σειρά από προβλήματα. Επίσης, αρχίζουν τα μεγάλα αγροκτήματα (Φασσούρι, Λανίτης κλπ) όπου οι δρόμοι μέσα στα αγροκτήματα που οδηγούν στις φυτείες είναι ιδιωτικοί. Δεν υπάρχει κυβερνητική γη για τοποθέτηση γεωτρήσεων εκτός από μερικούς κύριους δρόμους που διασχίζουν την περιοχή. Για ανόρυξη εμπλουτιστικών γεωτρήσεων θα πρέπει να απαλλοτριωθεί γη ή τα αγροκτήματα να δεσμευτούν για μακροχρόνια παραχώρηση της γης, γεγονός που θεωρείται δύσκολο. Όσο η περιοχή απομακρύνεται από το Δέλτα προς την ανατολή, οι ηθολογικές συνθήκες στον υδροφορέα γίνονται όλο και πιο δυσμενείς για σκοπούς εμπλουτισμού μέσω γεωτρήσεων. Οι αποθέσεις γίνονται όλο και πιο λεπτόκοκκες και τα στρώματα χονδρόκοκκων υλικών γίνονται όλο και πιο σπάνια.

3.5.6 Υδραυλική αγωγιμότητα του υδροφορέα Ακρωτηρίου

Υδραυλική Αγωγιμότητα (Hydraulic Conductivity), ονομάζουμε την ευκολία ή δυσκολία με την οποία ένα ρευστό, στην παρούσα περίπτωση το νερό, ρέει μέσα στους πόρους ενός πορώδους μέσου (Νάνου, 2006). Μετριέται σε μονάδες ταχύτητας και εξαρτάται από τη φύση του πορώδους μέσου και τις διαστάσεις των πόρων αλλά και από τις ιδιότητες του ρευστού. Ένα μέσο έχει υδραυλική αγωγιμότητα ίση με τη μονάδα, όταν μεταβιβάζει στη μονάδα του χρόνου κάθετα στη διεύθυνση της υπόγειας ροής, τη μονάδα όγκου νερού από μοναδιαία διατομή με υδραυλική κλίση ίση με τη μονάδα και την επικράτηση του κινηματικού ιξώδους. Το κινηματικό ιξώδες σχετίζεται με την εσωτερική τριβή, την αντίσταση δηλαδή του υγρού στη ροή.

Ο υδροφορέας Ακρωτηρίου αναπτύσσεται σε αλλουβιακές αποθέσεις που αποτελούνται από άμμους, χαλίκια, ψαμμίτες, ιλύες και μάργες. Η υδραυλική αγωγιμότητα των παραπάνω σχηματισμών ορίζεται ως εξής:

Code:	Thickness_mean (m)	Hydraulic conductivity_mean (m/day)
CY009-Ακρωτήρι	50	3.00E+01

Πίνακας 3.2: Υδραυλική Αγωγιμότητα του υδροφορέα Ακρωτηρίου (Πηγή : Τ.Α.Υ)

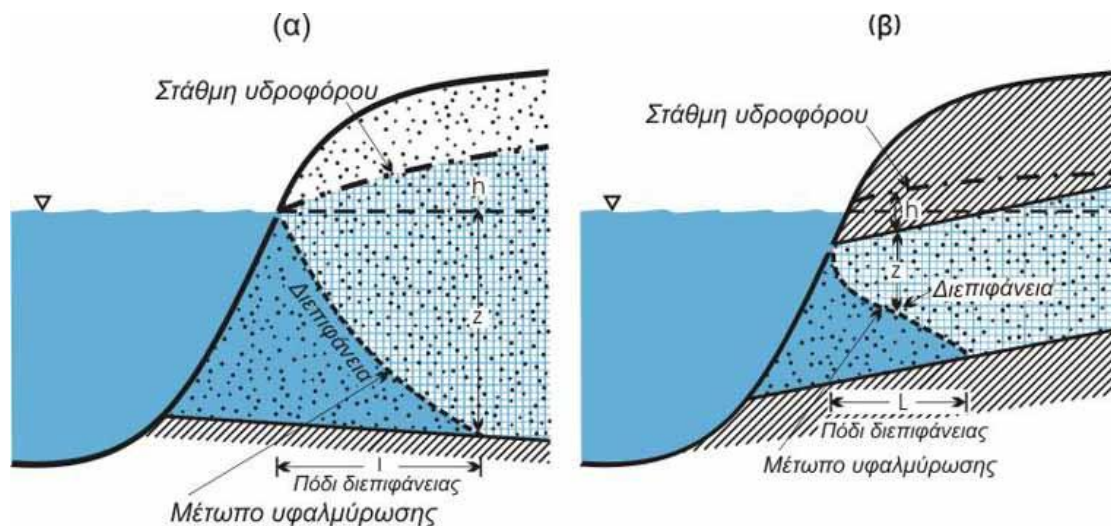
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΑΡΑΚΤΙΟΙ ΥΔΡΟΦΟΡΕΙΣ

4. ΠΑΡΑΚΤΙΟΙ ΥΔΡΟΦΟΡΕΙΣ

4.1 Υφαλμύριση Παράκτιων Υδροφορέων

Η ανάγκη για νερό στις παράκτιες περιοχές αυξάνεται συνεχώς λόγω της βελτίωσης του βιοτικού επιπέδου και της μεγάλης αύξησης του πληθυσμού κατά τους θερινούς μήνες εξαιτίας του τουρισμού. Οι αντλήσεις των υδροφορέων κατά τους θερινούς μήνες είναι εντατικές με αποτέλεσμα την υφαλμύρωση των παράκτιων υδροφορέων. Η τροφοδοσία των υδροφορέων μεταβάλλεται σχετικά με τις βροχοπτώσεις και σε περιόδους παρατεταμένης ξηρασίας δεν επαρκεί για την επαναπλήρωσή τους.

Η αποκατάσταση των παράκτιων υδροφορέων πρέπει να αποτελεί σημαντικό μέρος μίας ολοκληρωμένης διαχείρισης των υδατικών πόρων της παράκτιας περιοχής που περιλαμβάνει τα υπόγεια και επιφανειακά νερά λαμβάνοντας υπόψη τη διαρκή αύξηση των αναγκών, ειδικά κατά του μήνες του καλοκαιριού. Η διαχείριση αυτή χρειάζεται επιστημονική έρευνα, ανάλυση και καλή πληροφόρηση και συνεργασία μεταξύ φορέων αλλά και πληθυσμού (Μαντόγλου και Γιαννουλόπουλος, 2001).



Εικόνα 4.1: Ζώνη Διεπιφάνειας- α) σε ελεύθερο και β) σε υπό πίεση υδροφόρο στρώμα (Πηγή: Σούλιους, 2004)

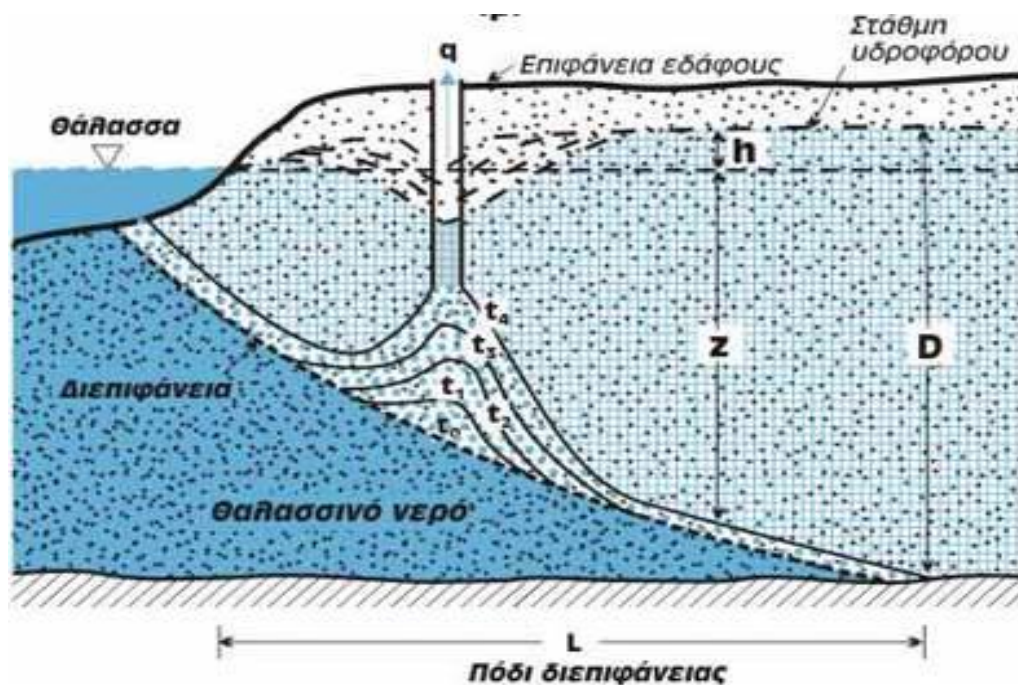
Στους παράκτιους υδροφορείς, το γλυκό νερό έρχεται σε επαφή με το θαλασσινό νερό που έχει μεγαλύτερη πυκνότητα λόγω των ιόντων χλωρίου. Το θαλασσινό νερό διεισδύει κάτω από το γλυκό νερό σχηματίζοντας έτσι μια σφήνα. Λόγω της διαφοράς πυκνότητας του γλυκού νερού με το αλμυρό, δημιουργείται μεταβατική ζώνη μεταβαλλόμενης πυκνότητας που χαρακτηρίζεται ως διεπιφάνεια. Η διεπιφάνεια αυτή γλυκού - αλμυρού νερού (fresh-salt water interface) έχει τη μορφή μια κυρτής καμπύλης που σχηματίζεται λόγω της αλάτινης σφήνας και της ροής του γλυκού νερού.

Χαρακτηριστικά στοιχεία είναι το χείλος που ορίζεται ως το σημείο τομής της διεπιφάνειας με τον πυθμένα του υδροφορέα και το πόδι της αλάτινης σφήνας. Επίσης, κατά την απουσία άντλησης η διεπιφάνεια παραμένει ακίνητη. Αντίθετα, σε περίπτωση αυξημένης άντλησης παρατηρείται πτώση του πιεζομετρικού φορτίου, καθώς και κίνηση της διεπιφάνειας στο εσωτερικό μέχρι την επίτευξη της κατάστασης ισορροπίας.

Η παρουσία του γλυκού και υφάλμυρου νερού στους υδροφορείς καλείται «υφαλμύρωση υπόγειων υδροφορέων» και οφείλεται σε κλιματικές αλλαγές και άνοδο της στάθμης της θάλασσας. Ο κυριότερος λόγος υπεράντλησης των παράκτιων υδροφορέων είναι οι αυξημένες ανάγκες σε πόσιμο νερό, όπου ο ρυθμός άντλησης υπερβαίνει το ρυθμό φυσικής επαναφόρτισης του υδροφορέα και παρατηρείται διείσδυση του θαλασσινού νερού. Η συνεχής διείσδυση οδηγεί στην υποβάθμιση της ποιότητα του γλυκού νερού και καθιστά το νερό ακατάλληλο για χρήση. Το φαινόμενο αυτό δεν είναι αναστρέψιμο.

Τα μοντέλα προσομοίωσης χωρίζονται σε δύο ξεχωριστές κατηγορίες. Η πρώτη είναι βασισμένη στη θεώρηση της διεπιφάνειας πεπερασμένου πάχους λόγω της ύπαρξης υδροδυναμικής διασποράς στην οποία υπάρχουν δύο αναμίξιμα υγρά, το αλμυρό νερό της θάλασσας και το καθαρό νερό του υδροφορέα. Οι διαφορικές εξισώσεις που χρησιμοποιούνται είναι πολύπλοκες καθώς επίσης οι παράμετροι διασποράς του άλατος που απαιτούνται λόγω της πολυπλοκότητας των υδροφορέων είναι δύσκολο να επικυρωθούν. Σε αντίθεση με την πρώτη κατηγορία, η δεύτερη βασίζεται στη θεώρηση απότομης διεπιφάνειας στην οποία επικρατούν δύο μη αναμίξιμα υγρά και οι εξισώσεις γίνονται απλούστερες. Αξίζει να σημειωθεί ότι σε περιοχές όπου το πραγματικό πάχος της διεπιφάνειας είναι μικρότερο σε σύγκριση με το πάχος του υδροφορέα, η προσέγγιση της απότομης διεπιφάνειας δίνει με πληρότητα τα αποτελέσματα.

Σε κατάσταση φυσικής ισορροπίας όπου υπάρχει απουσία άντλησης, η διεπιφάνεια παραμένει ακίνητη. Η αυξημένη άντληση σε βαθμό όπου η φυσική επαναπλήρωση δεν οδηγεί στην αποκατάσταση του υδροφορέα, έχει ως αποτέλεσμα την πτώση του πιεζομετρικού φορτίου και την κίνηση της διεπιφάνειας προς το εσωτερικό, ούτως ώστε να επιτευχθεί νέα κατάσταση ισορροπίας. Οι τιμές του πιεζομετρικού φορτίου καθορίζουν την ποσότητα του γλυκού νερού που εξέρχεται στη θάλασσα και του αλμυρού που εισέρχεται στον υδροφορέα. Σε περίπτωση που μια υδρογεώτρηση βρίσκεται πάνω από τη διεπιφάνεια, τότε διαμορφώνεται ένας κώνος άντλησης γύρω από αυτή. Όταν ο ρυθμός και η παροχή άντλησης δεν ελέγχονται, το αλμυρό θαλασσινό νερό εισέρχεται σε αυτή θεωρώντας ότι είναι «ρυπασμένη» λόγω του ότι αντλείται υφάλμυρο νερό.



Εικόνα 4.2: Κώνος άντλησης γύρω από την γεώτρηση (Πηγή:Σούλιους,2004)

4.2 Πολυπλοκότητα της Υφαλμύρωσης των παράκτιων υδροφορέων

Υδρογεωλόγοι και μηχανικοί αναγνωρίζουν το πρόβλημα στις περισσότερες περιπτώσεις αλλά η ποσοτικοποίηση του είναι δύσκολη λόγω έλλειψης στοιχείων. Προβλήματα υφαλμύρωσης παρατηρούνται σε περιφερειακή κλίμακα όπου επηρεάζονται μεγαλύτερες εκτάσεις από διάφορες ανθρώπινες δραστηριότητες ή σε τοπική κλίμακα όπου η επίδραση εστιάζεται στην διεπιφάνεια του αλμυρού- γλυκού νερού.

Τα προβλήματα υφαλμύρωσης οφείλονται στην ύπαρξη δύο φάσεων ρευστών και μιας ευρείας ζώνης ανάμιξης μεταξύ των δύο υγρών φάσεων. Επίσης, οφείλονται σε ένα άλλο παράγοντα όπου η κίνηση και η διασπορά του ενός ρευστού στο άλλο εξαρτάται από την πυκνότητα των ρευστών στη ζώνη υφαλμύρωσης η οποία εξαρτάται από τις συνθήκες ροής (Μαντόγλου και Γιαννουλόπουλος, 2004).

Τέλος, η περιγραφή του φυσικού φαινομένου περιπλέκεται λόγω της ανομοιογένειας των υδραυλικών παραμέτρων του υδροφορέα. Στους καρστικούς υδροφορείς η ανάμιξη του γλυκού και αλμυρού νερού είναι διαφορετικής φύσης από αυτή σε ομοιογενείς πορώδεις υδροφορείς. Η ροή σε αυτού του τύπου υδροφορείς δεν ακολουθεί το Νόμο του Darcy αφού γίνεται σε κοιλότητες και ανοίγματα που είναι μεγάλων διαστάσεων.

4.3 Επιπτώσεις της υφαλμύρωσης

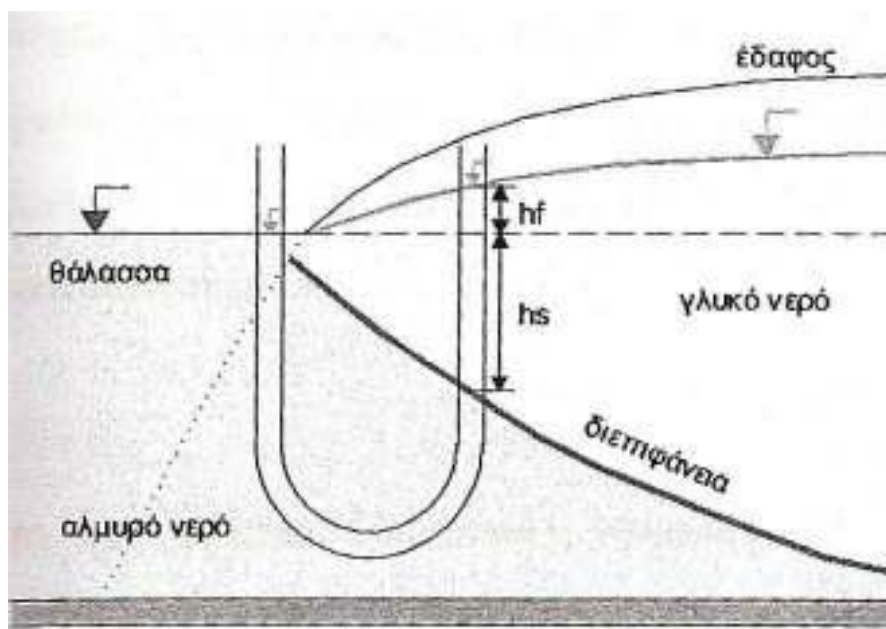
Οι επιπτώσεις της υφαλμύρωσης είναι μεγάλης σημασίας αφού το υφάλμυρο νερό είναι ακατάλληλο για άρδευση και ύδρευση αλλά και για την υγεία των καταναλωτών. Στις περιοχές που καλύπτονται από υπόγεια νερά και οι υδρευτικές απαιτήσεις είναι αυξημένες, το φαινόμενο της ποιοτικής υποβάθμισης των υδροφορέων καθιστά προβληματική την ύδρευση. Αυτό οδηγεί στην αύξηση του κόστους ζωής λόγω δαπανηρών λύσεων πχ εμφιαλωμένο νερό.

Από αρδευτικής άποψης, τα προβλήματα είναι αρκετά λόγω έλλειψης επαρκούς ποσότητας νερού και υποδομής αρδευτικής ανάπτυξης. Αυτό οδηγεί στην ελλειμματική άρδευση και κάλυψη των αρδευτικών αναγκών με υφάλμυρο νερό και έτσι αυξάνεται η αλατότητα των εδαφών. Το γεγονός αυτό ευθύνεται για τη μείωση της δυναμικότητάς τους, την αύξηση του κόστους των παραγόμενων προϊόντων και τη μείωση αριθμού των πωλήσεων. Η μείωση της παραγωγικότητας των εδαφών οδηγεί τους καλλιεργητές να

χρησιμοποιούν περισσότερο νερό και δραστικότερα λιπάσματα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των εξόδων και μείωση του εισοδήματός τους καθώς επίσης και μεγαλύτερη συρρίκνωση της καλλιεργούμενης γης, 15%. Επιπλέον οδηγεί στην επικράτηση εποχικού χαρακτήρα απασχόλησης. Τέλος, προβλήματα προκαλούνται στις περιπτώσεις όπου στα δίκτυα μεταφοράς το νερό είναι υφάλμυρο λόγω της μεγάλης διαβρωτικής ικανότητας. Αυτό έχει ως επακόλουθο τη μείωση του χρόνου ζωής τους, αύξηση των απωλειών λόγω διαρροής και αύξηση του λειτουργικού κόστους συντήρησης του δικτύου και βαθμού διαθεσιμότητάς του.

4.4 Προσέγγιση Ghyben-Herzberg

Η πρώτη εξίσωση που αναλύει και δείχνει την αλληλεπίδραση του γλυκού-αλμυρού νερού διατυπώθηκε από τους Badon Ghyben (1888) και Herzberg (1901) οι οποίοι ανεξάρτητα μεταξύ τους προσπάθησαν να προσδιορίσουν τη σχέση μεταξύ του σχήματος και της θέσης της διεπιφάνειας από τη μια πλευρά και των διαφόρων παραμέτρων των υπογείων νερών σε παράκτιες περιοχές από την άλλη.



Εικόνα 4.3: Προσέγγιση Ghyben-Herzberg (Πηγή: Βογιατζή, 2007)

Οι πιο πάνω μελετητές κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η στάθμη του θαλάσσιου νερού στο έδαφος δεν βρίσκεται στο επίπεδο της θάλασσας, αλλά κάτω από αυτό 40 φορές της διαφοράς στάθμης του γλυκού νερού από το επίπεδο της θάλασσας. Η σχέση προκύπτει από την υδροστατική ισορροπία μεταξύ του αλμυρού και γλυκού νερού. Η αλάτινη σφήνα θεωρείται ακίνητη, η πίεση στη διεπιφάνεια είναι κοινή και για τις δύο περιοχές και θεωρείται ότι ισχύει η παραδοχή *Dupuit*. Ορίζοντας h_f το ύψος του γλυκού νερού πάνω από τη στάθμη της θάλασσας, h_s τη θέση της διεπιφάνειας αλμυρού-γλυκού νερού κάτω από αυτή, γ_f , γ_s τα ειδικά βάρη γλυκού-αλμυρού νερού αντίστοιχα και δ το λόγο $\gamma_f / (\gamma_s - \gamma_f)$, ισχύει:

$$\left. \begin{aligned} h_s &= \frac{\gamma_f}{\gamma_s - \gamma_f} h_f \equiv \delta h_f \\ h_s &= \frac{P}{\rho_s g} + z \quad \text{και} \quad h_f = \frac{P}{\rho_f g} + z \end{aligned} \right\} \quad (4.1)$$

Οι πυκνότητες ρ_s και ρ_f του αλμυρού και γλυκού νερού αντίστοιχα λαμβάνονται με τις τιμές $\rho_s = 1,025 \text{ gr/cm}^3$ και $\rho_f = 1 \text{ gr/cm}^3$. Με βάση τα παραπάνω υπολογίζεται ότι $h_s = 40h_f$. Η εξίσωση αυτή είναι γνωστή ως εξίσωση **Ghyben-Herzberg**, η οποία σχετίζει το σχήμα και τη θέση της διεπιφάνειας με υδρολογικές παραμέτρους του υπόγειου νερού. Η εξίσωση αυτή βασίζεται στην υδροστατική ισορροπία μεταξύ των δύο υγρών. Η σχέση αυτή χρησιμοποιείται ως βάση για τον υπολογισμό της κίνησης της διεπιφάνειας, παρόλο που βασίζεται σε *υπεραπλουστευμένες* παραδοχές.

Οι παραδοχές στις οποίες βασίζεται η θεωρία είναι:

- Η διεπιφάνεια είναι ακίνητη.
- Η πίεση είναι κοινή και για τις δύο περιοχές.
- Η ροή θεωρείται οριζόντια (παραδοχή *Dupuit*).
- Το πάχος της ζώνης του γλυκού νερού είναι μηδέν στο σημείο εκροής.

Η εξίσωση Ghyben-Herzberg επιτρέπει την εύρεση της θέσης της διεπιφάνειας αλμυρού-γλυκού νερού ως ακολούθως:

- Παρατηρήσεις από φρέατα της περιοχής όπου και κατασκευάζεται ο πιεζομετρικός χάρτης του υδροφορέα για το γλυκό νερό
- Τα πιθανά βάθη της διεπιφάνειας τα οποία υπολογίζονται από την εξίσωση, οπότε ισχύει ο ίδιος πιεζομετρικός χάρτης πολλαπλασιασμένος με διαφορετικό συντελεστή
- Από τη γεωλογική μελέτη η οποία είναι γνωστή ως η θέση του πυθμένα του υδροφορέα
- Η τομή των δύο επιφανειών, της διεπιφάνειας του αλμυρού-γλυκού νερού και της βάσης του υδροφορέα, αποτελώντας το πόδι της αλάτινης σφήνας
- Η μέθοδος μπορεί να εφαρμοστεί για περιορισμένους και φρεάτιους υδροφορείς

Σύμφωνα με την Νάνου Α. (2006), η προσέγγιση αυτή δεν απεικονίζει την πραγματική εικόνα της διεπιφάνειας με βάση τα παρακάτω σημεία:

- Δεν ισχύει η παραδοχή της οριζόντιας ροής, διότι υπάρχουν σημαντικές κατακόρυφες συνιστώσες ταχυτήτων.
- Δεν επιτρέπει τον υπολογισμό της επιφάνειας από την οποία γίνεται η διέξοδος του γλυκού νερού προς τη θάλασσα.
- Η διεπιφάνεια δεν είναι ακίνητη όμως κινείται προς το εσωτερικό του υδροφορέα
- Η προσέγγιση αυτή δεν μπορεί να προβλέψει την επιφάνεια διήθησης στην περίπτωση φρεάτιων υδροφορέων.

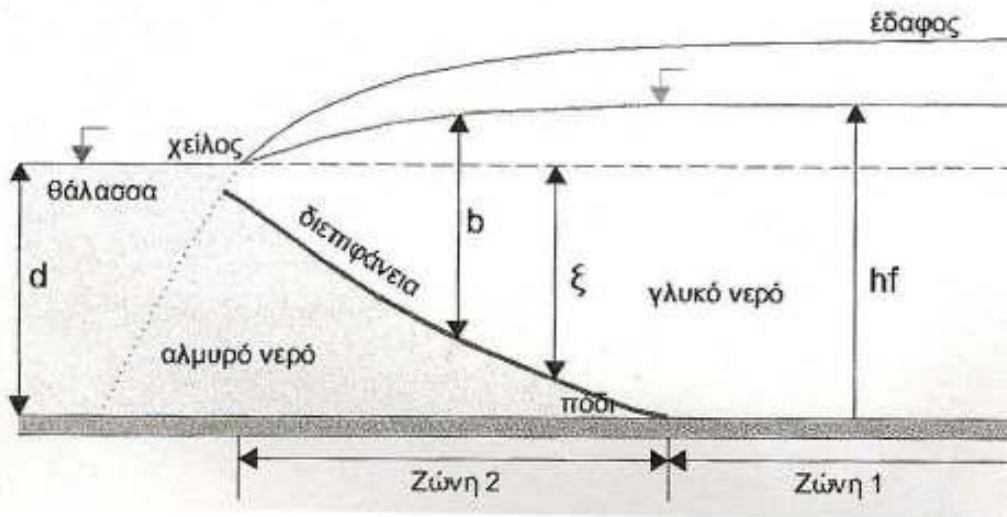
Τέλος, παρ' όλες τις ελλείψεις, η σχέση Ghyben-Herzberg αποτελεί ένα σημαντικό εργαλείο.

4.5 Ανάλυση κατά Strack

Το γενικό πρόβλημα της κίνησης υπογείων υδάτων σε παράκτιους υδροφορείς είναι πολύπλοκο απαιτώντας πάρα πολλές παραμέτρους που δεν είναι δυνατόν να καθοριστούν εξαιτίας της ανομοιογένειας τους στο χώρο. Επομένως, κρίνεται απαραίτητη η απλοποίηση του προβλήματος και η υιοθέτηση των κατάλληλων παραδοχών ώστε να βγουν ορθά συμπεράσματα με βάση τα υπάρχοντα κάθε φορά δεδομένα (Strack 1976, Bear 1979, Cheng & Quazar 1999, Cheng et al. 2000):

- Παραδοχή της απότομης διεπιφάνειας ή αλλιώς του ευδιάκριτου ορίου (sharp interface), θεωρώντας ότι το μέτωπο αλμυρού νερού έχει πρακτικά σταθεροποιηθεί και δε μετακινείται.
- Παραδοχή μόνιμης ροής (steady state) όπου η αποθηκευτικότητα του υδροφορέα αγνοείται.
- Παραδοχή οριζόντιας ροής για το γλυκό νερό ενώ στη ζώνη 2, το θαλασσινό θεωρείται ακίνητο.
- Χρησιμοποιείται η σχέση των Ghyben-Herzberg για τον υπολογισμό της μορφής της διεπιφάνειας.
- Ο υδροφορέας είναι ισότροπος και ομογενής με οριζόντιο αδιαπερατό πυθμένα.

Με βάση τους Ghyben-Herzberg, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι ένας υδροφορέας είτε είναι φρεάτιος, είτε περιορισμένος, χωρίζεται σε δύο ζώνες. Η μια ζώνη αφορά το τμήμα στο εσωτερικό του υδροφορέα που καλύπτεται από γλυκό νερό, ενώ στη δεύτερη ζώνη, στο εξωτερικό του υδροφορέα, το γλυκό νερό βρίσκεται πάνω από το αλμυρό λόγω της διαφοράς στην πυκνότητα. Επομένως, ως αποτέλεσμα υπάρχει πρόβλημα της υφαλμύρωσης που γίνεται αντιληπτό στη δεύτερη ζώνη. Λόγω της υπεράντλησης, το θαλασσινό νερό αρχίζει να εισχωρεί στο εσωτερικό του υδροφορέα.



Εικόνα 4.4: Ζώνες φρεάτιου υδροφορέα, όπως αυτές χωρίζονται από τη διεπιφάνεια αλμυρού και γλυκού νερού.

Ο Strack (1976) εφάρμοσε την έννοια ενιαίου δυναμικού ϕ και για τις δύο ζώνες. Για το σχηματισμό της ενιαίας εξίσωσης υιοθετείται η παραδοχή Dupuit για την περίπτωση της ροής του γλυκού νερού και χρησιμοποιείται η σχέση Ghyben-Herzberg για τον προσδιορισμό του βάθους της διεπιφάνειας. Το φορτίο του γλυκού νερού εκφράζεται έτσι συναρτήσει των οριζόντιων συντεταγμένων, $h_f - h_f(x, y)$. Λαμβάνοντας υπόψη ότι ο υδροφορέας είναι ομογενής, μπορεί να προκύψει μια εξίσωση που να ισχύει και στις δυο ζώνες, σε περιορισμένους και ελεύθερους υδροφόρους.

$$\nabla \cdot (b \nabla h_f) = 0 \quad (4.2)$$

Όπου b είναι το πάχος του ανώτερου στρώματος με γλυκό νερό, το οποίο εξαρτάται από τη θέση $b = b(x, y)$.

Το πάχος του ανώτερου στρώματος b διαφοροποιείται ανάλογα με τη ζώνη και τον τύπο του υδροφορέα.

Για έναν φρεάτιο υδροφορέα, όπως και ο υδροφορέας που εξετάζεται στην παρούσα διπλωματική εργασία ισχύει πως:

$$\left. \begin{aligned} b &= hf && \text{για τη ζώνη 1 και} \\ b &= hf - d + \xi && \text{για τη ζώνη 2} \end{aligned} \right\} \quad (4.3)$$

Όπου B είναι το πάχος του περιορισμένου υδροφορέα το οποίο είναι σταθερό και d το βάθος της θάλασσας με επίπεδο αναφοράς τον πυθμένα του υδροφορέα. Κάνοντας χρήση της προσέγγισης *Ghyben-Herzberg* ο *Strack* καταλήγει στις παρακάτω εξισώσεις υπολογισμού δυναμικού που για φρεάτιο υδροφορέα είναι:

$$\phi = \frac{1}{2} [h_f^2 - (1 + \delta) \cdot d^2] \quad , \text{για την ζώνη 1} \quad (4.4)$$

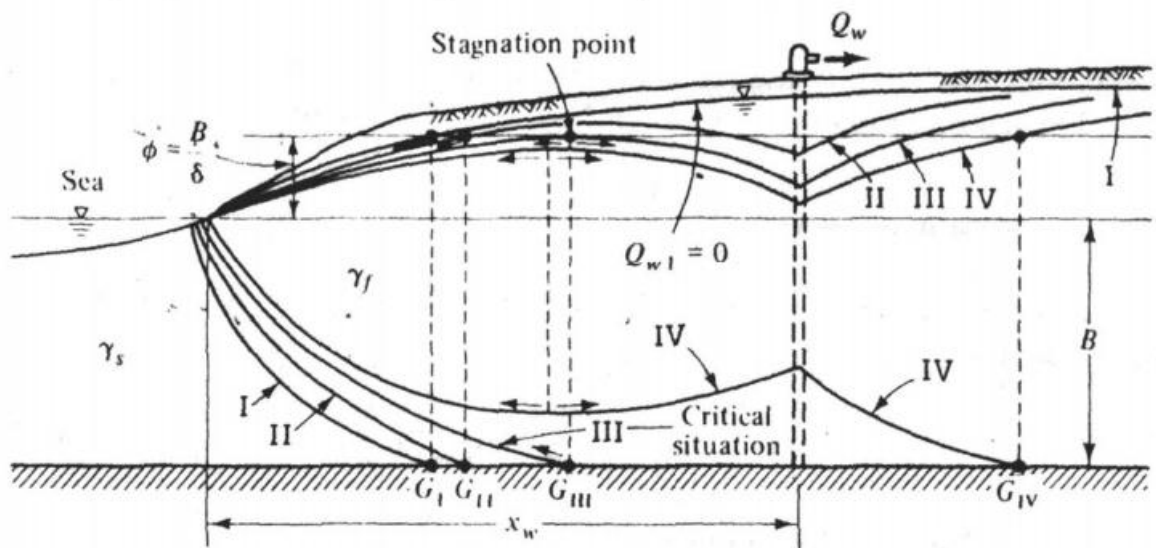
$$\phi = \frac{(1 + \delta)}{2 \cdot \delta} \cdot (h_f - d)^2, \text{ για τη ζώνη 2 του υδροφορέα} \quad (4.5)$$

Η τιμή του δυναμικού στο πόδι της αλάτινης σφήνας προκύπτει:

$$\phi_{\text{toe}} = \frac{\delta \cdot (1 + \delta)}{2} \cdot d^2 \quad (4.6)$$

$$\nabla^2 \phi = 0 \leftrightarrow \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = 0 \quad (4.7)$$

Η θέση της διεπιφάνειας στην ουσία καθορίζει το κατά πόσο ο υδροφορέας απειλείται με υπαλμύρωση. Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζονται οι τέσσερις φάσεις της διεπιφάνειας σε έναν υδροφορέα.



Εικόνα 4.5: Φάσεις της διεπιφάνειας γλυκού-αλμυρού νερού σε υδροφορέα (Πηγή: Bear,1979)

Η διεπιφάνεια βρίσκεται στη θέση I, όταν ο υδροφορέας βρίσκεται σε κατάσταση ισορροπίας και δεν υπάρχουν αντλήσεις. Όταν αρχίσει η άντληση από το φρέαρ με ρυθμό Q_w , η διεπιφάνεια μετακινείται στη θέση II και αρχίζει να εισχωρεί σιγά-σιγά προς το εσωτερικό του υδροφορέα και φτάνει στη θέση III όταν η άντληση αυξηθεί. Η θέση αυτή είναι οριακή, γιατί από το σημείο αυτό και έπειτα και εφόσον υπάρξει αυξημένη άντληση, το θαλασσινό νερό εισχωρεί στο εσωτερικό του υδροφορέα και παρουσιάζεται το φαινόμενο της υφαλμύρωσης (θέση IV). Σε αυτήν την περίπτωση στη βάση του φρέατος δημιουργείται ο χαρακτηριστικός κώνος και ο κίνδυνος άντλησης αλμυρού νερού είναι πολύ μεγάλος. Στη θέση αυτή, ο υδροφορέας έχει πρακτικά καταστραφεί.

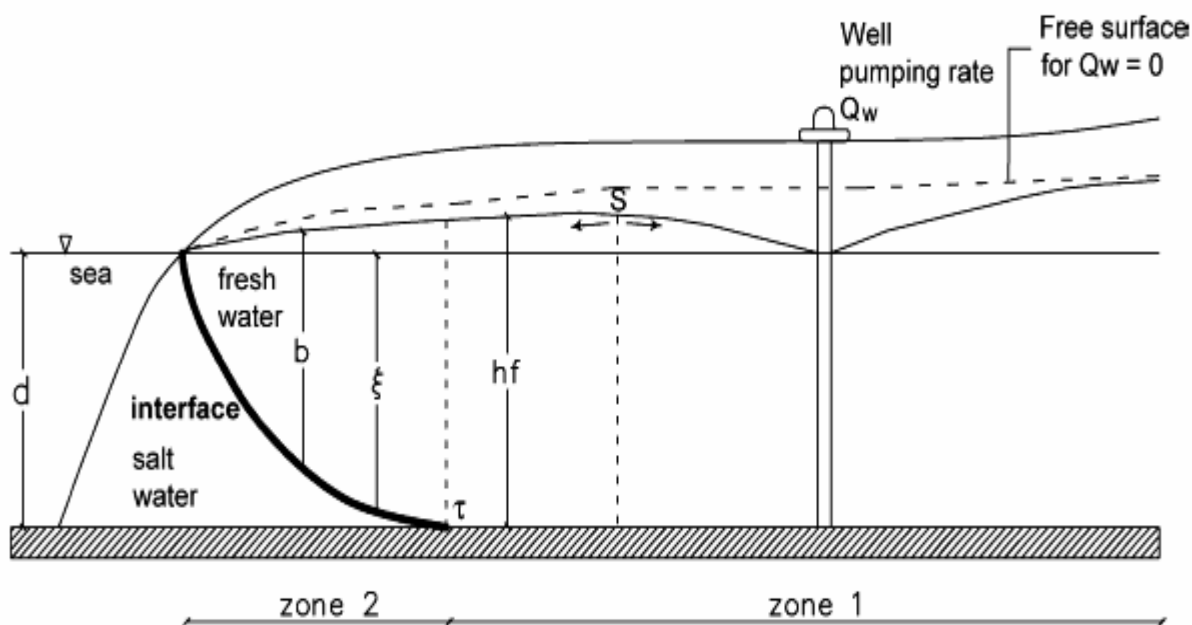
4.6 Μεθοδολογία Προσομοίωσης Παράκτιων Υδροφορέων: Μοντέλο Mantoglou et al (2004)

Το μοντέλο Mantoglou et al (2004) το οποίο υιοθετήθηκε στην παρούσα εργασία, αποτελεί μια μεθοδολογία για μεγιστοποίηση του τελικού ποσοστού άντλησης από παράκτια υδροφόρα στρώματα, χρησιμοποιώντας μη γραμμική βελτιστοποίηση και εξελικτικούς αλγόριθμους. Σκοπός του μοντέλου είναι η βελτιστοποίηση των παροχών άντλησης σε συγκεκριμένες θέσεις του υδροφορέα, ούτως ώστε τα σημεία άντλησης να

έχουν προστασία από την διείσδυση του θαλασσινού νερού. Το μοντέλο αυτό είναι βασισμένο στις αναλύσεις όπως φαίνονται παρακάτω:

- Στην προσέγγιση Ghyben – Herzberg
- Στην ανάλυση κατά Strack και
- Στη θεώρηση ύπαρξης απότομης διεπιφάνειας γλυκού – αλμυρού νερού

Εφαρμόζεται στην περίπτωση φρεάτιου υδροφορέα (unconfined aquifer) και σε συνθήκες μόνιμης ροής (steady-state flow). Στην παρούσα διπλωματική εργασία το μοντέλο Mantoglou et al (2004) θα τεθεί σε εφαρμογή για την προσομοίωση του παράκτιου φρεάτιου υδροφορέα που εξετάζεται και για την εύρεση της θέσης της διεπιφάνειας. Με βάση το πιο πάνω, η θέση της διεπιφάνειας θεωρείται σταθερή αφού εξετάζεται η περίπτωση μόνιμης ροής. Σύμφωνα με τη σχέση Ghyben-Herzberg η οποία κάνει την παραδοχή οριζόντιας ροής, μπορεί να γίνει εκτίμηση της θέσης της διεπιφάνειας.



Εικόνα 4.6: Παράκτιος υδροφορέας αντλούμενος από γεώτρηση (Πηγή: Mantoglou et al, 2004)

Η πιο πάνω εικόνα παρουσιάζει μια διατομή ενός φρεάτιου παράκτιου υδροφορέα με απότομη διεπιφάνεια που διαχωρίζει το γλυκό από το αλμυρό νερό της θάλασσας και θεωρείται ότι έχει ισορροπήσει και δεν κινείται γρήγορα. Το αλμυρό νερό παραμένει στάσιμο σε αντίθεση με τη ροή του γλυκού νερού που είναι οριζόντια και μόνιμη. Το

σημείο τ στη διατομή είναι η τομή της διεπιφάνειας με τη βάση του υδροφορέα, το S ορίζει την περιοχή που εφοδιάζει με νερό το πηγάδι, το d είναι το βάθος του υδροφορέα από τη βάση του ως την επιφάνεια της θάλασσας, το b είναι το τελικό βάθος του γλυκού νερού, το ξ θεωρείται το βάθος του γλυκού νερού μετρημένο από την επιφάνεια της θάλασσας και το h_f το φορτίο του γλυκού νερού σε σχέση με τη στεγανή βάση του υδροφορέα. Η σχέση Ghyben – Herzberg συνδέει το υδραυλικό φορτίο h_f με το βάθος ξ ως εξής:

$$h_f - d = \delta \xi \quad (4.8)$$

Όπου: $\delta = \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f} = 0,025$

Ακολούθως υιοθετείται η προσέγγιση Strack, που εισάγει την έννοια του δυναμικού ϕ και συμβάλει στη δημιουργία μια γενικής εξίσωσης συνέχειας που ισχύει και για τις δύο ζώνες και συμπίπτει με την εξίσωση Laplace. Στην περίπτωση που εξετάζουμε, η παραπάνω εξίσωση παίρνει την ακόλουθη μορφή μετά από τροποποιήσεις:

$$K \cdot \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} \right) + N = 0 \quad (4.9)$$

Όπου $N = \eta$ επιφανειακή τροφοδοσία του υδροφορέα, ενώ όπου K είναι η υδραυλική αγωγιμότητα.

Σύμφωνα με τους Mantoglou et al (2004), η σχέση (4.9) που αποτελεί την εξίσωση συνέχειας στην περίπτωση του υδροφόρου που μελετάται, μοιάζει με την αντίστοιχη σχέση που ισχύει για οριζόντια ροή σε ομογενή και ισότροπο περιορισμένο υδροφορέα που έχει τη μορφή:

$$T \cdot \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} \right) + N = 0 \quad (4.10)$$

Όπου T είναι η μεταφορικότητα και ϕ το πιεζομετρικό φορτίο. Συμπερασματικά, η εξίσωση (4.9) είναι όμοια με την (4.10), με τη μόνη διαφορά η σχέση (4.9) να χρησιμοποιεί το δυναμικό και την υδραυλική αγωγιμότητα K σε σύγκριση με την σχέση (4.10) όπου το πιεζομετρικό φορτίο ορίζεται ως ϕ και η μεταφορικότητα T . Ο φρεάτιος υδροφορέας στην παρούσα εργασία μπορεί να προσομοιωθεί ως ένας συνήθης περιορισμένος υδροφορέας όπου η τιμή μεταφορικότητας T είναι ίση με την υδραυλική αγωγιμότητα K του υδροφορέα Ακρωτηρίου. Η εξίσωση (4.10) στην οποία ανάγεται η προσομοίωση του παράκτιου υδροφορέα Ακρωτηρίου, αποτελεί εξίσωση ροής η οποία μπορεί να επιλυθεί με αναλυτικές ή αριθμητικές μεθόδους. Η γεωμετρία του υδροφορέα Ακρωτηρίου δεν επιτρέπει την ανάλυση με αριθμητικές μεθόδους και έτσι για τον υπολογισμό του δυναμικού ϕ σε κάθε θέση απαιτείται η εφαρμογή των αριθμητικών μεθόδων. Η αριθμητική μέθοδος που χρησιμοποιείται είναι ο κώδικας Modflow.

Η σχέση επιλύεται ως προς h_f :

$$\left. \begin{aligned} \phi &= \frac{(1+\delta)}{2\delta} \cdot (h_f - d)^2 \Rightarrow (h_f - d)^2 = \frac{2\delta}{(1+\delta)} \cdot \phi \Rightarrow h_f = \sqrt{\frac{2\delta}{(1+\delta)}} \cdot \phi + d \\ \text{Το } \delta &\text{ ισούται με } 0,025. \\ h_f &= \sqrt{\frac{0.05}{1.025}} \phi + d \end{aligned} \right\} \quad (4.11)$$

Η σχέση αυτή εφαρμόζεται για κάθε θέση του υδροφορέα και έτσι υπολογίζεται το αντίστοιχο φορτίο του γλυκού νερού h_f . Επίσης εννοείται ότι d είναι το βάθος της θάλασσας με επίπεδο αναφοράς τον πυθμένα του υδροφορέα και αποτελεί γνωστή παράμετρο αφού έχει εκτιμηθεί για τις ανάγκες της εργασίας ως $d = 50$ m.

Ακολούθως, επιλύεται η σχέση Ghyben-Herzberg ως προς ξ :

$$h_f - d = \delta \cdot \xi \Rightarrow \xi = \frac{h_f - d}{\delta} \Rightarrow \xi = \frac{h_f - d}{0.025} = 40 \cdot (h_f - d) \quad (4.12)$$

Υπολογίζεται το βάθος κάτω από το επίπεδο της θάλασσας στο οποίο βρίσκεται η διεπιφάνεια.

$$\xi = -z \Rightarrow z = -\xi = -40 \cdot (h_f - d) \quad (4.13)$$

**ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΥΔΑΤΙΚΟΥ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ
ΤΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΑΚΡΩΤΗΡΙΟΥ**

5. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΥΔΑΤΙΚΟΥ ΙΣΟΖΥΓΙΟΥ ΤΟΥ ΥΔΡΟΦΟΡΕΑ ΑΚΡΩΤΗΡΙΟΥ

5.1 Υδρολογικός Κύκλος

Ο υδρολογικός κύκλος περιλαμβάνει μια σειρά διαδικασιών με τις οποίες το νερό κυκλοφορεί μεταξύ της υδρόσφαιρας, ατμόσφαιρας, ξηράς και θάλασσας. Σε αυτή την αλυσίδα το νερό εμφανίζεται με όλες τις μορφές: υγρό, αέριο (υδρατμοί), στερεό (χιόνι, χαλάζι). Το σύνολο της ενέργειας που κατευθύνει τον κύκλο του νερού προέρχεται αποκλειστικά από τον ήλιο. Ο ήλιος, που κινεί τον κύκλο του νερού, θερμαίνει το νερό στη θάλασσα το οποίο εν μέρει εξατμίζεται και ανυψώνεται με τη μορφή ατμού στον αέρα. Νερό εξατμίζεται ακόμα από τις λίμνες, τα ποτάμια και το έδαφος. Η διαπνοή των φυτών είναι μια ακόμη λειτουργία που δημιουργεί υδρατμούς στην ατμόσφαιρα. Η εξατμηση και διαπνοή από την ξηρά συχνά δεν διακρίνονται και έτσι μιλούμε για εξατμισοδιαπνοή. Μια μικρή ποσότητα υδρατμών στην ατμόσφαιρα προέρχεται από την εξαχνωση, μέσω της οποίας μόρια από πάγους και χιόνια μετατρέπονται απευθείας σε υδρατμούς χωρίς να περάσουν από υγρή μορφή (Perlman, Μακρόπουλος, Κουτσογιάννης, 2005).

Ανοδικά ρεύματα αέρα ανεβάζουν τους υδρατμούς στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας, όπου οι μικρότερες πιέσεις που επικρατούν έχουν αποτέλεσμα τη μείωση της θερμοκρασίας. Επειδή όμως σε χαμηλή θερμοκρασία ο αέρας δεν μπορεί πια να συγκρατεί όλη την μάζα των υδρατμών, ένα μέρος τους συμπυκνώνεται και σχηματίζει τα σύννεφα. Τα ρεύματα του αέρα κινούν τα σύννεφα γύρω από την υδρόγειο. Παράλληλα τα σταγονίδια του νερού που σχηματίζουν τα σύννεφα συγκρούονται και μεγαλώνουν και τελικά πέφτουν απ' τον ουρανό ως κατακρημνίσματα, η συχνότερη μορφή των οποίων είναι η βροχή. Μια μορφή κατακρημνίσματος είναι το χιόνι, το οποίο όταν συσσωρεύεται σχηματίζει πάγους και παγετώνες. Σε σχετικά θερμότερα κλίματα, όταν έρχεται η άνοιξη, το χιόνι λιώνει και το ξεπαγωμένο νερό ρέει, σχηματίζοντας την απορροή από λιώσιμο του χιονιού. Η μεγαλύτερη ποσότητα κατακρημνισμάτων πέφτει απευθείας στους ωκεανούς.

Από την ποσότητα που πέφτει στην στεριά, ένα σημαντικό μέρος καταλήγει και πάλι στους ωκεανούς ρέοντας υπό την επίδραση της βαρύτητας, ως επιφανειακή απορροή. Η μεγαλύτερη ποσότητα της επιφανειακής απορροής μεταφέρεται στους ωκεανούς από τα ποτάμια, με τη μορφή ροής σε υδατορεύματα. Η επιφανειακή απορροή μπορεί ακόμη

να καταλήξει στις λίμνες, που αποτελούν μαζί με τους ποταμούς, τις κυριότερες αποθήκες γλυκού νερού.

Ωστόσο, το νερό των κατακρημνισμάτων δεν ρέει αποκλειστικά μέσα στους ποταμούς. Κάποιες ποσότητες διαπερνούν το έδαφος με τη λειτουργία της διήθησης και σχηματίζουν το υπόγειο νερό. Μέρος του νερού αυτού μπορεί να ξαναβρεί το δρόμο του προς τα επιφανειακά υδάτινα σώματα ως εκφόρτιση υπόγειου νερού. Όταν βρίσκει διόδους προς την επιφάνεια της γης εμφανίζεται με τη μορφή πηγών. Ένα άλλο μέρος του υπόγειου νερού πηγαίνει βαθύτερα και εμπλουτίζει τους υπόγειους υδροφορείς, οι οποίοι μπορούν να αποθηκεύσουν τεράστιες ποσότητες νερού για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Ακόμα και το νερό αυτό όμως συνεχίζει να κινείται και με την πάροδο του χρόνου μέρος του ξαναμπαίνει στους ωκεανούς, όπου ο κύκλος του νερού 'τελειώνει' και 'ξεκινάει'.

5.2 Κατακρήμνιση (P)

Τα κατακρημνίσματα είναι η πτώση του νερού από τα σύννεφα, με τη μορφή βροχής, χιονόνεου, χιονιού ή χαλαζιού. Αποτελεί τον κύριο τρόπο με τον οποίο το νερό της ατμόσφαιρας επιστρέφει στην επιφάνεια της Γης. Ποσοτικά υπερέχουν κατά πολύ σε σύγκριση με τις άλλες μορφές αλλά δημιουργούν και τα σημαντικότερα φαινόμενα επιφανειακής απορροής (Τσακίρης, 1995).

Οι βροχοπτώσεις επηρεάζονται από τους εξής παράγοντες:

- Γεωγραφικό πλάτος
- Η απόσταση της περιοχής από τη θάλασσα
- Η μέση ετήσια θερμοκρασία
- Η μορφολογία του ανάγλυφου
- Η υγρασία του εδάφους και του αέρα
- Η πυκνότητα της βλάστησης

5.3 Εξατμισοδιαπνοή

Ο όρος εξατμισοδιαπνοή περιγράφει το σύνολο του νερού που μετατρέπεται από την υγρή φάση στην αέρια και περιλαμβάνει την εξάτμιση μέσω υδάτινων επιφανειών, την εξάτμιση από την επιφάνεια του εδάφους και την διαπνοή των φυτών. Οι παράγοντες που επηρεάζουν το φαινόμενο της εξατμισοδιαπνοής είναι οι ακόλουθοι: η θερμοκρασία του εδάφους και του αέρα, η εδαφική και η ατμοσφαιρική υγρασία, η ηλιοφάνεια, η ταχύτητα του ανέμου, οι βροχοπτώσεις, η βλάστηση και τέλος η τοπογραφία της περιοχής.

Η εξατμισοδιαπνοή χωρίζεται σε δυνητική και πραγματική. Δυνητική εξατμισοδιαπνοή (potential evapotranspiration) είναι η ποσότητα της εξατμισοδιαπνοής που πραγματοποιείται από εδαφικές επιφάνειες, πλήρως και ομοιόμορφα καλυμμένες από αναπτυσσόμενη χλωρίδα σε συνθήκες απεριόριστης διαθεσιμότητας νερού. Αντίστοιχα, η πραγματική εξατμισοδιαπνοή είναι οι πραγματικές απώλειες νερού από την επιφάνεια του εδάφους με τους μηχανισμούς της εξάτμισης και της διαπνοής κάτω από υφιστάμενες συνθήκες κλίματος, φυτοκάλυψης και εδαφικής υγρασίας. Η πραγματική εξατμισοδιαπνοή είναι μικρότερη ή, το πολύ, ίση με τη δυνητική. Επίσης, η δυνητική και πραγματική εξατμισοδιαπνοή εξαρτάται από το είδος της φυτοκάλυψης και τα χαρακτηριστικά της π.χ. ύψος, φύλλωμα, στάδιο ανάπτυξης.

Ο υπολογισμός της εξατμισοδιαπνοής ακολουθείται από μεθόδους συνδυασμού βασιζόμενες στο συνδυασμό του ενεργειακού ισοζυγίου και της αεροδυναμικής μεταφοράς των υδρατμών.

Η πρώτη μέθοδος είναι του Penman (1948) όπου προσδιοριζόταν για την εκτίμηση της εξάτμισης από μετρήσεις θερμοκρασίας, σχετικής υγρασίας και ταχύτητας ανέμου σε μια στάθμη της ατμόσφαιρας, μέσα από το συνδυασμό της εξίσωσης μεταφοράς και της εξίσωσης ενεργειακού ισοζυγίου. Η εξίσωση Penman εφαρμόζεται για να επιτευχθεί η εκτίμηση της εξάτμισης από υδάτινη επιφάνεια. Μια παραδοχή που επικρατεί για την ανάπτυξή της και η οποία ευσταθεί για υδάτινη επιφάνεια, είναι ότι οι υδρατμοί κοντά στην επιφάνεια είναι κορεσμένοι. Αυτό δεν ισχύει στην περίπτωση της διαπνοής επειδή οι υδρατμοί δεν είναι κορεσμένοι στην επιφάνεια των φύλλων. Πρέπει να αναφερθεί ότι η μέθοδος Penman έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως για την εκτίμηση της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής από εδαφικές επιφάνειες (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999).

Η εξίσωση έχει ως εξής:

$$E' = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} * \frac{R_n}{\lambda} + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} * F(u) * D \quad (5.1)$$

Οι ορισμοί που δίνονται για την πιο πάνω εξίσωση είναι:

Δ = η κλίση της καμπύλης κορεσμού υδρατμών

R_n = η ολική καθαρή ενέργεια ακτινοβολίας

γ = ψυχομετρικός συντελεστής

λ = λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης

D = το έλλειμμα κορεσμού στην ατμόσφαιρα

$F(u)$ = η συνάρτηση του ανέμου και υπολογίζεται από: $F(u) = 0.13 + 0.14u$

Για την αντιμετώπιση της πιο πάνω αδυναμίας της μεθόδου Penman, ο Monteith (1965) εισήγαγε την επιφανειακή αντίσταση των στομάτων των φυλλωμάτων στην εξάτμιση (r_s). Από αυτή την τροποποίηση προέκυψε η μέθοδος Penman-Monteith που χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής των φυτών και της εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας αναφοράς. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί επίσης και για τον υπολογισμό της πραγματικής εξατμισοδιαπνοής (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999).

Η εξίσωση, γνωστή ως Penman-Monteith, είναι η ακόλουθη:

$$E' = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma'} * \frac{R_n}{\lambda} + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma'} * F(u) * D \quad (5.2)$$

Ακολούθως, το 1977 οι Doorenbos και Pruitt εισηγήθηκαν κάποιες τροποποιήσεις για να γίνει η μέθοδος κατάλληλη για την εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας αναφοράς. Η εξίσωση στην οποία κατέληξαν είναι:

$$E' = c \left[\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} * \frac{R_n}{\lambda} + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} * F(u) * D \right] \quad (5.3)$$

Από την πιο πάνω εξίσωση παρατηρείται η εισαγωγή του συντελεστή αναγωγής c , ο οποίος είναι υπεύθυνος για τις διαφορές των μετεωρολογικών συνθηκών που επικρατούν. Μια άλλη αλλαγή αφορά τη συνάρτηση του ανέμου η οποία είναι:

$$F(u) = 0.27 * (1 + 0.86u) \quad (5.4)$$

Η μέθοδος Doorenbos & Pruitt αποτελεί διεθνές πρότυπο, γνωστό ως F.A.O (Food and Agriculture Organization) που ασχολείται με την εκτίμηση των υδατικών αναγκών των καλλιεργειών και παρουσιάζει την τάση υπερεκτίμησης της εξατμισοδιαπνοής (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999).

Επιπλέον, η πολυπλοκότητα των πιο πάνω μεθόδων οδήγησε στην τροποποίηση της εξίσωσης από τους Priestley and Taylor (1972) που απεικονίζεται από την ακόλουθη εξίσωση:

$$E' = \alpha_e * \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} * \frac{R_n}{\lambda} \quad (5.5)$$

α_e = αριθμητική σταθερά και είναι ίση με 1.3.

Εμπειρικές μέθοδοι της εξατμισοδιαπνοής

Οι εμπειρικές μέθοδοι της εξατμισοδιαπνοής είναι μια κατηγορία η οποία δεν χρησιμοποιεί τη θεωρητική βάση των μεθόδων συνδυασμού αλλά απαιτεί αρκετά δεδομένα εισόδου. Βασίζονται συνήθως στη θερμοκρασία. Ακολούθως, θα περιγραφούν οι πιο διαδεδομένες:

Μέθοδος *Blanley-Criddle*

Προσδιορίζει την εκτίμηση της μηνιαίας δυναμικής εξατμισοδιαπνοής μιας καλλιέργειας με βάση την πιο κάτω σχέση, η οποία έχει μοναδικό μετεωρολογικό δεδομένο εισόδου τη θερμοκρασία.

$$E_p = 0.254 * k_c * p * (32 + 1.8T_a) \quad (5.6)$$

Όπου:

E_p = δυναμική εξατμισοδιαπνοή σε mm/month

k_c = συντελεστής καταναλωτικής χρήσης

T_a = θερμοκρασία (C°)

p = ποσοστό των ωρών ημέρας του συγκεκριμένου μήνα σε σχέση με το σύνολο ωρών ημέρας του χρόνου

Μέθοδος *Thornthwaite*

Αυτή η μέθοδος απαιτεί λιγιστά δεδομένα εισόδου, μόνο μέση θερμοκρασία και βασίζεται στην εξίσωση:

$$ET = 16 * \frac{(10 * T_a)^\alpha}{I} * \frac{(\mu * N)}{360} \quad (5.7)$$

Όπου

ET = η δυνητική εξατμισοδιαπνοή σε mm/μήνα

T_{α} = μέση θερμοκρασία του μήνα

μ = ο αριθμός των ημερών του μήνα

N = η μέση αστρονομική διάρκεια της ημέρας

I = εμπειρικός συντελεστής

Μέθοδος Turc

Η μέθοδος αυτή επινοήθηκε το 1951 και προσδιορίζει τη μέση ετήσια πραγματική εξατμισοδιαπνοή σε mm με την σχέση που ακολουθεί:

$$E = \frac{P}{\sqrt{(90 + (P/L)^2)}} \quad (5.8)$$

$L = 300 + 25 * T + 0.05 * T^3$ σε mm και T_{α} είναι η μέση ετήσια θερμοκρασία του αέρα.

Μέθοδος Hargreaves

Η μέθοδος Hargreaves είναι σχετικά μία πρόσφατη εμπειρική μέθοδος εκτίμησης της εξατμισοδιαπνοής της καλλιέργειας αναφοράς και χρειάζεται μόνο θερμοκρασιακά στοιχεία ως δεδομένα εισόδου. Βασίζεται στην εξίσωση:

$$E_{rc} = 0.0023 * (S_o / \lambda) * (T_{\alpha} + 17.8) * (T_{max} - T_{min})^{0.5} \quad (5.9)$$

Όπου

E_{rc} = η εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας αναφοράς σε mm/d

S_o = η εξωγήινη ακτινοβολία σε kJ (m₂d)

λ = η λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης σε kJ/Kg

T_a = η μέση μηνιαία θερμοκρασία του αέρα

$T_{max} - T_{min}$ = η διαφορά της μέγιστης και ελάχιστης θερμοκρασίας σε C°

Η μέθοδος αυτή δίνει αξιόπιστα αποτελέσματα και συστήνεται ως μια ανεκτή προσέγγιση για την περίπτωση που διαθέσιμα μετεωρολογικά στοιχεία είναι η θερμοκρασία (Shuttleworth, 1993).

5.4 Επιφανειακή απορροή

Με τον όρο επιφανειακή απορροή εννοούμε τη ροή του νερού, υπό την επίδραση της βαρύτητας, κατά μήκος των φυσικών υδατορευμάτων. Στον ορισμό αυτό δεν γίνεται διάκριση κλίμακας των φυσικών υδατορευμάτων και περιλαμβάνεται όλο το φάσμα τους, από την κλίμακα του μικρού, ακαθόριστων ορίων, ρυακιού μέχρι την κλίμακα του πιο μεγάλου ποταμού που είναι ο Αμαζόνιος (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999).

Περιλαμβάνει το νερό που πέφτει απευθείας στα υδρορεύματα, το νερό που απορρέει επιφανειακά στην επιφάνεια του εδάφους και καταλήγει στα υδρορεύματα, την υποδερμική ροή και την τροφοδοσία των υδρορευμάτων από πηγές.

Η απορροή διακρίνεται σε τρεις μορφές. Η πρώτη ορίζεται ως η *άμεση απορροή* που οφείλεται στην ύπαρξη διαπερατών σχηματισμών, ενώ η *επίγεια ροή* ορίζεται ως ταχεία απόκριση και οφείλεται στον κορεσμό του εδάφους. Τελευταία μορφή είναι η υποδερμική ροή που είναι μια αργή απόκριση και οφείλεται στην πλευρική κίνηση του νερού που εισχωρεί στο έδαφος τη βασική ροή, δηλαδή την απόκριση των κατώτερων εδαφικών στρωμάτων μέσω πηγών.

Τέλος, η απορροή εξαρτάται από την ένταση και κατανομή των βροχοπτώσεων, τη διάρκεια και τον όγκο των βροχοπτώσεων, τη θερμοκρασία, τον άνεμο, το κλίμα, την κλίση της επιφάνειας του εδάφους και την πυκνότητας βλάστησης.

5.5 Κατείσδυση

Ο όρος κατείσδυση περιλαμβάνει το σύνολο των διαδικασιών με τις οποίες το νερό της βροχής διεισδύει στο έδαφος και διηθείται στα βαθύτερα στρώματα, αναπληρώνοντας έτσι τη φυσική υγρασία και προστίθεται στους υδροφόρους ορίζοντες. Το νερό που προστίθεται στους υδροφόρους ορίζοντες αποτελεί την ενεργή κατείσδυση. Οι παράγοντες που την επηρεάζουν μπορούν να διακριθούν σε δύο κατηγορίες: η μία περιλαμβάνει φυσικά χαρακτηριστικά μιας περιοχής και η άλλη κλιματικούς παράγοντες που ποικίλουν σημαντικά από εποχή σε εποχή και από έτος σε έτος (Τσακίρης, 1995).

Η μέτρηση της κατείσδυσης μπορεί να γίνει με την παρακολούθηση της παροχής των πηγών σε όλη τη διάρκεια του έτους, γνωρίζοντας την περιοχή η οποία τροφοδοτεί με νερό την πηγή. Η δεύτερη μέθοδος μέτρησης πραγματοποιείται με τη χρήση των λυσίμετρων, ειδικές συσκευές που χρησιμοποιούνται σε προσχωσιγενείς περιοχές.

5.6 Εκτίμηση Υδατικού Ισοζυγίου στο Ακρωτήρι

Ο υπολογισμός του υδατικού ισοζυγίου έχει σκοπό τον ακριβή καθορισμό όλων των εισροών και εκροών του νερού σε συνδυασμό με τις μεταβολές του εναποθηκευμένου όγκου του σε συνθήκες μόνιμης ή μη μόνιμης ροής (Γιαννουλόπουλος, 2000).

Οι μέθοδοι που ακολουθήθηκαν για τον υπολογισμό του υδατικού ισοζυγίου είναι οι ακόλουθοι:

A) Εμπειρική μέθοδος Thornthwaite –Mather

B) Χρήση εμπειρικών συντελεστών

Η επιλογή των μεθόδων βασίστηκε στη διαθεσιμότητα των δεδομένων για την περιοχή μελέτης, καθώς και στα προγράμματα που είναι διαθέσιμα.

5.6.1 Υπολογισμός συνιστωσών υδατικού ισοζυγίου με την μέθοδο Thornthwaite-Mather

Η Κύπρος για την εκπλήρωση των υποχρεώσεων της διαθέτει 150 μετεωρολογικούς σταθμούς. Η Μετεωρολογική Υπηρεσία λειτουργεί δίκτυο που καταρτίζεται από 39 κλιματολογικούς σταθμούς, 111 βροχομετρικούς σταθμούς στις ελεύθερες περιοχές της Κύπρου, σταθμό για παρατηρήσεις στην ανώτερη ατμόσφαιρα στην Αθαλάσσα και μετεωρολογικά γραφεία στα αεροδρόμια Λάρνακας και Πάφου, όπου λειτουργούν συνοπτικοί μετεωρολογικοί σταθμοί, καθώς επίσης και 17 αυτόματοι μετεωρολογικοί σταθμοί.

Τα δεδομένα βροχοπτώσεων και θερμοκρασίας λήφθηκαν από το σταθμό Ακρωτηρίου με τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

Πίνακας 5.1: Χαρακτηριστικά Στοιχεία μετεωρολογικού σταθμού Ακρωτηρίου

Αλφαβ. Αριθμός	Αριθμός Σταθμού	Όνομα Σταθμού	Τοποθεσία			Είδος Σταθμού
			Γ. Πλάτος	Γ. Μήκος	Υψόμετρο	
0210	332	Ακρωτήρι (B.B.A)	34° 35'	32° 59'	23	Συνοπτικός

Αξίζει να σημειωθεί ότι η βροχόπτωση είναι η πρώτη συνιστώσα που λαμβάνεται υπόψη για τον υπολογισμό του υδατικού ισοζυγίου της περιοχής. Για τη συγκεκριμένη μελέτη συγκεντρώθηκαν οι μηνιαίες τιμές βροχόπτωσης και θερμοκρασίας για την περίοδο 1973-2011, οι οποίες δόθηκαν από τη Μετεωρολογική Υπηρεσία Κύπρου. Οι μηνιαίες τιμές βροχοπτώσεων φαίνονται στον πίνακα 5.2 και είναι σε mm.

Πίνακας 5.2: Μηνιαίες τιμές βροχόπτωσης περιόδου 1973-2011 (mm) (Πηγή : Μετεωρολογική Υπηρεσία Κύπρου)

Station number: 332-210

Latitude: 34° 35'

Longitude: 32° 59'

Station Name: AKRWTHRI (R.A.F)

Elevation: 0023m

	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC	ANNUAL
1973	30	12.4	6.3	20.7	1.5	0.5	0	0	0	14.1	49.3	14.4	149.2
1974	99.3	24.2	38.4	8.6	1.3	0	0	0	0	0	92.6	108.0	372.4
1975	171.5	121.6	10.1	7.9	2.2	0	0	0	0	0	17.2	153.6	484.1
1976	70.6	49.2	31.7	29.7	16.4	0	0	0	0	30.3	87.1	71.3	386.3
1977	61.6	23.3	29.1	28	0	10	0	0	0	10.9	9.7	157.9	330.5
1978	143.1	85.8	48.7	10.5	0.5	0	0	0	0.6	26.4	19.2	106.4	441.2
1979	35.9	33.6	16.4	2.2	2.3	2.8	0	0	0	18.9	50.4	177.5	340.0
1980	68.9	161	49.7	3.8	0.2	0	0	0	1	27.1	3.8	54.1	369.6
1981	284.3	102.4	35.2	8.4	0.4	0.4	0	0	0	0.2	84.7	42.7	558.7
1982	39.3	106.5	46.7	7.9	2.9	1.5	0	0	0	6.3	22.2	46.4	279.7
1983	51	142.8	34.1	15.4	0.1	0	0	0	0	20.4	29	91.7	384.5
1984	67	65.8	34.5	51.3	0.5	0	0	0	0	3	148.9	81.9	452.9
1985	84.3	35.5	28.1	1.4	0	0	0	0	0	43.5	14.4	81.5	288.7
1986	58.7	55.5	5.9	8.2	12.7	8.3	0	0	0.9	32.9	12.1	93.3	288.5
1987	64.7	37.5	159.7	24.7	1.6	0	0	0	0	15.6	26.7	165.5	496.0
1988	113.3	67.4	100.8	14.1	7.5	0	0	0	0	68.1	30.3	94.9	496.4
1989	108.3	16.6	20.4	0	0	0.4	0	0	0	61.1	70.5	71.3	348.6
1990	23.6	145.2	32.5	0.5	0	0	0	0	0.1	2.8	2.6	58.1	265.4

1991	85.7	72	34.1	20.9	2.3	0	0	0	0	17	62.5	300.9	595.4
1992	32.8	115.6	21.1	10.4	6.8	0	1.6	0	0	0	120.3	94	402.6
1993	85.2	55.5	78.6	10.3	5.8	0	0	0	0	0.6	15.6	21	272.6
1994	167.6	66.2	43.2	9.6	2.3	0	0	0	3.1	9.9	228.6	46.9	577.4
1995	36.7	47.8	17.1	7.6	6.7	0	0.2	0	0	3	89	12.3	220.4
1996	95.2	34.8	35.2	14	1	0	0	0	0	41.2	4.4	95.9	321.7
1997	4.9	59.1	32	21.6	5.2	0	0	0	17.9	27.1	124.6	57.9	350.3
1998	51.7	22.4	44.8	16.6	9.4	0	0	0	0	4.8	45.8	160.1	355.6
1999	37.8	48.4	29.6	12.4	0	0	0	0	0	1.2	6.8	33.8	170.0
2000	55	78	40	49.6	5.2	0	0	0	4.4	24.5	132.8	58.4	447.9
2001	64.4	110.4	0.6	34	0.2	0	0	0	3.8	14.5	36.3	159.1	423.3
2002	67.8	45.4	35.7	22.1	0	0	0	0	0	6.2	30.6	116.1	323.9
2003	69	152.8	82.4	18.6	0	1.2	0	0	0	0.8	50.4	117.6	492.8
2004	377.8	119.4	0	6.2	0	0.8	0	0	0	0.4	74	115.4	694.0
2005	115.4	56.6	24.8	18.4	0	4.4	0	0	3	16.8	60.2	34	333.6
2006	29.8	32	13.6	8.6	0.8	0	0	0	0.2	68.2	19.4	28.2	200.8
2007	58.8	156.8	39.2	38.5	42.4	0.4	0	0	0.2	0	42.6	128	506.9
2008	36	30.8	23.4	0	0.4	0	0	0	23.6	3.8	15.8	82.8	216.6
2009	89.4	125.8	81.2	8.4	6.8	0	0	0	3.4	21.8	59.8	252.2	648.8
2010	154	56.4	1	11.6	1	0	0	0	0	3.6	0	76.4	304.0
2011	120.8	55.8	54.7	9.6	4.4	0	0	0	1.4	25.4	70.2	95.6	437.9
MEAN	87.05	72.56	37.09	15.84	3.96	0.92	0.05	0	1.63	18.42	50.59	93.75	385.4

Από τον πιο πάνω πίνακα φαίνεται ότι το έτος με το μικρότερο ύψος βροχόπτωσης ήταν το 1973, σε αντίθεση με το 2004 που παρουσιάζει το μεγαλύτερο ύψος βροχόπτωσης. Η μέση υπερετήσια τιμή της περιόδου 1973-2011 υπολογίστηκε ίση με **385.4 mm**. Επιπλέον ο μήνας με το μεγαλύτερο ύψος βροχόπτωσης είναι ο Δεκέμβριος (93.75mm) και ο πιο άνυδρος μήνας είναι ο Αύγουστος με μηδενική συνολική βροχόπτωση (0 mm). Στο πιο κάτω διάγραμμα παρουσιάζεται το μέσο ύψος βροχής ανά μήνα για την περίοδο 1973-2011.



Διάγραμμα 5.1: Μέσο μηνιαίο ύψος βροχής περιόδου 1973-2011

Ακολούθως γίνεται η εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής με τις εμπειρικές μεθόδους Thornthwaite και Hargreaves. Απαραίτητο στοιχείο για το συγκεκριμένο υπολογισμό με τις δύο αυτές μεθόδους είναι η μέση μηνιαία θερμοκρασία της υπό εξέταση περιόδου. Τα στοιχεία αυτά λήφθηκαν από τη Μετεωρολογική Υπηρεσία Κύπρου από το 1973-2011 και εμφανίζονται στον πίνακα 5.3.

Πίνακας 5.3: Μέσες Τιμές Θερμοκρασίας περιόδου 1973-2011 (Πηγή : Μετεωρολογική Υπηρεσία Κύπρου)

Station number: 332-210

Latitude: 34° 35'

Longitude: 32°59'

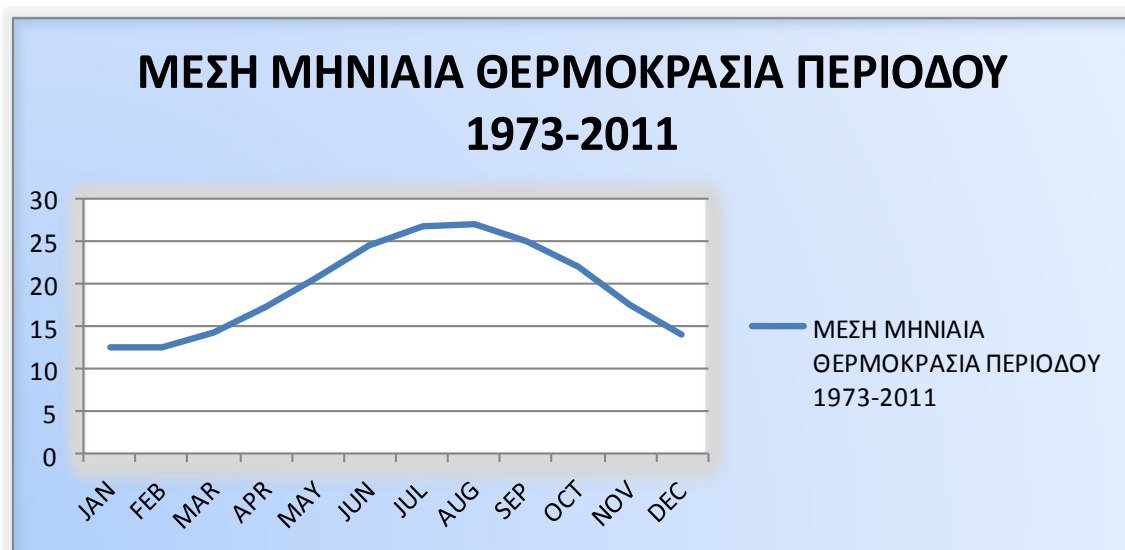
Station Name: AKRWTHRI (R.A.F)

Elevation: 0023m

	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
1973	12.2	14.3	14.4	16.6	21.3	24.3	26.8	26.7	25.5	22.7	15.8	14.6
1974	11	13.3	15.4	17	19.8	23.8	26.6	26	24.6	22.6	17.9	13.3
1975	12.4	12.6	14.9	19.4	20.3	24	26.3	26.1	25.4	22.1	17.6	13.4
1976	12.8	11.3	14.6	17	20.8	23.6	25.7	25.5	23.6	22	18.5	14.8
1977	11.6	14.4	14.2	17	21.1	24	27.3	27.1	24.8	20.4	18	13.3
1978	12.9	13.6	14.5	16.8	21.7	24.2	27.5	25.6	23.6	22.2	16.3	14.6
1979	13	14.3	14.9	17.5	20.4	24.8	26.3	25.5	24.9	21.8	19.3	13.8
1980	11.8	11.8	13.8	16.8	20.1	23.7	25.8	26.7	23.6	21.5	18.1	14.3
1981	12.1	12.3	15.3	17.7	18.8	24.8	26.3	26.8	24.9	22.8	16.1	15.1
1982	13.1	11.3	12.6	17.6	20.2	23.6	25.3	26.2	25	21.9	15.8	13
1983	10.4	10.6	12.8	16.5	20.5	23.5	26.1	26	24.2	20.5	18.7	14.6
1984	12.9	13.3	14.1	16.3	21.1	23.6	25.8	25.5	24.4	22.1	16.8	12.8
1985	13.8	11.2	14	17.2	21.3	23.9	26	27.5	24.8	20.3	18.4	14.3
1986	13.1	13.2	15.1	19.2	19.6	24.5	25.4	26.5	25.8	21.3	15.9	13.5
1987	13.6	14.3	11.8	15.9	19.8	23.7	26.7	26.9	25.4	21.4	17.1	14.3
1988	12.8	12.7	13.5	17.5	21.5	24.5	28.9	27.5	25.3	21.1	15.6	13.4
1989	10.4	11.8	14.4	20.1	22	23.5	26.5	26.2	24.6	20.6	17.5	13.9
1990	11.4	12.6	14.4	17.4	20.5	23.8	26	26.5	24.3	22.5	18.9	15.3

1991	12.5	12.8	15.8	18	20.3	23.9	25.5	26.3	24.7	22.4	17.7	12.6
1992	10.5	9.6	12.4	16.5	19.9	23.5	25.6	27.1	24.5	22	17.5	11.4
1993	11	10.4	13.3	16.8	19.5	24.5	26.5	27	24.5	24.4	17.3	15
1994	14.3	13.1	13.7	18.6	21.6	24.1	26.3	27.5	26.8	24.5	16.8	12.4
1995	12.6	13	14.5	16.3	20.6	25	26.8	26.9	24.5	21	15.1	13
1996	12	13.1	14	15.8	21.7	24.8	26.6	27	24.9	20.7	19.1	15.6
1997	13.1	11.2	12.9	15.3	20.8	24.4	27.3	25.1	23.8	21.6	18	14.5
1998	12.3	13	13.4	18.5	21.3	25	27.2	28.8	25.3	22.7	19.3	15
1999	14.1	13.2	14.6	17.5	22	25	27.1	27.7	25.6	22.7	18	15.9
2000	11.3	12.1	13.1	17.9	21.1	26	28.4	27.4	25.5	21.9	18.2	14.5
2001	13.4	13.4	17	18.5	21.9	24.6	26.7	27.4	25	22	17.6	14.1
2002	11.3	13.9	15.9	17	20.4	25	27.9	27.5	25.3	22.5	18.8	13.9
2003	14.5	11.6	13.4	17	23.7	25	27.4	27.7	25	22.3	18.2	15
2004	12.3	12.4	15	17.3	20.5	24.3	27	26.5	25	23.3	18.4	13.6
2005	13	12.6	14.8	17.6	20.6	23.8	26.9	27	25.1	20.6	16.6	14.5
2006	12.4	12.8	14.3	17.5	20.7	24.3	26.3	27	25.4	21.8	15.9	13.2
2007	12.1	13	14.5	16.6	21.8	25.5	27.9	27.3	24.8	22.5	18	14
2008	11.1	11.8	16.3	18.5	20.6	25.5	27	27.7	25.1	21.6	19.1	14.6
2009	13.6	13.3	13.8	17.6	20.6	25.8	27.7	27.6	25	23.5	17.9	15.4
2010	14.5	14.1	16	18.3	21.5	25	26.6	29.3	26.5	22.9	19.6	16.6
2011	13.6	13.4	14.5	17.4	20.8	24.8	27.2	27.5	25.5	21.7	16	14
Mean	12.48	12.62	14.30	17.38	20.82	24.40	26.69	26.7	24.93	22.01	17.57	14.13

Όπως φαίνεται από τον πιο πάνω πίνακα, ο θερμότερος μήνας είναι ο Αύγουστος (26.7 °C) και ψυχρότερος ο Ιανουάριος (12.48 °C). Ακολούθως, παρουσιάζεται η μέση μηνιαία θερμοκρασία για την περίοδο 1973-2011.



Διάγραμμα 5.2: Μέση Μηνιαία Θερμοκρασία περιόδου 1973-2011

Το λογισμικό που χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της εξατμισοδιαπνοής με τις μεθόδους που περιγράφηκαν είναι γνωστό ως «Υδρογνώμων». Το συγκεκριμένο λογισμικό χρησιμοποιεί για την προσομοίωση των επιφανειακών διεργασιών μιας λεκάνης, ένα μοντέλο ισοζυγίου της εδαφικής υγρασίας και αποτελεί μια τροποποιημένη εκδοχή του μοντέλου Thornthwaite (Κουτσογιάννης και Ξανθόπουλος, 1999).

Ο Υδρογνώμων είναι μια ολοκληρωμένη εφαρμογή ανάλυσης υδρολογικών δεδομένων και χρονοσειρών. Η ανάλυση των δεδομένων περιλαμβάνει εφαρμογές επεξεργασίας, όπως συνάθροιση και κανονικοποίηση χρονικού βήματος, παρεμβολή, ανάλυση παλινδρόμησης και συμπλήρωση ελλειπουσών τιμών, ελέγχους συνέπειας, φιλτράρισμα δεδομένων, οπτικοποίηση χρονοσειρών με χρήση γραφημάτων και πινάκων, κτλ.

Το πρόγραμμα υποστηρίζει ακόμη εξειδικευμένες υδρολογικές εφαρμογές, στις οποίες περιλαμβάνονται μοντέλα εξατμοδιαπνοής, κατασκευή καμπυλών στάθμης-παροχής, παροχής - στεροπαροχής, επεξεργασία υδρομετρήσεων, έλεγχοι ομοιογένειας, ανάλυση υδατικού ισοζυγίου, κτλ. Η στατιστική ενότητα παρέχει εργαλεία για ανάλυση δειγμάτων, συναρτήσεις κατανομής, στατιστική πρόγνωση, προσομοίωση Monte-Carlo, ανάλυση ακραίων γεγονότων και κατασκευή όμβριων καμπύλων.

Το λογισμικό αυτό είναι μέρος της ομάδας προγραμμάτων που κατασκευάστηκαν στα πλαίσια του έργου «Εκσυγχρονισμός της εποπτείας και διαχείρισης του συστήματος των υδατικών πόρων ύδρευσης της Αθήνας» από το ΕΜΠ. Αποτελεί μια εφαρμογή για τη διαχείριση και την επεξεργασία των υδρολογικών δεδομένων που περιέχονται στη βάση δεδομένων και μπορεί να διαχειριστεί ακόμη και γεωγραφικά δεδομένα ως οντότητες πραγματικού κόσμου ή γεωγραφικές οντότητες όπως π.χ. πόλεις, ταμιευτήρες, φράγματα, μετεωρολογικούς σταθμούς.

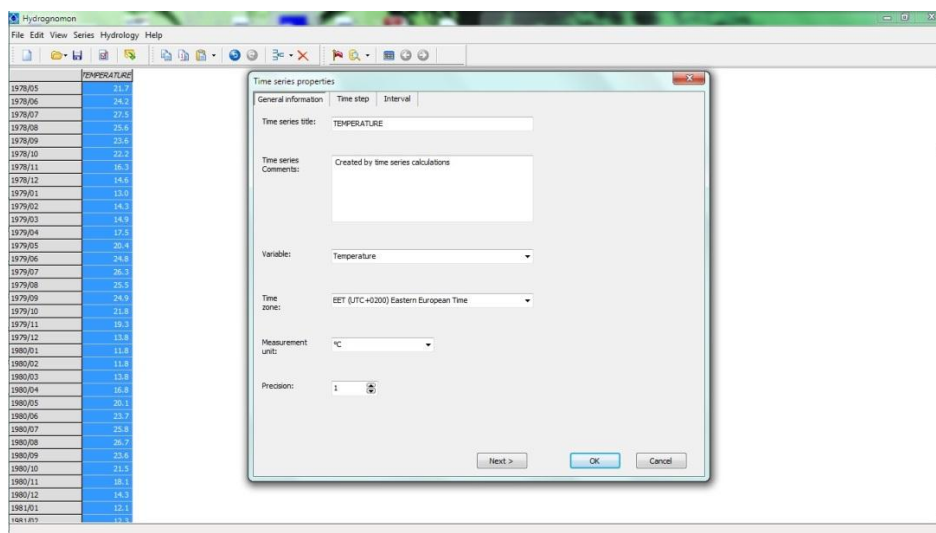
Στη συγκεκριμένη περίπτωση, όπου εξετάζεται ο υπόγειος υδροφορέας Ακρωτηρίου, θα εισαχθεί η χρονοσειρά των μηνιαίων τιμών θερμοκρασίας της περιοχής για τις περιόδους 1973-2011, καθώς επίσης και το γεωγραφικό πλάτος του σταθμού Ακρωτηρίου. Αυτά τα δεδομένα εισάγονται στο λογισμικό 'Υδρογνώμων', με αποτέλεσμα τον υπολογισμό των τιμών της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής με τις μεθόδους *Thornthwaite* και *Hargreaves*.

Μέθοδος Thornthwaite

Για την μέθοδο Thornthwaite απαιτούνται ως δεδομένα εισόδου οι μέσες τιμές θερμοκρασίας και το γεωγραφικό πλάτος του μετεωρολογικού σταθμού. Κατά την εισαγωγή των πιο πάνω δεδομένων στο πρόγραμμα, ακολουθούνται τα εξής βήματα:

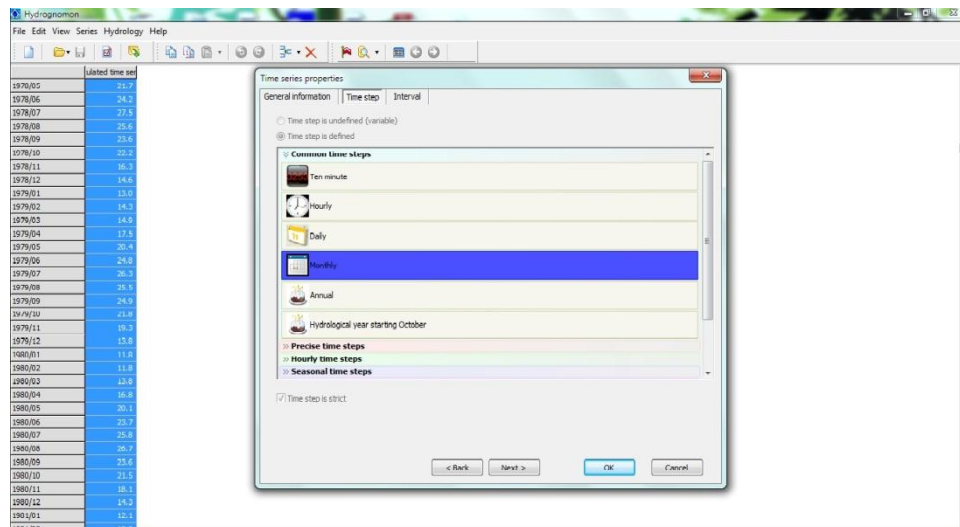
- Το χρονικό βήμα (Time step) καθορίζεται σε 'μηνιαίο' (Monthly)
- Ο τύπος μεταβλητής (Variable type) ορίζεται σε 'μέσο'
- Η ακρίβεια (Precision) ορίζεται σε 1 δεκαδικό ψηφίο

Αφού εισαχθούν οι θερμοκρασίες, καθορίζουμε όνομα της χρονοσειράς, την μεταβλητή, την μονάδα μέτρησης και την ακρίβεια. Εισάγοντας τα δεδομένα αυτά στο πρόγραμμα εμφανίζεται η εξής εικόνα:



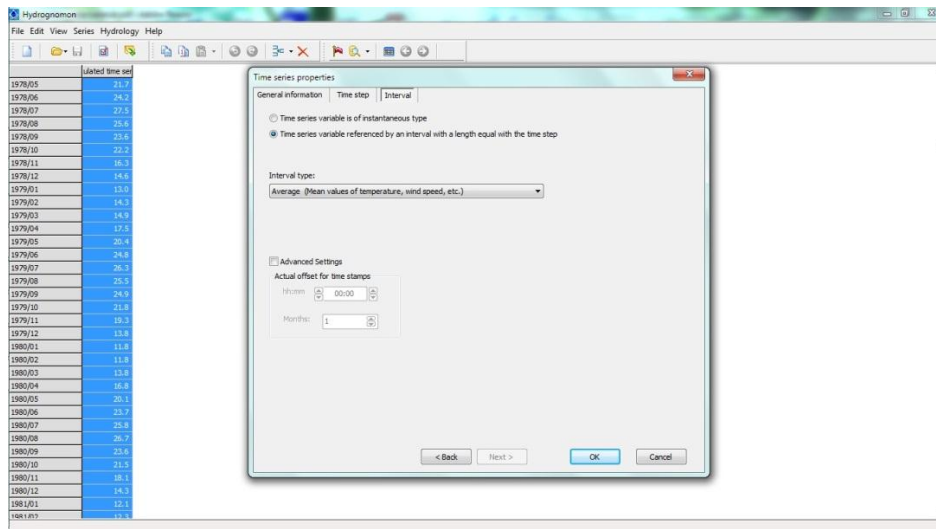
Εικόνα 5.1: Καθορισμός ονόματος χρονοσειράς , μεταβλητής, μονάδων μέτρησης και ακρίβειας στο πρόγραμμα Hydrognomon .

Στο επόμενο βήμα , μας ζητείται ο καθορισμός του χρονικού βήματος το οποίο επιλέγεται καθορισμένο και συγκεκριμένα μηνιαίο (Monthly).



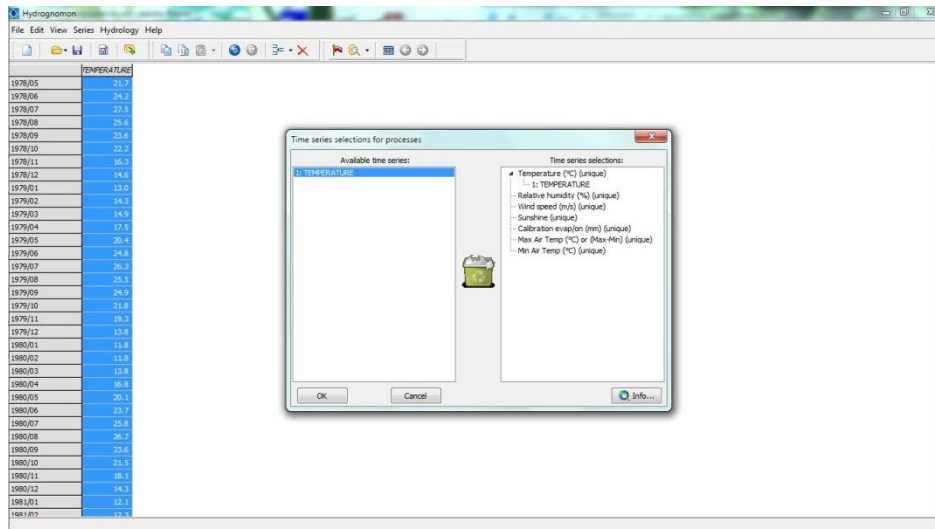
Εικόνα 5.2: Καθορισμός του χρονικού βήματος .

Στο τελευταίο βήμα , επιλέγουμε στο κουτί interval type, το Average διότι η χρονοσειρά είναι μέσες μηνιαίες θερμοκρασίες.



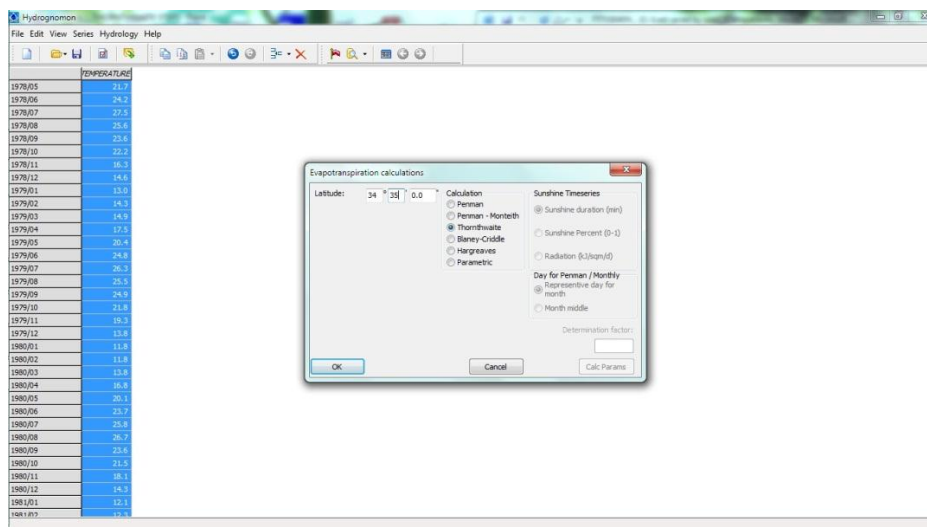
Εικόνα 5.3: Καθορισμός μέσω μηνιαίων τιμών χρονοσειράς

Ακολούθως, επιλέγετε η εντολή 'Calculations'- υπολογισμοί- και 'Hydrology'—Υδρολογία- και στο τέλος 'Evapotranspiration'- εξατμισοδιαπνοή- και αντιστοιχίζεται η διαθέσιμη χρονοσειρά με το Temperature που βρίσκεται στη δεξιά στήλη.



Εικόνα 5.4: Αντιστοιχία χρονοσειράς με το Temperature.

Στο τελευταίο βήμα για τον υπολογισμό της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής, επιλέγουμε την μέθοδο υπολογισμού, η οποία είναι η Thornthwaite και η εισαγωγή του γεωγραφικού πλάτους του μετεωρολογικού σταθμού που είναι $34^{\circ}35'$.



Εικόνα 5.5: Επιλογή μεθόδου Thornthwaite και εισαγωγή γεωγραφικού πλάτους.

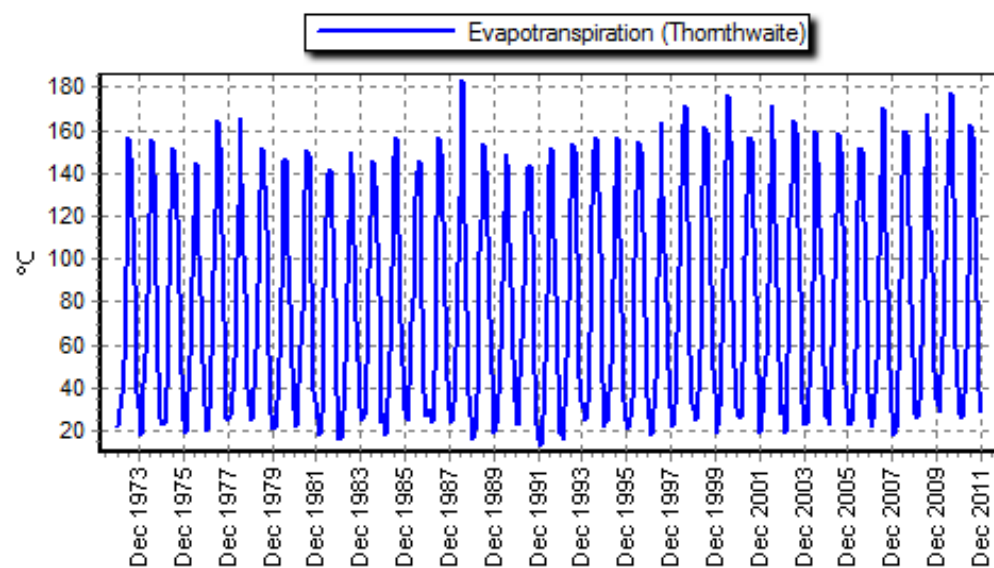
Αφού εφαρμοστούν τα προαναφερθέντα βήματα, το λογισμικό “Υδρογνώμων” μας δίνει τον ακόλουθο πίνακα και διάγραμμα της μέσης μηνιαίας δυνητικής εξατμισοδιαπνοής .

Πίνακας 5.4: Μέση μηνιαία δυνητική εξατμισοδιαπνοή Thornthwaite κατά τη μέθοδο για την περίοδο 1973-2011

ΜΕΘΟΔΟΣ THORNTHWAITE

	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC	MEAN
1973	22.4	29.9	36.8	52.8	96.1	126.1	157	147.6	120	88.7	37.6	31.3	78.85
1974	18.1	26	42.2	55.4	83.2	121.4	155.2	139.9	111.5	87.9	48.2	26.3	76.27
1975	23.1	23.1	39.7	72	87.6	123.5	151.7	141	118.5	84.4	46.8	26.7	78.17
1976	24.9	19.2	37.9	54.9	91.7	119.9	144.5	134.1	102.2	83.4	51.7	32.2	74.72
1977	20.2	30.3	36	55.1	94.7	123.5	164.2	152.1	112.4	71.4	49	25.9	77.91
1978	25.1	27.2	37.8	53.4	99.8	125	165.4	135.5	102.1	84.8	39.8	31.8	77.31
1979	25.5	29.9	40	58.1	88	132	151.7	135	113.8	81.4	56.1	28.1	78.29
1980	20.7	21.1	33.8	53.6	86	119.9	145.7	146.7	101.8	79.2	49.7	30.2	74.04
1981	22	22	41.9	59.8	75.3	132	151.1	148.7	113.4	89.1	39.1	33.8	77.34
1982	26.1	18.5	28.2	59.1	86.2	119.3	140.2	142.1	114.8	82.5	37.4	24.9	73.27
1983	16	16.2	29.2	51.8	88.9	117.8	149.9	140.4	107.4	71.8	52.9	31.5	72.83
1984	24.9	26.7	35.9	51	94.9	119.9	145.7	134.7	108.5	83.8	42.2	24.1	74.35
1985	28.5	18.3	34.7	56.4	96.1	121.9	147.6	156.7	112.4	70.4	50.9	30.2	77.02
1986	25.9	25.6	40.5	70.5	81.5	129.3	140.8	145.9	121.9	78	38.3	26.9	77.09
1987	28.1	29.9	24.5	48.1	83.2	120.3	156.4	149.3	118.1	78.7	44.1	30	75.90
1988	24.7	24.5	32.6	58.6	98.6	129.3	182.8	156.4	116.8	76.6	36.5	26.7	80.33
1989	16.2	20.2	36.8	77.4	103.6	118.3	154	142.1	111.1	72.9	46.5	28.5	77.29
1990	19.5	23.3	37.3	57.4	89.3	121.9	148.8	144.8	107.9	87.2	54.1	34.5	77.15
1991	23.5	24	44.4	62.2	87.1	122.4	143	143.7	112	86.4	47.3	23.2	76.61
1992	16.7	13.7	27.4	51.7	83.8	118.9	144	151.8	109.8	83.4	46.4	19.2	72.23
1993	18.1	15.9	31.5	53.8	80.3	128.2	154	151	109.7	102.8	44.9	33.5	76.98
1994	30.7	25.2	33.5	66.1	99.3	125	151.1	156.7	132.2	103.6	42.8	22.5	82.39
1995	24.1	24.6	37.6	50.6	90.2	134.1	157	149.3	110.6	75.8	34.3	25.1	76.10
1996	21.6	26.3	34.8	47.6	100.4	131.5	155	150.6	113	73.4	55.1	36.1	78.79
1997	25.9	18.3	29.6	44.2	91.5	127.7	163.6	130.2	103.4	80.2	49.3	31.3	74.60
1998	22.6	24.8	32.2	65.4	96.5	134.1	162.4	171.5	117.6	88.7	56.1	33.1	83.76
1999	30	25.6	38.3	58.1	103.1	134.1	161.8	159.1	120.4	88.7	48.7	37.5	83.79
2000	19	22.2	30.7	61	94.9	145.9	176.4	155.2	118.6	81.9	49.7	31.3	82.22
2001	27.3	26.4	52.2	65	101.7	129.8	156.4	155.6	115.2	83.3	46.8	29.6	82.43
2002	19	28.2	45	55.1	88.4	134.7	171	156.2	117.1	87.2	53.2	28.3	81.94
2003	31.8	19.7	31.8	55.4	119.4	134.7	164.8	159.1	115.2	85.6	50.1	33.3	83.40
2004	22.8	23.5	40.4	57.2	89	126.7	159.8	145.6	114.9	93.3	50.8	27.3	79.27
2005	25.7	23.3	39.1	59.1	90.2	121.4	158.2	150.4	115.7	72.9	41.6	31.1	77.38

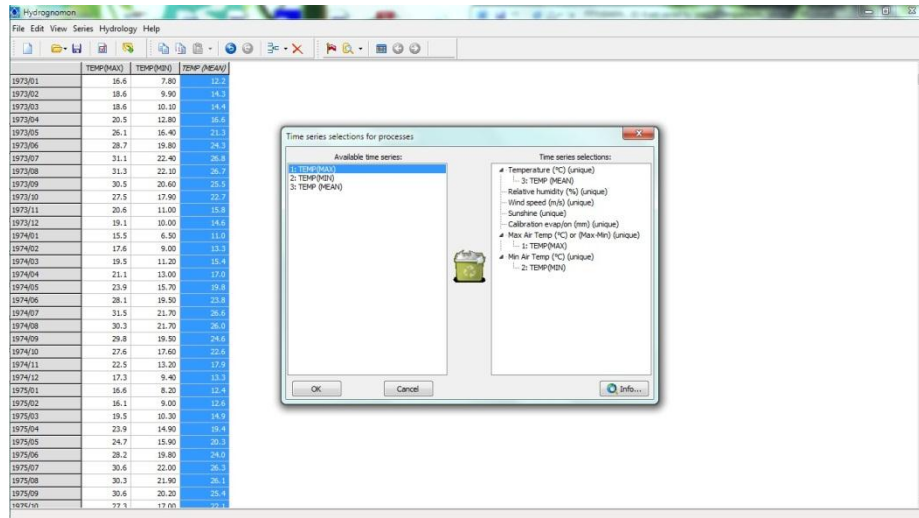
2006	23.1	23.9	36.5	58.1	91.1	127.1	151.7	151	118.1	81.7	38.1	25.7	77.17
2007	22	24.8	37.3	52.5	101.2	139.1	170.4	153.9	112.9	86.8	49	28.8	81.54
2008	18.6	20.9	47.8	65.9	90.4	139.1	159.8	158.7	115.8	80	55.1	31.5	81.97
2009	28.1	25.8	34	59.4	90.2	142.4	167.9	157.9	114.3	94.8	48.2	35.4	83019
2010	31.8	29.5	46.2	64	98.8	133.6	155.2	177.6	128.7	89.9	58.5	40.9	87.89
2011	27.7	26.2	37.3	57.4	92	131.4	162.4	157.3	120	81	38.6	28.8	79.99
MEAN	23.64	23.71	36.75	57.81	92.42	127.77	156.37	149.62	114.10	83.42	46.81	29.67	



Διάγραμμα 5.3: Σχηματική παράσταση μέσης μηνιαίας δυνητικής εξατμισοδιαπνοής Thornthwaite

Μέθοδος Hargreaves

Σε αυτή την μέθοδο ακολουθούνται τα ίδια βήματα με την μέθοδο Thornthwaite, με τη μόνη διαφορά ότι τα δεδομένα εισαγωγής για τον υπολογισμό της μέσης μηνιαίας δυνητικής εξατμισοδιαπνοής είναι περισσότερα. Προσθέτονται οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές θερμοκρασίας για τον υπολογισμό με την μέθοδο Hargreaves.



Εικόνα 5.6: Αντιστοίχιση διαθέσιμων χρονοσειρών με τα “Temperature”, “Max Air Temp”, και “Min Air Temp”

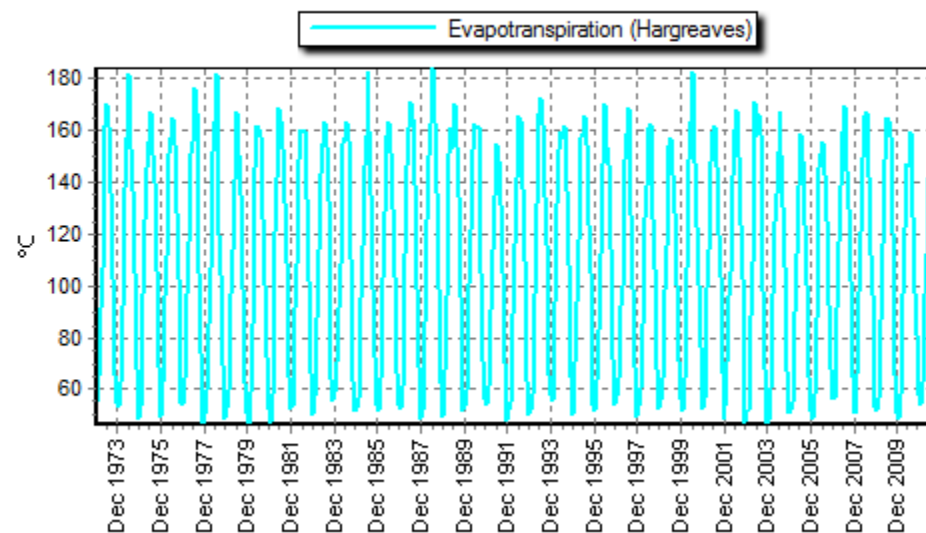
Ακολουθώντας τα ίδια βήματα, τα αποτελέσματα της μεθόδου Hargreaves εμφανίζονται στο παρακάτω πίνακα και διάγραμμα .

Πίνακας 5.5: Μέση μηνιαία δυνητική εξατμισοδιαπνοή Hargreaves κατά τη μέθοδο για την περίοδο 1973-2011

ΜΕΘΟΔΟΣ HARGREAVES

	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC	MEAN
1973	54.8	65.1	91	106.6	158.1	161.5	170	161.5	136.1	103	66.1	55.2	110.75
1974	53.7	62.9	92.1	111.1	138.1	156.7	181.9	152.9	136.8	105.4	68.3	48.9	109.07
1975	53.6	54.8	97	125.5	145.8	155.2	167.3	151.2	139.8	106.2	69.2	49.8	109.61
1976	52.2	62.8	96.2	111.3	150.7	157.3	164.9	154.9	128.3	102.6	74.7	55.3	109.27
1977	53.9	64.3	96.5	116.7	150.5	155.2	176.7	167	125.6	105.1	74.4	46.5	111.03
1978	50.3	59.8	84.8	106.9	151.4	163.3	181.6	157.9	120.1	104.4	69.9	49.1	108.29
1979	52.9	59.4	96.5	113.9	140.9	157.9	167.3	150.5	135.1	98.9	63.1	51.4	107.31
1980	46.6	58.8	84.9	102.4	145.4	161.6	160.7	157.5	125.8	100.7	72.7	52.8	105.82
1981	47.5	57.9	91.3	120.4	141.8	168.8	163.7	153.3	132.5	108.9	64.9	52.5	108.63
1982	55.9	54.5	91	108.4	148.2	160.3	159.3	159.8	133.8	102.5	66.5	51.8	107.66
1983	50	57.6	87.8	113.6	143.3	154.4	163.3	154.1	133.1	101	64.6	55.6	106.54
1984	58.6	70.2	91.2	108	154.9	157.3	163	156	130.3	110.8	63.3	52.1	109.64
1985	52.8	56.6	95.2	115.6	146	157.9	182.8	159.9	135.5	99.3	72.8	54.4	110.72
1986	52.2	64.6	103.3	128.3	145.3	158.1	162.9	151.5	130	103.6	66.8	54	110.04
1987	52.6	61.4	85.7	111.8	146	160.6	171	165.1	138.9	98.8	69.2	48.6	109.14
1988	51.8	61.3	86.3	125.3	150.2	162.6	184.1	163.4	136	99.2	62.7	49.7	111.05
1989	54.9	67.5	96.2	150.9	161	153.5	170.3	153.6	134.3	95.7	66	51.6	112.95
1990	53.5	59.9	100.4	121.8	152.4	162.2	160.7	161.7	124.3	105.1	71.4	56.2	110.8
1991	54.5	61.2	90.4	113.9	134.4	154.9	149.7	148.7	131.3	104.9	70.3	47.8	105.16
1992	51.8	55.2	88.7	116.4	141.6	150.5	165.9	164.2	137.9	110	63.7	50.4	108.03
1993	52.1	58.3	96.6	122.5	131.9	166.5	172.6	162.5	134.7	116.1	65.5	58.2	111.44
1994	56	59.9	93.9	131.3	152.3	159	156.7	162	137.1	108.4	64.8	50.4	110.98
1995	54.3	70.7	93.3	117.8	156.7	158.6	165.4	154.6	123.4	105.4	64.1	54.4	109.88
1996	52.1	63.5	82.6	112.1	146.8	169.8	154	146.9	114.8	97.6	72.2	53.9	105.52
1997	57.1	64.3	91.8	99.5	148.3	158.7	168.4	137.4	127.8	99.2	68.6	49.8	105.92
1998	53.7	60.6	84.8	126.1	138.8	160.8	161	162.8	126.2	106.9	67.9	52.7	108.52
1999	55.4	64.6	98.3	115.5	153.7	151.8	157.2	142.8	128.7	100.4	71.2	56.8	108.03
2000	52.2	63.9	91.8	107.1	148.9	163.3	182.3	148.1	123.2	100.8	76.2	52.8	109.21
2001	56.4	64	99.1	113.4	148	159.4	161.7	146.5	119.6	104	66.5	48.5	107.25
2002	53.7	70.7	96.1	105.1	142.1	159.8	168.1	149.9	123.5	102.5	73.5	47.3	107.69
2003	51.7	51.9	88.5	109.4	170.9	157.6	166.4	158.3	123	98.2	68.4	46.8	107.59

2004	47.8	60.4	96.7	124.6	135.4	151.9	167.1	150.9	130.6	107.4	67.7	51	107.61
2005	51.7	55.3	90.1	111.8	138.6	150.1	158.6	148.4	124	100.7	64.8	51.7	103.83
2006	48.7	57.9	87.5	110.5	145.1	150.8	155.6	143	125.5	93.2	68	56.4	103.53
2007	56.2	58.8	91.2	117.1	138.3	159	169.1	144.9	129.9	101.8	65.3	51.3	106.91
2008	52	65.5	97.3	121	149.1	165.7	167.1	142.3	112	97.1	69.4	53.2	107.65
2009	51.8	56.8	86.3	116.1	148.8	164.5	163.7	158	121	106.7	65.6	51	107.53
2010	49.1	58.3	96.6	122.2	147	145.9	159	157.7	126.7	97.4	81.4	57.8	108.26
2011	54.1	62.6	96.5	111.9	141.4	154.4	165.7	156.8	129.4	96.9	64.7	55	107.45
MEAN	52.83	61.12	92.45	115.99	146.87	158.4	166.33	154.32	128.89	102.73	68.37	52.11	



Διάγραμμα 5.4: Σχηματική παράσταση μέσης μηνιαίας δυνητικής εξατμισοδιαπνοής Hargreaves

Από τους παραπάνω πίνακες φαίνεται ότι οι τιμές της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής από τη μέθοδο Thornthwaite είναι διαφορετικές από τις τιμές που προκύπτουν με τη μέθοδο Hargreaves. Η διαφορά στις τιμές πιθανόν να οφείλεται σε κάποια μειονεκτήματα που παρουσιάζει η μέθοδος Thornthwaite, αφού η υπολογιζόμενη *ET* υποεκτιμάται όταν η ακτινοβολία που προσλαμβάνει η γη έχει τη μέγιστη τιμή της κατά την περίοδο του καλοκαιριού και αυτό συνεπάγεται να είναι και εκτός φάσης το φθινόπωρο. Σύμφωνα με τους Van Wijk, D.A Devries (1954) και Pelton *et al* (1960) το πιο πάνω είναι βάσιμο στη χρονική υστέρηση που παρουσιάζει η ετήσια πορεία της θερμοκρασίας ως προς την ακτινοβολία. Η μέθοδος Thornthwaite δείχνει υποεκτίμηση της *ET* στα ξηρά και ημίξηρα κλίματα, σε αντίθεση με τη μέθοδο Hargreaves η οποία υπερεκτιμά την *ET*.

Μετά την επεξεργασία των αποτελεσμάτων για την *ET* του προγράμματος 'Υδρογνώμων', θα κρατήσουμε τις τιμές Thornthwaite.

Πίνακας 5.6. Μέσος όρος των μέσων μηνιαίων τιμών της δυνητικής εξατμισοδιαπνοής των δύο μεθόδων.

ΜΕΣΗ ΜΗΝΙΑΙΑ ΔΥΝΗΤΙΚΗ ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗ												
Thornthwaite	23.64	23.71	36.75	57.81	92.42	127.77	156.37	149.62	114.10	83.42	46.81	29.67
Hargreaves	52.83	61.12	92.45	115.99	146.87	158.4	166.33	154.32	128.89	102.73	68.37	52.11
M.O	38,24	42,42	64,60	86,90	119,65	143,09	161,35	151,97	121,50	93,08	57,59	40,89

Το ετήσιο ύψος δυνητικής εξατμισοδιαπνοής παρουσιάζεται μετά από επεξεργασία των δεδομένων στον πιο κάτω πίνακα:

Πίνακας 5.7: Μέση υπερετήσια δυνητική εξατμισοδιαπνοή με τις μεθόδους Thornthwaite, Hargreaves

ΕΤΗΣΙΑ ΔΥΝΗΤΙΚΗ ΕΞΑΤΜΙΣΟΔΙΑΠΝΟΗ		
ΕΤΟΣ	THORNTHWAITE	HARGREAVES
1973	946.3	1329
1974	915.3	1308.8
1975	938.1	1315.4
1976	896.6	1311.2
1977	934.8	1332.4
1978	927.7	1299.5
1979	939.6	1287.8
1980	888.4	1269.9
1981	928.2	1303.5
1982	879.3	1292
1983	873.8	1278.4
1984	892.3	1315.7
1985	924.1	1328.8
1986	925.1	1320.6
1987	910.7	1309.7
1988	964.1	1332.6
1989	927.6	1355.5
1990	926	1329.6
1991	919.2	1262
1992	866.8	1296.3
1993	923.7	1337.5
1994	988.7	1331.8
1995	913.3	1318.7
1996	945.4	1266.3
1997	895.2	1270.9
1998	1005	1302.3
1999	1005.4	1296.4
2000	986.8	1310.6
2001	989.3	1287.1
2002	983.4	1292.3
2003	1000.9	1291.1
2004	951.3	1291.5
2005	928.7	1245.8
2006	926.1	1242.2
2007	978.7	1282.9
2008	983.6	1291.7
2009	998.4	1290.3
2010	1054.7	1299.1
2011	960.1	1289.4
ΜΕΣΗ ΥΠΗΡΕΤΗΣΙΑ	942.12	1300.43

Ως μέση υπερετήσια τιμή δυνητικής εξατμισοδιαπνοής ορίζεται ο μέσος όρος των τιμών των δύο μεθόδων, Thornthwaite και Hargreaves, που είναι ίσος με:

$$ET = \frac{942.12 + 1300.43}{2} = 1121.273$$

Έτσι, η μέση ετήσια δυνητική εξατμισοδιαπνοή στον υδροφορέα Ακρωτηρίου του οποίου η έκταση είναι ίση με $E=50500000 \text{ m}^2$, ισούται με:

$$ET(m^3) = ET(m) * E(m^2) \Rightarrow$$

$$ET(m^3) = 1.12127m * 50500000m^2 \Rightarrow$$

$$ET = 56624286.5m^3 = 56 * 10^6 m^3$$

Προχωρώντας στην εφαρμογή της μεθόδου Thornthwaite – Mather χρειάζονται κάποια δεδομένα τα οποία θεωρούνται απαραίτητα και είναι τα εξής:

- Η διαθέσιμη Υδατοϊκανότητα της εδαφικής κατατομής (σε mm)
- Μηνιαίες τιμές ύψους βροχής (σε mm)
- Επιφανειακή απορροή (%)
- Δυνητική εξατμισοδιαπνοή (σε mm)
- Συντελεστές βλάστησης (Kc)

Σε αυτό το σημείο αξίζει να αναφερθεί ότι η διαθέσιμη υδατοϊκανότητα της εδαφικής κατατομής υπολογίζεται ως η διαφορά μεταξύ της υδατοϊκανότητας FC (Field Capacity) και του σημείου μάρανσης WP (Wilting Point).

Επίσης, όταν το έδαφος κορεστεί με νερό, είτε από βροχή, είτε από άρδευση συνεπάγεται ότι έχει υγρασία θ_s , η οποία μειώνεται με τους μηχανισμούς της εξατμισοδιαπνοής και της κατακόρυφης διήθησης, μέχρι να φτάσει στη χαρακτηριστική τιμή θ_f , γνωστή ως υδατοϊκανότητα- Field Capacity, FC. Η μείωση της εδαφικής υγρασίας συνεχίζεται μέχρι η περιεκτικότητα του εδάφους σε νερό φτάσει στο σημείο θ_d , το οποίο

αντιστοιχεί στο 50-80% της τιμής θ_f . Η υδραυλική αγωγιμότητα και ο ρυθμός απομάκρυνσης του νερού αρχίζουν να μειώνονται ώσπου η περιεκτικότητά του σε νερό φτάσει στο σημείο θ_w , το σημείο μάρανσης (Wilting Point-WP). Στο σημείο μάρανσης, το φυτό δεν μπορεί να απορροφήσει νερό από το έδαφος και έτσι αρχίζει να μαραίνεται (Γιαννουλόπουλος, 2000).

Από δημοσίευση του Οργανισμού Τροφίμων και Γεωργίας των Ηνωμένων Εθνών (FAO), ο συντελεστής βλάστησης K_c για περιοχές στις οποίες επικρατούν οι θαμνώδεις εκτάσεις, κατέληξε στο συμπέρασμα ότι είναι ίσος με 0.45. Τα εδάφη χωρίζονται γενικά σε βαρεία, αν η περιεκτικότητα αργίλου είναι >35%, σε μέσης σύστασης, αν η περιεκτικότητα αργίλου κυμαίνεται μεταξύ 20-34% και η περιεκτικότητα της ιλύος < 40% και σε αμμώδη ή ελαφριά, αν η περιεκτικότητα αργίλου είναι <20% και της ιλύος < 30%. Έτσι, από τα εδαφικά χαρακτηριστικά του υδροφορέα Ακρωτηρίου που έχουν αναλυθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο προκύπτει ο πιο κάτω πίνακας:

Πίνακας 5.8: Υδατοϊκανότητα, σημείο μάρανσης και διαθέσιμο νερό εδάφους (Πηγή: I.A.C.O, 2008)

Εδαφικός Τύπος	Υδατοϊκανότητα (FC)%	Σημείο Μάρανσης (WP)%	Διαθέσιμο νερό
	Μέση τιμή	Μέση τιμή	Μέση τιμή
Μέσης σύστασης	27	15	12
Βαρεία	34	21	13
Μέση τιμή	30.5	18	12.5

Οι παραπάνω μέσες τιμές πολλαπλασιάζονται με το βάθος ριζοστρώματος που εκτιμάται ότι είναι ίσο με 1000mm και έτσι προκύπτουν τα τελικά δεδομένα που εισάγονται στο λογισμικό. Με βάση τα δεδομένα για το υδατικό ισοζύγιο της περιοχής και με τη βοήθεια του WTRBLN, πρόγραμμα το οποίο συντάχθηκε από τον διδάκτορα, Κουράκο Γεώργιο σε περιβάλλον Matlab, υπολογίστηκε η κατείσδυση.

Το πρόγραμμα WTRBLN (N.H.W Donker, 1987) υπολογίζει το υδατικό ισοζύγιο με βάση μακροχρόνιους μηνιαίους μέσους όρους κατακρημνίσεων και δυνητικής εξατμισοδιαπνοής .

Τα δεδομένα του προγράμματος είναι τα ακόλουθα:

- ✓ Μέσες μηνιαίες τιμές βροχόπτωσης, δυνητικής εξατμισοδιαπνοής
- ✓ Μέσες μηνιαίες τιμές επιφανειακής απορροής
- ✓ Τιμή του διαθέσιμου νερού της εδαφικής κατατομής όπου υπολογίζεται ως διαφορά μεταξύ της υδατοϊκανότητας και του σημείου μάρανσης.

Οι υπολογισμοί στο πρόγραμμα ακολουθούν τη μέθοδο Thornthwaite-Mather. Τα δεδομένα τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της κατείσδυσης παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 5.9: Δεδομένα εισόδου στο WTRBLN

F C (mm)	W P (mm)			
305	125			
P-Βροχόπτωση(mm)	RO-Επιφ. Απορροή(mm)	PE-Δυν.Εξατμισοδιαπνοή(mm)	Kc(%)	
87.05	8.71	23.64	0.45	
72.56	7.23	23.71	0.45	
37.09	3.71	36.75	0.45	
15.84	1.58	57.81	0.45	
3.96	0.40	92.42	0.45	
0.92	0.09	127.77	0.45	
0.05	0.01	156.37	0.45	
0	0	149.62	0.45	
1.63	0.16	114.10	0.45	
18.42	1.84	83.42	0.45	
50.59	5.06	46.81	0.45	
93.75	9.38	29.67	0.45	

Καταχωρώντας τα πιο πάνω δεδομένα στο πρόγραμμα WRBTLN, προέκυψαν τα ακόλουθα αποτελέσματα:

Πίνακας 5.10: Δεδομένα εξόδου στο WTRBLN για τον υπολογισμό της κατείσδυσης

ΜΗΝΑΣ	Ac _{pw} l	A _{et}	D	Det	D _{sm}	D _t	K _c	P
ΙΑΝ	0	10.638	0	-2.7369e-06	67.7020	8.7100	0.45	87.05
ΦΕΒ	0	10.6695	0	-5.3630	33.2084	7.2300	0.45	72.56
ΜΑΡ	0	16.5375	0	-2.8699	0	3.7100	0.45	37.09
ΑΠΡ	-11.7545	25.7909	0.2237	0.7175	-11.5309	1.5800	0.45	15.84
ΜΑΙΟΣ	-49.7835	37.9620	3.6270	-0.1794	-34.4020	0.4000	0.45	3.96
ΙΟΥΝ	-106.4500	44.7557	12.7408	0.0448	-43.9257	0.0900	0.45	0.92
ΙΟΥΛ	-176.7765	44.3432	26.0233	-0.0112	-44.3032	0.0100	0.45	0.05
ΑΥΓ	-244.1055	33.8402	33.4888	0.0028	-33.8402	0	0.45	0
ΣΕΠ	-293.9805	22.1367	29.2082	-0.0007	-20.6667	0.1600	0.45	1.63
ΟΚΤ	-314.9395	24.3056	13.2334	0.0002	-7.72557	1.8400	0.45	18.42
ΝΟΕ	0	21.0645	0	-4.3791e-05	24.4655	5.0600	0.45	50.59
ΔΕΚ	0	13.3515	0	1.0948e-05	71.0185	9.3800	0.45	93.75
ΕΤΟΣ	0	305.3954	118.545	0		38.1700		381.86

ΜΗΝΑΣ	P _{et}	P _{etr}	Pr _{petr}	R _o	Rot	S	Sm
ΙΑΝ	23.64	10.638	67.702	1.36846e-05	8.71001	0	271.79163
ΦΕΒ	23.71	10.6695	54.661	26.81516	34.04516	21.4521	305
ΜΑΡ	36.75	16.5375	16.843	14.34933	18.05933	16.8425	305
ΑΠΡ	57.81	26.0145	-11.755	-3.587334	-2.007333	0	293.46912
ΜΑΙΟΣ	92.42	41.5890	-38.029	0.896833	1.296833	0	259.06712
ΙΟΥΝ	127.77	57.4965	-56.667	-0.224208	-0.134208	0	215.14138
ΙΟΥΛ	156.37	70.3665	-70.327	0.0560521	0.066052	0	170.83816
ΑΥΓ	149.62	67.3290	-67.329	-0.0140130	-0.01401	0	136.99794
ΣΕΠ	114.10	51.3450	-49.875	0.0035033	0.163503	0	116.33120
ΟΚΤ	83.42	37.5390	-20.959	-0.0008758	1.839124	0	108.60563
ΝΟΕ	46.81	21.0645	24.4656	0.00021895	5.060219	0	133.07113
ΔΕΚ	29.67	13.3515	71.0185	-5.47384e-05	9.379945	0	204.08963
ΕΤΟΣ	942.09	423.941	-80.2505	38.294633	76.46463	38.2946	0

Όπου:

Acpwl (accumulated potential water loss): αθροιστική πιθανή απώλεια νερού

Aet (actual evapotranspiration): πραγματική εξατμισοδιαπνοή

D (soil moisture deficit): έλλειμμα εδαφικής υγρασίας

Det (detention): κατακράτηση

Dsm (change in soil moisture during the month indicated): μεταβολή εδαφικής υγρασίας κατά τη διάρκεια του μήνα

Kc (crop coefficient): συντελεστής φυτοκάλυψης

P (precipitation): η βροχόπτωση που εισάγουμε

Pet (potential evapotranspiration): δυνητική εξατμισοδιαπνοή που εισάγουμε στο πρόγραμμα

Petr (reference potential evapotranspiration): σχετική δυνητική εξατμισοδιαπνοή

Pr – Petr (precipitation minus direct runoff minus crop potential evapotranspiration): βροχόπτωση μείον άμεση απορροή μείον δυνητική εξατμισοδιαπνοή καλλιέργειας

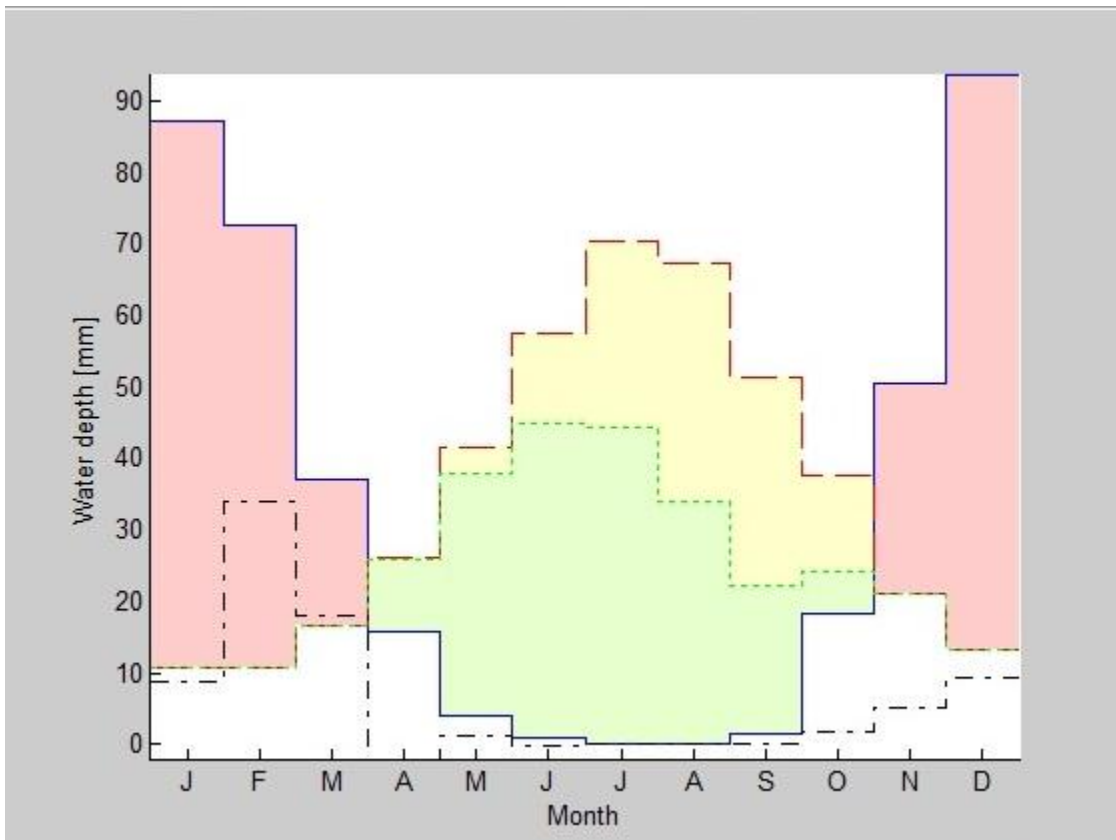
Ro (runoff without direct runoff): απορροή χωρίς την άμεση απορροή που εισάγουμε στο πρόγραμμα

Rot (runoff including direct runoff) : απορροή που περιέχει και την άμεση απορροή

Sm (soil moisture): εδαφική υγρασία

S (moisture surplus): π – κατείσδυση

Σχηματικά το πρόγραμμα δίνει το παρακάτω αποτέλεσμα:



Εικόνα 5.7 :Σχηματική παράσταση συνιστωσών υδατικού ισοζυγίου , υπολογισμένων με τη μέθοδο Thornthwaite-Mather.

Η πιο πάνω εικόνα παρουσιάζει το ροζ χρώμα ως το πλεόνασμα της υγρασίας στο έδαφος και την ποσότητα που κατεισδύει για την τροφοδότηση των αποθεμάτων του υπόγειου υδροφορέα. Το κίτρινο χρώμα είναι το έλλειμμα της εδαφικής υγρασίας το οποίο είναι εμφανές για το χρονικό διάστημα Μαΐου-Οκτωβρίου και το πράσινο αντιστοιχεί στη χρησιμοποίηση της εδαφικής υγρασίας από το έδαφος. Η μπλε γραμμή συμβολίζει τη βροχόπτωση που εισάγεται στο πρόγραμμα, η πράσινη διακεκομμένη είναι η πραγματική εξατμισοδιαπνοή, η κόκκινη διακεκομμένη είναι η δυνητική εξατμισοδιαπνοή της καλλιέργειας και η μαύρη αξονική είναι η στήλη –Rot- απορροή που υπολογίζει το πρόγραμμα προσθέτοντας την απορροή που εισάγεται (Dt) με τη στήλη (Ro). Από την εικόνα 5.7, μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι κατείσδυση

νερού στον υδροφορέα μας επικρατεί τους μήνες Φεβρουάριο και Μάρτιο. Οι μήνες Μάιος έως και τον Οκτώβριο οδηγούν στο έλλειμμα ύδατος, λόγω του ότι οι βροχοπτώσεις είναι λιγοστές ή και ανύπαρκτες με αποτέλεσμα η εξατμισοδιαπνοή και οι αυξημένες αντλήσεις να τις υπερκαλύπτουν. Τον Νοέμβριο και το Δεκέμβριο οι βροχές αρχίζουν να κάνουν την εμφάνισή τους και έτσι το έδαφος αρχίζει να συγκεντρώνει νερό για να ξεκινήσει η κατείσδυση από το Δεκέμβριο.

ΜΗΝΑΣ	Κατείσδυση (mm)
ΙΑΝ	0
ΦΕΒ	21.4521
ΜΑΡ	16.8425
ΑΠΡ	0
ΜΑΙΟΣ	0
ΙΟΥΝ	0
ΙΟΥΛ	0
ΑΥΓ	0
ΣΕΠ	0
ΟΚΤ	0
ΝΟΕ	0
ΔΕΚ	0
ΕΤΟΣ	38.2946

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

$$RCH(m^3) = RCH(m) * E(m^2) \Rightarrow$$

$$RCH(m^3) = 0.0382946 * 50500000m^2 \Rightarrow$$

$$RCH = 1933877.3 = 1.93 * 10^6 m^3 / \acute{\epsilon}τος$$

5.6.2 Υπολογισμός κατείσδυσης με χρήση εμπειρικών συντελεστών

Η μέση βροχόπτωση για τον υδροφορέα Ακρωτηρίου για το χρονικό διάστημα που εξετάζουμε είναι ίση με :

$$P = 0.03854m * 50500000m^2 = 1946270m^3 = 19.46 * 10^5 m^3 / \acute{\epsilon}τος$$

Όπως έχουμε αναφέρει στα προηγούμενα κεφάλαια, ο υδροφορέας Ακρωτηρίου αναπτύσσεται σε αλλουβιακές αποθέσεις που αποτελούνται από άμμους, χαλίκια, ψαμμίτες, ιλύες και μάργες. Έτσι, η κατείσδυση στα πετρώματα τα οποία καλύπτουν το έδαφος της περιοχής του υδροφορέα κυμαίνεται από 16- 21% της συνολικής βροχόπτωσης. Υποθέτουμε ότι στην υπό εξέταση περιοχή, η κατείσδυση αποτελεί το 18% της βροχόπτωσης οπότε προκύπτει ότι:

$$RCH = 0.18 * 19.46 * 10^5 = 3.5 * 10^5 m^3 / \acute{\epsilon}τος$$

5.7 Συμπεράσματα

Στο παρών κεφάλαιο, προσδιορίζοντας συνιστώσες του υδατικού ισοζυγίου για τον υδροφορέα που μελετάται για τη χρονική περίοδο 1973-2011, προκύπτουν αποτελέσματα που είναι εξέχουσας σημασίας. Από τις δύο διαθέσιμες εμπειρικές μεθόδους, χρησιμοποιήθηκε και έγιναν αποδεκτά τα αποτελέσματα της μεθόδου Thornthwaite – Mather, λόγω του ότι λογαριάζει κατείσδυση με περισσότερες παραμέτρους. Το αποτέλεσμα με τη μέθοδο αυτή είναι $1.93 * 10^6 m^3/\acute{\epsilon}τος$ το οποίο θεωρείται ικανοποιητικό, όμως επειδή η μέθοδος αυτή όπως προαναφέρθηκε υποεκτιμά, υπολογίστηκε η κατείσδυση και με τη χρήση των εμπειρικών συντελεστών. Αναπτυσσόμενος σε αλλουβιακές αποθέσεις ο υδροφορέας Ακρωτηρίου, θεωρείται ότι η τιμή της κατείσδυσης στα πετρώματα από τα οποία είναι καλυμμένο το έδαφος της περιοχής είναι 18%, τιμή που είναι αυθαίρετη. Το αποτέλεσμα που προέκυψε από αυτή τη μέθοδο είναι $3.5 * 10^5 m^3/\acute{\epsilon}τος$, τιμή που είναι 5,4 φορές μικρότερη από την μέθοδο Thornthwaite.

Υπάρχει έλλειμμα ύδατος λόγω το ότι οι βροχοπτώσεις είναι λιγιστές ή και ανύπαρκτες, με αποτέλεσμα η εξατμισοδιαπνοή και οι αυξημένες αντλήσεις να τις υπερκαλύπτουν. Επίσης, η μέθοδος αυτή προσφέρει μια καλή εκτίμηση του νερού που κατεισδύει για να

εμπλουτίσει τον υδροφορέα Ακρωτηρίου. Οι ποσότητες που έχουν υπολογιστεί δεν μπορούν όμως να αξιοποιηθούν στο σύνολό τους για μερικούς λόγους. Ένας από αυτούς αφορά τις απώλειες προς τη θάλασσα και την υφαλμύρωση λόγω των αντλήσεων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

6. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

6.1 Γενικά

Η προσομοίωση ενός παράκτιου υδροφορέα θεωρείται ως μία σύνθετη διαδικασία λόγω της ύπαρξης του θαλασσινού νερού το οποίο έχει μεγαλύτερη πυκνότητα και ειδικό βάρος σε σύγκριση με το γλυκό νερό. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να εμποδίζεται η κίνηση του γλυκού νερού προς τη θάλασσα. Για την προσομοίωση του παράκτιου υδροφορέα Ακρωτηρίου χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο Mantoglou *et al* (2004), το οποίο χρησιμοποιεί το αριθμητικό μοντέλο πεπερασμένων διαφορών Modflow για τον υπολογισμό των τιμών δυναμικού, σύμφωνα με την ανάλυση κατά Strack. Στη συνέχεια, με τη χρήση του προγράμματος Matlab και την βοήθεια της εξίσωσης Ghyben-Herzberg επιτυγχάνεται ο υπολογισμός της θέσης και της μορφής της διεπιφάνειας γλυκού και αλμυρού νερού.

6.2 Ο κώδικας Modflow

Ο κώδικας ή το λογισμικό Modflow είναι ένα μαθηματικό αριθμητικό μοντέλο πεπερασμένων διαφορών. Επιλύει την εξίσωση της συνέχειας στα υπόγεια νερά σε τρεις διαστάσεις σύμφωνα με το νόμο του *Darcy* σε συνθήκες σταθερής και ασταθούς ροής. Επίσης, έχει τη δυνατότητα προσομοίωσης ποικίλων υδρογεωλογικών περιβαλλόντων και οριακών συνθηκών, προσομοιώνει δισδιάστατη οριζόντια ή κατακόρυφη ροή, ημι-τρισδιάστατη και τρισδιάστατη ροή σε συνθήκες σταθερής ή ασταθούς ροής και σε ανισότροπους, ετερογενείς και επάλληλους (layered) υδροφόρους. Το Modflow (A Modular three-dimensional finite-difference groundwater flow model) έχει αναπτυχθεί από το φορέα Γεωλογικών Ερευνών των Ηνωμένων Πολιτειών Αμερικής (United States Geological Survey-USGS), από τους McDonald & Harbaugh (1988) και αποτελεί σήμερα το ευρύτερο διαδεδομένο μοντέλο για την προσομοίωση της ροής των υπόγειων νερών. Επίσης έχει εφαρμοστεί σε πολυάριθμες μελέτες (Wurbs, 1995).

Η υπόγεια ροή περιγράφεται από σύνθετες, μη γραμμικές διαφορικές εξισώσεις και στόχος του κώδικα είναι η απλοποίηση των εξισώσεων αυτών και η τροποποίηση τους σε γραμμικές αλγεβρικές εξισώσεις. Επομένως, η περιοχή ενδιαφέροντος χωρίζεται σε

στοιχειώδη κελιά, με μια βασική εξίσωση υπόγειας ροής, η οποία επιλύεται για κάθε ένα από αυτά τα κελιά. Είναι προφανές πως όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των κελιών, τόσο ακριβέστερη είναι η διαδικασία της προσομοίωσης. Σε κάθε κελί λαμβάνεται υπόψη η υδάτινη ισορροπία εισροών και εκροών. Το εξαγόμενο αποτέλεσμα μετά το πέρας των υπολογισμών που προκύπτουν, είναι η κατανομή των υδραυλικών φορτίων σε αντιπροσωπευτικά σημεία του κάθε κελιού.

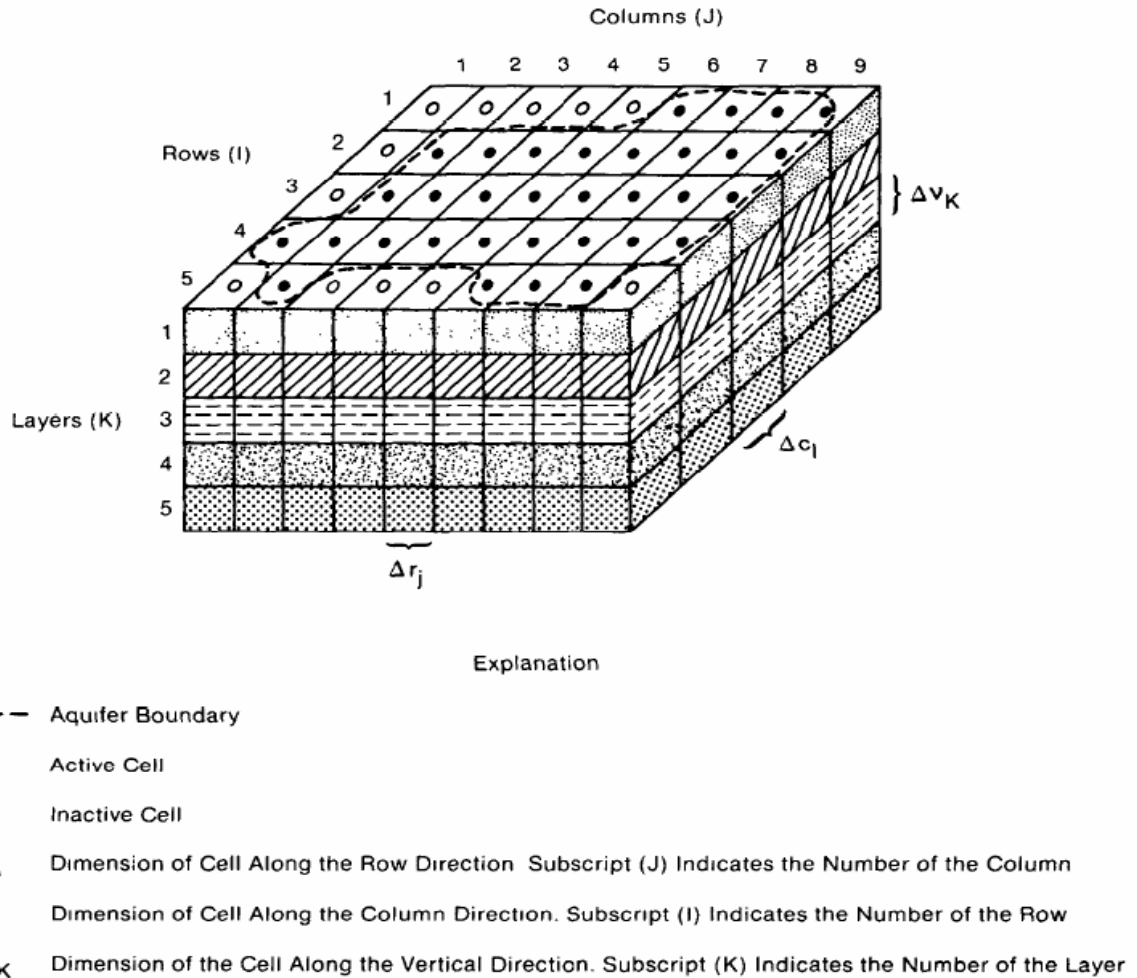
Η δημιουργία ενός αριθμητικού μοντέλου υπόγειων ροών αποτελείται από κάποια επιμέρους στάδια, όπως την ανάπτυξη του εννοιολογικού τοπικού μοντέλου (conceptual site model-CSM), την επιλογή του κώδικα (computer code) ο οποίος προσομοιώνει καλύτερα το σύστημα που εξετάζεται και ικανοποιεί το σκοπό της μοντελοποίησης και τελικά την εφαρμογή του μοντέλου η οποία περιλαμβάνει τον προσδιορισμό της γεωμετρίας του μοντέλου, την εισαγωγή των υδρογεωλογικών παραμέτρων για κάθε κελί, τον προσδιορισμό των οριακών και αρχικών συνθηκών και τον προσδιορισμό εξωτερικών και εσωτερικών υδραυλικών φορτίσεων στο σύστημα (Βογιατζή, 2006). Ανεξάρτητες ενότητες (modules) ομαδοποιημένες σε πακέτα αποτελούν το Modflow και προσομοιώνουν υδρολογικά και υδρογεωλογικά χαρακτηριστικά. Αφού προσεγγιστούν οι σύνθετες διαφορικές εξισώσεις και μετατραπούν σε απλούστερες αλγεβρικές, ακολουθεί η προσομοίωση του παράκτιου υδροφορέα. Προσεγγίζονται οι εξισώσεις που περιγράφουν την υπόγεια ροή εντός του πορώδους μέσου.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (6.1)$$

Ακολουθεί επεξήγηση για την πιο πάνω εξίσωση:

Όπου K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} είναι οι τιμές της υδραυλικής αγωγιμότητας κατά μήκος των αξόνων x, y, z αντίστοιχα σε μονάδες μήκους ανά χρόνο. Το h είναι το υδραυλικό φορτίο σε μονάδες μήκους, W ο όγκος της ροής ανά μονάδα όγκου και αντιπροσωπεύει τις εισροές ή εκροές του νερού προς ή από το σύστημα, S_s είναι η ειδική αποθηκευτικότητα του πορώδους υλικού και t ο χρόνος. Εδώ αξίζει να σημειωθεί ότι η υδραυλική

αγωγιμότητα και η ειδική αποθηκευτικότητα εξαρτώνται από τον χώρο σε αντίθεση με τον όγκο των εισροών ή εκροών που εξαρτάται από το χώρο και το χρόνο αντίστοιχα.



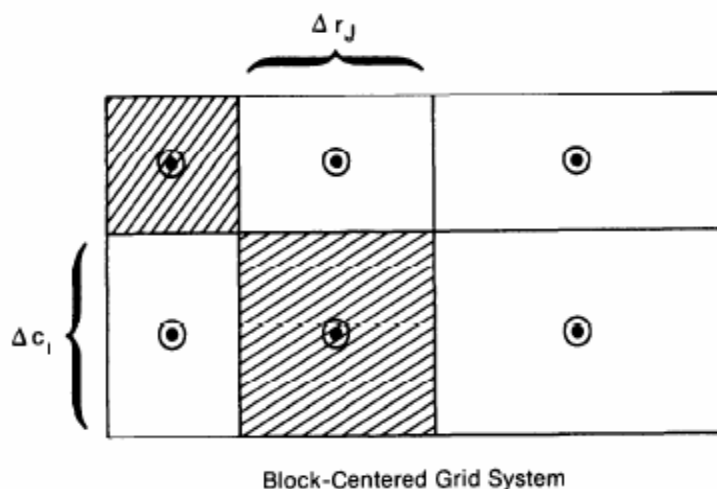
Εικόνα 6.1: Διακριτοποίηση υποθετικού υδροφορέα (Πηγή: McDonald και Harbaugh, 1988)

Ο υδροφορέας όπως επεξεργάζεται στο πρόγραμμα παίρνει την πιο πάνω μορφή όπως φαίνεται στην εικόνα. Παρατηρείται διακριτοποίηση που υφίσταται σε ένα δίκτυο κελιών.

Οι θέσεις τους ορίζονται ως ακολούθως:

- Γραμμή (row)
- Στήλη (column)
- Επίπεδο (Layer)

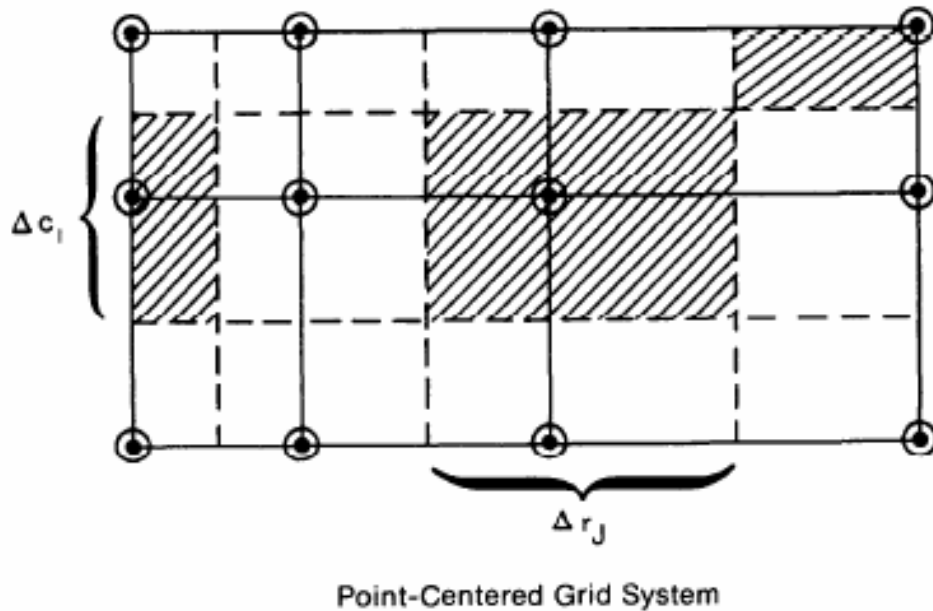
Τα κελιά που είναι εντός του περιγράμματος του υδροφορέα αποτελούν τα ενεργά κελιά κυμαινόμενου δυναμικού το οποίο υπολογίζεται από το μοντέλο. Αντιθέτως, όσα κελιά βρίσκονται εκτός του περιγράμματος λέγονται ανενεργά και ορίζονται ως τα κελιά του σταθερού δυναμικού που περιγράφουν τα όρια του μοντέλου με τιμές που προεπιλέγονται της προσομοίωσης και διατηρούνται σταθερές κατά τη διάρκειά της. Εντός του κάθε κελιού υπάρχει ένα σημείο που λέγεται κόμβος και αναγράφεται η τιμή του υδραυλικού φορτίου, η οποία υπολογίζεται από το πρόγραμμα.



Εικόνα 6.2: Κόμβοι σε σχηματισμό στο κέντρο του κελιού (Πηγή: McDonald και Harbaugh, 1988)

Ο προσδιορισμός της θέσης των κόμβων έχει δύο εκδοχές. Στην πρώτη, η οποία περιγράφεται σχηματικά με την πιο πάνω εικόνα, ο σχηματισμός είναι με κέντρο το κελί,

ενώ στη δεύτερη όπου περιγράφεται παρακάτω, ο σχηματισμός είναι με κέντρο το σημείο.



Εικόνα 6.3: Κόμβοι σε σχηματισμό με κέντρο το σημείο (Πηγή: McDonald και Harbaugh, 1988)

Οι πιο πάνω παραδοχές διαιρούν τον υδροφορέα σε δύο συστήματα από παράλληλες γραμμές, κάθετες μεταξύ τους. Το Modflow χρησιμοποιεί τη δομή με κέντρο το κελί όπου οι κόμβοι είναι τοποθετημένοι στο κέντρο του κάθε κελιού. Η απόσταση των κόμβων πρέπει να επιλέγεται, ούτως ώστε τα υδραυλικά χαρακτηριστικά του συστήματος να είναι όμοια κατά μήκος ενός κελιού. Η ανάπτυξη της εξίσωσης της υπόγειας ροής στην περίπτωση της μεθόδου των πεπερασμένων διαφορών, βασίζεται στην εξίσωση όπου το άθροισμα όλων των ροών προς και από το κελί πρέπει να ισούται με το ρυθμό μεταβολής της αποθηκευτικότητας εντός του κελιού.

Έχοντας την πυκνότητα σταθερή, η εξίσωση συνέχειας που εκφράζει την ισορροπία της ροής για κάθε κελί φαίνεται στην εξής σχέση:

$$E' = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} * \frac{R_n}{\lambda} + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} * F(u) * D \sum Q_i = SS \frac{\Delta h}{\Delta t} \Delta V \quad (6.2)$$

Όπου:

Q_i : είναι η παροχή εντός του κελιού – σε μονάδες όγκου ανά χρόνο

SS : είναι η ειδική αποθηκευτικότητα για τη μέθοδο των πεπερασμένων διαφορών και ορίζεται όμοια με την ειδική αποθηκευτικότητα S_s της διαφορικής εξίσωσης που περιγράφει την υπόγεια ροή, ως τον όγκο του νερού που εισέρχεται ανά μονάδα όγκου του υλικού του υδροφορέα για κάθε μεταβολή του υδραυλικού φορτίου.

ΔV : είναι ο όγκος του κελιού

Δh : είναι μεταβολή του φορτίου για πάροδο του χρόνου Δt

Ο όρος $SS \frac{\Delta h}{\Delta t} \Delta V$ είναι ίσος με τον όγκο του νερού που αποθηκεύεται σε ένα χρονικό διάστημα Δt , δεδομένης της μεταβολής του φορτίου Δt . Για την απλοποίηση της διαδικασίας, οι εκροές αντιμετωπίζονται ως αρνητικές εισροές, ενώ οι ροές που εισέρχονται στα κελιά είναι θετικές. Η ροή σε κάθε κελί υπολογίζεται με το νόμο του Darcy.

Το πρόγραμμα χρησιμοποιεί την εξίσωση του *Darcy* σε συνδυασμό με τη γεωμετρία των κελιών και τις υδραυλικές ιδιότητες του υδροφορέα (υδραυλική αγωγιμότητα), για να καταστρώσει τις εξισώσεις που θα προσεγγίσουν την από ένα κελί προς τα γειτονικά του (εκροή) και από τα γειτονικά του προς αυτό (εισροή). Η εξίσωση που περιγράφει τις εισροές και εκροές αυτές είναι μια διαφορική εξίσωση οπισθοδρομικών διαφορών (**backward difference equation**), η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως βάση για την προσομοίωση των μερικών διαφορικών εξισώσεων της υπόγεια ροής. Η εξίσωση αυτή δεν μπορεί να επιλυθεί ανεξάρτητα αφού αποτελεί μια εξίσωση με επτά αγνώστους.

Ωστόσο μια τέτοια εξίσωση μπορεί να γραφτεί για κάθε ενεργό κελί του υδροφορέα και αφού υπάρχει ένα άγνωστο φορτίο για κάθε κελί, προκύπτει σύστημα n εξισώσεων με n αγνώστους που μπορεί να επιλυθεί ταυτόχρονα.

6.3 Εφαρμογή Μοντέλου Mantoglou et al (2004) στον παράκτιο υδροφορέα του Ακρωτηρίου

Θα ακολουθήσει η εφαρμογή του μοντέλου των Mantoglou et al (2004), όπως έχει περιγραφεί πιο πάνω, για τις ανάγκες της προσομοίωσης του υδροφορέα Ακρωτηρίου. Αρχικά θα γίνει ο υπολογισμός όσο αφορά την κατανομή δυναμικού σε όλα τα κελιά του υδροφορέα, το υδραυλικό φορτίο και τέλος το βάθος κάτω από το επίπεδο της θάλασσας στο οποίο βρίσκεται η θέση της αλάτινης σφήνας.

6.3.1 Προσδιορισμός της Γεωμετρίας του μοντέλου

Εξωτερικά Όρια (external boundaries)

Όπως έχει γίνει η περιγραφή πιο πάνω, ο υπό εξέταση υδροφορέας οριοθετείται από τη θάλασσα και απεικονίζεται στην εικόνα 6.4 . Το νότιο τμήμα του υδροφορέα έχει θεωρηθεί ως υφάλμυρη περιοχή, λόγω του ότι εκεί υπάρχει η αλυκή. Δεξιά και αριστερά της αλυκής υπάρχει πολύ μικρή απόσταση από τη θάλασσα και επομένως αυτά τα δυο κομμάτια θεωρούμε ότι έχουν υφαλμυρωθεί . Η περιοχή αυτή απεικονίζεται στην εικόνα 6.5 με γαλάζιο χρώμα και στην παρούσα μελέτη θα θεωρηθεί ως θάλασσα. Έτσι, η περιοχή μελέτης φαίνεται στη πιο κάτω εικόνα.



Εικόνα 6.4 : Υδροφορέας Ακρωτηρίου



Εικόνα 6.5 : Περιοχή μελέτης υδροφορέα Ακρωτηρίου

Κατασκευή Κανάβου του Μοντέλου (model grid)

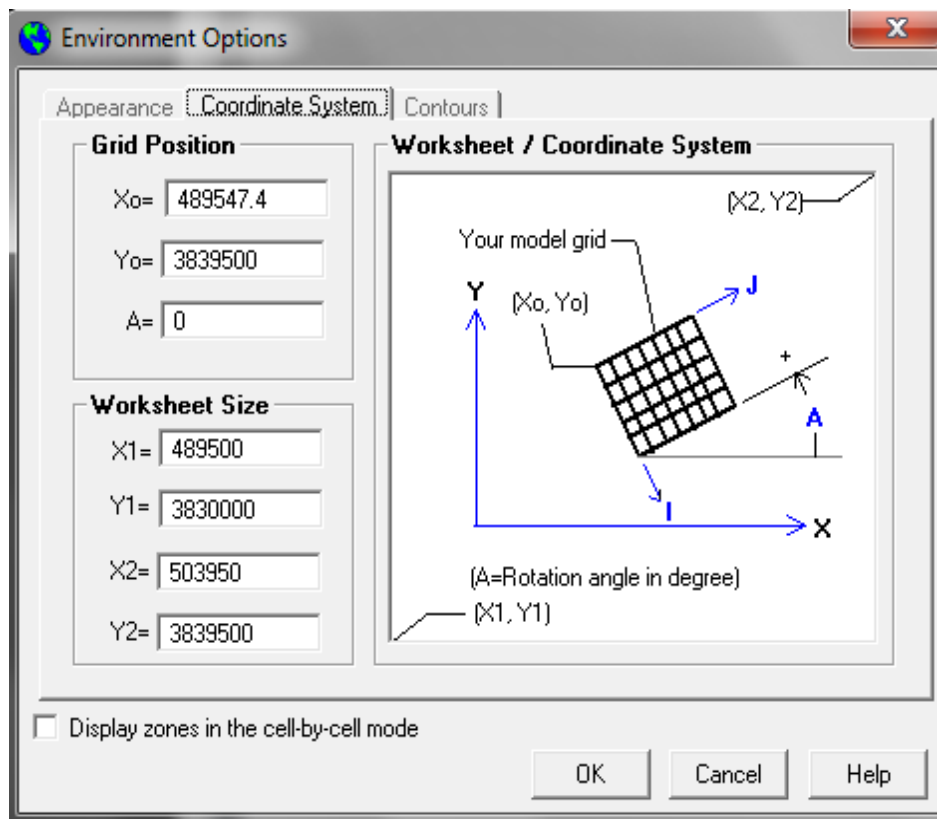
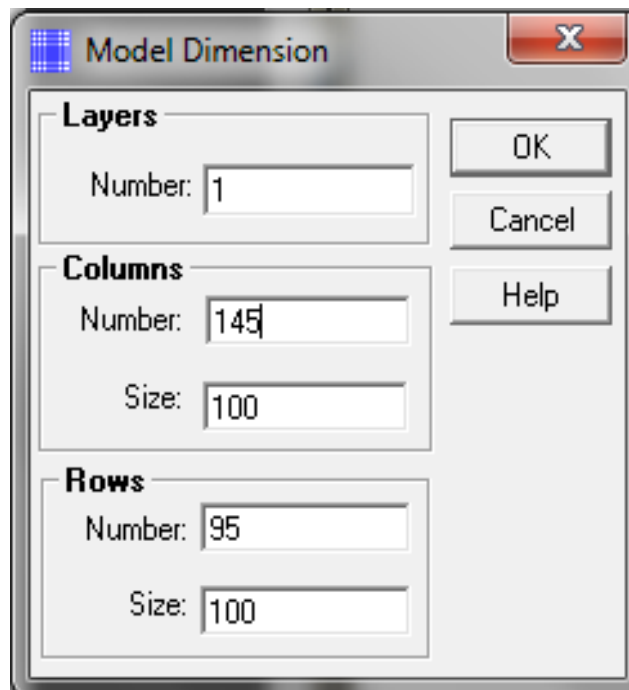
Η κατασκευή του κανάβου είναι η πρωταρχική ενέργεια κατά το σχεδιασμό του μοντέλου στον ηλεκτρονικό υπολογιστή (γίνεται η επιλογή: grid → mesh size). Ο κανάβος στο πρόγραμμα Modflow σχηματίζεται από δύο ζεύγη παράλληλων γραμμών που είναι κάθετα μεταξύ τους και σχηματίζουν κελιά. Επίσης, αξίζει να σημειωθεί ότι ο κανάβος του Modflow συνδέεται με τις καρτεσιανές συντεταγμένες ούτως ώστε:

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

Επιπλέον, ανάμεσα στα δύο αυτά συστήματα σημειώνονται και δύο σημαντικές διαφορές. Ο κανάβος του Modflow έχει ως σημείο αναφοράς $(x, y) = (0,0)$ την πάνω αριστερή γωνία, σε αντίθεση με το καρτεσιανό σύστημα συντεταγμένων που έχει ως σημείο αναφοράς την κάτω αριστερή. Η δεύτερη διαφορά είναι η αύξηση του δείκτη k των επιπέδων του κανάβου του Modflow η οποία αντιστοιχεί με τη μείωση του υψομέτρου z, λόγω του ότι τα επίπεδα αριθμούνται από πάνω προς τα κάτω. Η μορφή του κανάβου χωρίζεται σε δύο κατηγορίες: μπορεί να είναι είτε ομοιόμορφη (uniform) όταν τα κελιά που τον αποτελούν έχουν τις ίδιες διαστάσεις, είτε ανομοιόμορφη (custom) όταν το μέγεθος των κελιών ποικίλει. Ο ομοιόμορφος κανάβος έχει προτίμηση

σε ανώτερο βαθμό λόγω της αρτιότητας του μοντέλου και αποτελεί καλή επιλογή όταν τα δεδομένα του συστήματος είναι ομοιόμορφα κατανεμημένα και όταν το σύστημα αντιμετωπίζεται συνολικά και δεν εστιάζει τοπικά σε κάποιες θέσεις. Από την άλλη, ο ανομοιόμορφος κানাβος χρησιμοποιείται όταν τα δεδομένα που υπάρχουν αφορούν συγκεκριμένα τμήματα, ενώ για άλλα μέρη της περιοχής τα αντίστοιχα δεδομένα δεν είναι ορατά, πχ σε περιπτώσεις μεταφοράς ρύπων. Τέλος, αξίζει να τονιστεί ότι σε περίπτωση που θα χρησιμοποιηθεί ανομοιόμορφος κানাβος, πρέπει να ακολουθείται ένας μεγάλης σημασίας κανόνας για τη σωστή μαθηματική επίλυση από το μοντέλο. Το μέγεθος του κελιού και στις τρεις διαστάσεις (στήλη, γραμμή, επίπεδο) δεν μπορεί να διαφέρει πάνω από 1.5 φορά του μεγέθους των γειτονικών κελιών.

Για τις ανάγκες της προσομοίωσης του παράκτιου υδροφορέα Ακρωτηρίου στη Λεμεσό, εφαρμόζεται ομοιόμορφος κানাβος, λόγω του ότι τα δεδομένα εισαγωγής θεωρούνται καλώς κατανεμημένα. Οι διαστάσεις των κελιών που θα χρησιμοποιηθούν είναι 100m x 100m και οι διαστάσεις του κανάβου είναι 14500m x 9500m και έτσι κυριαρχεί ένα πλήθος γραμμών 95 και 145 στηλών. Ο κানাβος του Modflow έχει ως σημείο αναφοράς την πάνω αριστερή γωνία με πραγματικές συντεταγμένες (X_0, Y_0) σε σύστημα συντεταγμένων ΕΓΣΑ '87: (489547.4, 3839500) ενώ έχει (X_{min}, Y_{min}) ή (X_1, Y_1) = (489500, 3830000) και (X_{max}, Y_{max}) ή (X_2, Y_2) = (503950, 3839500). Τέλος, ο φρεάτιος υδροφορέας Ακρωτηρίου θα προσομοιωθεί με ένα επίπεδο (Layer), συνολικού πάχους 1m, ούτως ώστε η τιμή της μεταφορικότητας T που θα υπολογίζεται από το μοντέλο ($T = b \times K$), να ισούται με την υδραυλική αγωγιμότητα K του υδροφορέα, κάτι που απαιτείται στην προσέγγιση Mantoglou et al, 2004.



Τύπος υδροφορέα (layer type)

Οι τύποι των επιπέδων χωρίζονται σε τέσσερις κατηγορίες στο πρόγραμμα Modflow ως ακολούθως: (grid→ layer property).

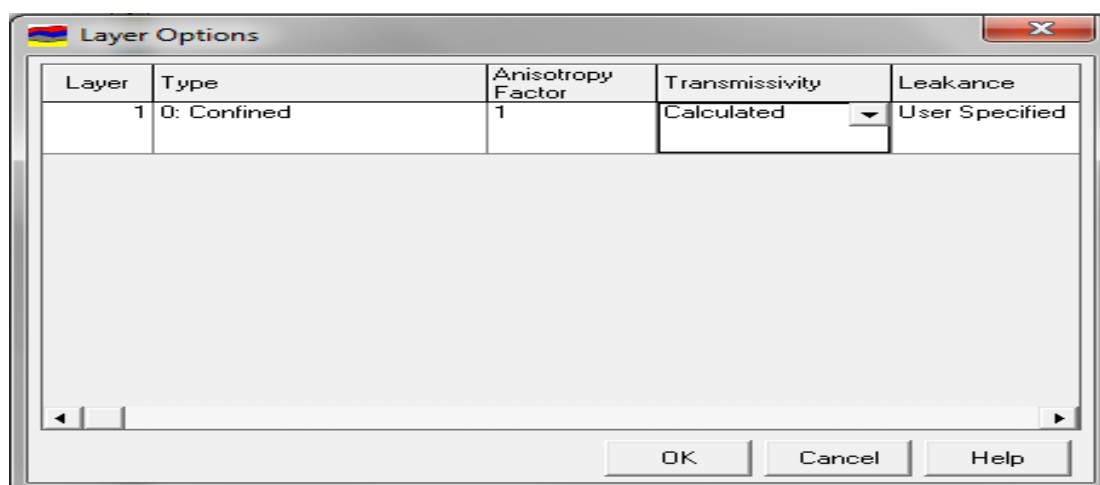
Τύπος 0: χρησιμοποιείται για περιορισμένους ή υπό πίεση υδροφορείς, όπου η διαβιβαστικότητα κάθε κελιού είναι σταθερή σε όλη τη διάρκεια της προσομοίωσης.

Τύπος 1: χρησιμοποιείται στην περίπτωση ελεύθερων ή φρεάτιων υδροφορέων και ισχύει μόνο για το ανώτερο επίπεδο.

Τύπος 2: χρησιμοποιείται στην περίπτωση που ο υδροφόρος σχηματισμός εναλλάσσεται ανάμεσα σε περιορισμένο και φρεάτιο. Πραγματοποιείται μια υπόθεση ότι το κορεσμένο πάχος παραμένει το ίδιο με αποτέλεσμα η μεταβιβαστικότητα να παραμένει σταθερή κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης.

Τύπος 3: γίνεται η εφαρμογή του στη ίδια περίπτωση με τον τύπο 2, με τη μόνη διαφορά ότι περιλαμβάνει κυμαινόμενη μεταβιβαστικότητα, η οποία επαναυπολογίζεται σε κάθε επανάληψη επίλυσης με βάση το πάχος του υδροφορέα.

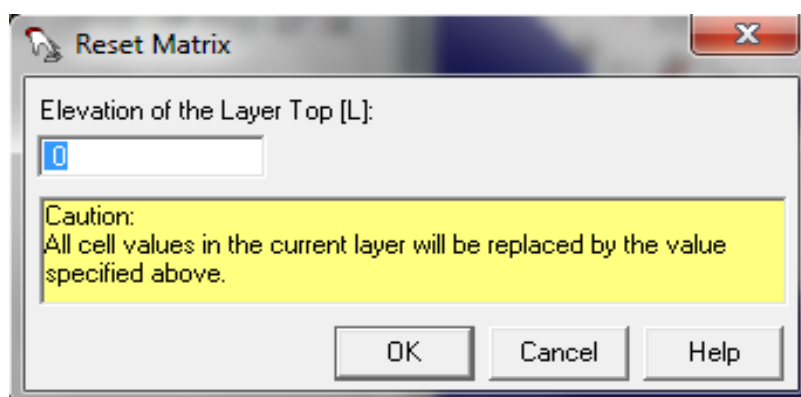
Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιείται ο *τύπος 0* λόγω του ότι έχει τιμή μεταφορικότητας T ίση με την υδραυλική αγωγιμότητα K του φρεάτιου υδροφορέα.



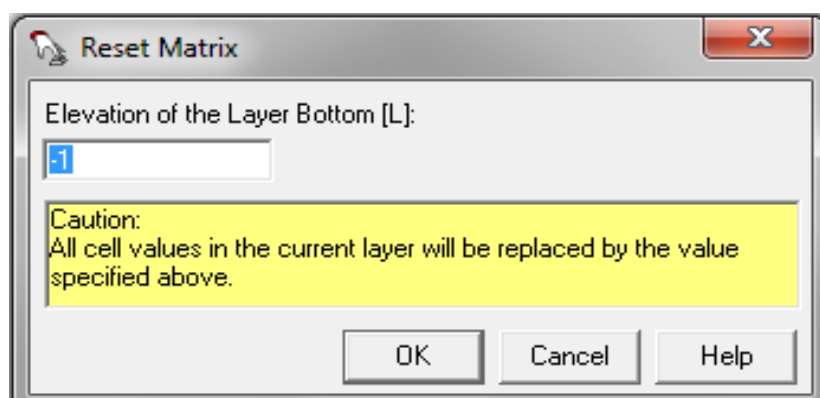
Οροφή και βάση του υδροφορέα (Layer Top and Bottom)

Στο μοντέλο πρέπει να γίνει εισαγωγή της οροφής και της βάσης του υδροφορέα, ούτως ώστε μετά την εισαγωγή της τιμής της υδραυλικής αγωγιμότητας K , το μοντέλο να μπορεί να υπολογίζει την ίδια τιμή με αυτή, τη μεταβιβαστικότητα T σε κάθε θέση.

Ως **οροφή** του υδροφορέα τίθεται η τιμή 0 για όλα τα κελιά (grid → top of layers).



Ως **βάση** ορίζεται η τιμή -1 (grid → bottom of layers)



6.3.2 Οριακές Συνθήκες (Boundary Conditions)

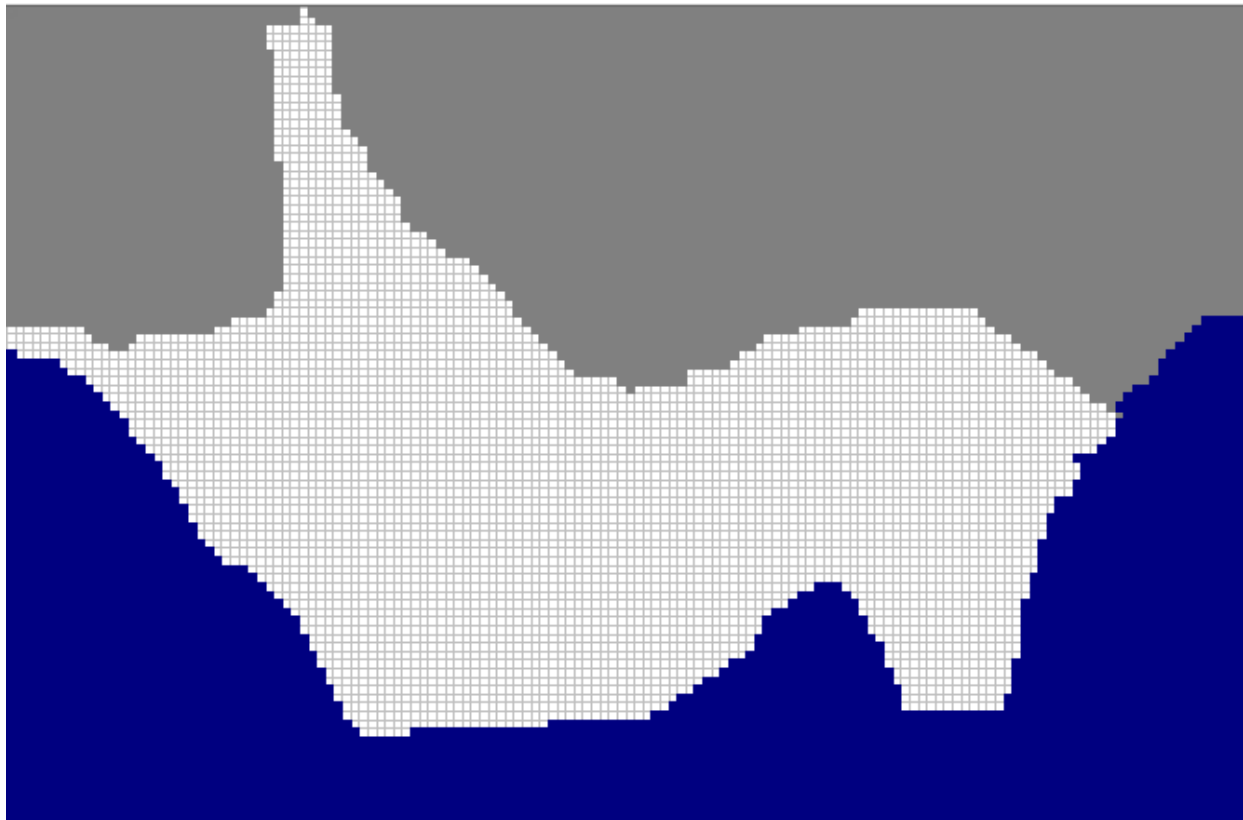
Οριακές συνθήκες είναι οι συνθήκες ροής οι οποίες επικρατούν στις θέσεις των ορίων του υδροφορέα (Bear, 1979). Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα στην κατάστροψη των μαθηματικών μοντέλων ροών σε υπόγειους υδροφορείς είναι ο καθορισμός των ορίων και οι αντίστοιχες συνθήκες που ισχύουν κατά μήκος του (Λατινόπουλος, 1986).

Κατηγορίες οριακών συνθηκών είναι οι ακόλουθες:

- 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 Modflow υπάρχουν τρεις τύποι κελιών για την επίτευξη της περιγραφής των οριακών συνθηκών (grid→ boundary condition→ IBOUND). Τα κελιά αυτά χρησιμοποιούνται για να γίνει η περιγραφή των ορίων του μοντέλου που έχουν γνωστά υδραυλικά φορτία (οριακές συνθήκες πρώτου τύπου), όπως στις θέσεις που ο υδροφορέας προσεγγίζεται με τις υδάτινες επιφάνειες. Η τιμή του υδραυλικού φορτίου των κελιών αυτών δίδεται από το αρχικό στάδιο στο μοντέλο και παραμένει το ίδιο κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Τα κελιά του σταθερού φορτίου με τιμές -1 στο IBOUND του PMWIN, εκπροσωπούν κελιά σταθερού δυναμικού ϕ , όπως ορίζεται κατά την ανάλυση Strack (1976). Αξιοσημείωτα παραδείγματα είναι τα κελιά της θάλασσας στα οποία το δυναμικό είναι σταθερό και μηδενικό. Στην περίπτωση που ο υδροφορέας δεν χρησιμοποιούταν με βάση το μοντέλο Mantoglou et al (2004), η χρήση των κελιών του σταθερού υδραυλικού φορτίου στη θάλασσα νοείται ως λανθασμένη επιλογή, λόγω του ότι η θάλασσα θα αντιμετωπιζόταν σαν ταμιευτήρα γλυκού νερού, μη λαμβάνοντας υπόψη τη δυσκολία που εμφανίζεται κατά την κίνηση του γλυκού νερού του υδροφορέα προς τη θάλασσα, όπου συναντά αλμυρό νερό μεγαλύτερης πυκνότητας και ειδικού βάρους.

Τα ενεργά κελιά με τιμές 1, στο IBOUND ορίζονται ως εκείνα που το υδραυλικό φορτίο υπολογίζεται από το μοντέλο κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Αντιπροσωπεύουν κελιά κυμαινόμενου δυναμικού \emptyset , το οποίο υπολογίζεται από το μοντέλο. Έτσι, ως ενεργά χαρακτηρίζονται τα κελιά του υπό εξέταση υδροφορέα, στα οποία ζητείται ο υπολογισμός του δυναμικού \emptyset . Τα ανενεργά κελιά ή κελιά μηδενικής ροής συμβολίζονται με 0 στο IBOUND και είναι εκείνα στα οποία λαμβάνει χώρα ροή από ή προς αυτά κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Το μοντέλο δεν υπολογίζει τα υδραυλικά φορτία για τα κελιά αυτά και χρησιμοποιούνται για να απενεργοποιούν τα όρια πέραν του πεδίου ροής.

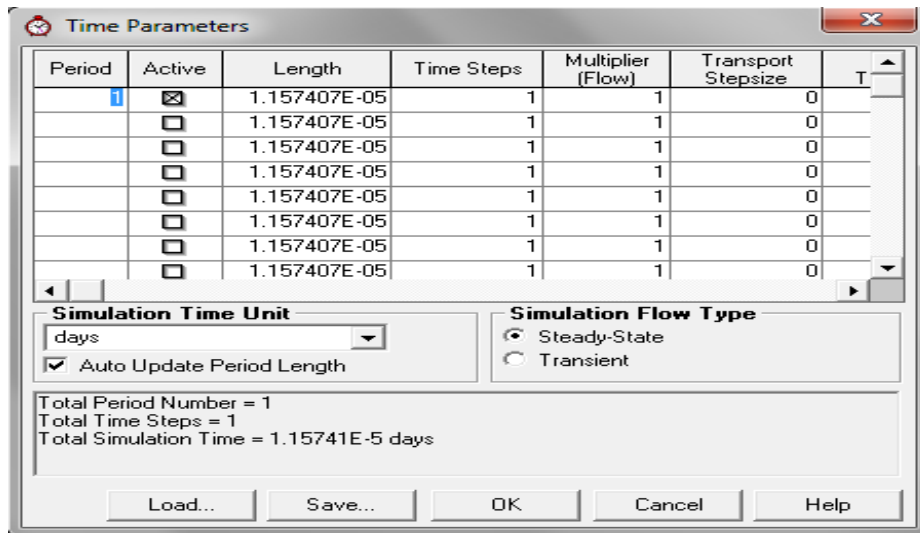


Εικόνα 6.6: Χωρική Διακριτοποίηση του υδροφορέα

6.3.3 Εισαγωγή παραμέτρων

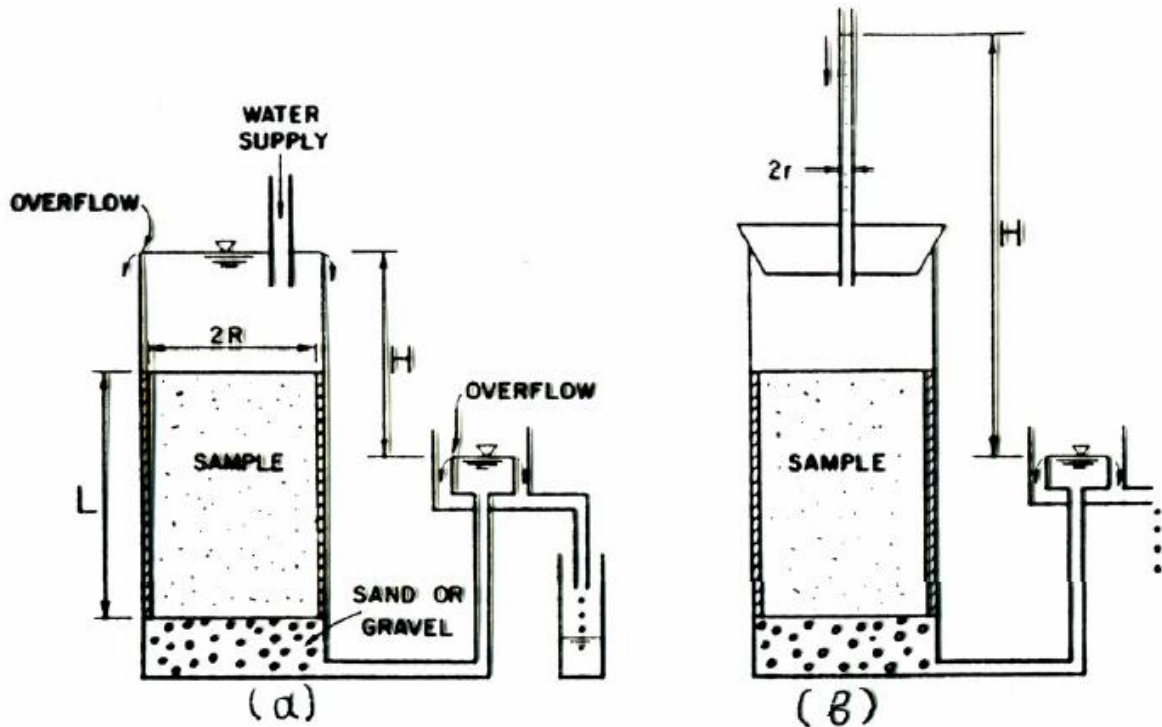
Χρόνος (time), (parameters→ time)

Η επιλογή της μονάδας του χρόνου γίνεται σε ημέρες ούτως ώστε οι παράμετροι στο μοντέλο να αναφέρονται σε μονάδες μέτρα ανά ημέρα (m/day). Επίσης, γίνεται η επιλογή συνθηκών μόνιμης ροής (steady state) για να μπορεί να εφαρμοστεί το μοντέλο.



Οριζόντια Υδραυλική Αγωγιμότητα (Horizontal Hydraulic Conductivity)

Η οριζόντια υδραυλική αγωγιμότητα K είναι η κρισιμότερη παράμετρος για το μοντέλο. Η εκτίμηση της τιμής της γίνεται μέσω κατάλληλων εργαστηριακών μετρήσεων ή επί τόπου δοκιμών εισπιέσεων. Σε μερικές περιπτώσεις η τιμή της μπορεί να προσδιοριστεί και με εκτέλεση διαδοχικών προσομοιώσεων, εφαρμόζοντας έτσι διαφορετική τιμή K κάθε φορά (μέθοδος trial και error). Η συσκευή με την οποία γίνονται οι εργαστηριακές μετρήσεις εκτίμησης της υδραυλικής αγωγιμότητας ονομάζεται διαπερατόμετρο και φαίνεται στην πιο κάτω εικόνα.



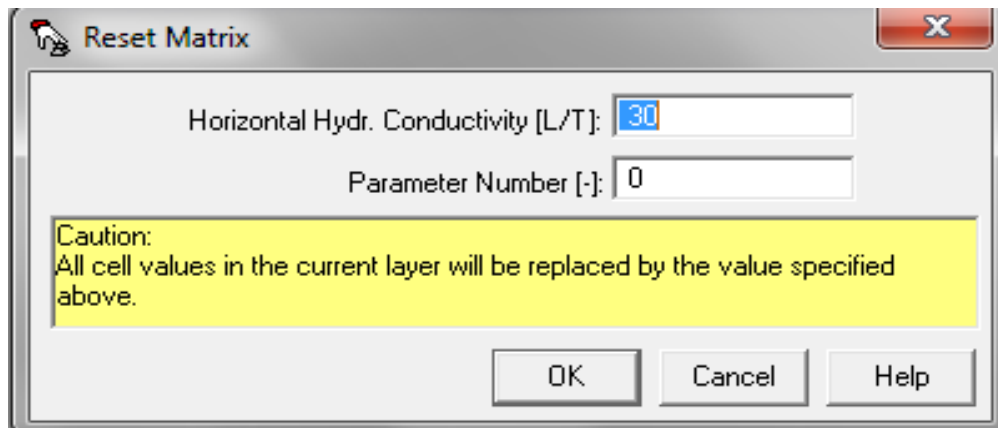
Εικόνα 6.7: Διαπερατόμετρα σταθερού υδραυλικού φορτίου (α) και μεταβλητού υδραυλικού φορτίου (β). (Πηγή: Νάνου, 2007).

Οι δοκιμές εισπίεσης νερού (Pumping in tests) είναι ο καταλληλότερος τρόπος εκτίμησης της υδραυλικής αγωγιμότητας K για το τμήμα του υπεδάφους το οποίο είναι τοποθετημένο πάνω από τον υδροφόρο ορίζοντα στην ακόρεστη ζώνη. Οι δοκιμές εισπίεσης νερού χαρακτηρίζονται από την ταχύτητα εκτέλεσης, τη δυνατότητα συχνής επανάληψης κατά τη διάρκεια της διάτρησης και από την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Κατά τις δοκιμές αυτές ισχύουν δύο τρόποι ως εξής: εισάγεται στη δειγματοληπτική γεώτρηση ποσότητα νερού και μετράται το επιβαλλόμενο φορτίο κάτω από τη δεδομένη πίεση ή η στάθμη του νερού ανυψώνεται και καταγράφεται ο βαθμός πτώσης μέχρι τη στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα. Η πρώτη περίπτωση αφορά δοκιμές σταθερού φορτίου (Constant head test), ενώ η δεύτερη δοκιμές μεταβλητού φορτίου (Falling head test).

Οι κατηγορίες δοκιμών χωρίζονται ως εξής:

- Δοκιμή MAAG (μεταβλητού φορτίου για λεπτόκοκκα εδαφικά υλικά)
- Δοκιμή LEFRANC (σταθερού φορτίου για αδρόκοκκα εδαφικά υλικά)
- Δοκιμή LUGEON (για βραχώδεις σχηματισμούς)

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, η εκτίμηση της μέσης υδραυλικής αγωγιμότητας ήταν διαθέσιμη και στάλθηκε από το Τμήμα Αναπτύξεως Υδάτων (ΤΑΥ) Λεμεσού. Παρουσιάζεται στο πιο κάτω σχήμα και είναι ίση με 30.



Εισαγωγή φρεάτων άντλησης (Models→ Modflow→ Flow Packages→ Well)

Ως ακολούθως εισάγονται τα δεδομένα αντλήσεων στο μοντέλο. Τα δεδομένα αυτά δόθηκαν από το Τμήμα Αναπτύξεως Υδάτων Λεμεσού (ΤΑΥ). Όπως αναφέρθηκε στο πιο πάνω κεφάλαιο, οι μέσοι ετήσιοι όγκοι άντλησης ανέρχονται στα $8 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. Οι γεωτρήσεις αντλήσεων που υπάρχουν ανέρχονται στις 400. Δυστυχώς όμως το ΤΑΥ έχει παραχωρήσει μόνο τις 17 στις οποίες οι μέσοι ετήσιοι όγκοι άντλησής τους ανέρχονται στα $2,9 \cdot 10^6 \text{ m}^3$. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την έλλειψη των $5,1 \cdot 10^6$ ετησίως στους όγκους άντλησης του μοντέλου μας. Ο παρακάτω πίνακας παρουσιάζει τις μέσες τιμές αντλήσεων γεωτρήσεων στον υπό εξέταση υδροφόρα, οι οποίες είναι διαθέσιμες από το ΤΑΥ.

Πίνακας 6.1 : Μέσες τιμές αντλήσεων υφιστάμενων γεωτρήσεων (Πηγή: Τ.Α.Υ)

Μέσες τιμές Αντλήσεων Γεωτρήσεων Υδροφορέα Ακρωτηρίου				
Υδρολ. Αριθμός	Αρ. Γεώτρ.	Σχέδιο Υδατ/θειας	κ.μ/μέρα	Κατάσταση
1457	51/77	Λεμεσός	0	Υφιστάμενη
1556	153/83	Λεμεσός	69.8	Υφιστάμενη
1569	130/84	Λεμεσός	137.4	Υφιστάμενη
1580	130/85	Λεμεσός	336.67	Υφιστάμενη
1581	76/85	Λεμεσός	240.87	Υφιστάμενη
1604	155/85	Λεμεσός	552.77	Υφιστάμενη
		ΣΥΝΟΛΟ	1337.51	
1403	105/73	Ύψων.- Πολεμ.	1239.77	Υφιστάμενη
1404	51/78	Ύψων.- Πολεμ.	800.5	Υφιστάμενη
1620	11/88	Ύψων.- Πολεμ.	762.13	Υφιστάμενη
		ΣΥΝΟΛΟ	2802.4	
1350	5/72	Ερήμη-Κολόσσι	176.83	Υφιστάμενη
1605	69/86	Ερήμη-Κολόσσι	321.53	Υφιστάμενη
1351	14/72	Ερήμη-Κολόσσι	599.3	Υφιστάμενη
1371	4/73	Ερήμη-Κολόσσι	470	Υφιστάμενη
		ΣΥΝΟΛΟ	1567.66	
1173	28/66	Επισκοπή	434.37	Υφιστάμενη
1568	185/83	Επισκοπή	504.2	Υφιστάμενη
		ΣΥΝΟΛΟ	938.57	
1207	207/62	Ασώματος	0	Υφιστάμενη
1240	ΕΒ97/70	Τραχώνι	1345.87	Υφιστάμενη
		ΟΛΙΚΟ	7992	

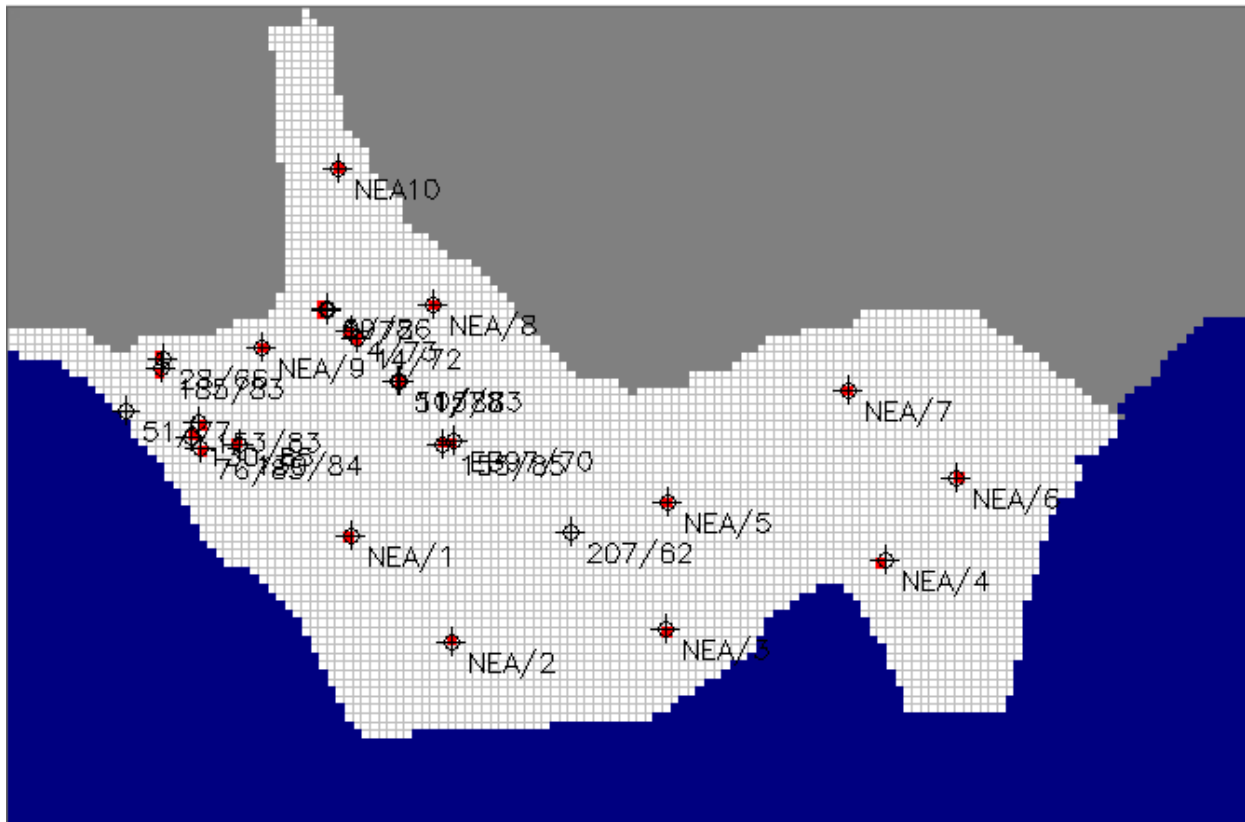


Εικόνα 6.8: Καθορισμός νέων γεωτρήσεων

Επιπλέον, το έλλειμμα των 5.1 εκατομμυρίων m^3 έχει αντιμετωπισθεί με την εισαγωγή 10 αντλήσεων, όπως φαίνονται στον πιο κάτω πίνακα και εικόνα. Έχουν τοποθετηθεί με βάση τις διαθέσιμες γεωτρήσεις στον υδροφόρα Ακρωτηρίου.

Πίνακας 6.2: Αντλήσεις νέων γεωτρήσεων

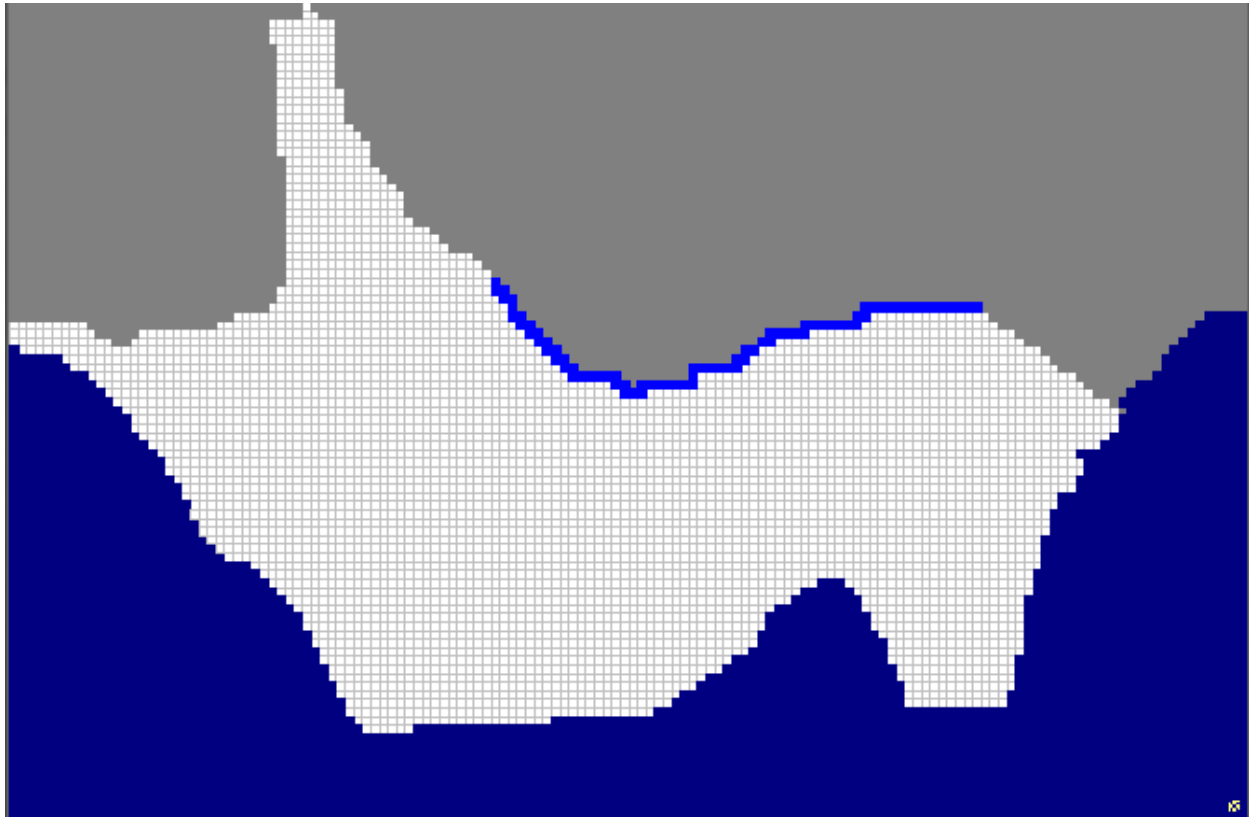
ΑΝΤΛΗΣΕΙΣ ΝΕΩΝ ΓΕΩΤΡΗΣΕΩΝ			
A/A	X(WGS84)	Y(WGS84)	Κ.μ/μέρα
1	493531.8	3833362	-1874.5402
2	494701.1	3832126	-1874.5402
3	497191.3	3832278	-1874.5402
4	499746.5	3833080	-1874.5402
5	497213	3833752	-1874.5402
6	500569.4	3834034	-1874.5402
7	499313.4	3835054	-1874.5402
8	494484.6	3836051	-333.333
9	492492.4	3835553	-333.333
10	493380.2	3837635	-333.333
		ΟΛΙΚΟ	14121.7814



Εικόνα 6.9: Εισαγωγή φρεάτων άντλησης στο μοντέλο

Υπόγειες Πλευρικές Εισροές (Models→ Modflow→ Flow Packages→ Well)

Οι υπόγειες πλευρικές εισροές του υδροφορέα Ακρωτηρίου βρίσκονται στο βορειοανατολικό του τμήμα, όπως φαίνεται στην πιο κάτω εικόνα, και ανέρχονται σε $314 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1} \text{ year}^{-1}$ το οποίο είναι ίσο με $86,0274 \text{ m}^3$ την ημέρα για κάθε κελί (Κούσης et al, 2010).



Εικόνα 6.10: Εισαγωγή πλευρικών εισροών στο μοντέλο

Για τη δημιουργία του μοντέλου στο πρόγραμμα Modflow έχουν ληφθεί υπόψη δύο πηγές 'τεχνητού εμπλουτισμού' οι οποίες είναι οι εμπλουτιστικές λίμνες και ο εμπλουτισμός από εκροές και διαρροές φράγματος.

Εμπλουτιστικές Λίμνες (Models→ Modflow→ Flow Packages→ Well)

Στο Ακρωτήρι χρησιμοποιείται μια σειρά λιμνών για εμπλουτισμό του υδροφορέα. Υπάρχουν επτά υφιστάμενες εμπλουτιστικές λίμνες. Οι σημαντικότερες είναι αυτές του Δέλτα του Κούρη μέσα στην κοίτη του ποταμού και η ιδιωτική του Αγροκτήματος Φασουρίου. Ιδιωτικές λίμνες επίσης είναι εκείνες του Αγροκτήματος Λανίτη στην ανατολική περιοχή του υδροφορέα και αυτή του Κολοσσιού που κατασκευάστηκε με στόχο τον εμπλουτισμό του υδροφορέα στην περιοχή της παλαιοκοίτης του Κούρη και την ενίσχυση των γεωτρήσεων ύδρευσης. Η παροχή νερού σε αυτές προερχόταν από τα φράγματα Κούρη και Γερμασόγειας. Ο εμπλουτισμός που μπορεί να επιτευχθεί μέσω

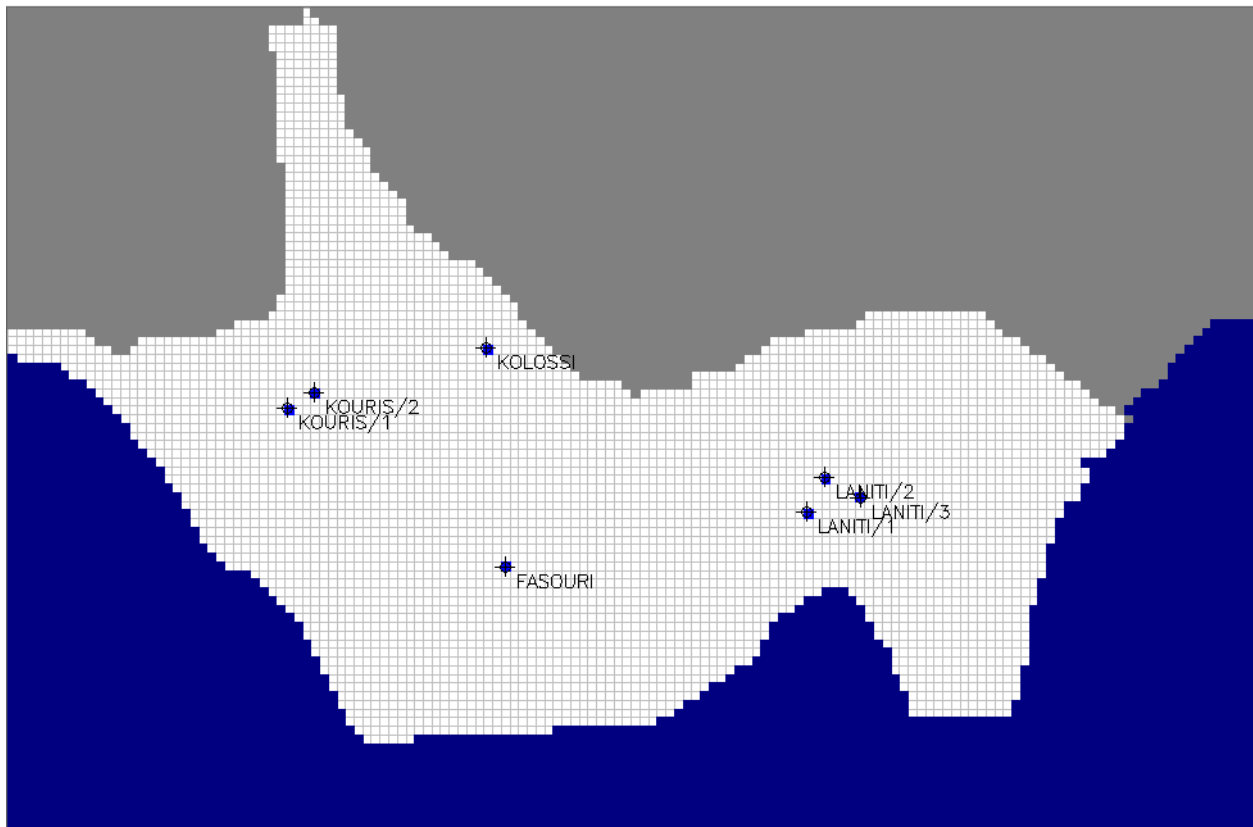
των λιμνών σύμφωνα με έρευνα του Νικολαΐδη et al (2010), υπολογίζεται στο 1 εκ. m³ το χρόνο ενώ η ζήτηση νερού στην περιοχή είναι πολλαπλάσια.

Πίνακας 6.3:Συνολικές ποσότητες τεχνητού εμπλουτισμού (Πηγή : Νικολαΐδη,2010)

ΣΥΝΟΛΙΚΕΣ ΠΟΣΟΤΗΤΕΣ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΥ	
Έτος	Όγκος Εμπλουτισμού m³/ετησίως
1990	0
1991	4284
1992	4630801
1993	4475515
1994	3783405
1995	4215925
1996	3479973
1997	2330203
1998	418452
1999	1493702
2000	432321
ΜΕΣΟΣ	2526458.1

$$\text{Μέσος m}^3/\text{day} = 2526458.1 / 365 = 6921.80 \text{ m}^3/\text{day}$$

$$\text{Κάθε εμπλουτιστική λίμνη} = 6921.80/7 = 988.83 \text{ m}^3/\text{day}$$



Εικόνα 6.11: Εισαγωγή εμπλουτιστικών λιμνών στο μοντέλο

Τροφοδοσία από την κοίτη του ποταμού Κούρη (Models→ Modflow→ Flow Packages→ Well)

Ο ποταμός Κούρης διατρέχει μόνο το δυτικό κομμάτι και όχι όλο το Υδατικό Σώμα. Οι συνολικές ποσότητες εμπλουτισμού από εκροές και διαρροές του φράγματος φαίνονται στον πιο κάτω πίνακα.

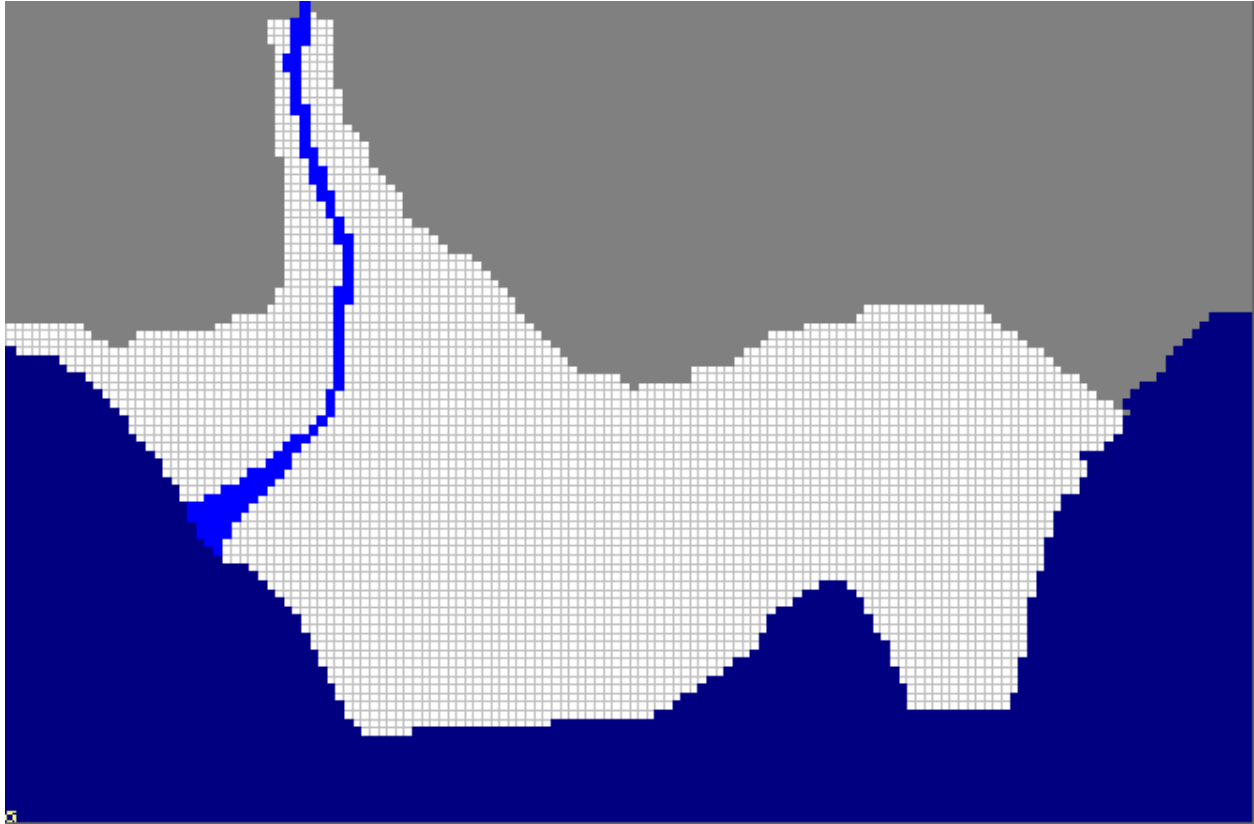
Πίνακας 6.4: Εκροές + Διαρροές (m³) Φράγματος Κούρη (Πηγή : Νικολαΐδη,2010)

Έτος	Εκροές + Διαρροές (m ³) Φράγματος Κούρη
1989	12038000
1990	8783000
1991	7889300
1992	2909150
1993	3106700
1994	3416500
1995	3448509
1996	6962793
1997	5096863
1998	1320852
1999	415202
2000	909236
2001	19172
2002	3732017
2003	3066732
2004	5018027
2005	2468217
2006	5746728
2007	4349533
Μέσος	4247185.842

Ο πιο πάνω μέσος ετήσιος όγκος έχει μετατραπεί σε ημερήσιο, ούτως ώστε να μπορεί να εισαχθεί στο πρόγραμμα, όπως αναγράφεται παρακάτω.

$$\text{Μέσος } m^3 / \text{day} = 4247185.842 / 365 = 11636.126 \text{ } m^3 / \text{day}$$

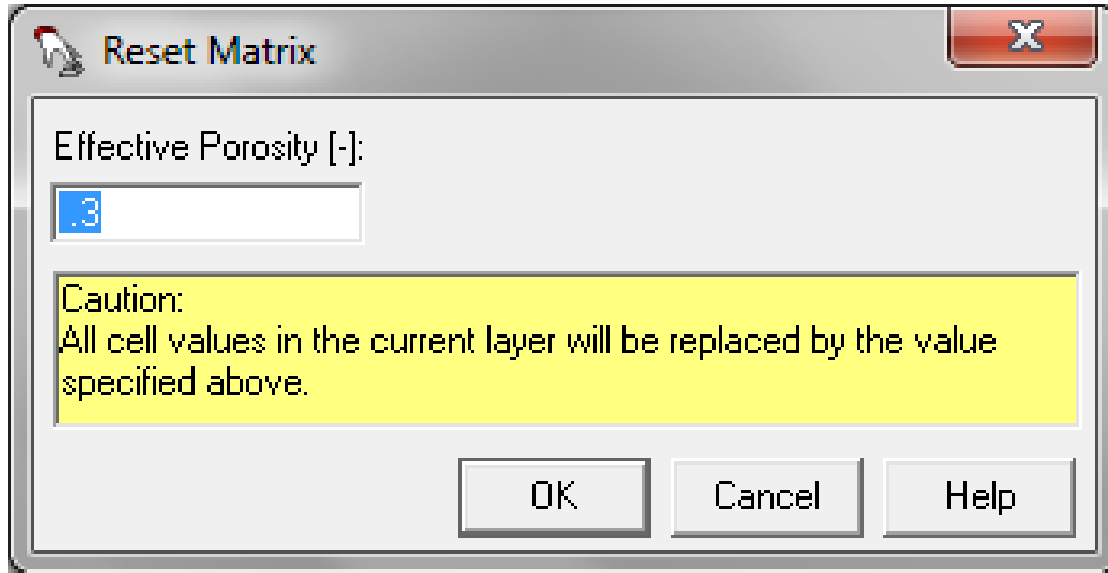
Ο ποταμός του φράγματος Κούρη έχει αναπαρασταθεί σε 115 κελιά από τα οποία το κάθε ένα αντιστοιχεί σε 101.1837043 m³ / day



Εικόνα 6.12: Εισαγωγή εκροών και διαρροών του ποταμού Κούρη

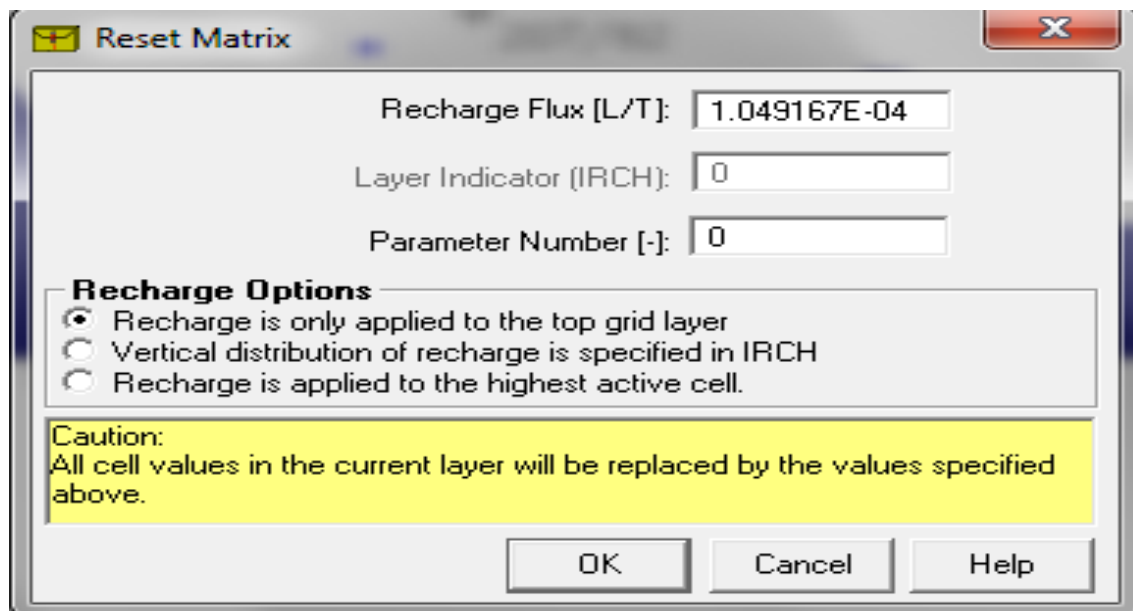
Ενεργό Πορώδες (Effective Porosity: Parameters → effective porosity)

Η τιμή του ενεργού πορώδους έχει εκτιμηθεί με βάση την επικρατούσα κοκκομετρία των υλικών του υδροφορέα, καθώς επίσης και από τη βιβλιογραφία. Το ενεργό πορώδες λήφθηκε 0.3 για τον υπό εξέταση υδροφορέα. Αξίζει επίσης να αναφερθεί ότι το ενεργό πορώδες αποτελεί τη βασικότερη συνιστώσα μεταβολών στα αποτελέσματα προσομοίωσης μεταφοράς μάζας.



Τροφοδοσία Υδροφορέα (Recharge) (*models*→ *Modflow*→ *flow packages*→ *Recharge*)

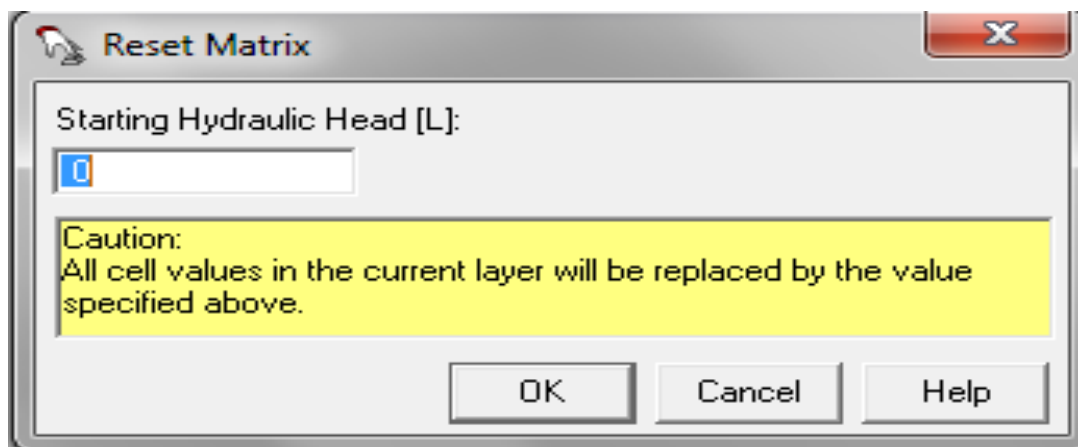
Η τιμή της τροφοδοσίας προς το υδροφόρο σύστημα που εξετάζεται, δηλαδή της κατείσδυσης, είναι ίση με $1.049167 \cdot 10^{-4}$ m/day.



6.3.4 Αρχικές Συνθήκες (Initial Conditions)

(Parameters → Initial & Prescribed Hydraulic Heads)

Αρχικές συνθήκες είναι οι τιμές των υδραυλικών φορτίων, όμως στην παρούσα εργασία εξετάζονται οι τιμές δυναμικού. Για κάθε ενεργό κελί και κελί σταθερού φορτίου, οι τιμές καθορίζονται για ορισμένη χρονική στιγμή-αφετηρία. Έτσι δόθηκε ως αρχική συνθήκη, τιμή δυναμικού μηδέν $\phi=0$ σε όλα τα κελιά σταθερού φορτίου της θάλασσας και στα ενεργά κελιά του υδροφορέα.



6.3.5 Εκτέλεση (Run)

Run (models → Modflow → Run)

Με την εισαγωγή των παραπάνω δεδομένων και τη δημιουργία των απαραίτητων αρχείων εισόδου εκτελείται το Modflow. Παράγονται:

- Αρχεία δεδομένων
- Αρχεία αποτελεσμάτων

Αναλυτικότερα, τα αρχεία δεδομένων (input data files) είναι τα εξής:

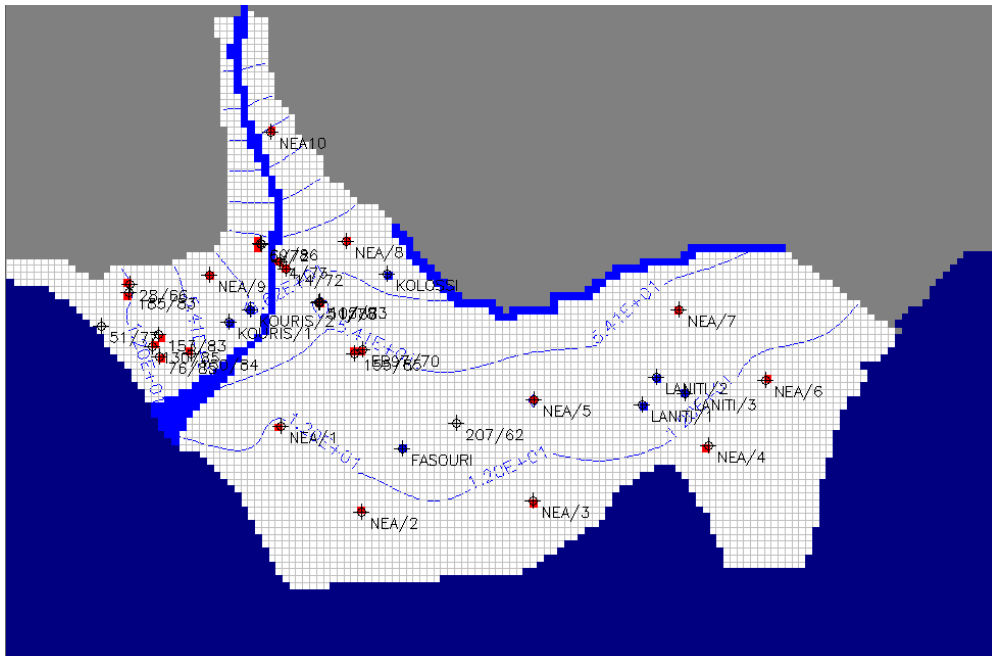
- bas.dat (basic package): αρχικές και οριακές συνθήκες
- bcf.dat (block-centered flow package): διαστάσεις κελιών και παράμετροι υδροφορέα
- oc.dat (output control)

- pcg2.dat (preconditioned conjugate gradient 2 package)
- rch.dat (recharge package): τροφοδοσία υδροφορέα

Τα αρχεία αποτελεσμάτων (output files) είναι:

- budget.dat: παροχές υπόγειου νερού
- ddown.dat: διαφορά αρχικών τιμών δυναμικού με υπολογισμένες
- heads.dat : αποτέλεσμα επίλυσης, κατανομή τιμών δυναμικού
- output.dat: εκτέλεση προγράμματος και αξιοπιστία αποτελέσματος

Το αρχείο heads.dat, περιλαμβάνει τις υπολογισμένες τιμές δυναμικού ϕ και θα χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια για την εκτίμηση της θέσης της αλάτινης σφήνας (με τη βοήθεια του προγράμματος Matlab). Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης του υδροφορέα παρουσιάζεται στη συνέχεια σχηματικά, σε περιβάλλον PMWIN. Σε αυτό απεικονίζονται οι τιμές του δυναμικού, όπως υπολογίστηκαν από το πρόγραμμα με την μορφή ισοδυναμικών καμπύλων.

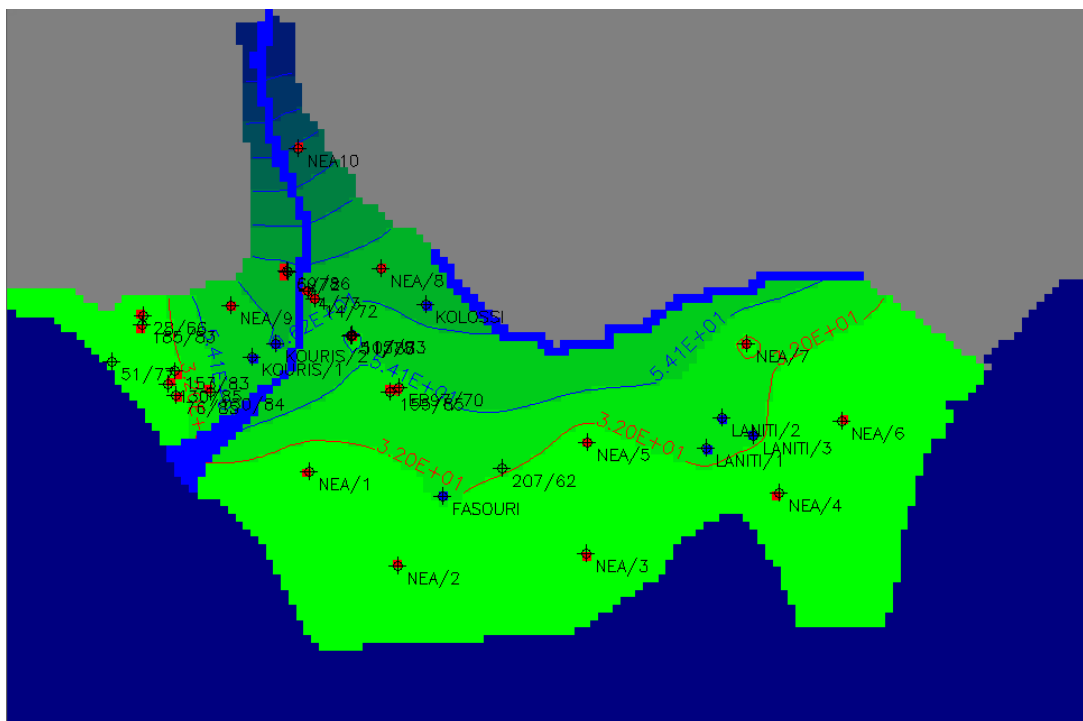


Εικόνα 6.13: Αποτέλεσμα Προσομοίωσης –Υπολογισμός δυναμικού Φ

Ακολουθεί επίσης ο υπολογισμός της τιμής δυναμικού Φ στον πόδα της αλάτινης σφήνας, ο οποίος με τη βοήθεια του προγράμματος Matlab υπολογίζεται ως εξής:

$$\Phi_{toe} = \frac{\delta \cdot (1 + \delta)}{2} \cdot d^2 = \frac{0.025 \cdot (1 + 0.025)}{2} \cdot 50^2 = 32,03125 m^2$$

Στο πρόγραμμα *PMWIN*, εισάγεται η πιο πάνω τιμή στην επιλογή Tools → Presentation και ακολουθεί: Options → Environment. Στην ετικέτα 'Contours' επιλέγεται η στήλη 'Level' και αφού εισαχθεί η τιμή που έχει υπολογιστεί στα πεδία 'Minimum' και 'Maximum', λαμβάνεται η παρακάτω εικόνα στην οποία εμφανίζεται η θέση του δακτύλου του πόδα της αλάτινης σφήνας.



Εικόνα 6.14: Περιοχή υφαλμύρωσης του Υδροφορέα Ακρωτηρίου – Δάκτυλο Πόδα

Επιπλέον, το επόμενο βήμα που ακολουθεί είναι η μετατροπή του πίνακα δυναμικού ο οποίος έχει προκύψει από την προσομοίωση σε τιμές υδραυλικού φορτίου. Για να γίνει αυτή η μετατροπή, εφαρμόζονται οι σχέσεις του μοντέλου Mantoglou et al (2004), οι οποίες ισχύουν στις δύο ζώνες του υδροφορέα όπως φαίνεται από την πιο πάνω εικόνα. Η ζώνη που βρίσκεται κάτω από τον πόδα είναι εκείνη της ανάμιξης του αλμυρού και γλυκού νερού. Ισχύει η εξής σχέση:

$$\Phi = \frac{(1+\delta)}{2\delta} \cdot (h_f - d)^2 \Rightarrow h_f = \sqrt{\frac{2\delta}{(1+\delta)} \phi} + d \Rightarrow h_f = \sqrt{\frac{0.05}{1.025}} \phi + 50 \quad (6.3)$$

Η ζώνη που βρίσκεται πάνω από τον πόδα περιέχει γλυκό νερό και ισχύει:

$$\phi = \frac{1}{2} [h_f^2 - (1 + \delta) \cdot d^2] \Rightarrow h_f = \sqrt{2\phi + (1 + \delta) d^2} \Rightarrow h_f = \sqrt{2\phi + 2562.5} \quad (6.4)$$

Έχοντας υπόψη τα πιο πάνω και με τη βοήθεια της γλώσσας προγραμματισμού Matlab, κατασκευάστηκε ένα πρόγραμμα το οποίο αναγνωρίζει σε ποια ζώνη βρίσκεται το κάθε κελί και εκτελούνται υπολογισμοί λαμβάνοντας έτσι τις τιμές του υδραυλικού φορτίου για τον υδροφορέα. Για το λόγο αυτό κατασκευάζεται ένας βοηθητικός πίνακας 'Head1', στον οποίο τα κελιά που αντιστοιχούν στη θάλασσα του υδροφορέα έχουν τιμή 'NaN' (Not a Number) και τα κελιά της ζώνης 1 και ζώνης 2 έχουν την τιμή δυναμικού που έχει υπολογιστεί από την προσομοίωση. Στα ανενεργά κελιά δίνεται η τιμή 'NaN' (Not a Number), όπου και ο αλγόριθμος που κατασκευάζεται διαβάζει τον πίνακα 'Head1'. Από την άλλη, αν η τιμή του κελιού που βρίσκει είναι μικρότερη από την τιμή του πόδα, υπολογίζει την τιμή του υδραυλικού φορτίου από την πρώτη εξίσωση, ενώ αν είναι μεγαλύτερη υπολογίζει από τη δεύτερη εξίσωση. Στη μελέτη παρουσιάζονται αρνητικές τιμές δυναμικού ϕ και επειδή δεν μπορούν να υπολογιστούν οι τιμές του υδραυλικού φορτίου h_f στις περιοχές αυτές, τους δίνεται η τιμή 'NaN'. Έτσι αφού κατασκευαστεί ο βοηθητικός πίνακας του υδραυλικού φορτίου h_f , παρουσιάζεται σε τρισδιάστατη και δισδιάστατη μορφή με τη βοήθεια του Matlab. Στη δισδιάστατη μορφή η περιοχή που αντιστοιχεί στην περιοχή με υφάλμυρο νερό είναι η ζώνη που βρίσκεται κάτω από το 1.25, ενώ του γλυκού νερού η ζώνη που βρίσκεται πάνω από το 1.25. Τα κενά τα οποία παρουσιάζονται στον υδροφορέα είναι οι περιοχές οι οποίες είχαν αρνητικό πρόσημο δυναμικού ϕ .

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΣΕΝΑΡΙΩΝ ΑΝΤΛΗΣΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΗΤΟΥ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΥ

7.ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΣΕΝΑΡΙΩΝ ΑΝΤΛΗΣΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΗΤΟΥ ΕΜΠΛΟΥΤΙΣΜΟΥ

7.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό, έχουν δημιουργηθεί διάφορα σενάρια για την ποιοτική και ποσοτική βελτιστοποίηση του υπόγειου σώματος . Όπως έχει προαναφερθεί, το 1/2 του υπόγειου νερού του υπό εξέταση υδροφορέα έχει υφαλμυρωθεί. Στόχος του κεφαλαίου αυτού είναι να βρεθούν τρόποι αντιμετώπισης της υφαλμύρωσης του υπόγειου υδροφορέα, φτιάχνοντας κάποια σενάρια τεχνητού εμπλουτισμού και μείωσης των αντλήσεων των γεωτρήσεων, ώστε να εξευρεθεί ο καλύτερος και πιο λειτουργικός τρόπος αντιμετώπισης του προβλήματος.

Τα σενάρια που έχουν εξεταστεί στο παρόν κεφάλαιο είναι η αύξηση του τεχνητού εμπλουτισμού από 10% μέχρι και 30% του αρχικού μέσου όγκου τεχνητού εμπλουτισμού, καθώς επίσης και η μείωση της μέσης άντλησης των γεωτρήσεων από 10% μέχρι και 30% .

Όλα τα σενάρια σχεδιάστηκαν και εφαρμόστηκαν στο Modflow. Για τη μετατροπή του δυναμικού όπως υπολογίζεται από την ανάλυση Strack σε πιεζομετρικό φορτίο και για την τρισδιάστατη απεικόνιση του υδραυλικού φορτίου h_f , χρησιμοποιήθηκε το προγραμματιστικό περιβάλλον του Matlab.

7.2 Σενάρια Τεχνητού Εμπλουτισμού

Στόχος του τεχνητού εμπλουτισμού, όπως αναφέρθηκε πιο πάνω, είναι η ελάττωση της πτώσης του υδροφόρου ορίζοντα, η προστασία του υπόγειου νερού από τη διείσδυση και ανάμειξη του με θαλασσινό νερό και η αποθήκευση νερού, κυρίως κατά τη χειμερινή περίοδο, που θα ανακτάται μελλοντικά για χρήση. Όμως, όπως έχει λεχθεί πιο πάνω δεν αποφεύχθηκε η διείσδυση του θαλασσινού νερού στο υπόγειο σώμα.

Με τα σενάρια τεχνητού εμπλουτισμού που ακολουθούν, επιχειρείται προσπάθεια ελέγχου του βαθμού στον οποίο μπορεί να βοηθηθεί ο υπό εξέταση υδροφορέας με τον τεχνητό εμπλουτισμό, έτσι ώστε να παρεμποδιστεί η διείσδυση και ανάμειξη του θαλασσινού νερού με τα υπόγεια νερά. Ακολουθούν τα τρία σενάρια που έχουν εξεταστεί και στα οποία ο τεχνητός εμπλουτισμός αυξάνεται από 10% μέχρι και 30%.

Πίνακας 7.1: Αύξηση τεχνητού εμπλουτισμού κατά 10% - 30%

	Όγκος Εμπλουτισμού m³/ετησίως
ΜΕΣΟΣ	2526458.10
Σενάριο 1 (10%)	2779103.91
Σενάριο 2 (20%)	3031749.72
Σενάριο 3 (30%)	3284395.53

Το πρώτο βήμα είναι η μετατροπή των όγκων εμπλουτισμού για κάθε σενάριο, σε ημερήσιους από ετησίους για να μπορούν να χρησιμοποιηθούν στο πρόγραμμα.

Σενάριο 1

$$\text{Εμπλουτισμός } m^3 / \text{day} = 2779103.910 / 365 = 7613.98 \text{ } m^3 / \text{day}$$

$$\text{Κάθε εμπλουτιστική λίμνη} = 7613.98/7 = 1087.71 \text{ } m^3 / \text{day}$$

Σενάριο 2

$$\text{Εμπλουτισμός } m^3 / \text{day} = 3031749.720 / 365 = 8306.16 \text{ } m^3 / \text{day}$$

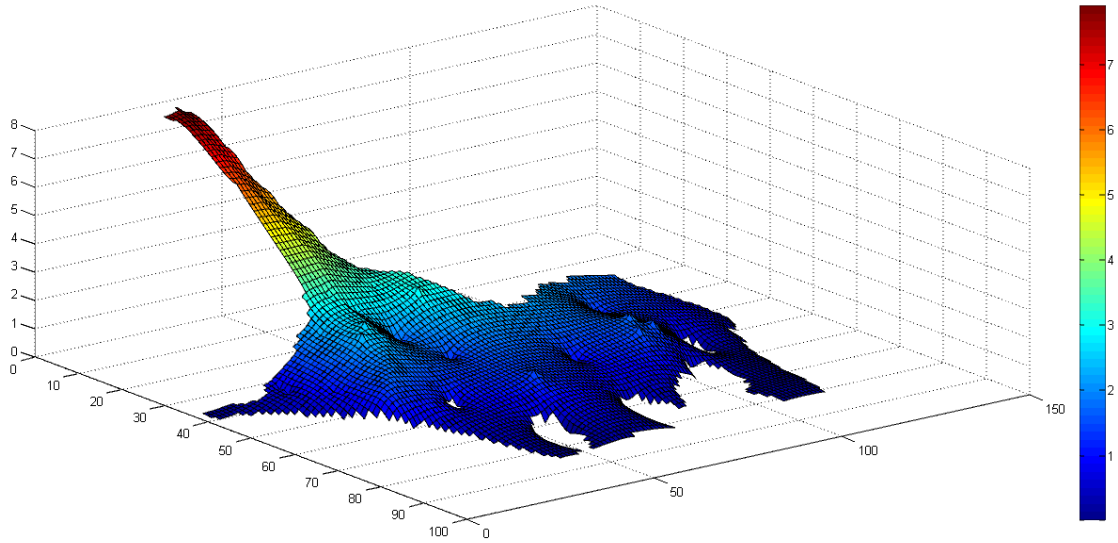
$$\text{Κάθε εμπλουτιστική λίμνη} = 8306.16/7 = 1186.59 \text{ } m^3 / \text{day}$$

Σενάριο 3

$$\text{Εμπλουτισμός } m^3 / \text{day} = 3284395.53 / 365 = 8998.34 \text{ } m^3 / \text{day}$$

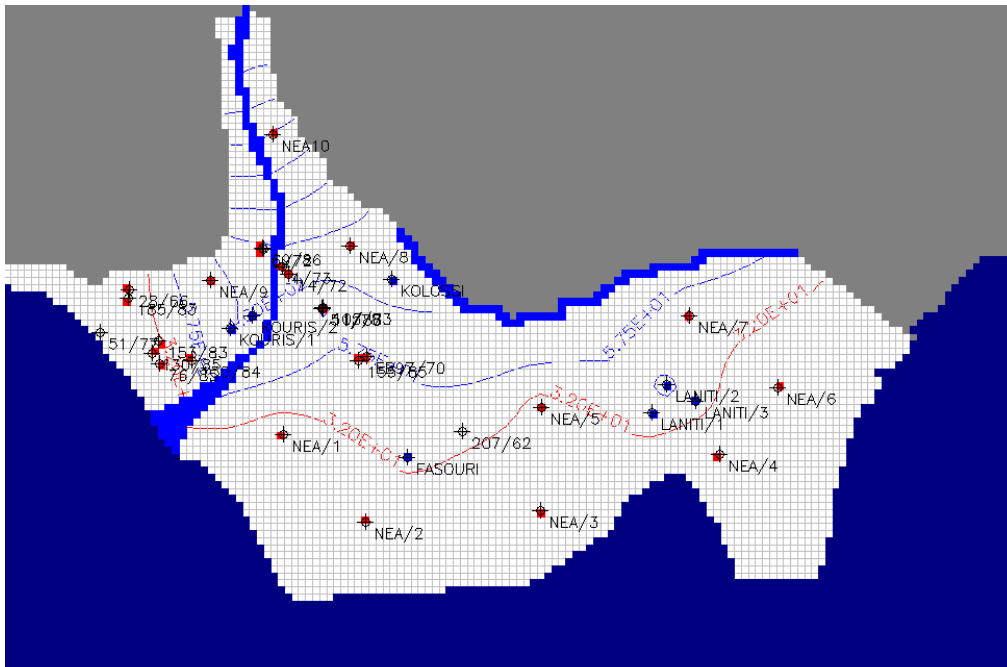
$$\text{Κάθε εμπλουτιστική λίμνη} = 8998.34/7 = 1285.48 \text{ } m^3 / \text{day}$$

Έτσι αφού τοποθετηθούν οι νέες τιμές των νέων εμπλουτιστικών λιμνών και ακολουθηθεί η ίδια διαδικασία όπως στο προηγούμενο κεφάλαιο, προκύπτουν τα παρακάτω αποτελέσματα :

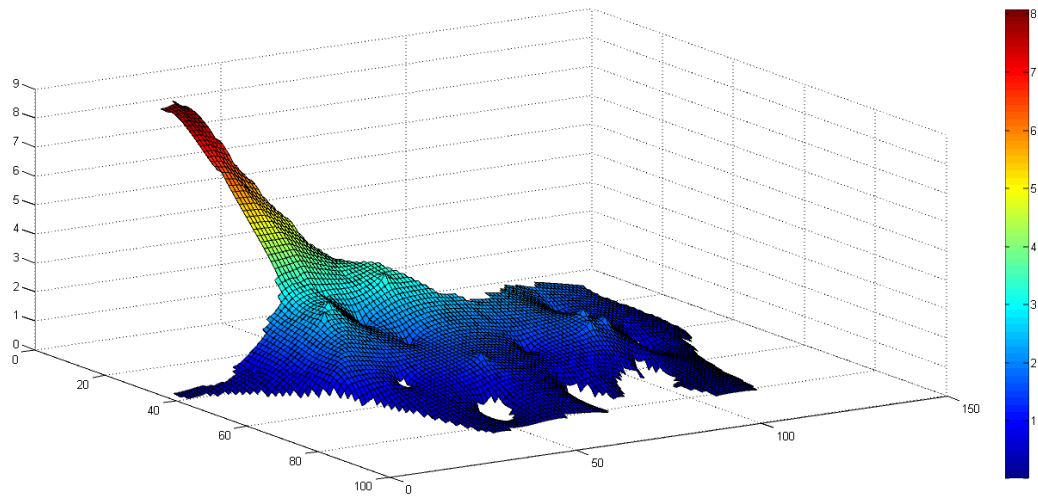


Εικόνα 7.3: Τρισδιάστατη απεικόνιση υδραυλικού φορτίου h_f με 10% αύξηση τεχνητού εμπλουτισμού του υδροφορέα Ακρωτηρίου.

Σενάριο 2



Εικόνα 7.4: Αποτέλεσμα προσομοίωσης – 20% Αύξηση τεχνητού εμπλουτισμού



Εικόνα 7.9: Τρισδιάστατη απεικόνιση υδραυλικού φορτίου h_f με 30% αύξηση τεχνητού εμπλουτισμού του υδροφορέα Ακρωτηρίου.

Από τα πιο σενάρια τεχνητού εμπλουτισμού παρατηρείται ότι με τη σταδιακή αύξηση του, έχουμε μια βελτίωση των τιμών του υδραυλικού φορτίου και συνάμα τη μείωση της έκτασης όπου υπάρχει υφάλμυρο νερό. Η βελτίωση αυτή δεν είναι αρκετή γι' αυτό ελέγχεται το επόμενο σενάριο που είναι η μείωση των αρχικών αντλήσεων.

7.3 Σενάρια μείωσης της αρχικής άντλησης

Ένας άλλος τρόπος προστασίας του υπόγειου υδροφορέα είναι η μείωση της αρχικής άντλησης στο βαθμό που αυτό είναι εφικτό. Οι αντλήσεις συνήθως υπερκαλύπτουν τις ανάγκες μας. Επειδή ο υπό εξέταση υδροφορέας οριοθετείται από τη θάλασσα αλλά και επειδή υπάρχουν καταχρήσεις στις αντλήσεις των γεωτρήσεων, ο υπόγειος υδροφορέας οδηγείται σε πολύ κρίσιμα στάδια. Περισσότερο από το ¼ του υδάτινου σώματος έχει υφαλμυρωθεί και αν δεν προσεχθεί το νερό του υδροφορέα, θα είναι τελείως ακατάλληλο για χρήση.

Με τα παρακάτω σενάρια μείωσης της αρχικής άντλησης, θα ελεγχθεί κατά πόσο μπορεί να παρεμποδιστεί η διείσδυση και ανάμειξη του θαλασσινού νερού με τα υπόγεια νερά. Ακολουθούν τα τρία σενάρια που έχουν εξεταστεί και στα οποία η μείωση των αντλήσεων κυμαίνεται από 10% έως 30%.

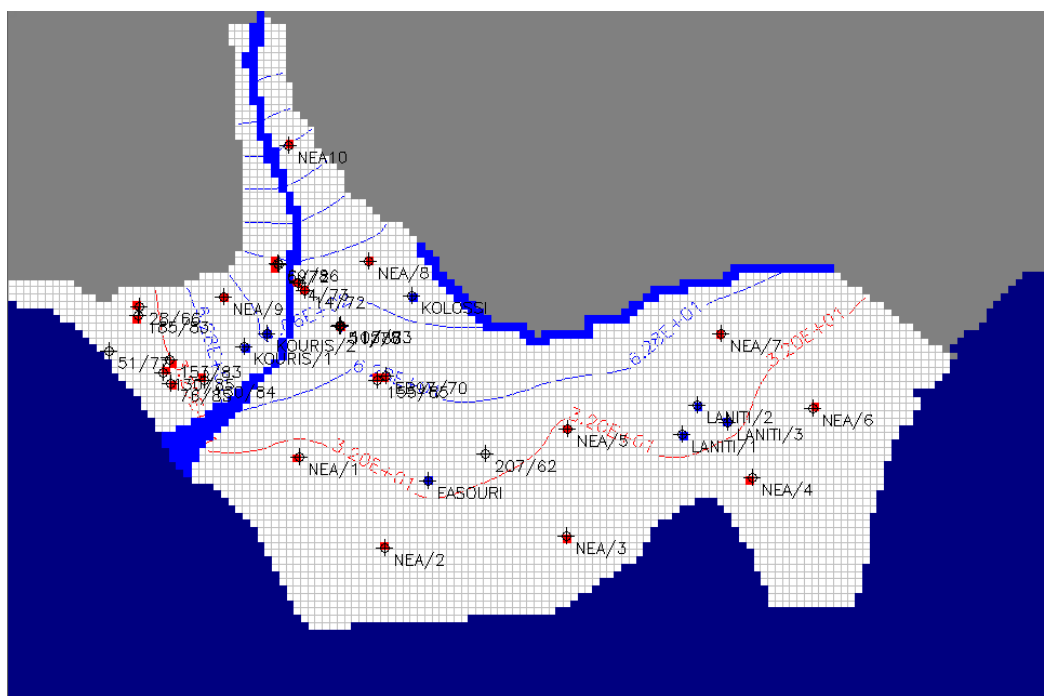
Πίνακας 7.2: Τα τρία σενάρια μείωσης άντλησης

Αρ. Γεώτρ.	κ.μ/μέρα	Σενάριο 1 (10%)	Σενάριο 2 (20%)	Σενάριο 3 (30%)
51/77	0	0	0	0
153/83	69.8	62.82	55.84	48.86
130/84	137.4	123.66	109.92	96.18
130/85	336.67	303	269.34	235.67
76/85	240.87	216.78	192.70	168.61
155/85	552.77	497.49	442.22	386.94
105/73	1239.77	1115.79	991.82	867.84
51/78	800.5	720.45	640.40	560.35
11/88	762.13	685.92	609.70	533.49
5/72	176.83	158.52	141.46	123.29
69/86	321.53	289.37	257.22	225.07
14/72	599.3	539.37	479.44	419.51
4/73	470	423	376	329
28/66	434.37	390.93	347.50	304.06
185/83	504.2	453.78	403.36	352.94
207/62	0	0	0	0
EB97/70	1345.87	1211.28	1076.70	942.11
NEA/1	1874.54	1687.09	1499.63	1312.18
NEA/2	1874.54	1687.09	1499.63	1312.18
NEA/3	1874.54	1687.09	1499.63	1312.18

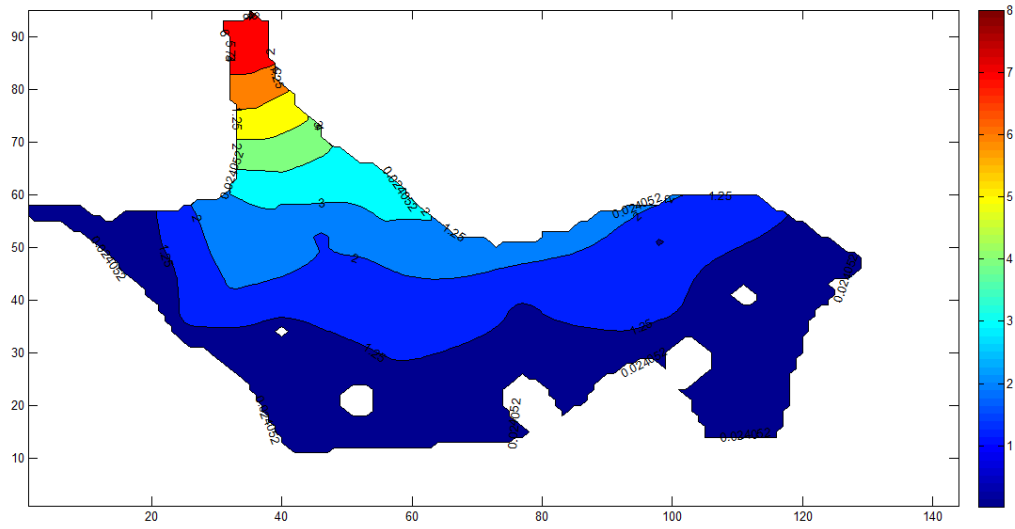
NEA/4	1874.54	1687.09	1499.63	1312.18
NEA/5	1874.54	1687.09	1499.63	1312.18
NEA/6	1874.54	1687.09	1499.63	1312.18
NEA/7	1874.54	1687.09	1499.63	1312.18
NEA/8	333.33	300	266.66	233.33
NEA/9	333.33	300	266.66	233.33
NEA10	333.33	300	266.66	233.33
ΟΛΙΚΟ	22113.79	19901.79	17691.01	15479.17

Σενάριο 1

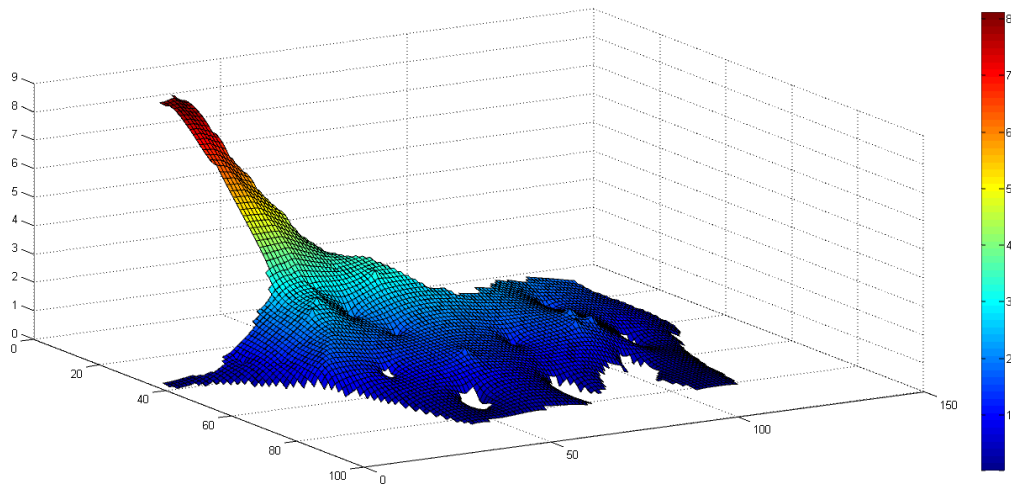
Μείωση κάθε γεώτρησης 10% της άντλησης του



Εικόνα 7.10: Αποτέλεσμα προσομοίωσης –Μείωση της αρχικής άντλησης κατά 10%



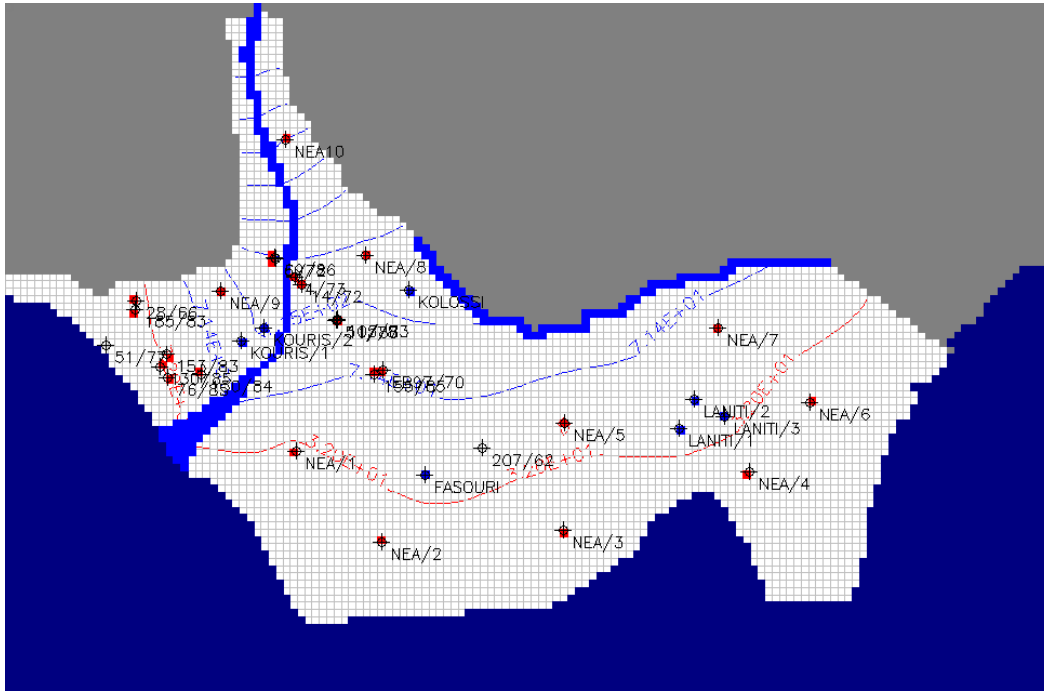
Εικόνα 7.11: Δισδιάστατη απεικόνιση υδραυλικού φορτίου h_f με 10% μείωση της αρχικής άντλησης του υδροφορέα Ακρωτηρίου.



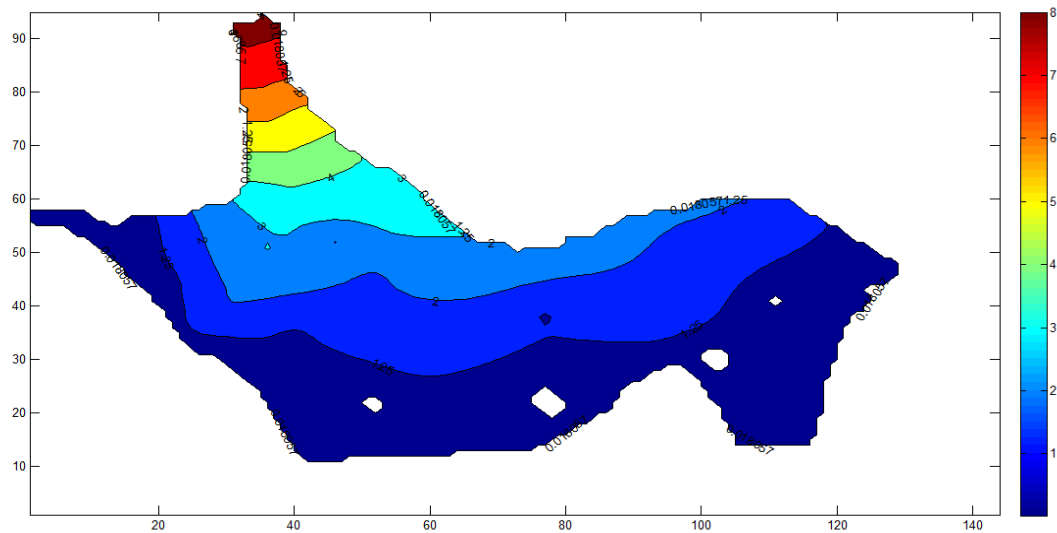
Εικόνα 7.12: Τρισδιάστατη απεικόνιση υδραυλικού φορτίου h_f με 10% μείωση της αρχικής άντλησης του υδροφορέα Ακρωτηρίου.

Σενάριο 2

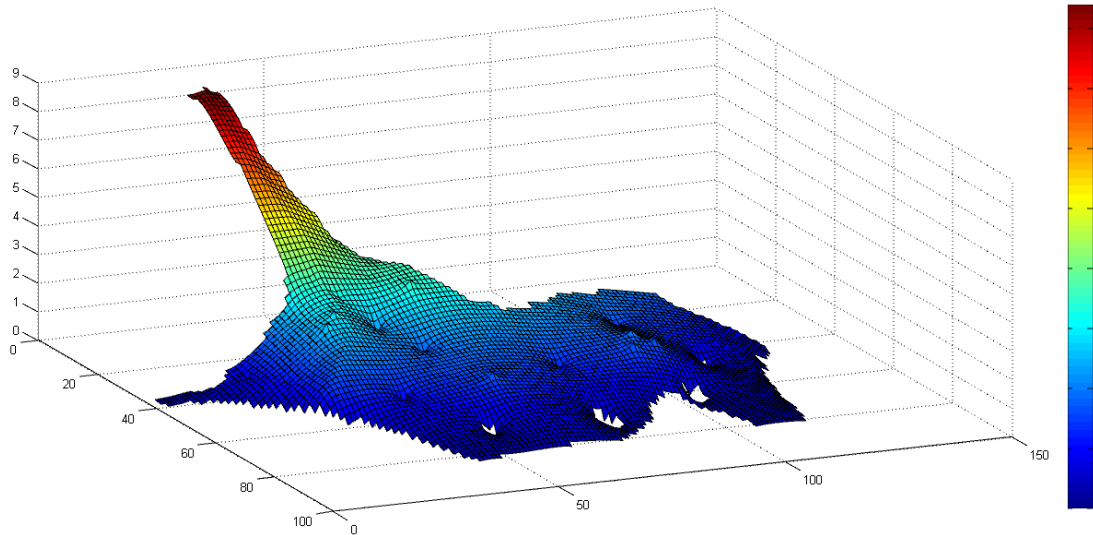
Μείωση κάθε γεώτρησης 20% της άντλησης του



Εικόνα 7.13: Αποτέλεσμα προσομοίωσης – Μείωση της αρχικής άντλησης κατά 20%



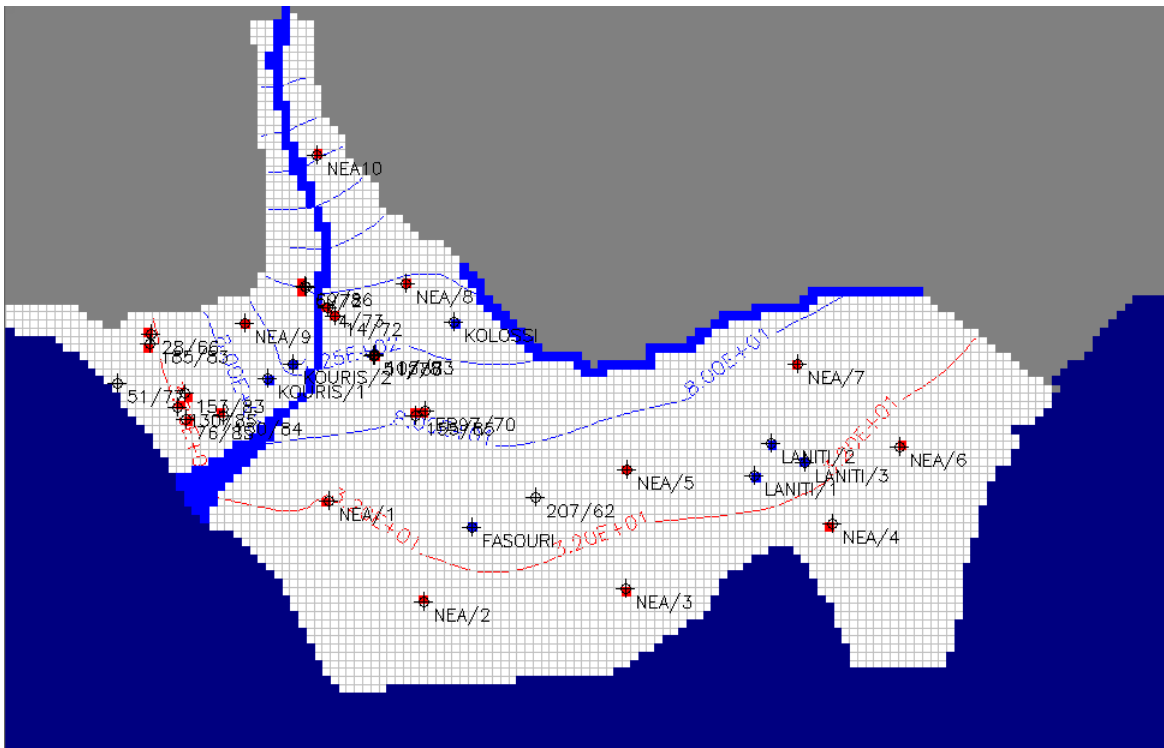
Εικόνα 7.14: Δισδιάστατη απεικόνιση υδραυλικού φορτίου h_f με 20% μείωση της αρχικής άντλησης του υδροφορέα Ακρωτηρίου.



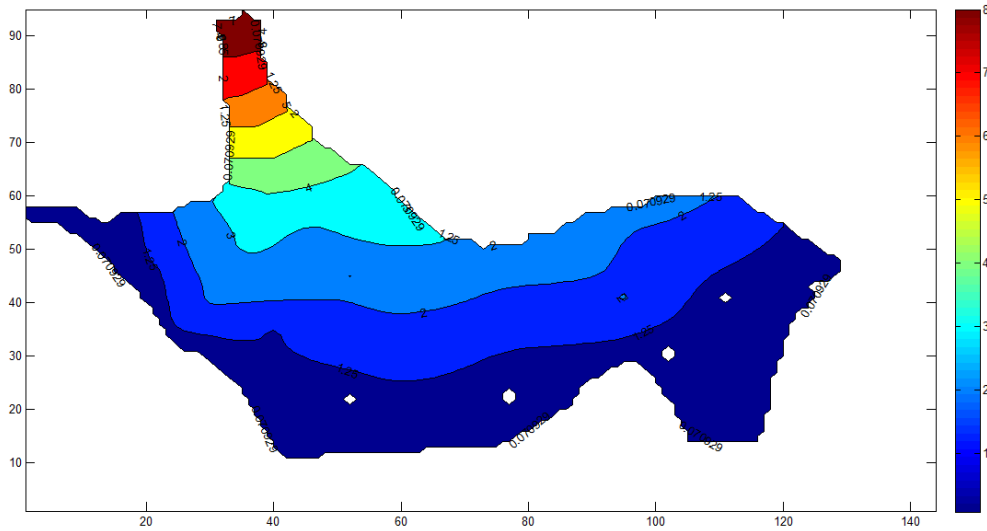
Εικόνα 7.15: Τρισδιάστατη απεικόνιση υδραυλικού φορτίου h_f με 20% μείωση της αρχικής άντλησης του υδροφορέα Ακρωτηρίου.

Σενάριο 3

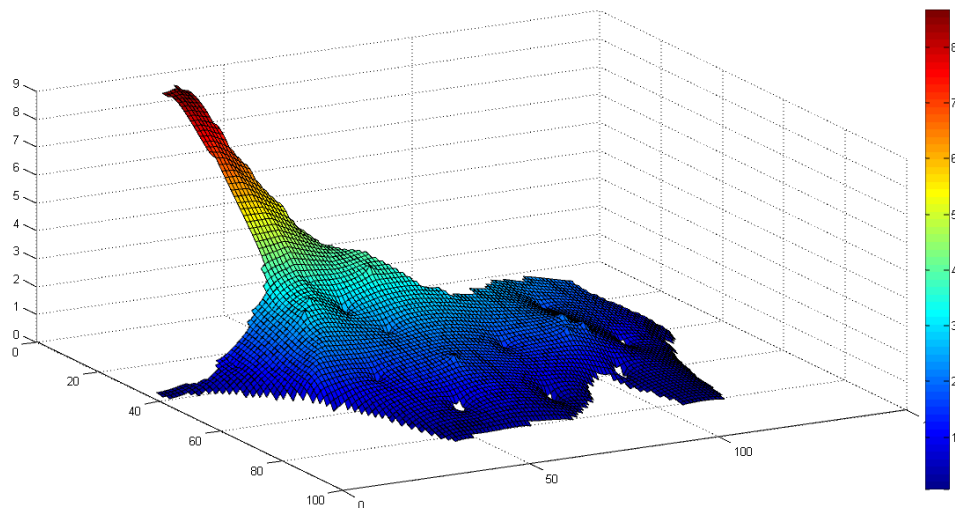
Μείωση κάθε γεώτρησης 30% της άντλησης του



Εικόνα 7.16: Αποτέλεσμα προσομοίωσης – Μείωση της αρχικής άντλησης κατά 30%

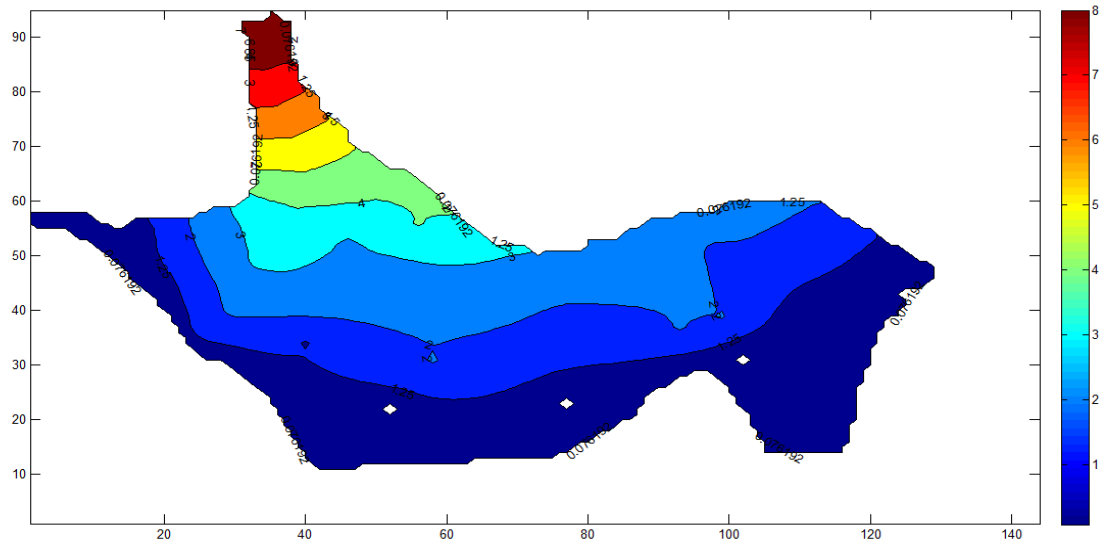


Εικόνα 7.17: Δισδιάστατη απεικόνιση υδραυλικού φορτίου h_f με 30% μείωση της αρχικής άντλησης του υδροφορέα Ακρωτηρίου.

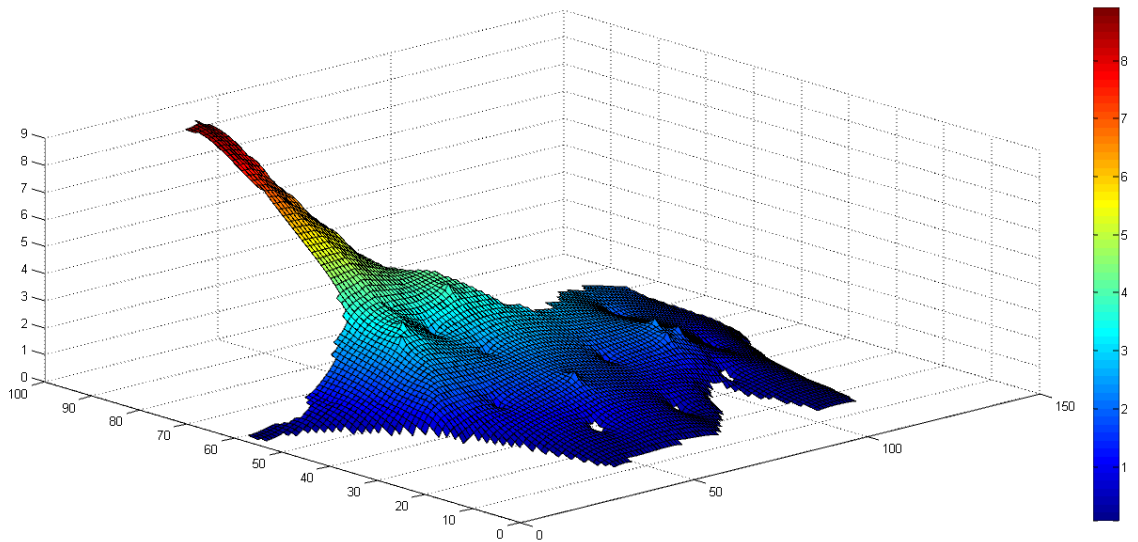


Εικόνα 7.18: Τρισδιάστατη απεικόνιση υδραυλικού φορτίου h_f με 30% μείωση της αρχικής άντλησης του υδροφορέα Ακρωτηρίου.

Από τα πιο πάνω σενάρια μείωσης της αρχικής άντλησης συμπεραίνεται ότι προκύπτουν βελτιωμένα αποτελέσματα υδραυλικού φορτίου σε σημαντικό βαθμό. Τα αποτελέσματα είναι καλύτερα από τα σενάρια τεχνητού εμπλουτισμού και παρόλο που το πρόβλημα αντιμετωπίζεται σε κάποιο βαθμό, εντούτοις δεν εξαλείφεται. Για αυτό το λόγο θα εξεταστεί ένα ακόμη σενάριο το οποίο θα συνδυάζει τα πιο πάνω σενάρια άντλησης και τεχνητού εμπλουτισμού.



Εικόνα 7.20: Δισδιάστατη απεικόνιση υδραυλικού φορτίου h_f με 30% μείωση της αρχικής άντλησης και 30% αύξηση τεχνητού εμπλουτισμού του υδροφορέα Ακρωτηρίου.



Εικόνα 7.21: Τρισδιάστατη απεικόνιση υδραυλικού φορτίου h_f με 30% μείωση της αρχικής άντλησης και 30% αύξηση τεχνητού εμπλουτισμού του υδροφορέα Ακρωτηρίου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ - ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

8.ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ -ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

8.1 Συμπεράσματα από την εκτίμηση του υδατικού ισοζυγίου

Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε η εμπειρική μέθοδος των Thornthwaite-Mather για τον προσδιορισμό του υδατικού ισοζυγίου στην περιοχή του παράκτιου υδροφορέα Ακρωτηρίου. Η μέθοδος αυτή επιλέχθηκε λόγω των δεδομένων που ήταν διαθέσιμα, π.χ. μηνιαίες τιμές ύψους βροχής (mm), μηνιαίες τιμές θερμοκρασίας (°C), δυνητικής εξατμισοδιαπνοής (σε mm). Τα δεδομένα βροχόπτωσης και θερμοκρασίας στάλθηκαν από τη Μετεωρολογική Υπηρεσία Κύπρου για την περίοδο 1973-2011 και αφού ολοκληρώθηκε η επεξεργασία τους, η κατείδυση που προκύπτει είναι 38,2946 mm ανά έτος. Επίσης, για την έκταση που καλύπτει ο υπό εξέταση υδροφορέας η οποία ανέρχεται στα 50500000m², συμπεραίνεται ότι η ποσότητα ύδατος που κατέρχεται στον υδροφορέα είναι 1,93*10⁶ m³ / έτος.

Έπειτα εκτιμάται η κατείδυση με την εφαρμογή της χρήσης των εμπειρικών συντελεστών οι οποίοι έχουν ως αποτέλεσμα μικρότερες τιμές. Έτσι γίνονται αποδεκτά τα αποτελέσματα της μεθόδου Thornthwaite-Mather, η οποία είναι βαθμονομημένη με μεγαλύτερη ακρίβεια και υπολογίζει τις περισσότερες παραμέτρους.

Για τον υπολογισμό του υδατικού ισοζυγίου ήταν διαθέσιμα τα δεδομένα του τεχνητού εμπλουτισμού και εισροών από τον ποταμό του φράγματος Κούρη, τα οποία λήφθηκαν από τη μελέτη των Νικολαΐδη et al (2010) και τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα μελέτη. Ο τεχνητός εμπλουτισμός όπως έχει αναφερθεί είναι ίσος με 2,5*10⁶ m³ /έτος ενώ οι εισροές 4,25*10⁶ m³/έτος. Οι αντλήσεις του υπό εξέταση υδροφορέα στάλθηκαν από το Τμήμα Αναπτύξεως Υδάτων και έχουν τιμή 8,03*10⁶ m³ /έτος. Οι φυσικές απώλειες θεωρήθηκαν 3,2*10⁶ m³/έτος και στηρίχθηκαν σε άρθρα του Τμήματος Αναπτύξεως Υδάτων, αφού ο υπολογισμός του είναι αρκετά δύσκολος από το πρόγραμμα Modflow. Με τις φυσικές απώλειες νοούνται οι υπόγειες μεταγίσεις σε γειτονικούς υδροφορείς που βρίσκονται σε υδραυλική επικοινωνία μεταξύ τους και οι υπόγειες εκροές προς τη θάλασσα .Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται η εκτίμηση του υδατικού ισοζυγίου.

Πίνακας 8.1: Εκτίμηση Υδατικού ισοζυγίου

ΕΙΣΡΟΕΣ	m ³ /ετησίως *10 ⁶	ΕΚΡΟΕΣ	m ³ /ετησίως *10 ⁶
Φυσικός εμπλουτισμός	1,93	Αντλήσεις	8,03
Τεχνητός εμπλουτισμός	2,50		
Εισροές (ποταμού)	4,25	Φυσικές απώλειες	3,20
Εισροές ορίων-Υπόγεια πλευρική τροφοδοσία	2.51		
Σύνολο:	11,192	Σύνολο:	11,23

$$\Delta S = I - O = 8.68 - 11.23 = -0,038 * 10^6 \text{ m}^3 / \text{ετησίως}$$

Από τον πιο πάνω πίνακα είναι εμφανές ότι ακόμη υπάρχει έλλειμμα νερού και ότι με τα σημερινά δεδομένα στον υδροφορέα, θα συνεχίσει η διείσδυση και ανάμειξη του θαλασσινού νερού με τα υπόγεια νερά . Ακόμη είναι φανερή η συνεισφορά του τεχνητού εμπλουτισμού στην τροφοδοσία του υδροφορέα αλλά και οι υπεραντλήσεις από τις γεωτρήσεις τις περιοχής μας.

8.2 Συμπεράσματα από την προσομοίωση του παράκτιου υδροφορέα Ακρωτηρίου και των σεναρίων άντλησης και τεχνητού εμπλουτισμού.

Στο κεφάλαιο 6, έγινε αναφορά και αναλύθηκε η μεθοδολογία για τη σύνταξη ενός απλού μοντέλου του παράκτιου υδροφορέα Ακρωτηρίου. Η προσομοίωση του βασίστηκε στο πρόγραμμα Modflow, στο οποίο εισήχθησαν τα διαθέσιμα δεδομένα με τον καλύτερο τρόπο για την περιοχή μελέτης. Φτιάχνοντας το μοντέλο με αρκετή ακρίβεια, μπορεί να περιγράψει τις διαδικασίες της υπόγειας ροής ενός υδροφορέα και έτσι να χρησιμοποιηθεί ως εργαλείο για την πρόγνωση μελλοντικών καταστάσεων. Αυτό θα βοηθήσει στη διασφάλιση ποιοτικών και ποσοτικών χαρακτηριστικών του υδάτινου

σώματος. Η βροχόπτωση άμεσα στην περιοχή μελέτης, έχει περιορισμένη συνεισφορά στην τροφοδοσία του υδροφορέα σε σύγκριση με άλλες πηγές. Η ανομβρία και λειψυδρία που παρατηρήθηκε τα τελευταία χρόνια στην Κύπρο και η έλλειψη υδατικών πόρων οδήγησε στην υπεράντληση του υδροφορέα και επηρεάζεται από το θαλάσσιο νερό το οποίο διεισδύει σε αυτόν. Σημαντικό ρόλο για τον εμπλουτισμό του υδροφορέα αποτελεί ο τεχνητός εμπλουτισμός στην κοίτη του ποταμού Κούρη και στις δεξαμενές Κολοσσίου, Φασουρίου και Λανίτη. Οι υπεραντλήσεις έχουν οδηγήσει στην πτώση του υδροφορέα και προκάλεσαν τη διείσδυση της θάλασσας. Σοβαρό πρόβλημα παρατηρήθηκε στην περιοχή του Δέλτα λόγω της μείωσης του φυσικού εμπλουτισμού από τον Κούρη. Αρκετές είναι οι γεωτρήσεις που είναι τοποθετημένες στην περιοχή και παρουσιάζονται αντλήσεις $2,9 \cdot 10^6 \text{ m}^3 / \text{έτος}$.

Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης παρουσιάζονται σημαντικές ενδείξεις υφαλμύρωσης στο νότιο τμήμα του υδροφορέα. Για αυτό έγιναν κάποια σενάρια μείωσης των αντλήσεων και αύξησης του τεχνητού εμπλουτισμού, ώστε να βρεθεί ο καλύτερος τρόπος αντιμετώπισης του προβλήματος υφαλμύρωσης του υδροφορέα. Φυσικά τα σενάρια αυτά για να υλοποιηθούν όπως έχουν υπολογιστεί, απαιτούν την πάροδο αρκετών χρόνων λόγω των προβλημάτων υφαλμύρισης που παρουσιάζει ο υδροφορέας.

Με τα σενάρια αύξησης τεχνητού εμπλουτισμού και μείωσης των αντλήσεων, παρατηρείται ότι τα αποτελέσματα που προκύπτουν είναι καλά αλλά όχι ικανοποιητικά γιατί το πρόβλημα της υφαλμύρισης δεν εξαλείφτηκε. Μειώνοντας τις αντλήσεις περισσότερο από 30%, δε θα καλύπτονται οι ανάγκες για ύδρευση και άρδευση, ενώ αυξάνοντας τον τεχνητό εμπλουτισμό περισσότερο από 30%, αυτό συνεπάγεται μεγάλο κόστος. Ο συνδυασμός αυτών των δύο σεναρίων οδηγεί στη βέλτιστη και οικονομικότερη λύση για την αντιμετώπιση υφαλμύρισης του υδροφορέα. Φτιάχνοντας το μοντέλο με το συνδυασμό των δύο πιο πάνω σεναρίων, προκύπτουν ακόμη καλύτερες τιμές του υδραυλικού φορτίου, γεγονός που οδηγεί στη μικρότερη έκταση υφαλμύρισης του υδροφορέα .

8.3 Μέτρα Προστασίας και Ανάκαμψης Υδροφορέα

Το νερό αποτελεί ένα από τους βασικότερους παράγοντες, για την περαιτέρω ανάπτυξη και σταθεροποίηση στα υφιστάμενα επίπεδα της οικονομίας και της αρδευόμενης γεωργίας. Οι ημιξηρικές συνθήκες και η αυξανόμενη έλλειψη υδατικών πόρων στην Κύπρο λόγω κλιματολογικών αλλαγών, έχουν επιδεινώσει το πρόβλημα ακόμη περισσότερο. Για αυτό το λόγο η ορθολογική χρήση των υφιστάμενων υδατικών πόρων και η επινόηση νέων μεθόδων ανακύκλωσής του είναι μεγάλης σημασίας και χρήζουν άμεσης προσοχής, προτεραιότητας και δράσης. Οι υπόγειοι υδατικοί πόροι είναι μικρής υδατικής δυναμικότητας, περιορισμένης έκτασης και αποθηκευτικής ικανότητας, τρωτοί σε εξωτερική ρύπανση, στενά εξαρτώμενοι από ακραίες μεταβολές του υδρολογικού καθεστώτος αλλά και απαραίτητοι για την συντήρηση της ζωής και της ανάπτυξης του περιβάλλοντος. Για αυτό απαιτείται να ληφθούν τα εξής προτεινόμενα μέτρα:

- Λήψη μέτρων προστασίας και πρόληψης της υπαλμύρωσης των παράκτιων υδροφορέων με τη σωστή διαχείριση του συνόλου των υδατικών πόρων.
- Μείωση των αντλήσεων υπόγειου νερού με αντίστοιχη εξοικονόμηση νερού για άρδευση.
- Αύξηση του Τεχνητού εμπλουτισμού του υδροφορέα
- Ενημέρωση του κοινού, με αποτέλεσμα την ουσιαστική ευαισθητοποίηση στη χρήση των φυσικών πόρων αλλά και την επαρκή αντίληψη της κρισιμότητας του προβλήματος της υπαλμύρωσης.
- Σε περιόδους ξηρασίας οι αντλήσεις πρέπει να ελαττώνονται για την προστασία του υδροφορέα γιατί αλλιώς αντλούνται έως τα όρια τους, αυξάνοντας έτσι το βάθος άντλησης και προκαλώντας αργή αποκατάσταση του κανονικού υδραυλικού καθεστώτος.
- Επιβολή ελέγχου λειτουργίας δημοτικών και ιδιωτικών γεωτρήσεων.
- Απαραίτητη θεωρείται η κατασκευή υδραυλικών φραγμών γλυκού νερού κοντά στην ακτή, ούτως ώστε να επιτευχθεί η στάθμη του υπόγειου νερού να είναι κάτω από αυτήν του επιπέδου της θάλασσας, χωρίς να προκληθεί περαιτέρω διείσδυση του αλμυρού νερού από τις πλευρές της θάλασσας.

- Συστήνεται όπως ανορυχθούν (ή να χρησιμοποιηθούν υφιστάμενες) γεωτρήσεις παρακολούθησης, διεσπαρμένες σε διάφορες περιοχές του υδροφορέα, μερικές από τις οποίες (τουλάχιστον τέσσερις) να βρίσκονται περιμετρικά σε κοντινή απόσταση (γύρω στα 400 m) από τις γεωτρήσεις ύδρευσης των Βρετανικών Βάσεων.
- Η εγκατάσταση των πηγαδιών άντλησης προς το εσωτερικό της παράκτιας ζώνης είναι καλύτερη από την εγκατάσταση κοντά στις ακτές, αφού το πάχος του φακού του γλυκού νερού αυξάνεται και επιτρέπει έτσι στα πηγάδια να αντλήσουν από μεγαλύτερο βάθος. Επίσης, μια πιο κατανομημένη διάταξη των φρεάτων άντλησης επηρεάζει σημαντικά τη συμπεριφορά του υδροφορέα.
- Αύξηση του τεχνητού εμπλουτισμού του υδροφορέα, με τη λειτουργία της νέας μονάδας αφαλάτωσης της Επισκοπής,
- Η οικολογική παροχή του ποταμού Κούρρη μπορεί να συνδυαστεί με έργα εμπλουτισμού στην ανάντη κοίτη του ποταμού, με σκοπό την ενίσχυση του εμπλουτισμού σε μεγαλύτερα επίπεδα στάθμης.

Με την εφαρμογή των παραπάνω προτάσεων επιτυγχάνεται η προστασία των υδατικών πόρων, η άνοδος της στάθμης του υδροφορέα Ακρωτηρίου και συνάμα η σταδιακή αποκατάσταση της υφαλμύρισης. Έτσι, εξασφαλίζεται η αειφόρος διαχείριση των υπόγειων υδατικών πόρων.

Διεθνής Βιβλιογραφία

Bear J. *et al* (1999) 'Seawater Intrusion in Coastal Aquifers –Concepts, Methods and Practices', Kluwer Academic Publishers, pp.163-191.

Bear J., (1979), 'Hydraulics of Groundwater', Ed. 2007, Dover Publications Inc., Mineola, New York.

Chiang W. and Kinzelbach W., (2001), '3D- Groundwater Modeling with PMWIN, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, New York.

Donker, N. H. W (1987) Wtrbln: A computer program to calculate water balance, "Computers & Geosciences, 13 (2), pp. 95-122.

Koussis A. D *et al* (2010) 'Cost-efficient management of coastal aquifers via recharge with treated wastewater and desalination of brackish groundwater: application to the Akrotiri basin and aquifer, Cyprus', Hydrological Sciences Journal, 55 (7), pp. 1234-1245.

Mantoglou A. and Giannoulou P. (2004) 'Sustainable Yield of Coastal Aquifers Using Simulation and Optimization: Application to Santorini Island', International Conference "Protection and Restoration of the environment VII", Mykonos, Greece.

Mantoglou A., (2003) 'Pumping Management of coastal Aquifers using Analytical Models of Saltwater Intrusion', Water Resources Research 39 [12].

Mantoglou A., Papantoniou M. & Giannouloupoulos P., (2004). 'Management of coastal Aquifers based on nonlinear optimization and evolutionary algorithms', *Journal of Hydrology*, pp.209-228.

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

Pelton W. L et al (1960) 'Potential evapotranspiration estimates by the approximate energy balance method of Penman', *Journal of Geophysical Research*, Vol. 65 (10), pp. 3391-3413.

Perlman, H., X. Μακρόπουλος, και Δ. Κουτσογιάννης, (2005). Ο υδρολογικός κύκλος, United States Geological Survey.

Strack O.D.L(1976) ' A single potential solution for regional interface problems in coastal Aquifers', *water Resour. Res*, 12, pp.1165-1174.

Van Wijk, W.R., and D.A. De Vries (1954) 'Evapotranspiration' *Journal of Agriculture Science*, Vol. 2 pp. 105-119, Netherlands.

Wurbs, Ralph A. (1995) 'Water Management Models', Prentice Hall.

Ελληνική Βιβλιογραφία

Αργυρόπουλος Δ. (2005) 'Οδηγία Πλαίσιο για τα νερά', Λευκωσία, Κύπρος.

Γιαννουλόπουλος Π., (2000) '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.

Δημητρίου Χ. (2008) 'Υπεράντληση Υπόγειων Νερών στην Κύπρο', Τμήμα Αναπτύξεως Υδάτων, Υπουργείο Γεωργίας, Φυσικών Πόρων και Περιβάλλοντος, Λευκωσία.

Εκπαιδευτικό Εργαλείο Κυπριακής Γεωλογικής Κληρονομιάς (2004), Μονάδα Περιβαλλοντικών Μελετών, Κέντρο Ερευνών και Ανάπτυξης, Κύπρος.

Κουτσογιάννης Δ. & Ξανθόπουλος Θ. (1999) 'Τεχνική Υδρολογία', Ε.Μ.Π, Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών, Τομέας Υδατικών Πόρων, Αθήνα.

Κουτσογιάννης Δ. (2000) 'Υδρομετεωρολογία - Εξάτμιση και διαπνοή', Τομέας Υδατικών Πόρων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα.

Κύρου Κ. (2007) 'Ιστορική Αναδρομή της Ανάπτυξης των Υδατικών πόρων της Κύπρου', Λευκωσία.

Λατινόπουλος Π.Δ., “Υδραυλική των Υπόγειων Ροών”, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Θεσσαλονίκη 1986.

Μαντόγλου Α. (2004) ‘Υπόγεια Νερά και η Διαχείριση τους’, Αθήνα.

Μαντόγλου Α. , Κουράκος Γ., (2005) ‘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.

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

Νικολαΐδης και Συνεργάτες-TAY (2010), ‘Αναθεώρηση της μελέτης των επιπτώσεων στο περιβάλλον από τον εμπλουτισμό του υδροφορέα Ακρωτηρίου με ανακυκλωμένο νερό του αποχετευτικού συστήματος Λεμεσού –Αμαθούντος, Κύπρος.

Σούλιος Γ., Γενική Υδρογεωλογία τόμος Γ’ Αποθέματα και διαχείριση του υπόγειου Νερού (2004).

Τμήμα Αναπτύξεως Υδάτων –Υπηρεσία Υδρολογίας (1997) ‘Πρώτες υδρολογικές/Υδρογεωλογικές και Περιβαλλοντικές Εκτιμήσεις για το έργο Επαναχρησιμοποίησης των Επεξεργασμένων Λυμάτων Αποχετευτικού Συστήματος Λεμεσού Αμαθούντας, Λευκωσία.

Τμήμα Γεωλογικής Επισκόπησης (2000) ‘Γεωλογία’, δελτίο 10, Κύπρος.

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

Χρίστου Α. (2010) 'Οι θετικές επιδράσεις στην ποιότητα του θαλάσσιου/υπόγειου νερού
από τη λειτουργία του δικτύου αποχέτευσης λυμάτων Λεμεσού', Σάλα, Λεμεσός.

I.A.C.O Environmental and Water Consultants Ltd (2008) , 'Εθνικό Σχέδιο Δράσης για
την Καταπολέμηση της Απερήμωσης', Υπουργείο Γεωργίας, Φυσικών Πόρων και
Περιβάλλοντος, Λευκωσία